TMMOB
İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI

ULUSAL BETON KONGRESİ

16-18 NİSAN 2015 ANTALYA

SÜRDÜRÜLEBİLİR BETON

*İNŞ. MÜH. **HALUK İŞÖZEN** ANISINA*

DÜZENLEYEN

TMMOB
İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI
ANTALYA ŞUBESİ

TMMOB
İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI
İSTANBUL ŞUBESİ

TMMOB
İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI
ANTALYA ŞUBESİ

Meltem Mahallesi 3808 Sok. No: 10
07030 Muratpaşa - ANTALYA

Tel : (0242) 237 57 27-3 hat
Faks : (0242) 237 57 31
E-posta : antalya@imo.org.tr
Web : http://antalya.imo.org.tr

TMMOB
İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI
İSTANBUL ŞUBESİ

Mumhane Cad. No: 21
Karaköy - Beyoğlu - İSTANBUL

Tel : (0212) 293 20 00
Faks : (0212) 232 09 12
E-posta : istanbul@imo.org.tr
Web : http://istanbul.imo.org.tr

Oda Yayın No: E/15/01
ISBN: 978-605-01-0697-8

Baskı ve Hazırlık
Retma Matbaa
T: 0242 322 21 11 • F: 0242 322 21 12
www.retma.com.tr

İNŞ. MÜH. ***HALUK İŞÖZEN*** *ANISINA*



ÖZGEÇMİŞ

27 Mayıs 1956'da İstanbul 'da doğdu. 1977 yılında İDMMA GALATASARAY Mühendislik Yüksek Okulu'ndan mezun oldu. Mezuniyetinden sonra çeşitli firmalarda mühendis ve yönetici olarak çalıştı.

Odamızın 1. ve 2. Ulusal Beton Kongrelerinde, Kuzey Kıbrıs 1. Beton Kongresi'nde, 1. Ulusal Alçı Kongresi'nde Bilim, Danışma ve Düzenleme Kurulu üyeliği görevlerinde bulundu.

İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi'nin 30. Dönem yönetim kurulu üyeliği, 31. Dönem Yönetim Kurulu Sekreter Üyeliği görevlerinde bulunan İŞÖZEN, 2002-2004 yıllarında (38. Dönemde) Oda yönetim kurulu üyeliği, 39. 40. ve 41. dönemlerde Oda Danışma Kurulu üyeliği görevlerinde bulundu.

Ölçü ve Türkiye Mühendislik Haberleri Yayın Kurulu Üyeliği yapan İŞÖZEN, Ölçü Gazetesi'nin çıkarılmasına önemli ölçüde katkı sağladı. Oda Merkezimizin ve Şubemizin çeşitli çalışma grubu ve kurullarında, yapı malzemeleri sektörüyle ilgili "BİRLİK" lerin çalışma komitelerinde Odamız adına görev alarak önemli katkılar sağlayan İŞÖZEN, yapı kimyasalları, yalıtım sistemleri firmasında üst düzeyde yöneticilik görevinde bulundu. İŞÖZEN evli ve bir kız çocuğu babasıdır.

İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI YÖNETİM KURULU

Nevzat ERSAN (Başkan)
Şükrü ERDEM (II. Başkan)
Bülent TATLI (Sekreter Üye)
Cihat MAZMANOĞLU (Sayman Üye)
Tansel ÖNAL (Üye)
Necati ATICI (Üye)
Ayşegül BİLDİRİCİ SUNA (Üye)

İMO İSTANBUL ŞUBESİ YÖNETİM KURULU

Cemal GÖKÇE (Başkan)
Murat Serdar KIRÇIL (Sekreter Üye)
Nusret SUNA (Sayman Üye)
İsmail UZUNOĞLU (Üye)
Cüneyt ESKİMUMCU (Üye)
Sadık DUMAN (Üye)
Baykal HANCIOĞLU (Üye)

İMO ANTALYA ŞUBESİ YÖNETİM KURULU

Cem OĞUZ (Başkan)
Haluk SELÇUK (Sekreter Üye)
Mustafa BALCI (Sayman Üye)
Rıza ARSLANBAY (Üye)
Umut TURAN (Üye)
M. Murat AYHAN (Üye)
Ahmet EVCİ (Üye)

DÜZENLEME KURULU

Prof. Dr. Fikret TÜRKER (Başkan)
Prof. Dr. Hulusi ÖZKUL
Prof. Dr. Turan ÖZTURAN
Prof. Dr. Fevziye AKÖZ
Doç. Dr. Özkan ŞENGÜL
Doç. Dr. N.Uğur KOÇKAL
Cihat MAZMANOĞLU
Haluk SELÇUK
Nusret SUNA
Mustafa BALCI
Umut TURAN
Rezan BULUT
İsmail Selçuk YILMAZ

BİLİM KURULU

Prof. Dr. Süheyl AKMAN (Onursal Başkan)
Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR (Başkan)
Prof. Dr. Yılmaz AKKAYA
Prof. Dr. Fevziye AKÖZ
Prof. Dr. Saim AKYÜZ
Prof. Dr. Bülent BARADAN
Prof. Dr. Turhan ERDOĞAN
Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU
Prof. Dr. Abdurrahman GÜNER
Prof. Dr. Fahriye KILINÇKALE
Prof. Dr. Hulusi ÖZKUL
Prof. Dr. Erbil ÖZTEKİN
Prof. Dr. Turan ÖZTURAN
Prof. Dr. Kambiz RAMYAR
Prof. Dr. Canan TAŞDEMİR
Prof. Dr. Mustafa TOKYAY
Prof. Dr. Selçuk TÜRKEL
Prof. Dr. Fikret TÜRKER
Prof. Dr. İ. Özgür YAMAN
Prof. Dr. Halit YAZICI
Prof. Asım YEĞİNOBALI
Prof. Dr. Nabi YÜZER
Doç. Dr. Hakan Nuri ATAHAN
Doç. Dr. A.Ferhat BİNGÖL
Doç. Dr. Sinan ERDOĞAN
Doç. Dr. Mehmet GESOĞLU
Doç. Dr. Erhan GÜNEYİSİ
Doç. Dr. Mustafa KARAGÜLER
Doç. Dr. N.Uğur KOÇKAL
Doç. Dr. Nilüfer ÖZYURT
Doç. Dr. Özkan ŞENGÜL
Doç. Dr. Hasan YILDIRIM

DANIŞMA KURULU

Nevzat ERSAN (İMO)
Taner YÜZGEÇ (İMO)
Cemal GÖKÇE (İMO)
Dr. Cem OĞUZ (İMO)
Menderes TÜREL (Antalya Büyükşehir Belediye Başkanı)
İsmail KARTAL (TCK 1. Bölge Müdürü)
Şenol ALTIOK (TCK 13. Bölge Müdürü)
Turkay ÖZGÜR (DSİ 13. Bölge Müdürü)
Sedat ÖZPINAR (DSİ 14. Bölge Müdürü)
Yaşar GÜVENÇ (İstanbul Çevre ve Şehircilik İl Müdürü)
Bedrettin TAŞKESEN (Antalya Çevre ve Şehircilik İl Müdürü)
Levent ÖZDEMİR (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Yapı Malzemeleri Daire Bşk.)
Demir İNÖZÜ (TMMMB-Türk Müşavir Mühendis ve Mimarlar Birliği Yön. Kur. Başkanı)
Mithat YENİGÜN (TMB-Türkiye Müteahhitler Birliği Yönetim Kurulu Başkanı)
M. Şefik TÜZÜN (TÇMB-Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Yönetim Kurulu Başkanı)
Yavuz IŞIK (THBB-Türkiye Hazır Beton Birliği Yönetim Kurulu Başkanı)
Dr. Tümer AKAKIN (THBB- Türkiye Hazır Beton Birliği Genel Sekreteri)
Bora YILDIRIM (KÜB-Beton Katkı Üreticileri Birliği Yönetim Kurulu Başkanı)
Buğra KÜÇÜKKAYALAR (TPB-Türkiye Prefabrik Birliği Yönetim Kurulu Başkanı)
Barbaros ONULAY (AGÜB-Agrega Üreticileri Birliği Yönetim Kurulu Başkanı)
F. Fethi HİNGİNAR (İMSAD-Türkiye İnşaat Malzemesi San. Derneği Yön. Kur. Başkanı)

Sponsorlara ve Destekleyen Kuruluşlara katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

RESMİ SPONSOR

YAPICHEM

ANA SPONSOR

TÇMB
TÜRKİYE ÇİMENTO MÜSTAHSİLLERİ BİRLİĞİ

TÜRKİYE HAZIR BETON BİRLİĞİ

CHRYSO
CHEMICAL SOLUTIONS FOR THE CONSTRUCTION MATERIALS INDUSTRY

DRACO®

Sika®

LCC LUNA
CONSTRUCTION CHEMICALS

BOSCH
Yaşam için teknoloji

DESTEKLEYEN KURULUŞLAR

AKÇANSA

PASCAL

GÖLTAŞ GHB HAZIR BETON

KORDSA GLOBAL

Kratos
sentetik fiber donatı

İÇİNDEKİLER

Haluk İŞÖZEN ve Beton Kongresi
Cemal GÖKÇE (İMO İstanbul Şube Başkanı) I

Sunuş
Cem OĞUZ (İMO Antalya Şube Başkanı) IV

Önsöz
Fikret TÜRKER (Kongre Düzenleme Kurulu Başkanı) VII

Aklımda ve Anılarımda Kalan...
Şenay İŞÖZEN VIII

Haluk'un Anısına
Serdar KUBİLAY (TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası
İstanbul Şubesi 31. Dönem (1988-1990) Yönetim Kurulu Üyesi) IX

Haluk İşözen...
M. Hulusi ÖZKUL XII

Günümüzde Beton Teknolojisi
Mehmet Ali TAŞDEMİR (Kongre Bilim Kurulu Başkanı) XIV

Betonarme Yapıların Yaşam Döngüsü Analizi
(Life Cycle Assessment of Concrete Structures)
Asko SARJA 1

Sürdürülebilir Yapım Süreci İçin Çevreye Uyumlu Beton
(Eco Efficient Concrete for Sustainable Construction)
Said JALALI 19

İnşaat Atıklarının Nicel Olarak Belirlenmesi
(Quantification of Construction Waste Amount)
Said JALALI 37

Kendiliğinden Yerleşen Harçlarda Kullanılan Yüksek Fırın Cürufunun
Yüksek Sıcaklık Performansına Etkisi
İlker Bekir TOPÇU, Tayfun UYGUNOĞLU, Erhan KAHRAMAN 49

Farklı Oranlarda Uçucu Kül İkame Edilerek Üretilen Betonların Klor Geçirimliliklerinin Belirlenmesi
Şakir ERDOĞDU, Ufuk KANDİL, Safa NAYIR 59

Harşit Çayı Vadisi Agregalarının Alkali Silika Reaksiyonu Bakımından İncelenmesi
Şirin KURBETCİ, Sevda KARAKAŞ 71

Çimento Dozajının Betonun Karbonatlaşma Derinliğine Etkisinin İncelenmesi
Harun TANYILDIZI, Murat ŞAHİN, Kenan KORAN 83

Farklı Yoğunluktaki Köpük Betonların Dayanım ve Isıl İletkenlik Özellikleri
Metin DAVRAZ, Şemsettin KILINÇARSLAN, Murat KORU 93

Çimento İnceliğinin Sabit Çökme Değerinde Betonun Basınç Dayanımına Etkisi
Tuğhan DELİBAŞ, Can ÇETİN, Mustafa ÖZTÜRK, Önder KIRCA 103

Çimento Özeliklerinin Çözünme Isısına Etkisi
Fahriye Mazlum KILINÇKALE, Özlem AKYAZI 111

Soğuk Bağlama Yöntemi İle Üretilen Uçucu Kül Hafif Agregalarının Kendiliğinden Yerleşen Betonların Kırılma Parametreleri Üzerindeki Etkileri
Mehmet GESOĞLU, Erhan GÜNEYİSİ, Turan ÖZTURAN, Hatice Öznur ÖZ 121

Genleştirilmiş Perlit ve Bitlis Yöresi Pomzası İçeren Kendiliğinden Yerleşen Harçların Mekanik Özellikleri
Bilal BALUN, Mehmet KARATAŞ 131

Ham Perlit Agregası ve Yüksek Hacimde Perlit Tozu İçeren Kendiliğinden Yerleşen Yüksek Performanslı Hafif Beton
Hasan ESER, Lutfullah TURANLI 141

Pomza Agregasına Polimer Kaplamasının Hafif Betonun Mühendislik Özelliklerine Etkisi
Alper BİDECİ, Özlem SALLI BİDECİ, Hasan YILDIRIM, Sabit OYMAEL, Serkan SUBAŞI 153

Köpük Beton İmalatlarında Kalsiyum Aluminat Çimentosu Kullanımı
Can ÇETİN, Tuğhan DELİBAŞ, Önder KIRCA, İsmail Özgür YAMAN 163

Farklı Kür Yöntemlerinin Betonun Geçirimlilik ve Mekanik Özeliklerine Etkileri
Fatih ÖZALP, Özkan ŞENGÜL, Mehmet Ali TAŞDEMİR 171

Afşin Elbistan Uçucu Külü ve Yüksek Fırın Cürufu İçeren
Çimentosuz Bağlayıcılar Hazırlanması
Murat ŞAHİN, Mahdi MAHYAR, Sinan T. ERDOĞAN 181

Pomza Agregalı Kendiliğinden Yerleşen Hafif Betonların Donma-Çözülme Direnci
Tahir GÖNEN, Salih YAZICIOĞLU 191

Eksenel Yük Etkisindeki Uçucu Kül Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Beton Dolgulu
Kompozit Kolonların Taşıma Kapasitelerinin Modellenmesi
Esra Mete GÜNEYİSİ, Kasım MERMERDAŞ, Ayşegül GÜLTEKİN 203

Biyomineralizasyonun Çimento Esaslı Malzemelerin
Performansına Olan Etkisinin Araştırılması
Zeynep Başaran BUNDUR, Raissa FERRON, Mary Jo KIRISITS 215

Deniz Suyunun Farklı Tip ve Dozajdaki Mineral Katkılı Kendiliğinden Yerleşen
Harçların Mekanik Özelliklerine Etkisi
Mehmet KARATAŞ, Elif GÜRSES 225

Kolemanit Kaplı Pomza Agregalarla Üretilen Hafif Betonlarda Klorür Geçirimliliği
Özlem SALLI BİDECİ, Alper BİDECİ, Hasan YILDIRIM, Sabit OYMAEL,
Serkan SUBAŞI 237

Sürdürülebilir Gelişme için Betonarme Yapıların Dürabiliteye Göre Tasarımı
Özkan ŞENGÜL 245

Betonun Donma-Çözülme Dayanıklılığına Deney Koşullarının Etkisi
Yuşa ŞAHİN, Yılmaz AKKAYA, Mehmet Ali TAŞDEMİR 255

Jeopolimer Betonunun Basınç Dayanımı ve Ultrases Geçirgenliğine
Kür Sıcaklığının Etkisi
Ahmet COŞKUN, Harun TANYILDIZI, Murat ŞAHİN 265

Alkali ile Aktifleştirilen Uçucu Kül Geopolimer Harcın
Mekanik Özellikleri Üzerine Isıl Kür Süresinin Etkisi
Cengiz Duran ATİŞ, Serhan İLKENTAPAR, Ela Bahşude GÖRÜR,
Okan KARAHAN 273

Alkalilerle Aktive Edilmiş Harçların Düşük Hızlı Darbe Yüklemesi Altında
Eğilme Performanslarının İncelenmesi
Mert Yücel YARDIMCI, Serdar AYDIN, Murat TUYAN 283

Alkalilerle Aktive Edilmiş Harçların Aşınma Dayanıklılığının İncelenmesi
Serdar AYDIN, Mert Yücel YARDIMCI 293

Alkali ile Aktive Edilmiş Silis Dumanlı ve Zeolitli Harçların Özellikleri
Niyazi Uğur KOÇKAL, Cem OĞUZ 303

Transmikser Yıkama Suyunun Beton Üretimine Geri Kazanımı
M. Hulusi ÖZKUL, Ü. Anıl DOĞAN 313

Makro-Sentetik Lif Katkılı Geri Kazanılmış Agregalı Betonların Özellikleri
Kutalmış Recep AKÇA, Özgür ÇAKIR, Metin İPEK 323

Çimentolu Yonga Levha Atıklarının Çimento Üretiminde Kullanılması
Mustafa YILMAZ, Mustafa TOKYAY, İ.Özgür YAMAN 333

Yüzey İyileştirme Metotları Uygulanan Geri Kazanılmış Agregaların
Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik Özelliklerine Etkisi
Erhan GÜNEYİSİ, Mehmet GESOĞLU, Zeynep ALGIN, Halit YAZICI 343

Uzun Süre Hizmet Veren Beton Yol Kaplamalarının Temel Malzemesi Olarak
Yerinde Yeniden Kullanılması: Doğu Karadeniz Bölgesi Uygulamaları
Muhammet ÇELİK, Muhammet Vefa AKPINAR 353

Ham Pirinç Kabuğunun Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Betonda
Polipropilen Lif Yerine Kullanılabilirliğinin Araştırılması
Büşra AKTÜRK, Nabi YÜZER, Nihat KABAY, Hasan BİRİCİK 365

Soğuk Bağlanmış Uçucu Kül Agregaları ile Üretilmiş Kauçuklu
Hafif Betonların Mekanik Özellikleri
Hasan YILDIRIM, Turan ÖZTURAN 375

Kentsel Dönüşüm Sonucu Oluşan Molozların Geri Dönüşümle
Betonda Kullanımı – Silis Dumanı Katkılı Geri Kazanılmış Agregalı Betonlar
Hasan DİLBAS, Mesut ŞİMŞEK, Özgür ÇAKIR 387

Mermer Tozu Katkılı Çelik Lifli Betonların Mekanik Özellikleri
Merve AÇIKGENÇ, Kürşat Esat ALYAMAÇ, Zülfü Çınar ULUCAN 399

İnşaat ve Yıkıntılardan Geri Kazanılan Agregaların Çeşitli Beton
Elemanların Üretiminde Değerlendirilmesi
Fatih ÖZALP, Halit Dilşad YILMAZ, Ömer KAYA, Mustafa KARA,
Yasemin KILIÇ 411

Hazır Beton Üretiminde Çevresel Uygulamalardaki Gelişmelere Bir Bakış
Nilay COŞGUN, Tülay ESİN, Selin ÖZTÜRK 421

Türkiye'de Uçucu Küllü Betonlar İçin Yaşam Döngüsü Analizi
Meltem TANGÜLER, Petek GÜRSEL, Çağla MERAL..... 431

Silis Dumanı ve İnce Kumun Poroz Kaplama Betonu Üzerindeki
Etkilerinin İncelenmesi
Orhan KARPUZ, Metin Mutlu AYDIN, Taşkın TANRIVERDİ 443

Sürdürülebilir Betonların Havaalanı Apron Sahasında Kaplama Olarak
Kullanılabilirliğinin Araştırılması
İsmail DOĞAN, Muhammet Vefa AKPINAR,
Mehmet T. SEFEROĞLU, Ayşegül G. SEFEROĞLU 455

Işık Geçiren Fosforesanlı Beton
Murat SAYDAN, Ülkü Sultan KESKİN..... 467

Beton Çökme Değerinin Kontrol Edilebilen Değişkenler Dikkate Alınarak
İstatistiksel Değerlendirmesi
M.Timur CİHAN, Abdurrahman GÜNER, Nabi YÜZER..... 479

Farklı Viskozite Değerlerine Sahip Püskürtme Beton Karışımlarının
Geri Sıçrama Optimizasyonunun Abaqus Cae Programıyla İncelenmesi
Sadık Alper YILDIZEL, Muhammed Ensar YİĞİT, Ali Uğur ÖZTÜRK,
Gökhan KAPLAN..... 489

Porta Batumi Tower Projesi Betonlarının Sıcaklık Kontrollü Dökümü,
Dayanım Gelişimi, Kalıp Alma Süreleri ve Yüzey Özelikleri
Savaşer YETİŞ, Ali KAYA, Mehmet Ali TAŞDEMİR 503

Çimento Esaslı Kompozitlerde Lif-matris Aderansına
Kür Koşullarının Etkisinin İncelenmesi
Ahsanollah BEGLARIGALE, Halit YAZICI 517

Çelik Lifli Betonun Basınç Birim Şekil Değiştirme-Elektriksel Direnç İlişkisi
Özkan Ayberk KOLATAR, Egemen TEOMETE, Serap KAHRAMAN..... 527

Yüksek Fırın Cürufu Üretimindeki Standart Sapmanın Beton Basınç Dayanımı
Üzerindeki Etkisi ve Girdilere Göre 90-Günlük Dayanımın Modellenmesi
Fulya GÜLEN, Erman DERİN, Önder KIRCA..... 535

HALUK İŞÖZEN VE BETON KONGRESİ

İnşaat Mühendisleri Odası adına Antalya ve İstanbul Şubeleri tarafından düzenlenen "9. Ulusal Beton Kongresi"ni 16-18 Nisan 2015 tarihinde Antalya'da gerçekleştirmiş olacağız.

Sadece beton konusunda değil, inşaat mühendisliği alanını ilgilendiren her konuda düzenlediğimiz kongre, konferans ve sempozyumlar, inşaat mühendisliği alanının gelişmesine önemli katkılar sağlıyor.

Üstelik ülke topraklarımızın %66'sı 1. ve 2.derece deprem tehlikesi altında bulunuyor. Nüfusumuzun %70'i, büyük sanayi kuruluşlarımızın %75'i deprem tehlikesi altında yaşıyor. Ayrıca yapı stokumuzun deprem güvenlikli olmadıklarını da biliyoruz. Yaşamış olduğumuz depremler, deprem büyüklüğü ile orantılı olmayan can ve mal kayıpları ortaya çıkarmaktadır.

Bu durum ülkemizde bulunan yaklaşık 20 milyon birim konutun, kamu yapılarının ve endüstri tesislerimizin orta büyüklükte bir depremde bile ayakta kalabileceklerini ifade etmeyi oldukça zorlaştırıyor. Yeterli ölçüde mühendislik hizmeti görmeyen, kaçak ve denetimsiz olarak üretilen yapı stokunun sayısı bugün hiç de az değil.

Yapı üretim sürecinde dikkate alınması gereken yer seçim kararlarından proje üretimine, proje üretiminden malzeme seçimine, malzeme seçiminden yapı denetimine kadar gerekli olan mühendislik kurallarına bugün bile uyulmamaktadır. Ayrıca elle yapılarak inşaatlarda kullanılan betonun oluşturduğu yapı stokumuza yeni güvensiz yapıların ilave edilmiş olduğunun altını bir kez daha çizmek gerekir. Bu nedenle yapı üretim sürecinde olması gereken her uygulamanın mühendislik bilgisi ve bilimi doğrultusunda yapılması gerekmektedir.

Ayrıca deprem tehlikesi olmasa bile var olan kaynaklarımızın sürdürülebilir bir anlayış doğrultusunda kullanılması gerekmektedir. Bu bağlamda ülkemize oldukça geç gelen hazır beton kullanımı ve teknolojileri, yapıların uzun ömürlü olması bakımından büyük bir öneme sahiptir.

Deprem konusu başta olmak üzere yapıya gelen tüm kuvvet ve yüklere karşı dayanıklı, kaliteli, proje değerlerine ve standartlara uygun bir betonun üretilmesi ve kullanılması, sürekli olarak Oda ve Şubelerimizin gündeminde olmuştur.

Ayrıca yapılarımızın ''güvenli olma konusu'' tek başına üretilen yapı ile de sınırlı değildir. "GÜVENLİ ve SAĞLIKLI BİR ÇEVRE"de yaşamayı amaçlamak temel öngörülerimiz arasında yer almaktadır. Bugün ülkemizde var olan kaynakların sadece bugüne ait olmadığını, gelecek kuşakların da etki alanımız içinde bulunan kaynaklara ihtiyaçları olacağını unutmamak gerekir. Açıkçası üretimlerimizin çevre şartlarını dikkate alarak

üretilmesi ve sürdürülebilir olması da Odamızın çalışma alanı içinde yer almaktadır. Bu bağlamda "9.ULUSAL BETON KONGRESİ"nin ana teması "SÜRDÜRÜLEBİLİR BETON" olarak seçilmiştir.

İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi tarafından başlatılan Beton Kongrelerinin yedisi İstanbul Şubesi tarafından İstanbul'da yapılmış, "8. Ulusal Beton Kongresi" ise İzmir Şubemizle birlikte İzmir'de düzenlenmiştir.

Her olayın, her insanın bir hikayesi olduğu gibi "Beton Kongrelerinin" ortaya çıkmasının bir hikayesi, bir alt yapısı vardır. Bu hikayenin anlatıcısı ve yazarı HALUK İŞÖZEN'dir.

1. Beton Kongresi'nin 1989 yılında düzenlenmesi ve bu kongrenin Prof. Bekir POSTACIOĞLU'nun anısına yapılması fikri Haluk İŞÖZEN tarafından önerilmiş ve gerçekleştirilmiştir.

Yine 6. Beton Kongresi'nin 2005 yılında Prof. Dr. Yaşar ATAN anısına, 7.Beton Kongresi'nin 2007 yılında Prof. Dr. Mehmet UYAN anısına, 8. Beton Kongresi'nin ise 2011 yılında Prof. Dr. Ferruh KOCATAŞKIN anısına düzenlenmiş olması, Haluk İŞÖZEN'in atmış olduğu tohumların birer filizleridir.

Haluk İŞÖZEN, 8. Ulusal Beton Kongresi'ne kadar tüm kongrelerin içinde yer almıştır. Ne yazık ki 8. Kongrenin Bilim ve Danışma kurulunda yer almasına rağmen bu kongreyi göremeden yaşamını yitirmiştir.

Gerek İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Yönetim Kurulu Sekreter Üyesi olarak, gerekse Oda Yönetim Kurulu Üyesi olarak üniversite ve sanayi kuruluşları arasındaki ilişki ve işbirliğinin sağlanması doğrultusunda çok büyük bir emeği vardır. Beton ve kimyasal katkı üreticilerinin işbirliği içinde olmalarını dile getirenlerin başında gelmektedir. Kimya Mühendisleri Odası Ankara Şubesi ile İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi'nin birlikte düzenledikleri "Kimyasal Katkılar Sempozyumu"nun öncüsü ve düzenleyicisi olmuştur.

Genel olarak yapı malzemesi, özel olarak beton konusuna yönelik sürekli bir çaba ve çalışma içinde olmuştur. THBB Kalite Güvence Sistemi çalışmalarında Odamız adına yer almış, sektörün gelişimine önemli ölçüde katkı sağlamıştır. İnşaat Mühendisleri Odası'na bağlı şubelerde bulunan laboratuvarların denetlenmesi ve bir envanter oluşturulması çalışmalarının da yürütücüsü ve fikir babası olmuştur.

Ayrıca, İnşaat Mühendisleri Odası'na bağlı şube ve temsilciliklerimiz de betonu ve betonun özelliklerini slaytlarla tanıtması, bu tanıtım seminerlerini esprili ve keyifli bir hale getirerek konuyu anlatması, Haluk İŞÖZEN'in bir başka özelliği olarak anlaşılmasına ve sevilmesine katkı sağlamıştır.

Benim için yaşamını yitirmiş yakın dost ve arkadaşlarımın arkasından bir şeyler

yazmak her zaman çok zor olmuştur. Haluk'un arkasından da hiçbir şey yazmadım. Oysa Haluk'la birlikte büyüdüm denebilir. Çok şeylerin ve çok şeylerinin tanığıyım. Özel yaşam dediklerinin de. Haluk'u yazmadım ama isminin geçtiği veya O'nu anımsatan her yerde, dudaklarda tebessüm yaratan yaşanmışlıkları anlattım. Anlatmayı da sürdüreceğim.

"9. Ulusal Beton Kongresi"ni Haluk İŞÖZEN'in anısına düzenlemiş olmakla bir vefa borcunu da yerine getirmiş oluyoruz. Bu geleneği Haluk İŞÖZEN başlattı. Biz de, Antalya Şubemizle birlikte gelenek yaratanları İMO'nun Anı Defterine ortak ettik.

9. Ulusal Beton Kongresi'ne kadar, "Akademik" alanda mesleğimize katkı yapan meslek büyüklerimizi, yani yaşamını yitirmiş olan "ÖĞRETENLER" anısına "Beton Kongresi" düzenlenerek Odamız ve Şubelerimiz tarafından bir vefa örneği gösterildi. Akademik alan dışında kalan "değerlerimizin" de unutulmaması gerektiğini, bu geleneği başlatan Haluk İŞÖZEN Anısına "9. Ulusal Beton Kongresi"ni düzenleyerek göstermek istedik.

Odamız adına Antalya Şubemizle birlikte Antalya'da 16-18 Nisan 2015 tarihinde düzenleyeceğimiz 9. Ulusal Beton Kongresi'nin hazırlık sürecinde; Antalya ve İstanbul Şubesi yönetim kurullarının sıcak bir birliktelik ve çalışma ortamı yaratmış olmalarını da önemle vurgulamak isterim. Birlikte çalışma süresi içerisinde Antalya Şubemizin yöneticileri ve çalışanları tarafından her zaman güler yüzle karşılandık. Şube Başkanı Sayın Cem OĞUZ'un şahsında tüm yönetim kurulu üyelerine çok teşekkür ediyoruz.

Ayrıca 9. Ulusal Beton Kongresi'nin özverili ve kaynaştırıcı Düzenleme Kurulu Başkanı Sayın Prof. Dr. Fikret TÜRKER'e ve düzenleme kurulunun diğer üyelerine de çok teşekkür ediyoruz. Yine Bilim ve Danışma kurulunun sayın üyeleriyle birlikte maddi ve manevi olarak desteklerini esirgemeyen tüm kurum ve kuruluşlara çok teşekkür ediyoruz.

9. Ulusal Beton Kongresi'nin ve kongre kitabında yer alan bildirilerin inşaat mühendislerine ve inşaat mühendisliği alanına yarar sağlayacağına tüm içtenliğimizle inanıyoruz. 24.03.2015

Cemal GÖKÇE
TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası
İstanbul Şube Başkanı

SUNUŞ

Sürdürülebilir gelişme; gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılayabilme yeteneğini ortadan kaldırmaksızın şimdiki neslin ihtiyaçlarının karşılanmasıdır. Günümüz koşullarında, sürdürülebilir gelişmenin sağlanması giderek daha büyük önem kazanmaktadır. Sürdürülebilirlik; çevresel, ekonomik ve sosyal olmak üzere, birbirleriyle bağıntılı etkilere dayanır. Servis ömrü hesaplanabilen veya tahmin edilebilen bir yapıda yaşam döngüsü değerlendirmeleri yapılabilir. Böyle bir değerlendirmede; yapının ilk inşasından ömrünü doldurup yıkılmasına kadar geçen sürede, çevreye verilen zararlar, karbon izi, enerji ihtiyaçları ve her türlü maliyetler gibi çeşitli faktörler esas alınır. Bu hesaplamalarda sadece ilk yapım değil, tüm işletme, bakım ve onarımlar ile yıkım aşaması da değerlendirmeye dahil edilir. Bu kapsamda, kullanılan malzemelerin üretimi ve malzemelerin inşaat sahasına taşınması için gerekli enerji, bu üretim ve taşınma sırasında çevreye etkileri, yapının kullanımı sırasındaki enerji ihtiyaçları gibi faktörler de esas alınır. Böylece farklı yapı sistemleri, malzemeler veya yöntemlerin karşılaştırılarak en uygun seçimlerin yapılması mümkün olabilir. Bunun bir sonucu olarak da sürdürülebilirlik sağlanabilir.

Toplum taleplerinin aşırı tüketim yönünde değişimi nedeniyle daha fazla kaynağa ihtiyaç duyulmaktadır ve bu durum dünyada kaynakların aşırı tüketimine neden olmaktadır. Son yıllarda, tüketim toplumunun bir sonucu olarak kentleşmenin hızlı bir şekilde gerçekleşmesi, yıkım ve yapım aktivitelerinin aşırı ölçekte artmasına neden olmaktadır. Hem miktar olarak, hem de maddi bakımdan incelendiğinde, inşaat sektörü günümüzde en çok malzeme tüketen sektörlerin başında gelmektedir. Üretim açısından bakıldığında da bu durumun önemli etkileri vardır.

İnşaat sektöründe son yıllarda görülen büyük ivmelenme, kullanılacak yapı malzemelerinin teknik yönden üstün parametre ve değerlere sahip olmalarının gerekliliği, birçok yeni yapı malzemelerinin kullanımına ve uygulanmasına zemin hazırlamaktadır. Özellikle günümüzde yaşanan fosil enerji kaynaklarının hızlı tüketimi, sera gazının sebep olduğu hava kirliliği, enerji kullanım miktarının en aza indirilme çabası, üretilen malzemelerin doğru ve yerinde kullanılmaması gibi sebeplerle ortaya çıkan sürdürülebilirlik kavramı bu malzemelerin araştırılması ve geliştirilmesine hız kazandırmaktadır.

Günümüzde artan çevresel bilince paralel olarak ulusal ve uluslararası çevresel politikalar giderek katılaşmaktadır. Her yıl milyarca ton tüketilen beton da bu çerçevede mercek altındadır. Beton günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesidir. Betonda sürdürülebilirlik kavramında beton bileşenlerinin çevreye zarar vermeyen malzemelerden oluşması ve atıkların beton üretiminde değerlendirilmesi, enerji tasarrufu ve beton yapıların kullanım ömrünün uzatılması gibi yaklaşımlar yer

almaktadır. Sürdürülebilir beton, bileşenleri olan agrega ve bağlayıcısı büyük ölçüde geri dönüşüm atıklarından oluşan bir malzemedir.

Betonun ve çimentonun bu denli fazla üretiminin ve tüketiminin çevresel etkilerinin olması kaçınılmazdır. Beton ve çimento sektörü gerek büyük miktarda doğal kaynak ve enerji tüketmesi, gerekse çimento üretimi kaynaklı başta Karbondioksit olmak üzere emisyonların yüksek olması sebebi ile eleştirilmektedir. Bu haklı eleştiriler alternatif çözüm yollarıyla aşılmaya çalışılmaktadır Çimento temelli sistemlerde (sıva, harç, beton gibi) uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi puzolanik özellik gösteren endüstriyel atıkların kullanımı ile Karbondioksit emisyonu minimize edilebilmekte, doğal kaynaklar ile enerjiye olan gereksinim azalmaktadır. Böylece çimento temelli sistemler daha sürdürülebilir olarak üretilebilmektedir.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın açıklamalarına göre; kentsel dönüşüm sürecinde Türkiye genelinde 6,5 milyon konutun yıkılıp yeniden inşa edilmesinin hedeflendiği belirtilmektedir. Ülkemizde 2012 yılında başlayan ve 20 yıl sürmesi beklenen Kentsel Dönüşüm çalışmaları sonucunda yıllık en az 4-5 milyon ton inşaat ve yıkıntı atığı oluşması beklenmektedir. Kentsel katı atıkların %13-%30'u arasında bir kısmını oluşturan inşaat yıkıntı atıklarının, çevresel zararlarının azaltılması ve ekonomik açıdan kazanca dönüştürülmesi, Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler için büyük önem taşımaktadır. Her geçen gün yapım çalışmalarında ve yıkım işlerinde artışlar gözlendiği de dikkate alındığında, inşaat sektöründe sürdürülebilir büyümenin sağlanabilmesi için tedbirler alınması gerekmektedir. İnşaat sektöründe sürdürülebilirlik kapsamında bu atıkların betonda geri kazanılmış agrega olarak kullanımı oldukça önemli bir yaklaşımdır.

Betonda sürdürülebilirlik kavramında beton bileşenlerinin çevreye zarar vermeyen malzemelerden oluşması ve atıkların beton üretiminde değerlendirilmesi, enerji tasarrufu ve betonarme yapıların kullanım ömrünün uzatılması gibi yaklaşımların tartışılması amacıyla düzenlenen bu kongrenin önemli bir platform oluşturacağı görüşündeyiz. Üniversite, kamu kurumları, yerel yönetimler, özel sektör ve gönüllü kuruluşlar gibi çok çeşitli kesimlerde çalışan ilgililerin bir araya gelmelerini sağlayarak, dünyada ve ülkemizdeki beton ve betonarme yapıların kalıcılık özelliği ile birlikte sürdürülebilirliğin temelini oluşturan konularda etkin, ekonomik çözümler üretilmesini sağlamak, meslektaşları bir araya getirerek zaten var olan dostlukları pekiştirmek ve olası yeni dostlukların kurulmasını sağlayarak güzel bir sosyal ortam olarak da değerlendirmektir. Bu çerçevede İnşaat Mühendisleri Odası, meslek alanları ile ilgili ülke gerçeklerini ortaya çıkarmayı tüm bilgi birikimini ülkenin ve halkın yararına kullanmayı temel çalışma ilkesi olarak görmektedir. Ülkemizde meslek alanımızı ilgilendiren sorunlara sahip çıkmaya ve bu sorunların çözümüne yönelik katkı sağlamaya her zaman olduğu gibi bugünde hazırdır.

Bu yıl dokuzuncusu gerçekleşecek kongrenin, beklenenden çok fazla olan bildiri ve katılımcıları ile kalitesinden kesinlikle ödün vermeyen yaklaşımı ve titizlikle uygulanan hakem değerlendirme sistemi ile daha da yüksek bir standardı yakalamış durumdadır.

Yaşam döngüsü analizi, Atık yönetimi ve betonun geri dönüşümü (İnşaat molozlarından agrega üretimi, geri kazanılmış agrega, geri dönüşüm suyu), Sanayi yan ürünü olan bağlayıcı malzemeler (Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, diğer küller), Alkaliler ile aktive edilen puzolan bağlayıcılar (Geopolimerler), Sürdürülebilirlik için dayanıklılık (dürabilite, servis ömrü, performansa dayalı tasarım, onarım ve bakım), Enerji tüketiminde tasarruf yapılması (Çimento üretiminde alternatif yakıtlar, ısı yalıtım özelliği yüksek betonlar), Sürdürülebilir beton yollar (geçirimli beton, kentlerde ısı depolanmasının önlenmesi, açık renkli beton) konu başlıklarında dördü yurtdışından olmak üzere 40 Üniversite ve 7 kurumdan 142 yazarın hazırladığı toplam 50 adet bildiri, 12 oturumda sözlü olarak sunulacaktır. Ayrıca yurtdışından iki çağrılı konuşmacımız da deneyimlerini ve değerli bilgilerini bizlere aktaracaklardır.

8. Ulusal Beton Kongresi'nin hazırlık sürecinde kaybettiğimiz Odamızın yönetim birimlerinde çeşitli görevler almış, Beton Kongrelerine ve inşaat mühendisliği mesleğine değerli katkılarda bulunmuş, 9. Ulusal Beton Kongresini anısına düzenlediğimiz meslektaşımız Haluk İşözen ve bugün aramızda olamayan inşaat mühendisliği mesleğine akademik ve bilimsel katkı sağlamış tüm bilim insanlarımızı saygıyla anıyoruz.

Bu kongrenin gerçekleşmesinde büyük bir özveriyle çalışan Düzenleme, Danışma, Bilim Kurulunun sayın üyelerine, maddi ve manevi olarak desteklerini esirgemeyen tüm kurum, kuruluş ve kişilere, İMO merkez ve İstanbul Şube Yönetim Kurulu üyeleri ile çalışanlarına, bildiri sunan meslektaşlarımıza, uzmanlara, katılımcılara, büyük bir gayretle çalışan personelimize ve emeği geçen herkese teşekkür ederiz.

Dr. Cem OĞUZ
TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası
Antalya Şube Başkanı

ÖNSÖZ

İlk olarak 1989 yılında İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi tarafından düzenlenen "Ulusal Beton Kongresi", bu yıl İstanbul ve Antalya Şubeleri tarafından 9. kez Antalya' da gerçekleştirilmiştir. Dokuzuncu Beton Kongresi; Beton Kongresi düzenlenmesi yönünde önemli çaba gösteren ve emek harcayan, ancak beklenmedik bir tarihte erken yaşta kaybettiğimiz meslektaşımız İnş. Müh. Haluk İŞÖZEN anısına düzenlenmiştir.

Geçen kongrelerde, Yüksek Dayanımlı Beton, Hazır Beton, Beton Teknolojisinde Kimyasal ve Mineral Katkılar, Yüksek Performanslı Betonlar, Yüksek Dayanımlı Beton, Beton Dayanıklılığı, Beton Teknolojisinde Gelişmeler ve Uygulamalar, temaları ile beton ve bileşenleri hakkında çok sayıda çalışma bildiri olarak sunulmuştur. Dokuzuncu Kongrede "Betonda Sürdürülebilirlik" ana tema olarak irdelenmektedir. Beton bileşenlerinden çimento, karbondioksit emisyonu ve enerji tüketimi açısından sorunlu bir malzemedir. Bu sorun özellikle endüstri yan atıkları olan puzolan özellikli malzemelerin kısmen çimento yerine kullanılması ile olumlu yönde çözülebilir. Agrega elde edilmesi sırasında az enerji tüketse de, doğal çevrede dengeyi bozabilecek etkileri olabilmektedir. Öte yandan Ülkemizde mevcut yönetmeliklere göre incelenerek, güçlendirme ve/veya yıkıp yapma yöntemiyle birçok yapı hem atık olarak sorun yaratacak, hem de yeni yapılacak inşaatlarda beton kullanım hızı sorunun devamı olacaktır. Bu süreçte önemli miktarda yıkıntı malzemesinin büyük çevresel sorunlara yol açması beklenmelidir. Bu şekilde ortaya çıkan yıkıntı atıkları beton üretiminde agrega olarak kullanılabilir. Antalya'da 16-18 Nisan 2015 tarihleri arasında gerçekleştirilen "9. Ulusal Beton Kongresi" kapsamında, yukarıda belirtilen çevre sorunlarının çözümüne katkı sağlayabilecek bildiriler sunulmaktadır.

9.Ulusal Beton Kongresini düzenleyen İnşaat Mühendisleri Odası Antalya ve İstanbul Şubelerinin Yönetim Kurullarına, Kongre Düzenleme, Danışma, Bilim Kurulu Üyelerine, kongrenin düzenlenmesine katkı sağlayan tüm kurum ve kuruluşlara, çağrılı konuşmacılara, oturum başkanlarına, bildiri sunan ve katılan tüm meslektaşlarımıza, mühendis arkadaşlarımıza teşekkür eder, kongrenin tüm inşaat camiasına yararlı olması dileğiyle saygılarımı sunarım.

Prof. Dr. Fikret TÜRKER
9. Ulusal Beton Kongresi
Düzenleme Kurulu Başkanı

AKLIMDA VE ANILARIMDA KALAN...

Ne zaman karıştırdığı beton harcını dökmeye gelen bir araç görsem Haluk'un söyledikleri aklıma düşüyor: "İyi Beton'un kaos yaratan gürültüsü olmaz. Kendi içinde ahenkli bir çalışması vardır. Karışım sağlıklıysa çıkardığı sesler kulakları rahatsız etmez!"

İlk beton kongresi için hazırlanan afişi eve getirdiğinde tutkuyla masaya koyup anlatması, bu işe gönül verenlerle birlikte yapılacak daha pek çok çalışmanın heyecanı gözümün önünde." Devamı gelecek ve her seferinde etkisi daha da artacak, eminim " diyordu. Yanılmadı.

Oda'nın düzenlediği bu kapsamlı kongreler, ülkemizin can damarı sektöre, inşaat mühendisliğinin yüzakı olarak önemli katkılar sağlamakta.

Biz aynı meslekten olmasak da beton her zaman ilgimi çekmişti. Olumlu olumsuz bir çok şeyi içinde barındırıyordu. Haluk'un evde kutunun içinde arşivlediği irili ufaklı, biri diğerine benzemeyen beton parçalarının hikayelerinde olduğu gibi. Kimi belli ki çok eski binalardan alınmış örneklerdi. Buna rağmen çok sağlamdı. Deprem görmüş geçirmiş olanları, yeni dökülmüş beton kokusunu taşıyanları tekrar yerine koyarken, 'hayat bunların içinde, küf kokanı da var, kaliteli bir yaşamın ipuçlarını veren de...' derdi. Özenle koruduğu dialar, kitaplar, gazeteler, dergiler, köşe yazılarına bakıyorum, öncelik hep 'beton'un olmuş. Tesadüfen dışarda bir betonunun standartlara uyulmadan döküldüğüne rastgelse, tepki alacağını bile bile çalışanları uyarmaya çalışırdı. Bazen tartışma büyür, gene de doğru olanı anlatmaktan vazgeçmezdi. İyi ki vazgeçmemiş, ısrarla üzerine gitmiş; titiz, açık yürekli ve kuralları esnetmeyen bir çalışma ahlakı olmuş. Yıkılan, hasar gören binalarda yaralananların, hayatını kaybeden canların acısı hafızamızdan silinebilecek gibi değil.

Haluk'un 1989'da yayımlanan bir haber dergisinde, kendisine yöneltilen "Niçin beton kongresi?" sorusundan hareketle ele aldığı yazıdan alıntıyla sözlerimi bitirmek istiyorum:

"Coğrafyayla uğraşan kişi konuları döndürüp dolaştırıp coğrafyaya bağlar. Konusu analitik geometri olan kişinin, dost meclisi sohbetlerinde bile analitik çözümlemelerinin ağırlığını hissedersiniz. Biz inşaat mühendislerinin, bir insan ömründen daha uzun olan taşıyıcı sistem malzemesi betondan sürekli söz etmesinden daha doğal ne olabilir. İşimiz bu..."

Değerli eşim Haluk İŞÖZEN'i bu vesileyle andığınız ve özellikle genç meslektaşlarına böylesine anlamlı bir şekilde hatırlatıp tanıttığınız için, şahsım ve kızım adına Oda'nızın tüm değerli çalışanlarına içtenlikle teşekkür ederim.

Şenay İŞÖZEN

HALUK'UN ANISINA

Haluk'u kaybedeli dört yıl oldu. Zaman çok hızlı geçiyor. Haluk'la birlikte otuz yılımızın geçtiği Şubemizin Harbiye'deki yeri de değişti. Ama Haluk'la ilgili anılar sadece eski mekânda kalmadı. Bizimle birlikte her yerde, yurt ölçüsünde bütün Oda mekânlarında, Oda toplantılarında var oldu. O'nun kaybından kısa süre önce, bir yeni yıl kutlaması için görüşmüştük. Yeni yılda daha fazla görüşmek, konuşmak dileğinde bulunmuştuk. Oysa son görüşmemizmiş. Elimizdeki en önemli olanak olan zamanı yazık ki iyi kullanamıyoruz. Bu kez önümüzde zaman da yokmuş.

Haluk'un Oda içinde de herkesden çok geniş bir ilişki ağı vardı. Dolayısıyla her vesileyle O'nu anımsama fırsatı bulduk. Şimdi ise O'nun anısıyla sarmalandığımız bir ortamdayız.

Haluk'un Oda çalışmalarına katılması, okulu bitirdiği 1977 yılında başladı. Ülkede tarihin akışının baş döndürücü biçimde birden bire hızlandığı günlerdi. Bütün sorunların çözümünün ancak iktidarın devrilmesiyle mümkün olabileceği inancının da yaşandığı bir dönemdi. Toplumsal gelişmenin zor yoluyla bastırıldığı karanlık yıllar...

Şubemizin de ilk yarısını faaliyetsiz geçirdiği seksenlerin ikinci yarısında, önce meslek alanımızın vazgeçilmez bir öğesi olma hedefini başa almıştık. Bu hedefin iki binli yıllara doğru adım adım yaşama geçmesi, Haluk'un da çok önemli katkısının olduğu uzun soluklu çalışmaların sonucuydu. Burada temel ilke şuydu: Mesleğimiz bilimsel teknik gerekler çerçevesinde gerçekleşirken, bir yandan toplumumuzun çıkarları doğrultusunda gelişmeler kaydedilebilir, meslektaşlarımızın da maddi ve manevi doyumu sağlanabilirdi. Bu yaklaşım, mesleğimizin bütün dallarında, üniversitedeki bilginin ve üretimdeki deneyimin, meslekiçi eğitimle meslektaşlarımıza düzenli biçimde aktarılması eksenine oturuyordu. Kongreler de, bu doğrultuda, bilimsel bilginin ve teknoloji üretiminin sergilendiği en önemli Oda faaliyetlerinden biri oldular.

Haluk, meslek alanımıza giren her sorunun öncelikle kendi özgüllüğü içinde, uzmanların değerlendirmesiyle ele alınması gerektiği düşüncesinin savunucularından biriydi. Oda yönetiminde yer almasıyla birlikte çalıştığı beton üretimi alanından sorunlar ve çözümler getirdi. Odada beton kalitesi konusu her ne kadar gündeme sık sık getirilse de Haluk bu konunun üzerinde yoğunlaşarak beton kalitesinin yaşamsal önemine dikkat çekmişti. 1972'de, Ersin ARIOĞLU'nun yaptığı bir araştırmayla, İstanbul'da dökülen betonların kalitesine ilişkin ilk toplu sonuçlara varılmıştı ve Haluk, Ölçü Gazetesi'ne verdiği bir röportajda, mücadele geleneğine verdiği önemi göstererek bu çalışmayı hatırlatmıştı.

Seksenlerin sonuna doğru İstanbul'da beton kalitesinin öne alınmasını gerektiren çok yaygın bir yapılaşma süreci başladı. Haluk'un Ölçü Gazetesi'nde Taşın Ağırlığı

isimli köşesinde o lezzetli üslubuyla onlarca yazısı bu sorunu bütün boyutlarıyla dile getirdi. Doksanların başında hazır beton firmaları hızla yayıldılar. Kuşkusuz beton dayanımı ve dayanıklılığı gibi kavramlar üniversitelerde oluşturulmuştu ama betonun bilimsel çerçevesi yaygın olarak yapı üretimi alanına kongreler aracılığıyla sokuldu. Meslektaşlarımızın hızla yayılan yapılaşma sürecinin gereksindiği bilimsel donanıma yükseltilmeleri, Oda-Üniversite işbirliğiyle gerçekleşebilirdi. Olumlu bir gelişme olacaksa bu ancak Odanın etkin katkısıyla olacaktı. Oda, mesleki faaliyetin üzerinde günün gereklerine yanıt veren bir konum elde etmiş, Odanın öncülüğünde meslek alanımızın asli öğeleri üniversiteler ve inşaat mühendislerinin karşılıklı etkileşiminden olumlu sonuçlar çıkarıldı.

Haluk'un çok geniş bir alanda, Şube ve temsilciliklerimizdeki yaygın beton kullanımında bütün olumsuzlukları içeren çok renkli çok çarpıcı slaytlı sunumu uzun yıllar sonra bile hala belleklerdedir.

Beton üretimi, Haluk'un iyi bildiği, ustası olduğu, önemli görevler üstlendiği ve başarılı olduğu bir alandı. Müthiş iletişim yeteneğiyle bütün beton ve yapı malzemesi ortamının tanınan en renkli kişilerindendi. Bütün üniversite çevrelerini, beton sektörünü henüz hiç de bir gelenek oluşmamışken, Oda düzleminde bir kongre çerçevesinde toplayabildi. İlk beton kongresinde nitelikli beton üretimine katkıda bulunmuş bir ustamız adına düzenlenmesi geleneğini de O başlatmıştı. İlk beton kongresi Prof. Bekir POSTACIOĞLU Anısına Haluk'un önerisiyle yapıldı.

Haluk, Oda tarihinin en kalıcı ve verimli etkinliklerinden biri olan beton kongrelerinin dokuzuncusunu gerçekleştirmekte olduğumuza ve günümüzdeki gelişmiş haline tanık olsaydı, eminim ilk harcını kendisinin attığını düşünerek haklı olarak çok gururlanacaktı. O'nun başlattığı geleneği sürdürmekten biz de mutluyuz, gururluyuz.

2011'de Haluk'u yitirdiğimizde, O'nun arkasından dilimde uzun süre hep zorlanarak tekrarladığım, kendi kendime söylediğim bir sayıklama kaldı. Bundan sonra, kalan ömrümde Haluk'la konuşamayacağım. Haluk'un değerini O'nu yitirdiğimde de fark etmiş değildim. Uzun süredir O'nun benzersiz kişiliğini keşfetmiş durumdaydım. Oda mekanının dışında da ilişkilerimiz sürüyordu, konularımız yalnızca mesleki ve Oda çalışmalarına ilişkin değildi. Her fırsatta telefonla arar, bulunduğum yeri, ortamı, yaşadığım duyguyu bildirir, ürettiğim düşünceyi ona aktarmazsam rahat edemezdim. Üstelik her zaman hararetli tartışmalarla geçerdi görüşmelerimiz. Ortak bir noktaya varmamız uzun çekişmelerden sonra mümkün olabilirdi. Bağlayamadığımız birçok tartışma konusu da dururdu gündemimizde. Herhangi bir zamanda/yerde ve birden tekrar alevlenmek üzere. Tartışmalarımızın sertliğinden kaçmaz, güçlü sezgilerinden mutlaka yararlanmak isterdim. Haluk'u kaybettikten sonra da her yeni durumda hâlâ O'nu aramak gelir içimden. 'O olsa ne derdi' diye. Düşündüklerimi O'nunla sınamak için. Geçmişte hep böyleydi. Aklıma düşen her sorunda, O'nunla konuşmak, tartışmak isterdim. Görüş geliştirmek için. O'nunla tartışmaya doyamazdım. Ama tartışmamız

bir tıkanıklığa kör dövüşüne dönmezdi Haluk'la. O'nunla tartışırken, boy ölçüşürken, karşıtlığımız yok olmasa bile keyfimizden bir şey eksilmezdi. Her keresinde kendimi kazançlı sayardım. Sanırım o da. Yoğun ilişkimiz ise 1988-1990 yıllarında Şube yönetim kurulu üyeliğimizde gerçekleşti. Üstelik çok da uyumlu bir birliktelik değildi. Ama sonraki yıllar gerçek bir dostluğa dönüştü.

Haluk, bir muhabbet adamıydı. Hangi ortamda olursa olsun, orada bulunan herkesin gönlünü alırdı. Çok rastlanan bir özellik değil bu. Anlamlı bir yaşam, çevremizdeki insanları etkilememize de bağlı. Oysa insanlar ancak kendilerine saygı ve ilgi gösterenlere yüreklerini açarlar. Kalp kalbe karşıdır, denir ya. İnsan sevgisinin kimde olduğu hemen anlaşılır. Haluk çok sevilen bir insandı, çünkü sevmesini bilen bir yüreği vardı. Sevgisi, muhabbeti sınırsızdı.

Haluk insanları iyi tanırdı. Bunun yolunun ülkenin kültürünü, bu kültürün çeşitliliğini, zenginliğinden geçtiğini bilirdi. Türkülerini, şarkılarını, şiirlerini, değerlerini, inançlarını bilmeden insanlarla ilişki kurulamayacağını, sanatla, kültürle yetişme döneminde haşır neşir olduğundan olmalı çok erken anlamıştı. İnsanlar arasındaki tek gerçek kuralın karşındakini kendinle eşit bir muhatap olduğunu duyumsatman olduğunu bilirdi. İlişkilerin sevgiyle, özenle, emekle geliştirileceğini çok erken anlamıştı. Belki de içinde yetiştiği kültürün O'na çocukluktan kazandırdığı bir yetenekti bu.

Haluk bir iletişim ustasıydı. Herkese söyleyecek güzel bir sözü olduğu gibi, herkesi etkileyecek, kavrayacak, hiç de basma kalıp olmayan bir sözü anında üretebilirdi. Konuştukları, hemen herkeste olumlu bir izlenim yaratırdı. Bu, insanları dikkatle izlemesinden, onlara önem vermesindendi. Oda çevresinde sanırım en çok tanınan, en çok dostu olan insanlardan biriydi. Bulunduğu her ortamı canlandırır, neşelendirirdi. Toplantılarda, kongrelerde, sempozyumlarda hep çevresi canlıydı. Herkes O'nunla konuşmak için sıraya girerdi. Hep zekice hazırlanmış bir mizansenle konuşur, düşünce yolculuğuna çıkarırdı dinleyenleri. Hem Oda yöneticiliği hem de işi, O'na ülke çapında tanıdık bir çevre kazandırmıştı. Ama asıl önemlisi, insanlarla ilişkilerindeki özenli ve dostça tutumuydu.

Haluk'un dostluğuyla bir ömür geçirdik. Bizi çok erken bıraktı. Biz ondan çok hoşnuttuk. Umarım O'da bizden hoşnuttu. O'nun kabına sığmayan yaşam enerjisinden uzun süredir yararlanamıyoruz. Şimdiye kadar edindiklerimizle yetinmek durumundayız.

Serdar KUBİLAY
TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi
31. Dönem (1988-1990) Yönetim Kurulu Üyesi

HALUK İŞÖZEN

Değerli dostum Haluk İşözen ile dostluğumuz İMO İstanbul Şube Sekreterliği yaptığı yıllara kadar dayanıyor. O yıllarda "beton" ile ilgili bir kongre düzenlenmesi düşüncesini ortaya atmıştı. Bu isteğine destek bulabilmek için bir slayd gösterisi planlamıştı. Bu gösteriye doküman sağlamak amacıyla İstanbul'u dolaşarak ilginç beton uygulamalarından örnek slaydlar çekmiş, sonra bunu meslektaşlarına değişik ortamlarda sunmuştu. 1. Beton Kongresinin, o sıralarlarda kaybettiğimiz değerli hocamız Prof. Bekir Postacıoğlu'nun anısına düzenlenmesi de yine Haluk'un önerisiydi. Son yıllara kadar Ulusal Beton Kongrelerinin hemen hepsinin düzenleme ve danışma komitelerinde görev almıştır.

Şube Sekreterliği sırasında İMO ile Üniversitenin yakınlaşması için büyük çaba göstermiştir. O yıllarda İstanbul Şubesi, İTÜ ile özellikle beton konusunda bir dizi seminerler düzenlemişti. Yine benzer olarak o yıllarda dökülen betonlardan örnek alınması ve betonun denetlenmesi konusunda Haluk'un çabaları ile Üniversiteler ile İMO işbirliği yapmıştı.

Haluk İşözen uzun yıllar kimyasal katkılar sektöründe çalışmıştı. Bu sektörün ilk yıllarının adeta canlı bir tanığı gibiydi. Sektörün ilk oluşum yıllarını çok iyi hatırlar ve sektördeki kilit isimleri yakından tanırdı. Bu ilgisi, İMO Ankara Şubesinin Kimya Mühendisleri Odası ile ortaklaşa düzenlediği Kimyasal Katkılar Sempozyumunun oluşumunda da devam etti; bu sempozyumun sonraki yıllardaki tekrarlarında da önemli katkılarda bulundu ve görevler aldı.

Bildiğim kadarı ile Haluk'un örgütçü yanı alçı üreticilerinin ilk kez dernekleşmelerinde de etkili olmuştur.

Genel olarak yapı malzemesi, özel olarak beton konusuna özel bir ilgisi vardı. İMO çerçevesinde malzeme konuları ile ilgili oluşumlardan yana idi. Örneğin, yapı malzemesi konusunda inşaat mühendislerini yönlendirebilecek bir üst kurul oluşumu onun fikri idi. En büyük ideallerinden birisi de bir "Beton Enstitüsü" şeklinde ilgili tarafların bir araya gelmesini sağlamaktı. Yine İMO'ya bağlı laboratuarların envanterinin çıkarılması ve onlara bir yön verilmesi konusunda önemli çalışmaları vardı.

Son yıllarda kendisi ile birlikte THBB Kalite Güvence Sistemi çalışmalarında beraber oluyorduk. Kurul çalışmalarında önemli katkıları oldu; onun da yer aldığı kurul çalışmaları sonunda beton ve diğer malzemelerde "G İşareti" uygulamasına geçildi.

Meslektaşlarının meslek sonrası eğitimine çok önem verirdi; onunla birlikte Antalya, Bodrum, Diyarbakır ve benzeri şubelerde seminerler verdiğimizi hatırlıyorum. Takipçi bir kişiliği vardı; bu seminerler sonrasında meslektaşlarından geri dönüşler bekler, seminerlerde anlatılanların nasıl hayata geçirildiğini bilmek isterdi.

Haluk sürekli yenilikler peşindeydi. Her karşılaşmamızda malzemeye yönelik yeni bir şeyler yapmamız gerektiğinden bahsederdi. Son projelerinden birisi geleneksel yapı malzemelerini yeni teknolojilerle yeniden üretmek, diğeri ise alçı kullanımını hiç değilse İran kadar yaygınlaştırabilmekti. Yine bu konularda, şu anda kimya mühendisi olan kızı Çiğdem ile ileride ortak çalışmalar yapmayı kafasından geçirdiğini düşünüyorum.

Haluk'un kendisini inşaat mühendislerinin örgütlenmesine ve gelişmesine adamış kişilerden birisi olduğunu söyleyebilirim. Benim çok sevdiğim bir dostumdu; kendisini çok arıyorum.

Prof. Dr. M. Hulusi ÖZKUL

GÜNÜMÜZDE BETON TEKNOLOJİSİ

Yaklaşık 40 yıl önce, basınç dayanımı 40 MPa değerini aşan beton yüksek dayanımlı kabul edilirdi. Geçmişte yüksek dayanımlı varsayılan bu beton, günümüzde basınç dayanımları 200-800 MPa, çekme dayanımları 25-150 MPa arasında ve kırılma enerjileri ise yaklaşık 30000 J/m2 olan ultra yüksek performanslı yeni kuşak betonlarla kıyaslandığında oldukça düşük dayanımlı olarak kabul edilebilir. Ayrıca günümüzde, çelik lif içeriğini %15'e çıkararak normal betonun kırılma enerjisinin 1350 katına sahip bir beton üretmek de mümkündür. Betonun geçirdiği bu evrimde, ultra incelikte mineral katkılar ile birlikte kullanılan yeni kuşak süperakışkanlaştıcılar ve yüksek dayanımlı çelik liflerin katkısı büyüktür. Bu çimento esaslı kompozitler, bazı özel prefabrike elemanlar, savunma amaçlı stratejik yapılar ve zararlı endüstriyel atıkların depolanması için potansiyel malzeme niteliği taşısalar da çok yaygın uygulama alanına sahip değildirler. Basınç dayanımları 60 – 100 MPa arasında değişen ve lif içermeyen betonların yüksek yapılarda ve bazı prefabrike elemanların üretimlerinde kullanılmalarına karşın, mekanik bakımdan gevrek davranış sergilemeleri, yangına dirençlerinin düşük, erken yaşta çatlak riskinin yüksek olması ve fazla otojen deformasyon yapmaları gibi sakıncaları nedeniyle büyük altyapı projelerinde kullanım olanakları kısıtlıdır. Basınç dayanımları 40 – 50 MPa aralığında değişen betonlar büyük altyapı projelerinde yüksek dayanımlı olanlara kıyasla daha çok kullanılmaktadır.

Son yıllarda tamamlanan veya devam eden büyük tüneller, önemli köprüler ve benzeri mega projeler toplumun büyük bölümüne hizmet vermektedir. Bu stratejik önemdeki altyapılar, şartnamelerinde de belirtildiği üzere en az 100 yıllık bir servis ömrüne sahip olacak biçimde tasarlanırlar. Sürdürülebilir yapılaşma kapsamında söz konusu önemli mühendislik yapıları için uzun servis ömrü seçimindeki en önemli amaç, zamanla bakım ve onarım masraflarındaki artışın azaltılmasının yanısıra toplumdaki olası hoşnutsuzluk ve güven kaybının önlenmesidir. Bu nedenle, bu tür projelerdeki stratejik hedef, klasik betondaki gibi sadece dayanım olmayıp üstün dayanıklılık (dürabilite) koşulunun sağlanmasıdır.

Çimento ve beton üretiminde dünyada ön sıralarda yer almaktayız ve haklı olarak dünya ölçeğindeki büyük inşaat firmalarımızla da övünüyoruz. Ancak, geniş açıklıklı asma köprülerimizin, büyük ölçekli delme tünellerimizin ve batırma tüplerimizin yabancı ülke firmalarının teknoloji, bilgi birikimleri ve deneyimleriyle gerçekleştirildiğini de unutmamamız gerekir. Yurt dışı müteahhitlik hizmetlerinde, yüksek yapıların projelendirilmesinde ve inşaatında iyi bir konuma erişmemize karşın, teknoloji gerektiren yatırımlarda ve uygulamalarında arzulanan seviyeye ulaşamadık. Dünyada büyük inşaat firmalarına sahibiz, ancak bu firmalarımıza güç

katacak, bilgi ve birikim gerektiren mühendislik – müşavirlik firmaları yaratmada çok geride kaldık. Dünyanın en yüksek yapısını bizim firmalarımız değil de, bir uzak doğu ülkesinin gayri safi yurt içi hasılasının yaklaşık %17'sine sahip olan bir firma inşa etti. Küresel ekonominin egemen olduğu günümüzde bazı stratejik alanlarda güçlerimizi birleştirmenin, Ar-Ge desteği ile katma değeri yüksek projeler gerçekleştirmenin ve özgün ürünler üretmenin, sonuçta marka yaratmanın hayati önem taşıdığı bir çağdayız. Bunu iyi değerlendirmeliyiz. Devletimiz de güç birliği girişimlerini desteklemek zorundadır. Öncelikle ülkemizde ve üniversitelerimizdeki eğitime gereken önemi vermeli, daha sonra da ileri araştırmalarda güç birliğine gitmeliyiz. Ülkemizin 'çimento ve betondaki büyüklüğü' ile bu alandaki 'teknoloji ve bilgi birikimi, ortaya çıkan yayınların sayısı ve kalitesi' arasında beklenen bir ilişki mevcut değildir. Bundan dolayı, sadece devletimizin üniversitelerimize verdiği küçük desteklerle dünyada ses getirecek ve heyecan yaratacak araştırmaların yapılması mümkün değildir. Sanayimizin ve özellikle de büyük inşaat firmalarımızın geleceği açısından Ar-Ge'ye destek vermeleri ve üniversitelerimizde sınırlı olanaklarla araştırma yapan gençlerimizi desteklemeleri önemlidir.

Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR
9. Ulusal Beton Kongresi
Bilim Kurulu Başkanı

BİLDİRİLER

Life Cycle Assessment of Concrete Structures

Asko Sarja

Innokas Consulting, Commandite Company, Espoo, Finland

Abstract

A new paradigm of building and civil engineering for the concretization of sustainable building is called “Lifetime Engineering”, which means a theory and practice of predictive and optimising management of the lifetime quality of assets. The lifetime quality is the capability of the asset to fulfil the requirements of users, owners and society over its entire service l ife during the planning period (usually 50 to 100 years). The generic requirements of the asset are arising from human usability, economy, culture and ecology .

The process of Lifetime Engineering includes:

1. Lifetime investment planning and decision -making
2. Integrated lifetime design
3. Lifetime Proc urement and Contracting
4. Lifetime management of the operation, maintenance, repair, rehabilitation, modernisa tion
5. End of Life management: Reuse, recovery, recycling and disposal.

Concrete as the dominant construction material plays a central role in the development of sustainable building. Most important properties of concrete are the adjustable resistance, durability, fire resistance and sound insulation as well as a highly adjust able materials composition for example to thermal insulation. Concrete is an ingenious material for different material modifications and structural designs, which can be utilised in the design and management of very different build assets. A dvanced mechani cal and durability design and optimisation methods are needed for effective use of these possibilities. The structural system must be flexible in order to avoid obsolescence of the assets. The area of “End of Life Management” is a new focus area of development of both concrete materials and structures.

***Keywords*:** Life cycle quality, usability, durability, reuse, recovery, recycling.

Introduction

The challenge of the present generation is to lead the rapid development of a global economy towards a sustainable line in relation to the entire society, economy, social welfare and ecology. Beside the new production of the assets also a major share of th e existing traffic infrastructure like bridges, harbours, roads, airports, terminals, tunnels etc. is getting old, and the question of service life, renovation and retrofitting is bec oming increasingly acute. T he old building stock needs increasingly renov ation, repair and modernisation. Concrete as a dominant building material has an important role both in new construction and in renovation .

During last decades there have been a lot of discussion on principles and goals of sustainable construction and sust ainable build environment. Now it is time to build the real technical content for the sustainable building changing the entire paradigm of building and civil engineering.

Lifetime Engineering as Concretization of Sustainable Building

Methodology

The lifetime engineering methodology is aiming at active control and optimising the life cycle quality of build assets. This is the difference to the more passive traditional methodologies of Life Cycle Analysis (LCA) and Life Cycle Assessment. The term "L ifetime Engineering" can be defined as a theory and practice of predictive and optimising management of the lifetime quality of assets. The lifetime quality is the capability of the asset to fulfil the requirements of users, owners and society over its ent ire service life, which means in the practice the planning period (usually 50 to 100 years). The lifetime quality of build assets can be described in relation to the generic requirements arising from requirements of human usability, economy, culture and ec ology (table 1) (Sarja 2010, 2007a, 2007b, 2006, 2005b,2004a, 2004b, 2002a) .

Table 1 Generic lifetime quality requirements of build assets (Sarja 2010, 2006, 2005b, 2002a) .

1. Human requirements
• functionality in use
• safety
• health
• comfort
	2. Economic requirements
	• investment economy
	• construction economy
	• lifetime economy in:
	  ○ operation
	  ○ maintenance
	  ○ repair
	  ○ rehabilitation
	  ○ renewal
	  ○ demolition
	  ○ recovery and reuse
	  ○ recycling of materials
	  ○ disposal

3. Cultural requirements • building traditions • life style • business culture • aesthetics • architectural styles and trends • imago	4. Ecological requirements • raw materials economy • energy economy • environmental burdens economy • waste economy • biodiversity and • geodiversity

Process

The process o f Lifetime Engineering (figure 1) includes:

1. Lifetime investment planning and decision -making
2. Integrated lifetime design
3. Lifetime Procurement and Contracting
4. Integrated lifetime construction, management in operation, maintenance, rep air, rehabilitation and moderni sation (MRR&M)
5. End of Life management: Recovery, reuse, recycling and disposal

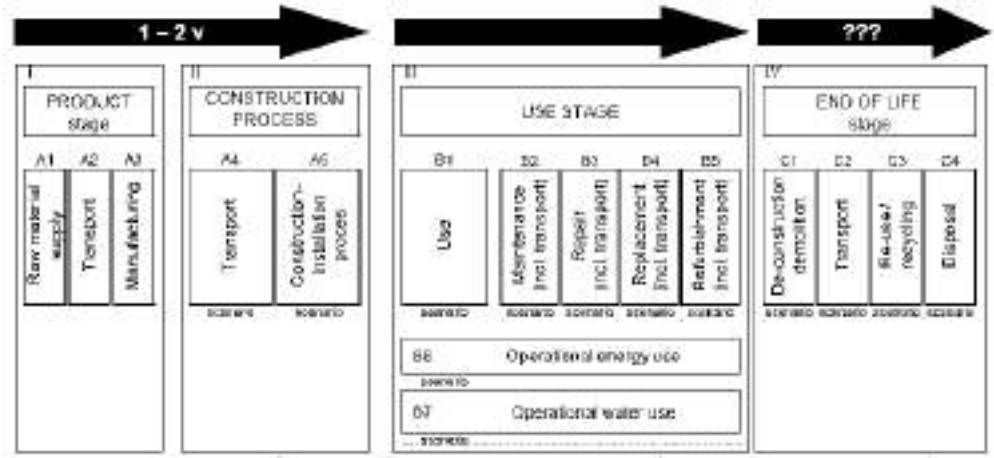


Figure 1 Linear process schedule of the lifecycle engineering of build assets (RIL 2012) .

Lifetime investment planning and decision -making is a basic issue in starting the construction, but also in lifetime asset management. Generally the investment planning and decision making is used in evaluating project alternatives, either in planning of a construction project or in MR&R planning. The procedure includes consideration of characteristi cs or attributes which decision makers regard as important, but which are not readily expressed in monetary terms. Examples of such attributes in case of buildings are: location, accessibility, site security, maintainability, and imago.

Integrated lifetime design includes a framework, a description of the design process and its phases, special lifetime design methods with regard to different aspects: human usability , economy, cultural compatibility and ecology. These aspects will be treated with parameters of technical performance and economy, in harmony with cultural and social requirements, and with relevant calculation models and methods (Kelly and Male 1996, Sarja 2004a, 2004b, 2002a) .

Integrated lifetime management and maintenance planning includes cont inuous condition assessment, predictive modelling of performance, durability and reliability of the facility, maintenance and repair planning and decision -making procedure regarding alternative maintenance and repair actions (Sarja 2010, 2006, 2002b, Sarja and Vesikari 1996) .

End of life management: Recovery, reuse, recycling and disposal is the last phase of the life cycles, including the selective demolition, recovery and reuse of components and modules, recycling of materials, and wasting of non -usable m odules, components and materials (Schultmann in Sarja 2006).

Energy Economy

About 80 % of the energy of the buildings is consumed duri ng the operation phase (figure 2). Therefore the implementation of low energy and nearly zero energy building concep ts and products is utmost important.

In case of the civil infrastructures the share of construction phase, construction materials production, demolition and end -of-life management is higher and the share of operation phase is lower than in case of buildin gs.

The production of cement is a globally a big consumer of energy, building about 5 % of the global energy consumption as well as CO_2 production. This can be reduced especially with the use of by-products like blast -furnac e slag and wastes like fly ash in concrete. Utmost important is to util ise and guarantee the long service life of concrete structures.

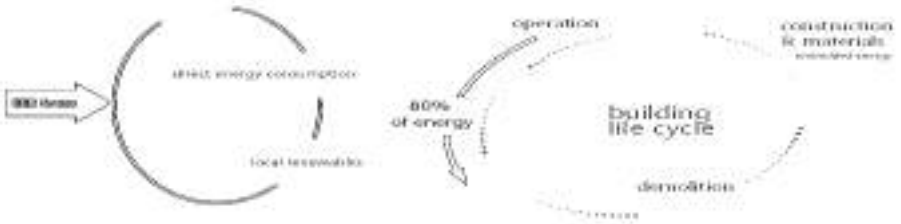


Figure 2 Energy consumption at different phases of the life cycle (World Business Council 2010).

Methods, Codes and Standards for Sustainable Building

Life Cycle Analysis (LCA)

Ecological Assessment methods for Life Cycle Analysis have been developed as the first step towards Sustainable Building mainly in 1990`s (Abu Sa'deh and Luscuere (2000)).

The family of ISO 14000 standards include *Environmental Product Declarations, EPDs,* to support Life Cycle Analysis, LCA. A complete and up -to-date set of EPDs is a key -enabler for environmental design.

Directives, Codes and Standards of European Union EU

A number of EU Directives and member States legislations concern directly and indirectly sustainability issues related to construction assets, the construction activity itself or the construction product industry, in particular the Building Energy Performance. Central directives are for examp le:

- Directive (2002/91),
- Energy Services Directive (2006/36), the Waste Framework
- Directive (98/83/EC), the Construction Product
- Directive (89/106/EC), the Equal Treatment in Employment and Occupation Directive (78/2000/EC), etc.

To safeguard the direct public interest in building products, and thus buildings, the EU Construction Product Directive (EU, 1988) specifies six essential requirements :

1. Mechanical resistance and stability.
2. Safety in case of fire.
3. Hygiene, health and the environment.
4. Safety in use.
5. Protection against noise.
6. Energy economy and heat retention.

The framework Directive for the European Product Directives provides a basis for establishing minimum eco -design requirements for energy using products (Öberg 2005). The aim of this Directive is to reduce the environmental impact of these products, contributing to sustainable development and ensuring the free movement of products in the EU (figure 3).

EPBD has significantly raised awareness of the issue of energy performan ce of buildings amongst stakeholders, and that it has indirectly led to the introduction of some new national legislation that goes beyond the requirements of the Directive. Implementation is also thought to have raised the numbers and skills of inspectors and to have led to development or wider usage of appropriate software tools for the application of the of minimum energy performance requirements that a re also 'cost-optimal' (figure 4).

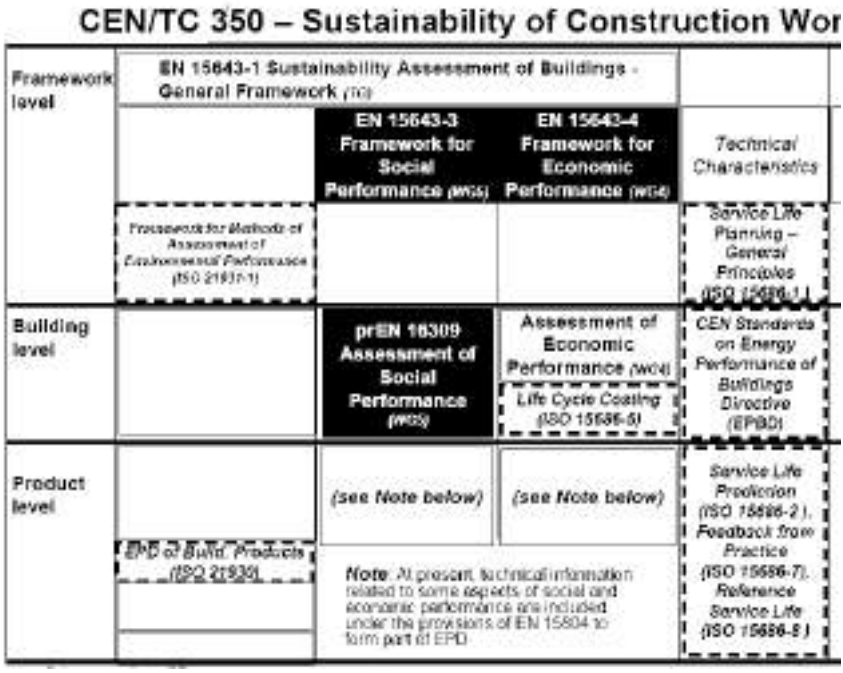


Figure 3 European codes and standards of sustainable building (CEN/TC350 2012).

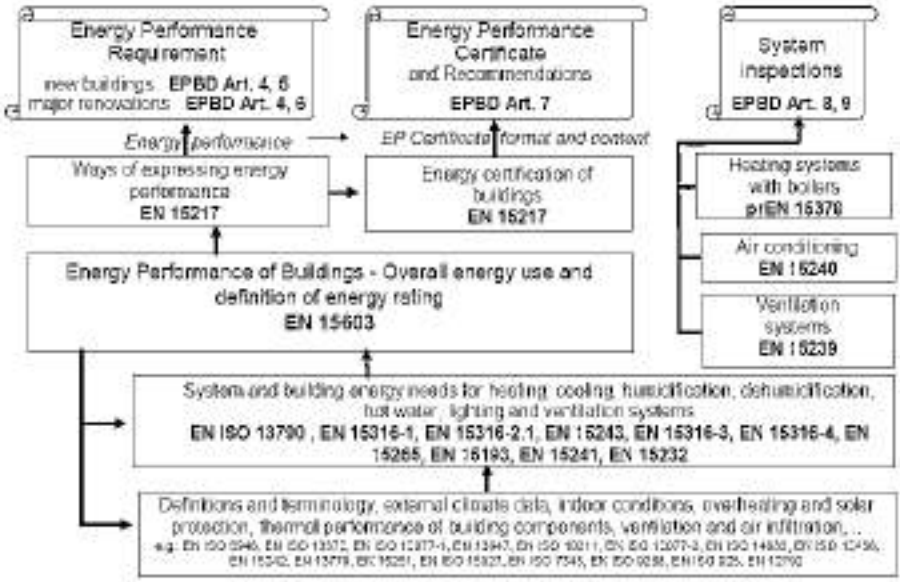


Figure 4 Methods for calculating energy performance of buildings (European Parlament, 2009) .

Life cycle oriented maintenance and facility management

Process Model

The life cycle maintenance planning and management includes all generic sustainability aspects: life cycle performance and usability, life cycle monetary economy, life cycle economy of nature (ecology) and cultural aspects (Sarja 2006). These indicators can be modelled and optimised applying the same basic methods as presented in the description of the life cycle design methods (Sarja 2002a). Future long -term maintenance, repair and renewal plans can be optimised by applying the multiple requirements optimisation and decision -making procedure (figure 5, figure 6).

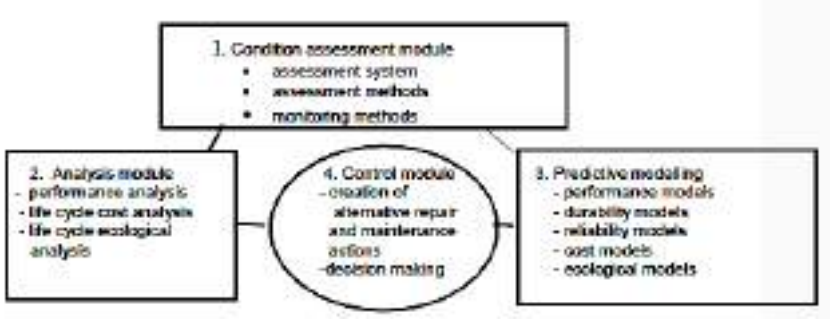


Figure 5 Scheme of a life cycle oriented facility maintenance and management system.

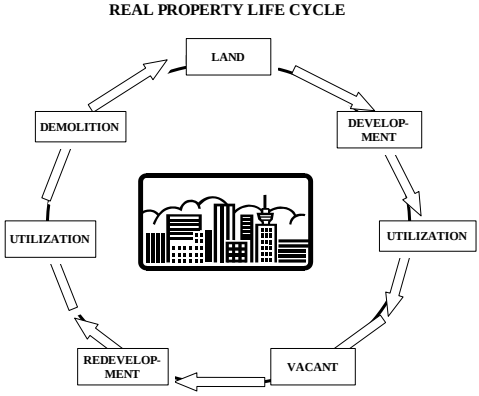


Figure 6. Phases of the life cycle management of a real estate (Koskelo 2000).

Dictating Quality Requirements of the Assets and Materials

For the life cycle management of buildings, the compatibility and easy changeability between load-bearing structures, partition structures and building service systems is important. The energy efficiency of the building is a dictating factor regarding the life time ecology of buildings. Envelope structures are responsible for most of the energy consumption, and therefore the envelope must be durable and have an effective thermal insulation and safe static and hydro-thermal behaviour. The internal walls have a more moderate length of service life length, but they have the requirement of coping with relatively high degrees of change, and must therefore possess good changeability and re-usability. In the production phase it is important to ensure the effective recycling of the production wastes in factories and on site. Finally, the requirement is to recycle the components and materials after demolition. Obsolescence of buildings is either technical or functional, sometimes even aesthetic in nature. Technical and functional obsolescence is usually related to the primary life time quality factors of structures. Aesthetic obsolescence is usually architectural in nature (Sarja 1999, 2000, 2002a, 2004b, Öberg 2005).

Civil engineering structures like harbours, bridges, dams, off shore structures, towers, cooling towers etc. are often very massive and their target service life is long. Their repair works under use are difficult. Therefore their life cycle quality is tied to high durability and easy maintainability during use, saving of materials and selection of environmentally friendly raw materials, minimising and recycling of construction wastes, and finally recycling of the materials and components after demolition. Some parts of the civil engineering structures like waterproof membranes and railings have a short or moderate service life and therefore the aspects of easy re-assembly and recycling are most important. Technical or performance related to obsolescence is the dominant reason for demolition of civil engineering structures, which raise the need for careful planning of the whole

civil engineering system, e. g. the traffic system, and for selection of relevant and future oriented design criteria (Sarja 2006, 2000).

User`s Manual

The user`s manual will be produced gradually during the design process in co-operation with the partners in design, manufacture and construction. Ordinary tasks of the structural designer are:

- Collating a list of maintenance tasks for the structural system
- Collating and applying instructions for the operation, control and maintenance procedures and works
- Checking and co-ordination of operation, control and maintenance instructions for product suppliers and contractors
- Preparing the relevant chapters for the user`s guidebook
- Checking relevant parts of the final user`s guidebook

Demolition for Recycling and Reuse

Most of the wastes in the construction sector, up to 80 %, are produced in renovation and demolition, only about 20 % come from the construction of new facilities. The dominant waste materials are earth, concrete, masonry, gypsum and wood. The active reduction of wastes in renovation and demolition is possible through the selective dismantling for recycling of structural systems, components and materials. Selective dismantling includes the detailed planning of dismantling phases, optimising the work sequences and logistics of the dismantling and selection process. The main goal is to separate the different fractions of materials and different types of components at the demolition phase in order to avoid multiple actions (Schultmann 1999, Schultmann in Sarja 2006) .

Sustainability with Concrete

Materials Technology

There are a lot of new advanced concrete materials, which are already in use or at the phase of implementation into practice. As examples, self compacting concretes, fibre reinforced concretes, thermal insulating lightweigth concretes and composites of recovery materials and by products. Besides the ordinary reinforcements also fibre reinforced plastic reinforcements, high strength steel reinforcements and stainless steel reinforcements and fasteners can be mentioned. Related to the strength, high strength concrete (compressive strength 80-110 Mpa), extra high strength concrete (compressive strength 120-190 MPA) and ultra high strength concrete (compressive strength 200-400 MPA) have been developed and even used in special cases and strengthening of structures .

Often a combination of two or several innovations can lead to success. This may lead into combination of materials as composite materials or composite structures. Often the structural solution and even the entire structural system together with production technique has to be changed

in order to achieve the potential benefits of new materials. As an example, the use of ultra -high strength concr ete can change structures towards the shape of steel structures.

Methods for Lifetime Design of Concrete Structures

Reliability Criteria

In the integrated lifetime design are needed calculation methods for three types of generalised limit states, which are (Sarj a 2010, 2005a, 2005b, 2004, 2003):

- Mechanical limit states under static and dynamic loads
- Durability limit states under physical, chemical and biological loads
- Usability limit states under obsolescence loads (changes of use or requirements)

There is an analogy between the terms and parameters of mechanical design against static and dynamic loads, durability design against degradation, but the variables and degrading models of durability are different from the models and variables of static and dyna mic design (table 2). The durability design can be carried out with the same kind of statistically based deterministic safety factor methods as mechanical design (EN 1990 2002, ISO 15686 -1 2000).

Table 2 Generic mechanical, degradation and obsolescence li mit states of concrete structures Sarja 2010).

Classes of the limit states	Limit states		
	Mechanical limit states	Degradation limit states	Obsolescence limit states
1. Serviceability limit states	1. Deflection limit state 2.Cracking limit state	1. Surface faults causing aesthetic harm (colour faults, pollution, splitting, minor spalling) 2. Surface faults causing reduced service life (cracking, major spalling, major splitting) 3. Carbonation of the concrete cover (grade 1: one third of the cover carbonated, gra de 2: half of the cover carbonated, grade3: entire cover carbonated)	1. Reduced usability and functionality, but still usable 2. The safety level does not allow the requested increased loads 3. Reduced healthy, but still usable 4. Reduced comfort, but still usable
2. Ultimate limit states	Insufficient safety against failure under loading	Insufficient safety due to indirect effects of degradation: • heavy spalling • heavy cracking causing insufficient anchorage of reinforcement • corrosion of the reinforcement causing insufficient safety.	Serious obsolescence causing total loss of usability through: • loss of functionality in use • safety of use • health • comfort • economy in use • MR&R costs • ecology • cultural acceptance

Table 3. Descriptions of generic limit states of concrete structures (Sarja 2010).

Classes of the limit states	Limit states		
	Mechanical limit states under static and dynamic loads	Durability limit states under physical, chemical and biological degrading loads	Usability limit states under loads causing obsolescence through changes of use and requirements
1. Serviceability limit states	1. Deflection limit state 2. Cracking limit state	1. Carbonation or penetration of salts or chemicals in concrete cover (grade 1.1: in one third of the cover, grade 1.2: in half of the cover, grade 1.3: in entire cover) 2. Surface faults causing aesthetic harm (colour faults, pollution, splitting, minor spalling) 3. Surface faults causing reduced service life (cracking, major spalling, major splitting)	Reduced usability and functionality, but still usable • The safety level does not allow the requested increased loads • Reduced healthy, but still usable • Reduced comfort, but still usable
2. Ultimate limit states	Insufficient safety against failure under loading	Insufficient sa fety due to indirect effects of degradation: • heavy cracking or spalling causing insufficient anchorage of reinforcement • heavy spalling causing reduced cross section • corrosion of the reinforcement causing insufficient safety.	Serious obsolescence causing total loss of usability through: • loss of functionality in use (use of building, traffic transmittance of a road or bridge etc.) • safety of use • health • comfort • economy in use • MR&R costs • ecology • cultural acceptance

When looking at the statistics of demolit ions of buildings and civil infrastructures the following reasons for refurbishment or demolition have been stated (Aikivuori 199 4, Izuka 1988):

- Degradation is the dominant reason for maintenance and minor repair of concrete structures
- Degradation is the the main reason for refurb ishment of buildings in 17 % and in 26 % (steel) to 27 % (concrete) of demolition of bridges . In individual cases degradation can be a dictating reason for refurbishment or demolition of the structures, which are working in high ly degrading environment.
- Obsolescence is the cause of refurbi shment of buildings in 26 % and the reason of demolition of bridge s in 74% of demolition cases .
- In the case of modules or component level renewals of facilities the share of obsolescence is st ill higher.

This means that the obsolescence is the dominating reason for refurbishments and demolitions of the build assets and their structures.

A conclusion of this, and a challenge for structural engineering is, that we have to include the degradati on and obsolescence criteria into the design, as well as into the MR&R (Maintenance, Repair and Rehabilitation) planning of structures. In this use we need new methodology, models and methods for analysis, optimisation and decision making (Iselin and Lemer 1993, Sarja 2010, 2006, 2005a, 2005b, 2004b, 2003, 2002b) .

There is an analogy between the terms and parameters of mechanical design against static and dynamic loads, durability design against degradation, but the variables and degrading models of durabil ity are different from the models and variables of static and dynamic design.

The durability design can be carried out with the same kind of statistically based deterministic safety factor methods as mechanical design (Sarja 2010, 2003, 2002a, 2002b, 2000 b, Sarja and Vesikari 1996).

Usability design against obsolescence can be based on statistical risk analysis methods (Sarja 2010, 2006) . A comparison of the terms and variables of mechanical design and dur ability design is presented in table 4 .

Table 4 . Comparison of static and dynamic (mechanical) limit state method, the degradation limit state method and obsolescence limit state (Sarja 2010),

Mechanical limit state design	Degradation limit state design	Obsolescency limit state design
1. Strength class 2. Target strength 3. Characteristic strength (5% fractile) 4. Design strength 5. Partial safety factors of materials strength 6. Static or dynamic loading onto structure 7. Partial safety factors of static loads 8. Service limit state (SLS) and ultimate limit state (ULS)	1. Service life class 2. target service life 3. Characteristic service life (5% fractile) 4. Design life 5. Partial safety factors of service life 6. Environmental degradating loads onto structure 7. Partial safety factors of environmental loads 8. Serviceability and ultimate limit states.	1. Service life class 2. Target service life 3. Characteristic service life (5% fractile) 4. Design life 5. (Partial safety factors of service life 6. Obsolescence loading onto structure 7. Partial safety factors of obsolescence loading 8. Serviceability and ultimate limit states related to obsolescence in relation to the basic requirements

Lifetime Design of Concrete Structures

Durability Design

Design Procedure

Durability design pr ocedure is presented in figure 7 .

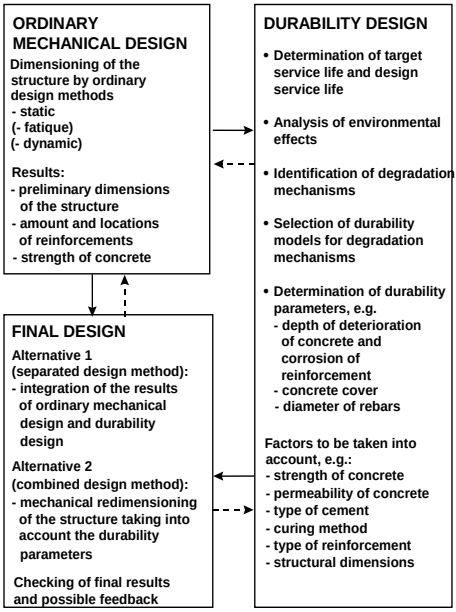


Figure 7 Flow chart of the durability design procedure, concrete structures as an example (Sarja 2005b, 2002a).

Degradation Models of C oncrete Structures

The principal degradation process of concrete structures is presented in figure 5.

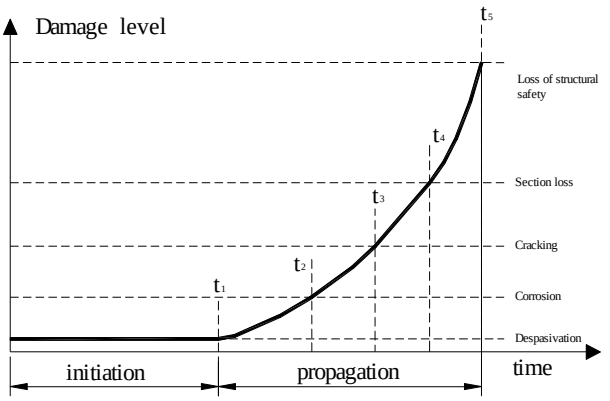


Figure 7 Service life model and limit states related to reinforcement corrosion (Sarja and Vesikari 1996, Andrade et al 2005 , FIB 2006).

Two principal types of degradation models have been presented:

- Statistical degradation models (Sarja and Vesikari 1996, Sarja 2010, 2006, FIB 2006)
- RILEM TC130 CSL models (Sarja and Vesikari 1996)

Characteristic properties of these models are as follows (Sarja 2005c):

- Statistical degradation models are based on physical and chemical laws of thermodynamics, and thus have a strong theoretical base. They include parameters, which have to be determined with specific laboratory or field tests. Statistical reliability method can be directly applied with these models (Sarja 2010, 2006).
- RILEM TC 130 CLS models are based on paramet ers, which are available from the mix design of concrete. The asset of these models is the availability of the values from the documentation of the concrete mix design and of the structural design (Sarja and Vesikari 1996).

The European standard -"EN 206-1 Concrete - Specification, performance, production, and conformity" (CEN, 2001) is a practical quantitative methodology for durability design . EN206-1 contains an agreed qualitative classification system as a synthesis of "best available" knowledge, covering the relevant degradation mechanisms and exposures in atmospheres, fresh water, seawater, and soil, indicating the decisive character of moisture and chloride (CEN 206-2001 Sarja 2005c, 2006)). The exposure classes of C EN-206 are defined for different degradin g loads, as presented in table 5 .

Table 5 Exposure classes for concrete structures (C EN-206 2001).

Class designation	Description of the environment
1. No risk for corrosion	
X0	- Plain concrete structure, if no chemical attck
2. Corrosion induced by carbonation	
XC1	Dry or permanently wet
XC2	Wet, rarely dry
XC3	Moderate humidity
XC4	Cyclic wet and dry
3. Corrosion induced by chlorides other than sea water	
XD1	Moderate humidity
XD2	Wet, rarely dry
XD3	Cyclic wet and dry
4. Corrosion induced by chlorides other than from sea water	
XS1	Exposed to airborn salt but not in direct contact with sea water
XS2	Permanently submerged
XS3	Tidal, splash and spray zones
5. Freeze/thaw attack with or without de -icing agents	
XF1	Moderate water saturation, without de -icing agent
XF2	Moderate water saturation, with de -icing agent
XF3	High water saturation, without de -icing agent
XF4	High water saturation, with de -icing agent
6. Chemical attack	
XA1	Slightly aggressive chemical environment
XA2	Moderate aggressive chemical environment
XA3	Highly aggressive chemical environment

The design service life control is based on minimum requirements of concrete cover against corrosion in different exposure classes of CEN -206 and for different types of reinforcement. These are specified for reference service lives of 50 years and 1 00 years in table 6 (Sarja 2005c) . The strength class of concrete is C35 -C40 and there are in some cases also specific requirements fot cement and admixtures.

Table 6 Minim um required thickness of concrete cover (Sarja 2005c) .

Exposure class	Minimum concrete cover for service life of 50 years (mm)		Minimum concrete cover for service life of 100 years (mm)	
	reinforcement sensitive against corrosion (prestress)	ordinary reinforcement	reinforcement sensitive against corrosion (prestress)	ordinary reinforcement
X0	10	10	10	10
XC1	20	10	20	10
XC2	30	20	35	25
XC3, XC4	35	25	40	30
XS1, XD1	40	30	45	35
XS2, XD2	45	35	50	40
XS3, XD3	50	40	55	45

Usability Design against Obsolescence

The obsolescence analysis and optimisation is always made with comparison of planning or design alternatives especially on assets level, comparing their response towards changing requirements and supposed changes of u ser demands. The following methods can be applied in obsolescence analysis, control and optimisation (Iselin 1993, Sarja 2006) :

- Quality Function Deployment method (QFD)
- Multiple Attribute Decision Aid (MADA)
- Risk Analysis (RA) Life Cycle Costing method (LCC)
- Simulations

Design for health

The healthy checking can follow national and international codes, standards and guides. The main issues in the case of buildings are to avoid moisture in structures and on finishing surfaces, and in the case of both building and civil engine ering structures, to check that all materials used do not cause emissions or radiation, which are dangerous to the health and comfort of the users and workers . In some regions the radiation from the ground must also be eliminated though the insulation and ventilation of the foundation. Thus, the main tools for health design are: selection of materials, especially finishing materials, eliminating risks of moisture in structures through water proofing, drying under construction and v entilation, and elimination of possible radioactive earth radiation with air proofing and ventilation of ground structures (Sarja 2006) .

Re-use, Recovery and Recycling

It is important to recognise that the recycling possibilities of the building components, modules and even technical systems shall be reconsidered in connection with design. The higher the hierarchical level of recycling, the higher also the ecological and economic efficiency of recycling. Therefore the re-use of entire components, modules, systems or even assets has to be preferred, even if there are difficulties in quality requirements and quality control in re-use (Schultmann in: Sarja 1999, 2006), Willkomm 1990) .

Material recycling is a tool used to save raw materials, but the reduction of environmental burdens and energy consumption is usually small. The components of the environmental profile of the basic materials usually already include the recycling efficiency.

The recycling ability of the structural materials and components depends on the degree and/or the technical level of the desired re-use. Special issues to be treated in the design of structures and materials for re-use and recycling are (Schultmann in: Sarja 2006, Sarja 1997a, 1997b) :

- separability of the structural components or materials during demolition of a structure e.g. the use of demountable structural components using suitable connections and joints
- structural separation of components, modules or systems with different service lives and different recycling techniques.
- reduction in the variety of materials
- separation ability of materials, which cannot be recycled together
- avoidance of insoluble composite substances and/or composite substances that are either only slightly soluble or soluble only with a high expenditure or energy input.

Several civil engineering structures, like roads and streets, are major consumers of raw materials. In those structures, materials consumption can be reduced with the use of industrial by-products like fly ash and blast furnace slag, and construction and demolition waste materials like crushed concrete and masonry. Detailed quality specifications and an effective quality control are needed for the use of these secondary materials.

EU initiatives include the EU Raw Materials Initiative (EU 2008), which proposed an integrated strategy to deal with the various challenges related to access to raw materials, including secondary raw materials that can be obtained in the EU through more and better recycling. It clarifies the basic concepts such as the waste hierarchy, the prevention of waste, and the incorporation of life-cycle thinking. The Directive lays down important targets for the recycling of waste for the year 2020: 50% for household waste recycling and 70% for construction and demolition waste.

Conclusions

Incorporating life cycle principles into the practical design, construction and maintenance of traffic structures is quite an extensive process. Application of life cycle principles is widening the scope of structural design to the extent that the entire working processes must be re-engineered. The tradition of structural engineers in applying mathematical and physical calculation methods in design will

serve as a good basis for applying the additional multiple calculation meth ods that are needed in life cycle structural engineering.

Concerning concrete materials and structures, new basic knowledge will be needed especially regarding environmental impacts, hyd rothermal behaviour, durability and service life of materials and structures in varying environments. Special lightweight concretes and composites are serving the energy efficiency of buildings. Structural design methods that are capable of life cycle desi gn, multiple analysis decision -making and optimisation will have to be further developed. Recycling design and technology demand further research in design systematics, recycling materials and structural engineering. The knowledge obtained will have to be put into practice through standards and practical guides.

References

Abu Sa'deh, A.J., Luscuere, P.G. (2000) Ecological assessment of building designs. Existing methodologies and tools . Proceedings: RILEM/CIB/ISO Symposium ILCDES 2000 . Helsinki, Finland, pp 355-359

Aikivuori, Anne 1994, Classsification of demand for refurbishment projects. Acta Universitatis Ouluensis, Series C, Technica 77 .University of Oulu, Department of Civil Engineering. ISBN 951 -42-3737-4.71 pp.+7 Appendices.

Andrade C. et al, Corrosion Propagation and Structural Consequences. International Conference on Concrete and Reinforced Concrete, concrete and reinforced concrete - development trends , Moscow, 5 -9 September 2005.

CEN/TC 359 -"Sustainability of construction works " 2012.

CEN 206-1 2000 Concrete -Part1: Specification, performance, production and conformity . CEN European Committee for Standardisation, December 2000. REf. No EN 206 -1:2000 E. 72 pp.

EN 1990: 2002: Eurocode - Basis of structural design. CEN : European Committee for Standardisation. Ref. No. EN 1990:2002 E. 87 pp.

EN 15643 -1 Sustainability of construction Works .

European Parlament, Policy Department, Economic and Scientific Policy, Study on Energy Performance of B uildings, IP/A/ITRE/FWC/2006 -087/lot 4/C1/SC4 , February, 2009.

EU Construction Product Directive (EU, 1988).

EU Waste and Raw Material Directive 2008/98/E C of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008

FIB (2006), Model code for service life design . FIB Bulletin 34, Lausanne, 2006. 110 pp. ISBN 2 -88394-074-6.

ISO 15686-1:2000, "Buildings and Constructed Assets, Service Life Planning, Part 1 General Principles" and Part 5 "life cycle costing"

Iselin, D.G., Lemer, A.C., (Eds) 1993., The Fourth Dimension In Building: Strategies For Minimizing Obsolescence. National Research Council, Building Research Board. National Academy Press, Washin gton, D.C. 59 pp. + Appendix 42 pp.

Iizuka, Hiroshi (1988), A statistical study of life time of bridges. Structural Eng./Earthquake Eng. Vol. 5 No1, pp. 51 -60, April 1988. Japan Society of Civil Engineers.

Kelly, John and Male, Steven 1996, Value Manageme nt in Design and Construction. The economic management of projects. E&FN SPON, London, 1996. 181 p.

Koskelo, Taina, 2005, A Method for Strategic Technical Life Cycle Management of Real Estates. Doctor Thesis. Helsinki University of Technology, Doctor diss ertation Series 2005/1. Espoo 2005. 230 p. + App..

Öberg, Mats (2005), Integrated life cycle design, application to Swedish concrete multi -dwelling buildings. Doctor Thesis, Lund University of Technology, Division of Building Materials, Report TVBM-1022, Lund 2005. 262 p. + Annexes.

RIL 216 -2013, Lifetime Management of assets (In Finnish). Finnish Association of Civil Engineers,Helsinki, 2013. 238 p.

Sarja, Asko 2010, Reliability principles, methodology and methods for lifetime design. Materials and Structures (2010) 43:261–271.

Sarja, Asko, 2007a, RIL 242 -2007 Glossary of Lifetime Engineering (in English, German, Swedish and Finnish). Finnish Association of Civil Engineers, Helsinki 2007. 26 pp.

Sarja, Asko, 2007b, Lifetime optimised planning and de sign concept. 3rd International Conference Lifetime Oriented Design Concepts, Ruhr Univivil Engineering. Proceedings, p. 3 – 20. Aedificatio Publishers, Freiburg, 2007.

Sarja, Asko, (Editor), 2006, Predictive and Optimising Life Cycle Management of Buildi ngs and Infrastructures. 667 pp. Taylor&Francise, London, 2006. ISBN 10: 0 -415-35393-9 (hbk) ISBN 10: 0-203-34898-2 (ebk)

Sarja, Asko, 2005a, Generic limit state design of structures. Proceedings of the 10DBMC International Conférence On Durability of Building Materials and Components, LYON, France, 17 - 20 April 2005. 8 pp.

Sarja, Asko 2005b. Lebenszyklusqualität und dauerhaftigkeit als zentrale Entwurfskriterien der Konstruktionen. Betonwerk+Fertigteil Jahrbuch 2005, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin, 2005. pp. 22-27.

Sarja, Asko 2005c, Applications of European standards into durability design guidelines. International Conference on Concrete and Reinforced Concrete, concrete and reinforced concrete - development trends, Moscow, 5 -9 September 2005.

Sarja, Asko (2004), Generalised lifetime limit state design of structures. Proceedings of the 2nd International Conference, Lifetime -Oriented Design Concepts , ICDLOC, pp. 51-60. Ruhr - Universität Bochum, Germany, 2004. ISBN 3-00-013257-0

Sarja, Asko 2003, Lifetime pe rformance modelling of structures with limit state principles. in: Proceedings of 2nd International SymposiumILCDES2003, Lifetime Engineering of Buildings and Civil Infrastructures , Kuopio, Finland, December1 -3, 2003. Association of Finnish Civil Engineer s pp. 59-66

Sarja, Asko 2002a, Integrated Life Cycle Design of Structures . 142 pp. Spon Press, London 2002. ISBN 0-415-25235-0.

Sarja, Asko 2002b, Reliability based life cycle design and maintenance planning. Workshop on Reliability Based Code Calibration, Swiss Federal Institute of Technology, *ETH* Zurich, Switzerland , March 21 -22,.

Sarja, Asko (2000), Design of Transportation Structures for Sustainability. IABSE Congress 2000, Luzern . International Association of Bridge and Structural Engineering , Zuerich.

Sarja, Asko, 1999, Environmental Design Methods in Materials and Structural Engineering. RILEM Journal: Materials and structures , Vol. 32, , pp 699 -707.

SARJA, Asko (1997a), A vision of sustainable materials and structural engineering . In: Selected research studies from Scandinavia. Report TVBM -3078. Lund University, Lund Institute of Technology. Lund, Sweden (1997). Pp. 153 -163.

SARJA, Asko (1997b), Framework and methods of life cycle design of building *s*. Symposium; Recovery, Recycli ng, Reintegration, R´97, Geneva, Switzerland, February 4 -7, 1997. EMPA (1997), Volume VI, pp. 100 -105.

Sarja, Asko & Vesikari, Erkki (Editors) 1996, Durability design of concrete structures . RILEM Report of TC 130 -CSL. RILEM Report Series 14 . E&FN Spon, C hapman & Hall, 1996 . 165 pp

Schultmann, Frank (1999), Material flow based deconstruction and recycling management for buildings. R`99, Recovery, Recycling, Re -integration Congress , Geneva, Switzerland, February 2 -5, 1999. Proceedings. Volume I, pp. 253-258. EMPA (1999).

Willkomm, W. (1990), Recyclinggerechtes Konstruieren im Hochbau : Recycling -Baustoffe einsetzen, Weiterverwertung einplanen. Köln : Verlag TÜV Rheinland (1990).

World Business Council, Report for Sustainable Development , 2010.

Eco Efficient Concrete for Sustainable Construction

Saad Jalali
(University of Minho, Campus of Azurem, Portugal)
Antalya, Turkey, April 2015

1

Contentes

1. Sustainable Development
2. Sustainable Construction
3. Eco Efficient Concrete
   a) Challenge of Integrating Eco/Efficiency
   b) Estimating Eco-Efficiency (Life Cycle Analysis - LCA)
   c) Increasing of Eco - Efficiency (Short Term & Long Term)
4. Integrating Durability
   a) Life Cycle Analysis
   b) Increasing Durability (Materials, Construction Processes)

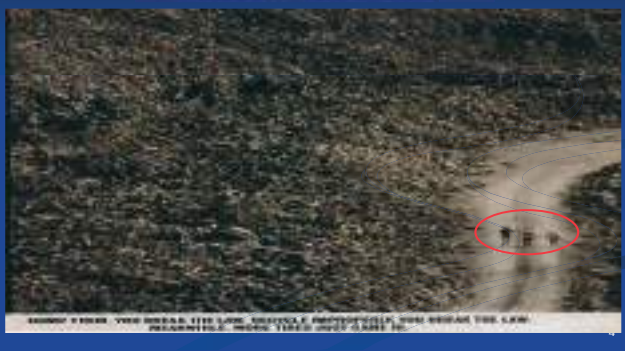
2

Sustainable Development: Justifying 4 Factors

1. Rapid Growth of World Population
2. Urbanization of the Planet
3. Massive Expansion of Consumption:
4. Adoption of Technologies Based on Short Term Gains

3

Consequences: Wastes Increases



4

Cost of Natural Desasters:

Increased 900% (1960 compared to 1990)



Desmoronamentos- Suíça





Inundações- Itália

5

Sustainable Development

- Definition:
  - Satisfaction of our Necessities while Enabling Future Generation to be able to Satisfy Their Needs.
- Sustainable Development Integrates: Economic, Environmental and Societal Aspects

6

Environmental Principles

- **Maintaining: Vitality and Diversity of the Earth**
- **Using Renewable Recourses**
- **Minimizing the Use of Non Renewable Resources**
- **Minimizing Pollution and Damage to Life**
- **…….**

7

Economic Principles

- **Promote Equality between Nations and Generations**
- **Avoid Inequalities**
- Not Impoverishing One Group for Enriching Another,
- Guarantee the Real Cost
- Encourage Ethical Procedures
- Promote Fair Distribution of Costs and Benefits
- Support Local Economy

8

Social Príncipes

- Enhancing the Quality of Human Life
- Promoting social Fairness Between All Nations
- Allow Social and Cultural Integration
- Guarantee the Right of Self Determination
- Encourage participation and Cooperation of All in Decision Making Process
- Providing Opportunities for All to Develop Their Capacities

9

Construction Industry

- Has Economic, Environmental and Social Importance.
- Largest Industrial Agglomerate of EU
- 25% of EU Industrial Production
- Produces 40% of Wastes (400 MT)
- Consumes 40% of Energy
- CO2 Emissions 30%

10

Sustainable Construction: The Necessary Change

- Dematerialization: absolute and relative (**Material Usage** Increased 67% between 1970 e 1995),
- Environmental Selection of Materials,
- Achieving Designed Life,
- Minimizing Energy Consumption
- Flexibility: prolongs Useful Life,
- Deconstruction: Avoiding Demolitions,
- Minimizing Construction Waste,
- Rehabilitation versus New Construction

11

Achieving Dematerialization

- Increasing the efficiency in using Materials
- Substitution of Materials
- Reusing and Recycling Materials and Products
- Sharing the Usage by more than One User
- Lighter Material does not Mean more Eco Friendly
- Replacement should look after Service Life
- Increasing Service Life May Result in Obsolete Products
- Reduction of 90% of Materials is Needed

12

Concrete:
Largest Construction Material Used

Annual Production:

- Concrete: 5 450 Mm^3
- Cement: 1 500 Mt;
- Aggregate: 9 000 Mt
- Other Components: 1 300 Mt

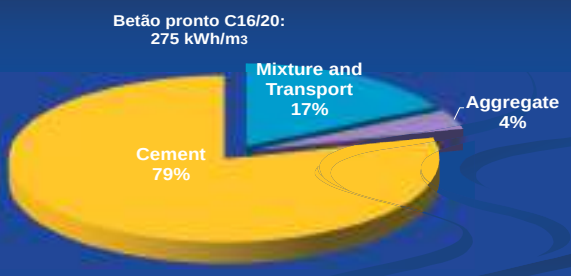
13

Integral Evaluation of Structures

- Concrete Structures have to Integrate:
  - Mechanical Stability (Static and Dynamic Forces)
  - Durability: Achieving Designed Life
  - Environmental Performance: Cradle to Tomb

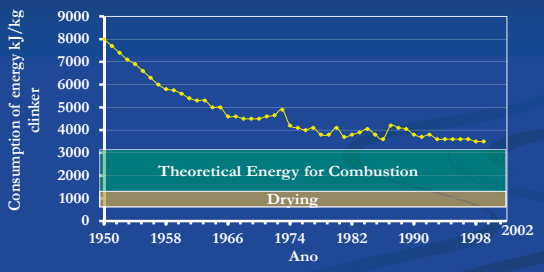
14

Energy Consumption for Ready Mix Concrete



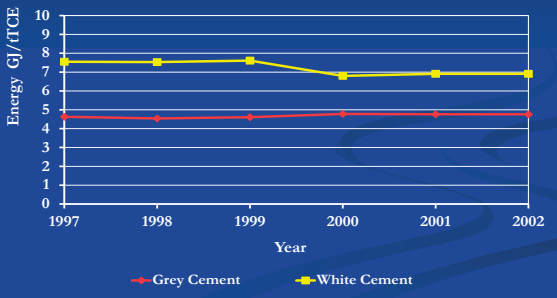
15

Energy Consumption:
Advances in Clinker Production



16

Energy Consumption in Production:
White Cement (+43%)



17

Emissions in Production:
White Cement & Grey Cement

+60% NOx

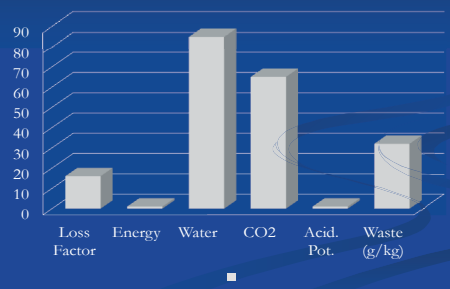


+53% CO2



18

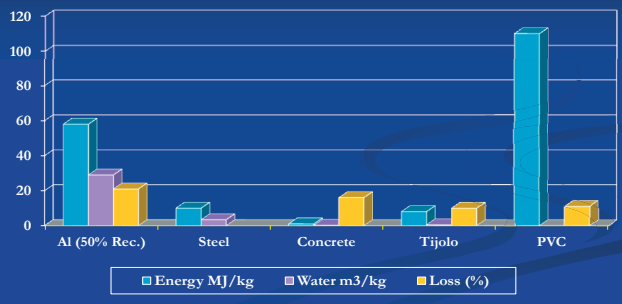
Environmental Effects of Concrete



19

Environmental Effects: (Energy, Water, Loss Factor)

Aluminum, Steel, Concrete, Brick, PVC



20

Concrete verses Other Materials:

Brick

- Energy 3 times more
- CO2 2 times more

Stone

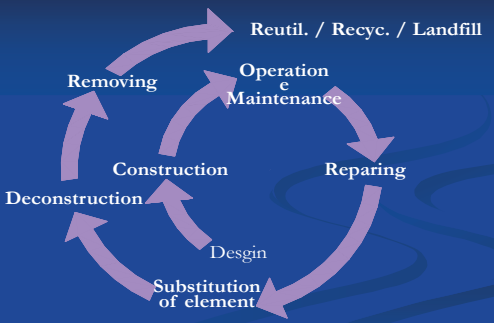
- Energy 10 times less
- CO2 is 8 times less

Steel (100% Recycled)

- Energy 10 times more
- CO2 is 5 times more

21

Evaluation Considers:
All Phases of Life Cycle



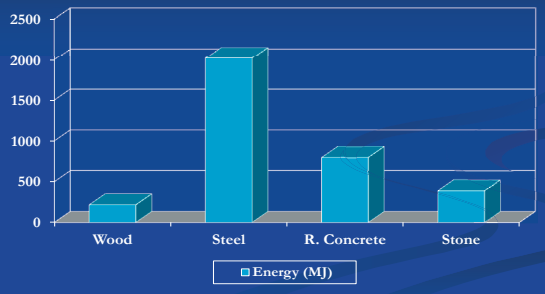
22

Metodologia: da Avaliação do Ciclo de Vida

1. **Define Functional Unit:** Example: paint for painting 1 m2
2. **Quantification:** Emissions, Materials, …
3. **Imapct Evaluation:** classify emissions e quantify impact level (normalization).
4. **Interpretation:** Controversial Step

23

Primary Energy Consumption
Building a 3m High Column



24

Achieving Eco – Efficient Concrete: Short to Medium Term

- Partial Substitution of Portland Cement;
- Total or Partial Substitution of Aggregates by Wastes;
- Partial or Total Substitution of Concrete by Other Materials;
- Investing in Durability;

25

Partial Substitution of Cement

Success Examples:

1. Fly Ach
2. Fly Ach from Tire Energy Valorization
3. Blast Furnace Slag
4. Rice Husk Ash
5. Wastes from Ceramic Industry,
6. Meta – Clay, Metakaolin
7. Reused Glass

26

Metakaolin

- Treatment of Kaolin at 650 ºC,
- High Possolanic Properties,
- Finely Grinded May Replace 5 to 15 %
- Significant Enhancement of Concrete Performance (Environmental, Mechanical and Durability)

27

Compressive Strength
10% e 15% Substitution by Metacaulino

Mix / Age	7	28	56	90	Efficiency of addition 7	28	56	90
C330	40,7	44,5	48,5	51,4	0	0	0	0
C33M10	36,9	48,7	55,6	60,8	-9	10	15	18
C33M15	39,9	54,5	59,6	64,6	-2	23	23	26
C33SF10	55,3	62,4	64,8	71,4	36	20	9	39
C33HRM10	51,0	62,7	66,0	60,8	25	41	36	36

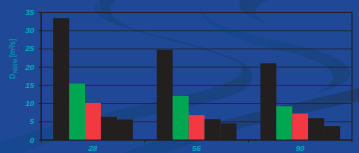
15% Substitution is more Advantageous

28

Durability Evaluation:
Chloride Migration

Mix / Age	28	56	90	Efficiency of Addition 28	56	90
C330	33,44	24,77	21,07	0	0	0
C33M10	15,40	12,00	9,20	-54	-51	-56
C33M15	10,17	6,84	7,25	-70	-72	-65
C33SF10	6,36	5,73	6,03	-81	-77	-71
C33HRM10	5,63	4,57	3,83	-83	-82	-82

15% is more Efficient

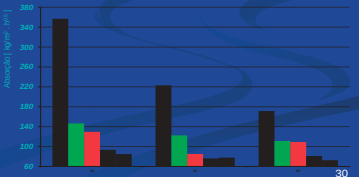


29

Durability Evaluation:
Capillary Water Absorption

Amassadura / Idade	28	56	90	Efficiency of Addition 28	56	90
C330	356,8	222,9	171,3	0	0	0
C33M10	146,4	122,5	111,2	-59	-45	-35
C33M15	129,5	85,0	109,1	-64	-62	-36
C33SF10	93,4	76,0	81,0	-74	-66	-53
C33HRM10	84,8	77,6	72,5	-76	-65	-58

15% is Slightly more Efficient



30

Eco Efficient Concrete: Longo Term Strategies

Finding New Binders to Substitute Portland Cement

Geopolymer:

- Alkali Activation of Alumina and Silica Produces an Stable Binder

Materials:

- Metakaolin, Industrial Wastes, Fly Ash
- Alkalis

Advantages:

- Rapid Strength Gain
- High Acid and Temperature Resistance

31

Compressive Strength of Geopolymer

Age	Rupture Force	Strength
1 dia	79 KN	49 MPa
2 dias	92.93 KN	58 MPa
7 dias	113.58 KN	71 MPa
14 dias	124.08 KN	77 MPa
21 dias	123.73 KN	77 MPa

32

Geopolymer Adhesion to Steel Bars

Limit Tension

PC Concrete >3.6 Mpa >3.35 Mpa >2.81 MPa

Geop. Conrete >6.6 MPa >6.75 MPa >5.48 MPa

33

Acid Resistance of Geopolímero

HCl Attack



Geopolímero PC Concrete

34

Substitution of Aggregates

Success Examples:

- ✓ Wastes from Ceramic Industry,
- ✓ Used Plastic Bottles
- ✓Fly Ash and Slags
- ✓ Construction and Demolition Wastes,
- ✓ Fly Ash and Slag from Incinerating Urban Wastes.

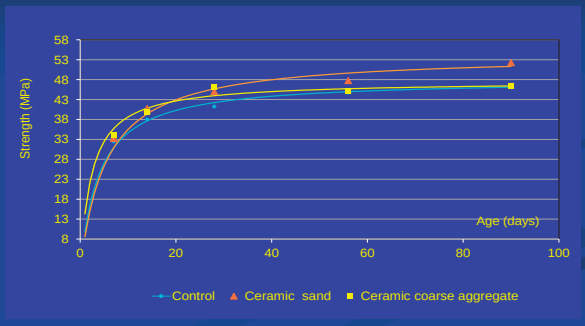
35

Ceramic Wastes



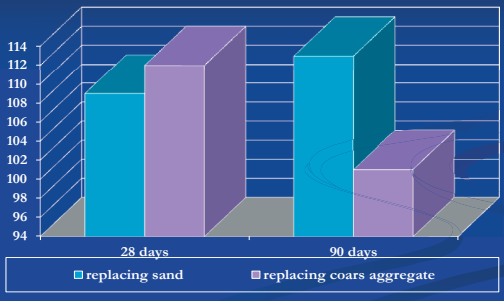
36

Compressive Strength:
Substitution of Aggregate
(50 Mt/Year Wall Tile EU)



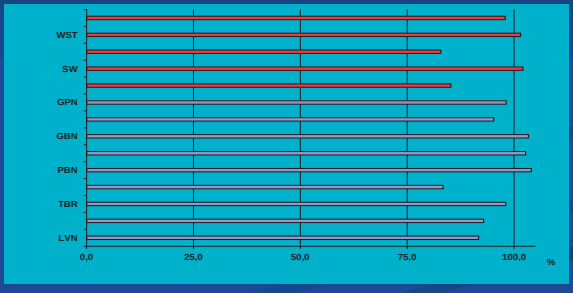
37

Activity Index:
When Used as Aggregate



38

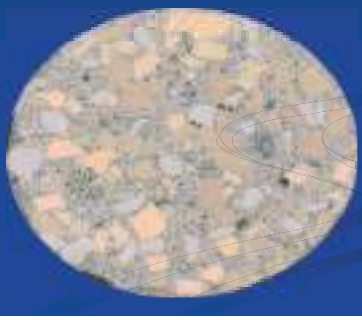
Activity Index
Partial Substitution of Cement by Ceramic Waste



39

Ceramic Waste as Aggregate

Concrete with Special Appearance



40

Ultra light Concrete: Used Polyethylene Bottles

- 40% Volume Replacement of Concrete
- Density 0.2 e 1.2 g/cm3
- Strength 0.2 e 3 MPa.
- Applications: Thermal Insulation and Concrete for Structural and Non Structural Filling

41

Possible Replacements for Concrete:

Earth Construction

- ✓Environmental Advantages: Availability, Eco-Efficiency
- ✓Acoustic and Thermal Comfort
- ✓Assured Reutilization
- ✓Compacted Earth Blokes: Economic Constructions and High Intensive Labor



Vivenda de luxo



Simple Compacting Blok apparatus

42

Increasing Durability: Need for Integral Approach

All Phases Should Be Considered:

- **Design:** Integrate Durability Performance,
- Selecting Adequate Materials for Durability
- **Construction Processes:** Using New Technologies (Self Compacting Concrete; Controlled Permeability Framework, Adequate Curing,…)

43

Ensuring Durability : Concrete

- Mix Design
- Binder
- Placing
- Framework
- Curing

44

Ensuring Durability : Two Strategies for Steel Bars

1. Protective Envelope for Bars
   - High Performance Concrete;
   - Enhanced Cover Layer
   - Protective layers
2. Corrosion Resistance Reinforcement
   - Stainless Steel
   - Galvanized Steel
   - Epoxy Protected Steel Bars
   - Non Ferrous Reinforcement

45

Enhancing Durability:
Controlled Permeability Formwork

- Rremoves Air and Excess at Formwork Surface;
- Drains the Excess Water
- Increases Cement Content in Cover Layer (up to 100 kg/m3);
- Retain Water and Providing Later, Enhancing Cover Layer up to Equivalent to 15 – 20 mm

46

Safeguarding Durability:
Placing and Curing Conditions

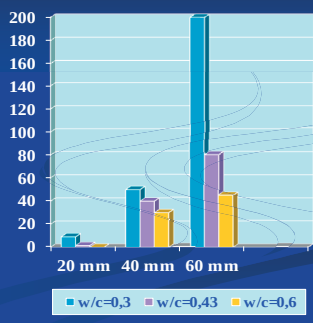
- Factors Affecting Placing of Concrete:
  - Wind, Air and Concrete Temperature,
- Human Skin versus Cover Layer

- How Long is Adequate for Curing Time?
- Factors Affecting Curing Time:
  - Temperature
  - Water Cement Ratio

47

Effect of Thickness and Quality of Cover Layer on Durability

- ✓ Increasing cover layer from 20 to 30mm increases service life; by 225% .
- ✓ More than 50% of Structures have cover layer less than designed (Norway)
- ✓ Cover Layer is not a detail of structure



48

All Stakeholders Should Participate:
Legislators, Promoters, Desginers, Contractors, Consumers



49



"The World is But One Country and Mankind Its Citizens"



51

Quantification of Construction Waste Amount

Said Jalali

Professor Associado com Agregação, Universidade do Minho, Campus de Azúrem, 4800-058 Guimarães, said@civil.uminho.pt

Abstract

This article outlines the importance of the quantification of wastes for a sound and adequate management of waste in the construction of buildings. It is noted that such quantifications provide a necessary tool for evaluating the true size of the wastes and hence making the adequate decisions for their minimization and sustainable management. This information also provides the essential information for a better pricing of construction bids and hence the user would be more competitive on the market.

Furthermore, the quantification of wastes enables a more adequate planning of the construction site and the related logistics in terms of containers and their management. This will provide the necessary information not only on the amount but also on the type and time of waste generations. Environmental and economic gains are thus incentives for contractors to opt for this prior quantification and planning.

Two approaches for quantification of wastes are outlined. The Component Index (CI) enables quantification of wastes for each constructive component in the overall project. As for the Global Index (GI), this provides the necessary indicators for a given type of building, which can then be used for similar future buildings and hence facilitates the overall estimation of the wastes.

The usefulness of preparing such data files, as well as the necessity for their updating and refining progressively is indicated. As the basis for the quantification of wastes, examples of CI and GI are presented. Data for these data files have been gathered empirically on construction sites and are good indicators for a first approach to the quantification of wastes. The waste managers are encouraged to update and refine these files to their own specific conditions and circumstances.

1. Introduction

This is an era of numbers. Whatever is dealt with in a scientific manner is quantified and expressed in numbers. This is even truer when dealing with technological applications of science. Decision-making has become increasingly based on quantified measurements or predictions expressed in numerical form. However, it is noted that as the complexity of the issues to be decided increases, less hard and reliable data is available. Construction waste is no exception. So far, information on the amount and type of waste generated on construction sites has been few and fragmentary. If adequate decisions are to be made on how construction wastes should be managed on and off the construction site, how they should be used, recycled or deposited, hard data on the amount, type, time and place of their generation is essential.

Until recently, little attention was given to methodically gathering the necessary information on waste generation at construction sites and their possible utilization. Decisions were often based on cursory observations, best guesses and simplified inferences by the construction site managers. The various construction activities are usually itemised and taken into account using the quantification map and the price list of the project. But too often wastes are simply estimated at representing 5% of the construction materials for quantity surveying and pricing purposes. This is by no means the best approach, as without due quantification of the wastes on construction site the true amount and type remains unknown and consequently adequate management of the wastes is hindered.

Quantification thus becomes a crucial tool for making decisions that are environmentally and economically optimised. Such decisions become progressively based on well grounded quantitative data for each activity on a construction site. Each contractor then will be able to base its prices on hard data from its own practice and not on oversimplified guess work. Moreover, contractors will be able to pinpoint the critical points in the generation of wastes, and as a result more able to effectively minimise its generation and become more competitive.

Benchmarking has been used for measuring performance of companies against industry peers. Yet in waste management, the lack of data has meant that the necessary basis for a sound benchmarking process in the construction industry has been missing. This lack

of benchmarking has seriously hindered the implementation of more sustainable and innovative practices in the construction industry.

The objective of this article is to underline the importance, provide the necessary information, and suggest a methodology of quantification of wastes actually generated on construction sites for a more sustainable construction industry. Furthermore, this section will provide some examples of indicators for the quantification of wastes in the main activities of construction, based on empirical data gathered on different construction sites. The data is presented as card files that indicate the relevant information needed for an environmentally sound management of construction wastes. These card files are presented as examples and as indicative of what can be done, and can be modified according to the needs of each contractor and specific construction project. These card files can be used as a first approach for the quantification purposes of wastes on construction sites.

2. Construction Wastes Classification by Source and Type

In order to quantify adequately the construction waste, it is useful to have a classification of wastes by source and type of waste generated. There are multiple sources of waste generation on a construction site. On the whole, waste is usually defined as the difference between the ordered materials and the actually applied ones in a construction site. Construction waste thus comprises waste caused by breakage in transportation from the retailer to the construction site, by the handling of material and storage on the site, by the handling up to the application point, and last but not least, the waste generated during the actual application or usage. As can be seen, the overall quality of the site management, equipment used and manpower the determining factors in waste generation. There is also waste generated by packaging of the construction materials that arrive on site and the wastes generated by the workers such as paper, glass and cans which are similar to municipal waste. This article examines waste produced during the application phase and packaging.

Hence, wastes generated on the construction site can be classified in the following three classes according to their origin:

- Building waste, generated during the construction process due to defects, damages, breakage or simply due to excess.

- Packaging waste, generated from packaging of materials and products delivered to construction site.
- Wastes produced by workers, similar to municipal waste such as paper, glass, cans, etc.

The main types of waste from construction activities are as follows:

- wood,
- metals,
- mineral debris (such as stone, bricks, mortar and concrete),
- plastics,
- papers and cardboards,
- glass
- hazardous wastes (such as paints and glues).

Occasionally there are also other specific wastes, depending on the type of construction and materials used, such as plaster, gypsum board or carpets. Wastes from packaging also consist of wood, plastics and cardboard and papers. Wood palettes are usually returned and reused by the retailer. Wastes produced by workers due to catering activities are for the most part organic materials, aluminium cans, glass and paper. It is noted that wastes generated on site are collected according to its type and dealt with irrespective of its origin.

3. Proposed Method for Quantification of Construction Waste

The quantification of wastes according to type is the fundamental task of the site manager or the person in charge of planning and management of the construction. This task has to take place before the actual construction activities begin, and must continue during the construction phase. Quantification of wastes by relevant type is essential for the management and organization of a construction site, as well as the provision of logistics for waste management.

Prior to the start of actual construction activities, it is essential to carry out a thorough analysis of the project, construction processes and materials that will be used. The review and critical analysis of the project at this stage should provide a fairly accurate estimate of the amount and type of waste foreseen. Based on this estimate and

considering the construction schedule and available space, the number, type, size and location of the containers is decided. Furthermore, the access for delivery and disposal vehicles is also determined.

The schedule of the construction work is an essential tool, as it provides the timetable for waste generation and thus the required information on the logistics of the waste management for any given time span. The logistics of wastes are also affected by several other factors such as the shape of the containers, waste material density and the number of intervening workers.

Based on the experience accumulated on waste management, the following approaches are proposed for the estimation of construction wastes:

1. ***"Global Index"* Approach:** This approach is based on the global data from similar construction types that provides the amount of waste per square meter of construction. The global data is gathered from previous construction works and registered on data files are used as a global index for a given construction. It is noted that this index can be used also for quantification of waste from a region or even from the whole country.
2. ***"Component Index"* Approach:** This approach provides the amount of waste generated from each construction Component ou component that composes the project. The construction component has a specific function in the building and is usually performed by a given professional on the site. Furthermore, it has a unit of its own, i.e. for example unit area or volume.

It is noted that both of these methods are acceptable and their applicability depends on the accuracy of the data available rather than the method itself. Furthermore, the Global Index can be of great benefit for regional and national planning of Construction Waste treatment and recycling.

It is suggested here that contractors, or those in charge of construction waste management, should create their own data base for "Component Index" (CI) and progressively expand, refine, and detail them further to provide a sound basis for quantification.

In the following sections, the methodology used for data gathering, creation of data bases and its utilization for future planning is outlined and examples of Global Index and Component Index are presented and their application is discussed.

4. Data Gathering

Obtaining the actual site data is a tedious and sensitive empirical work. As stated before, the amount of waste generated on a given site depends mainly on the construction design, construction process, quality and type of construction materials, available equipment and finally, but not the least, the skill of the workers. Hence the data obtained is site and project sensitive. However, the data gathered on one site may be used for the planning of future, similar construction projects. Additional information can further refine and specify the data. It is noted that in this way the data gathering is an ongoing process and tends to be developed progressively.

The main data needed is the amount of waste by each type, the way it is generated and the time period in which it is generated. Further information deals with the possibilities of using the wastes on the site. This information is useful as wastes may become sub-products and cease to be accounted as waste.

The data gathering should be repeated for a given construction activity and the way the measurements are performed and registered has to be decided. Based on the experience gathered so far, the waste generated on site should consider a given *Construction Component.*. The Construction Component (CC) as defined here is the minimum unit for data gathering and used later for quantification of wastes. The Construction Component is a specific and independent part of the construction. Examples of CC are:

- 1 m^2 of concrete retaining wall 0.20m thick,
- 1 m^2 of ceiling,
- 1 m^2 of roofing
- 1 m^2 of interior partition wall
- 1 m^2 of tiles in kitchen or bathrooms,

There are some 30 different “Construction Components” in a building construction project. It is suggested that at least three measurements should be made for establishing

a reliable data base. Care should be taken as to ensure that data is actually representative of the work being carried out and the waste produced. This can be done ensuring a minimum volume of work for each data and guaranteeing the accuracy of measurements.

For the estimation of Global Index, the total waste generated on a given site is measured and all the data regarding the waste and the site is registered. Hence, the data of each waste produced per square meter of area constructed becomes available and used for quantification of wastes for similar future projects.

5. Data Gathering for Component Index

The first step is to define the list of Construction Components relevant for waste quantification. Usually each construction project provides a list of quantities for different tasks that compose the construction. In the absence of this list, the first step would be to elaborate the list according to the documents and plans of the project.

The construction components (CC) are detailed in terms of material used and the type of waste generated in their production. Data will also contain further information regarding the size of the CC considered and the waste generated expressed in kg of waste by unit of area or volume of the CC.

Further information regarding the final destination, the possibilities of prevention, reutilization, recycling and economic potential may also be identified and registered. All the data has to be organized and structured in the data base in order to become useful information for the quantification of waste.

Hence, each data file is structured in three parts:

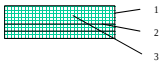
I) Description of the Construction Component

This part of the data file provides at least the following information (see Fig 1):

- A schematic view of the construction component, indicating parts that form the CC;
- A brief description of the technical characteristics of the CC;

- An indication of its location in the construction project.

Figure 1: Description of the Construction Component [1]

S 1	Foundation		
	Scheme:	**Technical characteristics:**	**Indication:**
		Grade of form work: 0,5 m² form work/m³ concrete; grade of armouring: 30 kg steel per m³ concrete	Data base on consultation of experts

II) Composition of the generated waste due to the CC

In this section of the data file, the following information is indicated (see Fig 2):

- The constructive elements needed for one unit of the CC;
- The characteristics in size and mass of the constructive components for one unit of CC;
- The amount of each type of waste per unit area or volume of the construction component including waste from packaging (kg/m^2).
- The total sum of waste generated by each component, as well as the range of data obtained as a percentage of the average value.

Figure 2: Composition and amount of waste generated [1]

	Foundation [per m² building construction surface]												
	Nr.	onstructon component (BE	Construction design		Construction - specific Waste Codes [kg/m² construction]							Sum	Span
			Thickness	Mass	specific Waste						Packaging use		[%]
			[cm]	[kg/m²]	Con.Rubbl	Wood	Gypsum	Mineral wod	Metal	Other			
Buildup	1	Formwork (Wood material	2,1	2,70		0,39						0,39	10,0 - 30,0
	2	Armouring		12,50					1,00			1,00	8,0 - 10,0
	3	Concrete	50,0	1.246,00	24,92							24,92	1,0 - 3,5
	4												
	5												
	6												
	7												
		SUM		**1261,20**	**24,92**	**0,39**			**1,00**		**0,00**	**26,31**	

III) Waste Management Potential

This part of the data file consists of indicating the most adequate final destination for each type of generated waste which is summarized in five options, namely: Prevention; Recycling; Energy Recycling; Landfill without treatment; and Landfill with treatment (see Fig. 3).

Figure 3: Waste Management Potential [1]

Waste - management potentials

Disposal route	BEL.Nr	Specific Waste						Packaging use	Sum	Comments
		Con.Rubbl	Wood	Gypsum	ineral wo	Metal	Other			
Prevention	1	0,26								Futher Use
Material recycling	2,3					1,00				
Energie recycling	1		0,39							
Deposit without treatment										
Deposit with treatment										

6. Global Index (GI)

The GI is a global presentation of data related to a specific construction such as office building or one family dwelling. The information is of a general nature and uses the overall indicators generated from the building sites. This data file states the data for global waste production to be used in planning phase of the project.

Global Indexes are prepared for a specific type of construction, e.g. residential buildings, office buildings, hotels, etc. Furthermore, for each type of construction 3 levels of quality are distinguished, high, medium and low. It is assumed that high quality building generates larger amounts of wastes and low quality buildings generate lower amount of wastes.

The structure of these files may be as follows:

I) Construction Description:

This section states the building type, fundamental construction parameters and quality of the construction. Relevant drawings and pictures of the site and the project are also included.

II) Construction Components and Waste Generation

The list of all the major tasks comprising the project is presented, indicating the quantities of each task in m^2, m^3 or kg in the construction. The amount and type of generated waste for each task is also indicated including waste from packaging.

III) Waste Generated

This section of the card file includes all the generated waste on the site, whether in volume or in mass. This section becomes, thus, a fundamental tool as it summarizes all the information in the previous sections of the file and based on it the estimation of the generation of waste for the studied building is performed. (See Figures 4 and 5).

IV) Management Indicators

Based on the total waste generated and the total area and volume of the building studied the management indicators are calculated. These indicators are used for quantification of wastes in similar buildings. Data from GI provides the necessary information on the volume, mass and type of the generated waste per square meter of building.

Figure 4: Construction Components and Waste Generated [1]

Construction	Type and Size	Planned performance		Main type of waste (Kg)							Used packaging (Kg)		
		unit	amount	wood	foil	metal	concr.	mixed	hazard.	other	Paper	Plastic	other
Earthworks:													
	Site implementation	m2	360										
	Excavations												
	excavation soil	m3	200							306000			
Foundation:													
	Foundation and beams												
	concrete	m3	24										
	reinforcement	t	1,0										
Structure:												10,7	
	Concrete elements	m3	82										
	Formwork	m2		164,3									
	steel nails					30,0							
	Reinforcement	t	9,0			26,8							
	Joints	m2	245										
	expanded polystirene							3,3					
Exterior wall:													
	Exterior masonry	m2	285										
	Construction phase												
	ceramic bricks							417,0				22,1	
	Windows and doors fitting												
	ceramic bricks							75,5					
	Plumbings and services fitting												
	ceramic bricks							100,0					
Interior wall:													
	Interior masonry (plasterboard)	m2	350								10,6		
	plasterboard							448,2					
	internal metalic structure					46,0							
	mineral wool							5,0				15,6	
	plaster coat (paper bags)										3,8		
Ceiling:													
	Double ceiling (plasterboard)	m2	310								3,0		
	plasterboard							124,2					
	internal metalic structure					11,1							
	mineral wool											1,6	
	plaster coat (paper bags)										2,5		

Figure 5: Summary of the Waste Generated on a Given Site (GI) [1]

Waste	Amount in m³	Amount in t	Density in t/m³
Type			
Wood	1,4	0,22	0,15
Foil	0	0,00	-
Metal	0,6	0,12	0,20
Concrete	1,76	0,04	-
Mixed Construction Waste	121,5	1,94	0,25
Hazardous Waste	0	0,02	-
Other	180,0	306,00	1,70
Paper Packaging	7,3	0,15	0,02
Plastic Packaging	5,8	0,09	0,02
Other Packaging	0	0,00	-
Sum	318,4	308,58	

Figure 6: Management Indicator for a Given Building [1]

Core numbers	Waste amount m³/m³ gross volumn	Waste amount m³ / m² gross floor area	Waste amount m³/ 1000 Euro construction costs	Waste amount t /m³ gross volumn	Waste amount t / m² gross floor area	Waste amount t t / 1000 Euro construction costs
Wood	0,00146	0,00438	0,00875	0,00022	0,00066	0,00131
Foil	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Metal	0,00061	0,00184	0,00368	0,00012	0,00037	0,00074
Concrete	0,00178	0,00535	0,01070	0,00004	0,00011	0,00021
Mixed Construction Waste	0,31874	0,36923	0,73845	0,00197	0,00591	0,01182

Construction Waste Management							
Used containers	**Type and size**	**waste type**	**duration in months**	**number of containters**	**containter costs in Euro/month**	**transportation costs in Euro/transport**	**disposal price in Euro/t**
Waste bags	Plastic bags 0,25 m3	light wastes	12	40			30
Waste containers	Plastic containers 0,25 m3	heavy wastes	12	5			30

7. Summary and Conclusions

This article outlined the importance of the quantification of wastes for a sound and adequate management of waste in the construction of buildings. It was noted that such quantifications provide a necessary tool for evaluating the true size of the wastes and hence making the adequate decisions for their minimization and sustainable management. This information also provides the essential information for a better pricing of construction bids and hence the user would be more competitive on the market.

Furthermore, the quantification of wastes enables a more adequate planning of the construction site and the related logistics in terms of containers and their management.

This will provide the necessary information not only on the amount but also on the type and time of waste generations. Environmental and economic gains are thus incentives for contractors to opt for this prior quantification and planning.

Two approaches for quantification of wastes are outlined. The Component Index (CI) enables quantification of wastes for each constructive component in the overall project. As for the Global Index (GI), this provides the necessary indicators for a given type of building, which can then be used for similar future buildings and hence facilitates the overall estimation of the wastes.

The usefulness of preparing such data files, as well as the necessity for their updating and refining progressively is indicated. As the basis for the quantification of wastes, examples of CI and GI are presented. Data for these data files have been gathered empirically on construction sites and are good indicators for a first approach to the quantification of wastes. The waste managers are encouraged to update and refine these files to their own specific conditions and circumstances.

References

[1] Handbook of Wastetool, 2006

Kendiliğinden Yerleşen Harçlarda Kullanılan Yüksek Fırın Cürufunun Yüksek Sıcaklık Performansına Etkisi

İlker Bekir Topçu*, Tayfun Uygunoğlu**
*Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Müh.-Mim. Fak., İnş. Müh. Böl., Eskişehir,
**Afyon Kocatepe Üniversitesi, Müh. Fak., İnş. Müh. Böl., Afyonkarahisar
Tel: 0 (222) 239 37 50, 0 (272) 228 14 23
ilkerbt@ogu.edu.tr , uygunoglu@aku.edu.tr

Erhan Kahraman**
**Afyon Kocatepe Üniversitesi, Müh. Fak., İnş. Müh. Böl., Afyonkarahisar
0 (272) 228 14 23
ekahraman@aku.edu.tr

Öz

Bu çalışmada, genel olarak beton dayanımını arttırmak amacıyla kullanılan mineral katkılardan biri olan öğütülmüş yüksek fırın cürufu katkılı beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası fiziksel ve mekanik özeliklerinde meydana gelen değişiklikler araştırılmış ve sonuçlar istatistik yöntemlerle incelenmiştir. Beton numunelerinde kullanılan malzemelerin oranlara bağlı olarak ortaya çıkan değişiklikler, mineral katkı oranlarının yüksek sıcaklık sonrası değişimlerine bağlıdır. Deneyler sonucu ortaya çıkan farklılıkları, mineral tipi ve uygulanan yüksek sıcaklık göz önünde bulundurarak kendi aralarında bir değerlendirme sunmak amaçlanmıştır. Çalışmada, çimento ağırlığının, % 0, 10, 20 ve 30'u oranlarında öğütülmüş yüksek fırın cürufu karışım içerisindeki çimento ile yer değiştirilerek, 4 değişik karışım elde edilmiştir. Bulgulara göre, % 0, 10, 20 ve 30'u oranlarındaki katkı kullanımlarında, priz başlama ve bitiş sürelerinin belirgin olarak geciktiği ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu, Yüksek Sıcaklık, Isıl Performans

Giriş

Betonda çimento harcının işlevi, agrega tanelerinin yüzeylerini kaplamak, agrega taneleri arasındaki boşlukları doldurmak ve agrega tanelerini bir arada tutacak tarzda bağlayıcılık sağlamaktır. Bu bakımdan beton, çimento harcından ve agregalardan oluşan iki fazlı kompozit bir malzeme olarak da tanımlanabilmektedir (Erdoğan, 2003). Betonun zamanla bozulmasına pek çok çevresel faktörler etki etmektedir. Betonda dayanıklılık problemine neden olan başlıca fiziksel etkilerden biri yüksek sıcaklıktır. Yüksek sıcaklık yapılarda kalıcı hasarlar oluşturarak, yapının servis dışı kalmasına, can ve mal kaybına neden olabilmektedir (Aydın ve Baradan, 2003). Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), dahili veya harici vibrasyon kullanılmadan kalıbına yerleştirilen ve sıkıştırılan betonlar olarak tanımlanmaktadır. KYB'ler konuldukları kabın içerisine yüksek akışkanlıklarından dolayı herhangi bir vibrasyon yapılmaksızın kendi

ağırlıklarıyla boşluksuz bir şekilde yerleşir, donatının etrafını sıkıca sarar ve beton içerisinde çok düşük oranda boşluk kalarak kalıbı doldurur (Leemann vd., 2006).

KYB'nin özel reolojik yapısı için hidratasyon ısısına karşı çimento miktarını düzenlemek, viskoziteyi ayarlayarak, yeterli akışkanlığı sağlayarak işlenebilirliği geliştirmek için filler (dolgu) malzeme kullanılmaktadır. Bu malzemeler genellikle kırmataş tozu, uçucu kül, silis dumanı, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve öğütülmüş cam tozu gibi filler malzemelerdir (Efnarc, 2002). Ancak gün geçtikçe KYB üzerine yapılan çalışmalarla bu filler malzemelerden başka, özellikle atık durumdaki malzemelerin filler malzeme olarak KYB içerisinde kullanımları araştırılmaktadır. Bu malzemelerden bazıları da öğütülmüş tuğla tozu ve mermer tozudur. KYB'de kullanılacak olan filler malzemelerde aranan en önemli özeliklerden biri en büyük tane çapı olup genellikle 0.125 mm'nin altında olması istenir. Bu durumda KYB üretiminde kullanılan kum ve agrega içerisinde bulunabilecek 0.125 mm altındaki ince maddeler de filler malzeme içerisine dahil edilmelidir. Filler malzemelerin optimum kullanım miktarları bu maddelerin mineralojik kökenine ve mekanik performansına bağlıdır. Örneğin, silis dumanı toplam toz miktarının (çimento+silis dumanı) 400 ile 450 kg/m^3 arasında olduğu bir KYB'de 50 kg/m^3 içeriğinde kullanılırken, uçucu kül toplam toz miktarının 500 ile 600 kg/m^3 arasında olan bir KYB'de 100 ile 150 kg/m^3 içeriğinde kullanılmaktadır (Uygunoğlu, 2008).

Bu çalışmada, çimento yerine farklı oranlarda ikame edilerek yüksek fırın cürufu kullanılmasıyla üretilen beton numunelerin, yüksek sıcaklık sonrası fiziksel ve mekanik özeliklerinde meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. Beton numunelerinde kullanılan malzemelerin oranlara bağlı olarak ortaya çıkan değişiklikler, farklı mineral katkıların yüksek sıcaklık sonrası değişimlerine bağlıdır. Amaç; deneyler sonucu ortaya çıkan farklılıkları, ikame oranı ve uygulanan yüksek sıcaklık göz önünde bulundurarak kendi aralarında bir değerlendirme sunmaktır.

Materyal ve Yöntem

Harç karışımlarının hazırlanmasında hidrolik bağlayıcı olarak TS EN 197-1 (2008) standardına uygun olarak üretilmiş olan CEM I-42.5/R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun özgül ağırlığı 3.07 olup toplam alkali içeriği % 0.65'dir. Çimentoya ait kimyasal ve fiziksel özelikleri Tablo 1'de verilmiştir. Yüksek fırın cürufu (YFC) Bolu'da bir çimento fabrikasından temin edilmiştir. Yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel özelikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Çimento ve mineral katkıların karakteristik özelliklerine bakıldığında; bağlayıcılık oranına büyük etkisi olan CaO miktarının en yüksek değerleri çimento ve yüksek fırın cürufunda bulunmaktadır. Harç üretimleri 0.50 su/bağlayıcı oranında ve % 2 kimyasal katkı içeriğinde üretilmiştir. Mineral katkı tipi olarak da YFC kullanılmış olup bu katkının karakteristik özelikleri Tablo 1'de sunulmuştur. Mineral katkı, % 0, 10, 20 ve 30 oranlarında çimentoyla yer değiştirilerek kullanılmıştır. Harçların üretimlerinde çimento ve mineral katkının toplamı olan bağlayıcı miktarı tüm serilerde 500 kg/m3 olarak sabit tutulmuştur. Agrega olarak da 0-1 mm elek aralığında kırma kum kullanılmıştır. KYH, kırma kum olmayan çimento harcına denilmektedir.

Tablo 1. Çimento ve mineral katkıların karakteristik özelikleri.

Bileşen, %	**Çimento**	**Yüksek Fırın Cürufu**
CaO	63.6	39.8
SiO_2	16.6	32.8
Al_2O_3	4.72	11.8
Fe_2O_3	3.27	1.45
S+A+F	-	*46.05*
MgO	1.91	4.15
Na_2O	0.34	0.51
K_2O	1.06	0.91
SO_3	4.72	2.06
Cr_2O_3	0.04	0.02
TiO_2	0.41	0.63
K.K.	2.69	2.2
Özgül ağırlık	3.07	2.8
İncelik(Özgül yüzey alanı), cm^2/g	3312	4982

Harç üretimleri, kapasitesi yaklaşık 5 lt olan harç mikseri ile gerçekleştirilmiştir. Harçların karışımında, agrega ve ince malzemeler ile 1 dakika boyunca kuru karışım yapıldıktan sonra karışım suyunun yaklaşık üçte ikisi karışıma ilave edilmiştir. Kalan su içerisinde kimyasal katkı çözülerek karışıma katılmış ve 3 dakika daha karışıma devam edilmiştir. Her karışımda, yüzeyi düzgün metal bir tabla üzerinde mini-çökmede yayılma deneyi gerçekleştirilmiştir. Her deneyden önce çökmede-yayılma konisi nemli bir bezle nemlendirilmiş ve harç ile metal yüzey arasındaki sürtünmeler ihmal edilmiştir. Çökmede-yayılma deneyi için yüksekliği 50 mm; alt ve üst genişlikleri de sırasıyla 100 ve 50 mm olan koni kullanılmıştır. Çökme deneyinden sonra yayılan harcın çapı birbirine dik iki doğrultuda ölçülerek iki ölçümün aritmetik ortalaması alınmıştır. Karışımlar 40x40x160 mm boyutlu prizmatik kalıplara konulmuştur. Numuneler 24 saat sonra kalıplardan alınarak 20±2 ^oC kirece doygun su içerisinde kür edilmiştir. Belirlenen mekanik, fiziksel ve ısıl özelikler aşağıdaki Tablo 2'de verilmiştir:

Tablo 2. Numune ler üzerinde gerçekleştirilen deneyler.

Özellik	**Deney adı**	**Numune boyutu ve tipi (mm)**	**Numune yaşı (gün)**	**Numunenin tutulduğu sıcaklık (^oC)**	**İlgili Standart**
Mekanik Özelik	Eğilme Dayanımı	40x40x160 prizma	28	20, 200, 400, 600, 800, 1000	TS EN 12390 -5
	Basınç Dayanımı	40x40x40 küp	28	20, 200, 400, 600, 800, 1000	TS EN 12390 -3/AC
Fiziksel Özellik	Su Emme (ağırlıkça)	40x40x160 prizma	28	20, 200, 400, 600, 800, 1000	TS EN 12390 -7
	Birim hacim ağırlık	40x40x160 prizma	28	20, 200, 400, 600, 800, 1000	TS EN 12390 -7
	Görünen porozite	40x40x160 prizma	28	20, 200, 400, 600, 800,1000	TS EN 12390 -7
Isıl Performans	Isıl Genleşme	Ø5x25 silindir	28	20-1000	ASTM E228-11

Mekanik özeliklerin belirlenmesinde tam otomatik 200 kN kapasiteli basınç ve 50 kN kapa siteli eğilme presi kullanılmıştır. Numunelerin yüksek sıcaklığa dayanıklılık testine maruz bırakılmadan önce nem farkından dolayı deney sonuçlarının farklılık göstermemesi için 105 ^{o}C'de etüv kurusu duruma getirilmişlerdir. Daha sonra Tablo 2'de verilmiş olan sıcaklıklarda 5 ^{o}C/dak ısınma sağlayan Protherm marka kül fırını içerisinde 2 saat net olarak bekletilmişlerdir. Isıl performans testleri için çapı 5 mm ve boyu 25 mm olan silindirik numuneler ile termal expansion olarak adlandırılan ve diğer adıyla dilatometre olarak bilinen 180~1600 ^{o}C arasında sıcaklık uygulayabilen NETZSCH DIL 402 CD/4 tipi dilatometre kullanılmıştır. Isıl genleşme katsayısı (α) aşağıda verilen Denklem (1) yardımıyla belirlenmiştir.

$$dL = \alpha . L_0 . dT \tag{1}$$

KYB'nin ısıl genleşme katsayısı (x10-6 1/^{o}C); dL, numunede oluşan birim boy değişimi (mm); dT, sıcaklık farkı (^{o}C); Lo, numunenin ilk boyunu simgelemektedir. Arşimet prensibine göre numunelerin etüv kurusu halindeki (Wo) suya doygun havada (W_1) ve su içerisinde (W_2) ağırlıkları alındıktan sonra 2, 3 ve 4 denklemleriyle yoğunluk (BHA), görünen porozite (GP) ve ağırlıkça su emme (Ww) değerleri belirlenmiştir.

$$BHA = \frac{W_o}{(W_1 - W_2)} \tag{2}$$

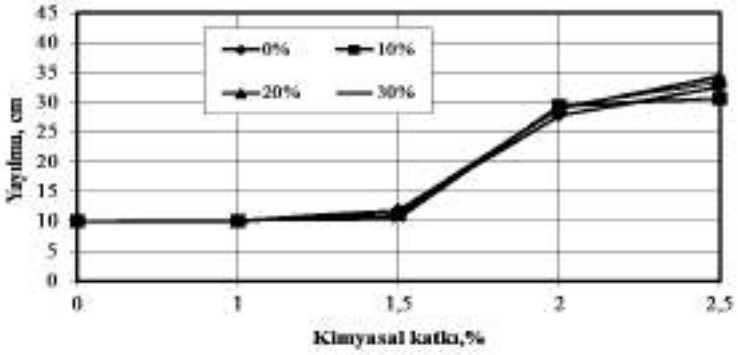
$$GP = \frac{(W_1 - W_o)}{(W_1 - W_2)} x100 \tag{3}$$

$$W_w = \frac{W_o}{(W_1 - W_o)} x100 \tag{4}$$

Bulgular

Taze Harç Özelikleri

Genel olarak mineral katkının çimentoyla yer değiştirilme oranı arttıkça harçlarda özgül ağırlıkları çimentoya göre daha düşük olan mineral katkıların daha fazla yüzey alana sahip olmaları nedeniyle artan su gereksiniminden dolayı yayılma özellikleri azalmıştır.

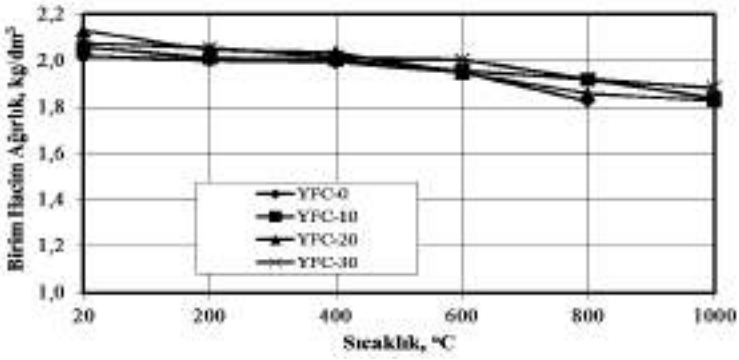


Şekil 1. Harç yayılmasına YFC mineralinin ve kimyasal katkı miktarının etkisi.

Ancak % 20 üzeri yer değiştirme oranlarındaki harçlarda kontrol harçlara göre yaklaşık aynı özelikte yayılma elde edilmiştir. Bu da YFC'nin yüzey yapılarından dolayı harcın işlenebilirliği arttırdığının göstergesidir (Roussel vd., 2005).YFC'li harçlarda % 2 katkı oranında yayılma çapları 28-30 cm arasında bulunmuştur ve en fazla 34 cm yayılma çapı elde edilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi burada mineral katkıların yer değiştirmedeki özgül ağırlığından dolayı kapladıkları hacim ve yüzey alanı gibi faktörler etkili olmuştur (Topçu ve Uygunoğlu, 2010; Schwartzentruber vd., 2006).

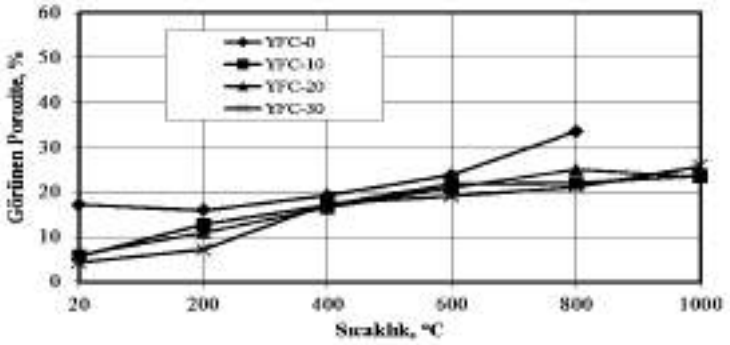
Fiziksel Özeliklere ait Sonuçlar

KYH'lerin yüksek sıcaklığa dayanıklılık testi sonrasında birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiş ve bu testlere ait sonuçlar kırma kumlu seriler için sırasıyla Şekil 2'de sunulmuştur. Harçların yüksek sıcaklığa maruz bırakılmasıyla birlikte birim hacim ağırlıkları azalmıştır. Kırma kumla üretilen harçların birim ağırlıkları sıcaklık derecesinin 20-1000 ^{o}C arasında değişmesiyle 2 ile 1.4 kg/dm^3 arasında değerler almıştır. Diğer yandan, mineral katkılı harçların birim ağırlıkları şahit numunelerle aynı veya daha düşük değerler aldığı görülmektedir. En fazla azalma da % 20 ve % 30 katkı içeriklerinde görülmüştür.



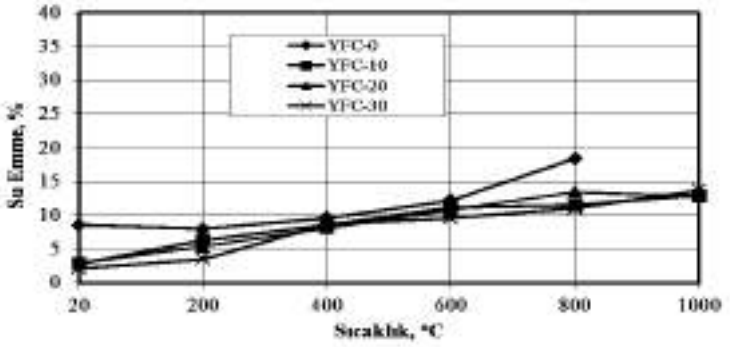
Şekil 2. YFC'li harçların birim hacim ağırlıkları.

Kırma kumlu harçların 800 ^{o}C sonrasında sıcaklık etkisinden dolayı numuneler dağılmıştır. Sıcaklık değerinin artışıyla birlikte numunelerdeki bağlı sular buharlaşmış ve sıcaklığın daha da artmasıyla hidrate ürünlerin yapısı bozularak oksit kaybından numunelerin ağırlıkları azalmıştır. Bazı sıcaklık değerlerinde numunelerde oluşan büzülmelerden dolayı birim hacim ağırlıklarda az da olsa bir artış da görülmüştür.



Şekil 3. YFC'li harçların görünen porozite değerleri.

Birim ağırlıkların sıcaklığa bağlı olarak azalması sonucunda dışarı çıkan su veya diğer oksitlerden dolayı görünen porozite değerleri de artmıştır (Şekil 3).



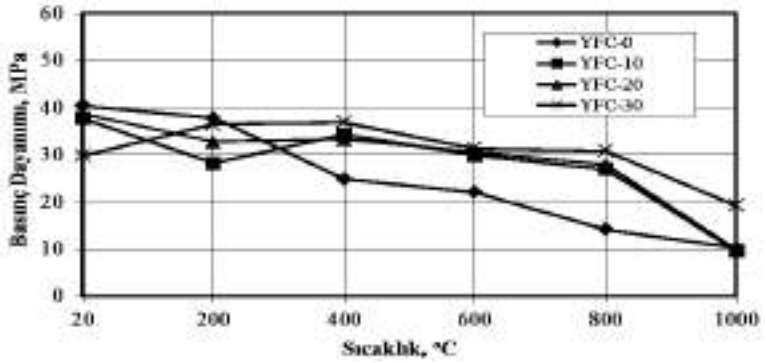
Şekil 4. YFC'li harçların ağırlıkça su emme değerleri.

Genel olarak mineral katkı kullanım oranı arttıkça porozite değerleri azalmıştır. Kırma kumun kullanıldığı şahit harç numunelerin görünen porozite değerleri de aynı sıcaklık değerinde % 33 oranına kadar yükselmiştir. Diğer yandan kırma kumla üretilen harçların oda sıcaklığındaki görünen porozite değerleri de düşük değerler aldığı görülmüştür. Bunun nedeni de kırma kum içerisinde fazla ince malzeme olması ve buna bağlı olarak da filler etkisi yaparak yüksek sıcaklıklarda daha az gözenek oluşmasıdır. Kırma kumla üretilen harçların görünen porozite değerlerine paralel olarak ağırlıkça su emme değerleri de değişim göstermektedir. Hem mineral katkıların kullanımı hem de kırma kumdaki ince malzeme miktarının artışına bağlı olarak su emme değerleri azalmıştır (Şekil 4).

Mekanik Özeliklere ait Sonuçlar

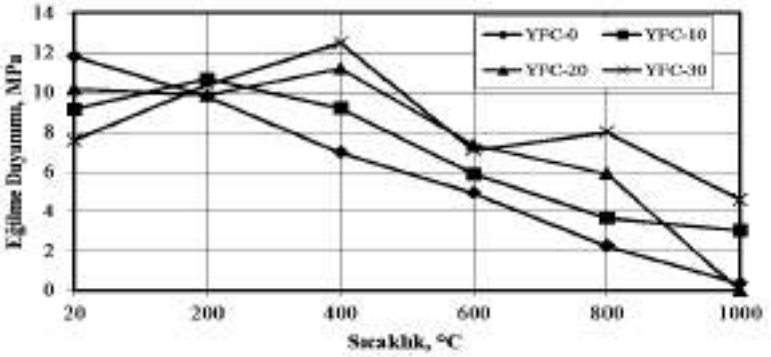
Eğilme ve Basınç Dayanımları

Yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılığa bağlı olarak KYH'lerin basınç dayanımlarındaki değişimler Şekil 5'te sunulmuştur. Sıcaklığın 200 ^{o}C'ye arttırılmasıyla birlikte harçların basınç dayanımlarında artış görülmüştür. Daha sonra sıcaklığın daha da arrtıtılmasıyla basınç değerleri azalma eğilimine geçmiştir.



Şekil 5. YFC'li harçların basınç dayanımları.

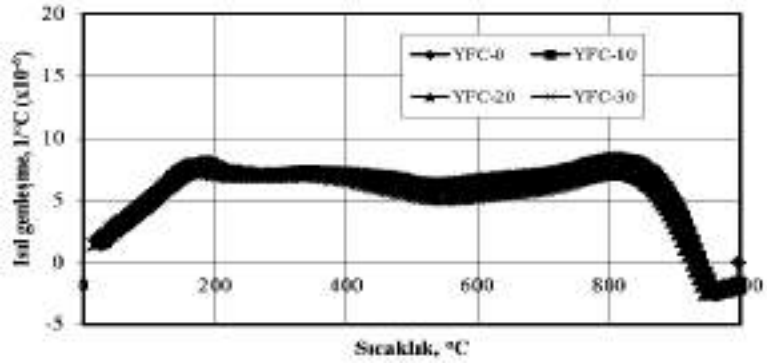
Bu durum 200 ^{o}C civarında çimento harcının büzülmesi ve buna bağlı olarak da dayanımın bir miktar artmasını sağlamasından dolayı oluşmaktadır (Yüzer vd, 2004). 1000 ^{o}C sıcaklıktaki basınç dayanım değerleri 0-20 MPa arasında değerler almıştır. Harçlarda 20 MPa basınç değerine sahip olan seriler % 30 oranında YFC içerenlerdir. Serilerde mineral katkı oranının artmasıyla basınç dayanımı genel olarak artış göstermiştir. Yine bunun en önemli temel nedeni ısıl genleşme katsayılarıyla açıklanabilir (Sellevold, 2006). Tıpkı basınç dayanımlarında olduğu gibi harçların eğilme dayanımlarında da çok benzer sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 6).



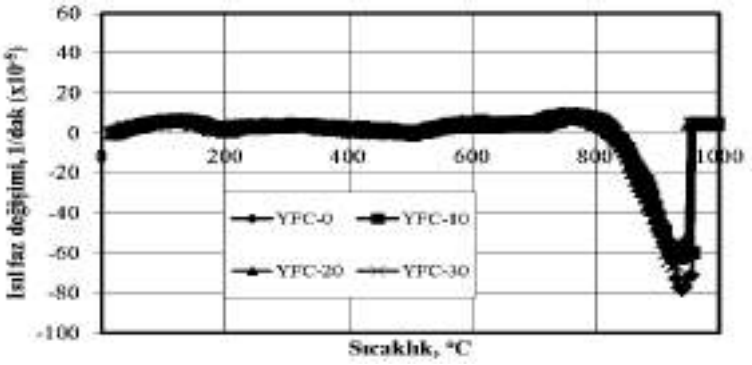
Şekil 6. YFC'li harçların eğilme dayanımları.

Isıl Performansa ait Sonuçlar

Belirlenen ısıl özeliklerden birisi de KYH'lerin ısıl genleşme katsayılarıdır. Isıl genleşme katsayısı, betonun ısı etkisiyle genleşmesinin belirlenmesi için kullanılan katsayıdır. Kırma kumlu harçlar için belirlenmiş olan ısıl genleşme katsayıları Şekil 7'de verilmektedir. Tüm oranlardaki YFC katkı içeriklerinde üretilen harçların ısıl genleşme katsayıları 200 ^{o}C sıcaklık değerine kadar numunelerdeki serbest suyun bünyeyi terk etmesi ve bu sırada oluşturduğu iç basınç nedeniyle artmıştır. % 20 ve % 30 oranlarında mineral katkı kullanımıyla genel olarak çimento harcındaki CH miktarı azaldığından ısı genleşme katsayıları da azalmıştır (Shui vd, 2010). Kireçtaşıyla birlikte mineral katkıların kullanılması ısıl genleşme katsayısının daha da azaltılmasını sağlamıştır. Bu azalma, 800 ^{o}C sıcaklık değerinde şahit seriye göre YFC-30 serisinde sırasıyla % 20 oranlarındadır.



Şekil 7. YFC'li harçların ısıl genleşme katsayıları.



Şekil 8. YFC'li harçların sıcaklığa bağlı ısıl faz değişimleri.

YFC ile üretilen serilerin genel olarak en fazla şekil değiştirme oranları 850 ile 900 ^{o}C arasında elde edilmiştir (Şekil 8). Bunun nedeni de, kireç taşından oluşan kırma-kum agregalarının 800 ile 900 ^{o}C arasında su kaybederek sönmemiş kirece (CaO) dönüşmesi ve açığa çıkan su buharının etrafına yaptığı basınçtan dolayı betonun genleşmesini arttırmasıdır. CaO'de dönüşüm gerçekleştikten sonra harçlar hızla büzülmektedir. Bu esnada agrega -çimento ara-yüzü ve agregada önemli derecede çatlamalar görülmektedir.

Kırma-kumlu serilerde agregadan dolayı 900 ^{o}C'de su kaybederek büzülen harçların büyük bir bölümü çatlayarak deforme olmuş ve dağılmışlardır.

Teşekkür

Bu çalışmayı 110.M.246 nolu projeyle destekleyen TUBİTAK'a teşekkürlerimiz sunarız.

Sonuçlar

Kendiliğinden yerleşen betonlarda değişik tipte mineral katkılar kullanılabilmektedir. YFC mineral katkı içeren kendiliğinden yerleşen betonun harç fazı üzerinde işlenebilirlik deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- KYH'lerde kullanılan ve genel itibariyle küresel şekle sahip olan mineral katkılar kimyasal katkılarla birlikte kullanılmaları durumunda harcın yayılma özeliklerini ve buna bağlı olarak işlenebilirliklerini arttırmışlardır. Böylece KYB'lerin özellikle pompa ile dökülürken boru tıkanma problemleri daha aza indirilmiş olunacaktır.
- Mineral katkı içeriği artmasıyla birlikte genel olarak zamana bağlı dayanım değerleri de artmıştır. YFC'nin harç içerisinde filler görevi yaparak mikro boşlukların doldurulmasını sağladığı görülmüştür.
- Mineral katkı kullanımı kırma kumlu harçlarda genleşmeleri genel olarak azaltmıştır. Kırma kumlu harçların ısıl genleşme katsayıları 900 ^{o}C'den sonra hızlı bir şekilde azalarak büzülme haline geçmiştir. Bu durum da 900 ^{o}C üzerindeki sıcaklıklarda harçların tamamen deforme olarak eğilme ve basınç dayanımlarının sıfır olmasına ve bu nedenle taşıma gücünü yitirmesine neden olmuştur.
- Normal koşullarda (20°C) mineral katkı kullanımı, basınç ve eğilme dayanımı değerlerini genel olarak düşürdüğü görülmüştür fakat ileriki sıcaklıklarda bu değerlerin arttığı görülmüştür.
- Basınç dayanımlarında özellikle %20 ve %30 katkı oranlarında yüksek fırın curufu minerallerinin dayanımı arttırdığı görülmüştür. Eğilme dayanımlarında da ortalama aynı sonuçların çıktığı görülmüştür.
- Kırma kum gibi CaO esaslı agrega ile üretilen harçlarda 600 ^{o}C civarında faz değişimi olmadığından dolayı agrega tanelerinde normale göre daha az çatlamalar veya deformasyonlar görülmüştür. Isıl faz değişimi 900 ^{o}C'de en fazla değerlerdedir. Dolayısıyla numunelerde en fazla deformeler bu sıcaklık değerlerinde oluşmuştur. Bu deformeler serilerin sıcaklığa bağlı basınç ve eğilme dayanımlarındaki değişimlerden açıkça görülmüştür.

Sonuç olarak Tüm deneyler dikkate alındığında %30 oranlı yüksek fırın curufu mineral katkısının en iyi sonuçları verdiği görülmüştür. Yüksek sıcaklığa maruz yerlerde kendiliğinden yerleşen beton veya harç kullanılması durumunda yüksek fırın curufu mineral katkısının kullanılması önerilmektedir.

Kaynaklar

Aydın S., Baradan B., 2003, Yüksek sıcaklığa dayanıklı bağlayıcı geliştirilmesi, TMMOB İnşaat Müh. Odası, 5. Ulusal Beton Kongresi, ss. 451-460, İstanbul.

Efnarc, 2002, Specification and guidelines for self -compacting concrete, Association House, 99 West Street, Farnham, Surrey GU9 7EN, UK, February, ss.1 -40.

Erdoğan, T.Y., 2003. Beton. METU Press, 741 s, Ankara.

Leemann, A., Münch B., Gasser P., Holzer L., 2006. Influence of compaction on the interfacial transition zone and the permeability of concrete, Cement and Concrete Research , 36, 1425-1433.

Roussel, N., Stefani, C., Leroy, R., 2005. From mini -cone test to Abrams cone test: measurement of cement -based materials yield stress using slump tests, Cement and Concrete Research 35, 817-822.

Schwartzentruber, L. D., Roy, R.L., J. Cordin, Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a Self Compacting Concrete (SCC), Cement and Concrete Research , 36, 1203-1213, (2006).

Sellevold EJ, Bjøntegaard O., Coefficient of thermal expansion of cement paste and concrete: mechanisms of moisture interaction. M aterials and Structures 39, 809-815, (2006).

Shui Z, Zhang R, Chen W, Xuan D, E ffects of mineral admixtures on the thermal expansion properties of hardened cement paste, Construction and Building Materials 24, 1761 -1767, (2010).

Topçu, İ.B., Uygunoğlu, T., Influence of mineral additive type on slump -flow and yield stress of self- consolidating mortar , Scientific Research and Essays Vol. 5 (12), pp. 1492 -1500, (2010).

TS EN 197 -1/A3, Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2008.

Uygunoğlu, T., 2008, Hafif Agr egalı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Özelikleri, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü., Doktora Tezi.

Yüzer, N., Aköz, F., Kızılkanat, A.B., Yüksek Dayanımlı Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklık Etkisi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası XVII. Teknik Kongresi, 15 -17 Nisan, İstanbul (2004).

Farklı Oranlarda Uçucu Kül İkame Edilerek Üretilen Betonların Klor Geçirimliliklerinin Belirlenmesi

Şakir Erdoğdu **Ufuk Kandil** **Safa Nayır**

Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü 61080 Trabzon

Tel: (0462) 377 2051

E-posta: shake@ktu.edu. tr

Öz

Betonda dayanıklılık sürdürülebilirlik açısından son derece önemlidir. Dayanıklılığın anahtarı geçirimliliktir. Geçirimsiz beton üretmenin temel amacı dış ortamda bulunan zararlı maddelerin betonun bünyesine girişini önlemektir. Bu noktada başvurulan yöntemlerin başında mineral katkı maddesi kullanımı gelmektedir. Mineral katkı maddesi kullanılan betonların daha az boşluklu olması yanı sıra açığa çıkan düşük hidratasyon ısısı dolayısıyla çatlama eğilimleri de azdır. Geçirimsizliği temin etmek suretiyle başta donatı korozyonu olmak üzere alkali-agrega genleşmesi ve sülfat etkisinin betonun d urabilitesi noktasında neden olacağı olumsuz etkiler de kontrol edilmiş olur.

Gerçekleştirilen çalışmanın temel amacı uçucu kül ikamesinin betonun durabilite özelliklerine etki sini incelemektir. Bu amaçla gerçekleştirilen deneysel çalışmada farklı oranlarda çimento ile ikame edilen uçucu kül ile üretilen betonların hızlı klor geçirimlilikleri, maksimum su işleme derinlikleri, kılcallık katsayıları ve basınç dayanımları değerlendirilmiştir. Uçucu külün artan oranlarda çimento ile ikamesinin basınç dayanımına etkisi olumsuz olmasına karşın klor geçirimliliğinde belirgin bir azalma sağladığı gözlemlenmiştir. Uçucu kül ikamesi artışının su işleme derinliği ile kılcallık üzerinde de benzer şekilde belirgin bir iyileştirme sağladığını söylemek mümkündür. Gerek klor geçirimliliği gerekse su işleme ve kılcallık açısından sağlanan bu iyileştirmeler özellikle korozif ortamlara maruz beton ve beton arme yapıların üretiminde sürdürülebilirlik noktasında uçucu kül kullanımının azımsanmayacak yarar sağladığını ifade etmek mümkündür.

Anahtar Sözcükler: Beton, Durabilite, Uçucu kül, Klor g eçirimliliği, Kılcallık katsayısı, Su işleme derinliği

Giriş

Beton rakip malzemelere kıyasla ucuz olması, kolayca elde edilebilmesi ve arzu edilen biçimde üretilebilmesi nedeniyle günümüzde inşaat sektöründe kullanılan en yaygın yapı malzemesidir. Bunun yanı sıra beton zorlu çevre şartlarına maruz yapıların inşasında da kullanım önceliğini sürdürmektedir.

Sertleşmiş çimento hamuru bazik bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla asitli ortamlara maruz kaldığında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar neticesinde betonda yapısal bozulmalar oluşur. Bu tip zararlı ortamlara maruz kalan betonlar ın durabilitesinin belirlenmesi bakımından geçirimlilik temel faktördür (Mehta and Monteiro, 2006) .

Geçirimlilik, beton bünyesindeki boşlukların ve çatlakların büyüklüğüne, dağılımına ve beton yüzeyindeki mikro iklime bağlıdır. Bu boşlukları sayısal ve hacimsel olarak minimize etmek beton teknolojisinin kuralları ile mümkündür (Baradan ve diğ., 2010).

Betonun geçirimliliği; su/bağlayıcı oranını düşürerek, beton üretiminde uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi bazı mineral katkılar kullan arak ve betonu yerleştirmede ve sıkılamada azami ihtimam göstererek azaltılabilir.

Geçirimliliği azaltmak için betonda uçucu kül kullanımı son yıllarda yaygın bir uygulamadır. Uçucu kül elektrik üretim santrallerinde toz kömür tüketiminden oluşan artık malzemenin ince öğütülmesiyle elde edilir.Uçucu külün betonda puzolanik malzeme görevi görmesi yanı sıra boşlukları doldurma özelliği de vardır (Fraay ,et al., 1989). Uçucu kül Portland çimentosuyla kütlece %50 oran ına kadar yer değiştirilebilir. Uçucu külün betonda kullanımı ile işlenebilirlikte iyileşme, su oranında azalma, hidratasyon ısısında azalma, çekme dayanımında artış, geçirimlilikte azalma ve durabilitede iyileşme gibi olumlu özellikler gözlenebilir. Uçucu kül kullanımı ayrıca çevreye verilen zararı da azaltır. 1 kg çimento üretmek için atmosfere salınan CO_2 yaklaşık 1 kg mertebesindedir (Reiner, 2007). Sanayi atığı uçucu kül çimento ile ikame edilerek kullanılması durumunda ikame oranı ile aşağı yukarı eşdeğer oranda sera gazı salınımını azalmaktadır.

Betonarme dünya çapında çok yaygın olarak kullanılan bir yapı elemanıdır (Sideris and Savva, 2005). Betona klor girişi betonarme yapının durabilitesini olumsuz etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Betonarme yapı elemanı bünyesine klor girişi öncelikle donatı korozyonuna ve devamında yapısal bazı bozukluklara yol açar (Vu and Stewart, 2000). Klor iyonları ve sülfatların beton içine girişi difüzyon ve kılcallık etkisi ile gerçekleşir (Martys and Ferraris, 1997). Betonda klor girişi ile oluşan donatı korozyonu köprülerin, viyadüklerin, denize maruz yapıların, fabrikaların ve diğer pek çok benzeri yapının hasar görmesine neden olur. Avrupa'da betonarme yapılarda meydana gelen korozyon sonucu oluşan hasarı gidermek için yıllık yapılan harcama 5 milyar Euro'dan fazladır (Klinghoffer , et al., 2000).

Betonda mineral katkı kullanımı ile ilgili pek çok çalışma vardır. Yapılan araştırmaların birinde 355 kg/m^3 ve 517 kg/m^3 olarak iki farklı dozajda bağlayıcı içeren betonlar üretilmiştir. Ayrıca her iki seri için %30 ve %40 oranlarında uçucu kül çimento ile ikame edilerek çeşitli deneyler gerçekleştirilmiş ve genel olarak uçucu kül ikame oranının artmasıyla betonun dayanım ve durabilite özelliklerinin iyileştiği görülmüştür. Ayrıca dozajın ve kür süresinin artması ile Coulomb cinsinden klor geçirimlilik değerlerinin azaldığı görülmüştür (Nath and Sarker, 2011) .

Amaç

Çalışma kapsamında farklı oranlarda çimento ile ikame edilerek kullanılan uçucu külün beton un klorür geçirimliliği, su işleme derinliği, kılcal su emme ve basınç dayanımına etkisi araştırılmıştır.

Çalışmada 290 kg/m^3 ve 340 kg/m^3 dozajlı beton karışımları üretilmiştir. Bu dozajların seçilmesinin amacı piyasada yaygın olarak kullanılan C20/25 ve C25/30 sınıfı betonların üretiminde bu miktarlarda çimento kullanılması nedeniyledir. Her bir dozaj için ağırlıkça %10, %20 ve %30 olmak üzere uçucu kül çimento ile ikame edilmiştir. Ayrıca her bir dozaj için karşılaştırma yapmak amacıyla uçucu kül içermeyen şahit betonlar da üretilmiştir. Tüm karışımlarda çökme 6 cm olacak şekilde sabit tutulmaya çalışılmıştır. Bunu gerçekleştirmek için bir süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Tüm numuneler deney yaşına kadar standart kür ortamında bekletilmiştir.

Deneysel Çalışma

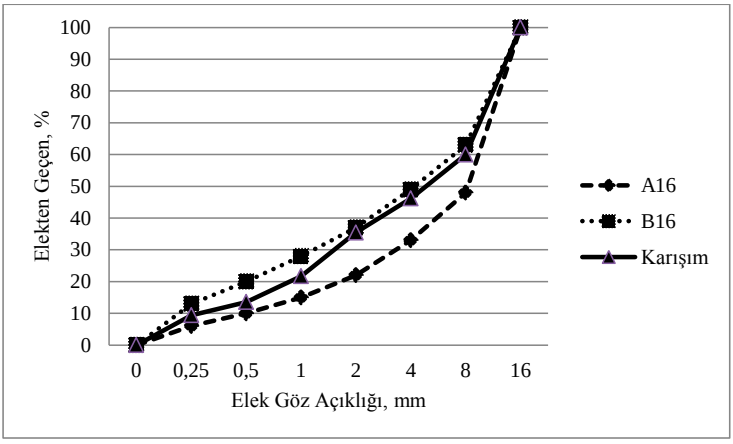
Kullanılan Malzemeler

Agrega

Çalışmada kalker esaslı kırma taş ve kırma kum karışımından oluşan en büyük tane çapı 16 mm olan bir karışım agregası kullanılmıştır. Agregalara ilişkin doygun kuru yüzey özgül ağırlıklar, su emme ve nem içerikleri Tablo 1'de ve granülometrik bileşim ve ilgili sınır eğrileri Şekil 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Agregalar a ilişkin özgül ağırlık, su emme ve nem içerikleri

Agrega	Özgül ağırlık, g/cm^3	Su emme, %	Nem içeriği, %
Kırmataş	2.74	1.00	0.25
Kırma kum	2.64	2.60	1.60



Şekil 1. Karışım agregasına ait granülometri eğrisi ve ilgili sınır eğrileri

Çimento

Üretimlerde Aşkale Trabzon Çimento Fabrikası üretimi CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentoya ilişkin özellikler Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2 . Çimentoya ilişkin fiziksel, kimyasal ve bazı mekanik özellikler

Kimyasal Özellikler		Fiziksel ve Mekanik Özellikler		
Bileşenler	Portland Çimentosu, %	45 mikron elek üstünde kalan, %		9.8
SiO_2	19.46	90 mikron elek üstünde kalan, %		1
Al_2O_3	5.11	Özgül Yüzey (Blaine), cm^2/g		4126
Fe_2O_3	3.31	Özgül Ağırlık, g/cm^3		3.12
CaO	60.23	Priz Süresi (Vicat), dak	Başlangıç	140
MgO	2.08		Bitiş	200
SO_3	3.05	Su İhtiyacı, %		29.2
Na_2O	0.27	Hacim Genleşmesi, mm		1
K_2O	0.69	Basınç Dayanımı, MPa	2 gün	28
Cl^-	0.02		7 gün	40.4
Kızdırma Kaybı	3.00		28 gün	51.5

Uçucu Kül

Çalışmada Zonguldak -Çatalağzı termik santralinden temin edilen uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu kül ASTM C 618`e göre F sınıfı olup bazı özellikleri Tablo 3'de verilmektedir .

Tablo 3. Uçucu küle ilişkin bazı fiziksel ve kimyasal özellikler

Kimyasal Özellikler		Fiziksel Özellikler	
Bileşenler	%	Yoğunluk, g/cm^3	2.34
SiO_2	61.57	45 µ elek üstü kalan, %	16.5
Al_2O_3	20.25		
Fe_2O_3	7.30		
CaO	1.54		

Kimyasal Katkı Maddesi

Çalışmada kimyasal katkı maddesi olarak bir süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır.

Beton Tasarımı

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen üretimlere ilişkin karışım oranları Tablo 4'de verilmektedir. Tüm karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0.50 olarak alınmıştır. Her bir üretimde 4 adet 15 cm küp numune, iki adet 10 cm küp numune ve bir adet 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde silindirik numune üretilmiştir. Standart kür gören numunelerin iki tanesi 28 gün sonunda eksenel yükleme altında kırılarak basınç

dayanımı belirlenmiştir. Geriye kalan iki adet 15 cm küp numune üzerinde 28 gün sonunda su işleme derinliği tayini deneyi gerçekleştirilmiştir. 10 cm küp numuneler üzerinde 28 günlük kılcal su emme deneyi gerçekleştirilerek kılcallık katsayısı belirlenmiştir. Silindirik numuneler 28 gün sonunda beton kesme makinesi ile her iki uçtan 2.5 cm kesilerek içte kalan kısımdan hazırlanan 5 cm yüksekliğinde ve 10 cm çapında numune üzerinde hızlı klor geçirimliliği deneyi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.Gerçekleştirilen üretimlere ilişkin karışım oranları

Üretim No	Uçucu Kül İkamesi, %	Malzeme Miktarları, kg/m^3				Çökme, cm
		Çimento	Su	Agrega	Uçucu Kül	
1	0	290	145	1994.5	0	6
2	10	261		1985.8	29	10
3	20	232		1977.0	58	7
4	30	203		1968.3	87	5.5
5	0	340	170	1883.9	0	6.5
6	10	306		1873.6	34	6
7	20	272		1863.3	68	6
8	30	238		1853.1	102	6.5

Hızlı Klor Geçirimliliği Deneyi

ASTM C 1202`ye göre gerçekleştirilen hızlı klor geçirimliliği deneyinde suya doygun hale getirilen numuneler bir yüzeyi %3'lük NaCl diğer yüzeyi 0.3M NaOH çözeltisine temas edecek şekilde düzeneğe yerleştirilmiştir. Doygun haldeki numunelerden su sızmayı engellemek için numunelerin cihaz ile temas etmeyen yüzeyleri silikon ile yalıtılmıştır. 6 saat süresince 60V gerilime maruz bırakılan numunelerden geçen elektriksel yük Coulomb (C) cinsinden kaydedildi. Deneysel gerçeklemede kullanılan düzenek Şekil 2`de verilmektedir.



Şekil 2. Hızlı klor geçirimliliği deney düzeneği

Ölçülen elektriksel yük itibariyle ASTM C 1202 standardı kapsamında betonun klorür geçirimlilik sınıflamasına ilişkin yapılan değerlendirme Tablo 5`te verilmektedir.

Tablo 5. ASTM C 1202'ye göre klorür geçirimlilik sınıflaması

Geçen Yük (Coulomb)	Klorür Geçirimlilik Sınıfı
>4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir

Su İşleme Derinliği Deneyi

TS EN 12390 -8 standardına uygun olarak gerçekleştirilen su işleme derinliği tayini deneyinde numunele re 72 saat süresince 5 bar basınç altında su tatbik edildi. Basınçlı su işleme deneyi uygulanan numuneler su basıncı uygulanan yüzeye dik olacak şekilde ortadan ikiye yarıldı. Yarma yüzeyinde suyun nüfuz derinliği kalemle çizilerek en büyük su işleme derinliği belirlenmiştir. Deneyde kullanılan aparat Şekil 3`de, yarma yüzeyinde suyun işleme derinliği işaretlenmiş beton numune Şekil 4`de verilmektedir.



Şekil 3. Su işleme derinliği düzeneği



Şekil 4. İşaretlenmiş su işleme derinliği

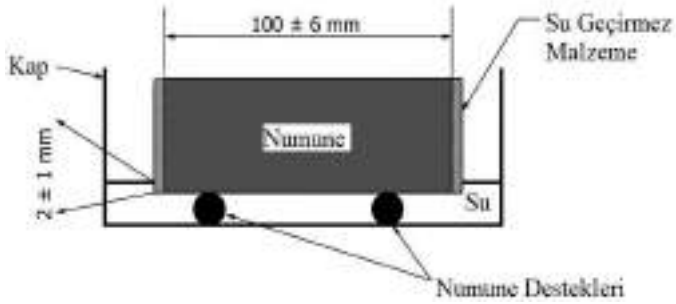
Basınç altında ölçülen maksimum su işleme derinliği itibariyle TS EN 12390-8 standardı kapsamında yapılan değerlendirme Tablo 6`da verilmektedir.

Tablo 6. Betonda su işleme derinliğinin değerlendirilmesine ilişkin kriterler

Maksimum Su İşleme Derinliği (mm)	Betonun Geçirimlilik Sınıfı
>50	Geçirimli Beton
<50	Geçirimsiz Beton
<30	Zararlı Ortamlara Karşı Geçirimsiz Beton

Kılcal Su Geçirimliliği Deneyi

ASTM C1585'e göre gerçekleştirilen kılcal su emme deneyi için 10 cm küp numuneler hazırlanmıştır. İki gün süreyle 70°C fırında bekletilen numuneler bu süre sonunda fırından çıkarılarak laboratuvar ortamında soğumaya bırakılmıştır. Numuneler soğuduktan sonra 2 mm su içinde dalacak şekilde Şekil 5`te şematik olarak gösterilen düzeneğe yerleştirildi. Su girişini engellemek için numune yan yüzeyleri geçirimsiz hale getirildi. Numunelerin ağırlıkları 0, 5, 10, 20, 30, 45, 60 ve 1440 dakikalık süreler sonunda ölçülerek zamanla kılcal yolla emilen su miktarı belirlenmiş ve kaydedilmiştir. Ölçüm değerleri kullanılarak kılcallık katsayısı değerleri her bir numune için cm^2/s cinsinden belirlenmiştir.



Şekil 5. Kılcal su geçirimliliği deney düzeneği

Basınç Dayanımı Deneyi

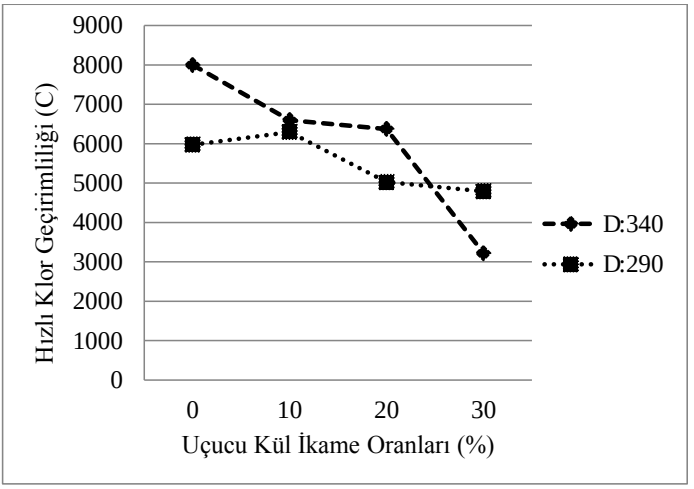
Basınç dayanımı ölçümleri için 15 cm küp numuneler kullanılmıştır. Bu numuneler ilgili standart TS EN 12390 -3 uyarınca eksenel yük altında kırılarak basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir.

Deney Sonuçları

28 gün süresince standart kür ortamında küre tabi tutulan ve ilgili standart ASTM C 1202`ye göre gerçekleştirilen hızlı klor geçirimliliği deneyi sonucu elde edilen ölçümler Şekil 6`da verilmektedir. Grafikte %0, %10, %20 ve %30 oranlarında çimento ile uçucu kül ile ikame edilerek üretilen betonlara ilişkin ölçülen hızlı klor geçirimliliği değerleri görülmektedir. Değerlendirme iki toplam bağlayıcı miktarı (290 ve 340 kg/m^3) için yapılmıştır. Grafikten açıkça görüleceği üzere uçucu kül ikame oranı arttıkça betonların klor geçirimliliklerinde belirgin bir azalma görülmektedir. Toplam bağlayıcı miktarı arttıkça uçucu kül ikamesindeki artışın hızlı klor geçirimliliği üzerindeki etkisi daha da belirginleşmektedir.

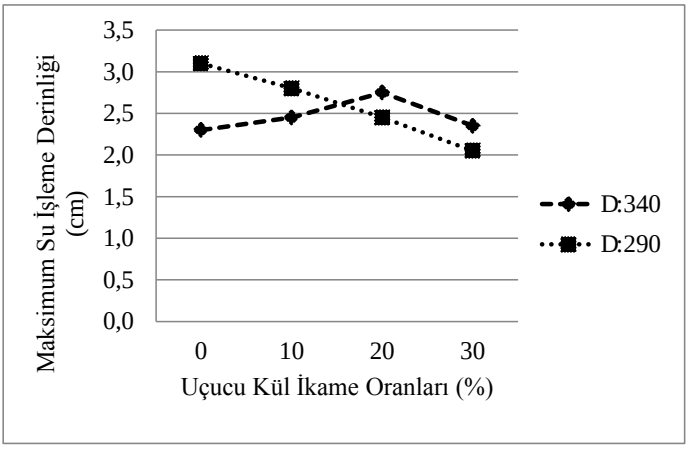
0.47 su/çimento oranında 28 gün standart küre tabi tutulan numuneler üzerinde gerçekleştirilen hızlı klor geçirimliliği deneyinde ölçülen yük 7303 C mertebesindedir (Türkel ve Tarım, 2011). Bu değer yaptığımız çalışmada elde edilen değerle uyumludur. Başka bir çalışmada 0.5 su/çimento oranında ve 330 kg/m^3 çimento ile üretilen

betonlarda yük değeri 5650 C iken uçucu kül ikameli betonlarda yük değeri 3000 C mertebesinde olduğu görülmektedir (Uluöz ve diğ.,2011). ASTM C1202 standardına göre Coulomb cinsinden ölçülen yük değeri 4000 C`dan büyük olması halinde betonun klor geçirimliliğinin yüksek olduğu kabul edilir. Yalnızca 340 kg/m^3 bağlayıcı içeren ve %30 uçucu kül ikame edilen betonlar ilgili standarda göre orta derece klor iyonu geçirimliliği sınıfına girmektedir.



Şekil 6.Standart kür uygulanan numuneler için hızlı klor geçirimlilikleri

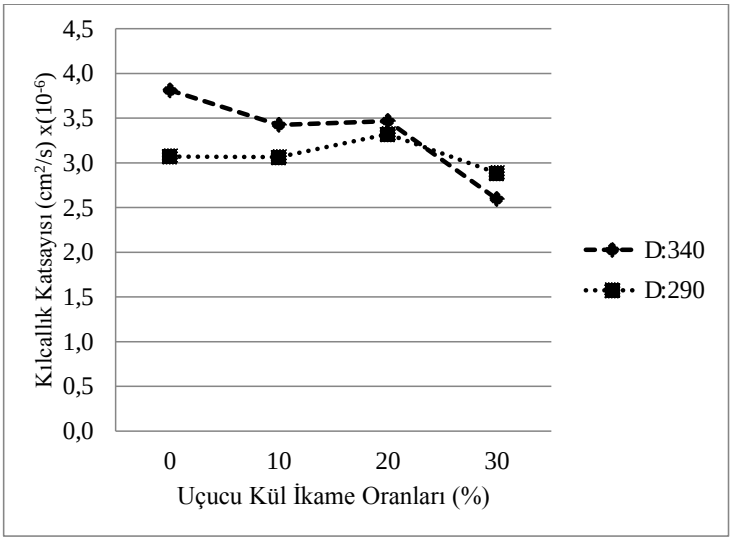
Şekil 7 iki farklı dozajda (290 ve 340 kg/m^3) üretilen betonlar üzerinde ölçülen maksimum su işleme derinliğinin uçucu kül ikame oranına bağlı olarak değişimini göstermektedir. İlgili standart TS EN 12390-8'e göre betonun geçirimsiz olarak nitelendirilebilmesi için maksimum su işleme derinliği 50 mm'den az olmalıdır. Zararlı ortamlara maruz kalması halinde bu değerin 30 mm'den küçük olması istenir.



Şekil 7. Numuneler üzerinde ölçülen maksimum su işleme derinlikleri

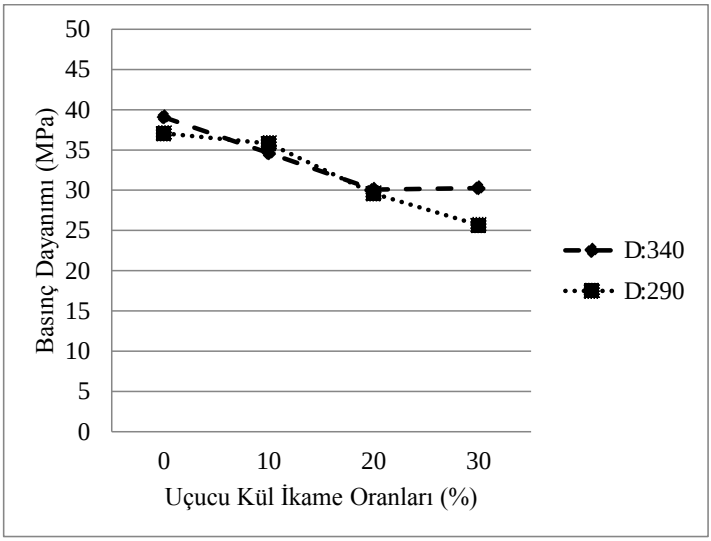
Şekil 7'den görüldüğü gibi maksimum su işleme derinliği 340 kg/m^3 dozajlı betonlarda uçucu kül ikamesinin artışına bağlı olarak değişim göstermezken 290 kg/m^3 dozajlı betonlarda uçucu kül ikamesi arttıkça su işleme derinliği belirgin bir biçimde azaldığı görülmektedir. Başka bir ifadeyle, yüksek dozajlı betonlar yeterince boşluksuz olması nedeniyle uçucu kül ikamesinin su işleme derinliği üzerindeki etkisi ikinci planda kalmaktadır. Bu sonucu uçucu kül ikamesinin su işleme derinliği üzerine etkisinin kayda değer bulunmadığı rapor edilen 0.5 su/çimento oranlı ve 330 kg/m^3 dozajlı bir beton üzerinde yapılan bir çalışma desteklemektedir (Uluöz ve diğ., 2011).

Üretilen betonlar üzerinde ölçülen kılcal geçirimlilik değerleri Şekil 8`de verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere 290 kg/m^3 dozajlı betonlarda kılcallık katsayısının uçucu kül ikamesine bağlı olarak değişimi ihmal edilebilecek düzeyde kalırken 340 kg/m^3 dozajlı betonlarda uçucu kül ikamesi artışına bağlı olarak kılcallık katsayısında hatırı sayılır bir azalma görülmektedir.



Şekil 8. Beton num uneler üzerinde ölçülen kılcallık katsayıları

Şekil 9`da beton numuneler üzerinde ölçülen basınç dayanımları görülmektedir. Şekilden görüleceği üzere uçucu kül ikamesi arttıkça basınç dayanımında belirgin bir azalma söz konusudur. Dayanımda gözlemlenen azalma eğilimi hem 290 kg/m^3 dozajlı betonlarda hem 340 kg/ m^3 dozajlı betonlarda benzerdir.



Şekil 9. Betonlar üzerinde ölçülen basınç dayanımları

Sonuç

Gerçekleştirilen deneysel çalışmadan elde edilen bulgular aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Hızlı klor geçirimlilik değerleri iki farklı dozaj ile üretilen betonlarda uçucu kül ikamesi ile azal maktadır. Başka bir ifadeyle uçucu kül ikamesi artışına bağlı olarak betonların klor geçirimliliğinde belirgin bir düşüş gözlenmektedir. Azalma yüksek dozajlı betonlarda daha belirgindir.
- Uçucu kül ikamesinin artışı ile maksimum su işleme derinliğinde gözlemlenen azalış 290 kg/m^3 dozajlı betonlarda daha belirgindir. Bu sonuç, uçucu kül kullanımın geçirimsizlik sağlama noktasında düşük dozajlı betonlarda daha etkili olduğunu göstermektedir.
- 340 kg/m^3 dozajlı betonlarda daha belirgin olmak üzere uçucu kül ikamesi artışına bağlı olarak kılcal su emme katsayısında gözlemlenen azalış daha belirgindir.
- Betonların basınç dayanımları dozajdan bağımsız olarak uçucu kül ikamesi arttıkça azal maktadır.
- Sonuç itibariyle, dozaj dan bağımsız olarak uçucu kül ikamesinin artışı ile betonun dayanıklılık özelliklerinin iyileştiği gözlenmektedir. Bu sonuç suya maruz ortamlarda kullanılması halinde betonda uçucu külün en %30 oranında çimento ile ikamesinin sürdürülebilirlik noktasında önemli olduğu görülmektedir.

Kaynaklar

Baradan, B. , Yazıcı, H., Ün, H. (2010) Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite). 1. Baskı, THBB, İstanbul, Türkiye.

Fraay, A.L .A.,Bijen, J.M., De Haan, Y.M.(1989) The reaction of fly ash in concr ete a critical examination. Cement and Concrete Research, Vol. 19, No. 2, pp. 235 –246.

Klinghoffer, O.,Frølund, T., Poulsen, E. (2000) Rebar corrosion rate measurements for service life estimates. Paper presented at the ACI Fall Convention Committee 365 ‘‘Practical Application of Service Life Models’’, Toronto.

Martys, N.S. and Ferraris, C.F. (1997) Capillary transport in mortars and concrete. Cement and Concrete Research , Vol. 27, No. 5, pp. 747 -760.

Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M. (2006) Concrete: Microstructure, Properties and Materials. 3rd ed.,McGraw Hill, USA.

Nath, P. and Sarker, P. (2011) Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete. Procedia Engineering , Vol. 14, pp. 1149 -1156.

Reiner, M. (2007) Technolog y, environment, resource and policy assessment of sustainable concrete in urban infrastructure. Ph.D. Thesis, University of Colorado at Denver and Health Sciences Center, USA.

Sideris, K.K. and Savva, A.E. (2005) Durability of mixtures containing calcium nitrite based Corrosion inhibitor. Cement and Concrete Comp .,Vol. 27, No. 2, pp. 277 –87.

Türkel, S. ve Tarım, E.E. (2011) Deniz suyunun farklı tip çimentolarla yapılan harçlara etkisi. DEÜ Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. Cilt. 13, Sayı. 3, sh.1-11.

Uluöz, N. Özbebek, H. Arslan, M. Açık, H. (2011) Farklı çimento tipleri ve mineral katkılar ile üretilen betonların mekanik ve geçirimlilik özellikleri. Beton 2011 Hazır Beton Kongresi, Bildiriler Kitabı, İstanbul, sh. 376-387.

Vu, K.A.T. and Stewart, M.G. (2000) Structural reliability of concrete bridges including improved chloride -induced corrosion models. Structural Safety , Vol. 22, No. 4, pp. 313–333.

Harşit Çayı Vadisi Agregalarının Alkali Silika Reaksiyonu Bakımından İncelenmesi

Şirin Kurbetci **Sevda Karakaş**

Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080 Trabzon
Tel: (462) 3772052
E-mail: skurbetci@ktu.edu.tr

Öz

Alkali-silika reaksiyonu, betondaki agreganın reaktif silika formlarının çimento alkalileri ile reaksiyonu olarak tanımlanabilir. Bu reaksiyon sonucunda su emerek genleşen ve betonda hasarlara yol açabilecek düzeyde çekme gerilmeleri meydana getirebilen ürünler oluşmaktadır. Bu çalışmanın amacı Harşit Çayı vadisinden temin edilen agregalarının alkali-silika reaktivite potansiyellerini belirlemektir.

Deneysel çalışmada kullanılan örnekler, vadinin 5 farklı lokasyonunda bulunan agrega ocaklarından sağlanmıştır. Agrega örneklerinin petrografik analizi yapılarak minerolojik yapıları incelenmiştir. Petrografik analizde tüm örneklerin baskın olarak volkanik kaya kırıntılarından oluştuğu, volkanik kaya kırıntılarının büyük kısmı da volkanik camdan oluşan bir matriks içerdiği belirlenmiştir. ASTM C 1260 Hızlandırılmış Harç Çubuğu ve ASTM C 289 Kimyasal Yöntem uygulanarak alkali silika reaksiyonu yönünden zararlı olup olmadıkları belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak Harşit Çayı vadisi agregalarının alkali-silika reaksiyonu potansiyellerinin olduğu söylenebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Agrega, Alkali -Silika Reaksiyonu, Petrografik Analiz, ASTM C289 Kimyasal Metod, ASTM C1260 Hızlandırılmış Harç Çubuk Deneyi.

Giriş

Alkali silika reaksiyonu ilk olarak 1940 yılında Stanton tarafından ortaya koyulmuş ve mühendislik yapılarında sorun oluşturan bir problemdir. Bu reaksiyon betonda kullanılan çimentodan kaynaklanan alkali hidroksitlerle agregaların yapısında bulunan reaktif silis bileşenleri arasında oluşur (Swamy, 1990). Yapılacak dikkatli incelemelerle tespit edilebilecek ASR belirtileri; genleşme, betonda çatlaklar, yüzey birikintileri, yüzey parçalanmaları-patlamaları ve renk değişimleridir. ASR varlığının en tipik göstergesi, genleşmelerle ortaya çıkan harita çatlağı tipindeki çatlak desenleridir.

Genleşmeye neden olan ASR'nin oluşabilmesi için agregada reaktif silika formları, betonda yeterli miktarda alkali ve ortamda nem bulunmalıdır. Bazı çimentoların içinde fazla miktarda bulunan Na_2O ve K_2O alkali oksitleri nin beton boşluk suyunda çözünerek oluşturdukları NaOH ve K OH, suyun pH değerinin yükselmesine sebep olur. Reaktif silis içeren agregalardaki silis ise bu yüksek pH' lı çözeltide çözünür ve su alarak şişme eğiliminde olan bir jel oluşur (Baradan, 2010). Reaksiyonun neden olduğu genleşmeden kaynaklanan çekme gerilmeleri belli bir sınırı aştığında beton için

potansiyel bir tehlike oluşturur (Farny and Kosmakta, 1997). Bu olay jel oluşumuyla eş zamanlı değildir. Bu nedenle jelin varlığı mutlaka ciddi boyutta ASR tahribatı oluşturacak anlamı taşımamaktadır. Jel ileriki safhalarda çimento hamurundan su emmek suretiyle hacmini artırarak agrega ve çimento hamurunda mikroçatlakların oluşmasına sebep olmaktadır. Mikroçatlaklarda yayılan jel giderek artar, su emerek daha da genleşir ve çatlakların genişleyip çoğalmasına, betonun çatlamasına neden olur (Neville, 1981).

Bileşiminde silis bulunan ve en yaygın olan mineraller kuvars, tridimit, kristobalit, opal ve kalsedon gruplarıdır (Ineson, 1990). Agreganın reaktifliğini onu oluşturan bileşenlerin formu ve türü belirler. Opal düzensiz kristal yapısı nedeniyle en yüksek reaktiviteye sahip agrega türüdür. Volkan camları, kriptokristalin kuvars, kalsedon, tridimit ve kristobalit ise orta derecede reaktif minerallerdir (Ineson, 1990; Michel, vd; 2000). X ray-analizi, elektron mi kroskobu ve diğer cihazların kullanımıyla desteklenen petrografik incelemeler ve ince kesit çalışmaları, agrega minerallerinin belirlenmesinde yeterli bilgi sağlayabilir.

Agrega reaktif silis mineralleri içeriyorsa, agrega-çimento bileşiminin reaktif olup oladığının tespiti gerekir. Bu amaçla değişik deney metotları geliştirilmiştir. Bu deney metotları ASR'nin genleşme özelliğinden yararlanılarak yapılan deneyler ile kimyasal yolla yapılan deneyler olarak ikiye ayrılabilir. Bu test metotlarından en çok kullanılanlar harç çubuk yöntemi (ASTM C 227), hızlı harç çubuk yöntemi (ASTM C 1260), kimyasal yöntem (ASTM C 289) ve beton prizma testidir (ASTM C 1293).

Deneysel Çalışma

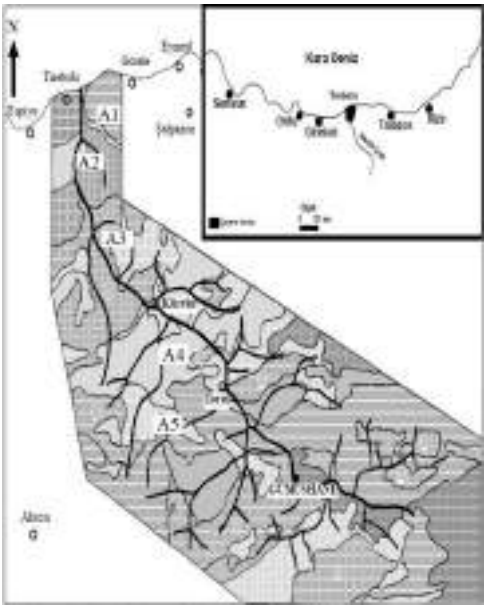
Amaç ve Kapsam

Beton üretiminde reaktif silis içeren agrega kullanılmaması durumunda ASR sorunundan söz edilemez. Ancak sorunsuz agrega kaynaklarına uzak olan inşaat alanlarında bu durum önemli bir problem oluşturmaktadır. Enerji ihtiyacı nedeniyle Doğu Karadeniz bölgesinde özellikle HES yapımları yoğun bir şekilde artmıştır. Bu santrallerin yapıldığı yerlerdeki agregaların ASR açısından tehlike oluşturup oluşturmadığı araştırılması gereken bir konudur. Bu çalışmanın amacı da, genellikle HES türü yapıların sıklıkla yapılmakta olduğu Harşit Çayı vadisi üzerinde, bölgedeki bu tür yapıların yapımında kullanılan agregaların sağlandığı belli noktalardaki taş ocaklarından alınan agregaların ASR yönünden zararlı etkisi olup olmadığını ortaya koymaktır.

Vadi üzerinde 5 farklı lokasyon dan örnek alınmıştır. Agrega örneklerinin petrografik analizi yapılarak minerolojik yapıları incelenmiştir. Alkali silika reaksiyonunu belirlemek amacıyla; ASTM C 1260 (2014)'a göre hızlandırılmış harç çubuk deney metodu ve ASTM C 289 (2007)'a göre kimyasal yöntemle agregaların potansiyel alkali silis reaktifliğinin tayini metodu uygulanmıştır. Hızlı harç çubuk deneyinde agregaların çimento hamuruyla oluşturduğu reaksiyon sonucu, genleşmesine bağlı olarak boy uzamaları belirlenmiştir. Kimyasal yöntemde ise alkali azalması ve çözünen silis miktarları belirlenmiştir.

Harşit Çayı Genel Jeolojisi

Çalışma alanı, Doğu Karadeniz Bölgesinde, Giresun-Gümüşhane illeri arasında kalan Harşit Çayı ve civarında yer alan vadiyi kapsamaktadır (Şekil 1). Harşit Çayı Gümüşhane ilinden başlayıp Giresun'un Tirebolu ilçesine kadar olan mesafede yer alır. Çalışmamızda Harşit Çayının bu civarından getirmiş olduğu agregalar ile bu bölgedeki kayaçlardan kırma eleme tesislerinde elde edilen numuneler üzerinde inceleme yapılmıştır.



Şekil 1 Çalışma sahası ve jeolojik haritası.

Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Agregalar

Agregaların temin edildiği lokasyonlar A1, A2, A3, A4 ve A5 koduyla Şekil 1'de görülmektedir. Agregalar tesislerden kırma kum halinde alınmıştır. Belirlenen özgül ağırlık ve su emme değerleri Tablo 2'te verilmiştir.

Tablo 2. Agregaların fiziksel özellikleri

Özellik	A1	A2	A3	A4	A5
Kuru Özgül ağırlık(gr/cm³)	2.54	2,58	2,47	2,51	2,56
Doygun kuru Yüzey özgül ağ. (gr/cm³)	2,59	2,63	2,52	2,57	2,60
Görünen Özgül ağırlık (gr/cm³)	2,69	2,71	2,60	2,68	2,67
Ağırlıkça su emme (%)	2,19	2,21	2,15	2,18	2,16

Çimento

Deneysel çalışmada CEM I 42.5 çimento kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1 Çimento analiz sonuçları.

Kimyasal analizler %		Fiziksel ve Mekanik Testler		
SiO_2	18,62	İncelik 45 µm elek üstü %		7,84
Al_2O_3	4,51			
Fe_2O_3	2,95	Özgül Ağırlık (gr/cm³)		3,13
CaO	64,33			
MgO	2,09	Özgül yüzey (gr/cm³)		3616
SO_3	2,77			
Kızdırma Kaybı	3,46	Piriz Başı (saat-dk)		2 sa-02 dk
Na_2O	0,25	Piriz sonu (saat -dk)		3 sa-02 dk
K_2O	0,62			
$(Na_2O)e: (Na_2O)+0,658K_2O$	0,66	Hacim genişlemesi (mm)		1
Cl	0,0191			
Ölçülemeyen	0,38	Basınç Dayanımı(Mpa)	2 gün	25,1
Toplam	100		28 gün	52,8
Serbest CaO	0,62	Su İhtiyacı %		28,8
Çözünmeyen kalıntı %	0,7			

Numunelerin Üretimi

Petrografik analiz DEÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nde gerçekleştirilmiştir. Binoküler mikroskop altında örneklerin orijinal hali ve polarizan mikroskop altında ise örneklerden hazırlanan ince kesitlerde inceleme yapılmıştır. Polarizan mikroskop altında örnekler içerisindeki bileşenlerin mineralojik ve petrografik özelliklerini belirleyebilmek için küçük parçalar şeklindeki örnekler araldit ile karıştırılmış ve 80^0C'deki etüvde yaklaşık 4 saatlik bir sürede sertleşmesi sağlanmıştır. Örnekler araldit ile tamamen çimentolana kadar işlem 4 kez tekrar edilmiştir. Sertleştirilen örnekler kesilerek cam üzerine yapıştırılmış ve 30 mikron kalınlığa ulaşana kadar aşındırılmıştır.

Hızlı harç çubuk deneyi için agregalar ASTM C1260 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Her çimento-agrega kombinasyonu için 1000 gr agrega, 441 gr çimento ve 194 gr su kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler dökümden sonra 24 ± 2 saat kür odasında bekletildikten sonra kalıptan çıkarılıp numaralandırılmıştır. Hassasiyeti 0,002 olan komparatörle ilk boy ölçümü yapılarak, 80 ± 2 °C sıcaklıktaki saf suya yerleştirilmiştir. Saf su banyosunda 24 ± 2 saat bekletilen örneklerin boy ölçümleri tekrar yapıldıktan sonra, örnekler hazırlanan 80 ± 2 ° C sıcaklığındaki 1 N NaOH çözeltisi içeren alkali tankına konmuştur. Alkali tankında bekletilen harç çubuklarının periyodik olarak 3, 7 ve 14. günlerde boy ölçümleri alınmıştır.

Kimyasal yöntemde ise ASTM C 289 standardında belirtildiği gibi hazırlanan numuneler alkali çözelti ile 80 ^{0}C de reaksiyona sokulmuş ve 24 saat sonra agregadan çözülerek ayrılan silis miktarı ve alkalinitedeki azalma ölçülmüştür. Deney A1, A2, A3 ve A4 örnekleri üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Deney Sonuçları ve İrdeleme

Petrografik Analiz

Agregaların petrografik analizleri, aynı vadi agregaları olması sebebiyle benzer yapıda olduklarını göstermektedir.

Yapılan mikroskobik incelemeler sonucunda tüm örneklerde ortak olarak tanelerin baskın olarak volkanik kaya tanelerinden oluştuğu görülmüştür. Diğer tane bileşenini ise karbonat kaya parçaları oluşturmaktadır. Karbonat kaya kırıntılarının tamamı kalsitten oluşmaktadır. Ayrışmamış volkanik kaya kırıntılarının büyük kısmı matriks ve bunlar içerisinde yüzen iri taneli minerallerden oluşturmaktadır. Matriks genellikle volkanik camdan meydana gelmektedir, bazı tanelerde ise matriks cam ve mikrolitlerden (ince plajiyoklas kristalleri) oluşmaktadır. Volkanik kayalarda bulunan volkanik camın alkali-silis reaksiyonu oluşumunda oldukça etkili olduğu bilinmektedir (Wakizaka, 1998).

A1 örneğinde bazı volkanik kaya kırıntılarında camsı matrikste zeolitleşme gözlenmektedir. Kuvarslar volkanik, magmatik ve metamorfik kaya kırıntıları içerisinde bulunmaktadır (Şekil 2). Volkanik, magmatik ve metamorfik kaya kırıntılarında gözlenen mineraller kuvars, plajiyoklas, ortoklas, klorit, kalsit, piroksen, amfibol, muskovit, sanidin, zeolit ve opak olarak saptanmıştır. Örnekte, volkanik kaya kırıntıları yaklaşık % 85-90, karbonat kırıntıları yaklaşık % 5-7, magmatik kaya kırıntıları % 5-7 ve metamorfik kaya kırıntıları oranı yaklaşık % 2 olarak verilebilir. Kaya kırıntılarındaki kuvarsların oranı ise yaklaşık olarak % 2-3 civarındadır.



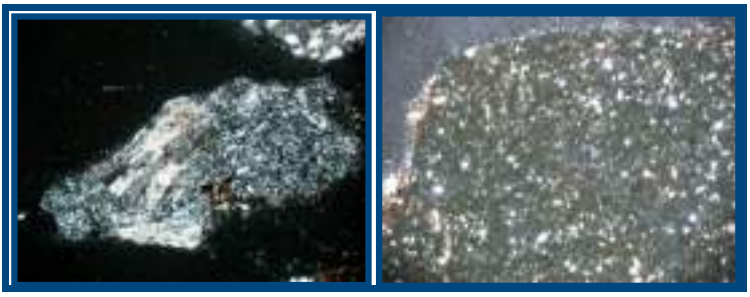
Şekil 2 Örnekte gözlenen volkanik kaya kırıntıları, + nikol.

A2 örneğinde volkanik ve magmatik kaya kırıntılarında gözlenen mineraller kuvars, plajiyoklas, ortoklas, klorit, epidot, kalsit, piroksen, amfibol, biyotit ve opak olarak saptanmıştır (Şekil 3). Örnekte, volkanik kaya kırıntıları yaklaşık % 70, karbonat kırıntıları yaklaşık % 20-25 ve magmatik kaya kırıntıları yaklaşık % 8-10 olarak verilebilir. Volkanik ve magmatik kaya kırıntılarındaki kuvarsların oranı ise yaklaşık olarak % 2 -3 civarındadır.



Şekil 3 Kloritleşme sunan camsı matriksce zengin volkanik kaya parçaları, + ve // nikol.

A3 örneğinde volkanik ve magmatik kaya kırıntılarında gözlenen mineraller kuvars, plajiyoklas, ortoklas, klorit, epidot, kalsit, piroksen, amfibol, biyotit ve opak olarak saptanmıştır. Örnekte volkanik kaya kırıntılarının yaklaşık yüzdesi % 70-75, karbonat kırıntılarının yaklaşık yüzdesi ise % 3-5 ve magmatik kaya kırıntılarının yaklaşık yüzdesi ise % 20-25 olarak verilebilir. Volkanik ve magmatik kaya kırıntılarındaki kuvarsların oranı ise yaklaşık olarak % 3-5 civarındadır. (Şekil 4)



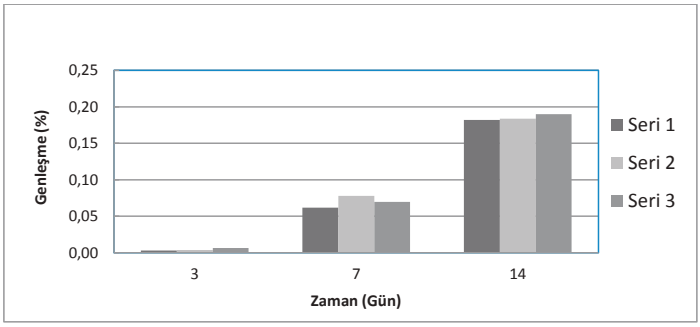
Şekil 4 Örnekte gözlenen mikrolitce zengin ve cam matriksce zengin volkanik kaya parçaları, + nikol

A4 örneğinde Volkanik kaya kırıntılarında matriks içerisinde gözlenen iri taneli mineraller kuvars, plajiyoklas, piroksen ve opak olarak saptanmıştır (Şekil 5). Örnekte volkanik kaya kırıntılarının yaklaşık yüzdesi %70-75, karbonat kırıntılarının yaklaşık yüzdesi ise % 25-30 olarak verilebilir. Volkanik kaya kırıntılarındaki kuvarsların oranı ise yaklaşık olarak % 2-3 civarındadır.

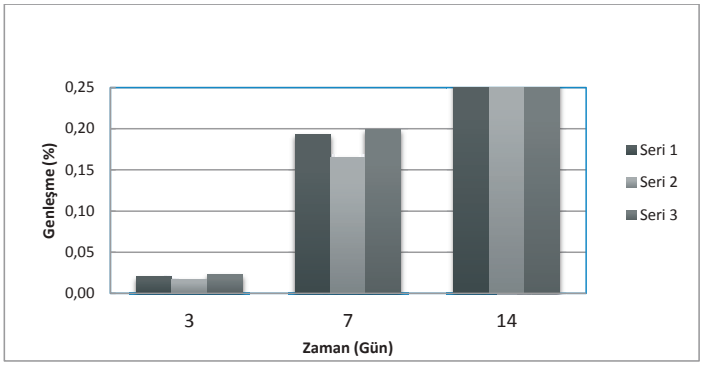


Şekil 5 a) Mikrolitce zengin matriksten oluşan volkanik kaya kırıntısı, + nikol.
b) Cam matriksce zengin volknaik kaya kırıntısı, // nikol.

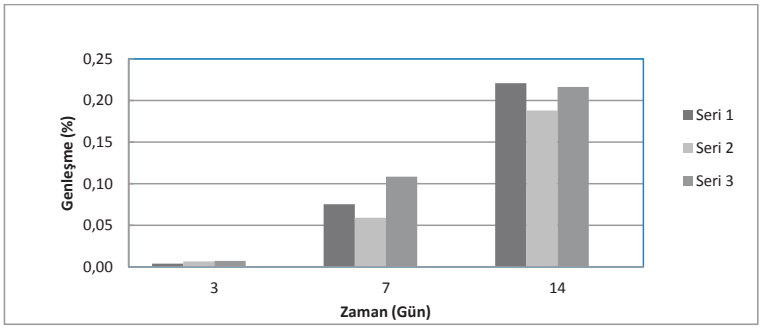
Her bölgeden alınan agregalardan hazırlanan 3'er numune üzerinde 3, 7 ve 14 günde yapılan boy ölçümleri sonucu boyca genleşme yüzdeleri hesaplanmış ve ortalamaları alınmıştır. Şekil (6-10) her bir örnek grubunun boyca genleşme yüzdesi- zaman ilişkisini göstermektedir. Şekil 11'de ise tüm örneklerin 14 günlük genleşme yüzdeleri bir arada verilmiştir.



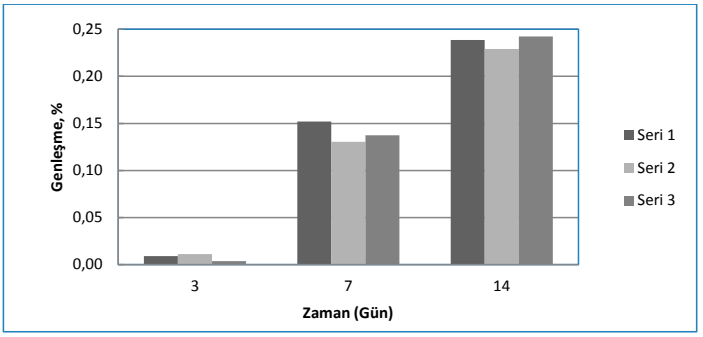
Şekil 6 A1 örneğine ait genleşme-zaman ilişkisi.



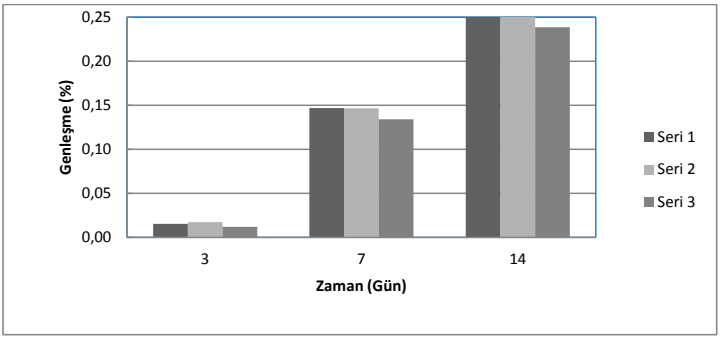
Şekil 7 A2 örneğine ait genleşme-zaman ilişkisi.



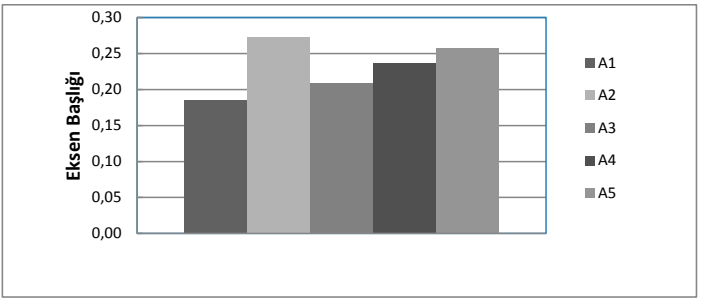
Şekil 8 A3 örneğine ait genleşme-zaman ilişkisi.



Şekil 9 A4 örneğine ait genleşme-zaman ilişkisi.



Şekil 10 A5 örneğine ait genleşme-zaman ilişkisi.



Şekil 11 Örneklerin 14 günlük genleşme-zaman ilişkisi.

ASTM C1260 "Agregaların Potansiyel Alkali Reaktivitesi için Deney Metodu" standardına göre 14 gün sonunda % 0.10 ve daha az genleşme zararsız davranış kabul edilir. Genleşmeler % 0.20 değerinin üstündeyse agregalar potansiyel olarak zararlı

kabul edilir . 14gün sonundaki genleşmeler, % 0.10 ile % 0.20 değerinin arasındaysa agregaların saha performansına göre zararsız veya hasara yol açacak nitelikte olup olmadığına karar verilebilir.

Bu standarda göre değerlendirildiğinde, sadece A1 örneğinin 14 günlük boy değişim yüzdesi % 0.185 değeriyle şantiye koşullarında hem zararlı hem de zararsız davranış gösterebilen agregalar sınıflandırmasındadır. Diğer örneklerin 14 günlük boyca genleşme yüzdeleri ise sırasıyla 0.257, 0.209, 0.273 ve 0.237'dir. Yani tüm örnekler ASTM C1260 standardına göre zararlı sınıfında yer almaktadır. A2, A4 ve A5 örneklerinin 7 günlük genleşmeleri dahi zararsız agrega sınırının üzerinde olmuştur.

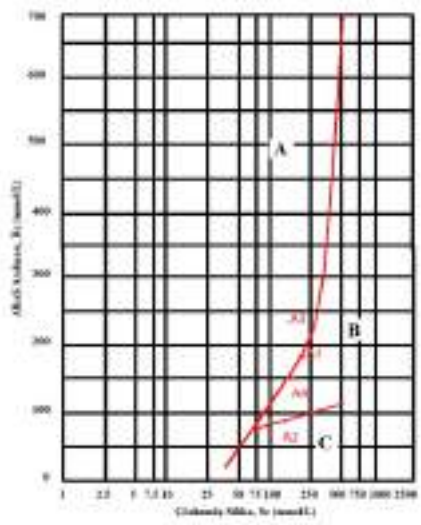
Kimyasal Yöntem

Deneye tabi tutulan agreganın çözünmüş silis (Sc) ve potansiyel alkali azalması (Rc) değerleri kullanılarak (Tablo 3) oluşturulmuştur.

Tablo 3. Agregaların Çözünmüş Silis ve Potansiyel alkali azalması değerleri

	Çözünmüş Silis(mmol/L)	Alkali Azalması(mmol/L)
A 1	212,62	180
A 2	145,70	90
A 3	177,65	240
A 4	155,01	150

Agregaların çözünmüş silis (Sc) ve potansiyel alkali azalması (Rc) değerleri ASTM C 289 da verilen sınıflandırma grafiği üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 12).



Şekil 12. Çözünen silika ve alkalinite azalması değerlerine göre agrega örneklerinin sınıflanması.

Buna göre A2 örneği zararlı kabul edilen C bölgesinde, A4 ve A1 örnekleri potansiyel zararlı kabul edilen B bölgesinde yer almaktadır. A3 örneği ise zararsız agrega bölgesinde olmakla birlikte potansiyel zararlı agrega bölgesi sınırına oldukça yakın bir noktadadır.

Bir agreganın ASR yönünden zararlı olan C bölgesinde yer alması, agreganın zararlı derecede alkali reaktif olduğunun göstergesidir. Ancak, B bölgesinde yer alan agrega, her ne kadar alkalilerle çok fazla reaktif olsa da, göreceli olarak harçta veya betonda düşük genleşme değerleri verebilir. Bu agregalar ile ilave deneyler gerçekleştirilmeli ve/veya betondaki performansı izlendikten sonra karar verilmelidir. Bu deney sonuçları elde edilinceye kadar agregaların potansiyel olarak zararlı oranda reaktif oldukları kabul edilir.

Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada üzerinde çok miktarda HES yapılmakta olan Harşit çayı vadisi boyunca 5 farklı noktadan alınan agregalar alkali silika reaksiyonu açısından incelenmiştir. Agregalar vadi boyunca yapılan santral yapımı için kullanılan agrega ocaklarından temin edilmiştir.

1. Petrografik analizde tüm örneklerin baskın olarak volkanik kaya kırıntılarından oluştuğu, volkanik kaya kırıntılarının büyük kısmı da volkanik camdan oluşan bir matriks içerdiği belirlenmiştir. Volkanik kayalarda bulunan volkanik camın alkali-silis reaksiyonu oluşumunda oldukça etkili olduğu bilinmektedir.

2. Kimyasal yöntem sonucunda elde edilen alkali azalması ve çözünen silis miktarları ASTM C 289 standardında verilen zararlı ve zararsız agrega sınırlarını veren grafiğe yerleştirildiğinde A2 örneği zararlı bölgede, A1 ve A4 örnekleri potansiyel zararlı bölgede, A3 örneği ise potansiyel zararlı agrega sınırına çok yakın olarak zararsız bölgede sonuç vermiştir.

3. Hızlandırılmış Harç Çubuk Deneyinde, A1, A2, A3, A4 ve A5 örneklerinin boyca uzamaları yüzdeleri sırasıyla % 0.185, 0.273, 0.209, 0.237 ve 0.257 olmuştur. ASTM C 1260'a göre A1 örneği şantiyede hem zararlı hem de zararsız davranış gösterebilir niteliktedir. A2, A3, A4 ve A5 örnekleri ise 14 günlük uzama yüzdesi sınırı olan % 0,2 değerinin üzerinde uzama yaptıkları için zararlı agrega sınıfına girmektedirler.

4. Çalışmada kullanılan petrografik analiz, hızlı harç çubuk ve kimyasal yöntem sonuçları birlikte değerlendirildiğinde Harşit Çayı Vadisi agregalarının alkali silika reaksiyonuna eğilimli oldukları söylenebilir. Fakat kesin sonuç için bu çalışmanın devamında beton prizma deneyi uygulanabilir ve alkali agrega reaksiyonunu kontrol altına almak için agregaların mineral katkı maddeleriyle kullanımı gibi bazı tedbirlerin kullanılıp kullanılmayacağı konusunda incelemeler yapılabilir.

Kaynaklar

ASTM C1260 -14 (2014), Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar -Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA

ASTM C289 -07 (2007), Standard Test Method for Potential Alkali -Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method), ASTM International, West Conshohocken, PA

Baradan,B. ve diğ.(2010) Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite) , DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları.

Farny,J. and Kosmatka,S.(1997) Diagnosis and control of alkali -aggregate reactions in concrete. IS413. Portland Cement Association . Skokie,IL

Ineson, P.R. (1990) Siliceous components in aggregates , Cement and Concrete Composites ,Vol.12, No.3 , pp. 185-190.

Michel, B. at all (2000) Flint reactivity, 11th International Conference on Alkali -Aggregate Reaction , Ottawa, Canada, 71 -80.

Neville,A.M. (1981) Properties of C oncrete . England. Longman Limited.

Swamy, R.N. (1990) The Alkali -Silica Reaction in Concrete , Thomson Litho Ltd., Scotland, UK.

Wakizaka, Y. (1998). Reactivity of rocks and minerals in alkaline solution. *J. Res. Publ.*, Works Research Institute , 34-146.

Çimento Dozajının Betonun Karbonatlaşma Derinliğine Etkisinin İncelenmesi

Harun Tanyıldızı, Murat Şahin
Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, ELAZIĞ
Tel: (424) 2370000-4315
E-Posta: htanyildizi @firat.edu.tr

Kenan Koran
Fırat Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü, ELAZIĞ
Tel: (424) 237 0000-3558
E-Posta: kkoran@firat.edu.tr

Öz

Bu çalışmada, farklı çimento dozajlarının betonun karbonatlaşma derinliğine olan etkileri araştırılmıştır. Çimento dozajları olarak 300, 350, 400, 450 ve 500 kg/m^3 olarak seçilmiştir. Maksimum tane boyutu 16mm olan agrega kullanılmıştır. Basınç dayanımı, ultra ses geçiş hızı ve karbonatlaşma derinliği deneyleri için, 100×100×100 mm ölçülerinde küp numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelere 20±2 ^{0}C de 28 gün standart su kürü uygulanmıştır. Kür uygulanan numunelere 1, 3 ve 7 gün süre ile hızlandırılmış karbonatlaşma testi yapılmıştır. Hızlandırılmış karbonatlaşmaya bırakılan numuneler in basınç dayanımları, ultrasonik geçiş hızları ve karbonatlaşma derinlikleri belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Çimento dozajı, Basınç Dayanımı, Ultrasonik Geçiş Hızı, Karbonatlaşma derinliği.

Giriş

Betonarme elemanlarda beton , oluşturduğu alkali ortam sayesinde çeliği korozyondan korur. Betonun alkalinitesini , çimentonun su ile yaptığı reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan $Ca(OH)_2$sağlar. Betonun bu özelliği karbonatlaşma ile yok olur. Karbonatlaşma atmosferde bulunan CO_2'nin betona difüzyonu sonucunda $Ca(OH)_2$ ile reaksiyon yaparak $CaCO_3$'a dönüşmesidir. Bu olay betonun pH'ını düşürerek, alkali ortamın kaybolmasına ve donatının korozyona uğramasına yol açar. Birçok Avrupa ülkesinde ve Amerika'da karbonatlaşmanın yol açtığı korozyon hasarlarının giderilmesine büyük paralar harcanmaktadır. Ülkemizde ise son yaşanan depremlerden sonra karbonatlaşma yüzünden donatının korozyona uğradığı görülmüştür. Bu durum mevcut yapılar içinde büyük tehlike oluşturmaktadır. Betonun servis ömrü boyunca hizmet verilebilmesi açısından dayanımı kadar dayanıklılıkta önemlidir. Betonda dayanıklılık problemlerinin başında da karbonatlaşma gelmektedir (Baradan ve diğ. 2002; Erdoğan, 2003; Topçu ve Canbaz, 2004).

Betonun boşluk yapısını etkileyen parametreler gaz karboniğin difüzyonunu değiştirmeleri bakımından önem kazanırlar. Bunlar arasında su/çimento oranı ön sırada yer alır. Bu oranın yüksek olması sertleşmiş betonda boşluğu arttırır, gazın girişi kolaylaşır ayrıca çimento taneleri daha yüksek oranda hidrate olabilirler. Çok düşük su/çimento oranlarında betonun yerleşmesi ve sıkışması güçleştiğinden boşluk artar. İkinci bir birleşim faktörü çimento dozajıdır. Dozaj farklı yönlerde etkin olur. Yüksek dozajlı betonlarda karbonatlaşabilecek hidrate öge miktarı artar. Bu artış karbonik gazın difüzyonunu durduran bir durum oluşturur ve karbonatlaşma hızı düşer. Öte yandan dozajın azalması halinde agrega taneleri birbirine daha çok yaklaşır. Gaz difüzyon katsayılarında ani bir düşme, süreksizlik ve gaz girişi kolaylaşır. Bu bulgu çimento tanelerinin, kum taneleri arasındaki boşluğu dolduracak kadar yeterli olmadıklarına, agrega-çimento arasının boşluklu, boşlukların bağlantılı yapısına bağlanmaktadır (Akman, 1997) . Boşluk yapısına etkiyen bir üçüncü faktör betonun kürüdür. Uzun süre suda kür edilmiş bir betonda hidratasyon ürünleri boşlukları doldurarak karbonatlaşmayı azaltmaktadır (Venuat, 1978).

Karbonatlaşma hızını değiştiren bir diğer özellik betonun su içeriği ve bununla dengede olan çevre rutubetidir. Suya doygun bir betona CO_2difüzyonu zordur, hava ve sudaki CO_2difüzyonlarının oranı $1/10^{4}$'tür. Buna karşılık tam kuru bir betona süzülen CO_2'nin asit karboniğe dönüşmesi ve karbonatlaşma oluşturması da olanaksızdır. Bağıl nemin %40 ve %90 arasında olması karbonatlaşma için en uygun koşullardır (Venuat, 1978; Yalçın ve Guru, 2006).

Bağıl nem % 90'un üzerinde olduğunda, gözeneklere karbondioksit girmesi mümkün değildir. Bağıl nem % 40'ın altında olduğunda ise karbondioksit su içinde çözülmez. Bunun nedeni gaz halindeki karbondioksitin doğrudan karbonatlasma reaksiyonuna girememesidir. Bazı kaynaklarda ise "bağılnem oranı % 25'ten küçük ise karbondioksitin karbonik asit haline geçmesi için beton içindeki su yeterli olmaz" seklinde ifadelere yer verildiği görülmüştür (Fibertex, 2013; Yalçın ve Guru, 2006).

Karbonatlaşma toplam boşluk oranını değiştirmemekle beraber kılcal boşlukların mezo ve mikroporozite bölgelerinde etkili olmaktadır. Bu bölge beton durabilitesi üzerinde en önemli rolü olan bölgedir. Geçirimsizliğin sağlanması durabilitede birincil faktördür. Karbonatlaşmanın sağladığı geçirimsizlik agrega-harç ara bölgesinde de etkindir. Ne var ki bu yararlı etkilerin oluşmasında çimento dozajının, su/çimento oranının, ortamın ve betonun su içeriğinin önemli parametreler olduğu unutulmamalıdır (Akman, 1997). Karbonatlaşma üzerine araştırmalar normal ortamdaki karbonatlaşma ve hızlandırılmış karbonatlaşma olarak iki şekilde yapılabilmektedir (Loo ve diğ. 1994; Atiş, 2002; Yazıcı, 1997). Normal ortamda yapılan deneyler çok uzun yıllar alabildiğinden, genellikle hızlandırılmış karbonatlaşma test tekniği kullanılmaya çalışılmaktadır. Fakat hızlandırılmış karbo natlaşma tekniği üzerine henüz tam bir prosedür bulunmamaktadır. Hızlandırılmış karbonatlaşma testinin yapılabilmesi nem, sıcaklık ve karbondioksit oranının kontrol edilebildiği suni bir atmosferin oluşturulmasına bağlıdır (Gönen ve Yazıcıoğlu, 2005).

Bu çalışmada, beş farklı çimento dozajı belirlenerek betonun karbonatlaşma derinliğine etkisi incelenmiştir.

Deneysel Çalışma

Malzemeler

Deneylerde kullanılan çimento, Elazığ Çimento Fabrikası'ndan temin edilen ve TS EN 197-1'de CEM I 42.5 N portland çimentosudur (TS EN 197 -1, 2002). Çimentonun özellikleri Tablo 1 'de verilmiştir. Bu çalışmada agrega olarak 0 -3mm ve 0-7mm kırma taş, 7-16 mm dere agregası kullanılmıştır. Maksimum tane çapı 16 mm olarak seçilmiştir.

Tablo 1 Çimento Fiziksel – Kimyasal Özellikleri.

Bileşenler (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	LOI	Özgül Yüzey (cm^2/gr)	Özgül Ağırlık
Portland Çimentosu	21.12	5.62	3.24	62.94	2.73	1.42	3430	3.10

Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada agrega olarak, maksimum dane çapı 16 mm olan 0-3 mm ve 0-7 mm kırma taş, 7-16 mm dere agregası kullanılarak 5 farklı beton serisi üretilmiştir. Bu seriler; H1 300 kg/m^3, H2 350 kg/m^3, H3 400 kg/m^3, H4 450 kg/m^3ve H5 500 kg/m^3olarak belirlenmiştir. Hazırlanan beton numunelerin karışım oranları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2 Deneylerde Kullanılan Betonun Karışım Oranları.

Karışım	Çimento (kg/m^3)	Su/Bağlayıcı	Agrega 0-3 mm (kg/m^3)	Agrega 0-7 mm (kg/m^3)	Agrega 7-16 mm (kg/m^3)	Hiper Akışkanlaştırıcı (kg/m^3)	Çökme (cm)
H1	300	0.45	592	691	691	6.9	7
H2	350	0.45	562	655	655	6.3	7
H3	400	0.45	532	620	620	6	7
H4	450	0.45	501	584	584	2.7	7
H5	500	0.45	470	549	549	0.5	7

Yarmada çekme ve ultrasonik ses geçirgenliği deneyleri için 100×100×100 mm ölçülerindeki küp numuneler kullanılmıştır. Hazırlanan karışımlar, 3 aşamada şişlenerek kalıplara yerleştirilmiştir. Numuneler 24 saat sonunda kalıplardan çıkarılarak 20±2 °C'de su kürüne tabi tutulmuşlardır. Bu kür süresi sonunda numuneler havuzunda n çıkarılarak etüvde 105±5 °C' de 24 saat kurutulmuştur. Bu işlem sonucunda her seri için 3' er adet numune üzerinde, yarmada çekme, ultrasonik ses geçirgenliği hızı ve hızlandırılmış karbonatlaşma deneyi yapılmıştır. Hızlandırılmış karbonatlaşma testi için deney aparatı hazırlanarak önce gaz sızmasının olmadığından emin olmak için %60 hava, %40 karbondioksit gazı verilerek 3 gün beklenmiştir. Üç günlük süre içerisinde manometredeki değerin azalmadığı ve aparattan her hangi bir şekilde gaz sızmasının

olmadığı gözlemlenmiştir. Daha sonra 1, 3 ve 7 günlük süre ile, hızlandırılmış karbonatlaşma test tekniği kullanılarak karbo natlaşma değerleri belirlenmiştir. Bütün zaman d ilimlerinde aynı şartlar korunmuştur. Deney düzeneğine %60 hava, %40 karbondioksit gazı verilmiş, 20°C derece sıcaklık ortamı hazırlanmış ve tank içindeki %55 nem ortamını sağlamak için sodyum dikromat kullanılmıştır. Tank içindeki sirkülasyonu sağlayan fan açılmıştır. Belirlenen zaman aralıklarına göre aparat içerisinden çıkarılan beton numuneler, iki eşit parçaya bölünerek baz indikatörü olan % 0.1 fenol fitalein alkol eriyiği püskürtülerek numunedeki renk değişimi gözlenmiştir.

Uygulanan Deneyler

Yarmada Çekme Deneyi

Yarmada çekme dayanımı deneyi için 100x100x100 mm küp numuneler kullanılmıştır. Her ya ş için 3'er adet numune üzerinde 28 günlük dayanım değerleri ölçülmüştür. Numunelerin yarmada çekme dayanımı deneyi, TS EN 12390 -6 standardındaki hususlar dikkate alınarak uygulanmıştır (TS EN 12390 -6, 2003). Yarmada çekme dayanımı deneyinin uygulanmasında 3000 kN yükleme kapasiteli hidrolik yük kontrollü, dijital göstergeli otomatik pres kullanılmıştır. Pres tablasının merkezine 10x10x100 mm ölçülerindeki demir çubuklar ve numune şekil 1'deki gibi yerleştirilmi ştir.



Şekil 1 Demir çubuklar ve numunenin pres tablasına yerleştirilmesi

Kırım sonrası preste okunan değer aşağıdaki formülde yerine konularak numunenin, yarmada çekme dayanımı hesaplanmıştır.

$$\sigma ç = \frac{2P}{\pi A} \qquad (2.1)$$

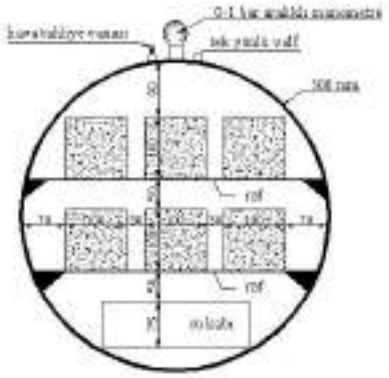
σç = Küp numunelerin yarmada çekme dayanımı (N/mm2)
P = Kırılmaya neden olan basınç yükü (N)
A = Kesit alanı (mm2)

Ultrasonik Ses Geçirgenlik Deneyi

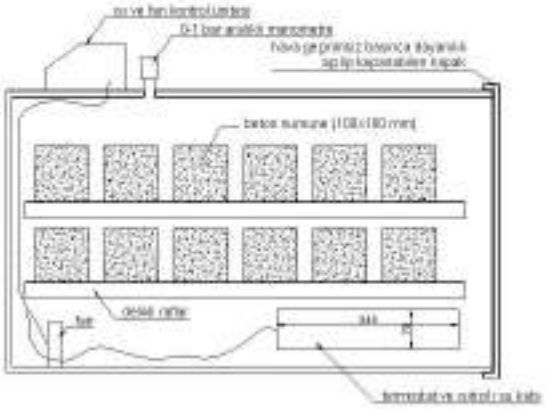
Ultrasonik test cihazı ile betonun içerisine gönderilen ultrases dalgalar ının betonun bir yüzeyinden diğer yüzeyine geçme süresi ölçülüp, dalga hızı hesaplanmaktadır. Bulunan bu ses üstü dalga hızı ile betonun basınç dayanımı ve diğer özellikleri arasındaki ilişki elde edilmektedir (Erdoğan, 2003). Ultrasonik ses geçirgenliği deneyi her karışım için 3'er adet 100×100×100 mm ölçülerindeki küp numune üzerinde uygulanmıştır.

Karbonatlaşma Deneyi

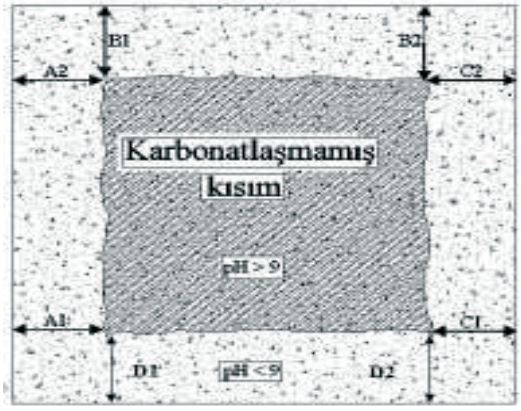
Hızlandırılmış karbonatlaşma testi, betonun yoğunlaştırılmış bir şekilde karbondioksit ortamına maruz bırakılmasıdır. Hızlandırılmış karbonatlaşma testinin tercih edilme sebebi, sonuçların zaman açısından daha kısa sürede sonuçlanmasıdır.



Şekil 2 Hızlandırılmış karbonatlaşma tankı enine kesiti (Gönen, 2003).



Şekil 3 Hızlandırılmış karbonatlaşma tankı boyuna kesiti (Gönen, 2003).



Şekil 4 Karbonatlaşma derinliğinin belirlenmesi (Kara, 2013) .

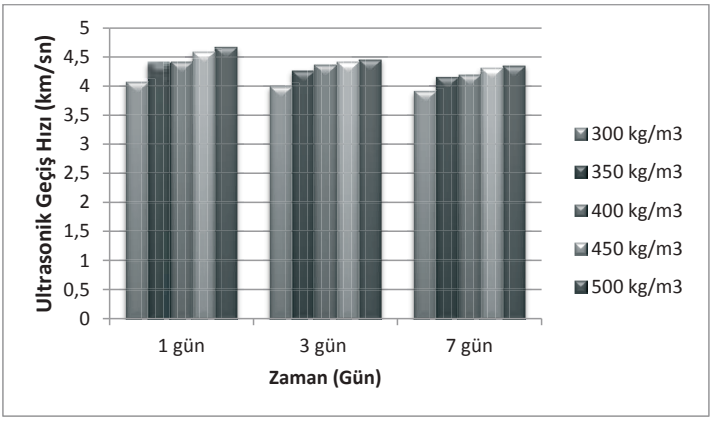
Karbonatlaşma derinliğinin hesaplanmasında 3.1 kullanılmıştır (Kara, 2013).

$$Karbonatlaşma\ Derinliği = \frac{A1+A2+B1+B2+C1+C2+D1+D2}{8} \quad (3.1)$$

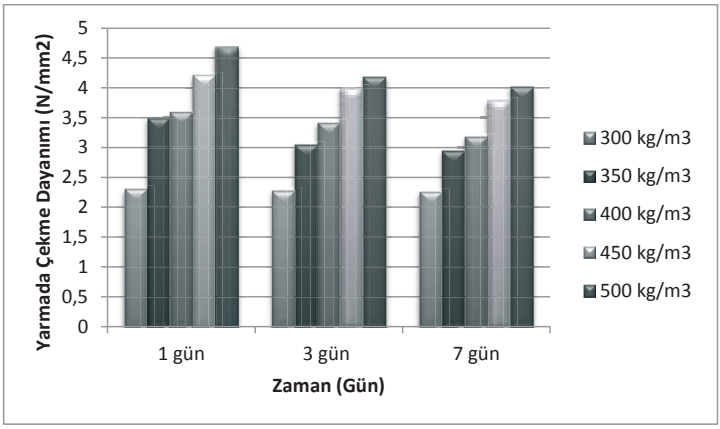
Karbonatlaşma derinliği, BS EN 13293-2004 "Productsand systems for the protect gionand repair of concrete structures - Test methods - Determination ofresistance to carbonation" standardına uygun olarak ölçülmüştür.

Deney Sonuçları ve Tartışılması

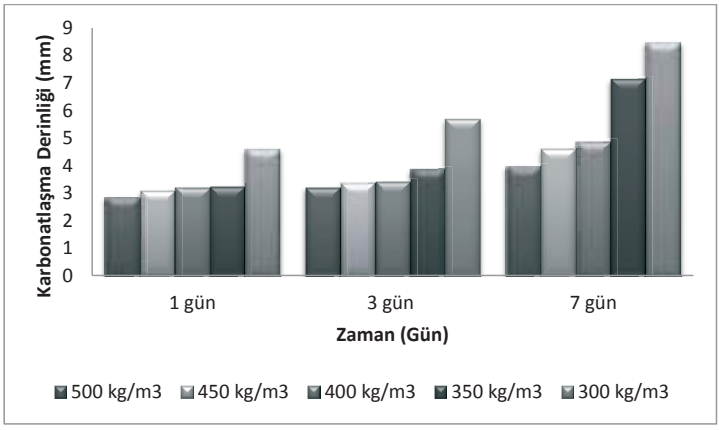
Bu çalışmada, 45 adet 100×100×100 mm boyutlarında küp numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 20±2 ºC'de standart su küründe 28 gün kür edilmiştir. Daha sonra, 1,3 ve 7 gün süre ile hızlandırılmış karbonatlaşma deneyi uygulanarak ultrasonik ses geçirgenliği ve yarmada çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen değerler Şekil 5-6-7'de verilmiştir.



Şekil 5 Karbonatlaşma sonrası numunelerinin ultrasonik ses geçirgenlik hızı grafiği.



Şekil 6 Karbonatlaşma sonrası beton numunelerinin yarmada çekme dayanımı grafiği.



Şekil 7 Karbonatlaşma sonrası numunelerin karbonatlaşma derinliği grafiği.

Yapılan deneyler sonucunda , 1, 3 ve 7 günlük hızlandırılmış karbonatlaşma değerlerindeki en iyi değerler, H5 serisinde ölçülmüştür. Yapılan deneysel çalışma sonucunda Şekil 3'te görüldüğü üzere, çimento miktarı arttıkça karbonatlaşma hızı düşmektedir. Deney sonuçlarına benzer olarak Cebeci, yaptığı çalışmasında 3 farklı dozaj kullanarak su/çimento oranı 0.45, 0.60, 0.75, olan numunelere 6 ay süre ile kür uygulamış, daha sonrada numuneler %70 nemli bir ortamda sakla nmıştır. Numunelerin üretiminden 3, 6, 12 ve 15 ay sonra basınç dayanımlarını ve karbonatlaşma derinliklerini ölçmüştür. Cebeci yaptığı çalışmasının neticesinde, ilk 6 aylık süreç de karbonatlaşmanın çok az olduğu, düşük dozajlı betonlarda karbonatlaşmanın daha fazla olduğu, basınç mukavemetinin artmasıyla karbonatlaşma derinliklerinin azaldığı,

karbonatlaşmanın köşelerde daha fazla olduğu, su-çimento oranlarına bağlı olarak karbonatlaşmada küçük değişimlerin olduğunu saptamıştır (Cebeci, 1988).

Şekil 5'de görüldüğü gibi karbonatlaşma süresi arttıkça ultrasonik ses geçiş hızı azalmaktadır. Ultrasonik ses geçirgenliği hızı grafiği incelendiğinde ise sonuçların, yarmada çekme dayanımları ile uyumluluk gösterdiği görülmektedir. Ultrasonik ses geçiş hızı yöntemiyle, herhangi b ir betonun yarmada çekme dayanımı hakkında fikir edinmek zordur. Bununla birlikte, herhangi bir beton içerisinden geçen ses üstü dalganın hızı, o betonun içerdiği boşluk miktarı ile orantılı olduğu için, elde edilen ses üstü hız ile betonun kalitesi hakkında genel bir ilişki kurulabilmek mümkündür. Bir başka deyişle, betonun içerisindeki boşluk miktarı azaldıkça, ses üstü dalga hızı artmaktadır (Erdoğan, 2003). Ultrasonik ses geçirgenlik hızı boşluksuz yapılarda büyük, boşluklu yapılarda küçük sayısal değer alır (Bahadır, 2010).

SONUÇLAR

Bu çalışmada, 5 farklı çimento dozajının betonun ultrasonik ses geçirgenliğine, yarmada çekme dayanımına ve karbonatlaşma derinliğine etkisi incelenerek aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur:

- Karbonatlaşma derinliklerinin, karbonatlaşma süresinin artışı ile birlikte arttığı fakat ivmesinde azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durum, karbonatlaşma sonucu $CaCO_3$ kristalleri çimento hamurundaki kapiler boşlukların içerisine yerleşerek nispeten daha geçirimsiz bir beton elde edilmesi sonucu karbondioksit girişinin yavaşlamasından kaynaklanmaktadır.
- Çimento dozajı baz alınarak incelendiğinde, yüksek dozajlı betonlar düşük dozajlı betonlara göre daha az karbonatlaştıkları gözlemlenmiştir. Yüksek dozajlı betonlarda karbonatla şabilecek kimyasal maddelerin fazlalığı nedeniyle karbonatlaşma sonucunda fazla ürün meydana gelmektedir ve bu ürünler boşluk hacmini azaltarak reaksiyon hızının düşmesine yol açmaktadır. Yapılan çalışmada karbonatlaşma açısından önerilecek çimento dozajı 300 kg/m^3'tür.
- Beton uzun süre nemli ortamda kür edilmiş ise hidratasyon ürünleri boşlukları doldurarak karbonatlaşma derinliğini azaltacaktır.
- Zamana bağlı olarak farklı özellikteki numunelerin karbonatlaşma derinlikleri birbirlerine pa ralel olarak değişmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmaya 113M448 nolu proje kapsamında maddi destek sağlayan Tübitak birimine teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Akman, S, M., (1997) Betonlarda Karbonatlaşma ve Yeniden Alkalizasyon Süreçleri, İstanbul Teknik Üniversitesi, 403-416.

ASTM C 597, (1994) *Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete* , Annual Book of ASTM Standarts.

Atiş, C.D., (2002) Accelerated Carbonationand Testing of Concrete Made with Fly Ash, Construction and Building Materials.

Bahadır,F., (2010) *Polipropilen Lifli Betonların Mekanik Özelikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.

Baradan, B., (2002) Yazıcı, H., Ün, H., Betonarme Yapılarda Kalıcılık, Dokuz Eylül Üniv. Müh. Fak. Yay., No.298.

Baron, J.,Ballote, B., Clergues, C., (1994) "FlyAshReplacement: ThresholdValues Of Cement Content in RelationtoConcreteDurability", P.K. Mehta Symp. On Durability of Concrete, Nice, pp.21 -34.

Cebeci, E., (1988) Betonda Karbonatla şma, Yük. Us. Tezi, İ.T.Ü., Fen Bil. Ens., İstanbul, 13-32,75-83.

Erdoğan T., (2003) Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.,

Gönen, T., (2003) Betonda Sıkıştırma Faktörünün Karbonatlaşmaya Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Gönen, T., Yazıcıoğlu, S., (2005) Betonda Hızlandırılmış Karbonatlaşma Deneyi ve Aparatı, Politeknik Dergisi Cilt: 8 Sayı: 2 s. 233-237.

http://www.fibertex.com/sitecollectiondocuments/carbonation.pdf (2013).

Kara, C., (2013) Mermer Tozu Atığının Betonun Karbonatlaşmasına Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Ensititüsü.

Loo, Y.H.,Chin, M.S., Tam, C.T., Ong, K.C.G., (1994) A Carbonation Prediction Model For Accelerated Carbonation Testing of Concrete, Magazine of Concrete Research, No:168, 191 -200.

Topçu, B. İ.,Canbaz, M., (2004) Betonda Karbonatlaşmanın Donatı Korozyonuna Etkisi, İMO Bülten, 31-33.

TS EN 12390 -6, (2003) Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 6: Deney Numunelerinde Yarmada Çekme Dayanımının Tayini, TSE, Ankara.

TS EN 197 –1, (2002) Çimento- Bölüm 1: *Genel Çimentolar- Bileşim*, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Venuat, M., (1978) "Relationentre la Carbonatationdu Beton et lesPhenomenes de la CorrosiondesArmaturesdu Beton", Annales de 1'ITBTP, N364, pp. 42-47.

Yalcın, H., Guru, M., (2006) "Cimento ve Beton", *Palme Yayıncılık*, ISBN: 9944 - 341-16-9,Ankara, 216.

Yazıcı, H., (1997) Accelerated Carbonation Test of Concrete, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Farklı Yoğunluktaki Köpük Betonların Dayanım ve Isıl İletkenlik Özellikleri

Metin DAVRAZ, Şemsettin KILINÇARSLAN
SDÜ Doğal ve Endüstriyel Yapı Malzemeleri AUM, Isparta
Tel: (246) 211 19 63
E-Posta: metindavraz@sdu.edu. tr, seref@tef.sdu.edu.tr

Murat KORU
SDÜ Teknoloji Fak. Enerji Sistemleri Müh., Isparta
Tel: (246) 211 14 02
E-posta: muratkoru@sdu.edu.tr

Öz

Köpük beton; çimento, su, sürfaktan ve istenirse kum ya da ince agrega ilave edilerek, ısıl işlemsiz olarak üretilebilen bir hafif beton türüdür. Taze halde yüksek akıcılığa ve sertleştikten sonra düşük yoğunluğa sahiptir. 400 kg/m^3 yoğunlukta 90 mW/mK ısıl iletkenlik katsayısını sağlayabilmektedir. Bu çalışmada CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu, kalker tozu, polipropilen elyaf ve süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılarak, 300 kg/m^3 çimento dozajı ve 0.30 su/katı oranında hazırlanan harçlara 80g/L yoğunlukta köpük ilavesiyle hafif beton numuneleri üretilmiştir. 300-1400 kg/m^3 aralığında 12 farklı kuru yoğunlukta üretilen numunelerin (28. gün) basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve ısıl iletkenlik özellikleri test edilmiştir. Elde edilen bulgulardan kalker tozu agregalı köpük betonun kuru yoğunluğuna göre basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve ısıl iletkenlik katsayılarının değişimlerini tahmin etmeye yönelik bağıntılar önerilmiştir.

***Anahtar sözcükler*:** Köpük beton, Kuru y oğunluk, Isıl iletkenlik, Basınç dayanımı.

Giriş

Köpük beton hafif betonun bir çeşididir. Çimento, su ve agreganın karışımından oluşan harca köpük ajanı ile oluşturulan köpüğün karıştırılması ile elde edilir. Bünyesinde hacminin %75 - %80'i oranında birbirinden bağımsız kapalı gözenekler içerir. Köpük beton, tüm binaların iç ve dış duvarları ile zeminlerinde kullanılan yapı elemanlarının yerine kullanılabilecek, bileşiminde doğal agrega ve çimento dışında malzeme bulundurmayan, insan sağlığına zararı olmayan, hafif, ısı ve darbe sesi yalıtımı sağlayan, çevreci bir yapı ve yalıtım malzemesidir (Ekinci, 2013). Köpük beton, taze halde yüksek akış yeteneğine, düşük yoğunluğa, işleve bağlı-yeterli dayanıma ve düşük ısıl iletkenlik özelliklerine sahiptir. Genel olarak kuru yoğunluğu 400-1600 kg/m^3,

basınç dayanımı 1-15 MPa aralığındadır. Köpük beton kolayca pompalanabilir ve yerleştirilebilir. Sıkıştırma ve vibrasyon gerektirmez. Suya ve dona karşı mükemmel bir dirence sahiptir. Köpük beton harcı, işletmelerde kalıplanıp blok haline getirilebileceği gibi, gerektiğinde mobil olarak uygulama sahasında-inşaatta hazırlanarak bir pompa yardımı ile kolayca taşınabilir. Köpük beton, yoğunluğuna bağlı olarak duvar blokları, asmolen, panel, yalıtım tesviye betonu, prefabrik yapı elemanları üretiminde kullanılabilir.

Köpük betonun ilk patenti 1923'de alınmış olmasına rağmen, ancak son yıllarda yarı taşıyıcı yada taşıyıcı olmayan inşaat uygulamalarında yaygınlaşmaya başlamıştır (Ramamurthy vd., 2009). Hücresel betonun ilk kapsamlı incelemesi 1954 yılında Valore tarafından yapılmış, 1963 yılında Rudnai, Short ve Kinniburgh tarafından bileşimi, özellikleri, kullanımı ve yapısı hakkında detaylı çalışmalar yapılmıştır. Son yıllarda Jones ve McCarthy (2005), köpük betonun tarihçesi, kullanılan malzemeler, özellikleri ve dünya çapında yürütülen bazı projelerdeki inşaat uygulamaları konularını değerlendirmişlerdir. Bu değerlendirmeler yangın dayanımı, ısıl iletkenlik ve akustik özellikler gibi fonksiyonel özellikleri kapsarken, köpük betonun taze beton özellikleri, durabilitesi ve hava boşluğu sistemi gibi konulardaki veriler hayli sınırlıdır. Kararlı köpük beton üretimi, köpük ajanı seçimi, köpük hazırlama yöntemleri, malzeme seçimi, üniform hava boşluğu dağılımı için katkı seçimi, karışım tasarımı stratejileri, performans gibi pek çok faktöre bağlıdır. Ramamurthy vd. (2009), köpük betonun bileşenleri, karışım tasarımı, üretimi, taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerine yapılan bilimsel çalışmaları sınıflandırmıştır. Bu çalışmaya dayanarak, köpük betonun karışım tasarımı, yoğunluğu ve basınç dayanımı konularını kapsayan araştırmaların sonuçları Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Köpük betonun karışımı, basınç dayanımı ve yoğunluk aralığının değerlendirilmesi (Ramamurthy vd., 2009)

Yazar(lar) ve Yıl	Çimento Dozajı Bileşenler	k/c	s/c	UK/c	Yoğunluk Aralığı (kg/m^3)	Basınç Dayanımı (MPa, 28g)
McCormick (1967)	335-446	0,79-2,8	0,35-0,57		800-1800	1,8-17,6
Tam vd. (1987)	390	1,58-1,73	0,6-0,8		1300-1900	1,81-16,72
Regan ve Arasteh (1990)	Hafif agregalı	0,6	0,45-0,6		800-1200	4-16
Van Deij k (1991)	Çimento, kum, UK				280-1200	0,6-10 (91gün)
ACI 523.1R -1992	Çimento hamuru				240-640 (KY)	0,48-3,1
	Çimento-kum				400-560 (KY)	0,9-1,72
Hun aiti (1997)		3			1667	12,11
Kearsly ve Booyens (1998)	Çimento – UK (yerdeğiştirme)				1000-1500	2,8-19,9
Durack ve Weiqing (1998)	270-398	1,23-2,5	0,61-0,82		982-1185 (KY)	1-6
	137-380		0,48-0,7	1,48-2,5	541-1003 (KY)	3-15 (77gün)
Aldridge (2000)	Çimento - kum				400-1600	0,5-10
Kearsly ve Wainwright (2001)	Çimento ve UK				1000-1500	2-18
Tikalsky vd . (2004)	Çimento, 149-420		0,4-0,45		490-660	0,71-2,07
	Çimento, kum/UK 57-149		0,5-0,57		1320-1500	0,23-1,1
Jones ve McCarty (2005)	300	1,83-3,17	0,5		1000-1400	1-2
			1,11-1,56	1,22-2,11	1000-1400	3,9-7,3
Jones ve McCarty (2005)	500	1,5-2,3	0,3		1400-1800	10-26
			0,65-0,83	1,15-1,77	1400-1800	20-43
Nambiar ve Ramamurthy (2006)	Çimento-kum (kaba)	1'den 3'e değişen filler /c oranlı ve %0 - %100 UK yer değişimli			800-1350 (KY)	1-7
	Çimento-kum (ince)				800-1350 (KY)	2-11
	Çimento-kum -UK				650-1200 (KY)	4-19
k/c : Kum/çimento s/c : su/çimento UK/c : Uçucu kül/çimento KY : Kuru yoğunluk (kg/m^3)						

Normal b eton üzerine yapılan çalışmaların büyük bir kısmı köpük beton için de yapılmıştır (Yong ve Kim, 2011; Kearsley ve Wainwright, 2002 ; Nambiar ve Ramamurthy, 2007 ; Just ve Middendorf , 2009 vd.). Ülkemizde ise köpük beton üzerine yürütülen bilimsel çalışmaların sayısı hayli kısıtlıdır. Oysa köpük betonun özelliklerini etkileyen çok sayıda faktör bulunmaktadır. Ülkemizde de köpük beton üzerine detaylı bilimsel araştırmaların yürütülmesi ve yayınlanması, bu alanda üretim yapan (ya da yapmayı hedefleyen) girişimci ve sanayicilere ışık tutacaktır.

Materyal ve Metot

Bu araştırmada çimento, kalker tozu, polipropleni elyaf, süper akışkanlaştırıcı ve protein esaslı köpük ajanı ile 300-1400 kg/m^3 yoğunluk aralığında köpük betonların üretimi, bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Laboratuvar ortamında üretilen köpük beton numunelerinin kuru yoğunluk, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve ısıl iletkenlik özellikleri deneysel olarak araştırılmış, elde edilen bulgulardan kuru yoğunluğa bağlı basınç dayanımı, çekme dayanımı ve ısıl iletkenlik katsayılarının tahminine yönelik bağıntılar önerilmiştir. Köpük beton numunelerinin yoğunluğu, sürfaktan+su+hava karışımından elde edilen köpük miktarı ve yoğunluğu ile kontrol edilmiştir. Araştırmadaki tüm numune üretimleri ve deneyler SDÜ Doğal ve Endüstriyel Yapı Malzemeleri Uygulama ve Araştırma Merkezi 'nde yürütülmüştür.

Materyal

Bağlayıcı olarak Göltaş Çimento A.Ş.'den temin edilen CEM I 42 ,5 R sınıfı Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun özellikleri Tablo2'de verilmiştir. Araştırmada HSD Madencilikten temin edilen -100 µm kalker tozu çok ince agrega olarak kullanılmıştır. Karışım suyu miktarını azaltmak amacıyla çimento miktarının kütlece %0,5'i oranında linyosülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı ve çekme dayanımlarını artırmak için %1'i oranında 6 mm polipropleni elyaf tüm karışım serilerine ilave edilmiştir.

Tablo 2. Çimento özellikleri (Göltaş, 2014)

Klinkerin Kimyasal Özellikleri (%)		**Çimento Fiziksel Özellikleri**		
SiO_2	20,52	Hacimsel Genleşme (mm)		≤ 1
Al_2O_3	4,00	İncelik (90µ, %)		0,10
Fe_2O_3	3,45	İncelik (200µ, %)		1,10
CaO	64,28	Özgül Yüzey Alanı (cm^2/g)		3340
MgO	1,63	Priz Başlangıcı (dak)		185
SO_3	2,53	Priz Sonu (dak)		240
Na_20+K_2O	1,35	Özkütle (g/cm^3)		3,12
Çimento Mekanik Özellikleri (MPa)				
7 günlük	Eğilme Dayanımı (MPa)	5,8	Basınç Dayanımı (MPa)	39,3
28 günlük	Eğilme Dayanımı (MPa)	7,2	Basınç Dayanımı (MPa)	51,0

Metot

300 - 1400 kg/m^3 kuru yoğunluk aralığında 12 farklı karışım tasarımı hazırlanmıştır. Her bir karışım tasarımı için hedeflenen teorik yoğunluklara göre, karışıma girecek bileşen miktarları hacim yöntemi esas alınarak hesaplanmıştır. Tüm karışımlarda çimento dozajı ve su/katı (s/k) oranı (0,30) sabit tutulmuş, kum/çimento (*K*/ç) oranı ise 0-3,66 arasında değişmiştir. Tablo 3'de 1 m^3 karışım için hedeflenen kuru yoğunluk ve bileşen miktarları verilmiştir.

Tablo 3. Farklı kuru yoğunluklardaki köpük betonlar için bileşen miktarları (1m^3 için)

Seri	D_{kuru} (kg/m^3)	Çimento (kg)	Kalker (kg)	Su (L)	Katkı (kg)	Lif (kg)	Köpük (kg)	s/k	*K*/c
1	300	300	0	89	1,48	3,0	76,55	0,30	0,00
2	400	300	96	119	1,98	3,0	70,22	0,30	0,32
3	500	300	196	149	2,48	3,0	63,85	0,30	0,65
4	600	300	296	179	2,98	3,0	57,53	0,30	0,99
5	700	300	396	209	3,48	3,0	51,16	0,30	1,32
6	800	300	496	239	3,98	3,0	44,84	0,30	1,65
7	900	300	596	269	4,48	3,0	38,47	0,30	1,99
8	1000	300	697	299	4,98	3,0	32,04	0,30	2,32
9	1100	300	797	329	5,48	3,0	25,71	0,30	2,66
10	1200	300	897	359	5,99	3,0	19,35	0,30	2,99
11	1300	300	997	389	6,48	3,0	12,98	0,30	3,32
12	1400	300	1097	419	6,99	3,0	6,65	0,30	3,66
Kalker özkütlesi (ρ_k) : 2,70 g/cm^3 S.A. yoğunluğu (ρ_{sa}) : 1,10 g/cm^3				P. elyaf özkütlesi (ρ_{pe}) : 1,90 g/cm^3 s/k : su /katı oranı *K*/c : kum/çimento oranı					

Öncelikle çimento, kalker tozu, lif, süper akışkanlaştırıcı ve suyun karıştırılması ile harç hazırlanmıştır. Karışım tasarımı için hesaplanan teorik taze yoğunluk değerine ulaşılıncaya kadar karışıma ortalama 80 g/L yoğunluklu köpük ilave edilmiştir. Her bir seri için 6 adet 150 mm küp ve 3 adet 300x300x50 mm plaka numuneler i üretilmiştir. Tüm deney numuneleri test sürelerine kadar 20±2°C sıcaklık ve %95 bağıl nem (RH) ortamında kürlenmiştir. Basınç ve yarmada çekme test numuneleri hava kurusu (~%6 RH) durumda teste tabi tutulmuştur. Isıl iletkenlik katsayısı plaka numuneleri ise 110 °C sıcaklıkta hava dolaşımlı etüvde değişmez kütleye kadar (%100 kuru) kurutulmuş ve deney süresine kadar streç filmle kaplanarak nem alması engellenmiştir.

Köpük beton kuru yoğunlukları TS EN 678 standardına göre belirlenmiştir. Her bir seri için 3'er adet 150 mm küp numune üzerinde TS EN 1354 standardına uygun olarak basınç dayanımı ve TS EN 12390-6 standardına göre yarmada çekme dayanımı testleri yürütülmüştür. Isıl iletkenlik katsayısı tayini deneyleri ise TS ISO 8301 standardına göre Laser Comb Fox 314 cihazı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Köpük beton numuneleri

Bulgular ve Tartışma

Araştırma kapsamında hazırlanan köpük beton karışımları için (teorik ve gerçek) taze beton yoğunluk değerleri ile sertleşmiş köpük beton numuneleri için (teorik ve gerçek) kuru yoğunluk değerleri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4 . Taze ve sertleşmiş (kuru) köpük beton yoğunlukları (kg/m^3)

Seri	Teorik		Gerçek	
	ρ_{tt}	ρ_{tk}	ρ_{gt}	ρ_{gk}
1	466	300	514	333
2	590	400	703	487
3	714	500	749	535
4	838	600	928	651
5	963	700	1066	793
6	1087	800	1128	878
7	1211	900	1264	958
8	1336	1000	1395	1100
9	1460	1100	1619	1236
10	1585	1200	1713	1312
11	1709	1300	1814	1433
12	1833	1400	1973	1608

ρ_{tt} : Teorik taze beton yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_{gt} : Gerçek taze beton yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_{tk} : Teorik kuru beton yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_{gk} : Gerçek kuru beton yoğunluğu (kg/m^3)

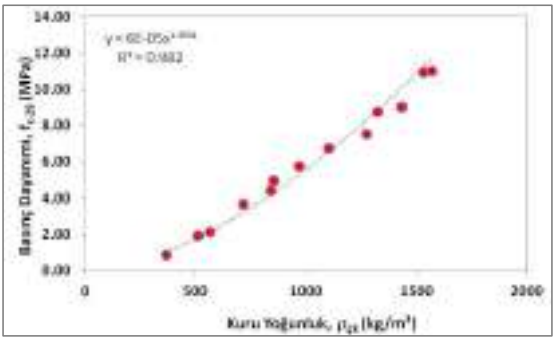
Köpük betonda hacim sabitliği, karışıma giren bileşenlerin miktarı ve türü, köpüğün yoğunluğu, karıştırma devri ve süresi, ortam koşulları gibi pek çok faktöre bağlıdır. Normal betondan farklı olarak, köpük betonda hem teorik ve gerçek taze beton yoğunlukları, hem de teorik ve gerçek kuru beton yoğunlukları arasındaki farklılıklar daha yüksektir. Tablo 4 incelendiğinde, taze beton karışımlarında ρ_{tt} değerlerine göre, ρ_{gt} değerlerinde ortalama %8 oranında bir artış söz konusudur. Bu artış, karışımda kullanılan köpüğün verimi (kararlılığı) ile ilgilidir. Bir başka değişle karışıma ilave edilen köpüğün bir kısmının patlaması nedeniyle taze betonda hacim kaybı oluşmuştur. Bu durum da ρ_{tt} değerlerine göre ρ_{gt} değerlerini ortalama %8 oranında artırmıştır. Sertleşmiş (28 gün) beton numuneleri ρ_{tk} değerlerine göre, ρ_{gk} değerlerinde ortalama artış %11 civarındadır. ρ_{gk} değerlerindeki artış da katılaşma aşamasında kalıba yerleşmiş taze beton içerisindeki köpüğün bir kısmının daha kararlılığını kaybetmesi ile ilişkilendirilmiştir.

28 günlük kür süresini tamamlayan hafif beton numuneleri üzerinde yürütülen basınç ve yarmada çekme dayanımı deney sonuçları Tablo 5'de verilmiştir.

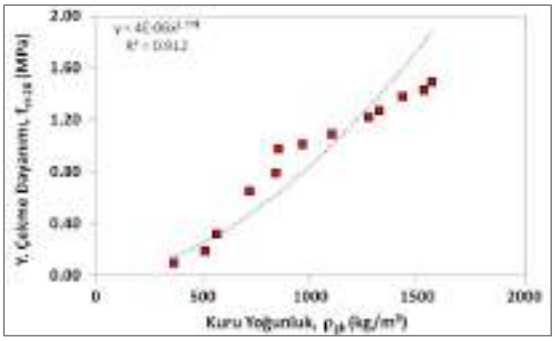
Tablo 5 . Sertleşmiş köpük beton numunelerinin 28 günde (ort.) basınç ve yarmada çekme dayanımı sonuçları

Seri	ρ_{gk} (kg/m^3)	$f_{c\text{-}28}$ (MPa)	$f_{ct\text{-}28}$ (MPa)
1	364	0,85	0,10
2	510	1,93	0,19
3	563	2,15	0,32
4	715	3,66	0,65
5	837	4,41	0,79
6	851	4,96	0,98
7	965	5,76	1,01
8	1100	6,77	1,09
9	1272	7,51	1,22
10	1321	8,77	1,27
11	1429	9,02	1,38
12	1531	10,94	1,43
$f_{c\text{-}28}$: Üç numunenin ortalama basınç dayanımı *$f_{ct\text{-}28}$: Üç numunenin ortalama y. çekme dayanımı*			

Köpük beton numunelerinin gerçek kuru yoğunluğa göre basınç dayanımları Şekil 2'deki, gerçek kuru yoğunluğa göre yarmada çekme dayanımları ise Şekil 3'deki grafikte verilmiştir.



Şekil 2. Köpük beton numunelerinde gerçek kuru yoğunluğa göre basınç dayanımının değişimi



Şekil 3. Köpük beton numunelerinde gerçek kuru yoğunluğa göre yarmada çekme dayanımının değişimi

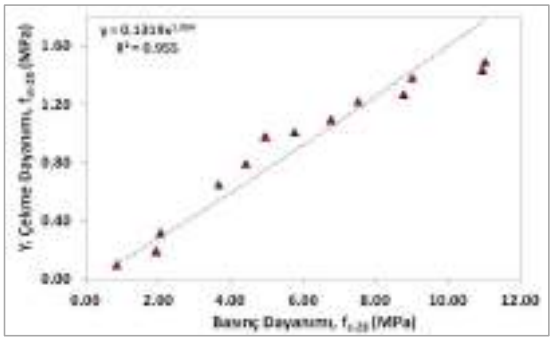
300 kg/m^3 çimento dozajlı, s/k =0 ,30 oranında ve kalker tozu agregalı köpük betonların kuru yoğunluklarına göre 28. gün basınç ve yarmada çekme dayanımlarının tahminine yönelik bağıntılar sırasıyla Eşitlik 1 ve Eşitlik 2'de verilmiştir.

$f_{c-28} = 6x10^{-5}x\,\rho_{gk}^{1,65}$ (MPa) (R^2 =0,98) (1)

$f_{ct-28} = 4x10^{-6}x\,\rho_{gk}^{1,77}$ (MPa) (R^2 =0,91) (2)

Burada f_{c-28}, 28 günlük köpük beton küp numune basınç dayanımı, f_{ct-28}, 28 günlük köpük beton küp numune yarmada çekme dayanımı, ρ_{gk}, köpük beton gerçek kuru yoğunluğudur (kg/m^3).

Ayrıca köpük beton numunelerinin basınç ve yarmada çekme dayanımları arasındaki ilişki de Şekil 4'deki grafikte verilmiştir.



Şekil 4. Köpük beton numunelerinde basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı ilişkisi

Yukarıda tanımlanan özelliklere sahip 28 gün kür süresini tamamlamış köpük betonların basınç dayanımlarına göre yarmada çekme dayanımlarının tahminine yönelik bağıntı da Eşitlik 3'de verilmiştir.

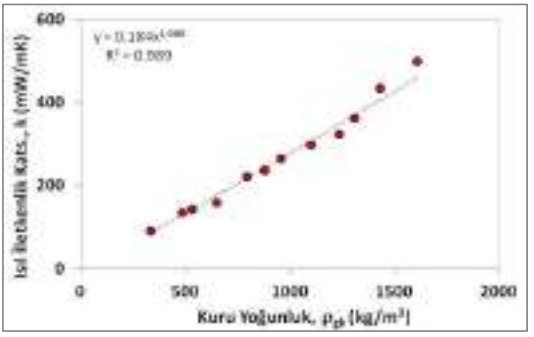
$f_{ct-28} = 0,132x\,(f_{c-28})^{1,084}$ (MPa) (R^2 = 0,95) (3)

Köpük beton numunelerinin ısıl iletkenlik katsayıları (k) her bir yoğunluk serisi için 3'er adet plaka ölçüm sonucunun aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiş ve numunelerin ρ_{gk}'larına göre k_{ort} değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Köpük beton numuneleri nin kuru yoğunluğa bağlı (ort.) ısıl iletkenlik katsayıları

Seri	ρ_{gk} (kg/m^3)	k_{ort} (mW/mK)
1	333	90,98
2	487	135,00
3	535	141,90
4	651	159,10
5	793	221,90
6	878	236,50
7	958	265,30
8	1100	297,90
9	1236	323,60
10	1312	361,70
11	1433	433,80
12	1608	498,10

Köpük beton numunelerinde gerçek kuru yoğunluğa bağlı ısıl iletkenlik katsayısı değişimi Şekil 5'deki grafikte verilmiştir. Ayrıca Eşitlik 4'de, ρ_{gk} değerlerine göre köpük beton k_{ort} değerlerinin tahminine yönelik bağıntı önerilmiştir.



Şekil 5. Köpük beton numunelerinde gerçek kuru yoğunluğa bağlı ısıl iletkenlik katsayısının değişimi

$$k = 0{,}184x(\rho_{gk})^{1{,}060}\ (mW/mK) \qquad (R^2 = 0{,}99) \qquad (4)$$

Burada k, %100 kuru durumdaki köpük betonun ısıl iletkenlik katsayısıdır (mW/mK).

Sonuç

Bu araştırmada 300-1400 kg/m^3 arasında 12 farklı kuru yoğunlukta köpük beton numuneleri üretimi hedeflenmiş, üretilen numunelerin gerçek kuru yoğunlukları 333-1608 kg/m^3 aralığında değişmiştir. Bu durum, *K*/ç oranına bağlı olarak köpük kararlılığının değişmesi ve üretilen köpük yoğunluğunun 70-95 g/L arasında dalgalanmasına bağlanmıştır.

Araştırmadan elde edilen bulgular değerlendirilerek, 300 kg/m^3 çimento dozajında, s/k = 0,30 oranında ve kalker tozu agregalı köpük betonlar için, kuru yoğunluğa göre basınç ve yarmada çekme dayanımları tahminine yönelik bağıntılar önerilmiştir. Ayrıca;

-Köpük betonun kuru yoğunluğunun azalmasıyla orantılı olarak basınç dayanımının da azaldığını,
-Farklı köpük beton tasarımları için, çimento dozajı, s/k oranı ve agrega türü sabit kalmak koşuluyla, kuru yoğunluk ve basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi yaklaşık doğrusal fonksiyonla tanımlamanın, dolayısıyla hedeflenen kuru yoğunluğa bağlı olarak basınç dayanımını yüksek bir kestirimle tahmin etmenin mümkün olduğunu,
-Benzer yaklaşımların kuru yoğunluk- yarmada çekme dayanımı ve basınç dayanımı-yarmada çekme dayanımı ilişkileri arasında da kurulabileceğini göstermiştir.

Araştırmada üretilen 333-1608 kg/m^3 arasında kuru yoğunluğa sahip köpük betonların ısıl iletkenlik katsayıları 91-498 mW/mK aralığında değişmiştir. Numunelerin kuru yoğunluk değerleri arttıkça ısıl iletkenlik katsayıları da düzgün doğrusal olarak artmıştır. Yazıda elde edilen köpük betonların kuru yoğunluklarına göre ısıl iletkenlik katsayılarının tahminine yönelik bir bağıntı önerilmiştir. Ancak köpük betonların ısıl iletkenlik katsayısına kuru yoğunlukları yanında çimento dozajı, agrega türü, s/k oranı ve *K*/c oranı gibi birçok faktör etki etmektedir. Bu bağlamda önerilen bağıntıların, 300 kg/m^3 çimento dozajı, kalker tozu ve s/k=0,30 koşuluna haiz köpük betonlar için tutarlı olacağı açıktır.

Enerji kaynakları açısından büyük ölçüde dışa bağımlı olan ülkemiz için, tasarruf büyük bir önem arzetmektedir. Düşük ısıl iletkenliği, düşük kuru yoğunluğu, üretimin amaçlanan ürüne göre esnetilebilmesi, hemen her bölgede kolayca ve lokal kaynaklara dayalı olarak üretilebilir olması, köpük betonu ülkemiz açısından önemli kılmaktadır. Bununla birlikte köpük betonun fiziksel, yapısal ve mekanik özelliklerini birçok faktörün etkilemesi, bu alanda daha fazla ve detaylı araştırmalar yapılmasını da zorunlu hale getirmektedir .

Kaynaklar

Aldridge D., Ansell T. (2001) Foamed concrete: production and equipment design, properties, applications and potential. In: Proceedings of one day seminar on foamed concrete: properties, applications and la test technological developments. Loughborough University.

Ekinci, D. (2013) Türkiye'de köpük beton. Dünya İnşaat Dergisi. http://www.dunyainsaat.com.tr/dergioku.php?haberid=4224

Durack J.M, Weiqing, L. (1998) The properties of foamed air cured fly ash based concrete for masonry production. In: Page A, Dhanasekar M, Lawrence S, editors. In: Proceedings of 5th Australian masonry conference. Australia: Gladstone, Queensland; pp. 129-38.

Göltaş Çimento A.Ş. Aylık Çimento Analiz Raporu, Ağustos 2014.

Hunaiti Y.M. (1997) Strength of composite sections with foamed and lightweight aggregate concrete. J. Mater Civ. Eng. Vol. 9(2), pp.58-61.

Jeong, Ji -Yong and Jin -Man Kim (2011) Properties of low density foamed concrete for building construction using anionic surfactants of synthetic and natural materials. Journal of the Korea Institute of Building Construction. Vol. 11, No.6, pp. 557- 566.

Jones M.R. , McCarthy A. (2005) Utilising unprocessed low -lime coal ash in foamed concrete. Fuel. Vol.84, pp. 1398 -409.

Jones M.R., McCarthy A. (2005) Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material. Mag Concr Res. Vol.57, pp. 21 -31.

Just, A. and Middendorf B. (2009) Microstructure of high -strength foam concrete. Materials Characterization. Vol. 60, No.7, pp. 741- 748.

Kearsley E.P., Booyens P.J. (1998) Reinforced foamed concrete, can it be durable. Concrete/Beton Vol. 91, pp. 5 -9.

Kearsley E.P., Wainwright P.J., (2001) The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete. Cement and Concrete Research. Vol. 31, pp. 105-12.

Kearsley, E. P. and Wainwright, P. J. (2002) The effect of porosity on the streng th of foamed concrete. Cement and Concrete Research. Vol. 32, No. 2, pp. 233- 239.

McCormick FC. (1967) Rational proportioning of preformed foam cellular concrete. ACI Material Journal. Vol.64, pp.104 -9.

Nambiar E.K.K, Ramamurthy K. (2006) Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology. Cem Concr Comp. Vol. 28, pp.752 -60.

Nambiar, E.K.K. and K. Ramamurthy (2007) Sorption characteristics of foam concrete. Cement and Concrete Research. Vol. 37, No. 9, pp. 1341 -1347.

Ramamurthy K., Nambiar E.K., Ranjani G. (2009) A classification of studies on properties of foam concrete. Cement & Concrete composite. Vol. 31, pp. 388 -396.

Regan P.E., Arasteh A.R. (1990) Lightweight aggregate foamed concrete. Struct Eng. Vol. 68(9), pp.167 -73.

Rudnai G. (1963) Lightweight concretes. Budapest, Akademikiado.

Short A., Kinniburgh W. (1963) Lightweight concrete. Asia Publishing House.

Tam C.T., Lim T.Y., Lee S.L. (1987) Relationship between strength and volumetric composition of moist -cured cellular concrete. Mag Concr Res. Vol.39, pp.12 -8.

Tikalsky P.J., Pospisil J., MacDonald W.A. (2004) Method for assessment of the freezethaw resistance of preformed foam ce llular concrete. Cement and Concrete Research. Vol. 34(5), pp. 889 -93.

Valore RC. (1954) Cellular concrete part 1: composition and methods of production. ACI J. Vol.50, pp. 773 -96.

Van Deijk S. (1991) Foam concrete. Concrete Vol. August, pp. 49 -53.

Çimento İnceliğinin Sabit Çökme Değerinde Betonun Basınç Dayanımına Etkisi

Tuğhan Delibaş, Can Çetin
Çimsa Çimento, Toroslar Mah. Tekke Cad. Yenitaşkent/Mersin

Mustafa Öztürk, Dr. Önder Kırca
Çimsa Çimento, Karşıyaka Mah. Fırat Cad. No: 3 Lalahan /Ankara

Öz

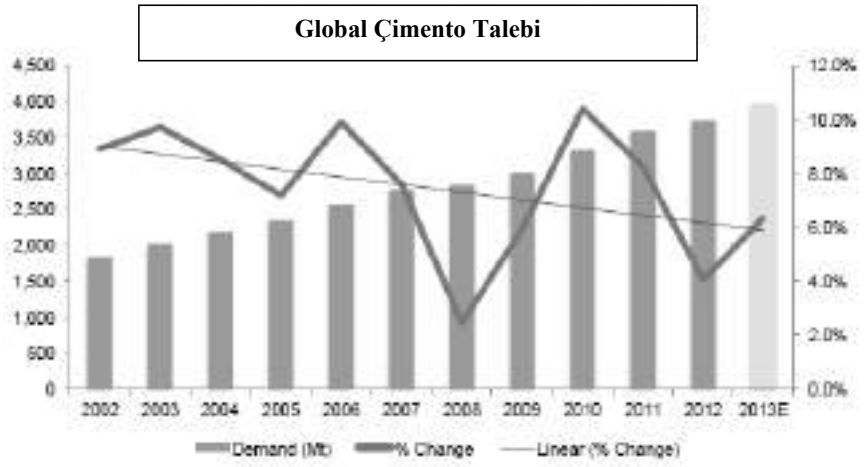
Çimento üretiminde kullanılmakta olan enerji kaynakları elektrik enerjisi ve termal enerji olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Termal enerji çimentonun kimyasal prosesinin tamamlanması için gerekli fırın içi reaksiyonlarda kullanılmakta, elektrik enerjisi ise hammadde boyutunun küçültülmesi, pnömatik taşıma sistemleri ve klinkerin öğütülmesinde kullanılmaktadır. Günümüzde yüksek mukavemet ve daha reaktif çimentoya olan talep neticesinde çimento inceliklerinde artış trendi görülmektedir. Bunun s onucunda çimento üretimi için gerekli elektrik enerjisi tüketimi artmaktadır. Yapılan çalışmada farklı inceliklere sahip 6 çimento numunesi gerçek proses şartlarında farklı incelik seviyelerinde öğütülmüş ve çimento mukavemeti ile beton mukavemeti arasındaki ilişki hem laboratuvarda hem de hazır beton santralinde incelenmiştir. Deneysel çalışma ve saha çalışmalarının sonucunda üreticilerin beklentilerinin aksine çimento inceliğindeki artışın beton mukavemetine belirli bir seviyeye kadar olumlu yönde etkisi olduğu, ancak belirli bir seviyeden daha ince çimentonun kullanıldığı harcın ve betonun erken ve nihai mukavemet değerlerinde önemli değişikliklerin gerçekleşmediği görülmüştür. Laboratuvar sonuçları ile fiili saha sonuçları karşılaştırılmış; korelasyon incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çimento, Beton, Blaine, İncelik, Sabit Çökme

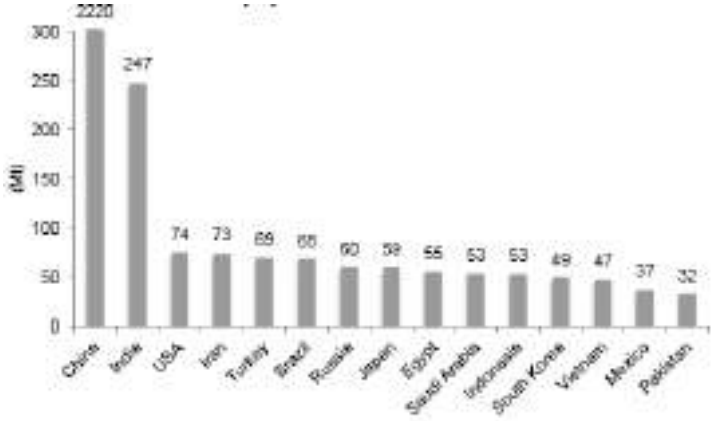
Giriş

Küresel çimento üretimi 2002 ve 2012 yılları arasında ikiye katlanarak 1.8 milyar tondan 3.7 milyar tona yükselmiştir (Hargreaves, 2013) . Çimento üretimindeki artış Şekil 1'de gösterilmiştir.

Türkiye de artış gösteren küresel trende adapte olmuş ve 2012'de gerçekleşen 69 milyon ton çimento üretimiyle 5. Sıraya yerleşmiştir. 2012 Yılı ülkelere göre çimento üretimi dağılımı Şekil 2'de gösterilmiştir (Hargreaves, 2013).



Şekil 1. 2002- 2013 Arasındaki Global Çimento Talepleri.



Şekil 2. Ülkelere Göre Çimento Üretimi Dağılımı.

Enerji yoğun bir endüstri olan çimento endüstrisinde iki temel enerji kaynağı olan kömür ve elektrik enerjisinin toplam üretim maliyeti (değişken maliyet) içindeki payı %70'lere varmaktadır. Sabit maliyetler devreye girdiğinde dahi bu oran %50 dolaylarında gerçekleşmektedir. Termal enerji tüketimi toplam tüketimin %80'ini oluştururken elektrik enerjisi tüketimi toplam enerji tüketiminin %20'sini oluşturmaktadır (Pardo ve diğ., 2011).Çimento üretiminde tüketilen elektrik enerjisi 110 kws/ton mertebesindedir . Bu tüketimin %40'ı klinkerin öğütülmesi sırasında harcanmaktadır (Jankovic ve diğ., 2004).

Çimentonun inceliğinin artması çimentodaki ortalama tane boyutunun küçülerek çimentonun yüzey alanının artması anlamına gelmektedir. Genel anlamda kalın tanelerd en oluşan çimentonun ince tanelerden oluşan çimentoya oranla daha yavaş hidratasyona girdiği bilinmektedir (Erdoğan, 2007)

Dünya'da ve Türkiye'de yükselen çimento üretimi nedeniyle sektörün enerji ihtiyacı artmakta ve enerji talebi sürdürülebilir büyümenin önünde engel teşkil etmektedir. Çimentodaki talep artışının yanısıra yüksek reaktiflik gösteren, erken mukavemeti yüksek olan çimentolara olan talebin artması inceliği daha yüksek çimentoların üretilmesine gebe olmuştur. İnceliği yüksek çimentoların elde edilmesi için klinkerin öğütülmesi sırasında daha yüksek elektrik enerjisi harcanması gerekmektedir. Ayrıca çimento inceliğinin artmasının ihtiyaç duyulan alçı miktarını değiştirebildiği ve işlenebilirlik sorunları yarattığı bilinmektedir (Neville, Brooks, 2010) . Bu çalışmada çimento inceliğinin şantiye şartlarında betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisinin anlaşılabilmesi için 6 farklı inceliğe endüstriyel koşullarda öğütülmüş çimento numunesi nin, aralarında bir hazır beton tesisi, Çimsa Çimento Araştırma ve Uygulama Merkezi , Ankara Öğütme ve Paketleme Tesisi kalite kontrol laboratuvarı ile bir yapı kimyasalı firmasının da bulunduğu 4 farklı laboratuvarda analizleri yapılmıştır.

Malzeme ve Deney Yöntemi

Çimsa Eskişehir Çimento fabrikasında üretilen klinkerin, Çimsa Çimento Ankara öğütme ve paketleme tesisinde endüstriyel koşullarda alçı taşıyla farklı inceliklere öğütülmesinin ardından numunelerin incelikleri otomatik blaine cihazıyla ölçülmüştür. Çalışmada numuneler N1 ile N6 arasında numaralandırılmıştır.Numunelerin blaine değerleri ile 45 ve 90 mikron elek üstü yüzdeleri Tablo 1.'de verilmiştir.

Tablo 1. Çimento Numunelerinin İncelik Değerleri.

Özellik	Birim	N1	N2	N3	N4	N5	N6
Blaine	cm^2/g	3900	3700	3350	3200	3100	3000
45 Mik	%	0.7	2.0	3.3	4.0	5.3	6.7
90 Mik	%	0.0	0.1	0.2	0.2	0.3	0.6

Numunelerin kimyasal analizleri Çimsa Kalite Kontrol Laboratuvarlarında tamamlanmıştır. Çalışmada kullanılan çimentonun kimyasal analiz sonuçları ve faz kompozisyonları Tablo 2.de verilmiştir.

Tablo 2. Çimentonun Kimyasal Kompozisyonu ve Faz Oranları (%).

Çözünmeyen Kalıntı	0.6	C3S	56.82
SiO2	19.35	C2S	16.35
Al2O3	5.25	C3A	9.95
FE2O3	2.72	C4AF	8.39
CaO	62		
MgO	2.5		
SO4	3.1		
Kızdırma Kaybı	3.1		
Na2O	0.28		
K2O	0.92		
Cl-	0.006		

Numunelerin 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları, TS EN 196-1'e, priz süreleri TS EN 196-3'euygun olarak Çimsa Mersin Araştırma ve Uygulama Merkezinde test edilmiş ölçülmüştür. Ayrıca her çimento numunesinden sabit çökme değerini sağlayacak şekilde Çimsa Ankara Öğütme ve Paketleme Tesisinde, piyasadaki bir hazır beton tesisinin kalite kontrol laboratuvarlarında beton numuneleri ha zırlanmış ve TS EN 12390-3'egöre betonların basınç dayanımları ölçülmüştür. Betonların taze birim ağırlıkları hesaplanmıştır.

Bulgu ve Tartışmalar

Numunelerin priz süreleri Tablo 3.'te verilmiştir.Tablo 3.'ten anlaşılabileceği gibi çimento inceliğinin artışı çimento pastasının daha erken priz almasını sağlamaktadır.

Tablo 3. Çimento Pastası Numunelerinin Priz Süreleri.

Özellik	Birim	N1	N2	N3	N4	N5	N6
Priz Başı	dakika	130.0	155.0	160.0	170.0	170.0	180.0
Priz Sonu	dakika	195.0	205.0	215.0	220.0	225.0	245.0

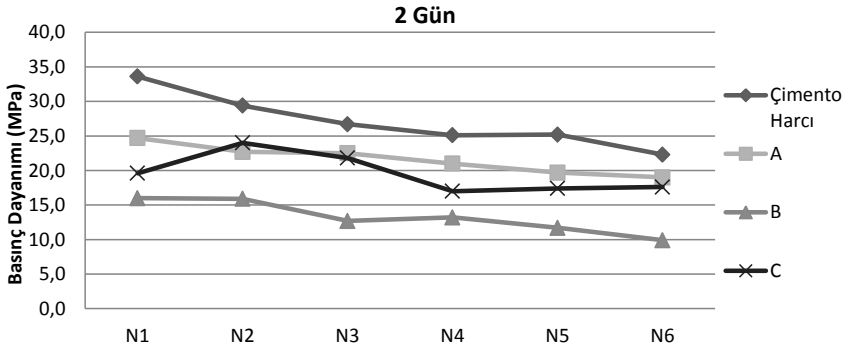
TS EN 1 2390-3'e göre farklı laboratuvarlarda sabit çökmede basınç dayanımı ölçülen numunelerin çökme değerleri, çimento miktarları, su/çimento oranları ve taze birim ağırlıkları Tablo 4.'te verilmiştir.

Tablo 4. Taze Beton Özellikleri.

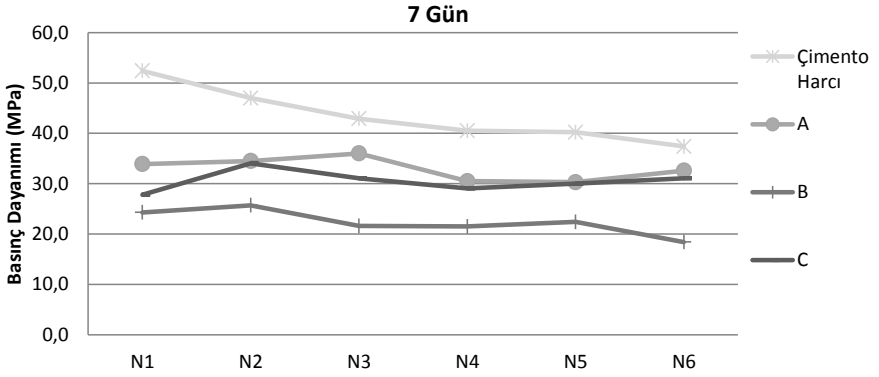
Lab.	Özellik	Birim	N1	N2	N3	N4	N5	N6
A	Çimento	kg/m^3	350	350	350	350	350	350
	Su miktarı	kg/m^3	212	205	205	203	201	198
	Su/ Çimento	-	0.606	0.586	0.586	0.580	0.574	0.566
	İlk Çökme	cm	12	12	12	12	12	12
	Taze birim	kg/m^3	2340	2352	2354	2356	2360	2365
B	Çimento	kg/m^3	280	280	280	280	280	280
	Su miktarı	kg/m^3	201	196	197	199	200	193
	Su/ Çimento	-	0.72	0.7	0.7	0.71	0.71	0.69
	İlk Çökme	cm	16	16	16	16	16	16
	Taze birim	kg/m^3	2401	2401	2395	2403	2400	2405
C	Çimento	kg/m^3	245	245	245	245	245	245
	Kül	kg/m^3	40	40	40	40	40	40
	Su miktarı	kg/m^3	185	169	170	176	177	175
	Su/ Çimento	-	0.65	0.59	0.60	0.62	0.62	0.61
	İlk Çökme	cm	19	19	19	19	19	19
	Taze birim	kg/m^3	2353	2355	2360	2332	2325	2338

Şekil 3. Şekil 4. ve Şekil 5.'te TS EN 196-1'e göre dökülen çimento harçlarının ve TS EN 12390-3'e uygun olarak farklı laboratuvarlarda test edilen beton numunelerinin sırasıyla 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları gösterilmiştir. TS EN 196-1'e göre

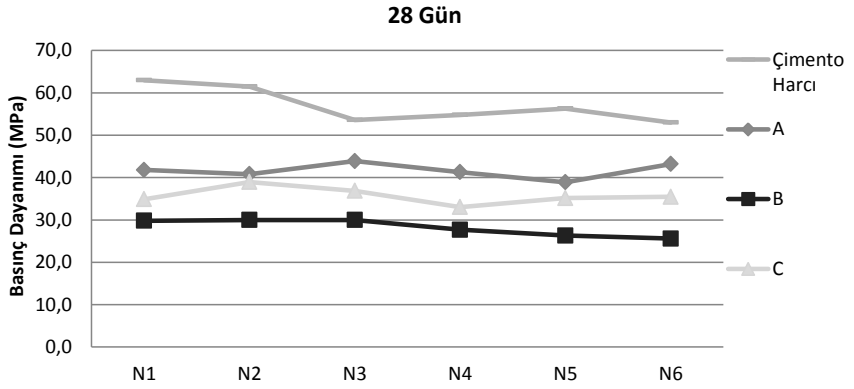
ölçümü yapılan çimento harçlarında su/çimento oranı sabit olduğu için çimento inceliklerindeki artışın çimento harçlarının2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında artış sağladığı anlaşılmıştır. Beton numuneleri ise sabit çökmede döküldüğü için incelik değerinin artmasıyla düşük incelik değerindeki çimentolu karışımlarda sağlanan çökme değerlerinin sağlanması için gereken su miktarları da artış göstermiştir. Bu durum özellikle 7 ve 28 günlük basınç dayanımların artışın önüne geçmiştir. Dolayısıyla inceliğin artışıyla artması beklenen basınç dayanımları Şekil 4 ve Şekil 5'te görüldüğü önemli ölçüde farklılık göstermemiştir. Özellikle belirli bir seviyenin üzerindeki inceliklerde basınç dayanımının değişmediği görülmüştür.Tablo 5.'te Şekil 3. Şekil 4 ve Şekil 5'te oluşan incelik basınç dayanımı ilişkilerinden elde edilen trend çizgilerinin eğimleri 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları için verilmiştir. Eğimlerin beton numunelerinde çimento numunelerine göre farkedilir derecede düşük olması çökme değerinin sabit tutulması için artırılan su miktarının basınç dayanımına etkisini işaret etmektedir.



Şekil 3. Çimento harcı ve beton numunelerinin 2 günlük basınç dayanımı sonuçları.



Şekil 4. Çimento harcı ve beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımı sonuçları.



Şekil 5. Çimento harcı ve beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımı sonuçları.

Tablo 5.Her Yaştaki Numunelerin Basınç Dayanımı Trend Çizgisi Eğimleri.

	Çimento Harcı	A	B	C
2 Gün	-2.02	-1.11	-0.99	-1.22
7 Gün	-2.79	-0.70	-1.13	0.06
28 Gün	-1.84	-0.03	-0.36	-0.98

Sonuçlar

Ülke ekonomilerinde gerçekleşen büyümenin habercisi olan İnşaat sektöründeki hareketliliğe bağlı olarak artış gösteren çimento talebi, Dünya'da ve Türkiyede son 10 yılda dikkate değer ölçüde kuvvetlenmiştir. Gelişmekte olan Dünya ekonomisin in bir göstergesi olan artan çimento talebini çimento üreticileri ancak sürdürülebilir üretimi sağlayarak karşılayabilmektedirler. Sürdürülebilir gelişmenin önündeki en önemli engellerden birisi de çimento üretiminde gerekli olan ve üretim maliyetlerinin yarısını oluşturan enerji maliyetleridir. Artış gösteren çimento talebini karşılayabilmek için ihtiyaç duyulan enerji de artmaktadır. Çimento üretiminde ihtiyaç duyulan yakıt ve elektrik enerjisinin birim fiyatları ise talep artışı nedeniyle sürekli artış gösterecektir.

Çimento üretiminde gerekli olan iki enerji tipinden biri olan termal enerji maliyetlerinin azaltılması için alternatif yakıtların ve kalorifik değerleri uygun olan atıkların kullanımı çimento üreticilerinin gündemine alınmıştır. Öbür yandan toplam enerji tüketim maliyetinin beşte birine tekabül eden elektrik enerjisi tüketiminin azaltılması sürdürlebilir gelişime büyük fayda sağlayacaktır. Çimento fabrikalarında kullanılan elektrik enerjisinin büyük bölümü çimento öğütme sürecine aktarılmaktadır. Çimentonun basınç dayanımını artırdığına inanılan çimento inceliğinin artışı çimento

üretiminde öğütme esnasında ihtiyaç duyulan elektrik enerjisinin artışına sebep olmaktadır.

Yapılan çalışmada sahada daha çok tercih edilen sabit çökme değerindeki betonlarda kullanılan çimentonun incelik değerinin artışının 2 günlük basınç dayanımlarında 3700 cm^2/gr, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında ise 3350 cm^2/gr'ın üzerindeki inceliklerdeki numunelerde basınç dayanımında önemli değişikliğe yol açmadığını ortaya çıkarmıştır.

Çimento inceliğinin artmasıyla betonda su ihtiyacının arttığı görülmüş, Beton dökümlerinde çimento inceliğinin artırılmasının işlenebilirlikte sorunlara yol açabileceği gözlenmiştir.

Referanslar

Erdoğan T. (2007) Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.

International Cement Review (2013) Global Cement Report 10th Edition .

Jankovic A. Walter V. Eugene D. (2004) Cement grinding optimisation . In: Minerals Engineering, pp. 1075 -1081.

Moya , J. A. And Mercier, A. (2011) Prospective on the energy efficiency and CO2 emissions in the EU cement industry . In: Energy, Vol. 36, pp. 3 244-3254.

Neville, A.M. and Brooks, J.J. (2010) Concrete Technology.

TS EN 196-1. Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini. Türk Standartları Enstitüsü; 2009.

TS EN 196-3. Çimento deney metotları – Bölüm 3: Priz süreleri ve genleşme tayini. Türk Standartları Enstitüsü; 2010.

TS EN 12390-3. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü; 2010.

Çimento Özeliklerinin Çözünme Isısına Etkisi

Fahriye Mazlum Kılınçkale
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Üniversitesi, 34320
Avcılar, İstanbul, Türkiye
Tel: (212) 473 70 70
E-Posta: fkilinc@istanbul.edu.tr

Özlem Akyazı
Sigma Mühendislik Ofisi, Maçka, İstanbul, Türkiye
Tel: (212) 258 30 30
E-Posta: o.akyazi@hotmail.com

Öz

Çimento hem havada hem de su içinde sertleşen, sertleştikten sonra suda çözünmeyerek, bu özelliğinden dolayı hidrolik bağlayıcı olarak adlandırılan beton için temel bir bileşendir. Çimentonun su ile yaptığı kimyasal reaksiyona hidratasyon ve açığa çıkan ısıya da Hidratasyon Isısı denir. Hidratasyon Isısı, baraj betonları, temel ayakları vb. gibi kütle betonu bulunan yapılarda termik rötreye neden olur. O sebeple hidratasyon ısısını arttıran nedenler ve hidratasyon ısısını düşürmek için alınacak önlemler betonun durabilitesi yönünden önemlidir. Literatürde çimentonun ve betonun hidratasyon ısısının araştırılmıştır. Bu çalışmanın amacı da çimentonun hidratasyon ısısı ile ilgili olarak çimentonun çözünme ısısının incelenmesidir. Çalışmada kullanılan çimentolar 2 farklı tipte (CEM I ve SDÇ) ve 3 farklı incelikte (300-400-500 m^2/kg,) olmak üzere 6 tanedir. Çimentoların çözünme ısıları ile diğer deneyler yapılarak, çimentoları fiziksel ve kimyasal özeliklerinin çözünme ısısına ne şekilde ve hangi oranda etkilediği araştırılmıştır. Çözünme ısıları, toz halde çimento üzerinde belirlenmiştir. Çözünme ısılarında oluşan sıcaklık artışı Beckmann Termometresi ile ölçülmüştür. Beckmann termometresi 5 -6 ^{0}C sıcaklık aralığında ve 0.01 duyarlıktadır. Bu çalışma sonunda, çözünme ısısına en çok etki eden bileşenlerden C_3S ve C_3A olduğu görülmüştür. Çimentonun inceliği de arttıkça, çözünme ısısının arttığı, priz sürelerinin kısaldığı da saptanmıştır.

Anahtar sözcükler: Çimento, Çözünme Isısı, Berkmann Termometresi, Hidratasyon Isısı, Termik Rötre.

Giriş

Çimento ve su karıştırıldıktan sonra hidratasyon reaksiyonu başlar. Çimentonun katılaşması ve sertleşmesi sırasında hidratasyon ısısı açığa çıkar (Akman, 1990;

Erdoğan, 2007; Baradan ve diğ., 2012). Hidratasyon ısısı, hidratasyon ilerleme süreçlerinde oluşan jel yüzeyindeki suyun soğrulma ısısından oluşur ve birçok etkene bağlıdır (Neville, 1981; Ün, 2007). Hidratasyon ısısının hızı ve miktarı betonun kullanıldığı yer için çok önemlidir. Isı beton içinde yüksek sıcaklık artışı meydana getirir. İç sıcaklık yükselişi, ilk birkaç günde oluşur ve beton plastik olduğu için bir hasar görülmez. Ancak soğuma esnasında, beton rijitlik kazandığında problem oluşabilir. Yapının iç ve dış kısımları arasındaki sıcaklık farklılıkları rötre çatlağına yol açtığı için, beton bazı özeliklerini yitirir (Sağlık ve diğ., 2009; Mindess ve Young, 1981; Liwu ve Min, 2006) . Hidratasyon ısısı, çimentonun kimyasal bileşimine bağlıdır. Çimento anabileşenlerinin herbirinin hidratasyon ısısı farklıdır. Ancak C_3A ve C_3S en reaktif bileşenlerdir ve hidratasyon ısısına en çok etki edenlerdendir. Çimentoda C_3S ve C_3A oranları azaldıkça hidratasyon ısısı ve hızı özellikle erken yaşlarda düşer (Sağlık ve diğ., 2009; Mindess ve Young, 1981; Liwu ve Min, 2006; Kaminski ve Zielenkiewivz, 1982). Çimento inceliği de hidratasyon ısısına etki eder. İncelik arttıkça da çimento tanelerinin yüzeyi artar, reaksiyona girme hızı artar. İnce öğütülmüş çimentolar hidratasyon hızını arttırır fakat toplam hidratasyon ısısında etkili değildir (Neville, 1981; Ün, 2007; Mindess ve Young, 1981).

Bu çalışmanın amacı, çözünme ısısına çimento bileşiminin ve inceliğinin etkisini araştırmaktır. Bu amaçla kimyasal bileşimleri ve incelikleri farklı SDÇ 32,5R ve CEM I 42,5R çimentoları seçilerek çimentoların incelikleri, priz süreleri ve toz çimentoların çözünme ısıları ölçülmüştür (Akyazı, 2011).

Çimentonun hidratasyon ısılarının ölçülmesi için çimentonun toz halde çözünme ısıları belirlenir. Hidrate çimentonun hidratasyon ısısı ise çimentonun çözünme ısısından yararlanılarak bulunur (TS 687, 1994).

Deneysel Çalışmalar

6 çimentoda, incelik, priz süreleri ve çözünme ısısı ölçülerek; aralarındaki ilişki araştırılmıştır.

Kullanılan Malzemeler ve Özelikleri

Çimentolar

32,5MPa dayanımlı (32,5 R) SDÇ çimentosu ile 42,5 MPa olan yüksek erken dayanımlı (42,5 R) CEM I çimentosu kullanılmıştır. SDÇ 32,5 R 318, 400, 550 m^2/kg, CEM I 42,5 R da 400, 463, 555 m^2/kg inceliktedir. Çimentoların kodları Tablo 1'de ve içeriği de Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 1 Çimento Kodları (Akyazı, 2011).

Çimento türü	SDÇ	SDÇ	SDÇ	CEM I	CEM I	CEM I
Blaine(m^2/kg)	318	400	550	400	463	555
Çimento kodu	S3K	S4K	S5K	C4K	C4aK	C5aK

Çözeltilerin Hazırlanması

Kalorimetre cihazının elemanlarından cam karıştırıcı, termos ve Beckmann termometresinin çözelti içerisinde kalan kısmı asitlerden zarar görmemesi için parafin

ile kaplanmıştır. Plastik kaplara 8 ml HF asit konmuştur. 127 ml derişik HNO_3 (d=1,39 kg/l, %65) su ile lt ye tamamlanarak (11 -ASTM C186 -05)'e göre 2N hazırlanmıştır.

Tablo 2 S ve C Çimentolarının Kimyasal B ileşimi (%) ve Blaine'leri (Akyazı, 2011).

Çimento Kodu	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	Cl^-	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	Blaine (m^2/kg)
S3K	64,56	20,48	3,91	4,05	1,05	0,74	0,22	2,73	0,0323	62,72	11,40	3,52	12,31	318
S4K	64,70	20,51	3,92	4,11	1,05	0,72	0,22	2,61	0,0308	63,13	11,17	3,42	12,52	400
S5K	65,19	20,83	3,95	4,11	1,07	0,68	0,21	2,26	0,0296	63,09	12,13	3,53	12,50	550
C4K	64,02	20,61	4,40	3,51	1,06	0,88	0,17	2,89	0,0398	56,91	16,14	5,72	10,68	400
C4aK	64,20	20,66	4,41	3,53	1,06	0,87	0,17	2,80	0,0394	57,21	16,07	5,71	10,75	463
C5aK	64,43	20,82	4,45	3,54	1,06	0,84	0,16	2,52	0,0373	57,12	16,59	5,80	10,76	555

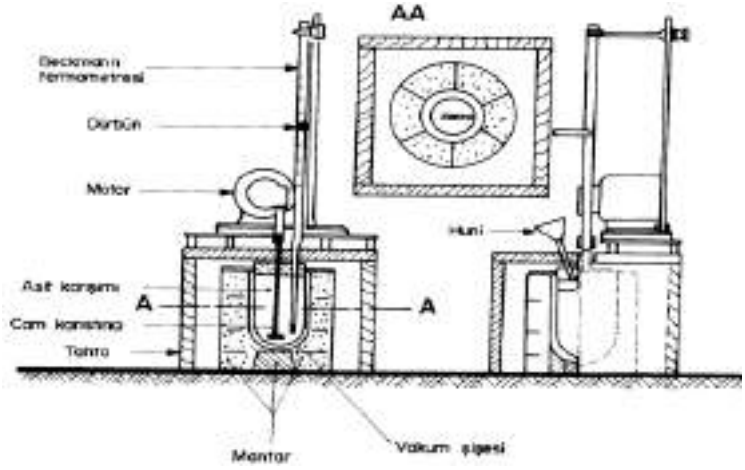
Kullanılan Araç ve Gereçler

Vicat Cihazı

Çimentonun normal kıvam, priz sürelerinin belirlenmesi için Vicat cihazı sondası ve iğnesi kullanılmıştır.

Kalorimetre

Çimentonun çözünme ısısının ölçümünde Kalorimetre cihazı kullanıllmıştır. (Şekil 1)

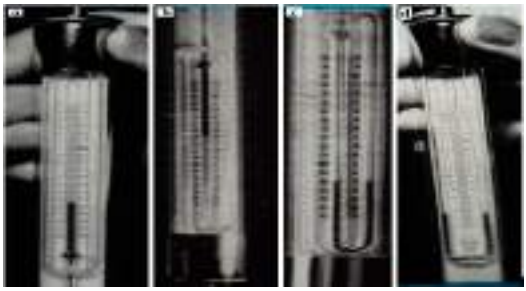


Şekil 1 Kalorimetre Cihazı (TS 687, 1994).

Beckmann Termometresi

Sıcaklık ölçümünde Beckmann termometresi kullanılır. Bu termometrenin uzunluğu yaklaşık 50 cm. , sıcaklık aralığı, 5-6°C, sıcaklık duyarlılığı ise 0,01'dir.

Termometrenin yukarısında ikinci bir hazne S şeklinde kıvrılmıştır. Termometre ve kalibrasyonu Şekil 2'dedir.



Şekil 2 Beckmann Termometresi ve Kalibrasyonu .

Kalorimetrenin ısı sığası ve açığa çıkan ısıdan sıcaklık yükselişi ölçülerek kalorimetrenin kalibrasyonu yapılır. Bulunan değerler standartda belirtilen denklemde yerine konarak kalorimetrenin ısı kapasitesi (C_c) bulunur.

Kuru Çimentoların Çözünme Isısı Tayini

Çimentolar 0,1 mg hassasiyetle 3 g tartıldıktan sonra kalorimetre kabının ısı kapasitesi hesabında olduğu gibi, aşağıdaki formülde yerine konarak çözünme ısısı (H_1) bulunmuştur.

$$H_1 = R^o \times C_c / m_K - 0{,}2 \times (T^o - t) \qquad (1)$$

H_1: Kuru çimentonun asitte çözünme ısısı, cal/g
R^o : Düzeltilmiş sıcaklık yükselişi, (°C)
C_c: Kalorimetre kabının ısı kapasitesi, (cal/°C)
t : Kalorimetre kabının son sıcaklığı, (°C)
T^o : Çimento numunenin kalorimetre kabına konulurken sıcaklığı (oda sıcaklığı), (°C)
m_K: Numunenin kızdırılmış haldeki kütlesi (g)

Yapılan Deneyler

Normal Kıvam Tayini

Deney için Vicat cihazına takılan sonda taban plakası üzerine indirilip, taksimatlı göstergeden sıfır okunacak şekilde ayarlanmıştır. Normal kıvamlı hamur için kullanılan su yeterli ise sonda 0,5 dk içinde cam levhaya 5-7 mm kalana dek iner.

Çimentonun Priz Süreleri Tayini

Normal kıvam tayininden farklı olarak sonda yerine iğnenin, düşey olarak pasta içine batırılır. Sıfır olarak kabul edilen başlangıç zamanından, iğne ile taban plakası arasındaki mesafe 4 (± 1) mm olana kadar geçen süre en yakın 5 dakikaya yuvarlatılarak priz başlangıç süresi olarak kaydedilmiştir. İğnenin 0,05 mm kadar battığı an ile sıfır

olarak kabul edilen zaman, en yakın 15 dak. ya yuvarlatılmış ve priz sonu süresi olarak kaydedilmiştir.

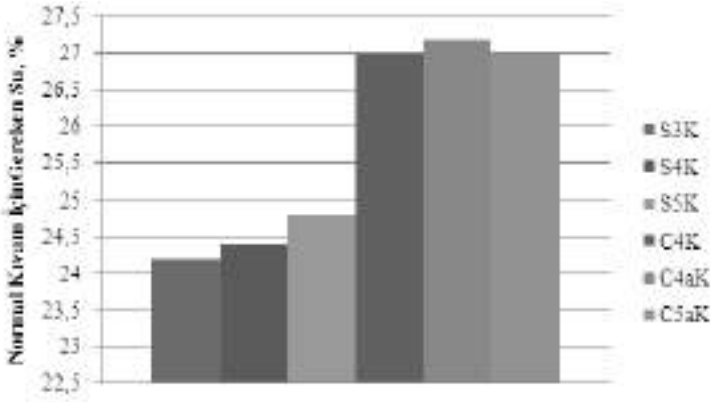
Hidratasyon Isısı Deneyi

Hazırlanan 2N HNO_3 ten 126 g, HF den 8 ml termos içine konur. Kalorimetre kabının üstündeki kapaklarda Beckmann termometresi ve huni bulunur. (Şekil 1 ve Şekil 2)

Deney Sonuçları ve Tartışma

Normal Kıvam Tayini Deney Sonuçları

Şekil 3'de görüldüğü gibi Normal kıvam için gerekli su miktarı, CEM çimento hamurunda SDC'ye göre daha fazladır. Normal kıvam priz süresi ile ilgili, priz süresi de incelik ilgili olduğuna göre; çimentoların incelikleri birbirine yakın (S, 318-400-550m^2/kg; C, 400-463-555 m^2/kg) olduğu için su gereksinimi artışı, bu farklılıkla açıklanabilir.



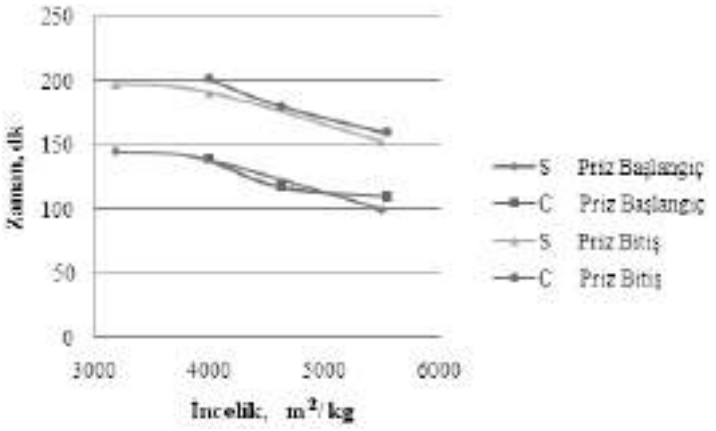
Şekil 3 Çimentolarda Normal Kıvam için Gereken % Su (Akyazı, 2011).

Priz Süreleri Deney Sonuçları

Tablo 3 ve Şekil 4'de çimentonun inceliğinin arttıkça priz başlama süresinin kısaldığı, çimento hamurunun daha erken sertleşmeye başladığı görülmüştür. Çünkü çimento taneleri küçüldükçe partiküllerin kapsadığı toplam alan ve reaksiyona hızı artar. Dolayısıyla, ürünler daha çok ve hızlı oluşarak erken dayanım kazanır. CEM(C) çimentoları SDC(S)'lere göre prize daha erken başamakta, priz alma süreleri daha uzun olmuştur. Bunun nedeninin C'lerin S'lere göre daha fazla miktarda C_3A içermesi olduğuna bağlanabilir. C5aK çimentosunun kimyasal bileşimine bakıldığında en fazla miktarda C_3A içerdiğinden prize diğerlerinden daha erken başladığı görülmüştür.

Tablo 3 Çimentoların Priz Süreleri, Yoğunlukları ve İncelikleri (Akyazı, 2011).

Çimento Kodu	Normal Kıvam % Su	Priz Süresi (dk)		Tane yoğunluğu (Mg/m^3)	Özgül Yüzey (m^2/kg)
		Başlangıç	Bitiş		
S3K	24,2	145	198	3,16	318
S4K	24,4	139	191	3,16	400
S5K	24,8	100	153	3,16	550
C4K	27,0	139	202	3,14	400
C4aK	27,2	118	180	3,14	463
C5aK	27,0	110	160	3,14	555



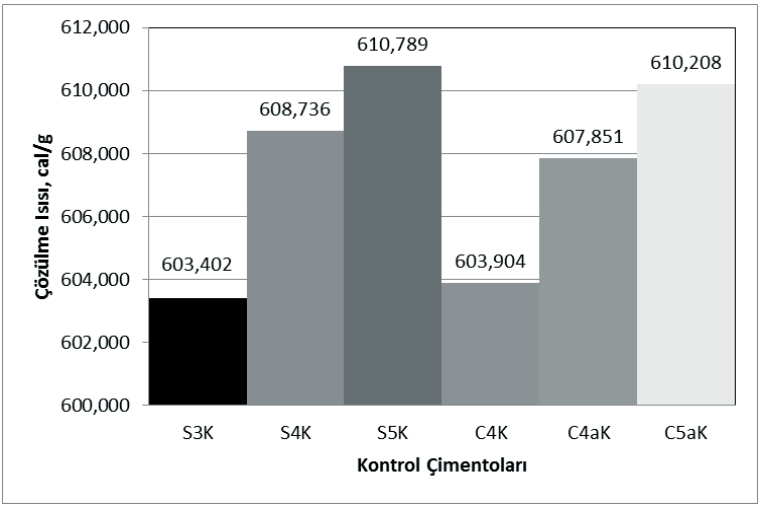
Şekil 4 İnceliğin Priz Başlama-Bitiş Süreleri Üzerindeki Etkisi (Akyazı, 2011).

Çözünme Isısı Deney Sonuçları

Deneyde bulunan CEM ve SDC çimentolarının çözünme ısıları Tablo 4'de sunulmuştur. Çimentoların çözünme ısıları iki farklı türün benzer Blainli çimentolarında yaklaşık aynı ısıyı vermiştir (Şekil 5). Bu sonuç, çimento türü farklı olsa da çimentoların Blaine değerlerinin çözünme ısısını etkileyen önemli bir özelik olduğunu göstermiştir. Çimentonun hidratasyonunda ve hidratasyon hızında, inceliğin önemli ölçüde etkili olduğu belirtilmiştir (Erdoğan, 2007). Sıcaklık artışları tüm çimentolarda ilk 10 dak içinde artmış, daha sonra da 40 dak. ya kadar sabit kalmıştır. Çimentolar arasında S grubunda sıcaklık artışı 4.5^0C'nin üstündedir (Şekil 6-7).

Tablo 4 S ve C Çimentolarının Çözünme Isısı Değerleri (Akyazı, 2011).

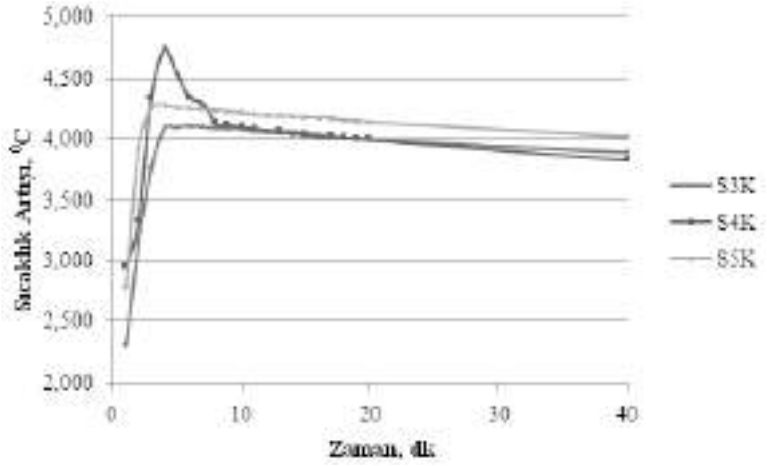
Çimento Kodu	θ_0 (°C)	θ_{20} (°C)	θ_{40} (°C)	R_0 (°C)	R^o (°C)	m_K (g)	T^o (°C)	t (°C)	C_c (cal/°C)	H_1 (cal/g)
S3K	1,19	5,19	5,08	4	4,11	2,96	18	22	434,28	603
S4K	0,86	4,85	4,69	3,99	4,15	2,96	21	25	434,28	609
S5K	0,8	4,75	4,64	3,95	4,07	2,89	21	25	434,28	611
C4K	0,81	4,84	4,81	4,03	4,06	2,93	19	23	434,28	604
C4aK	0,51	4,53	4,46	4,02	4,09	2,93	20	24	434,28	608
C5aK	1,03	5,04	4,9	4,02	4,16	2,96	20	24	434,28	610



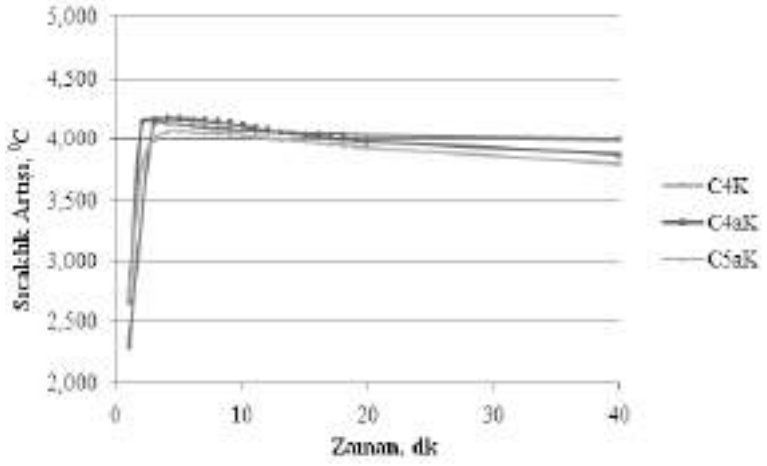
Şekil 5 Çimentoların Çözünme Isısı.

Tablo 5 Çimentoların İlk 20 Dak. Sıcaklık Artışı (Akyazı, 2011).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
C4K	2,30	3,30	4,10	4,13	4,12	4,11	4,10	4,09	4,08	4,08	4,07	4,07	4,06	4,06	4,05	4,05	4,04	4,00	4,04	4,03	4,00
C4ak	2,70	4,10	4,10	4,15	4,17	4,17	4,16	4,16	4,14	4,13	4,11	4,09	4,08	4,06	4,05	4,03	4,02	4,00	4,00	3,99	3,88
C5aK	2,70	3,80	4,00	4,06	4,07	4,07	4,05	4,05	4,04	4,03	4,02	4,01	4,00	3,99	3,98	3,97	3,96	4,00	3,94	3,93	3,80
S3K	2,30	3,20	3,80	4,09	4,10	4,11	4,10	4,09	4,08	4,08	4,06	4,06	4,05	4,04	4,03	4,02	4,02	4,00	4,01	4,00	3,89
S4K	2,90	3,30	4,30	4,74	4,54	4,34	4,29	4,13	4,12	4,10	4,09	4,07	4,06	4,06	4,04	4,03	4,02	4,00	4,00	4,00	3,83
S5K	2,80	3,90	4,30	4,29	4,26	4,25	4,25	4,24	4,23	4,22	4,21	4,20	4,19	4,19	4,18	4,18	4,17	4,20	4,15	4,14	4,03



Şekil 6 SDC Çimentolarının Çözünme Isısında Sıcaklık Artışı (Akyazı, 2011).



Şekil 7 CEM Çimentolarının Çözünme Isısında Sıcaklık Artışı (Akyazı, 2011).

Genel Sonuçlar

Bu çalışmadan çıkarılan sonuçlar şöyle sıralanmıştır:
Çimentoların çözünme ısısının değişiminde incelik ve kimyasal bileşim etkili olmuştur.

- Normal kıvam için gerekli su miktarı, CEM çimento hamurunda SDC'ye göre daha fazladır.
- CEM çimentoları SDC'lere göre prize daha erken başlamış, priz alma süreleri de daha uzun olmuştur.

- Çimentoların çözünme ısıları iki farklı türün benzer Blain'li çimentolarında yaklaşık aynı ısıyı vermiştir.
- Sıcaklık artışları tüm çimentolarda ilk 10 dak içinde artmış, daha sonra 40. dakikaya kadar sabit kalmıştır.
- Çimentolar içinde SDC grubunda sıcaklık artışı 4.5^0C'nin üstündedir.

Kaynaklar

Akman , M.S. (1990), Yapı Malzemeleri, İTÜ Kütüphanesi, 2. Baskı, Sayı 1408.

Akyazi,Ö. (2011), Katkısız Ve Katkılı Çimentoların Hidratasyon Isılarının Çimento Özelikleri İle Karşılaştırılması, İÜ, FBE.

Baradan B.,Yazici H. ve Aydin S. (2012), Beton, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.

Erdoğan, T.Y. (2007), Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Özkan Matbaacılık Gaz. San.ve Tic Şti., Ankara.

Kaminski , M. ve Zielenkiewicz, W. (1982) The heats of hydration of cement constituents , Cement and Concrete Research , 12, 549-558.

Liwu, M. ve Min, D. (2006) Thermal behavior of cement matrix with high -volume mineral admixtures at early hydration age, Cement and Concrete Research, 36, 1992-1998.

Mindess , S. ve Young , J.F. (1981), Concrete , Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jerse y, 0-13-167106-5.

Neville, A.M. (1981), Properties of Concrete , 3rd Edi., Pitman Books Limited, Great Britain, Longman Scientific&Technical, 0 -582-40626-9.

TS 687 (1994), Çimento Kimyasal Analiz Metotları, Çimento Hidratasyon Isısı Tayini.

Sağlik, A., Sümer, O., Tunç, E., Kocabeyler, M.F., Çelik, R.S. (2009) Borlu aktif belit (BAB) çimentosu ve DSİ projelerinde uygulanabilirliği, DSİ Bülten, Sayı 105, 1-46.

Ün, H. (2007), Yapı Malzemesi ders notları, Pamukkale Üniversitesi.

Soğuk Bağlama Yöntemi İle Üretilen Uçucu Kül Hafif Agregalarının Kendiliğinden Yerleşen Betonların Kırılma Parametreleri Üzerindeki Etkileri

Mehmet Gesoğlu, Erhan Güneyisi
Gaziantep Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 27310, Gaziantep
Tel: 0342 3172404; 0342 3172410
E-posta: mgesoglu@gantep.edu.tr ; guneyisi@gantep.edu.tr

Turan Özturan
Boğaziçi Üniversitesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü,
34342, İstanbul
Tel: 0212 3596450
E-posta: ozturan@boun.edu.tr

Hatice Öznur Öz
Niğde Üniversitesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü,
51240, Niğde
Tel: 0388 2252287
E-posta: oznuroz@nigde.edu.tr

Öz

Günümüzde depolama sorunları nedeniyle endüstriyel atık maddelerin geri dönüşümünün sağlanması konusunda önemli çalışmalar yapılmaktadır. Son yıllarda düşük özgül ağırlığa sahip doğal veya yapay hafif agregalarla üretilen betonların yapı sektöründe kullanımı hızla artmaktadır. Doğal kaynakların sınırlı olmasından dolayı hafif agregalı beton kullanımına artan talep, araştırmacıları çevresel faktörler ve enerji tüketimini de göz önüne alınarak yapay hafif agrega üretimine yönlendirmiştir. Buna bağlı olarak uçucu kül gibi endüstriyel atık maddeler yapay hafif agrega üretiminde kullanılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada, soğuk bağlama yöntemi ile üretilen uçucu kül hafif agregalı kendiliğinden yerleşen betonların mekanik ve kırılma özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. İlk olarak, hafif uçucu kül agregaları üretmek için ağırlıkça %90 uçucu kül ve %10 çimentodan oluşan kuru toz karışım eğimli bir diskte oda sıcaklığında ıslatma yoluyla peletlenmiş ve 28 gün süreyle kapalı ortamda bekletilmiştir. Daha sonra, 0.32 su/bağlayıcı oranında %100 doğal agrega içeren kendiliğinden yerleşen kontrol betonu tasarlanmış ve yapay agregalar doğal agregalar ile %10, ,%30 ve %50 hacimsel oranlarda yer değiştirilerek kendiliğinden yerleşen hafif agregalı betonlar (KYHB) üretilmişlerdir. 90. günde, KYHB'ların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, kırılma enerjisi, karakteristik boy ve kırılma anındaki son deplasman değerleri ölçülerek incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, KYHB' ların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, kırılma enerjisi ve karakteristik boy değerleri hafif agrega hacimsel oranının artmasıyla azalmıştır. İnce hafif agregalı KYHB' ların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ile kırılma enerjisinin iri hafif agregalı KYHB' lara kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Hafif Agrega; Kendiliğinden Yerleşen Beton; Kırılma enerjisi; Peletleme Yöntemi; Sertleşmiş Özellikler.

Giriş

Beton diğer yapı malzemelerine nazaran yapı sektöründe çok yaygın olarak kullanılan bir taşıyıcı malzemedir. Ancak normal betonun birim ağırlığının fazla olması ve işlenmesinin zor olması gibi nedenler hafif beton ve kendiliğinden yerleşen beton gibi yeni tip betonların gereksinimini doğurmuştur (Kim ve diğ., 2010).

Hafif beton normal betona göre, yüksek dayanım/ağırlık oranı, iyi çekme dayanımı, düşük ısı genleşme katsayısı, daha iyi ses ve ısı izolasyonu gibi üstün özelliklere sahiptir. Çoğunlukla doğal veya yapay çeşitli hafif agrega kullanımıyla üretilen hafif betonların inşaat sektöründe çok yönlü kullanımı gittikçe önem kazanmaktadır. Doğal kaynakların sınırlı olmasından dolayı hafif agregalı beton kullanımına artan talep, araştırmacıları çevresel faktörler ve enerji tüketimini de göz önüne alınarak yapay hafif agrega üretimine yönlendirmiştir. Termik santrallerin atığı olan uçucu kül depolama sorunları nedeniyle hava ve suları kirleterek çevreye büyük zararlar vermektedir. Türkiye'deki termik santrallerden yılda 15 milyon tonun üzerinde uçucu kül açığa çıkmaktadır (Gesoğlu ve diğ., 2014). Bu miktara karşın uçucu külün çok az bir miktarı inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Diğer yöntemlere kıyasla daha kolay ve ekonomik olan soğuk bağlama veya peletleme yönteminde, uçucu kül içerisine bir miktar çimento veya kireç eklenmesiyle hazırlanan kuru karışım belirli bir açıda ve hızda dönen pelet tamburu içerisine boşaltılmakta ve üzerine yağmurlama biçiminde su püskürtülerek küresel agregalar elde edilmektedir (Gesoğlu ve diğ., 2014).

1980'li yıllarda Japonya'da geliştirilen kendiliğinden yerleşen beton (KYB) üstün deformasyon ve segregasyon dayanımı ile beton teknolojisine önemli bir katkıda bulunmuştur. Herhangi bir sıkıştırmaya gerek kalmaksızın, kendi ağırlığı altında kalıba kolayca yerleşen, boşlukları dolduran bu beton türü, yeni tip yüksek performanslı beton olarak kabul edilmektedir (Mazaheripour v e diğ., 2011). Kendiliğinden yerleşen hafif agregalı beton (KYHB) ise hafif beton ve kendiliğinden yerleşen betonun üstün özelliklerin birleştirilmesiyle oluşan bir beton türüdür. Hafif agregaların kendiliğinden yerleşen betonda kullanılmasıyla hafif agregalarda önemli bir sorun olan segregasyon problemi önlenmiş ve kendiliğinden yerleşen betonun birim ağırlığı önemli ölçüde azaltılmış olacaktır.

Hafif agrega içeren betonların yapısal olarak kullanımı yaygınlaşırken bu tip betonların temel özelliklerinin iyi anlaşılması gerekmektedir. Uygulamada, beton genellikle basınç dayanımı teorisine bağlı olarak tasarlanmaktadır. Fakat malzemelerde teorik olarak hesaplanan dayanım, pratikte elde edilememektedir. Bu da önemli bir sorun olan, malzemelerin akma yoluyla değil, kırılma diye bilinen gevrek davranış sonucu dayanımlarını yitirmelerinin bir sonucudur (Alyamaç ve İnce, 2007). Dolayısıyla, betonun mekanik özelliklerinin yanı sıra kırılma mekaniği parametrelerinin de belirlenmesi gerekir. Literatürde hafif agrega içeren betonların kırılma parametreleri ile ilgili çalışmalar kısıtlı sayıdadır. Hafif agrega içeren betonlarda kırılma, hafif agregala rın dayanımının düşük olması sebebiyle, hafi f agregalarda başlamakta ve gelişmektedir. Dolayısıyla bu tür betonlarda hafif agrega özellikleri ve hacim konsantrasyonu büyük önem taşımaktadır. (Lydon ve Balendran, 1980) . Chang ve Shieh

(1996) yaptıkları çalışmada sinterlenmiş ve soğuk bağlanmış uçucu kül agregası içeren hafif betonların kırılma enerjilerini 34.42 N/m ve 37.20 N/m olarak tespit etmişlerdir. Akçay (2007) hafif agregaların dane çapının hacim yüzdesinden daha fazla kırılma enerjisini etkilediğini belirtmiştir. Bunlara ek olarak, İpek (2013) yaptığı çalışmada %45 hafif agrega içeren betonların kırılma enerjisi ve karakteristik boy değerlerini 42 N/m ve 382 mm olarak bulurken , bu değerlerin %60 hafif agrega içeren betonlar için 34,4 N/m ve 311 mm olarak azaldığını göstermiştir.

Bu çalışmada soğuk bağlama yöntemiyle uçucu külden üretilen suni agregalar KYH B tasarımında kullanılmıştır. Doğal iri ve ince agregalar ın hacimsel olarak dört farklı oranda (%0, %10, %30, %50) iri ve ince hafif agregalar ile yer değiştirilmesiyle oluşan toplam 1 1 KYHB üzerinde basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, kırılma enerjisi, karakteristik boy ve kırılma anındaki son deplasman değerleri incelenmiştir.

Deneysel Çalışma

Malzemeler

Bu çalışmadaki KYHB ve hafif agrega üretimlerinde CEM I 42.5 R portland çimentosu kullanılmıştır. Zonguldak Çatalağzı Termik Santralinden getirilen ASTM F tipi uçucu kül hem hafif agrega üretiminde hem de KYHB üretimin de %20 oranında mineral katkı olarak kullanılmıştır. KYHB karışımlarında işlenebilirliği sabit tutmak üzere değişken oranlarda polikarboksilik eter esaslı süperakışkanlaştırıcı katılmıştır.

Hafif agregalar , düşeyde 45° derecelik açı yapan ve 42 dev/dak hızla dönen tambur içerisindeki ağırlıkça % 90 uçucu kül ve % 10 çimento kuru karışımı üzerine düzenli olarak su püskürtülmesi sonucu ıslanan tanelerin oda sıcaklığında birleşmeleriyle üretilmişlerdir. Bu işlem sonucunda oluşan taze peletler plastik torbalar içerisinde 28 gün bekletilmiştir. Bu süre sonunda 0.25-4 mm ve 4-16 mm tane gruplarına ayrılarak, KYHB üretiminde iri ve ince hafif agrega olarak kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1 Peletleme işlemi ve üretilen hafif agregalar.

ASMT C 127' ye uygun olarak yapılan testler sonucunda hafif iri ve ince agreganın su emme yüzdeleri, sırasıyla %17,1 ve %21,2 olarak bulunurken, kuru yüzey doygun özgül ağırlıkları her iki agrega için de 1,76 olarak ölçülmüştür.
Doğal iri ve ince agregalar KYHB üretmek için hafif iri ve ince agregalar ile birlikte kullanılmışlardır. İri agrega olarak dere çakılı kullanılırken, ince agrega olarak doğal ve kırma kumdan oluşan bir karışım kullanılmıştır.

Beton Üretimi ve Deney Numuneleri

KYHB beton karışımları ASTM C192'ye uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Taze betonda çökme kaybının önlenmesi amacıyla karışım suyunun hafif agregalarca emilmesini azaltmak için özel bir metot uygulanmıştır. Beton karıştırma işleminden önce hafif agregalar yaklaşık 30 dakika suda bekletilmiş ve daha sonra geniş elekler üzerine serilerek 30 dakika süreyle yüzey suyu süzdürüldükten sonra kullanılmıştır (Akçay, 2007; İpek, 2013; Gesoğlu ve diğ., 2014).

Hafif agregaların dane çapının ve hacim konsantrasyonun KYHB'nin mekanik özellikleri ve kırılma parametreleri üzerinde etkisini incelemek için 11 farklı beton karışımı tasarlanmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0.32 ve 550 kg/m^3 dozaj (%20 uçucu kül ve %80 çimento olmak üzere) içeren beton karışım miktarları Tablo 1'de verilmiştir. İlk olarak tamamen doğal agrega içeren kontrol karışımı (CM) tasarlanmıştır. İlk grupta, doğal iri agreganın hafif iri agrega ile hacimsel olarak %10, %30 ve %50 yer değiştirmesiyle MC10, MC30 ve MC50 karışımları elde edilmiştir. İkinci grupta MF10, ,MF30, MF50 karışımları aynı oranlarda doğal ince agreganın hafif ince agregayla hacimsel olarak yer değiştirmesiyle tasarlanmıştır. Üçüncü grupta ise doğal iri ve ince agrega eşit oranlarda hafif iri ve ince agregayla birlikte yer değiştirilerek MCF10, MCF30, MCF50 karışımlarını oluşturulmuştur. Ayrıca, tamamen hafif agregadan oluşan MCF100 karışımı da tasarlanmıştır. KYHB'ların yayılma çapı EFNARC (2005) limitlerini sağlamak amacıyla 720±20 mm olarak sabit tutulmuştur. İstenilen yayılma çapını elde edene kadar farklı miktarda süperakışkanlaştırıcı kullanılarak deneme üretimler yapılmıştır.

Tablo 1 Üretilen betonların karışım oranları (kg/m^3).

Karışım Kodları	Çimento	Uçucu kül	Su	İri agrega			İnce agrega			SA*	Taze Birim Ağırlık
				Doğal	Hafif		Doğal		Hafif		
				4-16 mm	4-8 mm	8-16 mm	Doğal kum	Kırma kum	0.25-4 mm		
CM	440	110	176	853,7	0,0	0,0	582,3	229,8	0,0	7,1	2398,9
MC10	440	110	176	683,0	33,0	77,1	582,3	229,8	0,0	5,9	2337,1
MC30	440	110	176	341,5	99,1	231,2	582,3	229,8	0,0	4,4	2214,2
MC50	440	110	176	0,0	165,1	385,3	582,3	229,8	0,0	4,0	2092,5
MF10	440	110	176	853,7	0,0	0,0	465,8	183,9	110,1	6,1	2345,6
MF30	440	110	176	853,7	0,0	0,0	232,9	91,9	330,2	4,0	2238,8
MF50	440	110	176	853,7	0,0	0,0	0,0	0,0	550,4	3,1	2133,2
MCF10	440	110	176	768,3	16,5	38,5	524,0	206,9	55,0	5,9	2341,2
MCF30	440	110	176	597,6	49,5	115,6	407,6	160,9	165,1	4,5	2226,8
MCF50	440	110	176	426,9	82,6	192,6	291,1	114,9	275,2	3,9	2113,2
MCF100	440	110	176	0.0	165,1	385,3	0,0	0,0	550,4	3,0	1829,8

SA*: Süperakışkanlaştırıcı

Beton dökme işleminden sonra üç adet 150x150x150 mm küp, 100x200 mm silindir numune ve dört adet 100x100x500 mm'lik prizma numuneler alınmıştır. Küp numuneler üzerinde basınç deneyi, silindir numuneler üzerinde yarma-çekme dayanımı deneyi, prizma numuneler üzerinde ise kırılma enerjisi deneyleri yapılmıştır.

Deneysel Yöntem: Mekanik Özelikler ve Kırılma Parametrelerinin Belirlenmesi

Üretilen numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkartılıp, 90 gün süreyle suda bekletilmiş ve bu süre sonunda deneyler yapılmıştır. Basınç deneyleri 3000 kN kapasiteli bir pres kullanılarak küp numuneler üzerinde yapılırken silindir numuneler üzerinde yarma - çekme deneyleri yapılmıştır.

Kırılma enerjisinin belirlenmesinde RILEM TC 50 -FMC Teknik Komitesince (1985) önerilen yöntem kullanılmıştır. İlk olarak, 100x100x500 mm'lik prizma numuneler de taş kesme makinesi ile 40 mm derinlikte bir çentik açılmış ve etkin kesit alanının 60x100 mm olması sağlanmıştır. Daha sonra, çentikli prizma (kiriş) numuneler üzerinde 250 kN kapasiteli kapalı çevrim test cihazı (Instron 5590R) ile 0,02 mm/dak. yükleme hızında üç noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Kiriş ortasında maksimum sehim değeri 1.5 mm olarak seçilmiştir. Kirişin ortasına yerleştirilen sehim transdüser (LVDT) ile oluşan sehim değerleri ölçülmüştür. Böylece, her bir kiriş numune için yük–sehim eğrileri elde edilmiştir. Test cihazı detayları Şekil 2'de verilmiştir. Betonun kırılma enerjisi, G_F, yük-sehim eğrisinin altındaki alan (W_0) yardımıyla RILEM TC 50 - FMC'nin (1985) önerisine göre aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Eşitlik 1).

$$G_F = \frac{W_0 + mg\frac{S}{L}\delta_0}{B(h-a)} \quad (1)$$

Burada, B ve h kiriş numunenin genişliği ve derinliği, a çentik derinliği, S mesnetler arası uzaklık, L ve m ise deney numunesinin uzunluğu ve ağırlığıdır. Ayrıca, g yerçekimi ivmesi, δ_0 ise göçme anında açıklığın ortasında ölçülen en son sehimdir. Çentikli kiriş numuneler aşağıda verilen formülle (Eşitlik 2) net eğilme dayanımı (f_{flex}) hesaplanmasında kullanılabilir (P_{max}: Maksimum yük).

$$f_{flex} = \frac{3P_{max}S}{2B(h-a)^2} \quad (2)$$

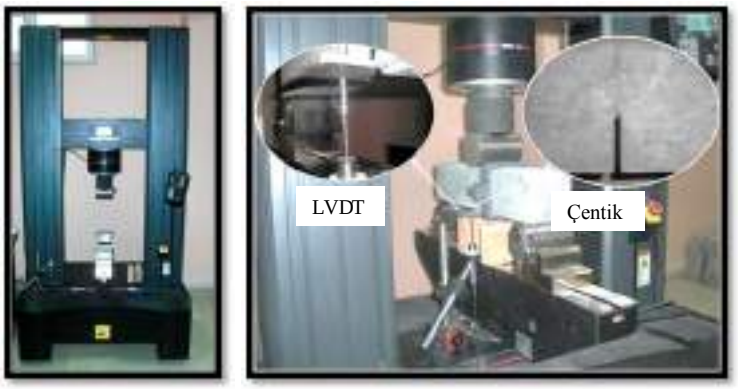
Sünekliği belirlemek için, Fiktif Çatlak Modeli'ndeki karakteristik boy değerinin kullanılabileceği bilinmektedir (Hillerborg ve diğ., 1975). Kırılma süreci bölgesinin boyu olarak tanımlanan karakteristik boy (l_{ch}), elastisite modülü (E), kırılma enerjisi (G_F) ve yarma-çekme dayanımı (f_{st}) büyüklüklerine bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir (Eşitlik 3). Bu çalışmada tek eksenli çekme dayanımı yerine yarma-çekme dayanımı kullanılmıştır.

$$l_{ch} = \frac{EG_F}{f_{st}^2} \quad (3)$$

Yukarıda belirtilen deneysel yöntemlerin yanı sıra kırılma parametrelerin değerlendirmek için KYHB'ların elastisite modülü değerleri, ACI 318'de önerilen eşitlik (Eşitlik 4) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E = 4.15q^{1.5}\sqrt{fc} \quad (4)$$

Burada, q betonun kuru birim hacim ağırlığını (kg/m^3), fc ise silindir (150x300 mm) basınç dayanımını (MPa) göstermektedir.



Şekil 2 Test cihazı ve kiriş numune detayları.

Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

Test edilen beton serilerinin mekanik özelikleri ile kırılma parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. Betonda kullanılan hafif agrega miktarının artması sonucunda basınç dayanımında önemli bir azalma eğilimi görülmektedir. Betonların basınç dayanım değerleri 46,69 ile 87,53 MPa arasında değişmektedir. KYHB'ların basınç dayanımları kontrol betonu ile karşılaştırıldığında MC grubundaki betonlar için %7 ile %24, MF grubundaki betonlar için %12 ile %37, MCF grubundaki betonlar için %11 ile %31 arasında değişen azalmalar oluşmuştur. Hafif agreganın doğal agregaya oranla daha zayıf olması KYHB dayanımındaki azalışın nedeni olarak belirtilmektedir (Gesoğlu ve diğ., 2014).

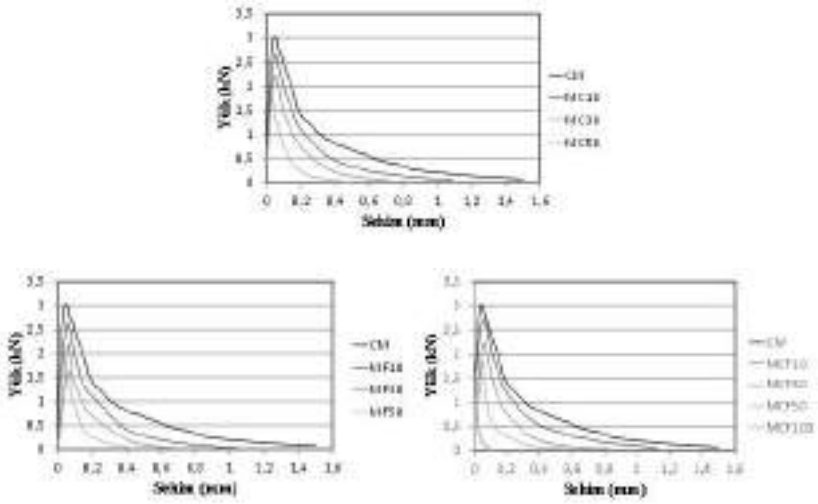
Tablo 2. KYHB'ların 90. Gündeki mekanik özellikleri ve kırılma parametreleri.

Karışım Kodları	f_c , MPa	f_{st}, MPa	E, GPa	f_{flex}, MPa	G_F, N/mm	δ_0, mm	l_{ch}, mm
CM	87,5	4,2	40,1	5,02	189,01	1,500	427,3
MC10	81,6	3,7	35,6	4,48	134,71	1,126	344,3
MC30	73,8	3,3	30,6	3,71	78,01	0,836	215,6
MC50	63,3	3,2	26,1	3,13	39,46	0,596	99,1
MF10	76,8	3,6	34,5	4,38	122,32	1,054	323,5
MF30	66,2	3,1	29,4	3,63	68,30	0,693	202,1
MF50	55,1	2,7	24,5	2,69	34,35	0.409	114,5
MCF10	78,6	3,7	34,9	4,42	121,56	1,088	313,3
MCF30	70,1	3,2	30,0	3,68	75,67	0,713	215,0
MCF50	61,3	2,9	25,6	2,86	37,45	0,490	108,5
MCF100	46,7	2,5	17,7	2,71	8,81	0,115	25,0

Benzer sonuçlar yarma-çekme dayanımı ve elastisite modülü sonuçlarında da gözlenmiştir. Kontrol betonunun yarma -çekme dayanımı 4,21 MPa ve elastisite modülü 40,1 GPa iken, MCF100 betonunda bu değerler, sırasıyla 2,5 MPa ve 17 ,7 GPa olarak ölçülmüştür. Genel olarak yarma-çekme dayanımındaki azalış dikkate alındığında, hafif ince agreganın yarma-çekme dayanımını azaltma etkisinin MF grubundaki betonlarda daha fazla olduğu görülmektedir. MF grubundaki bu azalış, dane çapının küçük

olmasından dolayı kırılmanın hafif ince agrega içinde gelişerek, daha kısa yolla ilerlemesiyle açıklanabilir.
Tablo 2'de görüldüğü üzere, hafif agrega dane çapına bakılmaksızın, artan hafif agrega hacim yüzdesi net eğilme dayanımında azalmalara neden olmuştur. Hafif agreganın dayanımının düşük olması, çimento hamuru-agrega ara yüzeyindeki gerilmeleri artırmıştır. Bunun sonucu olarak, MCF100 betonun net eğilme dayanımı kontrol betonuna kıyasla %46,1 oranında azalmıştır. Bunların dışında, hafif agrega dane çapınının %30 hacimsel yer değiştirme seviyesine kadar net eğilme dayanımı üzerine önemli bir değişime neden olmadığı görülmüştür. Deney sonuçlarına dayanarak, hafif agrega dane çapının net eğilme dayanımı üzerine hacim konsantrasyonu kad ar etkili olmadığı söylenebilir (Akçay and Taşdemir, 2009).

Farklı miktarlarda hafif iri ve/veya ince agrega kullanımının yük-sehim eğrileri üzerindeki etkisi Şekil 3'de görülmektedir. Genel olarak hafif agrega içeren betonların yük-deplasman eğrileri Şekil 3'den görüldüğü üzere lineer artan bir kol şeklinde karakterize edilebilir (Faust, 2007). Kontrol betonuna göre hafif agrega hacim oranı artıkça eğrinin tepe yükünün belirgin bir şekilde düştüğü gözlenmektedir. Benzer şekilde, beton basınç dayanımı azaldıkça son deplasman değerlerinin de azaldığı görülmektedir. Bu da betonların giderek tokluğunun azaldığını belirtir. Bununla birlikte, eğrinin maksimum tepe yükündeki sehim değerinin genellikle hafif agrega yüzdesi artıkça azaldığı gözlenmektedir. Bu durum çatlağın oluştuğu bölgede yeterince doğal agrega olmaması sonucu, çatlağın kolayca hafif agregada oluşmasından kaynaklanmaktadır (Akçay and Taşdemir, 2009). Diğer taraftan hafif agrega miktarının artmasıyla tepe yükünden sonraki eğrinin inen kısmında çalışan toklaşma yoğunluğunun azaldığı görülmektedir.

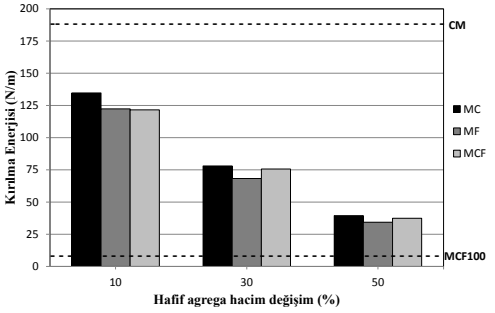


Şekil 3 Hafif agrega dane çapı ve hacim değişim yüzdesinin KYHB'ların yük-sehim eğrisi üzerindeki etkileri.

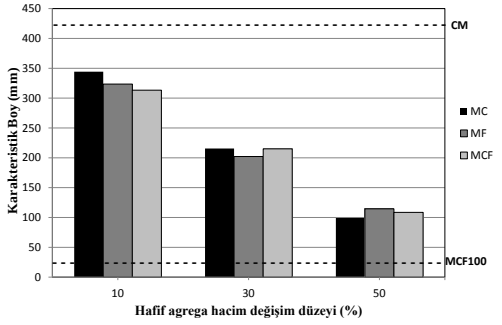
Şekil 4'de sunulduğu gibi eğrilerin altında kalan alan ile hesaplanan kırılma enerjileri dikkate alındığında, kontrol betonu için hesaplanan 189,01 N/m değerinin MCF100 betonu için 8,81 N/m'ye kadar azaldığı görülmektedir. Kontrol betonu ile kıyaslandığında kırılma enerjilerinde azalış MC grubu için %28,7-%79,1, MF grubu

için %35,3-%81,8 ve MCF grubu için %35,7-%80,2 olarak hesaplanmıştır. Diğer test sonuçlarına benzer şekilde, kırılma enerjisinde de en çok azalma MF grubunda gözlenmiştir. Örneğin, MC50, MF50 ve MCF50 betonlarının kırılma enerjileri 39,46 N/m, 34,35 N/m ve 37,45 N/m olarak hesaplanmıştır.

Betonların gevrekliklerini belirlemede kullanılan Fiktif Çatlak Modeli'nde tanımlanan karakteristik boylar her bir beton grubu hesaplanarak Şekil 5'de verilmiştir. Karakteristik boy nominal dayanım, kırılma modu ve çatlak gelişimini kontrol ettiği için çimentolu malzemenin tasarım ve analizinde sünekliği değerlendirmede ve malzemenin mikro-çatlamasının kontrolünde güvenilir olarak kullanılmaktadır (Akçay, 2007). Hafif agrega kullanılmasıyla birlikte KYHB'ların karakteristik boyunun azaldığı görülmektedir. KYHB'da karakteristik boyun azalması, malzemenin daha gevrek hale geldiğini belirtir. Örneğin kontrol betonunun karakteristik boy değeri 427,3 mm iken, bu değer MC30, MF30 ve MCF30 için 215,6 mm, 202,1 mm ve 215,0 mm olarak bulunmuştur. Bunun nedeni, hafif agrega zayıflığı nedeniyle malzemenin gevrekleşerek mikro-çatlakların yerelleşmesinin kısa zamanda olması, hem çatlakların miktarı hem de genişliğinin artması nedeniyle KYHB'ların sehim yapabilme yeteneğinin azalmasıdır.



Şekil 4 Üretilen KYHB'ların kırılma enerjileri.



Şekil 5 Üretilen KYHB'ların karakteristik boy değerleri.

Sonuçlar

Bu çalışmada, soğuk bağlama yöntemiyle üretilen uçucu kül hafif iri ve ince agregalarının KYHB'ların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilmede çekme

dayanımı, kırılma enerjisi ve karakteristik boy gibi özellikleri üzerinde etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen bulgulara dayanarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılabilir:

- Hafif agrega hacim yüzdesinin artmasıyla KYHB'ların mekanik özelikleri ve kırılma parametrelerinde önemli azalışlar olduğu gözlemlenmiştir. İnce hafif agregalı KYHB'ların mekanik özeliklerinin ve kırılma parametrelerinin iri hafif agregalı KYHB'lara kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür.
- Hafif agreganın daha zayıf olması, su emme yüzdesinin fazlalığı ve düşük özgül ağırlığı gibi nedenlerle, tamamen hafif agregadan oluşan MCF100 betonunun basınç dayanımında kontrol betona oranla %46,7 oranında azalma meydana gelmiştir. Benzer şekilde, kontrol betonunun yarma- çekme dayanımı 4,21 MPa ve elastisite modülü 40,1 GPa iken, MCF100 betonunda bu değerler 2,5 MPa ve 17,7 GPa ölçülmüştür.
- MCF100 betonun net eğilme dayanımı kontrol betonuna kıyasla %46,1 oranında azalmıştır. Hafif agrega dane çapınının %30 değişim düzeyine kadar net eğilme dayanımı üzerine önemli bir değişime neden olmadığı görülmüştür. Bu nedenle, hafif agrega dane çapının net eğilme dayanımı üzerine hacim konstrasyonu kadar etkili olma dığı söylenebilir.
- Hafif agrega hacim yüzdesi arttıkça yük-sehim eğrisinin tepe yükünde belirgin bir azalma görülmüştür. Öte yandan, KYHB'larda hafif iri agrega kullanımı hafif ince agregaya kullanımı ile kıyaslandığında maksimum tepe yükünden sonraki eğrinin inen kısmında çalışan toklaşma mekanizması yoğunluğunun hafif iri agrega içeren KYHB'larda kısmen daha fazla olduğu görülmektedir.
- Eğilme deneyinden elde edilen yük-sehim eğrilerin altında kalan alan ile hesaplanan kırılma enerjileri dikkate alındığında, kontrol betona kıyasla MC50'de %79,1, MF50'de %81,8 ve MCF50'de %80,2 oranlarında azalmalar oluşmuştur. Ayrıca, KYHB'larda hafif agrega hacim yüzdesinin artmasıyla karakteristik boy azalmış ve betonlar daha gevrek hale gelmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında, hafif ince agreganın kırılma deneyinde KYHB'ların gevrek bir davranış sergilemesinde hafif iri agregadan daha etkili olduğu görülmüştür.

Kaynaklar

Akçay, B. (2007) Effects of lightweight aggregates on autogenous deformation and fracture of high performance concrete. Ph.D. Thesis, Istanbul Technical University, Turkey.

Akçay, B. and M. A. Taşdemir (2009) Optimization of using lightweight aggregates in mitigating autogenous deformation of concrete. Construction and Building Materials, Vol. 23, pp. 353- 363.

Alyamaç, K.E. ve R. İnce (2007) Farklı Kür Metotlarının Betonun Kırılma Parametreleri Üzerine Etkisi. Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Vol. 19, No. 3 , pp. 347-355.

Chang, T.P. and M. M. Shieh (1996). Fracture properties of lightweight concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 26, pp. 181- 188.

EFNARC (2005) Specification and guidelines for self -compacting concrete . Feb., pp. 29-35. Free pdf copy dow nloadable from http://www.efnarc.org .

Faust, T (1997) Stress Strain Curves of High Strength Lightweight Concrete . LACER , Vol. 2, pp. 103- 108.

Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Özturan, T., Öz, H.Ö. and D.S. Asaad (2014) Permeation characteristics of self compacting concrete made with partially substitution of natural aggregates with rounded lightweight aggregates . Construction and Building Materials , Vol. 59, pp. 1- 9.

Hillerborg , A., Modeer , M. and P.E. Peterson (1976) Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. Cement and Concrete Research, Vol. 6, pp. 773 -782.

İpek, S. (2013) Improving the ductility properties of lightweight concretes by steel fiber addition . MSc Thesis . Gaziantep University, Turkey.

Kim, Y.J., Choi, Y.W. and M. Lachemi (2010) Characteristics of self -consolidating concrete using two types of lightweight coarse aggregates . Construction and Building Materials, Vol. 24, pp. 11-16.

Lydon, F.D. and R.V. Balendran (1980). Some properties of higher strength lightweight concrete under short -term tensile stress . The International Journal of Lightweight Concrete ,Vol. 2, pp. 125-139.

Mazaheripour, H., Ghanbarpour, S., Mirmoradi, S.H. and I. Hosseinpour (2011) The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self - compacting concrete . Construction and Building Materials, V ol. 25, No. 1, pp. 351-358.

RILEM Technical Committee 50 -FMC (1985) Draft Recommendation: Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three -point bend test on notched beams . Materials and Structures , Vol. 18, pp. 287 -291.

Genleştirilmiş Perlit ve Bitlis Yöresi Pomzası İçeren Kendiliğinden Yerleşen Harçların Mekanik Özellikleri

Bilal Balun
Bingöl Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bingöl
Tel:(426)2160012-1772
E-posta: bbalun@bingol.edu.tr

Mehmet Karataş
Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ
Tel:(424)2370000-5433
E-posta: mkaratas@firat.edu.tr

Kendi ağırlığı ile istenilen kesitlere homojen olarak yerleşebilen, yüksek dayanım ve dayanıklılık özelliklerine sahip kendiliğinden yerleşen beton (KYB) gözenekli hafif agregalarla üretildiğinde kendiliğinden yerleşen hafif beton (KYHB) ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmanın amacı kendiliğinden yerleşen harçta (KYH) hafif agrega kullanımının dayanım özelliklerine etkisini araştırmaktır. Harçlar, KYB işlenebilirlik özelliklerinin temelini oluşturmakta ve bu özellikler KYH'ların incelenmesiyle değerlendirilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada harç kullanmak uygun bulunmuştur.

KYH üretiminde, normal agrega olarak 0 -2 mm ve 2-4 mm boyutunda dere agregası, hafif agrega olarak 0 -2 mm boyutunda genleştirilmiş perlit ve 2-4 mm boyutunda Bitlis yöresi pomzası kullanılmıştır. İstenilen özellikte betonların üretilebilmesi için deneme karışımları hazırlanmış, taze harç özellikleri dikkate alınarak karışım dizaynları oluşturulmuştur. Mineral malzeme olarak silis dumanı ve C sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Seriler, içerdiği agrega oranlarına göre 13 farklı şekilde tasarlanmıştır. Taze haldeki KYH'lerin mini çökme yayılma, mini V-hunisi ve viskozimetre deneyleri gerçekleştirilmiştir. KYH'lerin sertleşmiş haldeki özelliklerinin belirlenebilmesi için de yoğunluk, porozite, eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda hafif agregasız serilere göre, pomzasız ve %20'ye kadar genleştirilmiş perlit içeren harç serilerinin eğilme dayanımı, pomzasız ve %30'a kadar genleştirilmiş perlit içeren harç serilerinin de basınç dayanımı daha yüksek çıkmıştır. Artan pomza oranlarıyla birlikte, KYH'nin eğilme ve basınç dayanımlarında düşüşler elde edilmiştir. Üretilen bütün KYH serilerinin, kendiliğinden yerleşen hafif harç (KYHH) olarak kabul edilebileceği ve taşıyıcı hafif harç sınıfına dahil edilebileceği kanaatine ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kendiliğinden yerleşen hafif harç, hafif agrega, mineral katkı, süper akışkanlaştırıcı, taze ve sertleşmiş harç deneyleri

Giriş

İnşaat sektöründe yaygın kullanılan kompozit malzemelerden biri olan normal ağırlıklı agregalarla üretilen betonun, iyi bir taşıyıcı olmasına karşın birim ağırlığı yüksektir. Yapıların normal betonlar yerine hafif betonlar ile inşa edilmesi, yapıların zati yükünü azaltmakta ve deprem sırasında yapıların daha az salınıma maruz kalmasını sağlamaktadır. Böylelikle yapının taşıyıcı eleman kesitleri küçülmekte ve temeller daha ekonomik çözülebilmektedir (Topçu,1997;Al-Khaiat ve Haque,1998) . Aynı zamanda hafif betonların normal betonlara göre; düşük termal genleşme katsayısı ve içerisindeki boşlukların bir sonucu olarak yüksek yangın dayanımı ve ses yalıtımı gibi üstünlükleri vardır (Mouli ve Khelafi, 2008) .

TS EN 206 -1'de (2002) hafif betonlar etüv kurusu durumdaki yoğunluğu, 800 kg/m^3 veya daha büyük olup, 2000 kg/m^3 ü geçmeyen beton olarak tanımlanmaktadır. Hafif betonları üretmek için en sık başvurulan yöntem doğal kaynaklardan veya suni yollardan elde edilen hafif agregalarla beton üretmektir. Doğal kaynaklardan elde edilen hafif agregalar başlıca volkanik kökenli olup, suni agregalar ise bazı ısıl işlemlerin sonucunda elde edilmektedir (Chandra ve Berntsson, 2002) .

Geniş bir kullanım alanı olan ve hafif agrega olarak ta kullanılabilen pomzanın dünya rezervlerinin yaklaşık 1/7'si Türkiye de olmasına karşın bu potansiyel yeterince değerlendirilememektedir. Doğu Anadolu Bölgesi Türkiye'deki pomza taşı rezervlerinin yaklaşık % 56'sına sahiptir en fazla pomza rezervi ise yaklaşık 1,1 milyar m^3 ile Bitlis Tatvan yöresindedir (DPT, 2001) .

1980'lerin sonunda Japonya'da betonun işlenebilirliğini, durabilitesini ve kalitesini arttırmak için bir grup bilim adamı tarafından geliştirilen kendiliğinden yerleşen beton (KYB), kendi ağırlığı altında hiçbir dış etki uygulanmadan (vibrasyon, sarsma vb.) istenilen yere kolayca yerleşebilen ve homojen bir şekilde yayılabilen, bu özelliğini sağlarken segregasyon ve terleme gibi problemler yaratmayarak kohezyonunu koruyabilen özel bir beton türüdür (Ozawa ve diğ. 1989;Okamura ve Ouchi,2003; Barbhuiya,2011) .

Klasik beton tasarımından farklı olarak KYB'de; kimyasal katkılar, akışkanlaştırıcılar ve puzolanik mineral katkıların tümünün veya bir kısmının kullanılması ihtiyacı doğmaktadır. Bu malzemelerin seçimi ve beton tasarımına uygun olarak kullanılmasına yönelik yeni deney yöntemleri ve dolayısıyla standartlar geliştirilmektedir (Karatas ve diğ. 2010). Bu çalışmada, EFNARC (2002) tarafından yayınlanan standarttan yararlanılmıştır. EFNARC 'a göre kendiliğinden yerleşen betonun işlenebilirliği; bulunduğu hacmi boşluksuz doldurma yeteneği, akma oranıyla belirlenen uygun viskozite, dar kesitlerden geçme kabiliyeti ve ayrışma direnci ile sağlanabilmektedir.

KYB'lerde yüksek akışkanlığın sağlanabilmesi için yaygın olarak kullanılan yöntem, iri agrega miktarının sınırlandırılması ve uygun özelikte harç kullanılmasıdır. Ayrıca ince madde oranının da arttırılması gereklidir. Bu amaçla 0.125 mm'den daha küçük taneli olan; uçucu kül, taş unu (kireçtaşı tozu), cüruf (öğütülmüş) ve silis dumanı gibi mineral katkılar kullanılabilir (Bonavetti ve diğ. 2003; Bosilijkov, 2003). Böylelikle mineral katkıların çimento yerine ikame yöntemiyle kullanılması; çevrenin ve doğal kaynakların korunmasına yardımcı olmakta, enerjiden tasarruf sağlamaktadır.

Hafif betonlarda kullanılan agregaların yoğunluğunun düşük olmasından dolayı betonun dayanımı ve işlenebilirliği düşer, betonda ayrışma meydana gelebilir. Kendiliğinden yerleşen hafif betonun uygun dayanım ve dayanıklılık özellikleri ve segregasyona direnci sayesinde, hafif betonların bahsedilen sorunlarının giderilmesinde uygun bir alternatif olduğu söylenebilir.

KYB, geleneksel betona göre daha az iri agrega içerdiğinden (hacimce %30) harç karakteristikleri baskındır ve harçta deney yapmak daha kolaydır (Jin ve Domone, 2002). Harçlar KYB'nin işlenebilirlik özelliklerinin temelini oluşturmakta ve bu özellikler kendiliğinden yerleşen harçların (KYH) incelenmesiyle değerlendirilmektedir.

Deneysel Çalışma

Bu çalışmada genleştirilmiş perlit ve pomza gibi hafif agregalar kullanılarak üretilen mineral katk ılı KYH'lerin taze ve sertleşmiş harç özellikleri incelenmiştir. Çalışmada akışkanlaştırıcı kimyasal katkı ve iki farklı mineral katkı kullanılmıştır. KYH'nin taze haldeki özelliklerini belirlemek için EFNARC tarafından önerilen mini çökme-yayılma ve mini V hunisi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca harçların viskoziteleri de saptanmıştır. Mini çökme yayılma değerlerine göre agrega tipi ve miktarlarında değişiklikler yapılarak karışımlar hazırlanmıştır. KYH'le rın sertleşmiş haldeki özelliklerinin ölçülmesi için 3 noktalı eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sertleşmiş harç numunelerinin yoğunluğu ve porozitesi hesaplanmıştır.

Malzeme Özellikleri

Deneysel çalışmada Elazığ Altınova Çimento Sanayii Tic. A.Ş.'den temin edilen CEM I 42,5 N tipi portland çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. İnce toz malzeme (<0,125 mm) miktarına da katkı sağlamak amacıyla Soma Termik Santrali'ne ait C sınıfı uçucu kül (UK) ve Eti Elektro Met alurji A.Ş.'den temin edilen silis dumanı (SD) karışıma mineral katkı olarak katılmıştır. Kullanılan çimento ve toz malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1 Çimento ve toz malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Kimyasal Bileşim (%)	PÇ	UK	SD
SiO_2	21,12	42,14	81,4
Al_2O_3	5,62	19,38	4,47
Fe_2O_3	3,24	4,64	1,4
CaO	62,94	26,96	0,82
MgO	2,73	1,78	1,48
SO_3	2,3	2,43	1,35
Na_2O	-	-	-
K_2O	-	1,13	-
CI	-	0,001	-
Kızdırma Kaybı	1,78	-	1,84
Fiziksel Özellikler			
Özgül Ağırlık(g/cm^3)	3,1	2,2	2,2
Özgül Yüzey(cm^2/g)	3370	2900	144000

Deneylerde 0 -2 mm elek aralığında dere agregası ve genleştirilmiş perlit, 2-4 mm elek aralığında dere agregası ve pomza kullanılmıştır. Dere agregası Elazığ Murat nehrinden temin edilmiştir ve agreganın doygun kuru yüzey özgül ağırlığı 2,63 gr/cm^3, su emmesi %1,96'dır. Asidik pomza agregası, Bitlis Tatvan yöresinden elde edilmiş olup, özgül ağırlığı 0,8 gr/cm^3 ve su emmesi %29'dur. Genleştirilmiş perlit Konya Persa Perlit'ten temin edilmiştir ve özgül ağırlığı 0,055 gr/cm^3, su emmesi %26,7'dir. Deneysel çalışmalarda kimyasal katkı olarak, 1,06 gr/cm^3 yoğunluğa sahip Sika Hi-Tech 36 modifiye polikarboksilat esaslı polimer yapılı süper akışkanlaştırıcı (SA) tüm karışımlarda 8 kg/m^3 oranında kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların tamamında TS EN 1008'e (2009) uygun Elazığ ili şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

Karışım Oranları

Çalışmada, çimento ve mineral katkı miktarı, maksimum tane çapı, süper akışkanlaştırıcı miktarı sabit tutulurken, kullanılacak ince agrega oranları değişken parametre olarak alınmıştır (Tablo 2). Bütün harç serilerinde çimento ile birlikte literatürün önerdiği oranda uçucu kül (%20) ve silis dumanı (%10) kullanılmıştır. Harç serilerinde 0 -2 mm tane aralığında genleştirilmiş perlit ve kum, 2-4 mm tane aralığında pomza ve kum kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı miktarı 8 kg/m^3, toplam toz içeriği ise yapılan ön işlenebilirlik deneyleri sonucunda 650 kg/m^3 olarak sabitlenmiştir. Karışım suyu miktarı, çökme yayılma çapını, EFNARC'ta önerilen mini çökme-yayılma deneyinden faydalanılarak, 240–260 mm arasında tutacak şekilde ayarlanmıştır. Tüm karışımlarda su/toz oranı (ağırlıkça) 0,31~0,34 civarında tutulmuştur. TS 802 (2009) standardına uygun hacim esasına göre hesaplanan harçlar, ASTM C 305 'e (2002) uygun bir mikser kullanılarak hazırlanmıştır.

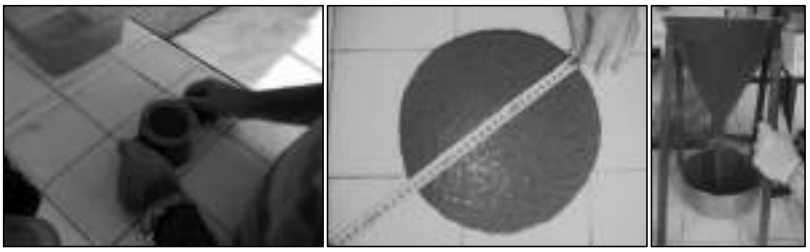
Çalışmada hafif agrega içeren ve içermeyen olmak üzere toplam 13 adet KYH karışımı üretilmiştir. Karışımlar agrega içeriklerine göre isimlendirilmiştir. Örnek olarak GP1-P6 karışımı; sırasıyla 0-2 mm tane aralığında %10 genleştirilmiş perlit, 2-4 mm tane aralığında %60 pomza kullanıldığını göstermektedir.

Tablo 2 KYH Karışım oranları.

Karışım	Miktar (kg/m^3)								%	
	PÇ	UK	SD	Su	Kum	GP	P	SA	Su/Toz (ağırlıkça)	Su/Toz (hacimce)
GP0 -P0	455	130	65	255,40	1229,64	0	0	8	0,34	1,11
GP0 -P10	455	130	65	228,06	597,72	0	181,82	8	0,31	0,99
GP1 -P0	455	130	65	249,44	1184,40	1,30	0	8	0,34	1,09
GP1 -P2	455	130	65	240,89	1059,72	1,30	37,92	8	0,33	1,05
GP1 -P6	455	130	65	230,95	799,27	1,29	112,21	8	0,31	1,01
GP1 -P8	455	130	65	229,81	666,89	1,27	147,53	8	0,31	1,00
GP2 -P0	455	130	65	236,69	1152,83	2,68	0	8	0,33	1,03
GP2 -P3	455	130	65	244,47	922,22	2,57	56,11	8	0,34	1,07
GP2 -P4	455	130	65	240,25	860,74	2,57	74,81	8	0,33	1,05
GP2 -P10	455	130	65	229,73	478,18	2,50	181,82	8	0,32	1,00
GP3 -P0	455	130	65	237,59	1088,78	4,02	0	8	0,33	1,04
GP3 -P6	455	130	65	239,82	666,90	3,80	110,65	8	0,34	1,05
GP3 -P10	455	130	65	230,57	418,41	3,75	181,82	8	0,33	1,01

Taze Harç Deneyleri

KYH serilerinin taze özelliklerinin belirlenebilmesi için EFNARC tarafından tanımlanan Şekil 1'deki mini çökme-yayılma ve mini V-hunisi deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1 Mini çökme-yayılma ve mini V-hunisi testi.

Mini çökme-yayılma deneyinden elde edilen sonuçlardan yararlanarak EFNARC tarafından verilen denklem (i) yardımı ile bağıl çökme-yayılma değeri hesaplanmıştır.

$$\Gamma_m = \left[\frac{d}{d_o}\right]^2 - 1 \qquad \text{(i)}$$

Burada, d test sonucu elde edilen ortalama son çap, d_o mini çökme-yayılma konisinin alt çapıdır (100 mm). EFNARC 'a göre, harçların kendiliğinden yerleşebilme kriterlerinden çökme yayılma değeri 240-260 mm arasında olmalıdır. Mini V-hunisi deneyinden elde edilen akış süreleri kullanılarak EFNARC'ta verilen aşağıdaki denklem (ii) ile bağıl huni hızları hesaplanır.

$$R_m = \frac{10}{t} \qquad \text{(ii)}$$

Ayrıca harçların viskozite ölçümleri Brookfield DV-E model bir cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Harçların viskozitesi 1, 2.5, 5, 10, 20, 50 ve 100 devir/dk açısal hızlarda ve karıştırma işleminden hemen sonra ölçülmüştür. Böylece, her bir KYH karışımı için farklı açısal hızlardaki viskozite değerleri (cP) elde edilmiş ve viskozite-açısal hız grafiği çizilmiştir.

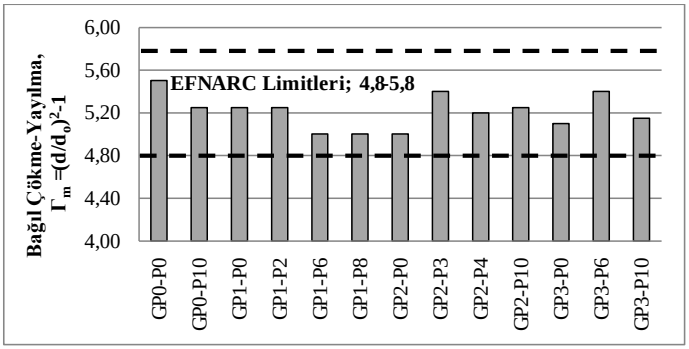
Taze harç deneyleri tamamlandıktan sonra KYH, herhangi bir sıkıştırma veya sarsma işlemi yapılmaksızın 40×40×160 mm prizmatik ve 50 mm küp kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıba sıkıştırma işlemi yapılmaksızın yerleştirilen harçlar 48 saat boyunca üzeri koruma altına alınmış olan kalıplarda bekletilmişlerdir. 48 saat sonra kalıptan çıkartılan harç numunelerinin, 20±2ºC sıcaklıktaki kirece doygun su içerisinde deney gününe kadar kür işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Sertleşmiş Harç Deneyleri

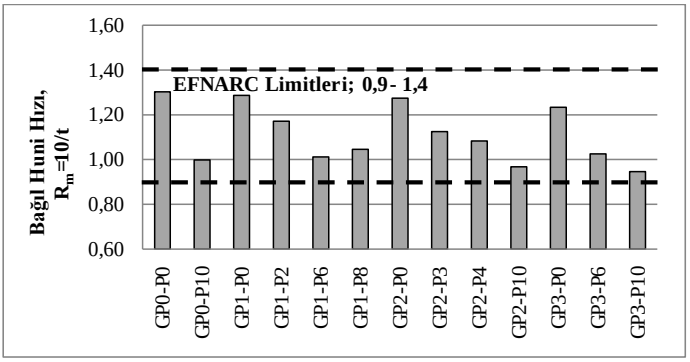
40×40×160 mm prizmatik KYH numuneleri 3, 28 ve 90 günlük kür sürelerin sonunda ASTM C 348 (2002) ve ASTM C 349 (2002)'de öngörüldüğü şekilde üç noktalı eğilme ve basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Her seriden 3'er adet numune üzerinde önce eğilmede çekme dayanımı sonra da basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 28 günlük 50 mm küp numunelerin birim hacim ağırlıkları ve poroziteleri hesaplanmıştır.

Deney Sonuçlarının İrdelenmesi

Şekil 2 ve 3'te verilen bağıl çökme-yayılma bağıl V-hunisi hızı grafikleri incelendiğinde, bütün serilerin EFNARC tarafından verilen referans değerler arasında kaldığı görülmektedir.



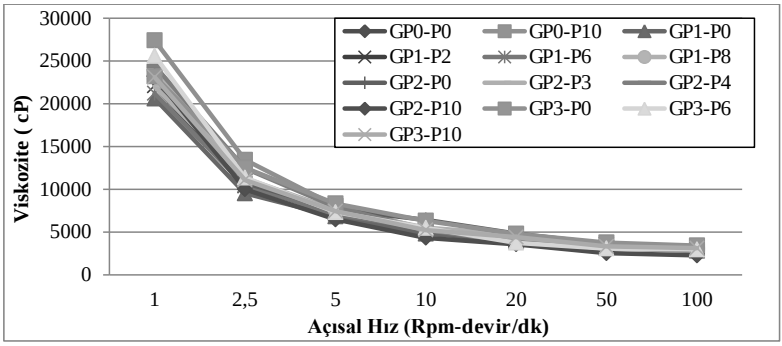
Şekil 2 Bağıl çökme-yayılma grafiği.



Şekil 3 Bağıl V-hunisi hızı grafiği.

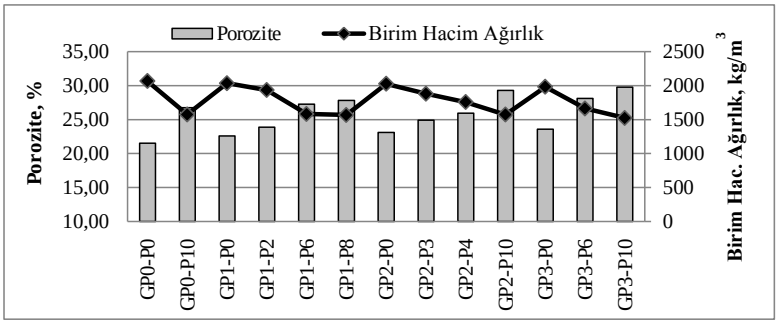
Beton içerisindeki malzeme parametreleri betonun kendiliğinden yerleşebilirlik özelliklerini değiştirebilmektedir. Hafif agrega kullanılan beton ve harçlarda ayrışma problemleri görülebilmektedir. Yapılan çalışmada akıcılık süper akışkanlaştırıcılar yardımı ile sağlanırken betonun kararlılığı ise ince malzeme miktarı yüksek tutularak gerçekleştirilmiştir.

Taze harçların işlenebilirlik ve kıvam açısından değerlendirilmesi için ayrıca viskozimetre deneyi yapılmıştır. Bütün harçlarda dönel ucun açısal hızının artmasıyla viskozite azalmış ve viskozite eğrileri X eksenine doğru asimptotik bir yaklaşım göstermiştir. Şekil 4'teki grafik incelendiğinde kullanılan serilerin viskozite değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Taze harç deneylerinden sonra, hafif agregalı ve hafif agregasız bütün serilerin kendiliğinden yerleşen harç özellikleri gösterdiği gözlenmiştir.



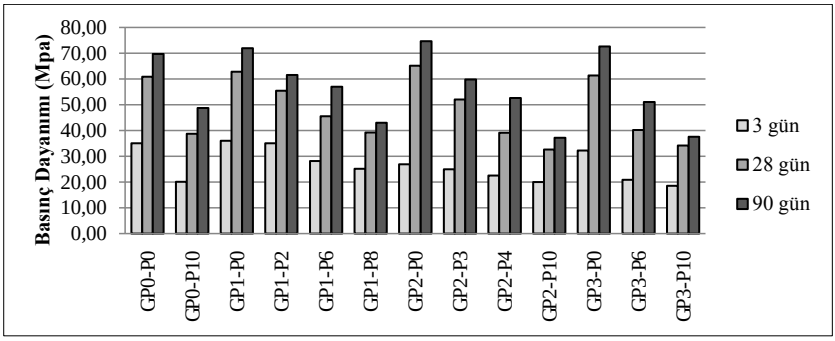
Şekil 4 Viskozimetre değişimleri.

KYH numunelerin porozite değerleri, birim hacim ağırlık değerleriyle ters orantılı olarak değişmektedir (Şekil 5). En az porozite değeri GP0-P0 serisinde, en yüksek porozite değeri de GP3-P10 serisinde elde edilmiştir. Genleştirilmiş perlit ve pomza kullanılan bütün numunelerin porozite değerleri, hafif agrega kullanılmayan numuneye göre daha fazladır. Dolayısıyla genleştirilmiş perlit ve pomza kullanımı harçların birim ağırlıklarını düşürmekte ve porozi telerini arttırmaktadır.

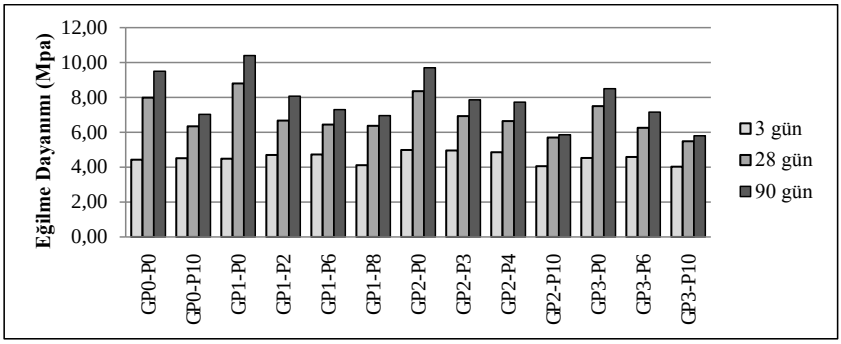


Şekil 5 KYH'lerin porozite ve birim hacim ağırlık değişimleri.

40×40×160 mm prizmatik KYH numunelerinin 3, 28 ve 90 günlük üç noktalı eğilme deneyinden elde edilen eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri Şekil 6 ve 7'de verilmiştir.



Şekil 6 KYH karışımlarının basınç dayanımları.

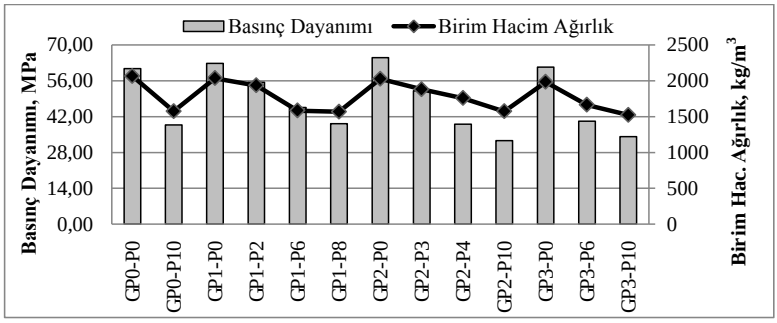


Şekil 7 KYH karışımlarının eğilmede çekme dayanımları.

Yapılan deneysel çalışmalar, KYH numunelerinin basınç ve eğilmede çekme dayanımlarının agrega özelliklerine göre değiştiğini göstermektedir. Genel olarak birim ağırlık düştükçe ve porozite arttıkça eğilmede çekme ve basınç dayanımı düşmektedir. Ancak tüm kür sürelerinde %10 genleştirilmiş perlit ikameli GP1-P0 ve %20 genleştirilmiş perlit ikameli GP2-P0 serileri, bütün seriler içerisinde en fazla eğilmede çekme dayanımına ulaşmışlardır. GP3-P0 serisi sadece 3 günlük kür süresinde yani erken yaşta kontrol harcına göre daha yüksek eğilme dayanımı göstermiştir.

Şekil 6'daki KYH'lerin basınç dayanımı grafiği incelendiğinde, 3 günlük kür süresi sonunda en yüksek basınç dayanımı 36.0 MPa değeriyle GP1-P0 serisine, en düşük basınç dayanımı ise 18.5 MPa değeriyle GP3-P10 serisine aittir. 28. ve 90. günlerde, pomzanın kullanılmadığı ve %30'a kadar genleştirilmiş perlit katkılı serilerin basınç dayanımlarının hafif agrega kullanılmayan seriye göre fazla olduğu görülmektedir. 28 ve 90 günlük kür periyotlarında en yüksek basınç dayanımları sırasıyla 65.1 ve 74.6 MPa değerleriyle GP2-P0 serisinde ve en düşük basınç dayanımları sırasıyla 32.6 ve 37.2 MPa değerleriyle GP2-P10 serisinde elde edilmiştir.

KYH numunelerinin birim hacim ağırlıkları ve 28 günlük basınç dayanımları Şekil 8'de verilmiştir



Şekil 8 KYH'lerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanımları arasındaki ilişki.

TS EN 206 -1'e (2002) göre yaklaşık olarak bütün numuneler hafif beton standardına uymaktadır. TS 2511 (1977), taşıyıcı hafif betonu birim kütlesi 1900 kg/m^3 'den küçük ve 28 günlük basınç dayanımı da 16 MPa'dan büyük beton olarak tanımlamaktadır. Elde edilen bütün serilere ait birim hacim ağırlıkları yaklaşık olarak 2000 kg/m^3 ve altı,

28 günlük en düşük dayanımın da 34.2 MPa olduğu göz önünde bulundurulursa üretilen bütün serilerin kendiliğinden yerleşen hafif harç (KYHH) olarak kabul edilebileceği ve taşıyıcı hafif harç sınıfına dahil edilebileceği söylenebilir.

Sonuçlar

Genleştirilmiş perlit ve pomza kullanımı harçların kendiliğinden yerleşebilirlik özelliklerini değiştirmemiş ve serilerin viskozite değerleri birbirlerine yakın çıkmıştır.

KYHH'de yüksek akıcılık, akışkanlaştırıcı kimyasal katkılar yardımı ile betonun ayrışma direnci ise ince malzeme miktarı yüksek tutularak gerçekleştirilmiştir.

Genleştirilmiş perlit ve pomza kullanımındaki artış, harç numunelerin in boşluk oranının artmasına, birim hacim ağırlıklarının da azalmasına sebep olmuştur.

KYHH numunelerinin basınç ve eğilmede çekme dayanımları agrega özelliklerine göre değişmiştir. Genel olarak birim ağırlık düştükçe ve porozite arttıkça eğilmede çekme dayanımı düşmektedir. Ancak tüm kür sürelerinde, pomzasız ve %20'ye kadar genleştirilmiş perlitli harçların eğilmede çekme dayanımları, hafif agrega kullanılmayan harçlara göre daha yüksek elde edilmiştir.

KYHH'lerin basınç dayanımları incelendiğinde, pomzanın kullanılmadığı ve %30'a kadar genleştirilmiş perlitli harçların basınç dayanımlarının hafif agrega kullanılmayan harçlara göre fazla olduğu görülmektedir.

Elde edilen bütün serilerin birim hacim ağırlıkları yaklaşık olarak 2000 kg/m^3 ve altı, 28 günlük en düşük dayanımın da 34.2 MPa olduğu göz önünde bulundurulursa üretilen bütün serilerin kendiliğinden yerleşen hafif harç (KYHH) olarak kabul edilebileceği ve taşıyıcı hafif harç sınıfına dahil edilebileceği söylenebilir.

Kaynaklar

Al-Khaiat,H., Haque, M.N., (1998) Effect of initial curing on early strength and physical properties of lightweight concrete. Cement and Concret Research , Vol. 28, No. 6, pp. 859 -866.

ASTM C305 , (2002) Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency .

ASTM C348, (2002) Standard test method for flexural strength of hydraulic cement mortars .

ASTM C349 (2002) Standard test method for compressive strength of hydraulic -cement mortars .

Bonavetti V., Donza H., Menendez G., Ca brera O., Irassar E.F., (2003) Limestone filler cement in low w/c concrete: A rational use of energ, Cement and Concrete Research , Vol. 33, pp. 865- 871.

Barbhuiya S. (2011) Effects of fly ash and dolomite powder on the powder on the properties of self -compacting concrete. Construction and Building Materials, Vol. 25, pp. 3301-3305

Bosiljkov V. B., (2003) SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 1279 -1286.

Chandra, S., & Berntsson L., (2002) Lightweight Aggregate Concrete. Noyes Publications, New York, USA.

DPT (2001) Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeler III Çalışma Grubu Raporu. Sekizinci Bes Yillik Kalkinma Plani, Ankara.

EFNARC, (2002) Specifications and Guidel ines for Self-Compacting Concrete. http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCC.PDF

Jin, J., Domone, P.L., (2002) Relationships between the fresh properties of SCC and its mortar component, First North American Conference on the Design and Use of Self -Consolidat ing Concrete. Center for Advanced Cement -based Materials, North Western Unive rsity, Chicago, USA, pp. 33 – 38.

Karatas, M., Turk, K., Acikge nc, M. and Ulucan, Z.C., (2010) Effect Of Elazig Region Waste Brick Powder On Strength And Viscosity Properties Of Self Compacting Mortar. 9th International Congress on Advances in Civil Engineering, pp. 128.

Moul i M, Khelafi H. (2008) Performance characteristics of lightweight aggregate concrete containing pozzolan. Building and Environment, Vol. 43, pp. 31–6.

Okamura H, Ouchi M. (2003) Self-compacting concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 5 -15.

Ozawa, K., Maekawa, K., Kunis hima, M. and Okamura, H. (1989) High performance concrete based on the durability design of concrete struct ures. The proceeding of EASEC-2, Chiang Mai, pp. 445 -450.

Topcu, I.B. (1997) Semi-lightweight concretes produced by volcanic slags. Cement and Concret Research, Vol, 27, pp. 15 –21

TS EN 206 -1, (2002) Beton - Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk

TS 802, (2009) Beton Karışımı Hesap Esasları.

TS EN 1008, (2003) Beton - Karma suyu -Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları

TS 2511, (1977). Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları.

Ham Perlit Agregası ve Yüksek Hacimde Perlit Tozu İçeren Kendiliğinden Yerleşen Yüksek Performanslı Hafif Beton

İnş. Yük. Müh. Hasan Eser
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, K1/110D, Ankara, Türkiye
Tel: (312) 210 5497
e-posta: heser@metu.edu.tr

Doç. Dr. Lutfullah Turanlı
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, K1/232, Ankara, Türkiye
Tel: (312) 210 2429
e-posta: turanli@metu.edu.tr

Özet

Son yıllarda gittikçe artan yakıt fiyatlarıyla birlikte, çimento ve yapay hafif agrega üretim maliyetlerinin artması, hafif beton üretiminde puzolan ve doğal hafif agregaların kullanılmasına yönelik ilgiyi artırmıştır. Türkiye'nin dünya perlit rezervinin büyük bir kısmına sahip olduğu düşünüldüğünde bu kaynağın iyi değerlendirilmesi, gerek ekonomik gerekse sürdürülebilir çevre açısından büyük önem taşımaktadır. Perlit ham haliyle hafif agrega olarak kullanılabildiği gibi, öğütülerek toz haline getirildiğinde, puzolan olarak da kullanılabilmektedir. Ancak, son yıllarda artmakla beraber, bu konudaki çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Bu çalışmada, sadece ham perlit agregası ve yüksek hacimde perlit tozu kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen yüksek performanslı hafif betonun basınç dayanımı, yarma çekme dayanımı, elastisite modülü gibi bazı mekanik özellikleri ile klor geçirgenliği, asit ve sülfata karşı dayanıklılığı gibi bazı kalıcılık özellikleri, benzer dayanımdaki normal ağırlıklı betonla kıyaslamalı olarak incelenmektedir.

Çalışma sonucu, perlit agregası ve perlit tozu kullanılarak, işlenebilirliği yüksek, 28. gün dayanımı 50 MPa'yı aşan ve çok düşük klor geçirgenliğine sahip taşıyıcı hafif beton üretilebileceğini ortaya koymuştur. Çalışmada bununla beraber, perlit tozunun puzolanik aktivite indeksi, bir yıl süresince, ağırlıkça yerdeğiştirme yüzdeleri için incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: perlit, puzolan, kendiliğinden yerleşen beton, yüksek performanslı beton

Giriş

Yüksek performanslı beton, geniş tanımıyla, bir veya birden fazla özelliği ile sıradan betonlardan üstün olan betonları tanımlamak için kullanılır. Bu özellikler; yüksek işlenebilirlik, yüksek dayanım, yüksek elastisite modülü, düşük geçirgenlik, yüksek kalıcılık ve hacim stabilitesi gibi performans özelliklerini içerir. Bu özelliklerin ortak noktası ise genelde düşük su-bağlayıcı oranına (sıklıkla 0.45 ve altı) sahip beton karışımlarıyla elde edilebilmeleridir. Bu sebeptendir ki, bazı araştırmacılar yüksek performanslı betonu "düşük su-bağlayıcı oranına sahip ve optimize agrega-bağlayıcı oranıyla hacim stabilitesi kontrol altına alınmış, yeterince kür görmüş beton" olarak tanımlamaktadırlar (Aitcin, 2008, s. 333).

Yüksek performanslı betonun geniş tanımını göz önüne alırsak, yüksek dayanımlı betonlar, kendiliğinden yerleşen betonlar ve hafif betonlar yüksek performanslı beton sınıfının içinde adlandırılabilirler. Aynı şekilde, tüm bu özellikleri (yüksek işlenebilirlik, yüksek dayanım ve düşük birim ağırlık) birleştiren kendiliğinden yerleşen yüksek dayanımlı hafif beton da yüksek performanslı betondur.

Taşıyıcı hafif betonlar genellikle yapay agregalar kullanılarak üretilir ve yüksek dayanım değerlerine ulaşabilmek için normal ağırlıklı betonlara göre daha fazla bağlayıcı miktarına ihtiyaç duyarlar. Son yıllarda artan yakıt fiyatları, üretim aşamasında fırınlarda yakılarak üretilen çimentonun ve yapay agregaların üretim maliyetini de etkilemiştir. Dolayısıyla, üretim maliyetlerini düşürme arayışı, hafif betonların üretiminde puzolanların ve doğal agregaların kullanımına yönelik ilgiyi artırmıştır. Günümüzde artmakla beraber, yapay agregalarla kıyaslandığında doğal hafif agregaların hafif beton üretiminde kullanımına ilişkin araştırmalar oldukça azdır. Kendiliğinden yerleşen hafif betonlar üzerindeki araştırmalar ise çok daha kısıtlıdır. Aşağıda bu çalışmaların bir kısmına değinilmiştir.

Yanai ve diğ. (1999), genleştirilmiş perlit ve uçucu kül agregası içeren kendiliğinden yerleşen hafif betonlar üzerinde yaptığı çalışma sonucunda yüksek yoğunluklu hafif agrega kullanımının betonun agrega ve çimento hamuru fazları arasındaki yoğunluk farkını azaltarak taze betonun akma ve doldurma özelliklerini geliştirdiğini belirtmişlerdir. Müller ve Haist (2004), genleştirilmiş kil agregası kullanarak ürettikleri kendiliğinden yerleşen hafif betonlar üzerinde yaptıkları benzer bir çalışma sonucunda, agrega ve çimento hamuru fazları arasındaki yoğunluk farkını azaltmanın kendiliğinden yerleşmeyi sağlamak için yeterli olmayacağını bunun için betonun akma direncinin ve plastik viskozitesinin , akıcılığı ve hava kabarcıklarının tahliyesini sağlayacak kadar düşük fakat segregasyonu engelleyecek kadar yüksek olması gerektiğinin altını çizmişlerdir. Hwang ve Hung (2005), beton içindeki agrega, çimento ve puzolanların birbirine oranlarını düzenleyerek bu malzemelerin arasındaki boşlukları en aza indirmeyi sağlayan yeni bir karışım tasarımı algoritması geliştirmiş ve kendiliğinden yerleşen hafif betonun klor geçirgenliği ve elektriksel direnci gibi bazı fiziksel özelliklerini geliştirmeye çalışmışlardır. Lo ve diğ. (2007), kendiliğinden yerleşme özelliğine sahip hafif ve normal ağırlıklı betonların işlenebilirlik ve mekanik özellikleri karşılaştırmış ve çalışmaları sonucunda, 550 kg/m^3'ten daha fazla oranlarda bağlayıcı kullanmanın kendiliğinden yerleşen betonların doldurma ve geçiş özelliklerini artırmakta etkili olmadığını sadece akışkanlığını artırdığını belirtmişlerdir. Kim ve diğ. (2010), normal ağırlıklı kaba agregaların hafif agregalarla değişiminin kendiliğinden yerleşen betonların taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri üzerine etkisini incelemiş,

Yanai ve diğ. (1999) yaptığı çalışma sonuçlarına paralel bir şekilde, kullanılan hafif agreganın yoğunluğu arttıkça kendiliğinden yerleşen betonun akışkanlığının arttığını ancak bununla beraber segregasyon riskinin de arttığını ortaya koymuşur.

Bu bildiriye konu olan çalışmada ise, sadece ham perlit agregası ve yüksek hacimde (50%) perlit tozu kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen yüksek performanslı hafif betonun basınç dayanımı, yarma çekme dayanımı, elastisite modülü gibi bazı mekanik özellikleri ile klor geçirgenliği, asit ve sülfata karşı dayanıklılığı gibi bazı kalıcılık özellikleri, benzer dayanımdaki normal ağırlıklı betonla kıyaslamalı olarak incelenmektedir .

Deney Programı

Malzemeler

Portland Çimentosu

Bu çalışmada CEM I 42.5R tipi portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentonun kimyasal kompozisyonu ve diğer özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Puzolan

Yaklaşık olarak %80'i 45µm'lik elekten geçecek şekilde laboratuvar tipi değirmende öğütülerek toz haline getirilmiş perlit, puzolan olarak kullanılmıştır. Perlit tozunun kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Buna ek olarak Şekil 1,2 ve 3 de sırasıyla XRD analizi, tanecik boyutu d ağılımı ve dayanım aktivite endeksi verilmiştir.

Ham Perlit Agregası (PA)

Kendiliğinden yerleşen yüksek performanslı hafif betonda sadece doğal perlit agregası kullanılmıştır. Bu agreganın fiziksel özellikleri Tablo 3'de değişik boyut aralıkları için verilmiştir. Üretimde kullanılan kombine perlit agregasının tane boyut u dağılımı Şekil 4'de gösterilmiştir.

Kireçtaşı Agregası (KA)

Normal ağırlıklı betonda sadece kireçtaşı agregası kullanılmıştır. Bu agreganın fiziksel özellikleri Tablo 3'de değişik boyut aralıkları için verilmiştir. Üretimde kullanılan kombine kireçtaşı agregasının tane boyutu dağılımı eğrisi Şekil 4'de gösterilmiştir.

Süperakışkanlaştırıcı

Bir tür modifiye polikarboksilat esaslı polimer süperakışkanlaştırıcı, her iki beton karışımında da bağlayıcının kütlece %0.4'ü oranında kullanılmıştır.

Tablo 1: Kullanılan portland çimentosunun özellikleri.

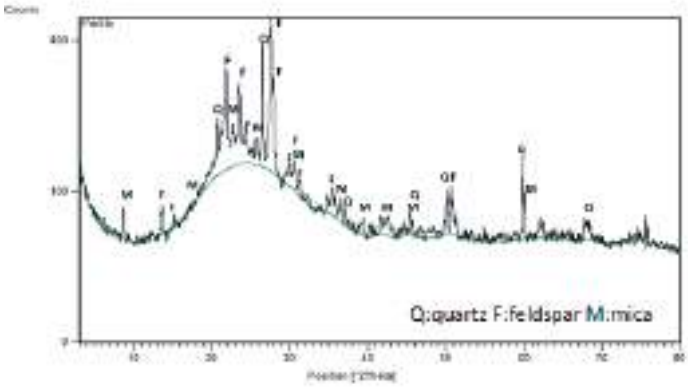
CEM I 42.5 R tipi Portland Çimentosu	
Kimyasal Bileşimi*, %	
CaO	63.91
SiO_2	20.23
Al_2O_3	5.15
Fe_2O_3	3.22
MgO	1.40
SO_3	2.81
K_2O	0.57
Na_2O	0.15
Cl^-	0.001
LOI	2.45
IR	0.25
Fiziksel Özellikleri*	
Özgül Ağırlık	3.16
Blaine İnceliği, cm^2/g	3443
Priz Başlangıcı, dk.	120
Priz Sona Erme , dk.	175
Basınç Dayanımı** (MPa)	
3-gün	32.9
7-gün	44.8
28-gün	57.0

*Limak Çimento - Ankara .
** Numuneler ASTM C109 'a göre hazırlanmış ve test edilmiştir.

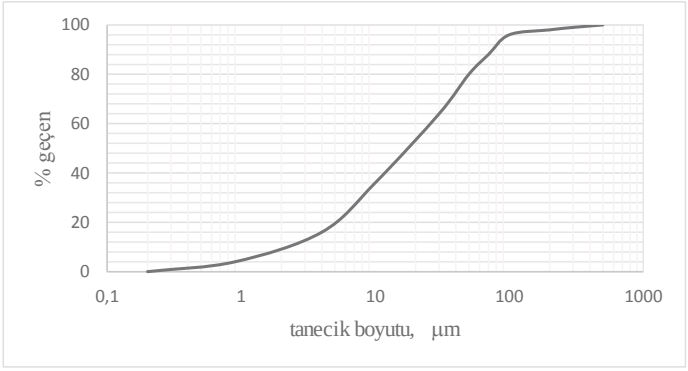
Tablo 2: Perlit tozunun özellikleri.

Perlit Tozu	
Kimyasal Kompozisyonu *, %	
SiO_2	70.96
Al_2O_3	13.40
Fe_2O_3	1.16
MgO	0.28
CaO	1.72
Na_2O	3.20
K_2O	4.65
LOI	3.27
Fiziksel Özellikleri	
Özgül Ağırlık	2.38
Blaine İnceliği, cm^2/g	4267
45µm'dan geçen, %	82
Dayanım Aktivite Endeksi**, %	
7-gün	85.5
28-gün	91.3

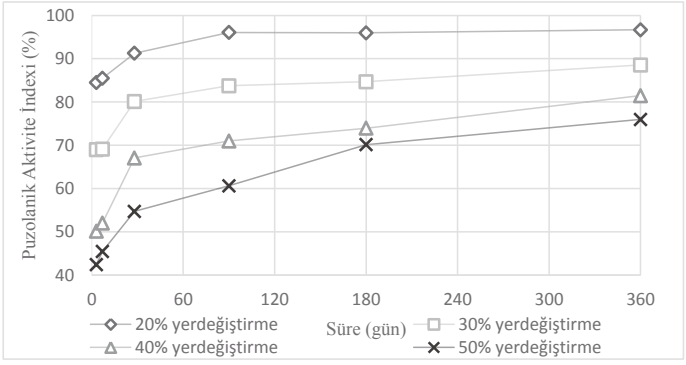
* Aşık (2006).
** Dayanım aktivite endeksi ASTM C311 'ye göre belirlenmiştir.



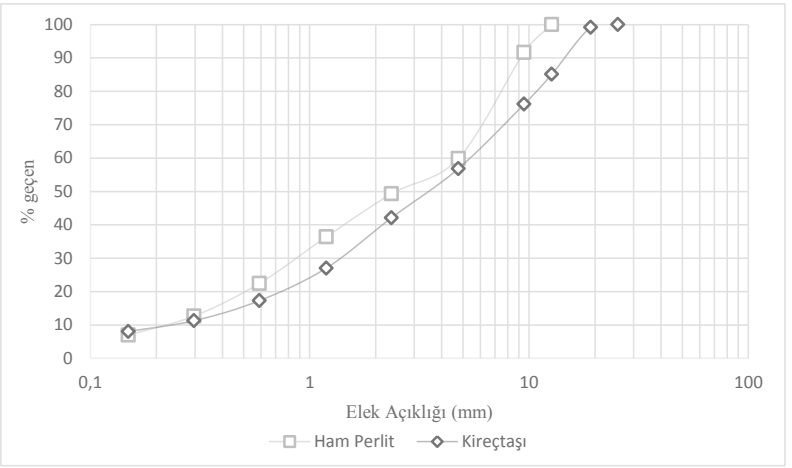
Şekil 1: Perlit tozunun XRD analizi (Sassani, 2014).



Şekil 2: Perlit tozunun tanecik boyutu dağılımı.



Şekil 3: Perlit tozunun puzolanik aktivite indeksinin zamana ve ağırlıkça yerdeğiştirme yüzdesine göre değişimi.



Şekil 4: Kullanılan agregaların tane boyutu dağılımı.

Tablo 3: Kullanılan agregaların özellikleri.

Agrega Çeşidi	Ham Perlit			Kireçtaşı		
Agrega Boyutu (mm)	0-4	4-8	8-12	0-5	5-15	15-25
Kuru Birim -Ağırlık* (kg/m^3)	1322	1025	1002	1880	1549	1534
Fırın Kurusu Özgül Ağırlık	1.99	1.89	1.93	2.59	2.67	2.71
Doygun Yüzey Kuru Özgül Ağırlık	2.15	2.00	2.04	2.65	2.69	2.72
Su emme kapasitesi ** (%)	7.79	6.14	5.59	2.27	0.53	0.33
No.200 Elekten geçen (%)	8.75	-	-	0-5	5-15	15-25
Los Angeles Aşınması (%)	-	49.7		-	26	

*Ham perlit agregası için gevşek, kireçtaşı için sıkıştırılmış birim ağırlıktır.
**Ham perlit agregası için 72, kireçtaşı için 24 saatlik değerdir.

Beton Karışımları

Bu çalışmada yüksek dayanımlı kendiliğinden yerleşen hafif beton (KYHB) ve benzer dayanımdaki normal ağırlıklı betonun(NB) bazı mekanik ve kalıcılık özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. Bu betonların karışım oranları her iki tip betonun 28.gün dayanımı 50 MPa'ya ulaşacak şekilde belirlenmiştir. KYHB ayrıca, fırın kurusu birim ağırlığı EN 206-1'de hafif betonlar için belirtilen 2000 kg/m^3 sınırının altında kalacak şekilde tasarlanmıştır. Bu betonların karışım oranlarına ve taze özelliklerine Tablo 4'de yer verilmiştir.

Tablo 4: Betonların karışım oranları ve taze özellikleri.

Karışım Oranları (kg/m^3)		
Beton Tipi	KYHB	NB
Çimento	274	308
Puzolan (Perlit Tozu)	274	-
Su	127	140
0-4 mm PA / 0-5 mm KA (DYK)	749/0	0/1135
4-8 mm PA / 5-15 mm KA (DYK)	335/0	0/450
8-12 mm PA / 15-25 mm KA (DYK)	267/0	0/391
Süperakışkanlaştırıcı	2.19	1.23
s/b	0.23	0.45
Teorik Taze Birim Ağırlık (kg/m^3)	2029	2425
Taze Betonun Özellikleri		
Ölçülen Taze Birim Ağırlık (kg/m^3)	1950	2373
Hava Oranı (%)	2.2	2.2
Çökme (cm)	-	9
Çökme Yayılması (cm)	77	-
Çökme Yayılma Sınıfı	SF3	-
Görsel Stabilite Endeksi (VSI)	1-Stabil	-
T_{500} (sn)	≤ 2	-
Vizkozite Sınıfı	VF1	-
Priz Alma Süreleri		
İlk Priz (sa:dk)	4:00	4:30
Son Priz (sa:dk)	7:00	7:30

Deney Yöntemleri

Betonların taze özellikleri karıştırma işleminden hemen sonra test edilmiştir. Beton numuneleri, boyutları 200x100mm olan silindirik kalıplar kullanılarak alınmıştır. Dökümden 24 saat sonra kalıplardan alınan numuneler test gününe kadar 23±2°C'de kür havuzunda bekletilmiştir. Beton numunelerin basınç dayanımı, yarma çekme dayanımı, elastisite modülleri ve klor geçirgenlik deneyleri sırasıyla ASTM C39, ASTM C496, ASTM C469, ASTM C1202'ye göre gerçekleştirilmiştir. Numunelerin sülfat etkisine karşı dayanıklılığını ölçmek için 0.352 M magnezyum sülfat çözeltisi hazırlanmıştır. Bu molarite değeri ASTM C1012'den alınmıştır. Asit etkisine karşı dayanıklılığı belirlemek için ise pH değeri 1.0 olacak şekilde sülfürik asit çözeltisi (yaklaşık 1%'lik) hazırlanmıştır. Deney süresince çözelti hacminin numune hacmine oranı 2.0 olarak sabit tutulmuş ve çözeltiler ilk beş ay boyunca ayda bir kez, daha sonra 8. ayda bir kez daha olmak üzere yenilenmiştir. Bu çözeltilerde, 28.günden itibaren oda sıcaklığında bekletilen numunelerin 1 yıl süreyle belirli aralıklarla basınç dayanımları test edilmiştir ve numunelerin yüzeyinde oluşan hasar görsel olarak incelemiştir.

Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Mekanik Özellikler

Betonların basınç dayanımı, yarma çekme dayanımı ve elastisite modülü değerlerine Tablo 5'de yer verilmiştir. KYHB, perlit tozunun puzolanik özellikleri sayesinde basınç dayanımını bir yıl süresince artırırken, NB'nin basınç dayanımındaki artış 56. gün itibariyle yavaşlamıştır. Yarma çekme dayanımları incelendiğinde KYHB'de 28. ve 90. günler arasında kaydadeğer bir artış gözlenmemektedir. Bunun sebebi, zayıf perlit agregasının parçacık dayanımının betonun çekme dayanımını sınırlaması olabilir. Elastisite modüllerine bakıldığında, KYHB'nin elastisite modülünün NB'ninkinin yaklaşık %60'ı kadar olduğu görülmektedir. Bunun sebebi perlit agregasının rijiditesinin kireçtaşına oranla oldukça düşük olmasıyla açıklanabilir.

Tablo 5: Betonların Mekanik Özellikleri.

Basınç Dayanımı (MPa)		
Yaş (gün)	KYHB	NB
7	36.9	49.7
28	50.9	54.9
56	52.6	57.3
90	55.8	57.6
120	59.4	57.9
180	64.6	59.5
270	66.9	62.7
390	70.4	63.0
Yarma Çekme Dayanımı (MPa)		
Yaş (gün)	KYHB	NB
28	4.2	4.3
90	4.3	5.2
Elastisite Modülü (GPa)		
Yaş (gün)	KYHB	NB
28	26.0	44.9
90	25.9	42.5

Kalıcılık Özellikleri

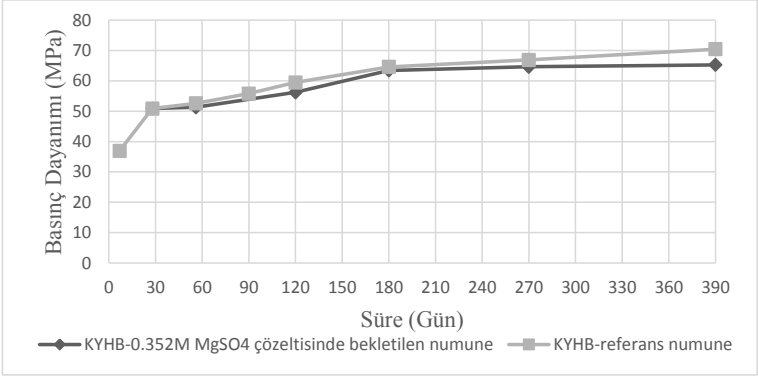
Klor geçirgenliği

Tablo 6'da verilen değerlerde açıkça görüldüğü gibi KYHB'nin klor geçirgenliği NB'ye oranla oldukça düşüktür. Bunun başlıca sebepleri arasında, KYHB'nin düşük s/b oranı, yüksek bağlayıcı oranı, içerdiği perlit tozunun puzolanik aktivesi ve en büyük agrega boyutunun NB'ye oranla daha küçük olması sıralanabilir.

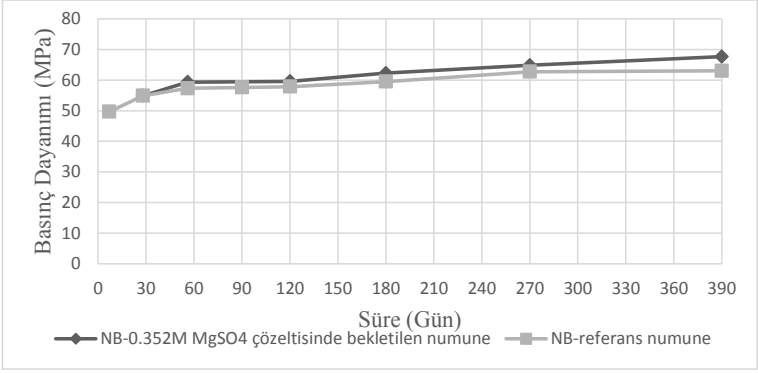
Tablo 6: Betonların klor geçirgenlikleri (ASTM C1202).

Yaş (gün)	KYHB		NB	
28	800 C	Çok Düşük	3696 C	Orta
90	271 C	Çok Düşük	3054 C	Orta

Şekil 6 ve 7'de numunelerin basınç dayanımının sülfat etkisi altında değişimi incelenmiştir. Bu grafiklerde, referans numune ve sülfat etkisi altındaki numunelerin basınç dayanımları arasında kaydadeğer bir fark olmadığı görülmektedir. Bu durumda her iki numuneninde düşük s/b oranlarına sahip olması etkilidir. Şekil 8'de numune yüzeylerindeki hasar incelendiğinde, KYHB'nin NB'ye oranla sülfat saldırısından daha çok etkilendiği söylenebilir.



Şekil 6: KYHB'nin sülfat etkisiyle dayanımının zamana bağlı değişimi.



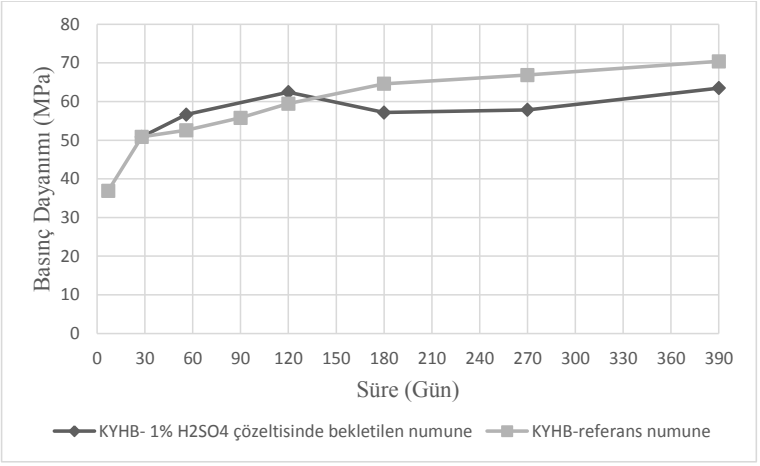
Şekil 7: NB'nin sülfat etkisiyle dayanımının zamana bağlı değişimi.



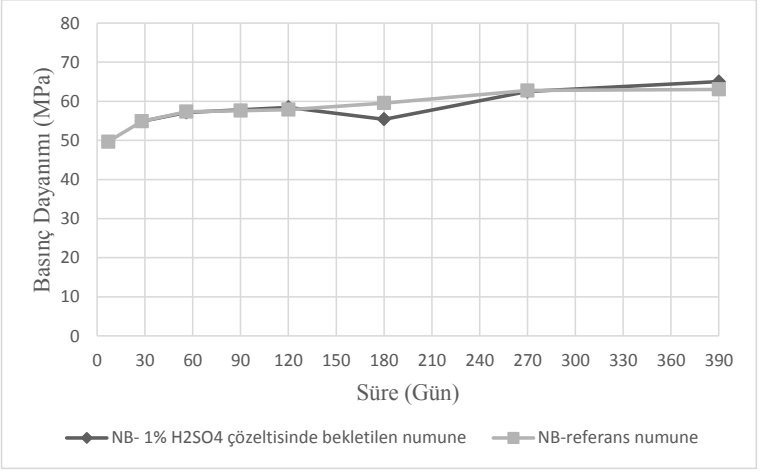
Şekil 8: Sülfat etkisiyle KYHB(solda) ve NB(sağda) numunelerinin yüzeyinde oluşan hasar .

Asit Etkisine Karşı Dayanıklılık

Şekil 9 ve 10'da numunelerin basınç dayanımının asit etkisi altında değişimi incelenmiştir. Bu grafiklerde, referans numune ve asit etkisi altındaki numunelerin basınç dayanımları arasında 6. aya kadar önemli bir fark olma dığı görülmektedir. KYHB numunelerinin 6. aydan sonra, asit etkisiyle dayanımlarındaki artışın referans numunelere göre azaldığı görülmektedir. Şekil 11'de numune yüzeylerindeki hasar incelendiğinde, KYHB'nin NB'ye oranla asit saldırısından çok daha fazla etkilendiği açıkça görülmektedir. KYHB numunelerinin yüzeyindeki aşınma sonucu oluşan zayıf kabuk, betonun kesit alanını daraltmış ve sonuç olarak betonun basınç dayanımını düşürmüştür.



Şekil 9: Kendiliğinden yerleşen hafif betonun asit etkisiyle dayanımının zamana bağlı değişimi.



Şekil 10: Normal betonun asit etkisiyle dayanımının zamana bağlı değişimi.



Şekil 11: Asit etkisiyle KYHB(üstte) ve NB(altta) numunelerinin yüzeyinde oluşan hasar.

Sonuç

1. Doğal perlit agregası ve perlit tozu kullanılarak 28. gün basınç dayanımı 50 MPa'yı aşan, klor geçirgenliği çok düşük, kendiliğinden yerleşen hafif beton üretilebileceği belirlenmiştir.

2. Doğal perlit agregalı ve perlit tozlu hafif betonların kireçtaşı kullanılarak üretilmiş benzer dayanımdaki normal betonlara göre asit ve sülfat saldırısından daha çok etkilendiği gözlenmiştir.

Referanslar

Aitcin, P.-C. (2008). Binders for Durable and Sustainable Concrete. New York: Taylor & Francis.

Aşık, M. (2006). Structural Lightweight Concrete with Natural Perlite Aggregate and Perlite Powder. M.Sc. Thesis. Middle East Technical University, Ankara.

Hwang, C.-L., & Hung, M.-F. (2005). Durability design and performance of self-consolidating lightweight concrete. Construction and Building Materials, Vol. 19, pp. 619-626.

Kim, Y. J., Choi, Y. W., & Lachemi, M. (2010). Characteristics of self-consolidating concrete using two types of lightweight coarse aggregates. Construction and Building Materials, Vol. 24, pp. 11-16.

Lo, T. Y., Tang, P. W., Cui, H. Z., & Nadeem, A. (2007). Comparison of workability and mechanical properties of self -compacting lightweight concrete and normal self -compacting concrete. Materials Research Innovations , Vol. 11, pp. 45-50.

Müller, S. H. & Haist, M. (2004). Properties of structural lightweight concrete. Betonwerk und Fertigteil -Technik , Vol. 12, pp. 8-17.

Sassani, A. (2014). A Multi -Scale Approach to Characterization of Volcanic Natural Pozzolans . M.Sc. Thesis . Middle East Technical University, Ankara .

Yanai, S., Sakata, N., Nobuta, Y., & Okamoto T. (1999). Study on mix proportion for self-compacting high performance lightweight aggregate concrete. In International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete , 18-22 June 2000. Norwegian Concrete Association, pp. 705-716.

Pomza Agregasına Polimer Kaplamasının Hafif Betonun Mühendislik Özelliklerine Etkisi

Alper BİDECİ, Özlem SALLI BİDECİ
Düzce Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 81620, Düzce
Tel: (380) 542 12 64
E-Posta: ozlembideci@duzce.edu.tr , alperbideci@duzce.edu.tr

Hasan YILDIRIM
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul
Tel: (212) 285 37 58
E-Posta: hasanyildirim@itu.edu.tr

Sabit OYMAEL
Arel Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 34537, İstanbul
Tel: (212) 867 25 00
E-Posta: sabitoymael@arel.edu.tr

Serkan SUBAŞI
Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce
Tel: (380) 542 12 33
E-Posta: serkansubasi@duzce.edu.tr

Öz

Yapay bir malzeme olan betonarmenin olumlu özelliklerini sürdürebilmesi kalıcı olmasına bağlıdır. Betonun durabilitesinin gözenek yapısı özellikleriyle ilgili olduğu genel bir kabuldür. Betonun geçirgenliği, gözenek miktarı ve gözenekler arasındaki bağlantı ile doğrudan ilişkilidir. Betonun geçirimsizliği, hem kendisinden beklenen işlevi yerine getirmesi, hem de zaman içinde dış etkilere karşı dayanıklılığı açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, gözenekli yapıya sahip olan betonun su emme ve işlenebilirliğini olumsuz yönde etkileyen pomza agregasının beton içerisindeki performansını iyileştirmek amacıyla, hidrofobik olan ve güçlü aderans özelliklere sahip üç farklı polimerle (SNMC, KBP, PLP) kaplanması söz konusudur. Elde edilen polimer kaplı agregalarla 300, 400 ve 500 dozlu beton serileri üretilerek, numunelere birim ağırlık, basınç dayanımı ve su emme deneyleri uygulanmıştır. Çalışma sonucunda; kaplanmamış agrega ile üretilen kontrol numuneleri yle kaplanmış agregalarla elde edilen beton numunelerin su emme oranları, en yüksek 500 doz SNMC numunelerinde ve en düşük 400 doz PLP numunelerinden elde edilmiştir. Kontrol numuneleri ile kıyaslandığında, agregaları kaplayan polimerin agregaya su geçişini engellemesi,

polimer kaplı agregalarla üretilen beton numunelerinde su emme oranının diğer numunelere göre azaldığı görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Polimer Kaplama, Pomza, Hafif Beton, Su Emme

Giriş

Türkiye, pomza rezervleri açısından oldukça önemli bir potansiyele sahiptir. Araştırılmış alanlarda yaklaşık 3 milyar m^3 pomza rezervi olduğu tahmin edilmektedir. Pomza rezervlerinin İç Anadolu ve Doğu Anadolu bölgelerinde yoğunlaşmış olmasına karşılık, Akdeniz ve Ege bölgelerinde de pomza rezervlerine rastlanılmakta ve üretim faaliyetleri görülmektedir. Dünya pomza rezervleri bakımından önemli bir yere sahip olan Türkiye, 10'a varan renk ve doku kalitesine sahip pomza çeşitleri ile oldukça yüksek dış pazar şansına sahiptir (Gündüz, 1998 ve DPT, 2001).

Doğal hafif agrega, meydana gelişleri sırasında gözenekli bir yapı kazanmış bulunan tüf, bims, sünger taşı, lav cürufu, diatomit vb. kırılmış veya kırılmamış agregalar olarak nitelendirilmiştir (Gündüz, 2005). Pomza, volkanik faaliyetler sonucu oluşan, gözenekli, hafif bir kayaç türüdür. Volkanik faaliyetler neticesinde iki tür pomza oluşumu gelişir. Bunlar asidik ve bazik pomzadır. Diğer bir deyişle bazik pomzaya bazaltik pomza veya scoria da denilmektedir. Bazaltik pomza koyu renkli, kahverengimsi siyahımsı olabilmektedir (DPT, 2001).

TS 3234 standardına göre pomza, birbirine bağlantısız, boşluklu sünger görünümlü silikat esaslı, birim hacim ağırlığı genellikle 1.0 g/cm^3'ten küçük, sertliği Mohs skalasına göre yaklaşık 6 olan ve camsı doku gösteren volkanik bir madde olarak tanımlanmıştır. Kimyasal bileşiminde %75'e varan silisyum dioksit içeriği bulunabilmektedir. Malzemenin kimyasal bileşiminde genel olarak %45 - %75 SiO_2, %13 - %21 Al_2O_3, %1 - %7 Fe_2O_3, %1 - %11 CaO, %7 - %9 Na_2O - K_2O, eser miktarda TiO_2 ve SO_3 ve %1 - %3 kızdırma kaybı değerleri bulunmaktadır (Gündüz, 2005).

İnsan hayatının vazgeçilmez temel maddelerinin ana yapı taşları polimerlerdir. İpek, yün ve selüloz gibi doğal polimerlerin yanı sıra polyester, naylon, teflon ve sentetik kauçuk gibi sayısız türde yapay polimer bilinmektedir (Savran, 2001). Tabii ve sentetik olarak elde edilen polimerler uzun zincirler ve uzun zincirli moleküler yapısından dolayı kuvvetli bağ yapan ve kolayca işlenebilir özelliğe sahiptir. Petrol ürünü olan sentetik polimerler plastik madde üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Oymael, 1991).

Hafif beton, normal betona göre bazı farklı özellikleri bulunan genellikle boşluklu, daha düşük birim ağırlığa ve dayanıma, yüksek ısı yalıtımı özelliklerine sahip olan, bununla birlikte normal betonda aynı amaçlarla kullanılabilen betondur (Neville, 1993). "Hafif betonlar, yapısal hafif yoğunluktaki agregalarla yapılan, 28 günlük basınç mukavemetleri 15 –17 MPa ve 28 günlük kuru birim hacim ağırlığı 1850 kg/m^3 geçmeyen betonlar olarak tanımlanırlar (Mindess, 1981).

Bal, 1998, bazı polimerlerin harçlarda kullanılabilirliğini araştırdığı çalışmada, altı adet polimer malzemesinin portland çimentosu ile yapılan harç numunelerinde %0, %2, %5, %10 ve %15 oranlarında katkı maddesi kullanılarak basınç dayanımlarını incelemiştir. Sonuçta, basınç dayanımlarının VAC 205 polimer malzemesi hariç diğer tüm malzemelerin %2'lik karışımlarında bir hayli yüksek çıktığını tespit etmiş, katkı miktarının arttırılması ile basınç dayanımlarında azalmalar meydana geldiğini belirlemiştir.

Rossignolo ve Agnessini, 2002, polimer ile modifiye edilmiş hafif betonların (iki çeşit) Brezilya hafif agregalarına polimer olarak stiren-butadien lateks (SBR) ilave edilerek mekanik özellikleri üzerine yaptıkları çalışmada, elde edilen betonların 7 günlük basınç dayanımlarının 39.7-51.9 MPa arasında değiştiğini, çalışmanın sonucunda Brezilya hafif agregalarına SBR modifiye edilerek ince prefabrik komponent malzeme üretilebileceğini tespit etmişlerdir.

Deneysel çalışmalara dayalı olarak yapılan bu araştırmada, gözenekli yapıya sahip pomza agregasının beton üretiminde su emme ve işlenebilirliği olumsuz yönde etkileyen performansını iyileştirmek amacıyla, endüstride çok yönlü olarak kullanılan üç farklı polimerle (Sonomeric1: SNMC, KB Pur 214: KBP ve Polipol3455: PLP) kaplanarak , 300, 400 ve 500 dozlu hafif beton numuneler üretilmiştir. Üretilen beton numunelerin birim ağırlıkları, basınç dayanımları ve su emme özellikleri ilgili standartlara göre araştırılmıştır.

Materyal ve Metod

Materyal

Polimer: Araştırmada agregaların kaplanmasında üç çeşit polimer kullanılmıştır. Söz konusu polimerlerin çalışmada kullanılan kodları ve özellikleri aşağıda belirtilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Polimerler ve özellikleri

Özellikleri	Polimerlerin Kodları		
	SNMC	KBP	PLP
Malzemenin Yapısı	Bitüm Modifiye Poliüretan	Bitüm Modifiye Poliüretan	Bitüm Modifiye Poliester
Renk	Siyah	-	Max.100 Hazen
Çekme Dayanımı	(ASTM D 412) 1.70 N/mm^2	(7 gün DIN 53 504) 5.0 N/mm^2	(ISO 0527) 6.6 N/mm^2
Kopmada Uzama	(ASTM D 412) %1200	(7 gün DIN 53 504) > %200	(ISO 0178) %5.94
Servis Sıcaklığı	-40 °C+80°C	-30 °C+80°C	-
Yoğunluk	-	1.45 g/cm^3	1.125 g/cm^3
Kuruma Süresi	-	12 – 24 Saat	-

Agrega: Araştırmada, Bintaş Yapı Elemanları San. ve Tic. A.Ş'ye ait ocaktan alınan pomza agregası, Kırklareli Limak Trakya Çimento Fabrikası'nda TS EN 197-1'e uygun olarak üretilen CEM I 42.5/R çimentosu, agregaların birbirine yapışmaması, birbirinden ayrılmasını sağlamak ve agreganın yüzeyinde pürüz oluşturmak amacıyla agrega ağırlığının %10'u kadar piyasadan elde edilen mermer tozu kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Malzemelerin kimyasal analizi (%)

Kim. Bileşim	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	K.Kaybı
Pomza	64.06	15.08	3.85	2.82	1.35	3.49	4.46	0.03	4.70
CEM I 42,5/R	19.49	5.08	2.54	63.76	1.18	0.74	0.26	3.13	3.82
Mermer Tozu	-	-	0.02	31.16	23.31	0.01	0.51	-	44.89

Rapor : Kırklareli Limak Trakya Çimento Fabrikası Kimya Laboratuarı, 06.05.2010.

Çimento: Araştırmada Kırklareli Limak Trakya Çimento Fabrikası'nın TS EN 197-1'e uygun olarak üretilen CEM I 42.5 R çimentosu kullanılmıştır. Çimentoya ait kimyasal ve fiziksel analiz, ilgili standart sınır değerleri ile birlikte Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. CEM I 42.5/R çimentosunun fiziksel ve kimyasal analizi

Bileşen (%)	CEM I 42.5R	TS EN 197-1	Fiziksel Analiz			TS EN 197-1
CaO	63.92	C+S≥%50	**Priz Süresi (Dk.)**	**Başlama**	145	min. 60
SiO_2	19.55			**Bitiş**	195	-
Al_2O_3	5.12	-	**Yoğunluk (g/cm^3)**		3.11	-
Fe_2O_3	2.52	-	**Özgül Yüzey (cm^2/g)**		3912	-
MgO	1.02	Lim.≤%5	**Toplam Hacim Genleşmesi (mm)**		1	max.10
SO_3	2.96	Lim.≤%4	**40µ Elek Üzeri Kalıntı**		23.1	-
Na_2O	0.27	-	**90µ Elek Üzeri Kalıntı**		2.4	-
K_2O	0.67	-	**Basınç Dayanımı (N/mm^2)**	**2 Gün**	25.9	min. 20
Cl-	0.0089	Lim.≤%0.10		**7 Gün**	45.1	-
Kız. Kaybı	4.08	Lim.≤%5		**28 Gün**	-	min. 42.5 max. 62.5
Çöz. Kalıntı	0.36	Lim.≤%5				

Mermer tozu: Piyasadan elde edil miştir.

Su: Araştırmada Kırklareli şehir içme suyu şebekesinden temin edilen TS EN 1008 standardına uygun su kullanılmıştır.

Metod

Beton Karışım Dizaynı

Çalışmada kaplanmış ve kaplanmamış hafif agregalarla beton üretiminde karışımların çökme değerleri sabit tutul arak 300, 400 ve 500 dozlu numune serileri hazırlanmıştır. Beton karışım dizaynı Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Beton karışım dizaynı

Bileşenler (kg)		Karışım Miktarları											
		300 Doz				400 Doz				500 Doz			
		Kontrol	SNMC	KBP	PLP	Kontrol	SNMC	KBP	PLP	Kontrol	SNMC	KBP	PLP
Elek Aralığı (mm)	**8 - 16**	96	373	363	363	87	338	329	415	78	302	294	294
	4 - 8	202	224	281	187	183	203	254	214	164	181	228	151
	0 - 4	737	408	436	571	667	369	394	516	600	330	353	462
Su		575	400	400	360	580	350	450	400	500	350	390	385
Çimento		300	300	300	300	400	400	400	400	500	500	500	500

Taze Beton Birim Ağırlık Deneyi

TS EN 12350-6 standardına göre taze beton; üç tabaka halinde ölçü kabına yerleştirilerek, her tabakada 25'er kez şişlenerek sıkıştırılmıştır. Ölçme kabı üzerindeki fazla beton, sıyırma levhası ile düzeltilerek dolu kap tartılmıştır. Brüt ağırlıktan kabın dara ağırlığı çıkarılarak, ölçü kabının hacmine bölünmesi ile taze betonun birim ağırlığı belirlenmiştir.

Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyi, TS EN 12390–3 "Sertleşmiş beton numunelerinde basınç dayanımı tayini" standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Her bir deney serisi için 3, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda kırılmak üzere 100x100x100 mm boyutlarında toplam 108 adet küp numune hazırlanmıştır. Deneyde 3000 kN yükleme kapasiteli, dijital kumanda üniteli ve yükleme hızı ayarlanabilen tek eksenli beton basınç test cihazı kullanılmıştır.

Su Emme Oranı

Betonun emebileceği su miktarı, betonun içerisindeki boşlukların toplam hacmiyle ilgilidir. Betondaki toplam boşluk hacmi ise betonda kullanılan su/çimento oranı, agrega cinsi, kür koşulları, kür süresi, karbonatlaşma, beton elemanın boyutu gibi birçok faktör tarafından etkilenmektedir (Erdoğan, 2007). Beton karışım hesabında hafif agregaların su emme oranlarının bilinmesi hesaplamada kullanılması açısından oldukça önemlidir. Su emme deneyi, 28 gün standart su küründe bekletilen numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kürden çıkarılan numunelerin yüzeyindeki serbest su silinerek temizlenerek suya doygun su kütlesi kaydedilmiştir. Numuneler 105 ± 2 ºC sıcaklıktaki hava dolaşımlı etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Numuneler tartılarak kuru ağırlık değeri saptanmıştır. Etüv kurusu ağırlığı saptanan numuneler 21±2 ºC sıcaklıktaki su içine batırılarak sabit bekletilmiştir. Sudan çıkarılan numunelerin yüzeylerinin ıslaklığı bir havlu ile silinerek tartılmış, doygun kuru yüzeyli numune ağırlığı belirlenmiştir. Su emme oranı, doygun kuru yüzey ağırlığı ile etüv kurusu ağırlığının farkının etüv kurusu ağırlığına bölünerek yüzde olarak bulunmuştur. Su emme deneyi için her bir deney serisinden üçer adet olmak üzere toplam 36 adet 100x100x100 mm küp numuneler üretilmiştir.

Bulgular ve Tartışma

Birim Ağırlık

Kaplanmış agregalarla üretilen hafif beton karışımları üzerinde gerçekleştirilen taze beton birim ağırlık deney sonuçları Tablo 4'te verilmiştir.
Hafif beton numunelerin birim ağırlıkları, 300 doz kontrol numunelerine göre; 400 dozda %7 ve 500 dozda %15 artmıştır. Dozajlara göre üretilen taze betonların birim ağırlıkları karşılaştırıldığında, 300 doz kontrol numunelerine göre; SNMC, KBP ve PLP numunelerinin birim ağırlıkları %22, %23 ve %15, 400 doz kontrol numunelerine göre; SNMC, KBP ve PLP numunelerinin birim ağırlıkları %8, %20, %15 ve 500 doz kontrol numunelerine göre; SNMC, KBP ve PLP numunelerinin birim ağırlıkları ise %18, %23 ve %14 artmıştır. Birim ağırlık değerleri incelendiğinde, polimer kaplanmış ve

kaplanmamış agregalardan elde edilen beton numunelerin taze beton birim ağırlık değerleri 974 ile 1376 kg/m³ arasında değişmektedir.

Tablo 4. Üretilen taze betonların birim ağırlık deney sonuçları

Karışımlar		Birim Ağırlık (kg/m³)
300 DOZ	Kontrol	974
	SNMC	1192
	KBP	1196
	PLP	1120
400 DOZ	Kontrol	1038
	SNMC	1122
	KBP	1248
	PLP	1193
500 DOZ	Kontrol	1116
	SNMC	1314
	KBP	1376
	PLP	1268

Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 5'te ve grafiksel gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 5. Beton numunelerin basınç dayanımları

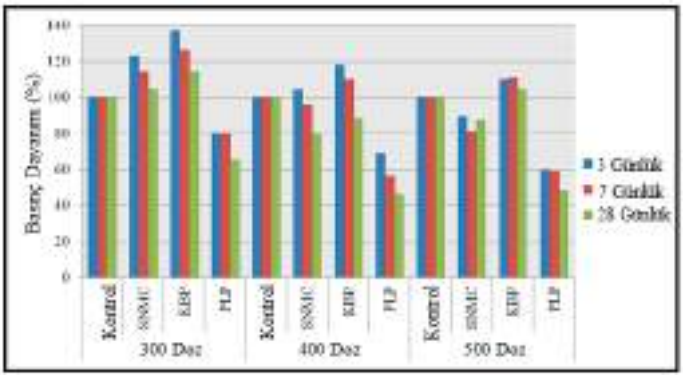
Karışımlar		Basınç Dayanımları					
		3 Günlük		7 Günlük		28 Günlük	
		MPa	%	MPa	%	MPa	%
300 DOZ	Kontrol	3.4	100	4.9	100	8.2	100
	SNMC	4.2	123	5.5	114	8.5	104
	KBP	4.7	137	6.1	126	9.4	114
	PLP	2.7	80	3.9	80	5.3	65
400 DOZ	Kontrol	5.3	100	6.8	100	11.9	100
	SNMC	5.5	104	6.5	96	9.4	79
	KBP	6.3	118	7.5	110	10.5	88
	PLP	3.7	69	3.8	56	5.5	46
500 DOZ	Kontrol	8.9	100	11.0	100	16.2	100
	SNMC	8.0	89	8.9	81	14.4	87
	KBP	9.9	110	12.1	111	16.8	104
	PLP	5.3	60	6.5	59	7.8	48

Kontrol num unelerinde dozaj artışına bağlı olarak basınç dayanımlarında artış gözlenmiştir. Söz konusu numunelerin basınç dayanımları; 300 dozda 8.2 MPa, 400 dozda 11.9 MPa ve 500 dozda 16.2 MPa bulunmuştur.

Dozajlara göre, kontrol numuneleri ile kaplanmış agregalarla elde edilen beton numunelerin basınç dayanım değerleri karşılaştırıldığında, 300 doz kontrol numunelerine göre; SNMC ve KBP numunelerinin basınç dayanımları %3.5 ve %14 artarken, 300 doz PLP numunesinin ise %35 azalmıştır. 400 doz kontrol numunelerine göre; SNMC, KBP ve PLP numunelerinde sırasıyla %21, %12 ve %54 azalmıştır. 500 doz kontrol numunelerine göre; SNMC ve PLP numunelerinin basınç dayanımları %11 ve %52 azalırken, KBP numunelerinin %4 arttığı görülmüştür.

Dozajlarına bağlı olarak değişken kaplanmış agregalarla elde edilen beton numunelerin basınç dayanım değerleri karşılaştırıldığında, SNMC numunelerinde 300 doza göre; 400 dozlu numuneler %10 ve 500 dozlu numuneler %68 artmıştır. KBP numunelerinde 300

doza göre; 400 doz numuneler %11 ve 500 dozlu numuneler %78 artmıştır. PLP numunelerinde ise 300 doza göre; 400 doz numuneler %4 ve 500 doz numuneler %45 artmıştır. Basınç dayanım sonuçlarına göre; numunelerin kendi aralarında dozaj artışına bağlı olarak tutarlı bir şekilde arttığı gözlenmiştir.
Küp numunelerin 28 günlük basınç dayanımları TS EN 206-1'e göre (9–88 MPa) incelendiğinde, 300 dozlu serilerde KBP, 400 dozlu ve 500 dozlu serilerde Kontrol, SNMC ve KBP numunelerinin standart değerler arasında olduğu, PLP kaplı numunelerin hiçbir dozda standart değerler arasında olmadığı görülmüştür.



Şekil 1. Beton numunelerin basınç dayanımları grafiği

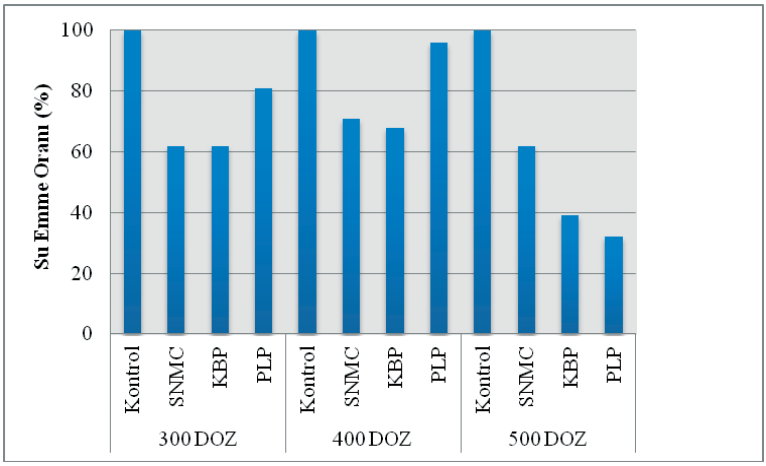
Su Emme Oranı

Betonun emebileceği su miktarı, betonun içerisindeki boşlukların toplam hacmiyle ilgilidir. Betondaki toplam boşluk hacmi ise betonda kullanılan su/çimento oranı, agrega cinsi, kür koşulları, kür süresi, karbonatlaşma, beton elemanın boyutu gibi birçok faktör tarafından etkilenmektedir (Erdoğan, 2007). Beton karışım hesabında hafif agregaların su emme oranlarının bilinmesi hesaplamada kullanılması açısından oldukça önemlidir. Su emme deneyi için her bir deney serisinden üçer adet olmak üzere toplam 36 adet 100x100x100 mm küp numuneler üretilmiştir. Polimer kaplı agregalarla üretilmiş olan hafif betonun s u emme deneyi ile ilgili veriler Tablo 6'da ve Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 6. Beton numunelerde su emme oranları, (%)

Karışımlar		Su Emme Oranı (%)	
300 DOZ	Kontrol	5.2	100
	SNMC	3.2	62
	KBP	3.2	62
	PLP	4.2	81
400 DOZ	Kontrol	2.8	100
	SNMC	2.0	71
	KBP	1.9	68
	PLP	2.7	96
500 DOZ	Kontrol	2.1	100
	SNMC	1.3	62
	KBP	1.1	39
	PLP	0.9	32

Çimento oranı artışına bağlı olarak hafif beton numunelerin su emme oranları azalmıştır. Kontrol numunelerin de 300 doza göre; 400 dozda %46 ve 500 dozda %60 azalmıştır.



Şekil 2. Beton numuneler in su emme oranları

Dozajlara göre, kaplanmamış agregalı (kontrol) numu neleri ile kaplanmış agregalı beton numunelerin su emme oranları karşılaştırıldığında, 300 doz kontrol numunelerine göre; SNMC, KBP ve PLP numunelerinde %39, %39 ve %19, 400 doz kontrol num unelerine göre; SNMC, KBP ve PLP num unelerinde %29, %32 ve %4 ve 500 doz kontrol numunelerine göre; SNMC, KBP ve PLP numunelerinde sırasıyla %38, %48 ve %57 azalmıştır.

Dozajlarına bağlı olarak üretilen hafif betonların su emme oranl arı karşılaştırıldığında, SNMC numunelerinde 300 doza göre; 400 dozlu numuneler %38 ve 500 dozlu numuneler %59, KBP numunelerinde 300 doza göre; 400 dozlu numuneler %41 ve 500 dozlu numuneler %66 ve PLP numunelerinde 300 doza göre; 400 dozlu numuneler %36 ve 500 dozlu numuneler %79 azalmıştır.

Su emme oranları (Şekil 2) incelendiğinde, çimento dozajının artışına bağlı olarak her bir numune serisinde su emme oranının azaldığı görülmektedir. Kontrol numunelerine göre agregaları kaplayan polimer sebebi ile agregaya su geçişinin engellenmesi, polimer kaplı agregalarla üretilen beton numunelerinde su emme oranının azalmasını sağlamıştır.

Sonuç ve Öneriler

Çalışma kapsamında, polimer kaplanmamış ve üç farklı polimer kaplı hafif agregalarla üretilen betonlar üzerinde yapılan deneylerin ve analizlerin sonuçları aşağıda verilmiştir.

- Polimer kaplanmış ve kaplanmamış agregalardan elde edilen taze beton numunelerin birim ağırlık değerleri 974 ile 1376 kg/m³ arasında değişmektedir.
- Kaplanmış hafif beton numunelerinin basınç dayanımları, kontrol numunelerinde dozaj artışına bağlı olarak artmıştır. Dozajlara göre, kontrol numuneleri ile kaplanmış agregalarla elde edilen beton numunelerinde en yüksek basınç dayanımı 500 doz KBP numunelerinden ve en düşük basınç dayanımı 400 doz PLP numunelerin den elde edilmiştir. TS EN 206 –1 hafif

beton için beton dayanım sınıfları kapsamında kontrol betonları için 300 doz hafif beton numuneleri LC 8/9, 400 doz hafif beton numuneleri LC 8/9, 500 dozlu hafif beton numuneleri LC 12/13 dayanım sınıfında olduğu belirlenmiştir.

- Hafif beton numunelerin su emme oranları, 300 doz kontrol numunelerine g öre; 400 ve 500 dozda azalmıştır. Dozajlara göre, kontrol numuneleri ile kaplanmış agregalarla elde edilen beton numunelerin su emme oranlarında, en yüksek 500 doz SNMC nu munelerinden ve en düşük 400 doz PLP numunelerinden elde edilmiştir. Kontrol numunelerine göre agregaları kaplayan polimerin agregaya su geçişini engellemesi, polimer kaplı agregalarla üretilen beton numunelerinde su emme oranının azalmasını sağlamıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda, agregaların polimer kaplanmasıyla su emmeleri azaltılarak, yeni bir agrega ve beton türünün üretimi gerçekleştirilebileceği tespit edilmiştir. Kaplanmış pomza agregalarıyla üretilen hafif beton yapı elemanlarında ön emdirme işlemine, ayrışma ve işlenebilirlik için kimyasal katkılara ihtiyaç duyulmadan, beton üretilebilecektir. Ayrıca, farklı polimer malzemeler ve agregaların birbirini yapışmasını engelleyen farklı toz hammaddeleri kullanarak, elde edilecek beton numunelerin day anım ve durabilite açısından özellikleri belirlenebilir.

Kaynaklar

Bal, H., 1998, "Bazı Polimerlerin Harçlarda Kullanılabilirliğinin Araştırılması", Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.

DPT, 2001, "Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı", Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri-III, Ankara .

Erdoğan, T.Y., 2007, "Beton", ODTÜ Geliştirme Vakfı, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara

Gündüz, L., 1998, "Pomza Teknolojisi, Pomza Karakterizasyonu", Cilt I, Isparta.

Gündüz, L., 2005, "İnşaat Sektöründe Bimsblok", Süleyman Demirel Üniversitesi Pomza Araştırma ve Uygulama Merkezi, Isparta.

Mindess, J. ve Young, J, S., 1981, "Concrete", Engleood Cliffs, Newjersey: Prentice Hall, Inc. Sayfa No: 581 –596. New Jersey

Neville, A.M., 1993, "Properties of Concrete", Pitman Publishing, London

Rapor: Pınarhisar Set Çimento Fabrikası Kimya Laboratuarı, 06.05.2010.

Rossignolo, J.A., Agnessini, M.V.C., 2002, Mechanical Properties of Polymer - Modified Lightweight Aggregate Concrete, Cement and Concrete Research, 32, pp. 329-334

Savran, Ö.H., 2001, "Elastomer Teknolojisi-I", Kauçuk Derneği Yayınları, İstanbul

TS EN 197 -1, Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara , 2002.

TS EN 206 -1, 2002, "Beton – Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

TS EN 1008, Beton -Karma Suyu -Numune Alma, Deneyler Ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2003.

TS EN 12390 –3, Beton -Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2010.

TS EN 12 350–6, Beton -Taze Beton Deneyleri - Bölüm 6: Yoğunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2010.

TS 3234, , "Bimsbeton Yapım Kuralları, Karışım Hesabı ve Deney Metotları", Türk Standartl arı Enstitüsü, Ankara, 1978.

Köpük Beton İmalatlarında Kalsiyum Aluminat Çimentosu Kullanımı

Can Çetin, Tuğhan Delibaş
Çimsa Çimento, Toroslar Mah. Tekke Cad. Yenitaşkent / Mersin

Dr. Önder Kırca
Çimsa Çimento, Karşıyaka Mah. Fırat Cad. No: 3 Lalahan /Ankara

Prof. Dr. İsmail Özgür Yaman
İnşaat Müh. Bölümü, K1 Binası, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Inonu Bulvari/Ankara

Öz

Ülkemizde son yıllarda enerji verimliliği konusunda yapılan çalışmalar ve yapı malzemeleri teknolojilerindeki gelişim neticesinde; tüm yapı elemanlarının çevreci şekilde ve daha düşük karbon ayak izi ile üretilmelerinin gereği ortaya çıkmıştır.

Çimento, su ve agregadan oluşan harcın kimyasal katkı yardımı ile oluşturulan köpükle bir araya gelmesinden oluşan köpük beton; 2000'li yıllardan başlayarak ülkemizde gelişim göstermekle birlikte halen endüstriyel üretim anlamında istenen seviyeye gelememiştir. Günümüzde özellikle izolasyon özelliğine sahip şap imalatlarında kullanılmakta olan köpük betonun yurtdışı uygulamalarına bakıldığında yalıtım özelliği yüksek blok imalatlarının da uygulama alanları içerisinde önemli bir yere sahip olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada 300/ 400/ 500 kg/m^3 bağlayıcı içeren köpük beton blokların en önemli gelişim alanı olan hızlı ve yüksek erken mukavemet kazanımı üzerinde çalışılmıştır. Portland Çimento ile kullanıldığında hem yüksek mukavemet hem de çok kısa priz süresi elde edilen Kalsiyum Aluminat Çimentosunun köpük beton bloklarda kullanımı incelenmiştir.

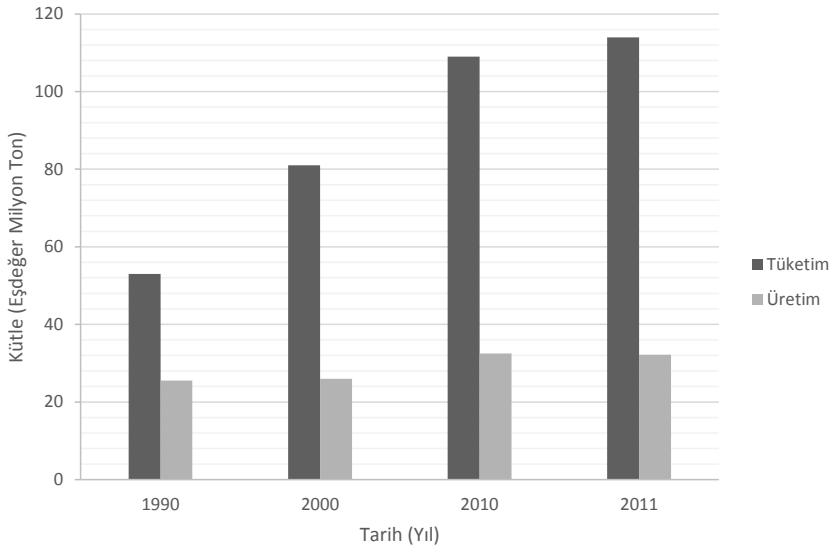
Yapılan testlerde farklı Portland Çimento/Kalsiyum Aluminat Çimento mukavemet değerleri incelenmiş, kuru elemanların ısıl iletkenlik katsayıları hesaplanmıştır.

Kalsiyum Aluminat Çimentosu içeren karışımların dayanımlarında ise Portland Çimentosu ile önemli bir fark gözlemlenmemiştir.

Anahtar Kelimeler: Köpük Beton, Kalsiyum Aluminat Çimentosu, Hafif Beton

Giriş

Türkiye enerjiyi büyük oranda ithal eden bir ülke konumunda bulunmaktadır. Ülkemiz 1980'de 32 milyon ton eşdeğer petrol tüketirken 1998 yılında 74 milyon ton eşdeğer petrol tüketir hale gelmiştir (Mendilcioğlu, 2000). Tüketilen enerjinin %71,5'lik bölümü ithal edilmektedir ve Türkiye'nin enerji ihtiyacı 1990 yılından bu yana yıldan yıla ortalama %4.6 oranında artmıştır.Türkiye'nin 1990 ve 2011 yılları arasında birincil enerji üretimi ve tüketimi miktarlarının değişimi Şekil 1. de eşdeğer milyon ton petrol cinsinden verilmiştir. Bu süreçte yerli birincil enerji üretimi %48 mertebelerinden %28,2'ye gerilemiştir (Energy Report, 2011) .



Şekil 1. 1990 ve 2011 yılları arasında birincil enerji üretimi ve tüketimi miktarlarının değişimi (Eşdeğer Milyon Ton Petrol).

Türkiye'nin Tablo 1'de verilen artan enerji harcamasının %30'luk önemli kısmı konut larda gerçekleşmektedir.

Tablo 1. Farklı sektörlerde gerçekleşen enerji tüketiminin yıllara göre dağılımı (%) (Energy Report, 2011) .

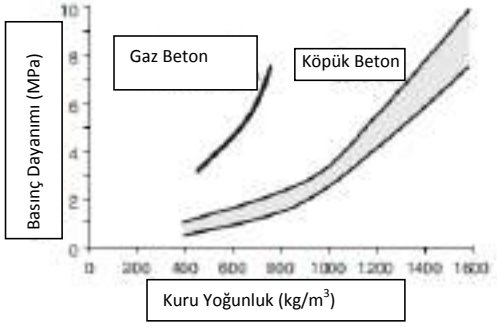
Yıl	Endüstri	Konut	Toplu Taşıma	Tarım	Diğerleri
1995	35.80	34.41	21.32	5.49	2.98
1999	38.96	33.75	19.82	5.11	2.36
2003	42.24	31.44	19.22	5.08	2.02
2007	45.47	29.25	18.55	4.99	1.74

Türkiye'de konutlarda ve iş yerlerinde ısıtma için kullanılan enerji yüzdeleri Tablo 2.'de verilmiştir. Tablo 2'de görüldüğü gibi konut ve iş yerlerinde kullanılan enerjinin önemli bölümü ısıtma için harcanmaktadır. Binanın içerisinde ısınan havanın ısıyı çatıdan binanın dışına aktarmasını veya oluşan ısının duvar ve pencerelerden sızmasının engellenmesi yalıtım özellikli malzemelerin kullanımıyla mümkün olmaktadır.

Tablo 2. Konuttaki e nerji tüketiminin dağılımı % (Cengel, 1998).

	Alan Isıtması	Su Isıtması	Havalandırma	Aydınlatma	Soğutma	Diğer
Konut	40	17	7	7	12	17
İş Yeri	32	5	22	25	-	16

Köpük beton, gaz beton gibi yalıtım amaçlı duvar sistemlerinde kullanılabilen, ısı yalıtımına önemli oranda katkı sağlayabilen bir malzemedir. Köpük beton, köpük ajanı ve suyun basınçlı hava ile köpürtülmesi sonucunda oluşturulan köpüğün çimento harcı veya pastasıyla karıştırılması sonucu oluşur. Taze halde kendiliğinden yerleşme ve kolay pompalanma özelliğine sahiptir. Köpük betonun yoğunluğu, minimum %20 olan boşluklu yapısı nedeniyle 300 ila 1700 kg/m^3'tür. Bu özelliğiyle köpük beton hafif beton sınıfına girer. Köpük beton ve gaz betonun yoğunluğunun basınç dayanımına göre değişimi Şekil 2.'de verilmiştir (Domone, Illston, 2010) .



Şekil 2. Köpük beton ve gaz betonun yoğunluk vs. basınç dayanımı ilişkisi(Domone, Illston, 2010) .

Bu çalışmada kullanılan köpük beton Çimsa CEM I 42R ve Çimsa'nın kalsiyum aluminatlı çimentosu ISIDAÇ 40 ve granüle yüksek fırın cürufu ile üretilmiş, oluşturulan numunelere yoğunluk ve basınç dayanımı analizi yapılmış, numunelerin ısıl iletkenlik katsayıları TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları'na göre bulunmuştur.

Malzeme ve Deney Yöntemi

Analizlerde kullanılan CEM I 42.5R ve ISIDAÇ 40 çimentolarının kimyasal analiz sonuçları Tablo 3. ve Tablo 4.'te verilmiştir. ISIDAÇ 40 çimentosunun fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 5.'te verilmiştir.

Tablo 3. CEM I 42.5 R kimyasal ve faz kompozisyonu .

Kimyasal Kompozisyon	CEM I 42.5R Değerleri (%)		Faz Kompozisyonu (%)
Çözünmeyen Kalıntı	0,5	C_3S	53,52
SiO_2	19,36	C_2S	19,28
Al_2O_3	5,07	C_3A	9,83
Fe_2O_3	2,62	C_4AF	8,79
CaO	62,8		
MgO	2,52		
SO_3	3,29		
Kızdırma Kaybı	2,98		
Na_2eş	0,92		
Cl^-	0,0062		

Tablo 4. ISIDAÇ 40 kimyasal özellikleri.

Kimyasal Özellikler	ISIDAÇ 40 Değerleri (%)
SiO_2	3.60
Al_2O_3	39.80
Fe_2O_3	17.05
CaO	36.20
MgO	0.65
SO_3	0.04
Kızdırma Kaybı	0.30
Na_2eş	0.16
Cl^-	0.0090
S	0.01

Tablo 5. ISIDAÇ 40 fiziksel ve mekanik özellikleri.

		Fiziksel ve Mekanik Özellikler
Özgül Ağırlık		3.25
Özgül Yüzey(Blaine)	cm^2/g	3000
Akma Tablası	%	55
Priz Başlangıcı	Dakika	280
Priz Sonu	Dakika	295
Su	%	23.1
Hacim Sabitliği	mm	1
0.045 mm Elek Bakiyesi	%	23
0.090 mm Elek Bakiyesi	%	6.5
6 Saat Basınç Dayanımı	MPa	47
24 Saat Basınç Dayanımı	MPa	70

Basınç dayanımı testi için hazırlanan numunelerin köpük yoğunluğu ve su/çimento oranı sabit tutulmuş, numunelerin içerisindeki çimento miktarları değiştirilmiştir. Karışım tasarımları Tablo 6.'te verilmiştir. Bütün karışımlar 300, 400 ve 500 kg/m^3 bağlayıcı esasıyla hazırlanmıştır.

Tablo 6. Köpük beton karışım tasarımları.

	Cem I 42.5R (kg/m^3)	Cüruf (kg/m^3)	ISIDAÇ 40 (kg/m^3)	Su Miktarı (kg/m^3)	Su/Çimento	Köpük yoğunluğu (kg/m^3)
G1	300	0	0	165	0,55	70
G2	400	0	0	220	0,55	70
G3	500	0	0	275	0,55	70
G4	150	150	0	165	0,55	70
G5	200	200	0	220	0,55	70
G6	250	250	0	275	0,55	70
IG1	292.5	0	7.5	165	0,55	70
IG2	285	0	15	165	0,55	70
IG3	390	0	10	220	0,55	70
IG4	380	0	20	220	0,55	70
IG5	487.5	0	12.5	275	0,55	70
IG6	475	0	25	275	0,55	70

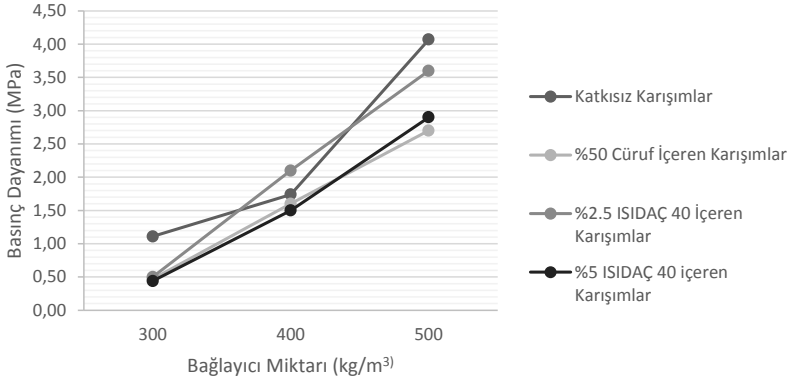
15 x 15 x 15 cm boyut larındaki küp numuneler 20 ± 2 C° sıcaklıktaki suyun içerisinde kırım tarihine kadar Şekil 3.'te gösterildiği gibi kürlenmiştir. Numunelerin dökümü Çimsa Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir. Köpük yoğunluğu; belirli oranlarda köpük ajanı, su ve hava karışımıyla oluşturulan köpüğün meydana gelmesinin ardından hacmi bilinen bir kabın içerisine köpük doldurulmasıyla gerçekleşen ağırlık değişiminin kabın hacmine bölünmesiyle elde edilmiştir.



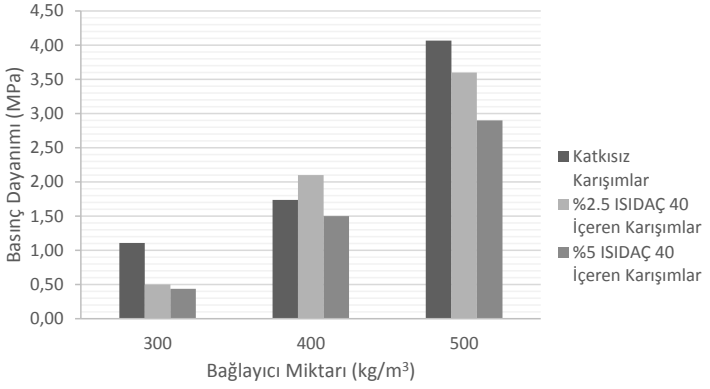
Şekil 3. Kür havuzundaki köpük beton numuneleri.

Bulgu veSonuçlar

Karışımlardaki çimento miktarının artışının 90 günlük basınç dayanımlarına etkisi Şekil 4.'te verilmiştir. Su/çimento oranlarının değişmemesine karşın artan çimento miktarının basınç dayanımını artırdığı görülmüştür. Dökümlerin yapıldığı mikserlerin hacminin sabit olması, çimento miktarlarındaki artışın sonucunda miksere eklenen önceden hazırlanmış köpüğün miktarının azalmasını gerektirmiştir. Karışımdaki su/çimento oranlarının değişmemesine karşın basınç dayanımlarında artış görülmesinin köpük miktarının azalmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Katkı kullanılmadan, yalnızca CEM I 42.5R çimento ile hazırlanan karışımların 90 günlük basınç dayanımları, CEM I 42.5R çimentosunun %2.5 ve %5 oranında ISIDAÇ 40 ile karıştırılmasıyla elde edilen karışımların 90 günlük basınç dayanımlarıyla karşılaştırılmış, sonuçlar Şekil 5.'te verilmiştir. ISIDAÇ 40 içeren karışımlarla katkısız çimentolar arasında önemli bir dayanım farkı gözlenmemiştir.



Şekil 4. Farklı miktarlarda bağlayıcı içeren karışımların 90 günlük basınç dayanımları.



Şekil 5. Farklı oranlardaki ISIDAÇ 40'lı karışımların 90 günlük basınç dayanımları.

CEM I 42.5R çimentoya toplam bağlayıcı miktarının %50'si oranında cüruf eklenmesiyle hazırlanan karışımların 90 günlük basınç dayanımları katkısız çimentolu karışımların 90 günlük basınç dayanımlarıyla karşılaştırımış ve %50 cüruf katkılı çimentoların daha düşük olmakla beraber katkısız çimentolara yakın basınç dayanımı gösterdiği görülmüştür. Sonuçlar Tablo 7.'da verilmiştir.

Tablo 7. %50 cüruflu karışımların 90 günlük basınç dayanımları.

	Basınç Dayanımı (MPa)	
	Katkısız Çimento	**%50 Cüruf Katkılı Çimento**
300 Kg/m^3 Bağlayıcılı	1.11	0.47
400 Kg/m^3 Bağlayıcılı	1.74	1.60
500 Kg/m^3 Bağlayıcılı	4.07	2.70

Çalışmada hazırlanan bütün numunelerin kuru yoğunlukları analiz edilmiştir. Bulunan yoğunluklar TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları standardında yer alan "Yapı malzeme ve bileşenlerinin birim hacim kütlesi, ısıl iletkenlik hesap değeri (λ_h) ve su buharı difüzyonu faktörü" tablosunun yardımıyla ısıl iletkenlik katsayılarının bulunmasında kullanılmıştır. Numunelerin yoğunlukları ve ısıl iletkenlik katsayıları Tablo 8.'de verilmiştir. Çimento miktarının artışının numunelerin kuru yoğunluklarını artırdığı görülmüştür. Cüruflu çimentoların katkısız çimentolara oranla daha yoğun olduğu gözlemlenmiştir. CEM I 42.5R esaslı karışımlara %2.5 ve %5 oranında ISIDAÇ 40 eklenmesinin kuru yoğunluk değerlerini önemli oranda değiştirmediği tespit edilmiştir.

	G1	G2	G3	G4	G5	G6
Kuru Yoğunluk (kg/m^3)	386	545	760	583	691	738
Isıl İletkenlik (λ_h)(W/mK)	0.2	0.23	0.29	0.24	0.27	0.27
	IG1	IG2	IG3	IG4	IG5	IG6
Kuru Yoğunluk (kg/m^3)	352	371	566	546	745	720
Isıl İletkenlik (λ_h)(W/mK)	0.11	0.2	0.23	0.23	0.27	0.27

Tablo 8. Numunelerin kuru yoğunluk değerleri ve ısıl iletkenlik katsayıları.

%50 Cüruflu karışımların 90 günlük portland çimentolu karışımlara göre kuru yoğunluklarının daha yüksek olmasına rağmen basınç dayanımlarının daha düşük olduğu görülmüştür.

Numunelerin katılaşma süreçleri el ve gözle takip edilmiştir. ISIDAÇ 40 katkılı numunelerin kalıptan daha çabuk sökülebildiği, süre farkının 1 güne kadar çıkabildiği gözlenmiştir.

Sabit su/çimento oranının ve köpük yoğunluğunun sağlandığı ortamlarda köpük miktarının artışı basınç dayanımını, köpük yoğunluğunu ve ısıl iletkenlik katsayısını düşürmektedir.

Gelecek Çalışmalar

Daha yüksek oranda ISIDAÇ 40 ihtiva eden köpük betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin, kalsiyum aluminatlı çimentoda gerçekleşen dönüşüm reaksiyonlarının tamamlanmasının ardından tespit edilmesi ISIDAÇ 40'ın kullanım alanlarının daha iyi anlaşılması açısından fayda sağlayacaktır.

Farklı oranlarda cürufun ISIDAÇ 40 ile birlikte kullanılmasıyla hazırlanan köpük beton un kalsiyum aluminatlı çimentoda gerçekleşen dönüşüm reaksiyonlarına ne derece maruz kalacağının anlaşılması için farklı sıcaklıklardaki kürleme ile yapılacak fiziksel ve mekanik analiz çalışmasının gelecekte ISIDAÇ 40'ın köpük betondaki performansının anlaşılması adına faydalı olacağı öngörülmektedir.

Farklı tipteki köpük ajanlarının ISIDAÇ 40 'lı köpük betonun performansına etkisinin anlaşılması için fiziksel ve mekanik analiz çalışması da bu çalışmanın ardından fayda sağlayacak çalışmalar arasında olacaktır.

Referanslar

Cengel Y.A. (1998) Heat Transfer: A Practical Approach .

Domone, P. And Illston, J. (2010) Construction Materials Their nature and behavio ur Fourth edition

Nüfus Projeksiyonları, 2013-2075. TÜİK, http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1027

Mendilcioglu M. (2000) Restructuring the Turkish Electricity Market. World Energy Council -Turkish National Committee. Proceedings of the Turkish Eighth Energy Congress: Opening Talks, Invited Papers and Panels, pp. 169 –76.

TS 825. Binalarda Isı Yalıtım Kuralları. Türk Standatları Enstitüsü; 2008

World Energy Council -Turkish National Committee (WEC -TNC). Turkey Energy Report (2001), Ankara, Turkey.

World Energy Council -Turkish National Committee (WEC -TNC) Energy Statistics (1998). Proceedings of the Turk ish Eighth Energy Congress, p. 177 –273.

Farklı Kür Yöntemlerinin Betonun Geçirimlilik ve Mekanik Özeliklerine Etkileri

Fatih Özalp
İSTON, İstanbul Beton Elemanları ve Hazır Beton Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş.
Tel: (212) 537 82 00
E-Posta: fatihozalp@iston.com.tr

Özkan Şengül, Mehmet Ali Taşdemir
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, 34469 İstanbul
Tel: (212) 285 37 71
sengulozk@itu.edu.tr , matasdemir@gmail.com

Öz

Sürdürülebilirlik için, yapıların uzun servis ömürlerine sahip olmaları en önemli hususlardan biridir. Prefabrike elemanların üretiminde betonun dayanım kazanma hızını arttırmak amacıyla su buharı kürü uygulanmaktadır. Ancak, kür uygulama sırasında ve sonrasında iç-dış sıcaklık farkının aşırı artması betonda erken yaş çatlaklarının meydana gelmesine neden olmaktadır. Bu da betonarme elemanlarda dürabilite sorunlarına yol açmakta, servis ömrü kısalmakta ve sonuçta önemli ekonomik kayıplar oluşmaktadır. Bu nedenle, donatıya kadar ulaşan çatlakların uygun bir yöntemle onarılması ve ayrıca genişliği 0,2 mm'nin altındaki çatlaklarla ağ şekilli çatlakların dış etkilere karşı tecriti gereklidir. Bu çalışmada, betonun üretimi sonrasında uygulanan su, buhar ve yalıtılmış ortamda yüksek sıcaklık gibi kür süreçlerinin normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonların mekanik davranışlarına ve geçirimlilik özeliklerine etkileri araştırılmıştır. Ayrıca, söz konusu betonlarda erken yaşta oluşan genişliği 0,2 mm'nin altındaki çatlaklarla ağ şekilli mikroçatlakların su itici monomerik alkilalkoksilan esaslı bir malzemeyle tecriti yapılmıştır. Bu tecrit uygulamalarından önce ve sonra betonlarda su emme, kılcal su emme ve hızlı klor iyonu geçirimliliği deneyleri yapılarak geçirimlilik özelikleri karşılaştırılmıştır. Daha sonra, çatlakları tecrit edilen numuneler UV ile yaşlandırma deneylerine tabi tutulmuştur. Yaşlandırma deneylerinden sonra numunelerin geçirimlilik özelikleri yeniden belirlenmiş ve performansa dayalı karşılaştırmalar yapılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Beton, Kür, Çatlak, Yaşlandırma, Onarım

Giriş

Betona uygulanan kür sıcaklığının yüksek olması, normal sıcaklıkta kür uygulanan betonların dayanımları ile karşılaştırıldığında, ilk günlerdeki dayanımın yüksek olmasını sağlamakla birlikte, daha sonraki günlerdeki dayanımın daha düşük olmasına yol açmaktadır. Hem betonun ilk günlerde kazanacağı dayanımın yüksek olmasını sağlamak, hem de daha sonraki günlerde betonun çok düşük dayanım göstermesini bir ölçüde engellemek amacıyla, betona uygulanan buhar kürü farklı aralıklarla ve değişik sıcaklıklarda yerine getirilmektedir. B asınçlı buhar kürünün kullanılmasındaki en büyük

amaç beton elemanın bir an önce dayanım kazanmasını ve böylece ekonomi sağlamak olduğundan, çoğu zaman buhar kürü süresi, özelikle de bekleme süresi, uygulamada yeterince uzun tutulmamaktadır. Oysa, bekleme süresinin, betonun ilerideki performansına büyük etkileri olmaktadır (Erdoğan ve Erdem, 2002). Buhar kürünün beton özelliklerine etkileri üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda betona buhar kürü uygulamalarının betonun uzun süreli dayanım özelliklerini bir miktar azalttığı anlaşılmaktadır. Uzun süreli nem ortamında kalan betonun nihai dayanımlarının buhar kürü görmüş numunelerden fazla olduğu anlaşılmaktadır (Vollenweider, 2004).

Buhar kürü uygulaması yapılacak beton elemanlarda Portland çimentosu ile birlikte bir miktar ince taneli silis malzeme de bulundurulmalıdır. Aksi durumda, buhar kürüne tabi tutulan elemanın ilk zamanlardaki davranışı normal betonunkine benzemesine rağmen buhar kürü süresinin ilerlemesiyle betonda oluşan C-S-H jelleri amorf yapıdan kristal yapıya dönüşerek kararsız hale gelmekte uniform olarak dağılım göstermeyip boşlukları dolduramamakta ve beton dayanımını düşürmektedir (Liu ve diğ., 2005).

Bu çalışmada, betonun üretimi sonrasında uygulanan su, buhar ve yalıtılmış ortamda yüksek sıcaklık gibi kür süreçlerinin normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonların mekanik davranışlarına ve geçirimlilik özeliklerine etkileri araştırılmıştır. Ayrıca, söz konusu betonlarda erken yaşta oluşan genişliği 0,2 mm'nin altındaki çatlaklarla ağ şekilli çatlakların su itici bir malzemeyle tecriti yapıldıktan sonra geçirimlilik deneyleri tekrarlanmış, bu malzemenin etkinliğini görebilmek için çeşitli yaşlandırma deneyleri de yapıldıktan sonra bir kere daha geçirimlilikler belirlenmiştir.

Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar; normal dayanımlı betonlar, yüksek dayanımlı betonlar ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada normal dayanımlı betonlarda çimento dozajı 300 kg/m³, su/ bağlayıcı oranı 0,52 olan beton karışımı kullanılmıştır. Yüksek dayanımlı betonlar için çimento dozajı 500 kg/m³, su/ bağlayıcı oranı 0,32 olan beton karışımı ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda çimento dozajı 1000 kg/m³, su/ bağlayıcı oranı 0,172 ve su/çimento oranı 0,215 olan beton karışımı kullanılmıştır. Tüm karışımlarda CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmış olup, ultra yüksek dayanımlı betonlarda ayrıca mineral katkı olarak silis dumanı ilave edilmiştir. Beton karışımların üretilmesinde kullanılan katkı polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı özelikte olup karışımlarda farklı oranlarda kullanılarak istenilen beton özeliklerinin elde edilmesi sağlanmıştır. Normal dayanımlı betonlar ve yüksek dayanımlı betonlarda agrega olarak Kırmataş I (5-12 mm), Kırmataş II (12-22 mm), Kırmataş tozu (0-5 mm) ve Doğal kum (0-4 mm) kullanılmıştır. Ultra yüksek dayanımlı betonların üretilmesinde ise tane boyutu 500 μm ile 2 mm arasında olan silis kumu ve 0-500 μm arasında olan silis pudrası agregalar kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan bileşen malzemeler ve kullanım oranları aşağıda Tablo 1 ve Tablo 2' de verilmektedir.

Tablo 1 Normal Dayanımlı ve Yüksek Dayanımlı Betonların Taze Beton Bileşimi ve Özelikleri.

Karışım	Normal Dayanımlı Betonlar		Yüksek Dayanımlı Betonlar	
	Teorik	Gerçek	Teorik	Gerçek
Çimento, kg/m³	300	301,9	500	500,8
Kırmataş I, kg/m³	491	493,7	444	444,7
Doğal Kum, kg/m³	476	478,6	431	431,7
Kırmataş Tozu, kg/m³	374	376,0	339	339,6
Kırmataş II, kg/m³	589	592,2	533	533,9
Süperakışkanlaştırıcı, kg/m³	3,6	3,6	7,0	7,0
Su, kg/m³	153,5	154,3	155	155,3
Su/Çimento	0,52	0,52	0,32	0,32
Birim ağırlık, kg/m³	2387	2402	2409	2413
Hava boşluğu (%)	3	2,4	3	2,8

Tablo 2 Ultra Yüksek Dayanımlı Betonların Taze Beton Bileşimi ve Özelikleri.

Karışım	Teorik	Gerçek
Çimento, kg/m³	1000	952
Silis dumanı, kg/m³	250	238
Su, kg/m³	120	114
Silis kumu, kg/m³	330	314
Silis pudrası, kg/m³	510	486
Süperakışkanlaştırıcı, kg/m³	125	119
Su/Çimento	0,215	0,215
Su/Bağlayıcı	0,172	0,172
Birim ağırlık, kg/m³	2335	2223
Hava boşluğu (%)	1,0	5,8

Deneysel çalışma ana iki bölüme ayrılmış olup ilk bölümde betonlar a çeşitli kür rejimi uygulamaları gerçekleştirilmiş ve kürün betonun mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Kür rejimi uygulamaları üç farklı şekilde yapılmıştır. Numunelerin kalıptan çıkma evresinden sonra bir kısmı 20±2°C' de su kürü ortamında, bir kısmı 1 gün süreyle 90 °C' de buhar kürü ortamı ve sonrasında su küründe ve bir kısmı da 1 gün süreyle 150 °C' de etüv kürü ve sonrasında su kürü ortamında bekletilmiştir. Numuneler de basınç dayanım deneyi TS EN 12390-3 standardı, hızlı klor geçirimliliği deneyi ASTM C 1202 standardı ve kılcal su emme deneyi ASTM C 1585 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı için 15x15x15 cm küp numuneler, hızlı klor geçirimliliği ve kılcal su emme deneyleri için 50x100 mm silindir numuneler kullanılmıştır. Basınç dayanımı deneyleri 7 günlük, hızlı klor geçirimliliği ve kılcal su emme deneyleri ise 28 günlük olarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde normal dayanımlı, yüksek dayanımlı ve ultra yüksek dayanımlı beton numunelerde buhar kürü uygulanmış ve sonrasında ani soğutma gerçekleştirilerek genişliği 0,2 mm altında çatlaklar oluşturulmuş ve çatlak bulunan bu numunelerin geçirimlilik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, çatlak bulunan yüzeylere su

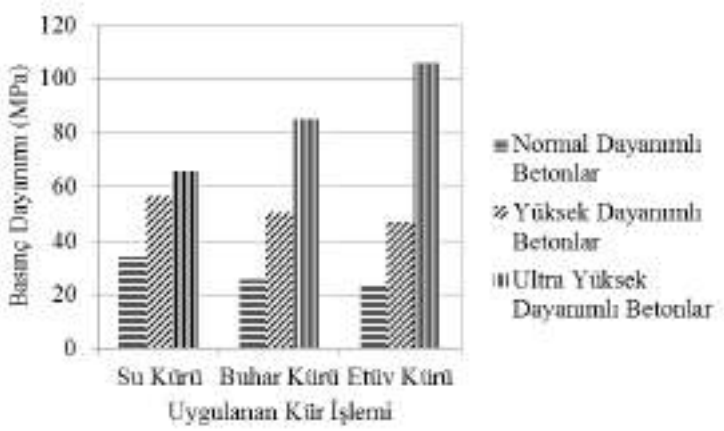
itici tecrit malzemesi uygulanarak geçirimlilik özelliklerinin belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Son olarak tecrit malzemesi uygulanan numuneler ve referans beton numunelere yaşlandırma deneyleri yapılarak tecrit malzemesi ile yapılan işlemin etkinliği değerlendirilmiştir.

Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Beton basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 1' de verilmektedir. Beton basınç dayanımı deney sonuçları incelendiğinde ultra yüksek dayanımlı betonların 100 MPa üzeri dayanıma ulaştıkları, yüksek ve normal dayanımlı betonların dayanımları ise 20-60 MPa ar alıklarında oldukları görülmektedir.

Burada etüv kürü, buhar kürü ve su kürü uygulamaları dikkate alındığında normal dayanımlı betonların buhar ve etüv kürü ile zarar gördükleri ve su kürü görmüş numunelere göre önemli ölçüde dayanım kayıpları yaşadıkları görülmektedir. Normal dayanımlı betonlarda bu kayıp yüksek dayanımlı betonlara göre daha büyük ölçüdedir. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise en yüksek dayanım etüv kürü gören numunelerde oluşmaktadır. Bu durumun sebebi ultra yüksek dayanımlı betonlarda silisli çok ince malzemelerin belirli sıcaklık değerlerinin üzerinde reaksiyona girerek daha kararlı bir iç yapı oluşmasını sağlamasından kaynaklanmaktadır.



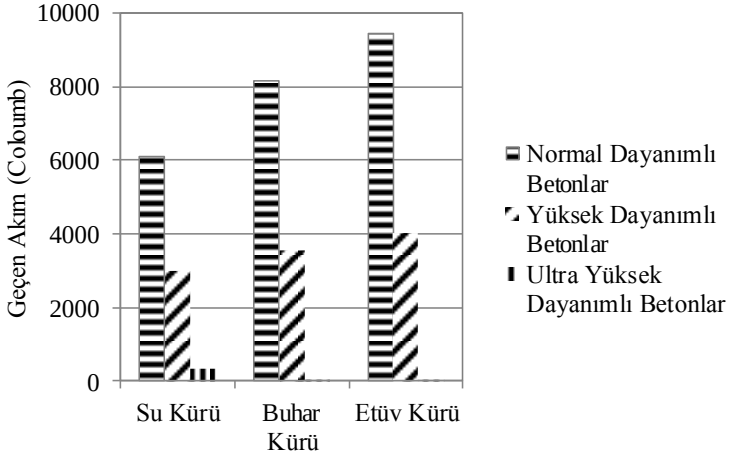
Şekil 1. Kür koşullarının basınç dayanımına etkisi

Hızlı Klor Geçirimliliği Deney Sonuçları

Hızlı klor geçirimliliği deney sonuçları Şekil 2' de verilmektedir. Bu deney 28 günlük numunelere uygulanmış olup en düşük değerlerin, beklenildiği üzere, ultra yüksek dayanımlı betonlarda gerçekleştiği bunu sırasıyla yüksek dayanımlı betonlar ve normal dayanımlı betonların izlediği görülmektedir. Burada normal dayanımlı betonlarda uygulanan kür işlemleri dikkate alındığında etüv kürü görmüş numunelerin en çok

hasara uğradığı bu durumu buhar kürü görmüş numunelerin izlediği görülmüştür. Yüksek dayanımlı numunelerde kür işlemi hızlı klor geçirimliliğini daha az etkilemiş olup ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise buhar kürü ve etüv kürü ile iç yapıda önemli iyileşme sağlandığı anlaşılmıştır.

Normal dayanımlı betonlara uygulanan kür işlemleri değerlendirildiğinde, 90°C'de uygulanan buhar kürü ve 150°C olarak uygulanan etüv kürünün beton iç yapısında hasarlara neden olduğu ve betonun geçirimlilik özeliğini olumsuz etkilediği görülmektedir. Yüksek dayanımlı betonlarda kür işlemi sonrasında normal d ayanımlı betonlara benzer biçimde en yüksek geçirimlilik değerlerinin sırasıyla etüv kürü, buhar kürü ve su kürü görmüş numunelerde oluştuğu görülmektedir. Yüksek dayanımlı betonlarda uygulanan kür işlemleri sonuçları değerlendirildiğinde, 90°C'de uygulanan buhar kürü ve 150°C olarak uygulanan etüv kürünün beton iç yapısında hasarlara neden olduğu ve beton geçirimlilik özelliğini olumsuz etkilediği ancak bu etkinin normal dayanımlı betonlara göre çok daha az olduğu görülmektedir. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda suda bekleyen numunelerin geçirimlilik değerinin 325 coulomb olduğu görülmüştür. Bu değer normal dayanımlı betonlarla kıyaslandığında çok daha boşluksuz bir iç yapıyı ifade etmektedir. Bu yapıya ulaşılmasında, su/çimento oranının çok düşük olması ve çimento taneleri arası boşlukların silis dumanı ile doldurulması etkili olmaktadır. Numunelere buhar kürü ve etüv kürü uygulanması ile karışımdaki silis dumanı aktif hale gelmekte ve çimentonun hidratasyonu sonrası kararsız bir bileşik olan $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girerek kararlı bir yapı olan C-S-H oluşmaktadır. Bu durum buhar kürü ve etüv kürü uygulanan numunelerde klor geçirimliliğini 10 coulomb seviyesine kadar düşürerek belirgin etkiyi göstermektedir.



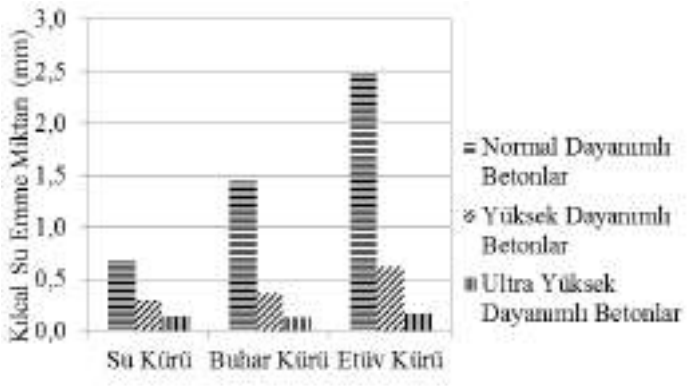
Şekil 2. Kür koşullarının hızlı klor geçirimliliğine etkisi

Kılcal Su Emme

Şekil 3' de verilen kılcal su emme deneyleri dikkate alındığında normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonlarda kür işlemi uygulaması ile kılcal su emmenin önemli ölçüde arttığı ancak ultra yüksek dayanımlı betonlarda buhar kürü uygulamasının kılcal

su emme değerini azalttığı görülmektedir. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda etüv kürü görmüş numuneler su kürü görmüş olanlara göre daha fazla kılcal su emme değerine sahip olurken, en iyi sonuçlar buhar kürü uygulanan numunelerde elde edilmiştir.

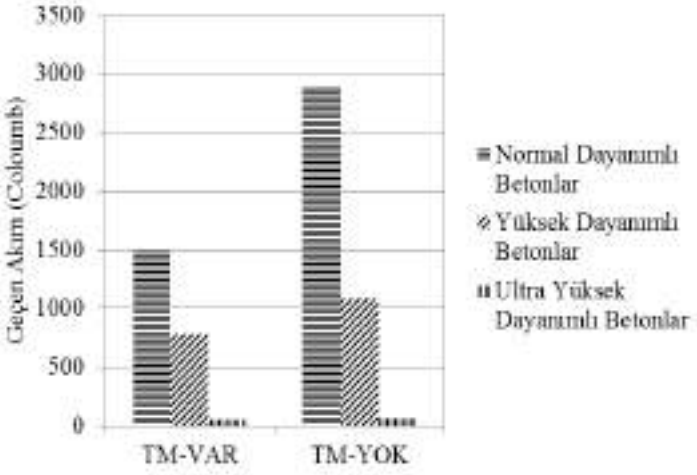
Betonların kılcal su emme ve hızlı klor geçirimliliği deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonların kılcal su emme değerleri ve hızlı klor geçirimliliği değerlerinin benzer olarak ısıl kür işlemi uygulaması ile arttığı anlaşılmıştır. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise bu özellikler buhar kürü işlemi uygulaması ile fazla değişmemektedir.



Şekil 3. Kür koşullarının kılcal su emmeye etkisi

Su İtici Tecrit Malzemesinin Etkisi

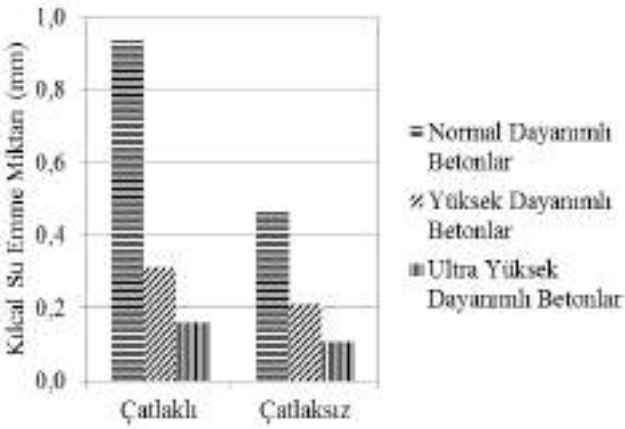
Çalışmanın bu bölümünde buhar kürü ve ani soğutma etkisinde betonlarda çatlak oluşturulmuş ve bu numunelerin geçirimlilik özellikleri tecrit malzemesi uygul anmadan ve uygulandıktan sonra incelenmiştir. Şekil 4' de laboratuvar ortamında bekletilen 50x100 mm silindir numunelere 56 . günde yapılan hızlı klor geçirimliliği deney sonuçları verilmektedir. Numunelerin tek yüzeyine su itici malzeme sürülmesi ile hızlı klor geçirimliliğinin tüm beton türlerinde azaldığı, en belirgin etkinin ise normal dayanımlı betonlarda gerçekleştiği görülmektedir. Su itici malzemelerin kullanılması betonların hızlı klor geçirimliliğini belirgin biçimde azaltmaktadır.



Şekil 4. Tecrit Malzemesinin (TM) hızlı klor geçirimliliğine etkisi

Çatlakların Kılcal Su Emmeye Etkisi

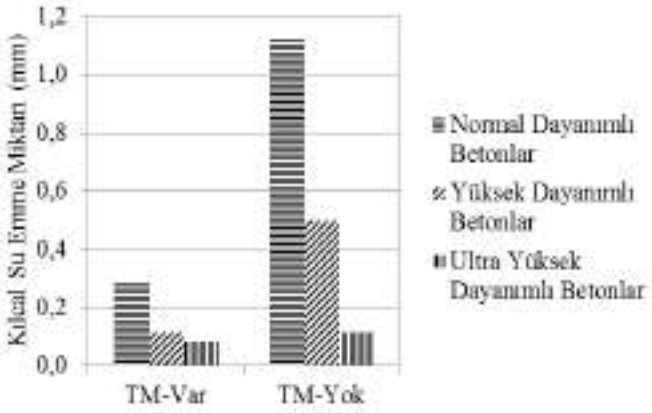
Çatlak oluşturulan ve laboratuvar şartlarında bekletilen numunelere kılcal su emme deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçları çatlak bulunmayan referans beton numuneleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma neticesinde çatlak bulunan numunelerin 14 günlük kılcal su emme değerlerinde referans numunelere göre belirgin şekilde artış gözlemlenmiştir. Deney sonuçları Şekil 5'de verilmektedir . Burada aynı şartlarda karşılaştırma yapılabilmesi için çatlak bulunan numunelere benzer olarak, çatlak bulunmayan referans numuneler de laboratuvar şartlarında bekletilmiştir. Bu sebeple referans numunelerin geçirimlilik değerleri Şekil 3'te su kürüne tabi tutulan numune lerden farklılık göstermektedir. Beklenildiği üzere, çatlaklı numunelerde kılcal su emme çok daha yüksektir.



Şekil 5. Çatlakların kılcal su emmeye etkisi

Yüzeye Su İtici Malzeme Uygulamasının Kılcal Su Emmeye Etkisi

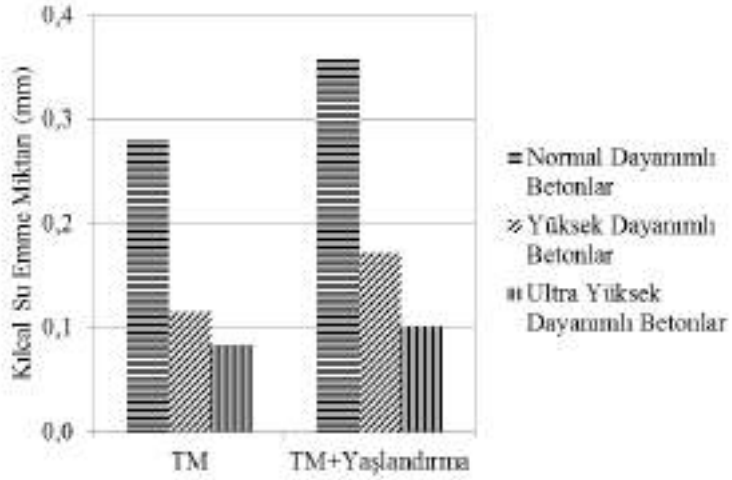
Çatlak bulunan yüzeylere tecrit malzemesi sürülmesi ile tüm beton türlerinde kılcal su emme değerlerinde azalma görülmüştür. Su itici malzeme kullanılması ile özellikle normal dayanımlı betonların kılcal su emme değerleri önemli ölçüde azalmaktadır. Betonlarda dayanım değeri yükseldikçe daha kararlı ve boşluksuz bir içyapı oluşmaktadır. Bu sebeple içyapının daha iyi olduğu betonlarda tecrit malzemenin etkisi normal dayanımlı betonlara göre daha azdır. Deneyler, 56 günlük 50x100 mm silindir numunelere uygulanmış olup sonuçları Şekil 6' da verilmektedir.



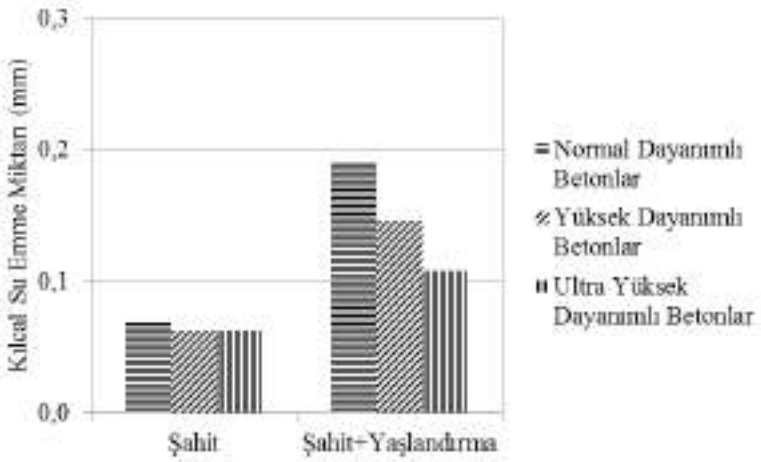
Şekil 6. Tecrit Malzemesinin (TM) kılcal su emmeye etkisi

Yaşlandırmanın Kılcal Su Emmeye Etkisi

Bütün beton türlerine 4 saat 60 °C sıcaklıkta UV lambaları ile ısıtma, 2 saat devamlı su püskürtme ile ıslanma, 3 saat -20 °C donma çözülme kabininde soğutma ve sonrasında laboratuvar ortamında 20 °C' de 17 saat bekletme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu döngü 14 gün boyunca tekrar edilmiştir. Yaşlandırma deney sonuçları incelendiğinde beton numunelerinde yaşlandırma deneyi hem çatlak bulunan tecrit malzeme uygulanmış numunelere hem de çatlak bulunmayan referans beton numunelere uygulanmış ve her iki durumda yaşlanma etkilerine bağlı olarak numunelerin kılcal su emme değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Kılcal su emme değerindeki bu artış yaşlandırma etkisi ile çatlak bulunmayan numunelerde zamanla ağ şeklinde kılcal çatlakların oluşmaya başlamasından kaynaklanmaktadır. Tecrit malzemesi uygulanan numunelerin kılcal su emme miktarındaki artış referans numunelere oranla daha azdır. Deney sonuçları Şekil 7 ve Şekil 8' de verilmektedir.



Şekil 7. Yaşlandırmanın Tecrit Malzemesi (TM) uygulanmış çatlaklı numunelerdeki kılcal su emmeye etkisi



Şekil 8 . Yaşlandırmanın tecrit malzemesi uygulanmamış ve çatlak bulunmayan referans numunelerdeki kılcal su emmeye etkisi

Sonuçlar

Yapılan bu deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. Basınç dayanımı deney sonuçları incelendiğinde yüksek sıcaklıktaki kür uygulamaları ile normal dayanımlı betonlar ve yüksek dayanımlı betonların basınç dayanımları azalmaktadır. Ultra yüksek dayanımlı betonların iç yapısı sebebiyle bu betonlarda yüksek sıcaklıktaki kür uygulamaları basınç dayanımını olumlu

etkilemekte ve dayanımlar artmaktadır. Kür etkisinde normal dayanımlı betonlarda dayanım azalması yüksek dayanımlı betonlara göre çok daha belirgin biçimde gerçekleşmektedir.

2. Kür uygulamalarının betonların kılcal su emme değeri ve hızlı klor geçirimliliği özelliklerine etkileri incelendiğinde, normal dayanımlı betonlar ve yüksek dayanımlı betonlar kür etkisinde beton zarar görmekte ve geçirimlilik artmaktadır. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda buhar kürü uygulaması ile iç yapı iyileşmekte ve daha kararlı hale gelmektedir. Normal dayanımlı betonlarda yüksek sıcaklıkta ısıl işlem uygulamaların betonların içyapı özelliklerine olumsuz etkileri daha fazladır.

3. Çatlak bulunan numunelere su itici tecrit malzeme uygulanması ile betonların hem kılcal su emme değerinde hem de hızlı klor geçirimliliği değerlerinde belirgin bir azalma görülmektedir. Bu azalma bütün beton sınıflarında olmakla birlikte en belirgin etkiler normal dayanımlı betonlarda sonra sırasıyla yüksek dayanımlı betonlar il e ultra yüksek dayanımlı betonlarda olmaktadır. Tecrit malzemelerinin kullanılması ile çatlak bulunan numunelerin geçirimlik değerleri azalmaktadır.

4. Yaşlandırma deneyi hem çatlak bulunan tecrit malzeme uygulanmış numunelere hem de çatlak bulunmayan referans beton numun elere uygulanmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. Yaşlandırma etkisi ile başlangıçta çatlak bulunmayan referans numunelerde ağ şeklinde çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Deney sonrasında tüm numunelerin kılcal su emme değerinde artış gözlemlenmiştir. Ancak tecrit malzeme uygulanan numunelerin yaşlandırma sonrasında kılcal su emme değerindeki artış daha azdır.

Kaynaklar

Erdoğan T. Y., Erdem T. K. 2002. Buhar Kürü Uygulamasında Beton Özelliklerini Etkileyen Faktörlerden Bekleme Süresinin Önemi. ECAS2002 U luslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, 14 Ekim 2002, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

Liu, B., Xie, Y., Li, J., 2005. Influence of Steam Curing on the Compressive Strength of Concrete Containing Supplementary Cementing Materials", Cement and Concrete Research , Vol. 35, 994–998, 2005.

Vollenweider, B.,2004. Various Methods of Accelerated Curing for Precast Concrete Applications, and Their Impact on Short and Long Term Compressive Strength. Concrete Technology . 16 March 2004.

Afşin Elbistan Uçucu Külü ve Yüksek Fırın Cürufu İçeren Çimentosuz Bağlayıcılar Hazırlanması

Murat Şahin
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, K1/110C, Ankara, Türkiye
Tel: (312) 210 5497
e-posta: samurat @metu.edu.tr

Mahdi Mahyar
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, K1/110E, Ankara, Türkiye
Tel: (312) 210 5497
e-posta: mahdi .mahyar @metu.edu.tr

Doç. Dr. Sinan T. Erdoğan
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, K1/231, Ankara, Türkiye
Tel: (312) 210 2428
e-posta: sinante @metu.edu.tr

Özet

Afşin Elbistan (AE) termik santrali ülkemizdeki en yüksek enerji üretme kapasitesine sahip tesislerden biridir ve en çok uçucu kül ortaya çıkaran santraldir. Ortaya çıkan yüksek kireçli uçucu kül, içerdiği yüksek serbest kireç ve yüksek kükürt oksit miktarları sebebiyle çimento ve beton ile ilgili standartlara uymamaktadır. Dolayısıyla devamlı olarak araziye dökülmekte ve rüzgarla havalanarak kirlilik yaratma veya yeraltı suyuna karışarak su kaynaklarını kirletme gibi çevresel tehdit oluşturmaktadır.

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun (YFC) uygun aktivatör kimyasallarla birleştirildiğinde çözünüp katılaşarak çimentosuz harç ve betonlar üretmekte kullanılabildiği bilinmektedir. Bu aktivatörlerden ikisi sönmüş kireç ve alçıtaşıdır. AE uçucu külü bu iki kimyasalı azımsanmayacak miktarlarda içerdiği için uygun oranlarda YFC ile sulu ortamda birleştirildiğinde kısmi cürüf aktivasyonu gerçekleşmesi ve karışımın bağlayıcılık kazanması mümkün olabilir.

Bu çalışmada AE uçucu külü-YFC karışımlarının oda sıcaklığında ve 80 °C sıcaklıkta kür ile dayanım gelişimi incelenmiştir. Yüksek dayanım veren karışımların açığa çıkardığı hidratasyon ısısı ölçülerek mikroyapı gelişimi araştırılmıştır.

İki farklı endüstriyel atık kullanarak, fabrika üretimi kimyasal aktivatöre ihtiyaç duymayan karışımlar elde edilebilmesi durumunda çevresel etkisi çok düşük betonlar üretmek mümkün olabilir. Ayrıca halihazırda yüksek miktarda ortaya çıkan, sahada depolanan ve neredeyse hiç kullanılamayan bir atığın olumsuz etkisi azaltılabilir.

Anahtar kelimeler: curuf aktivasyonu, Afşin Elbistan uçucu külü, öğütülmül uçucu kül,

Giriş

Günümüzde dayanıklılık ihtiyacı gibi teknik sebeplerle ve özellikle de artan çevre bilincinin etkisiyle bağlayıcı olarak yalnızca portland çimentosu içeren betonlar artık tercih edilmemektedir. Çimentonun bir kısmı tepkimeye girebilen bir toz malzeme ile ikame edilerek elde edilen betonlar veya hiç çimento içermeyen bağlayıcılarla yapılan betonlar tercih edilmektedir. Bu i kinci grubun son yıllarda en çok araştırılan örenklerinden biri alkali aktive cüruf veya jeopolimer betonlardır (Gartner, 2004; Davidovits, 2008; Škvára, 2007; Provis ve van Deventer, 2009).

Kömür yakan termik santrallerin atıklarından biri olan uçucu kül yaygın olarak kullanılan bir yapay puzolandır (Erdoğan, 2010). Uçucu külün beton yapımında kullanılabilmesi için sahip olması gereken özelikler ve sınırlamalar standartlarda belirtilmektedir (Erdoğan, 1997). Bu sınırlamaların bazıları SO_3 içeriği, serbest CaO içeriği, MgO içeriği, alkali oksit içeriği olarak sıralanabilir. Bu kimyasal içerikleri yüksek olan küller çimento ikamesi için veya kompoze çimento yapımında kullanılamamaktadır. Dolayısıyla bu küller depo sahalarında uzun yıllar saklanmakta, zamanla yeraltı suyuna karışarak veya havalanarak kirlilik ve çevresel tehdit oluşturabilmektedir.

Afşin Elbistan (AE) termik santrali ülkemizdeki en yüksek enerji üretme kapasitesine sahip tesislerden biridir ve en çok uçucu kül ortaya çıkaran santraldir. Ortaya çıkan yüksek kireçli uçucu kül, içerdiği yüksek serbest CaO ve yüksek SO_3 miktarları sebebiyle çimento ve beton ile ilgili standartlara uymamakta (Erdoğan ve diğ., 2003), sürekli olarak depolanmaktadır. Dolayısıyla bu kül için bir kullanım alanı bulmak faydalı olacaktır. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun (YFC) kireç ve alçıtaşı gibi kimyasallarla birleştirildiğinde çözünüp katılaşarak çimentosuz harç ve betonlar üretmekte kullanılabildiği bilinmektedir (Kim ve diğ, 2013; Gu ve diğ, 2014; Melo Neto ve diğ., 2010; Jin ve diğ., 2011). AE uçucu külü bu iki kimyasalı azımsanamayacak miktarlarda içerdiği için (Erdoğan ve diğ., 2003) uygun oranlarda YFC ile karıştırılarak kullanıldığında aktivasyon gerçekleşmesi ve karışımın bağlayıcılık kazanması mümkün olabilir.

Çalışmada AE uçucu külü-YFC karışımlarının oda sıcaklığında ve 80 °C sıcaklıkta kür ile dayanım gelişimi incelenmiştir. Ayrıca karışımların açığa çıkardığı hidratasyon/aktivasyon ısısı ölçülerek mikroyapı gelişimi araştırılmıştır. İki farklı endüstriyel atık kullanarak, fabrikada üretilmiş kimyasal aktivatöre ihtiyaç duymayan karışımlar elde edilmesiyla çevresel etkisi çok düşük olan düşük ve orta dayanımlı sistemler elde edilebileceği gösterilmiştir.

Deneysel Çalışma

Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmada, Kardemir De mir Çelik Fabrikası'ndan öğütülmüş olarak temin edilen granüle yüksek fırın cürufu (YFC) ve Afşin Elbistan uçucu külü kullanılmıştır. Afşin Elbistan uçucu külü öğütülerek ve temin edildiği hali olmak üzere iki farklı şekilde karışımlarda kullanılmıştır. Kullanılan bağlayıcı malzemelerin kimyasal ve

fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmektedir. Numunelerin hazırlanmasında maksimum agrega boyutu 2.36 mm olan yıkanmış ve kurutulmuş silis kumu ile damıtılmış su kullanılmıştır.

Tablo 1: Kullanılan bağlayıcı malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Oksit	YFC	Uçucu Kül
CaO	34.56	33.3
SiO_2	39.90	19.4
Al_2O_3	11.13	9.5
Fe_2O_3	0.26	5.64
MgO	9.37	1.88
SO_3	0.09	12.9
K_2O	1.18	0.678
Na_2O	0.35	0.226
LOI	2.93	4.93 (7.94*)
Fiziksel Özellikleri		
Özgül Ağırlık	2.87	2.41 (2.67*)
Blaine İnceliği, cm^2/g	4100	2200 (7540*)

*parantez içindeki değerler öğütülmüş uçucu kül içindir.

Karışım Oranları

Hazırlanan harç karışımların ağırlıkça kum/bağlayıcı oranı 3.00 olup, hacimce su/bağlayıcı oranı (S/B) 1.435'tir. YFC içeren karışımlara özgül ağırlığı YFC'den daha düşük olan uçucu kül ikame edildiğinde toplam bağlayıcı hacmi artış göstermektedir. Bağlayıcı hacmindeki artış; sabit S/B oranı kullanıldığında harcın işlenebilirliğinin azalmasına, eş yayılma değeri kullanıldığında ise işlenebilirlik artarken dayanımın daha düşük olmasına neden olmaktadır. Hacimce sabit S/B oranı kullanarak üretilen harçların değerlendirilmesinde bağlayıcı su içeriğinin benzer olması hedeflenmiştir. Çalışmada sabit hacimce S/B oranı %100 YFC içeren harç karışımın yayılma miktarının %110 olduğu su miktarı referans alınarak belirlenmiştir. Toplamda 9 farklı harç karışımı yapılmış, kullanılan bağlayıcı malzemelere göre 2 farklı grupta toplanmıştır. Hazırlanan karışımlarda yüksek fırın curufu %25, %50, %75, %100 oranlarında uçucu kül ile ikame edilmiş, birinci grupta bağlayıcı olarak uçucu kül, ikinci grupta öğütülmüş uçucu kül kullanılmıştır. Karışım ve numunelerin isimlendirilmesi bağlayıcı oranlarına göre yapılmıştır. S, F, FG kısaltmaları sırasıyla yüksek fırın cürufunu, uçucu külü ve öğütülmüş uçucu külü ifade etmektedir. Örneğin; S75F25 isimli karışım %75 YFC ve %25 uçucu kül içeren karışımı, S50FG50 isimli karışım ise %50 YFC ve %50 öğütülmüş uçucu kül içeren karışımı belirtmektedir. Karışım oranları Tablo 2'de verilmektedir.

Harç Yapımı

Karışım oranlarına uygun şekilde, 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik harç numuneleri üretilmiştir. 24 saat sonunda kalıplardan çıkarılan numuneler oda sıcaklığında ve 80 °C sıcaklıkta nemli olmak üzere iki farklı küre tabi tutulmuştur. Oda sıcaklığında kür ile elde edilen numuneler in 7, 28 ve 56 gün sonunda ve 80 °C sıcaklıkta nemli kür ile elde edilen numunelerin 1,3,7,14,28 ve 56 gün sonunda basınç dayanımları belirlenmiştir.

Oda sıcaklığında kür edilen harç numunelerin su emme oranı, porozite (boşluk oranı) ve birim ağırlık değerleri, Arşimet metodu kullanarak, 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik numuneler üzerinden elde edilmiştir.

Hidratasyon ısısı ortaya çıkışının ölçümü için 20 µW hassasiyetinde 8 kanallı bir mikro kalorimetre cihazı kullanılmıştır. Harç karışımları içerisinde bulunan bağlayıcı hamura benzer özellikte, 5 g ağırlığındaki numuneler teste tabi tutulmuştur. Su ve bağlayıcı karıştırıldıktan sonra ivedi likle cihaza yerleştirilmiştir. Bağlayıcı hamurun 23°C'de açığa çıkardığı hidratasyon ısısı kararlı bir hale gelinceye kadar ölçümler yapılmıştır. Numune miktarı az olduğundan ölçümler iki kere yapılarak sonuçların tekrarla nabilirliliği kontrol edilmiştir ve her iki ısı çıkış verisi çok az fark göstermiştir.

Tablo 2: Karışım oranları.

Karışım	YFC (%)	Uçucu Kül (%)	YFC (g)	Uçucu Kül (g)	Su (g)	Su/Bağlayıcı (Ağırlıkça)
S100F0	100	0	450	0	225.0	0.50
S75F25	75	25	337.5	112.5	235.7	0.52
S50F50	50	50	225	225	246.5	0.55
S25F75	25	75	112.5	337.5	257.2	0.57
S0F100	0	100	0	450	267.9	0.60
S75FG25*	75	25	337.5	112.5	229.2	0.51
S50FG50*	50	50	225	225	233.4	0.52
S25FG75*	25	75	112.5	337.5	237.6	0.53
S0FG100*	0	100	0	450	241.9	0.54

* Öğütülmüş uçucu kül kullanılmıştır.

Bulgular ve Tartışma

Fiziksel Özellikler

Numunelerin su emme oranı, porozite, birim ağırlık ve yayılma değerleri Tablo 3'te verilmektedir. Sabit hacimce su/bağlayıcı oranı ile referans olarak kullanılan %100 curuf içeren karışıma uçucu kül veya öğütülmüş uçucu kül ikame edilmesiyle, karışımın su ihtiyacı artmaktadır. Burada yüksek oranda uçucu kül içeren taze harcın yayılma değerinin, yüksek oranda öğütülmüş uçucu kül içeren harcın yayılma değerinden daha düşük olduğu görülmektedir. Uçucu külün öğütülmesiyle oluşan özgül ağırlık artışı, karışımın su ihtiyacını azaltmakla beraber normal uçucu kül içerisinde bulunan hızlı bir şekilde karışım suyunu emebilen boşlukları da azaltmıştır.

%100 curuf içeren numuneler, 91 gün sonunda dayanım kazanmadığı için porozite ve su emme değerleri hesaplanamamıştır. Üretilen numunelerin birim ağırlıkları 1619-2012 kg/m^3 arasında değişmektedir. Uçucu kül ikame oranı arttıkça numunelerin birim ağırlıkları azalmakta, su emme ve porozite değerleri artmaktadır. Uçucu kül içeren numunelerde bu değişim öğütülmüş uçucu kül içeren numunelere göre daha yüksek olmaktadır. Bu durumun temel sebebi, uçucu kül içeren karışımların su içeriğinin öğütülmüş uçucu kül içeren karışımlara nazaran daha yüksek olmasıdır. %100 uçucu kül içeren numuneler en yüksek porozite ve su emme değerleri ile en düşük birim ağırlık değerlerine sahiptir.

Tablo 3: Üretilen numunelerin yayılma yüzdeleri, birim ağırlık, su emme ve porozi teleri.

Karışım	Yayılma (%)	Birim Ağırlık (kg/m^3)	Su Emme (%)	Porozite (%)
S100F0	110	2102	-	-
S75F25	80	1979	9.2	18.0
S50F50	65	1934	10.9	20.6
S25F75	60	1728	16.9	28.7
S0F100	30	1619	20.8	33.4
S75FG25*	65	2071	9.5	19.3
S50FG50*	60	2064	10.1	20.4
S25FG75*	65	2043	10.4	20.7
S0FG100*	60	1974	10.9	21.3

* Öğütülmüş uçucu kül kullanılmıştır.

Basınç Dayanımı

Oda sıcaklığında kür edilen harç numunelerinin basınç dayanımları Tablo 4'te verilmektedir. Oda sıcaklığında kür edilen numunelerin 1. ve 3. gün basınç dayanımları oldukça düşük olduğu için basınç dayanım testleri 7. günden itibaren değerlendirilmiştir. Oda sıcaklığında %100 YFC içeren numunelerin dayanım kazanmadığı görülmektedir. Uçucu kül ikame edilerek üretilen harçlarda en yüksek dayanım bütün yaşlarda %50 uçucu kül ikameli karışım harçlarda elde edilmiştir. Öğütülmüş uçucu kül ikame edilen karışımlarda en yüksek dayanım 28 günlük numunelerde %75 ikameli karışımlarda görülmektedir. %100 uçucu kül içeren numunelerin dayanımları 28 gün sonunda 1.8 MPa iken %100 öğütülmüş uçucu kül içeren numunelerin dayanımı 12.7 MPa olarak elde edilmiştir. Oluşan dayanım farklılığına; numunelerin su içeriğinin ve reaksiyon hızlarının farklı olması neden olmaktadır. Blaine inceliği, 2200 cm^2/g olan uçucu külün 7540 cm^2/g değerine kadar öğütülmesiyle uçucu külün karışımlarda reaksiyona girme hızı artmıştır. Bu durum oda sıcaklığında öğütülmüş uçucu kül içeren karışımların erken yaş dayanım değerlerinin uçucu kül içeren numunelerden çok fazla olması ile net bir şekilde görülmektedir.

Tablo 4: Oda sıcaklığında kür edilen numunelerin basınç dayanımı, MPa.

Numune	7. gün	28. gün	56. gün
S100F0	0	0	0
S75F25	4.1	5.7	4.7
S50F50	5.2	5.2	5.7
S25F75	1.9	3.7	3.4
S0F100	0.7	1.8	1.2
S75FG25*	4.2	5.9	6.0
S50FG50*	8.9	10.0	10.2
S25FG75*	11.2	13.1	12.7
S0FG100*	9.6	12.7	12.1

* Öğütülmüş uçucu kül kullanılmıştır.

80 °C sıcaklıkta kür edilen numunelerin basınç dayanımları Tablo 5'te verilmektedir. Numunelerin kür sıcaklığı ve nem miktarının artırılmasıyla, erken yaş dayanımları artmıştır. 80 °C sıcaklıkta kür edilen YFC içeren karışımlar 3. günden itibaren dayanım kazanmaya başlamıştır. %100 YFC içeren numulerin 28 günlük dayanımı 20.4 MPa olarak elde edilmiştir. YFC'ye uçucu kül ve öğütülmüş uçucu kül ikame edilmesiyle dayanım değerleri azalmaktadır. %50 uçucu kül içeren numuneler en yüksek 28 gün dayanım değerine sahiptir. Oda sıcaklığında kür edilen %100 uçucu kül ve %100 öğütülmüş uçucu kül içeren numunelerin dayanım sonuçlarına benzer şekilde, 80 °C'de kürlenen bahsigeçen numunelerin aralarında ciddi dayanım farklılıkları devam etmektedir.

Tablo 5: 80 °C sıcaklıkta kür edilen numunelerin basınç dayanımı, MPa.

Numune	1. gün	3.gün	7. gün	14. gün	28. gün	56. gün
S100F0	0	0	15	17	20.4	19.0
S75F25	4.1	3.2	4.1	4.1	5.7	6.2
S50F50	5.9	5.7	6.2	6.9	9.3	9.1
S25F75	4.6	4.7	4.2	5.8	6.8	7.4
S0F100	2.0	3.0	2.4	3.3	3.5	3.7
S75FG25*	1.7	2.0	2.3	2.4	3.8	4
S50FG50*	4.4	5.2	5.4	4.8	6.4	5.8
S25FG75*	8.0	7.9	7.9	7.7	8.6	8.4
S0FG100*	10.2	11.8	12.8	11.4	11.9	11.1

* Öğütülmüş uçucu kül kullanılmıştır.

Hidratasyon Isısı

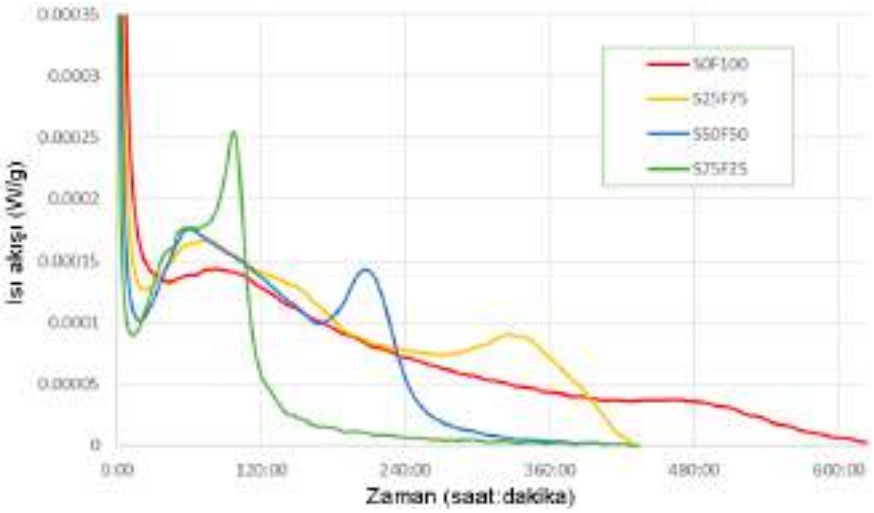
Karışımların hidratasyon ısısı ortaya çıkarışları Şekil 1 ve 2'de verilmektedir. %100 YFC içeren karışımın hidratasyon ısısı ortaya çıkarışında 20 gün boyunca hiç bir değişikliğe rastlanmamıştır. Uçucu kül ve öğütülmüş uçucu kül içeren karışımların hidrasyon ısısı ortaya çıkarış eğrileri benzerlik göstermekte, öğütülmüş uçucu kül içeren karışımların hidratasyon ısısı ortaya çıkarışları daha hızlı olmaktadır. Hidratasyon ısısı ortaya çıkış eğrileri incelendiğinde; en yüksek ısı ortaya çıkışı %25 uçucu kül içeren karışımda görülmektedir. Burada YFC'nin uçucu külün hidratasyonuna ve ısı ortaya çıkışına katkıda bulunduğu görülmektedir.

Öğütülmüş uçucu kül içeren karışımlara bakıldığında, erken ve geç hidratasyon ısısı ortaya çıkarışlarında uçucu kül içeren karışımlara göre farklılıklar görülmektedir. Öğütülmüş uçucu kül miktarının artışı ile erken ve geç hidratasyon ısısı ortaya çıkışları değişiklik göstermiştir. Öğütülmüş uçucu kül kullanımı ile erken hidratasyon ısısı çıkışları daha fazla etkilenmiş ama daha sonraki ısı çıkışları değişmemiştir. Bir başka değişle YFC, öğütülmüş uçucu külün erken hidratasyon ısısı ortaya çıkarışını sınırlandırmıştır.

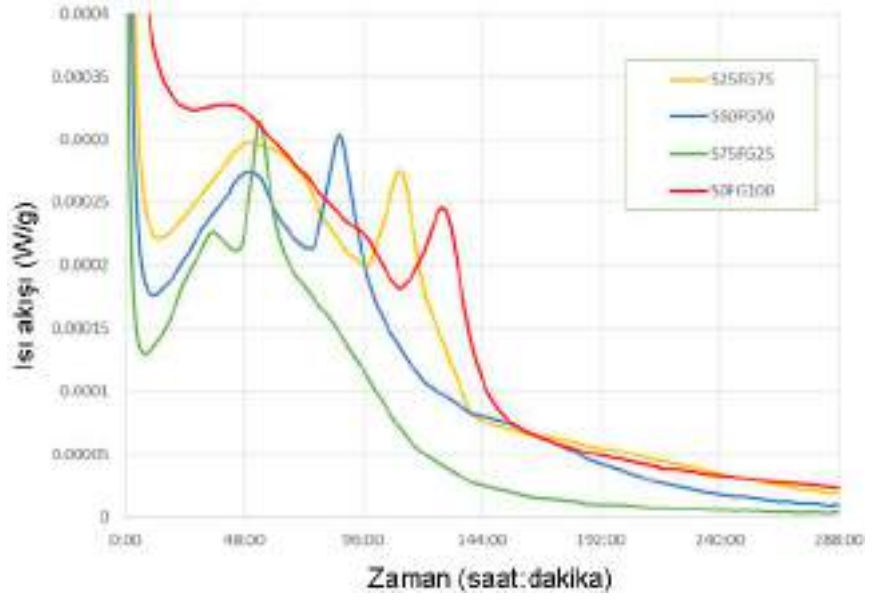
Her iki şekilde de karışımların ısı ortaya çıkarış eğrilerinin, standart portland çimentosu hidratasyonu için elde edilen eğrilere benzemediği görülmektedir. Karışımların geç yaşlarda (öğütülmemiş küllü karışımlarda başlangıçtan yaklaşık 5-15 gün, öğütülmüş küllü karışımlarda başlangıçtan yaklaşık 2-6 gün sonra) beklenmedik ısı çıkış hızı

artışları gözlenmektedir. Bu hareketin hangi kimyasal tepkimeye veya dönüşüme bağlı olduğu şu aşamada açık değildir.

Numunelerin çıkardığı toplam ısı tipik portland çimentosu hidratasyon ısısı ile karşılaştırıldığında oldukça düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 1: Uçucu kül içen numunelerin hidratasyon ısısı ortaya çıkarışları.



Şekil 2: Öğütülmüş uçucu kül içen numunelerin hidratasyon ısısı ortaya çıkarışları.

Sonuçlar

Bu çalışmada Afşin Elbistan uçucu külü (temin edildiği haliyle veya öğütülmüş olarak) ile yüksek fırın cürufu belli oranlarda birbirleriyle ve su ile karıştırılarak harç numuneleri hazırlanmış, dayanım ve tepkime ısısı ölçülmüştür. Çalışmadan şu sonuçlar çıkarılabilir:

- Uygun kimyasal yapıdaki uçucu küller ile yüksek fırın cürufu karıştırılarak fabrika üretimi kimyasallar kullanılmadan düşük-orta dayanımda harçlar ve betonlar yapmak mümkün olabilir. Bu tip karışımlar düşük yüklere maruz kalan pek çok uygulama için uygun olabilir.
- Oda sıcaklığında kür ile 13.1 MPa, 80 °C'de kür ile 20.4 MPa 28. gün dayanımına sahip harçlar elde edilebilmiştir.
- Bazı numunelerin 28-56 gün arasında düşük oranda dayanım kayıpları gösterdiği gözlenmiştir.
- Kül-cüruf karışımının ısı ortaya çıkarış eğrisi portland çimentosu hidratasyonundan oldukça farklıdır. Çok geç yaşlarda ısı çıkışı hızı artmaktadır. Bu davranışın sebebi numunel er üzerinde zaman a bağlı x-ışını kırınım ve termal analiz deneyleri yapılarak daha iyi anlaşılabilir.
- Numunelerin hidratasyon ısısı portland çimentolu karışımlarınkine kıyasla oldukça düşüktür.
- Alçıtaşı vb. ucuz ve doğal aktivatör malzemeler ile elde edilen dayanımların daha da artırılması mümkün olabilir.

Kaynaklar

Adriano, D.C., A. L. Page, A. A. Elseewi, A. C. Chang, I. Straughan (1980). Ut ilization and disposal of fly ash and other coal residues in terrestrial ecosystems: A review, Journal of Environmental Quality 9 (3), 333-344.

Davidovits, J. (2008). Geopolymer chemistry and applications , 3rd Ed., Institut Géopolymère, St. Quentin, France.

Erdoğan, B., F.Katnaş, P.Türker, A.Yeğinobali (2003). Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.

Erdoğan, T.Y. (2010). Beton. ODTU Yayıncılık, Ankara.

Erdoğan, T.Y. (1997). Admixtures for Concrete. METU Press, Ankara

Gartner , E. (2004). Industrially interesting approaches to "low-CO2" cements. Cement and Concrete Research 34 (9), 1489-1498.

Gu, K., F. Jin, A. Al-Tabbaa, B . Shi (2014) Activation of ground granulated blast furnace slag by using calcined dolomite , Construction and Building Material s 68, 252-258.

Jin, Z., X. Lu, S. Hu (2011). Alkali activation of granulated blast furnace slag, Advanced Materials Research 158, 1-11.

Kim, M.S., Y. Jun, C. Lee, J.E. Oh (2013) Use of CaO as an acti vator for producing a price-competitive non-cement structural binder using ground granulated blast furnace slag, Cement and Concrete Research 54, 208-214.

Melo Neto, A.A., M.A. Cincotto, W. Repette (2010). Mechanical properties, drying and autogenous shrin kage of blast furnace slag activated with hydrated lime and gypsum. Cement and Concrete Composites 32(4), 312-318.

Škvára, F. (2007). Alkali activated materials or geopolymers. Ceramics-Silikaty , 51 (3), 173–177.

Provis, J.L., and J.S.J. van Deventer (200 9). Geopolymers: Structures, processing, properties and industrial applications , Woodhead Publishing, Abingdon UK.

.

Pomza Agregalı Kendiliğinden Yerleşen Hafif Betonların Donma-Çözülme Direnci

Tahir Gönen
Uşak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
(276) 276 21 21 /2732
tahir.gonen@usak.edu.tr

Salih Yazıcıoğlu
Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
(312) 202 88 67
yazicioglus@gmail.com

ÖZ

Bu çalışmada, pomza ve genleştirilmiş perlit agregası ile 4 farklı kendiliğinden yerleşen hafif beton (KYHB) üretilmiştir. Üretilen KYHB'lerin kendiliğinden yerleşebilirlikleri ile donma-çözülme dirençleri incelenmiş ve bu özellikler dere agregalı kendiliğinden yerleşen beton (KYB) ve vibrasyonla sıkıştırılan hafif beton (HB) ile karşılaştırılmıştır. Kendiliğinden yerleşebilirliklerinin belirlenmesi için slump yayılma, V hunisi, L kutusu, V hunisi 5 dakika gecikmeli akış süresi ve elek ayrışma deneyleri yapılmıştır. Kendiliğinden yerleşebilmeyi sağlayan numunelere donma-çözülme deneyleri uygulanmış ve tüm numuneler 100 sert çevrime (+20 ve -20 $^{\circ}$C) tabi tutulmuştur. Deney öncesi ve sonrasında numunelerin ultra ses hızları ölçülerek dinamik elastisite modülleri hesaplanmış ve aynı numuneler üzerinde basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. KYB ve KYHB'ler üzerinde yapılan kendiliğinden yerleşebilirlik deneyleri sonucunda, genleştirilmiş perlit agregası takviyesinde en fazla %30 oranında yer değiştirmeye kadar kendiliğinden yerleşebilme özellikleri sağlanabilmiştir. Taze beton deney sonuçlarına göre agreganın birim ağırlığı azaldıkça V hunisi boşaltma süresinin uzadığı görülmüştür. Dere agregalı KYB'lerin birim ağırlıkları 2300-2400 g/dm^3 iken KYHB'nin birim ağırlığı, genleştirilmiş perlit ilave edilmesi durumunda 1700 g/dm^3'e kadar düştüğü görülmüştür. Birim ağırlığa düşen basınç dayanımında KYHB'lerin KYB'lere göre daha verimli oldukları görülmüştür. Fakat donma-çözülme deneyleri sonrasında; agregaların hafifleşmesinin kendiliğinden yerleşen hafif betonların donma-çözülme dayanıklılıklarının azalmasına sebep olmuştur.

Anahtar Sözcükler: Kendiliğinden yerleşen beton, hafif beton, donma çözülme, pomza.

Giriş

Depremler esnasında; yapılara gelen yükler, yapının ağırlığı ile doğru orantılıdır. Zati ağırlığı fazla olan bir yapı, deprem sırasında daha fazla salınım yapmaktadır. Yapılarda hafif beton kullanılması durumunda yapının zemine aktardığı yük azalır. Binalarda hafif agregadan yapılmış beton kullanıldığında yapının toplam kütlesi azalmakta, dolayısıyla da binanın iskeletini oluşturan temele daha az yük binmektedir. Bir başka deyişle, hafif malzemelerle yapılan binalarda deprem sırasında oluşan eylemsizlik kuvvetleri de azalacağından sarsıntıların bina üzerindeki yıkıcı etkileri zayıflar (Doğan ve Şener, 2004). Hafif beton kullanımının, bina ölü yükünü azaltmasının ve ısı yalıtımı sağlaması gibi avantajlarının dışında dezavantajları da bulunmaktadır. Başlıca bilinen dezavantajları; işlenebilme güçlüğü ve basınç dayanımlarının nispeten az olmasıdır.

Son yıllarda beton teknolojisinde önemli gelişmelerden biri de kendiliğinden yerleşen betondur (KYB). İlk kez 1990 yılında Japonya'da geliştirilen KYB, herhangi bir sıkıştırmaya gerek kalmadan kendi ağırlığınca kalıbına yerleşebilen ve sıkışabilen bir beton türüdür. KYB'lerin malzeme maliyetinin yüksekliği, su geçirimsizliklerinden dolayı iç bölgelerdeki kür problemi, hedeflenen dayanımdan yüksek çıkması ve daha gevrek olması gibi problemleri bulunmaktadır. Hafif betonun kendiliğinden yerleşebilmesi ya da KYB'de hafif agregası kullanılması ile hem KYB'nin hem de hafif betonun dezavantajları ortadan kalkabilir (Gonen, 2010) .

Hafif beton üretmende en yaygın yollardan birisi hafif agrega kullanımıdır (Bingöl ve Gül, 2004; Türkmen ve Kantarcı 2006). Literatürde; kendiliğinden yerleşen betonda hafif agrega kullanımı üzerine çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Mevcut çalışmalar genellikle, tasarım, işlenebilirlik, mekanik ya da reolojik özellikler üzerine yoğunlaşmıştır. Durabilite problemleri üzerine çok fazla çalışmaya rastlanılmamıştır (Topçu ve Uygunoğlu, 2010; Choi ve diğ., 2006; Lo ve diğ., 2007; Hwang ve Hung, 2005; Soleymani ve diğ., 2013).

Donma -çözülme çimentolu sistemlerde bozulmaya sebep olan temel faktörlerden birisidir. Beton içerisinde bulunan su donma sırasında %8-9 civarında bir genleşmeye neden olur. Bu olay betonda çekme gerilmelerinin oluşmasına neden olur. Ortaya çıkan gerilmelerin betonun çekme direncini aşması durumunda betonda çatlaklar ve çatlakların ilerlemesiyle parçalanmalar gözlenir. Sertleşmiş betonun donma sonunda çatlamasına neden olan en baskın etken bünyesindeki suyun miktarıdır. Su miktarı fazlalaştıkça betonun donma-çözülme süreci sonunda bozulup dağılma riski artar. Buna karşılık boşluklarında su bulunmayan betonlarda donma-çözülme olgusu zararlı etki yaratmaz. Tamamen boşluksuz bir beton üretmek imkânsızdır. Boşlukların suya doygun olması en büyük risktir. Boşluklar tamamen suyla dolu olmasa beton zarar görmeyebilir. Suyla dolu olm ayan boşluklar bir çeşit yastık vazifesi görecektir. Nitekim donan suyla gelen hacim artışı bu boşluklara doğru büyüyecek ve gerilme meydana gelmeyecektir.

Hafif agrega kaynağı açısından Türkiye'de zengin kaynakların bulunması ve KYB ile HB'nin birleşmesi ile daha iyi bir beton türü olacağı düşüncesi ile bu çalışmada kendiliğinden yerleşen hafif beton (KYHB) üretilmiştir. Bu amaçla bazaltik pomza ve genleştirilmiş perlit agregaları ile KYHB üretilmiş ve dere agregalı KYB ile karşılaştırmalı olarak donma -çözülme direnci ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

Deneysel Çalışma

Malzemeler

Çalışmada 3 farklı kökenli agrega kullanılmıştır. Bunlar; dere, bazaltik pomza ve genleştirilmiş perlit agregasıdır. Dere agregası normal ağırlıklı KYB üretimi için; pomza ve genleştirilmiş perlit agregası ise KYHB üretiminde kullanılmıştır. Dere ve bazaltik pomza agregası sırasıyla Elazığ'ın Palu ve Yeniköy yörelerine aittir. Genleştirilmiş perlit ise Etiper marka olarak piyasadan temin edilmiştir. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Dere ve pomza agregaları 0–4 ve 4–16 tane sınıflarına ayrılarak kullanılmıştır. Genleştirilmiş perlit agregası ise sadece 0-4 mm olarak kullanılmıştır.

Tablo 1 Agregaların fiziksel özellikleri.

	Pomza		Dere		Perlit
	4-16 mm	0-4 mm	4-16 mm	0-4 mm	0-4 mm
Kuru özgül ağırlık faktörü (kg/dm^3)	1,91	2,07	2,67	2,73	0,19
Su emme (%)	8,3	17,7	2,0	2,0	140
Gevşek birim ağırlık (kg/m^3)	789	836	1470	1580	0,022
500 devir aşınma (%)	42		5,6		

Deneysel çalışmalarda Elazığ çimento fabrikasında üretilen CEM I 42.5 N tipi çimento kullanılmıştır. Çalışmada toz malzeme olarak uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Uçucu kül, Sivas Kangal termik santralinden temin edilmiştir. Kangal termik santralinden elde edilen uçucu kül C sınıfıdır. Kullanılan çimento ve uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Verilerin hepsi üretici firma verileridir.

Tablo 2 Çimento ve toz malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Kimyasal Bileşim (%)	PÇ	Uçucu kül
S(SiO_2)	21.12	38,34
A(Al_2O_3)	5.62	16,69
F(Fe_2O_3)	3.24	5,11
C(CaO)	62.94	27,62
MgO	2.73	1,60
SO_3	2.30	4,44
Na_2O	-	-
K_2O	-	-
Cl	-	-
Kızdırma Kaybı	1.78	0,79
Fiziksel Özellikler		
Yoğunluk (g/cm^3)	3.10	2,3
Özgül Yüzey cm^2/g (cm^2/g)	3370	2343

Deneylerde kimyasal katkı olarak Sika Yapı Kimyasalları A.Ş'den temin edilen üçüncü nesil süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Kullanılan katkının pH değeri 3.7 ve yoğunluğu 20 °C'de 1.03–1.07 kg/l'dir.

Karışımlar

Üretilen serilerin karışım oranları Tablo 3'de verilmiştir. Pomza agregası ile üretilen KYHB'lerde birim ağırlığı biraz daha düşürebilmek için karışımın ince agregası, farklı oranlarda perlit agre gası ile yer değiştirilmiştir. Genleştirilmiş perlit agregası pomza agregasının %30'una kadar yer değiştirilerek kullanılmıştır. Hazırlanan KYHB'leri kıyaslamak için iki farklı dozaja sahip dere agregalı KYB üretilmiştir. Bu karışımların rumuzları düşük dozajlı KYB1 ve yüksek dozajlı KYB2 serisidir. Tüm karışımları kıyaslamak için ayrıca KYB özelliği olmayan, vibrasyon ile sıkıştırılmış geleneksel hafif beton (HB) karışımı hazırlanmıştır.

Karışımlarda farklı birim ağırlıkta agregalar olması sebebiyle, iri agrega miktarı hacimce 310 litre/m ^{3} olarak sabit alınmıştır. Bu değer EFNARC (2005) de malzeme miktarları için tavsiye edilen sınır değerlere uygundur. Bütün numuneler standart kirece doygun suda kür edilmiştir. Kalıptan çıkarılan numuneler karanlık bir odaya alınmış ve bu ortamın günlük olarak sıcaklık ve nem durumu takip edilmiştir. Ortalama %40–50 arasında bağıl nem ve 18–23 $^{\circ}$C sıcaklık değişimi gözlenmiştir Bu şekilde deney zamanına kadar bekletilen numuneler çalışmada hava kürü olarak bahsedilmiştir. Basınç dayanımı için 7, 28 ve 90 günde eğilmede çekme dayanımı için ise sadece 28 günde kür şartının etkisi incelenmiştir.

Tablo 3 Farklı agregalar ile üretilen KYB ve KYTHB'lerin karışım oranları.

Rumuz	Açıklama	Toplam toz (kg/m^3)	PÇ (%)	UK (%)	Perlit 0-4 (%)	Pomza (kg/m ^{3})		Dere (kg/m^3)	
						0-4	4-16	0-4	4-16
KYHB	Kendiliğinden yerleşen hafif beton	550	80	20	0	557	531		
KYHB10		550	80	20	10	510	532		
KYHB20		550	80	20	20	461	546		
KYBH30		550	80	20	30	410	540		
KYB1	Kendiliğinden yerleşen beton	420	80	20	-			973	791
KYB2		500	80	20	-			874	813
HB	Hafif beton	440	100	-	-	619	590		

Taze beton deneyleri

Üretilen KHYB'lerin işlenebilirlikleri EFNARC'a (2002 ve 2005) göre belirlenmiştir. Karışımlar 56 dm^3 kapasiteli pan tipi mikserde hazırlanmıştır. Tablo 4 'de belirtilen taze beton deneylerine yetecek miktarda KYHB karışımı hazırlandıktan sonra, aynı mikserden çıkan harç ile sırasıyla slump yayılma, V hunisi, L kutusu, V hunisi 5 dk gecikmeli akış süresi ve son olarak elek ayrışma deneyleri yapılmıştır.

Deney sonuçları Tablo 4 'de verilen sınır değerler ile kıyaslanmıştır. Slump yayılma deneylerinde KYHB ve KYB karışımları herhangi bir sıkıştırma işlemine tabi tutulmaksızın abrams konisine doldurulmuş ve koninin kaldırılması sonrasında taze betonun toplam yayılma çapı birbirine dik iki yönde ölçülerek ortalamaları alınmıştır. Şekil 1'de yapılan bir ölçüm sonrası yayılmış harcın görüntüsü verilmiştir.



Şekil 1 Slump yayılma deneyi.

KYB ve KYHB'lerin viskozite özelliklerini belirlemek için V hunisi kullanılmıştır. V hunisi taze harç ile doldurulduğunda hemen alt tarafta bulunan kapağı açılarak boşalma süresi ölçülmüştür. Bu sürenin EFNARC'da (2002) 8-25 saniye arasında olması gerektiği belirtilmektedir. Numunelerin geçiş yeteneğini ölçmede standart L kutusu aparatı kullanılmıştır. L kutusu deneyi EFNARC'a (2005) göre yapılmıştır. Harcın karılma işlemi biter bitmez bekletilmeden L kutusunun kapalı bölümüne herhangi bir sıkıştırılma işlemi yapılmadan doldurulmuştur. Doldurmanın hemen ardından alt tarafta bulunan kapak açılmış ve harcın demir çubuklar arasından geçiş yeteneği iki uç noktadaki kotun birbirine oranı ile tespit edilmiştir.

KYB ve KYHB'lerin ayrışma direncini belirlemek amacıyla iki farklı deney yapılmıştır. V hunisinde taze harç 5 dakika bekletilmiş ve bu süre sonrasında boşalma süresi ölçülmüştür. Ayrışmanın olmadığını söyleyebilmek için bu sürenin ilk boşalma süresine göre en fazla 3 saniye gecikme olması gerektiği EFNARC'da (2002) belirtilmiştir. KYB ve KYHB'lerin ayrışma direnci için ayrıca elek ayrışma deneyi yapılmıştır. Bu deneyde mikserden alınan taze harç ilk önce bir kapta 15 dakika bekletilmiştir. Bu süre zarfında ayrışma veya kusma olup olmadığı gözlenmiştir. Bu beklemenin ardından kaptaki taze harç 5 mm kare göz açıklıklı eleğe 50 cm yükseklikten boşaltılmıştır. Deney sonucunda elek altına geçen malzemenin tüm malzemeye oranı kaydedilmiştir. Bu oranın %20'e kadar olabileceği belirtilmiştir (EFNARC 2005) .

Tablo 4 Kendiliğinden yerleşen betonların kabul kriterleri.

Ölçülen özellik	Deney metodu	Sınır Değerler [8,9]		
Viskozite	V Hunisi akış süresi (sn)	≤8		≤25
Akışkanlık	Slump yayılma (mm)	550-650	660-750	760-850
Geçiş yeteneği	L kutusu deneyi (mm/mm)		≥ 0.8	
Ayrışma direnci	V hunisi 5 dk gecikmeli akış süresi (+sn)		0-3sn	
Ayrışma direnci	Elek testi (%)		≤ 20	

Donma-çözülme deneyleri

ASTM C666 –92 (1992) göre donma-çözülme testleri ya 300 çevrim yapılıncaya kadar ya da dinamik elastisite modülü orijinal değerin %60'ına ulaşıncaya kadar sürdürülür. ASTM' de ayrıca çözülme sıcaklığının + 4 ^{0}C, donma sıcaklığının -20 ^{o}C ve donma hızının da 14 ^{0}C/saat olması gerektiğini belirtmektedir. Ancak dünyanın çoğu yerinde donma hızının 3 $^\circ$C/saat'e nadiren ulaştığı görülür (Neville, 1987). TS 3449 (1980) iki metot tarif edilmektedir . Bunlar havada donma -çözülme ve suda donma-çözülmedir.

Bu çalışmada pomza agregasından dolayı yüksek poroziteli numuneler bulunmaktadır. Ancak bu boşlukların büyük bir kısmı agrega fazının içerisindedir. Donma-çözülme direncini arttırmak için ayrıca hava sürükleyici katkı kullanılmamıştır. Çalışma kaps amında tüm numuneler 100 sert çevrime (+20 ve -20 $^\circ$C) tabi tutulmuştur. Her bir çevrim bir donma ve bir çözülmeden ibarett ir. Bu çevrim sayısı Jansen'in (2002) önerisine uygundur. Ayrıca birçok araştırmacı bu çevrim sayısını uygulamıştır (Jansen, 2002; Polat ve diğ., 2010; Güneysi ve diğ., 2014). Deneyler 10×10×10 cm küp numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Ultra ses hızı ve dinamik elastisite modülü

Ultra ses hızı betonun dayanımı ve diğer bazı özellikleri hakkında ön fikir verir. Ultra ses hızı ölçülerek betonun yaklaşık dayanımı ve dinamik elastisite modülü hesaplanabilmektedir. Betonların donma-çözülme direnci ile dinamik elastisite modülü arasında ilişki vardır (Neville, 1987). Beton numuneden geçen ses hızı hesaplanmasında ultra ses cihazı kullanılmıştır. Bu cihazda, dalga gönderici ve alıcı başlıklar arasında kalan, yüzeyleri temiz numunelerden sesüstü dalgaların ne kadar zamanda geçtiği belirlenmiş ve (1) no'lu bağıntı ile dalga hızı hesaplanmıştır (Erdoğan 2003).

$$V = (h/t) \times 10^6 \qquad (1)$$

Formüldeki;V = Sesüstü dalga hızı (m/sn), h = Beton numunenin sesüstü dalga gönderilen yüzeyi ile dalganın alındığı yüzeyi arasındaki mesafe (m), t = Sesüstü dalganın gönderilmiş olduğu beton yüzeyinden alındığı yüzeye kadar geçen zaman (µsn) dır. Dinamik elastisite modülü, donma-çözülme deneylerinde hasar gören ve görmeyen numunelerde kıyaslama yapmak için hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar ASTM C 215'de tarif edilen 2 no'lu denklem ile yapılmıştır. Burada; E_d dinamik elastisite modülü (MPa), V ultra ses hızı (km/sn), n betonun yoğunluğu (kg/m^3), µ poisson oranı. Poisson oranı bu çalışmada 0.15 alınmıştır.

$$E_d = \frac{V^2 n(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} \qquad (2)$$

Ultrasonik hız ölçümleri donma-çözülme deneylerinden önce ve sonrasında ölçülmüştür. Numunelerde iki farklı yönde okuma yapılmış ve bunların ortalamaları kaydedilmiştir. Ultrasonik deney yönteminde; ses üstü dalgaların betonun içerisinden geçme süresini ölçmek üzere tertiplenen bir cihaz kullanılmıştır. Donma-çözülme deneylerinde doygun yüzey kurusu (DYK) haldeyken ultra ses geçiş hızlarının okumalar yapılmıştır. Çalışmada donma-çözülme çevrimine başlamadan önce numunelerin ultra ses hızları ve buna bağlı hesaplanan dinamik elastisite modülü ile

ağırlıklar kaydedilmiştir. Kaydedilen bu değerler donma-çözülme sonrası ile kıyaslanmıştır. Ayrıca çevrimler sonrası basınç dayanımları çevrime tabi tutulmayan kontrol numunelerinin basınç dayanımlarıyla kıyaslanmıştır

Deney sonuçları

Taze beton deney sonuçları

Farklı agregalar ile üretilen kendiliğinden yerleşen taze betonlara ait özellikler Tablo 5'te verilmiştir. KYB ve KYHB'ler üzerinde yapılan kendiliğinden yerleşebilirlik deneyleri sonucunda, genleştirilmiş perlit agregası takviyesinde en fazla %30 oranında yer değiştirmeye kadar kendiliğinden yerleşebilme özellikleri sağlanabilmiştir. Kendiliğinden yerleşebilirlik özelliği göstermeyen numunelerin sonuçlarına bu çalışmada yer verilmemiştir. Genleştirilmiş perlit agregasının yüzey özellikleri bazaltik pomza agregasının yüzey özelliklerine benzerdir. Ancak bu iki hafif agreganın birim ağırlıkları arasında oldukça fark vardır. Bu farklılık V hunisi 5 dk gecikmeli akış süresinin biraz artmasına neden olmuştur. Bu artış en fazla KYHB30 serisinden elde edilmiştir. Tablo 5'de görüldüğü gibi elek ayrışma testi de bu serinin ayrışma eğiliminde olduğunu göstermektedir.

Tablo 5 'da verilen taze beton özellikleri Tablo 4 'deki EFNARC sınır değerleri ile kıyaslandığında tüm karışımların akışkanlık özelliğini sağladıkları görülmüştür. Geçiş yeteneği açısından da tüm serilerin bloklanma oranı 0.80'nin üstünde kaldığından bu özelliği sağladıkları görülmüştür. Ayrışma direnci parametresi ise iki bağımsız deney ile ölçülmüştür. Bu deneylerden elek ayrışma testi ile yapılan ayrışma direnci sınır değerlerini tüm karışımlar sağladığı halde, V hunisi 5 dakika gecikmeli testine göre ayrışma direncini KYHB10 ve KYHB30 serileri sağlamamıştır. EFNARC (2002) segragasyon direncini belirlemede 5 dakika gecikmeli V hunisi deneyi önerilmiştir. EFNARC (2005) ise 5 dakika gecikmeli V hunisi testinin yerine elek ayrışma testi önerilmiştir. Bu bağlamda geçerliliği kalmamış olmakla birlikte 5 dakika gecikmeli V hunisi testine bu çalışmada yer verilmiş ve elek ayrışma testi ile bulunan viskosite ölçümleri arasından anlamlı bir ilişkinin olmadığı görülmüştür.

Genleştirilmiş perlit agregasının bazaltik pomza agregasına göre hafif olmasından dolayı bu agregalar yukarıya doğru çıkma eğilimindedir. Karışımda herhangi bir değişiklik (genleştirilmiş perlit-pomza ikamesi hariç) olmadığından dolayı genleştirilmiş perlit agregası miktarındaki artışla birlikte segregasyon direncinde azalma olmuştur. Kendiliğinden yerleşebilme özellikleri açısından dere agregalı seriler KYB1 ve KYB2 betonları incelendiğinde slump yayılma çaplarının diğer seriler ile benzer olmasına karşın V hunisi sürelerinin kısalığı dikkat çekmektedir. Dere agregası birim ağırlığının bazaltik pomza ve genleştirilmiş perlit agregasına göre daha büyük olmasının, V hunisinden boşalmayı hızlandırmada etkili olduğu düşünülmektedir.

Genel olarak kendiliğinden yerleşebilme özellikleri incelendiğinde ayrışma direnci iyi olan karışımların slump yayılma çaplarının azaldığı görülmektedir. Slump yayılma çapının artması ayrışma riskini ortaya çıkarmaktadır. Kendiliğinden yerleşebilme özellikleri açısından dere agregalı seriler KYB 1 ve KYB 2 incelendiğinde slump yayılma çaplarının diğer seriler ile benzer olmasına karşın V hunisi sürelerinin kısalığı dikkat çekmektedir. Dere agregasının birim ağırlığının pomza ve perlit agregasına göre

daha ağır olmasının, V hunisinden boşalmayı hızlandırmada etkili olduğu düşünülmektedir.

Tablo 5 Karışımlarının taze beton özellikleri ve birim ağırlıkları.

Beton tipi	Slump (mm)	V hunisi İlk (s)	V hunisi 5 dk (s)	L kutusu (mm/mm)	Elek ayrışma (%)	Taze beton br.ağr. (gr/dm^3)	Etüv kurusu br. Ağr. (gr/dm^3)
KYHB0	630	10	+3	0.87	7.9	1920	1785
KYHB10	660	11	+4	0.82	6.4	1900	1748
KYHB20	690	13	+2	0.80	7.0	1880	1722
KYHB30	660	11	+6	0.80	12.1	1860	1706
KYB1	670	5	+0	0.90	2.5	2385	2292
KYB2	710	4	+1	0.94	14	2395	2336
HB	-	-	-	-	-	1895	1675

Donma-çözülme test sonuçları

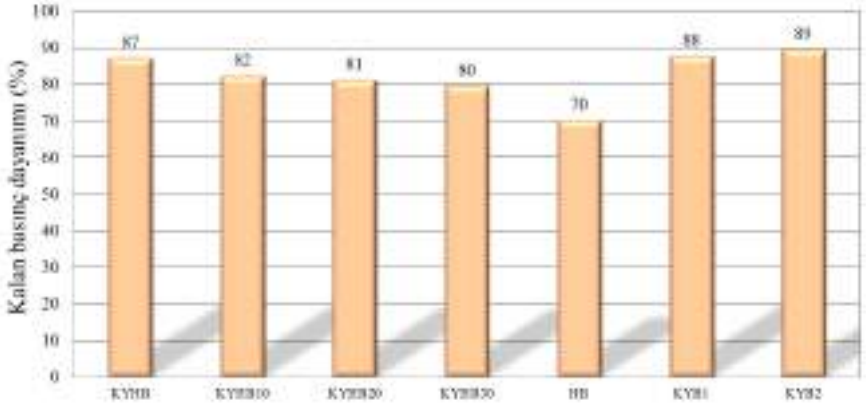
Kendiliğinden yerleşme özelliği donma-çözülmede Tablo 6 'de görüldüğü gibi etkili parametrelerden biri olmuştur. Vibrasyon ile sıkıştırılan hafif beton (HB) KYHB'lerden daha fazla dayanım kaybetmiştir. Donmaya karşı dayanıklılığı belirleyen en büyük etken betonun boşluk yapısıdır. Donma sonucu suyun buza dönüşmesi ile hacimce %9'luk artışın getirdiği basınç (buz basıncı) dayanıklılığı belirlemektedir. Buz basıncının etkili olabilmesi betonun doygunluk derecesine bağlıdır. Betonda yeterli boşluk varsa ya da tamamen doygun değil ise donma-çözülmeden çok fazla etkilenmeyebilir. HB numunesi en yüksek porozite ve kılcal su emme değerini sahip olan seridir. Donma -çözülme sırasında da yüksek boşluk oranı ve kılcal kanalların çokluğu ile hasar sürecinin azalmasına sebep olduğu düşünülmektedir.

Tablo 6 Farklı agregalar ile üretilen kendiliğinden yerleşen betonların donma çözülme sonrası ultra ses, ED ve basınç dayanımları.

	Kontrol				100 Çevrim		
	Ultra ses	ED	Basınç dayanımı		Ultra ses	ED	Basınç dayanımı
	km/sn	GPa	MPa		km/sn	GPa	MPa
KYHB	3,95	26.5	60.9	1785	3.82	25.4	53.1
KYHB10	3,94	24.4	60.1	1748	3.85	23.8	49.4
KYHB20	3,65	20.6	57.7	1722	3.50	19.3	46.9
KYHB30	3,95	24.0	55.0	1706	3.83	23.0	43.8
HB	3,8	21.8	47.0	1675	3.63	21.0	33.0
KYB1	4,57	43.0	69.1	2292	4.46	40.7	60.6
KYB2	4,85	49.5	78.0	2336	4.75	46.5	69.8

Çalışmada donma-çözülme direncini arttırmak için ayrıca hava sürükleyici katkı kullanılmamıştır. Hale ve diğ. (2009) su/çimento oranı 0.36'dan küçük karışımlarda donma-çözülme dayanıklılığı için hava sürükleyici katkı kullanmaya gerek olmadığını belirtmişlerdir. Bundan dolayı hiçbir karışım hava sürükleyici katkı içermemektedir. Agrega tipinin donma -çözülme direncine etkisinde dere, pomza ve genleştirilmiş perlit agregaları kullanılmıştır. En fazla dayanım kaybı kendiliğinden yerleşme özelliği bulunmayan hafif betonlu serilerde meydana gelmiştir. Kendiliğinden yerleşebilme özelliği olan KYB1 ve KYB2 ile KYHB arasındaki dayanım kaybı açısından fark ise

%1-2 mertebesindedir. Şekil 2'de görüldüğü gibi agregalar hafifleştikçe donma-çözülmeye dayanıklılıkları azalmıştır. Bünyelerinde fazla miktarda su tutabilmeleri ve donma sırasında zayıf yapıları donma-çözülme dayanıklılığını azaltmıştır.



Şekil 2 Farklı agregalar ile üretilen KYB'lerin donma-çözülme öncesine göre kalan basınç dayanımları.

Sonuçlar ve Öneriler

Kendiliğinden yerleşen betonda hafif agrega kullanılması ile edilen KYHB'nin birim ağırlığı %25 azalırken buna mukabil mukavemette azalma %15 kadardır. Bu durumda birim ağırlığa düşen basınç dayanımında pomza agregalı kendiliğinden yerleşen hafif betonda 34 MPa iken aynı çimento dozajlı KYB de ise 33 MPa civarındadır.

Donma -çözülme deneyi öncesi ve sonrasında en yüksek basınç dayanımı KYB'dedir. En düşük dayanım ise HB'dedir. Dayanım kayıpları, pomza agregalı KYHB'lerde %13-20, dere agregalı serilerde ise %11-12 civarındadır. Pomzanın bünyesinde yüksek miktarda su tutabilmesi ve donma sırasında da zayıf yapıları nedeniyle daha fazla hasar görmesi bu sonucu ortaya çıkarmaktadır. Genleştirilmiş perlit agregası da aynı durumdan dolayı donma-çözülme dayanıklılığını azaltmıştır. Perlit agregalı serilerde dayanım kaybı %20 civarındadır. Sonuç olarak Türkiye'de zengin yatakları bulunan pomza agregası ile KYHB üretmek mümkündür. Üretilen bu betonların donma -çözülme sonrası daha az mukavim oldukları görülse de birim ağırlığa düşen dayanım açısından daha verimli oldukları söylenebilir. Özellikle yüksek katlı yapılar ve köprü tabliyeleri için hafifletilmiş ve kendiliğinde yerleşebilme özelliği kazandırılmış betonların kullanımının oldukça rağbet görebileceği düşünülmektedir.

Kaynaklar

ASTM C 666 –92, 1992, Standart Test method for Freezing and Thawing Resistance.

Bingöl, A.F. Gül, R. (2004) Compressive strength of lightweight aggregate concrete exposed to high temperatures. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. Vol. 11, pp. 68 –72.

Choi Y.W. Kim Y.J. Shin H.C. Moon H.Y. (2006) An experimental research on the fluidi ty and mechanical properties of high -strength lightweight self -compacting concrete. Cement Concrete Research Vol. 36, No. 9, pp. 1595 –602.

Doğan, H. ve Şener F. (2004) Hafif Yapı Malzemeleri, Türkiye Jeoloji Mühendisleri Odası Haber Bülteni, Vol. 1, pp. 51-53.

EFNARC (2005) Specifications and Guidelines for Self -Compacting Concrete , The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.

EFNARC (2002) Specifications and Guidelines for Self -Compacting Concrete ", The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.

Erdoğan T.Y. (2003) Beton, Metu Pres, Ankara.

Gönen T. ve Yazıcıoğlu, S. (2010) Kendiliğinden Yerleşen Hafif Betonun Mekanik Özelliklerine Kür Ortamı Ve Agrega Tipinin Etkisi Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Vol. 25, No. 3, pp. 459-467.

Güneysi E. Gesoğlu M. Algın Z. Yazıcı H. (2014). Effect of surface treatment methods on the properties of self -compacting concrete with recycled aggregates Construction and Building Materials . Vol. 64 No 14, pp. 172 –183.

Hale W.M. Freyne S.F. and Russell B.W. (2009) Examining the frost resistance of high performance concrete, Construction and Building Materials Vol. 23, pp. 878 –888.

Hwang C.L, Hung M .F. (2005) Durability design and performance of self -consolidating lightweight concrete. Construction and Building Materials Vol. 19, No. 8, pp. 619 –26.

Jansen, D.J. (2002) Requirements for a test of frost resistance of concrete , Frost resistance of concrete, edited by Setzer, Auberg and Keck, RILEM Proceeding PRO24, Germany.

Lo T.Y, Tang P.W.C. Cui H.Z. Nadeem A. (2007) Comparison of workability and mechanical properties of self -compacting lightweight concrete and normal self -compacting concrete. Mater Research Innovation . Vol. 11, No. 1, pp. 45 –50.

Neville, A.M. and Brooks, J.J. (1987) Concrete Technology . Addison Wesley Longman Ltd, Edinburgh Gate, Harlow, Essex CM20 2JE 290.

Polat R. Demirboğa R. Karakoç M.B. Türkmen İ, (2010) The influence of lightweight aggregate on the physico -mechanical properties of concrete exposed to freeze –thaw cycles Cold Regions Science and Technology Vol.60, pp. 51 –56.

Soleymani Ashtiani, M. Scott, A.N. Dhakal, R.P. (2013) Mechanical and fresh properties of high-strength self -compacting concrete containing class C fly ash, Construction and Building Materials . Vol. 47, pp. 1217 -1224.

Topçu, I.B. Uygunoğlu T. (2010) Effect of aggregate type on properties of hardened self -consolidating lightweight concrete (SCLC), Construction and Building Materials , Vol. 24 No. 7, pp. 1286-1295

TS 3449 (1980) Çabuk Donma Ve Çözülme Koşulları Altında Betonda Dayanıklılık Faktörü Tayini, Türk standartları enstitüsü, Ankara.

Turkmen, I. Kantarcı, A. (2006) Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the drying shrinkage of self -compacting concretes. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences Vol. 13, pp. 253 –258.

Eksenel Yük Etkisindeki Uçucu Kül Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Beton Dolgulu Kompozit Kolonların Taşıma Kapasitelerinin Modellenmesi

Esra Mete Güneyisi
Gaziantep Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 27310, Gaziantep
Tel: (0342) 3172423
E-Posta: guneyisi@gantep.edu.tr

Kasım Mermerdaş
Hasan Kalyoncu Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 27410,
Tel: (0342) 2118080-1232
E-Posta: kasim.mermerdas@hku.edu.tr

Ayşegül Gültekin
Gaziantep Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 27310, Gaziantep
Tel: (0342) 3172457
E-Posta: agultekin @gantep.edu.tr

Öz

Sunulan bu çalışmada uçucu kül katkılı kendiliğinden yerleşen beton (KYB) dolgulu dairesel çelik tüp kolonların eksenel yük taşıma kapasiteleri farklı yöntemler kullanılarak modellendi. Araştırmada toplam 64 adet deney sonucundan yararlanıldı. Oluşturulan veri tabanı KYB'un karışım oranları ile çelik tüpün geometrik ve mekanik özelliklerini içeren 12 adet tahmin parametresinden teşkil edildi. KYB üretiminde kullanılan uçucu külün çimentoya ağırlıkça oranı %15 ila %41 arasında değişmektedir. Betonların basınç dayanımları ise 21-62 MPa arasındadır. Ayrıca, dairesel çelik tüpün dış çap/et kalınlık (D/t) ve boy/dış çap (L/D) oranları sırasıyla 15,1-60,7 ve 3,0-7,2 arasında değişmektedir. Beton dolgulu daire kesitli kompozit kolonların eksenel yük taşıma kapasitesinin modellenmesinde, karmaşık mühendislik problemlerinin çözümü için yoğun bir şekilde kullanılan esnek hesaplama yöntemlerinden genetik programlama (GP) ve yapay sinir ağları (YSA) araştırma kapsamında kullanıldı. Ayrıca, esnek hesaplama yöntemlerinden yararlanılarak elde edilen yük taşıma kapasite değerleri, Amerikan Beton Enstitüsü ACI 318 ve Avrupa standar dı Eurocode 4 tarafından sunulan ampirik bağıntılar kullanılarak hesaplanan kapasite değerleri ile karşılaştırılarak irdelendi. Elde edilen sonuçlara göre GP ve YSA'dan türetilen modeller, sırasıyla, 0,988 ve 0,998 korelasyon katsayılarına sahip olmakla beraber YSA için %3,5, GP için ise %12 ortalama mutlak hata seviyeleri elde edildi. Ayrıca, bu çalışmada kullanılan yaklaşımla, değişik oranlarda uçucu kül katkılı beton dolgulu kompozit kolonların eksenel yük taşıma kapasitesinin mevcut bağıntılara kıyasla daha iyi tahmin edilebildiği görüldü.

***Anahtar sözcükler*:** Eksenel yük taşıma kapasitesi, Esnek hesaplama yöntemi, Kendiliğinden yerleşen beton, Kompozit kolon, Modelleme.

Giriş

Sahip olduğu yapısal üstünlüklerden dolayı kullanım alanları yaygınlaşmakta olan beton dolgulu kompozit yapı öğeleri yatay veya düşey taşıyıcı eleman olarak kullanıldıkları yapıların performanslarında önemli katkılar sağlarlar (Aydın, 2008). Bu tür kolonların klasik beton ve çelik yapı öğelerine nazaran üstün özeliğe sahip olması yüksek dayanım, yüksek süneklik düzeyi ve yüksek enerji yutma kapasitesinden gelmektedir. Ayrıca, bu elemanlarda kesitin kompozit çalışmasından dolayı beton çekirdeğinin de katkısıyla yerel burkulmaların önlenmesi önemli bir üstünlük sağlamaktadır (Lee ve diğ., 2009; Dundu , 2012). Bu tür kolonlar kısa ve narin kolon olarak sınıflandırılmaktadırlar. Kısa kolonlar göreli olarak küçük "Boy/Çap" (L/D) oranında çalışan kolonlardır. Kısa kolonların davranışlarında kesit ve malzeme özellikleri belirleyici unsurdur. Kesiti oluşturan unsurların nihai dayanımlarına ulaşmalarıyla kesit taşıma kapasitesine ulaşır. Narin kolonlar ise (L/D oranı yüksek) elastik veya inelastik burkularak taşıma kapasitesine ulaşmaktadırlar (Mac -Greg or ve diğ., 1970).

Karışım oranları ve bakım koşulları gibi beton özeliklerini etkileyen diğer önemli bir etmen de betonun uygun bir şekilde yerleşmesinin ve ayrışma olmaksızın en uygun sıkışmanın sağlanmasıdır. Betonlama işlemlerinde bu problemlerin üstesinden gelebilmek için 1980'li yılların başlarından bu yana inşaat endüstrisinde kendiliğinden yerleşen beton (KYB) sıkça kullanılmaktadır (Okamura ve Ouchi, 2003). KYB 'lar herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmaksızın kendi ağırlığıyla donatılar arasından geçerek ayrışma olmadan kalıba yerleşen beton olarak tarif edilebilir. Dolayısıyla geleneksel betona nazaran taze özeliklerinin kontrol edilmesi büyük önem arz eden bir beton çeşididir. Sektörde kullanılmaya başlandığından beri taze özelikleri üzerindeki çalışmalar yoğun bir şekilde devam eden KYB üretiminde faydalanılan en önemli malzemelerden biri uçucu küldür (UK) (Bouzoubaa ve Lachemi, 2001).

UK endüstriyel atık bir yan ürün olmasının yanı sıra gerek sahip olduğu puzolanik özelik ve gerekse taze betonun işlenilebilirliği üzerindeki etkisinden dolayı uzun yıllardan beri beton araştırıcılarının ilgi odağı olmuştur. Çimentoya kıyasla oldukça düşük maliyete sahip olması, yüksek oranda toz malzeme kullanımı gerektiren KYB'da kullanımını teşvik eden önemli bir özeliktir.

Günümüzde, karmaşık mühendislik problemlerinin çözümüne önemli katkı sağlayabileceği düşünülen esnek hesaplama yöntemleri geniş kullanım alanlarına ulaşmıştır (Gholizadeh ve Salajegheh, 2010). Yapay zekâ teknolojilerinin bir ürünü olan esnek hesaplama yöntemleri kullanıcı dostu ara yüzlerin geliştirilmesi sayesinde geniş kitlelere ulaşmayı başarmıştır.

Bu çalışmada uçucu kül katkılı KYB dolgulu kompozit kolonların eksenel yük taşıma kapasitelerinin esnek hesaplama yöntemleriyle modellenmesi amaçlanmıştır. Araştırmada kullanılan esnek hesaplama yöntemleri ise yapay sinir ağları (YSA) ve genetik programlamadır (GP). Bu bağlamda, konuyla ilgili deneysel veriler kullanılarak tahmin modelleri üretilmiştir.

Esnek Hesaplama Yöntemleri

Uzun yıllardan beri bazı yapay zekâ metodolojilerinin birleşimi olan esnek hesaplama önemli bir araştırma aracı haline gelmiştir. Bu kavram akıllı sistemlerin temelini oluşturmakla birlikte bilgisayarlı geleneksel hesaplama tekniklerinin bu alana adaptasyonu ile geliştirilmiştir. Yapay Sinir Ağları, Bulanık Mantık ve Genetik Algoritmalar gibi akıllı yöntemlerin birleşimi genel olarak "Esnek Hesaplama" olarak isimlendirilmektedir . Yeni bir yaklaşım olan esnek hesaplama, insan bilgi ve tecrübesi ile mantık işleyişini etkin olarak birleştirerek matematiksel modellenmesi zor olan sistemlerde daha iyi bir performans için değişen ortam koşullarına uyum göstermeyi hedefler (Şahin, 2009). Geleneksel hesaplamadan farklı olarak esnek hesaplama ile insanın muhakeme, sezgi ve düşüncelerinin gerçekleştirilebilme üstünlüğü kullanılmaya çalışılmaktadır. Bunun için esnek hesaplamanın amacı insanın karar verme modelini kullanarak başarılı, basit, gerçekleştirilebilir ve düşük maliyetli çözümlerdir (Karay ve De-Silva, 2004). Matematiksel istatistik bakış açısından, bu esnek hesaplama yöntemlerinin temeli çok sayıda değişkenin bulunduğu çok boyutlu bir hiper-uzayda elde edilmiş bir veriler takımına ardışık yaklaşımlarla bir hiper-yüzey uydurmaktır. Seçilen modelde kullanılan terim sayısı ve iterasyon adım sayısı arttıkça veri takımındaki daha çok sayıda noktaya daha yakın geçerek hesaplanan sapmalar (hatâlar) azalmakta, belirleyicilik katsayısı R^2 artmaktadır. Ancak genelde değişkenlerin değişimine duyarlı sigmoid biçimli fonksiyonların genel süperpozisyonu veya birleşimi kullanılarak oluşturulan "model"i eğitmek için kullanılan veri takımları çözüm takımları uzayının kısıtlı bir bölümüne veya bölümlerine uyan bir hiper -yüzey tanımladığı için eğitim bölgesi dışındaki hattâ içerisindeki noktalarda sapmaları anlamlı düzeyde arttırabilmektedir.

Yapay Sinir Ağları (YSA)

Yapay Sinir Ağı kavramı, beynin çalışma ilkelerinin sayısal bilgisayarlar üzerinde taklit edilmesi fikri ile ortaya atılmış ve ilk çalışmalar beyni oluşturan biyolojik hücrelerin ya da literatürdeki ismiyle nöronların matematiksel olarak modellenmesi üzerinde yaygınlaşmıştır. Yapay sinir ağları (YSA) veriler arasındaki bilinmeyen ve fark edilmesi güç ilişkileri ortaya çıkarabilmektedir. YSA doğrusal olmadıkları için doğrusal modellerin uygulanamayac ağı doğrusal olmayan durumlarda daha yarar lı olabilmektedir (Zhang ve diğ., 1998).

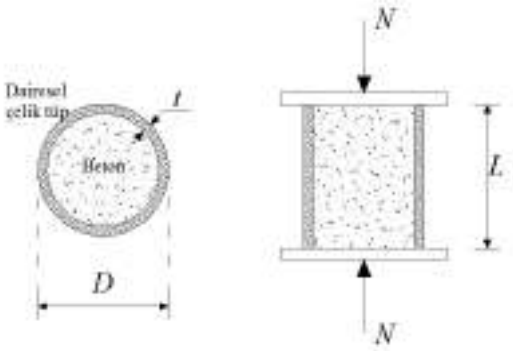
Yapay sinir ağları girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki herhangi bir ön bilgiye ihtiyaç duymadan, herhangi bir varsayımda bulunmadan, doğrusal olmayan modellemeyi sağlayabilmektedir (Kaastra ve Boyd, 1996). Ağa girdi bilgileri ve bu girdilere karşılık gelen çıktı bilgileri verilmekte ve ağın girdi-çıktı arasındaki ilişkiyi öğrenmesi sağlanmakta, böylece ağın eğitimi gerçekleştirilmektedir. Öğreticili öğrenme denilen bu yöntem genelde tercih edilen bir yöntemdir (Haykin, 1999).

Genetik Programlama(GP)

Genetik algoritmalar, doğal seçim ilkelerine dayanan bir arama ve optimizasyon yöntemidir. Temel ilkeleri belirlendikten sonra , genetik algoritmalar hakkında birçok bilimsel çalışma yayınlanmıştır. Genetik algoritmaların, fonksiyon optimizasyonu, çizelgeleme, mekanik öğrenme, tasarım, hücresel üretim gibi alanlarda başarılı uygulamaları bulunmaktadır. Geleneksel optimizasyon yöntemlerine göre farklılıkları olan genetik a lgoritmalar, parametre kümesini değil amaca uygun kodlanmış biçimlerini kullanırlar. Olasılık kurallarına göre çalışan genetik algoritmalar, yalnızca amaç fonksiyonuna gereksinim duyar. Çözüm uzayının tamamını değil belirli bir kısmını tararlar. Böylece, etkin arama yaparak çok daha kısa bir sürede çözüme ulaşırlar (Goldberg, 1989).

Veri Tabanının Oluşturulması

Literatürde sunulmuş olan deneysel çalışmalardan yararlanarak bir veri tabanı oluşturuldu (Yu ve diğ., 2007; Gupta ve diğ., 2007; Liao ve diğ., 2011; Kumar ve diğ., 2013). Toplam 64 adet deneysel örnek bulunan bu veri tabanı tahmin modellerinin geliştirilmesi amacıyla kullanıldı. Şekil 1'de kesiti şematik olarak gösterilen KYB dolgulu kompozit çelik tüp kolonun eksenel yük taşıma kapasitesinin hesaplanması için kullanılan çeşitli girdi parametreleri verilmektedir . Bu parametreler , kullanılan KYB'nın karışım oranları ile kesitin geometrik özelikleri ve çeliğin akma dayanımından oluşmaktadır. Girdi değişkenlerinin ayrıntıları Tablo 1'de görülmektedir. Ayrıca, Şekil 1'de eksenel yük uygulama durumu şematik olarak sunulmaktadır.



a) b)

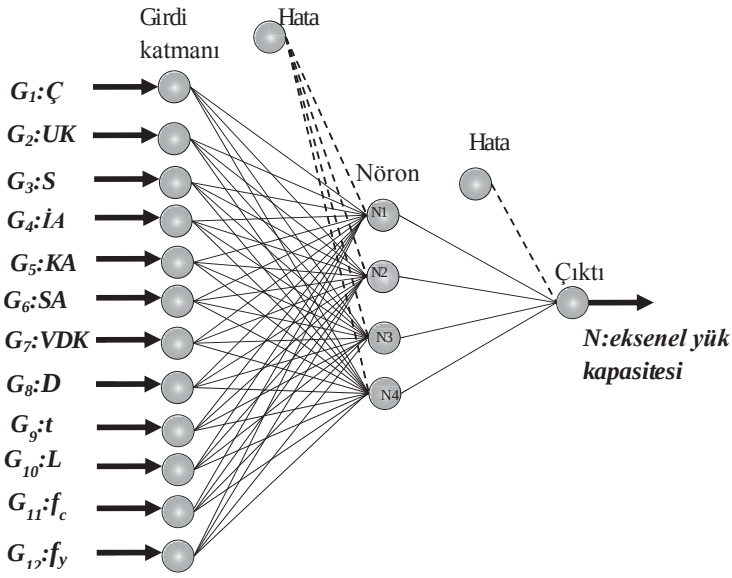
Şekil 1 KYB dolgulu kompozit kolonun a) kesit özellikleri ve b) yükleme durumu.

Tablo 1 Kullanılan tahmin parametreleri ve özelikleri.

Tahmin parametreleri		Simge	Değer aralığı
G1	Çimento (kg/m^3)	Ç	257-500
G2	Uçucu kül (kg/m^3)	UK	51-209
G3	Su (kg/m^3)	S	165-215
G4	İnce agrega (kg/m^3)	İA	613-867
G5	Kaba agrega (kg/m^3)	KA	721-1152
G6	Süperakışkanlaştırıcı (kg/m^3)	SA	3,3-13,6
G7	Viskozite düzenleyici katkı (kg/m^3)	VDK	0-4,9
G8	Kesit Çapı (mm)	D	47-219
G9	Kesitin et kalınlığı (mm)	t	1,9-4,8
G10	Kolon boyu (mm)	L	340-740
G11	Betonun silindir basınç dayanımı (MPa)	f_c	21-62
G12	Çeliğin akma dayanımı (MPa)	f_y	310-360

YSA ve GP Modelleri

YSA modelinin geliştirilmesi için Şekil 2'de gösterildiği gibi 12-4-1 (12 girdi, 4 nöron, 1 çıktı) yapısına sahip bir ağ seçimi yapıldı. YSA çözümü için "MatlabV.R2012" isimli programda hazır bulunan yapay sinir ağı aracı kullanıldı.



Şekil 2. Yapay sinir ağının yapısı.

Nöronlara diğer hücrelerden ya da dış ortamlardan giren bilgiler (yapay sinir girdileri) sinaptik bağlantılar üzerindeki ağırlıklarla çarpılarak bir birleştirme fonksiyonuna uygulanmaktadır. Elde edilen toplam, yapay sinir hücresi aktivasyon fonksiyonundan geçirilerek çıkışlar elde edilir. Aktivasyon fonksiyonu ise birleştirme fonksiyonundan elde edilen net girdiyi bir işlemden geçirerek hücre çıktısını belirleyen ve genellikle doğrusal olmayan bir fonksiyondur. Bu çalışmada aktivasyon fonksiyonu olarak "hiperbolik tanjant (tanh) " fonksiyonu kullanılmıştır.

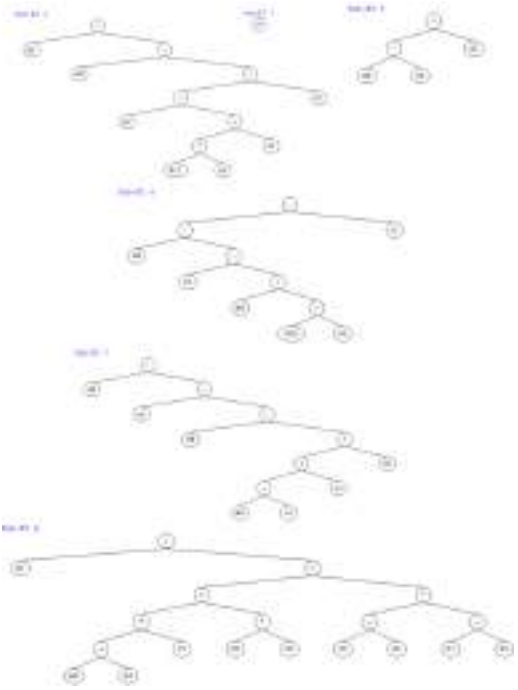
Genetik programlama ile açık formülasyon elde edebilmek amacıyla GeneXProtools.4.0 isimli program kullanıldı ve Şekil 3'de gösterilen formül ağacı elde edildi. Bu formül ağacında yer alan alt formüller hesaplandıktan sonra birbiriyle çarpılarak sonuç elde edilmekte, eksenel yük kapasitesi "N" Denklem (1)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$N = N_1 \times N_2 \times N_3 \times N_4 \times N_5 \times N_6 \tag{1}$$

Burada N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 ve N_6 formül ağacında yer alan alt ifadelerden her biridir. Örneğin N_1 Denklem (2)'de gösterildiği gibi hesaplanır. Denklem (2)'deki *d* değerlerinin açıklaması Şekil 3'te verilmektedir.

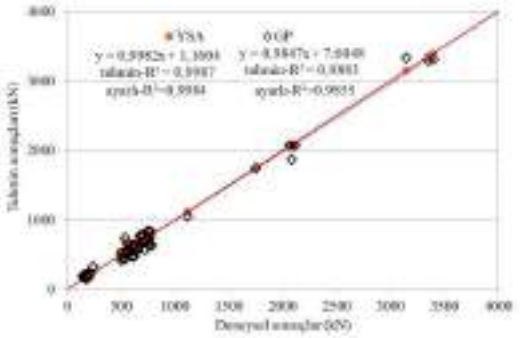
$$N_1 = \frac{d_1 \times d_7}{d_7 \times d_9 - d_7 + d_{11} \times d_5 + d_4} \tag{2}$$

Formülde bütün parametrelerin kullanılmış olması her bir parametrenin burada incelenen kolonların eksenel yük taşıma kapasitesine fiziksel bir etkisinin olduğunu göstermektedir.



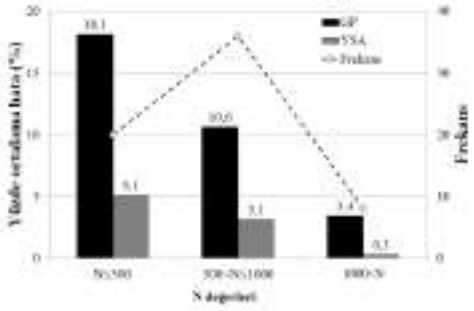
Şekil 3 Formül ağacı (d_0: Ç (kg/m^3), d_1: UK (kg/m^3), d_2: S (kg/m^3), d_3: İA (kg/m^3), d_4: KA (kg/m^3), d_5: SA (kg/m^3), d_6: VDK (kg/m^3), d_7: D (mm), d_8: t (mm), d_9: L (mm), d_{10}: f_c (MPa), d_{11}: f_y (MPa), SubET4 için c_0=5.671234 ve c_1=9.229431, SubET5 için c_0=-9.088867, SubET6 için c_0=-8.684601).

Şekil 4 YSA ve GP ile üretilen tahmin modellerinin performansını göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere, deneysel sonuçlar ile önerilen modeller arasında korelasyon katsayısı yüksek doğrusal bir ilişki bulunduğu görülmektedir. Ayrıca, YSA'nın tahmin performansı özellikle yüksek eksenel yük (N) değerlerinde oldukça iyi görünmektedir. Ancak bu rada hesaplanan belirleyicilik katsayısı, eğitim veri takımları bütün çözümlemeler uzayının kısıtlı bir bölümünü kapsadığı için, R^2 değerlerinin 1 değerine yakın olması genel anlam taşımamaktadır.



Şekil 4 YSA ve GP tahmin modellerinin karşılaştırılması.

YSA ve GP'nın gerçekçi bir karşılaştırmasını yapmak için, gerçek N değerlerinin aralıklarıyla tahmin hatalarının değişimi Şekil 5'te sunulan grafikte verilmektedir. Tahmin edilenle gerçek N değerleri arasındaki hatâ yüzdeleri YSA modeli için %0,3 ila %5,1 GP modeli için ise %3,4 ila %18,1 arasında değişmektedir. Ayrıca, şekilden de görüldüğü üzere, yüksek N değerleri için her iki model de daha iyi sonuçlar vermektedir. Ancak 500 kN 'nun altındaki N değerlerinde özellikle GP modelinin YSA modeline kıyasla daha yüksek hatâ payına sahip oldu ğu gözlenmektedir. Durum böyle olmasına rağmen, YSA ile üretilen modelin tahmin ettiği değerlerin GP modelinkine göre çok daha düşük hatâ vermesi bu model in daha güvenilir sonuçlar ürettiğini göstermektedir.



Şekil 5 Önerilen tahmin modellerinin N değer aralıklarına göre ortalama hat â oranları.

Önerilen modellerin mevcut tasarım kodlarıyla karşılaştırılması

Amerikan Beton Enstitüsü'nün (ACI) beton dolgulu kompozit kolonların eksenel yük taşıma kapasitesi ile ilgili önerdiği bağıntı aşağıdaki gibidir (ACI 318, 2005).

$$N_{ACI} = 0.85 f_c^{'} A_c + f_y A_s \tag{3}$$

Burada A_c = Betonun kesit alanı, A_s = Çelik tüpün kesit alanı, f_c' = Betonun basınç dayanımı, f_y = Çeliğin akma dayanımıdır.

Avrupa standartlarında (Eurocode 4) belirtilen bağıntı ise aşağıda sunulmaktadır (EC4, 2004).

$$N_{EC4} = \left(1 + \eta_c \frac{t}{D} \frac{f_y}{f_{ck}}\right) f_{cd} A_c + \eta_a f_{yd} A_s \tag{4}$$

Burada t = Çelik tüpün et kalınlığı, D = Tüpün çapı, f_{ck} = Betonun karakteristik basınç dayanımı, f_{cd} = Betonun tasarım basınç dayanımı, f_{yd} = Çeliğin tasarım akma dayanımı, η_c ve η_a sırasıyla betonun ve çeliğin bağıl narinliğe ($\bar{\lambda}$) bağlı olarak hesaplanan sargı etkisi katsayılarıdır. Çalışmada, η_c katsayısı 0.87-2.90 değerleri arasında, η_a katsayısı ise 0.81-0.90 değerleri arasında hesaplanmıştır.

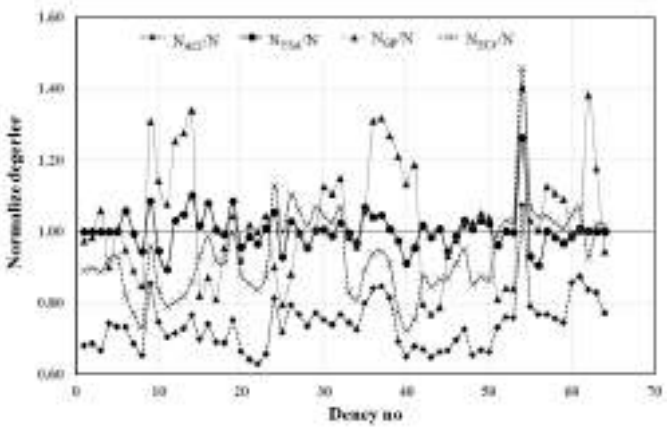
Şekil 6'da bu çalışmada önerilen modeller ile kodlarda verilen bağıntıların karşılaştırılması sunulmaktadır. Aşağıdaki grafikte sunulan normalize değerler, tahmin değerinin aynı parametrelerine denk gelen deneysel değerine bölünerek belirlendi. Bu durumda 1,0 sayısı mükemmel tahmini gösterirken bu değerin altındaki ve üstündeki değerler sırasıyla "eksik tahmin" ve "yüksek tahmin" olarak isimlendirilebilir.

YSA modeli 1,0 etrafında küçük dalgalanmalar gösterirken GP modeli bariz farklar göstermekte ve 0,78 ile 1,40 aralıklarında değerler almaktadır. EC4 (2004) koduna göre hesaplanan değerler genellikle %20 mertebelerinde eksik tahmin gösterirken yer yer yüksek tahmin değerleri de gözlenmektedir. Bu çalışmada ACI 318 (2005)'e göre yapılan hesaplamayla elde edilen değerlerin neredeyse tamamı %30 eksik tahmin olarak bulunmaktadır. Bu durum, önerilen modellerden özellikle YSA'nın çalışmada kullanılan gerçek çözümler bölgesi için GP'ye göre önemli düzeyde başarılı bir tahmin aracı olduğunun göstergesi olarak düşünülebilir.

Sonuçlar

Bu çalışmada kendiliğinden yerleşen beton dolgulu çelik kolonların eksenel yük taşıma kapasiteleri esnek hesaplama yöntemiyle modellendi. Elde edilen modeller birbirleriyle ve kodlarda verilen bağıntılarla karşılaştırıldı. Buna göre elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir.

- Esnek hesaplama araçları KYB dolgulu kolonların eksenel yük taşıma kapasitelerinin hızlı tahmininde faydalı araçlar olarak kullanılabilirler. Bu çalışmada YSA ve GP modellerinin eğitiminde kullanılan gerçek, doğru kabul edilen veri takımlarıyla elde edilen modellerde erişilen korelasyon katsayıları YSA ve GP modelleri için sırasıyla 0,998 ve 0,988 oldu.
- Bu sonuçlar YSA'nın GP'ye göre büyük ölçüde daha az hatâ ile tahmin performansı sergilediğini göstermektedi r. Özellikle yüksek eksenel yük değerlerinde YSA modelinden neredeyse mükemmel tahmin değerleri elde edilirken GP modeli yaklaşık %3 seviyelerinde hata ile sonuçlar vermiştir.
- Mevcut yapı tasarım standartlarında önerilen bağıntılardan elde edilen sonuçlarla yapılan karşılaştırmalara göre EC4 değerleri ile önerilen GP modelinin tahmin i benzer hat â oranlarında sonuçlar verirken ACI 318R-05 modeli oldukça düşük değerler vermektedir. Karşılaştırılan 4 model içerisinde YSA doğruya en yakın eğilimi göstermektedir. Bunun yanı sıra, önerilen modeller mevcut standartlarda sunulan bağıntılara kıyasla daha karmaşık görünseler de, uygun programlama dilleri vasıtasıyla bilgisayara aktarıldıklarında kullanıcı dostu tahmin araçları olarak faydalanılabilirler.
- Ayrıca, araştırmada kullanılan esnek hesaplama yöntemlerinin uygulanmasında yaklaşıma temel oluşturan matematiksel bağıntı kullanılan yazılım tarafından seçilmekte, ardışık yaklaşım işlemi sayısı ise ya kullanıcı tarafından doğrudan veya kabul edilen bir sapma değerine erişilmesi esas alınarak belirlenmektedir. Temel ve/veya dönüşüm bağıntılarının hesaplanan fiziksel özeliğe veya olaya yakınlığı göz önüne alınmamaktadır. Bu sebeple YSA ve GP yaklaşımlarında, ardışık yaklaşım adımı sayısı ve terim sayısı arttıkça eğitim için kullanılan veri takımından sapmalar azalmakta, ancak veri takımı bölgesi dışındaki çözümler bölgesinde sapmalar kabul edilemez düzeyde artabilmektedir.



Şekil 6 Önerilen modeller ile mevcut standart hesap sonuçlarının karşılaştırılması.

Kaynaklar

American Concrete Institute (2005) ACI 318R-05: Building code requirements for structural concrete and commentary. Farmington Hills (MI, USA).

Aydın, Ç. (2008) Beton dolgulu çelik kutu kolonlar ve dolu gövdeli çelik (I) kirişlerden oluşan çerçevelerin yapı davranış katsayısının (R) irdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Bouzouba a, N. and M. Lachemi (2001) Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash: Preliminary results. Cement and Concrete Research, Vol. 31, pp. 413-420.

Dundu, M. (2012) Compressive strength of circular concrete filled steel tube columns. Thin-Walled Structures, Vol. 56, pp. 62-70.

Eurocode 4 (2004) BS EN 1994-1-1: Design of composite steel and concrete structures, part 1.1: general rules and rules for building. British Standards Institution, London, UK.

Gholizadeh, S. and E. Salajegheh (2010) Optimal seismic design of steel structures by an efficient soft computing based algorithm. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 66, pp. 85-95.

Goldberg, D. (1989) Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning. MA: Addison-Wesley.

Gupta, P.K., S.M. Sarda, and M.S. Kumar (2007) Experimental and computational study of concrete filled steel tubular columns under axial loads. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 63, pp. 182–193.

Haykin, S. (1999). Neural networks: a comprehensive foundation. 2nd edition, Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall.

Kaastra, I. and M. Boyd (1996) Designing a neural network for forecasting financial and economic time series. Neurocomputing, Vol. 10, pp. 215-236.

Karay, F.O. and C. De-Silva (2004) Soft Computing and Intelligent Systems Design: Theory, Tools and Applications. Pearson Addison Wesley, England.

Kumar H.R., K.U. Muthu, and N.S. Kumar (2013) Experimental behavior of circular hsscfrc filled steel tubular columns under axial compression. International Journal of Research in Engineering and Technology, Conference issue, pp. 111-115.

Lee, E.T., B.H. Yun, H.J. Shim, K.H. Chang, and G.C. Lee (2009) Torsional behavior of concrete-filled circular steel tube columns. Journal of Structural Engineering, Vol. 135, pp. 1250–1258.

Liao F.Y., L.H. Han, and S.H. He (2011) Behavior of CFST short column and beam with initial concrete imperfection: Experiments. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 67, pp. 1922–1935.

Mac-Gregor, J.G., J.E. Breen, and E.O. Pfrang (1970) Design of slender concrete columns. ACI Journal, Code preview paper, Title No:67-2, pp. 6-28.

Okamura, H. and M. Ouchi (2003) Self compacting concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, pp. 5-15.

Şahin, F. (2009). Çimento hammadde ve üretim sürecinde esnek hesaplama yöntemlerinin kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.

Yu Z.W., F.X. Ding, and C.S. Cai (2007) Experimental behavior of circular concrete - filled steel tube stub columns . Journal of Constructional Steel Research , Vol. 63, pp. 165–174.

Zhang, G., B.E. Patuwo, and M.Y. Hu (1998) Forecasting with artificial neural networks: The state of the art. International Journal of Forecasting , Vol. 14, pp. 35-62.

Biyomineralizasyonun Çimento Esaslı Malzemelerin Performansına Olan Etkisinin Araştırılması

Zeynep Başaran Bundur[a]
[a] Özyeğin Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
Tel: +902165649453
E-Posta: zeynep.basaran@ozyegin.edu.tr

Raissa Ferron[b]
[b]The University of Texas at Austin, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Austin, TX, ABD
Tel: +1512 2322691
E-Posta: rferron@mail.utexas.edu

Mary Jo Kirisits[b]
[b]The University of Texas at Austin, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Austin, TX, ABD
Tel: +15122327120
E-Posta: kirisits@utexas.edu

Özet

Çimento-esaslı malzemelerde oluşan çatlaklar, yapıların servis ömrünü kısaltmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda beton yapılarda erken yaşlarda oluşan çatlakların kendiliğinden iyileşme ile onarılabileceğini göstermiştir. Bu yöntem ile klasik yöntemlere göre çatlaklara daha hızlı müdahale edilebilmektedir. Betonda kendiliğinden iyileşmeyi sağlayabilecek birden çok yöntem vardır, ve biyomineralizasyon kullanılabilecek en yenilikçi yöntemlerden biridir. Biyomineralizasyon, mikroorganizmaların metabolik aktiviteleri sonucunda mineral oluşumunu gerçekleştiği bir biyo-kimyasal reaksiyondur. Bu araştırmada kendiliğinden iyileşme için kullanılan *Sporosarcina pasteurii*-besi yeri katkısının çimento esaslı malzemelerin kimyasal, mikro ve mekanik yapısına olan etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle çimento hamuru içinde biyomineralizasyonu sağlayabilmek için çimento hamurunun karışımında kullanılan su, *S. pasteurii* bakteri suşu ile büyütüldüğü sulu besi yerinden oluşan solüsyon ile değiştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda besi yeri ile katılan *S. pasteurii* suşunun çimento hamurunda kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) miktarını arttırdığı ve buna bağlı olarak çimento hamuru/harcı içindeki boşluk oranının azaldığı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra çimento harcının basınç dayanımında artış gözlemlenmiştir. Karışım sırasında kullanılan besi yeri çimento hamurunun priz süresini büyük ölçüde uzatırken, bakterilerin ortama eklenmesi ile bu süre daha da artmıştır. Bu çalışmada elde edilen veriler çimento esaslı malzemelerde çatlak onarımı için kullanılan biyomineralizasyon mekanizmasının aydınlanmasına yardımcı olmuş ve kendiliğinden iyileşebilen biyo-beton için önemli bir adım atılmıştır. Bu doğal ve yenilikçi yöntem ile çimento esaslı malzemelerin onarımı ve bakımı için harcanan para ve zaman azaltılabilir ve dolayısı ile malzemenin dayanıklılığı arttırılabilir.

Anahtar sözcükler: *Biyomineralizasyon, kendili ğinden iyileşme, çimento harcı, hidratasyon, basınç dayanımı, kalsiyum karbonat*

Giriş

Beton yapıların servis ömrünü etkileyen faktörler genellikle birbirleriyle bağlantılıdır. Beton gevrek ve kırılgan doğası yüzünden, gerilmeler altında çatlayabilir. Bu çatlaklar betonun geçirgenliğini arttırır, dayanımını düşürür ve dolasıyı ile servis ömrünü kısaltır. Günümüzde, püskürtme beton ve epoksi enjeksiyonu, betonda çatlak onarımı için kullanılan tamir ve restorasyon yöntemlerinden bazılarıdır. Klasik yöntemlerin uygulanması zaman almakla beraber, çatlaklara hızlı müdahale olasılığı düşüktür. Bu yöntemler büyük çatlakların onarımı için uygundur, ama çatlaklar inceldikçe bu malzemelerin, çatlağın derinlerine inmesi zorlaşmaktadır (J.Y. Wang vd. 2014). Son yıllarda yapılan araştırmalar kendiliğinden iyileşen çimento esaslı malzemelerin üretiminin mümkün olduğunu göstermiştir (De Muynck, De Belie, ve Verstraete 2010; Van Tittelboom ve De Belie 2013; Sahmaran vd. 2013). Kendiliğinden iyileşme özelliği, betonun oluşan çatlakları kendiliğinden kapatabil mesidir. Bu amaçla kullanılabilecek en yenilikçi yöntemlerden biri de biyomineralizasyondur. Biyomineralizasyon mikroorganizmaların metabolik aktivitelerine dayanan bir tür biyokimyasal reaksiyonlar zincirindir (Mann 2001). Bu reaksiyonlarla elde edilecek minerallerin li stesi uzundur ama çimento esaslı malzemelerde sıkça kullanılan biyomineralizasyon ürünü kalsiyum karbonattır ($CaCO_3$). Üreaz enzimine sahip ve negatif yüzey yükü olan mikroorganizmalar, ortamda bulunan üreyi, karbonat ve amonyak olarak hidrolize edebilm ektedirler. Mikroorganizmalar eksi yüklü yüzeyleri sayesinde ortamdaki kalsiyum iyonlarını elektrostatik olarak çekmekte ve kalsiyum karbonat çökeltisinin yüzeyinde çekirdeklenmesini sağlamaktadır (Stocks-Fischer vd. 1999; De Muynck vd. 2010).Özellikle, üreaz enzimi içeren mikroorganizmalar üre ve kalsiyum içeren ortamlarda ürün olarak kalsiyum $CaCO_3$ oluşumunu indükleyebilir ve oluşan $CaCO_3$ çökeltisi çimento esaslı malzemelerde oluşabilecek çatlakları doldurarak kendiliğinden iyileşme sağlayabilir (De Muyn ck 2010). Çimento esaslı malzemelerde biyomineralizasyon ile kendiliğinden iyileşmenin sağlanması için ilk adım mikroorganizmaların çimento hamuru içine katılmasıdır. Bu aşamada önemli bir nokta mikroorganizmaların çimento hamuru içerisinde canlı kalabilme yeteneğidir. Literatürde yapılan çalışmalar sonucunda farklı yöntemler ile mikroorganizmaların beton içinde uzun süre canlı kalabildiği gözlemlenmiştir. Bu yöntemler genellikler hücrelerin çeşitli işlemlerden geçirilerek spor olarak veya kapsül içerisine enjekte edilmesini içermektedir (Jonkers vd. 2010; Wiktor ve Jonkers 2011 ; Wang 2012; Wang vd. 2014a). Çimentonun alkali yapısı ve de devam eden hidratasyon nedeni ile azalan boşluk miktarının, mikroorganizmaların canlı kalma olasılığını azaltabileceği öne sürülmüş ve geçmişte yapılan çalışmalar büyük oranda mikroorganizmaların çimento içinde canlılığı/dayanımı üzerinde yoğunlaşmıştır. Wiktor ve Jonkers (2011) Delft Üniversitesi'nde geliştirdikleri sistem ile endosporları (kalsiyum laktat ile beraber) genleştirilmiş kilden oluşan hafif agregaların içine enjekte etmişlerdir ve bu agregaları beton karışımında kullanmışlardır. Çatlak oluşumunda yüzeyle beraber kırılan agregaların içindeki karışım sayesinde yüzey çatlakları kalsiyum karbonat çökeltisi ile tamamen kapatılmış ve malzemenin geçirgenliği azaltılmıştır. Wang vd. (2012; 2014a) yaptıkları çalışmada bakterileri sırasıyla poliüretan ve silika jel kapsüllerin içine yerleştirip, iki farklı sistemin verimliliğini karşılaştırmışlardır. Silika jel kapsüllerin bakterilerin metabolik aktivitelerini daha az etkilediklerini ve üre ayrışımının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir (Wang vd., 2014a). Wang vd. (2014 b) son çalışmalarında ise endosporları mikro kapsüller içerisine yerleştirip; üre, maya özütü ve kalsiyum nitrat ($CaNO_3$) ile beraber çimento harcının içine karıştırmışlardır. Bu yöntem ile çatlaklar

onarılmış ve harcın geçirgenliği azaltılmıştır (Wang vd., 2014b). *Ancak doğru mikroorganizma ve besi yeri seçimi ile bu işlemler azaltılarak, mikroorganizmalar doğada bulundukları koşullar ile çimento harcı içine katılabilir.* Achal vd. (2011) bakteriyi sulu besi yerinde büyüttükten sonra bu besi yerini kum, uçucu kul ve çimento ile karıştırmışlardır. Yapılan analizlerle bu yöntem ile çimento harcı içine katılan hücrelerin 28 gün boyunca canlı kalabildikleri ve basınç gücünü arttırdıkları gözlemlenmiştir(Achal vd. 2011). Ayrıca Basaran (2013) yaptığı çalışmalarda *S. pasteurii* suşunun büyütüldüğü sulu besi yeri ile çimento harcı karışımına katıldığında, hücrelerin 11 ay kadar canlı kalabildiklerini gözlemlemiştir. Bu çalışmada çimento harcı içine katılan *S. pasteurii* suşu önce uygun besi yerinde büyütüldükten sonra ekstra hiçbir işlem uygulanmadan çimento ile karıştırılmıştır. *S. pasteurii* aktif üreaz enzimine sahip olması ve eksi yüzey yükü sayesinde biyomineralizasyon üzerine yapılan çalışmalarda sıkça kullanılmaktadır (Stocks-Fischer vd. 1999; De Muynck vd. 2010). Bu araştırmanın amacı kendiliğinden iyileşme için kullanılan *S. pasteurii*-besi yeri katkısının çimento esaslı malzemelerin kimyasal, mikro ve mekanik yapısına olan etkilerinin belirlenmesidir.

Yöntem

Besi yerinin hazırlanması ve bakterilerin çoğaltılması (İnkübasyon):

Bu çalışmada Amerikan Tip Kültür Koleksiyonu (American Type Culture Collection) *Sporosarcina pasteurii* (ATCC 6453) suşu kullanılmıştır. *S. pasteurii* hücrelerinin inkübasyon için Tris Bazı (0.13 M), üre (10 g/L) ve maya özütü (20 g/L) içeren sulu besi ortamı (pH 9) steril koşullarda hazırlanmıştır. Sulu besi yeri hazırlanırken deiyonize saf (DDI) su kullanmıştır. 600mL. üre-maya özütü (ÜMÖ) sulu besi yerine eklenen *S. Pasteurii* hücreleri aerobik ortamda ve 30°'de çalkalamalı inkübatorde (150 rpm) büyütülmüşlerdir. Periyodik olarak alınan örnekler, besi yeri-agar petri kaplarına yayılmış ve 30°'de inkübe edilmiştir. Petri kapları 24 saat inkübe edildikten sonra oluşan hücre sayısı (konsantrasyon) belirlenmiştir. Ayrıca periyodik olarak bakteri kültüründen alınan örneklerin optik yoğunluğu Bio-Tek Synergy HT mikroplaka okuyucu ile ölçülmüştür. Ardından petri kaplarındaki konsantrasyon (kob/mL) ve optik yoğunluk (OD_{600}) ilişkilendirilmiştir. Bu ilişki çalışmanın ileriki safhalarında çimento hamuru içine katılacak bakteri kültüründeki hücre sayısını belirlemek için kullanılmıştır.

Bakterilerin çimento hamuru ve harcı içine katılması:

Yukarıda belirtilen koşullarda sulu ÜMÖ besi yerinde (pH 9) büyütülen *S. pasteurii* hücreleri üssel büyüme safhasına eriştiklerinde çimento ile karıştırılmışlardır. Araştırmada, Texas Lehigh Tip I/II Portland çimentosu (Buda, TX) kullanılmıştır. Çimento hamurunun karışımında kullanılan su hazırlanan bakteri kültürü ile değiştirilmiştir. Kontrol numuneleri için çimento hamuru karışımında saf su ve bakteri içermeyen ÜMÖ sulu besi yeri kullanılmıştır. Tüm deneysel çalışmalarda Su-çimento (s/ç) ve bakteri kültürü- çimento (b/ç) oranı 0.5'tir. Burada değinilmesi gereken bir nokta ise bu solüsyonun ağırlığının %96'sının saf su olduğu ve bakterilerin ağırlığının su-çimento oranını etkilemeyeceğidir. Hazırlanan numuneler ve uygulanan testler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Çimento harcı numuneler ise yukarıda belirtilen çimento hamurlarına incelik modülü 2.37 ve emme katsayısı %0.65 olan Colorado Nehri kumu (D_{max}= 4mm) katılarak hazırlanmıştır. Karışımlar çimento kum oranı 1:4 olacak şekilde hazırlanmıştır.

Tablo 1: Deneysel çalışmalar için hazırlanan numune adları, kullanılan malzemeler ve uygulanan testler.

Numune Adı		*Kullanılan Malzemeler*	*Uygulanan Testler*
Çimento Hamuru Numuneler	ÇH	Saf su + Çimento	*İzotermal Kalorimetre, TGA, XRD, Vikat İğnesi, Boşluk oranı ölçümü*
	ÜMÖ_ÇH	ÜMÖ sulu besi ortamı + Çimento	
	Bak_ÇH	Bakteri kültürü + Çimento	
Çimento Harcı Numuneler	ÇHRC	Saf su + Çimento + Kum	*ASTM C 109 Basınç Dayanımı, Boşluk oranı ölçümü*
	ÜMÖ_ÇHRC	ÜMÖ sulu besi ortamı + Çimento + Kum	
	Bak_ÇHRC	Bakteri Kültürü + Çimento + Kum	

Deneysel yöntemler:

İzotermal Kalorimetre Analizi ve Vikat İğnesi testi:

Bakterilerin çimento hamurunun hidratasyonu ve priz başlangıç süresine olan etkisi izotermal kalorimetre analizi ve Vikat iğnesi testi ile belirlenmiştir. Bu amaçla Tablo 1'de belirtilen ÇH, ÜMÖ_ÇH ve Bak_ÇH numuneleri sırasıyla 7 g su, 7 g ÜMÖ sulu besi yeri ve 7 g bakteri kültürünün 14 g çimento ile karıştırılarak hazırlanmıştır. Bakteri kültüründeki hücre sayısı 2 x 10^6 kob/ mL (1 x 10^6 kob/ g çimento) olarak belirlenmiştir. Taze haldeki çimento hamuru numuneler de ısı çıkış hızı 23°C'de 48 saat boyunca 3114/3236 TAM Air Thermal, Thermometric AB İzotermal Kalorimetre (İsveç) ile ölçülmüştür. Çimento hamurlarının priz başlangıç süreleri ise değiştirilmiş ASTM C191 Vikat iğnesi testi (ASTM International 2008) ile belirlenmiştir. Test standartlarında belirtilen çimento hamuru kıvamının belirlenmesi yerine s/ç veya b/ç oranı 0.5'e sabitlenmiştir.

TGA ile $CaCO_3$ miktarının belirlenmesi:

Bakterilerin çimento hamuru içinde $CaCO_3$ oluşumuna olan etkisi TGA ile ölçülmüştür. Tablo 1'de belirtilen hazırlanan taze çimento hamurları kalıpların içine döküldükten sonra 24 saat rutubetli odada tutulmuştur. Ardından kalıplar çıkarılarak numuneler test gününe kadar ÜMÖ sulu besi yeri içinde kür edilmiştir. Sertleşmiş çimento hamurları 1., 7. ve 28. Günlerde toz haline getirilmiş ve 53 µm'lik elekten geçirilmiştir. Toz halindeki çimento hamuru numunelerde hidratasyonun durması için numuneler etanol ile öğütülmüştür (Zhang ve Scherer 2011). Hazırlanan numuneler 24 saat vakum desikatör içinde tutulduktan sonra Mettler Toledo TGA/DSC Analizör (Schwerzenbach, İsviçre) içine yerleştirilmiştir. TGA sıcaklık 40°C'den 1200°C'ye arttırılarak gerçekleştirilmiştir.

Basınç Dayanımı:

Bakteri içeren ve kontrol çimento harcı (ÇHRC, ÜMÖ_ÇHRC, Bak_ÇHRC) numuneler ASTM C305 standardına göre karıştırılmıştır (ASTM International 2011) . Hazırlanan taze çimento harçları 5.08 x 5.08 x 5.08 cm küp numune kalıplarına alınarak 24 saat rutubetli odada tutulmuştur. Ardından kalıplar sökülerek, numuneler test gününe kadar ÜMÖ sulu besi yeri içinde kür edilmiştir. Numunelerin basınç dayanımları 1., 7., 28. ve 56. günlerde ASTM C109 standartlarına göre ölçülmüştür (ASTM International 2009) .

Boşluk oranın etanol değişim yöntemi ile ölçülmesi:

Çimento hamuru ve harcı numunelerde (ÇH,ÇHRC, Bak_ÇH, Bak_ÇHRC) boşluk oranı etanol değişim yöntemi ile belirlenmiştir (Parrott 1981) . Hazırlanan taze çimento hamuru ve harcı numuneler 3 cm çapında 2 cm kalınlığındaki kalıplara aktarılmıştır. 24 saat sonra kalıplardan çıkarılan numuneler test edilene kadar ÜMÖ sulu besi yeri içinde tutulmuştur. Numuneler 7. ve 28. güne geldiklerinde kür ortamından çıkarılmış ve tamamen etanol içine batırılmıştır. Bu sayede boşluk içerisindeki su özgül ağırlığı 0.789 olan etanol ile yer değiştir miş ve numunelerde ağırlık farkı oluşturmuştur. Numuneler periyodik olarak etanolden çıkarılarak, bir havlu yardımı ile kuru yüzey-doygun hale getirilmiştir ve ağırlıkları kayıt edilmiştir. Bu işlem numunelerin ağırlıklarında denge sağlanana kadar tekrarlanmıştır. Ardından ağırlık farkı kullanılarak numune hacmindeki boşluk oranı yüzde olarak hesaplanmıştır (Parrott 1981) .

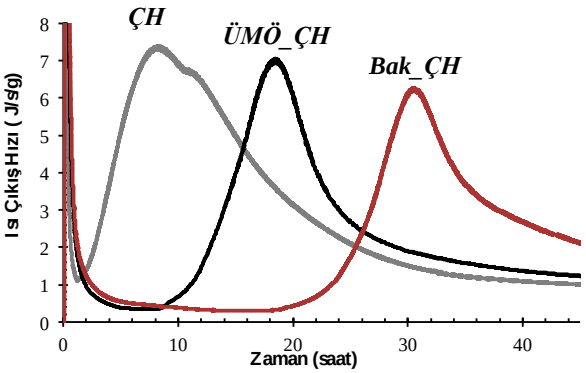
Deneysel Sonuçların Değerlendirmesi

Çimento hamuruna katılan bakterilerin hidratasyon ve priz suresine olan etkisi:

Şekil 1 çimento hamuru numunelerde 48 saat boyunca ölçülen ısı çıkış hızını göstermektedir. Öncelikle çimento hamuru karışımına su yerine (ÇH) ÜMÖ sulu besi yeri kullanılması (ÜMÖ_ÇH) hamurun uyku süresini belirgin bir şekilde uzatmıştır. Bu etkileşim sertleşmeyi geciktirmekte, malzemenin priz süresini uzatmaktadır. Benzer davranış su yerine bakteri kültürü kullanıldığında (Bak_ÇH) da gözlemlenmiş, hatta uyku süresinin ÜMÖ_ÇH karışımına göre daha da uzun olduğu belirlenmiştir.

Bu amaçla ilk olarak incelenmesi gereken nokta, ÜMÖ sulu besi yerinin içerdiği bileşenlerin hidratasyonu nasıl etkilediğidir. ÜMÖ besi yeri tris bazı, üre ve maya özütü içermektedir. Bundur vd. (Bundur vd. 2014) yaptığı detaylı çalışmada üre ve tris bazının uyku süresini etkilemediğini, maya özütünün ÜMÖ_ÇH'ın sertleşmesini kontrol ettiğini belirlemişlerdir. Bunun başlıca nedeni maya özütü içindeki karbonhidratların geciktirici olarak etki etmesidir (Bolobova ve Kondrashchenko 2000) . Benzer bir etki Wang vd . (2014) tarafından gözlemlenmiş; maya özütü oranı %0.35'ten %0.85'e çıkarıldığında sertleşmenin geciktiği ve hidratasyon derecesinin azalmasına neden olduğu gözlemlenmiştir.

Bakterileri kültürünün kullanılması ile sertleşmenin daha da geciktiği gözlemlenmiştir (*Şekil 1*). Bunun nedeni, bakterilerin büyürken ÜMÖ sulu besi yerindeki bileşenleri hidrolize ederek yeni yan ürünlerin oluşumunu indüklemesidir. Bunun yanı sıra uyku süresinin uzamasına neden olabilecek başka bir sebep ise, bakterilerin karışım anında $CaCO_3$ çökerterek, C_2S ve C_3S'ten çözünen $[Ca^{+2}]$ iyonlarını kullanmaları ve hidratasyon ürünlerinin oluşumunun gecikmesine sebep olmasıdır.



Şekil 1: Bir gram çimento için ısı çıkış hızı (J/s/g). Bak_ÇH içindeki bakteri konsantrasyonu 2 x 10^6 kob/mL (1 x 10^6 kob/ g çimento) olarak belirlenmiştir (s/ç: 0.5).

İzotermal kalorimetre analizi çimento hamuru karışımına su yerine ÜMÖ sulu besi yeri ve bakteri kültürü kullanılmasının hamurun priz başlangıç süresini geçirtilebileceğini belirtmiştir. Bu amaçla yapılan Vikat iğnesi testiden elde edilen priz başlangıç süreleri Tablo 2'de özetlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, uyku süresindeki uzamanın priz başlangıç süresi ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir.

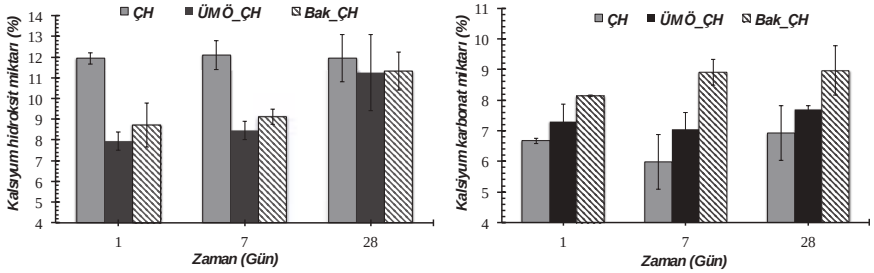
Tablo 2: Hazırlanan çimento hamurları için Vikat priz süreleri. Bak_ÇH içindeki bakteri konsantrasyonu 1 x 10^7 kob/mL (5 x 10^6 kob/ g çimento) olarak belirlenmiştir (s/ç: 0.5). Vikat zamanı ve standart sapma üç numunenin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

Numune	*Vikat zamanı (ortalama± st.dev, saat)*
ÇH	3.0 ± 0.3
ÜMÖ_ÇH	13.3 ± 0.9
Bak_ÇH	36.5 ± 1.1

Bakterilerin çimento hamurundaki $CaCO_3$ miktarına etkisi:

Şekil 2 (a) ve (b) sırasıyla sertleşmiş çimento hamurlarında kalsiyum hidroksit ve $CaCO_3$ ağırlık yüzdelerini göstermektedir. Ağırlık yüzdeleri belirli sıcaklıklarda çimento hamurundaki kütle kaybının belirlenmesi ile hesaplanmıştır. Çimento hamuru içinde kalsiyum hidroksitin miktarı, 1200°C'ye kadar ısıtılan numunelerde 450°-550°C arasındaki kütle kaybı esas alınarak belirlenmiştir. Benzer şekilde $CaCO_3$ miktarı numunelerde 700 °-900°C arasındaki kütle kaybının (dekarbonizasyon) belirlenmesi ile hesaplanmıştır. Şekil 2(a) görüldüğü gibi çimento hamuru karışımına su yerine ÜMÖ sulu besi yeri ve bakteri kültürü kullanılması kalsiyum hidroksit miktarını 1. ve 7. günlerde önemli ölçüde azaltmıştır. Ancak 28. günde analiz edilen tüm numunelerde kalsiyum hidroksit miktarı aynı aralıkta belirlenmiştir. ÜMÖ_ÇH ve Bak_ÇH numunelerinde ÇH numunesine göre ilk 7 günde gözlemlenen kalsiyum hidroksit miktarındaki azalma, hidratasyon sırasında uyku süresinin uzaması ile ilişkilidir. Bu süreç içinde bu iki numunede de, özellikle bakteri içeren Bak_ÇH' da $CaCO_3$ miktarında artış gözlemlenmiştir. 7. günden 28. güne geçerken, kalsiyum hidroksit miktarındaki artışın aksine, kalsiyum karbonat miktarında önemli bir artış gözlemlenmemiştir. Elde edilen sonuçlar, karışım sırasında çözünen [Ca^{+2}] iyonları

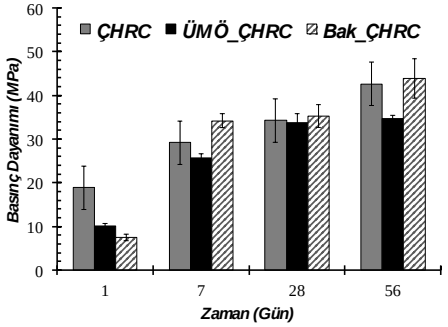
$CaCO_3$ çökelttirirken, kalsiyum hidroksit miktarı ancak $CaCO_3$ çökmesinin hızının azalması ile artış göstermiştir.



Şekil 2: Çimento hamuru numunelerde (a) kalsiyum hidroksit-CH (b) kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) miktarı (ağırlık %). Bak_ÇH içindeki bakteri konsantrasyonu 8 x 10^6 kob/mL (4 x 10^6 kob/ g çimento)olarak belirlenmiştir (s/ç: 0.5). Elde edilen ağırlık %'leri üç numunenin ortalaması alınarak belirlenmiş, hata çubukları standart sapmayı göstermektedir.

Bakterilerin çimento harcının basınç dayanımına ve boşluk oranına olan etkisi:

Şekil 3 çimento harcı numunelerde ASTM C109 standartlarına göre yapılan basınç dayanımı testinin sonuçlarını göstermektedir. 1. günde karışımda su yerine ÜMÖ sulu besi yerinin (ÜMÖ_ÇHRC) kullanılması ile basınç dayanımında önemli ölçüde bir azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma bakteri kültürünün kullanılması ile (Bak_ÇHRC) daha da belirginleşmiştir. Bu azalma numunelerin uyku sürelerindeki uzama ile ilgilidir (*Şekil 1* ve *Tablo 2*). ÜMO_ÇHRC numunesinde ÇHRC numunesine kıyasla belirlenen azalma 7., 28., ve 56. günlerde de gözlemlenmiştir. Bunun aksine Bak_ÇHRC numu nesindeki azalma 7. günde toparlanmış hatta bu numunede hesaplanan ortalama basınç dayanımı ÇHRC' den daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu bakteri içeren çimento harcındaki $CaCO_3$ miktarındaki artış ve orantılı olarak azalan kalsiyum hidroksit miktarı ile bağlantılı olabilir. Ancak benzer davranışın gözlemlendiği ÜMÖ_ÇHRC numunesinin basınç dayanımda belirgin azalma olması, bakterileri hücrelerinin harcın mekanik yapısına ayrıca bir etkisi olduğunu göstermektedir. $CaCO_3$ miktarındaki artışın kısmen basınç dayanımını etkilemesi, ÜMÖ_ÇHRC ve Bak_ÇHRC numunelerinde çöken $CaCO_3$'ın yapısının farklı olmasından kaynaklanabilir. Whiffin (Whiffin 2004) tarafından yapılan çalışmada mikroorganizmaların çökerttiği $CaCO_3$'ın doğada gözlemlenen sert $CaCO_3$ kristallerinin aks ine daha yumuşak ve toz halinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca Lian vd. (2006) tarafından çalışmalarında bakterileri üssel büyüme safhasının bitimine kadar büyütüldükten sonra santrifüj ederek ortamdan çıkarmış, geri kalan kullanılmış edilmiş sulu besi yerine kalsiyum ekleyerek çökelti elde etmişlerdir. Bu çökelti ile $CaCO_3$'ün vaterit kristali elde edilirken, bakteri kültüründen elde edilen çökeltide kalsit elde edilmiştir (Lian vd. 2006) . Bakterilerin çimento harcına katılması $CaCO_3$ kristallerinin çekirdeklenmesi için alan yaratıp, çökeltinin daha dayanıklı ve sert olmasını sağlamış olabilir. Bakterilerin basınç dayanımına olan etkisi $CaCO_3$ miktarının artışına olan etkisine benzer bir şekilde 28. ve 56. günde azalmıştır.



Şekil 3: Çimento harcı numunelerin basınç dayanımı (MPa). Bak_ÇHRC içindeki bakteri konsantrasyonu 3 x 10^6 kob/mL (1.5 x 10^6 kob/ g çimento)olarak belirlenmiştir (s/ç: 0.5). Basınç dayanımları üç numunenin ortalaması alınarak belirlenmiş, hata çubukları standart sapmayı göstermektedir.

Ayrıca bu numunelerde boşluk oranları etanol değişimi ile hesaplanmıştır. Bak_ÇHRC numunesinin basınç dayanımında gözlemlenen artış, bu numunenin boşluk oranındaki azalma ile de açıklanabilir. Bakteri içeren hem çimento hamuru (Bak_ÇH) hem de çimento harcı (Bak_ÇHRC) numunelerin boşluk oranlarında bakteri içermeyen numunelere (ÇH ve ÇHRC) göre belirgin azalma gözlemlenmiştir. 7. günde Bak_ÇH' de bakterisiz ÇH' a göre %17 azalma belirlenirken, Bak_ÇHRC' de bakterisiz ÇHRC' ye göre %21 azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma bu numunelerdeki $CaCO_3$ miktarındaki artışla ilişkilidir. Çimento-esaslı malzemelerde karbonatlaşmanın boşluk miktarını azaltırken, basınç dayanımını arttırdığı bilinmektedir (Mehta ve Monteiro 2006). Boşluk oranlarındaki değişim esas alındığında, bakterilerin çimento harçları numunelerde çimento hamuru numunelere göre daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. 28. günde ise Bak_ÇH' de bakterisiz ÇH' a göre %9 azalma belirlenirken, Bak_ÇHRC' de bakterisiz ÇHRC' ye göre %24 azalma gözlemlenmiştir. Bunun bir nedeni Başaran (Basaran 2013) tarafından bakterilerin çimento harcında daha uzun süre ve yüksek oranla canlı kalabilmesi ile açıklanmıştır.

Tablo 3: Hazırlanan çimento harcı ve hamuru numuneler için boşluk oranı (% hacim). Bak_ÇH içindeki bakteri konsantrasyonu 1 x 10^7 kob/mL (5 x 10^6 kob/ g çimento)olarak; Bak_ÇHRC içindeki bakteri konsantrasyonu 1 x 10^7 kob/mL (5 x 10^6 kob/ g çimento)olarak belirlenmiştir (s/ç: 0.5). Boşluk oranı %'si ve standart sapma üç numunenin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

Numune Adı	Boşluk oranı (ortalama ± st. Dev, % hacim)	
	Gün	
	7	28
ÇH	25 ± 1	14 ± 3
Bak_ÇH	21 ± 2	13 ± 1
ÇH/ Bak_ÇH Değişim	***-17%***	***-9%***
ÇHRC	32 ± 4	20 ± 2
Bak_ÇHRC	25 ± 1	15 ± 2
ÇHRC/ Bak_ÇHRC Değişim	***-21%***	***-24%***

Sonuçlar

Bu çalışmada çimento hamuru karışımında su yerine *S. pasteurii* suşunun büyütüldüğü ÜMÖ sulu besi yeri ile beraber kullanılmasının, malzemenin kimyasal ve mekanik özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. *S. pasteurii*- ÜMÖ sulu besi yeri solüsyonunun karışımda kullanılması çimento hamurunun hidratasyonunu önemli ölçüde etkilemiştir. ÜMÖ sulu besi yerinin karışımda kullanılmasının çimento hamurunun uyku süresini uzattığı ve priz başlangıcını belirgin bir şekilde ertelediği gözlemlenmiştir. Sisteme bakterilerin eklenmesi bu etkiyi daha da arttırmıştır. Bu gecikmeye eklenen ÜMÖ ortamıyla eklenen maya özütünün içindeki karbonhidratların neden olduğu belirlenmiş, ayrıca bakterilerin büyüme sırasında sentezledikleri yan ürünlerin de etki ettiği gözlemlenmiştir. Yapılan Vikat iğnesi testi de izotermal kalorimetre ölçümleriyle orantılı bir sonuç sunmuştur. Ayrıca TGA ile çimento hamuru karışımında su yerine *S. pasteurii* suşunun büyütüldüğü ÜMÖ sulu besi yeri ile beraber kullanılmasının çimento hamurunda kalsiyum hidroksit miktarını önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Kalsiyum hidroksit miktarındaki azalmanın aksine bakteri içeren çimento hamurlarında $CaCO_3$ miktarında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu hiç bir ekstra işlem gerektirmeden sunulan bakterilerin çimento hamuru içinde biyomineralizasyonu sağlayabildiklerini göstermektedir. Buna bağlı olarak bakterilerin çimento hamuru ve çimento harcı numunelerdeki boşluk oranını azaltabildikleri ve çimento harcında basınç dayanımını arttırabildikleri belirlenmiştir. Sonuçlar kendiliğinden iyileşmenin sağlanabilmesi için kullanılan *S. pasteurii*- ÜMÖ sulu besi yerinin çimento-esaslı malzemelerin kimyasal ve mekanik yapısında belirgin değişikliklere neden olduğunu göstermiştir.

Kaynaklar

Achal, Varenyam, Xiangliang Pan, and Nilüfer Özyurt (2011) Improved strength and durability of fly ash-amended concrete by microbial calcite precipitation. Ecological Engineering, Vol. 37, No. 4, pp. 554 –559.

ASTM International (2008) ASTM C191 -Standard test methods for time of setting of hydraulic cement by Vicat needle". West Conshohocken.

ASTM International (2009) ASTM C109/C109M - Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2 -in . or [50 -Mm] cube specimens).West Conshohocken.

ASTM International (2011) ASTM C305 -Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars. West Conshohocken.

Basaran, Zeynep (2013) Biomineralization in cement based materials: Inoculation of vegetative cells. Ph.D. Dissertation . The University of Texas at Austin, USA.

Bolobova, A V, and V I Kondrashchenko (2000) Use of yeast fermentation waste as a biomodifier of concrete (Review). Applied Biochemistry and Microbiology , Vol. 36, No. 3, pp. 205–214.

Bundur, Zeynep Başaran, Raissa Douglas Ferron, and Mary Jo Kirisits (2014) Biomineralized cement-based materials: Impact of inoculating vegetative bacterial cells on hydration and strength. Cement and Concrete Res earch (*In press*).

De Muynck, Willem, Nele De Belie, and W Verstraete (2010) Microbial carbonate precipitation in construction materials : A review. Ecological Engineering, Vol. 36, pp. 118 –136.

Jonkers, H. M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., & Schlangen, E. (2010) Application of bacteria as self -healing agent for the development of sustainable concrete. Ecological Engineering , Vol. 36, No. 2, pp. 230 –235.

Lian, B., Hu, Q., Chen, J., Ji, J., & Teng, H. (2006) Carbonate biomineralization induced by soil bacterium *Bacillus megaterium*. Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 70, No. 22, pp. 5522 –5535.

Mann, Stephan (2001) Biomineralization: Principles and Concepts in Bioinorganic Materials Chemistry . Oxford, New York, USA.

Mehta, P Kumar, and Paulo J . M. Monteiro (2006) Concrete: Microstructure, Properties and Materials . 3rd Edition, McGraw -Hill, New York, USA.

Parrott, L.J (1981) Effect of drying history upon the exchange of pore water with methanol and upon subsequent methanol sorption behaviour in hydrated alite Paste. Cement and Concrete Research , Vol. 11, pp. 651 –658.

Sahmaran, Mustafa, Gurkan Yildirim, and Tahir K. Erdem (2013) Self -healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary Cementitious Materi als. Cement and Concrete Composites , Vol. 35, No. 1,pp.89 – 101.

Van Tittelboom, Kim, and Nele De Belie (2013) Self -healing in cementitious materials - A review. Materials , Vol. 6, pp. 2182 –2217.

Wang, J., Van Tittelboom, K., De Belie, N., & Verstraete, W. (2012) Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self -healing concrete. Construction and Building Materials , Vol. 26, No. 1, pp. 532 –540.

Wang, J.Y., D. Snoeck, S. Van Vlierberghe, W. Verstraete, and N. De Belie (2014a). Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. *C*onstruction and Building Materials, Vol. 68, pp. 110 –119.

Wang, J.Y., H. Soens, W. Verstraete, and N. De Belie (2014b) Self -healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. Cement and Concrete Research , Vol. 56, pp. 139–152.

Whiffin, Victoria S (2004) Microbial $CaCO_3$ precipitation for the production of biocement. Ph.D. Thesis . Murdoch University, Australia.

Wiktor, Virgi nie, and Henk M. Jonkers (2011) Quantification of crack -healing in novel bacteria -based self-healing c oncrete. Cement and Concrete Composites , Vol. 33, pp. 763 –770.

Zhang, Jie, and George W. Scherer (2011) Comparison of methods for arresting hydration of cement. Cement and Concrete Research , Vol. 41, No. 10, pp. 1024 – 1036.

Deniz Suyunun Farklı Tip ve Dozajdaki Mineral Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Harçların Mekanik Özelliklerine Etkisi

Mehmet Karataş*
Fırat Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ-Türkiye,
Tel: (0424) 2370000-5419
E-posta: mkaratas@firat.edu.tr

Elif GÜRSES
Karayolları 6. Bölge Müdürlüğü, Kayseri -Türkiye,
E-posta: eelif-e@hotmail.com

(*) Yazışmacı Yazar Adresi: Fırat Üniversitesi, Müh. Fak. İnşaat Müh. Bölümü, 23279, Elazığ-Türkiye, tel: +90 4242370000-5419, Cep: 0533 7736412, fax: +90 424 2415526, e-mail: mkaratas@firat.edu.tr , ymkaratas@gmail.com

Öz

Deniz suyuna maruz kalan betonlarda meydana gelen hızlı bozulmanın deniz suyunda bulunan magnezyum iyonu saldırısından kaynaklandığı, elektron mikroskobu ve XRD analizlerinden deniz suyunun tomasit, etrenjit, brusit ve hidrate magnezyum silikat gibi reaksiyon ürünlerini oluşturduğu bilinmektedir. Bu çalışmada mineral katkı olarak Soma Yatağan Termik Santralinden elde edilen C sınıfı uçucu kül (UK) ve silis dumanı (SD) ile üretilen harçlar üzerinde deniz suyu etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda %10, %20 ve %30 UK ikameli; %6, %9, %12 ve %15 SD ikameli ve %10UK+%6SD, %10UK+%9SD, %10UK+%12SD, %10UK+%15SD, %20UK+%6SD, %20UK+%9SD ikameli ikili ve üçlü karışımlar olmak üzere kontrol harcıyla birlikte 14 seri harç numuneleri üretilmiştir. Toplam 182 adet 40×40×160 mm harç numuneleri hazırlanmış ve farklı kür sürelerinde sırasıyla şehir şebeke suyu ve Akdeniz 'den temin edilen deniz suyunda bekletilmiştir. Tüm kür türleri için harç numunelerinin farklı kür sürelerinde eğilmede çekme ve basınç dayanımları ölçülmüş ve aynı zamanda numunelerde meydana gelen yüzeysel bozulmalar periyodik olarak gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda şehir şebeke suyunda kür edilen harçlarda en yüksek dayanıma %10 UK içeren harç numunesinin sahip olduğu belirlenmiştir. SD ve UK miktarı arttıkça deniz suyunda bekletilen harç numunelerinin eğilmede çekme dayanımlarında 90 günden sonra azalmalar olduğu görülmektedir. UK içeren ikili numunelerin 180 güne kadar basınç dayanımlarının yükselmeye devam ettiği, diğer karışımlarda 90 günden sonra basınç dayanımlarında düşüş meydana geldiği görülmektedir. Deniz suyuna maruz harçlarda tüm numunelerin eğilmede çekme ve basınç dayanımlarında 90 güne kadar artış, 90 günden sonra düşüş olduğu ve basınç dayanımı sonucuna göre en iyi direnci UK içeren harçların, özellikle de %10 UK içeren numunenin gösterdiği belirlenmiştir.

Anahtar sözcükler: Uçucu kül, silis dumanı, deniz suyu etkisi, dayanım, dayanıklılık

Giriş

Yapı malzemelerinin ve yapıların işlevlerini servis ömürleri boyunca bozulmadan yerine getirmelerine dürabilite, dayanıklılık veya kalıcılık denir. Günümüzde, bazı dürabilite sorunlarının mekanizması tam olarak açığa kavuşmamakla birlikte, bu konuda gün geçtikçe ciddi ilerlemeler kaydedilmektedir. Örneğin beton üzerinde sülfatın zararlı etkisi 1877 yılından beri bilinmekte olup ilk araştırmalar 19. yüzyılın sonunda Candlot ve Michaelis tarafından yapılmıştır (Brueckner 2007). Sülfat etkisi, çimentodan kalsiyum alüminat hidrat ve kalsiyum hidroksit ile sülfat iyonları arasında betonda genleşme yaratan ürünler meydana getirmesiyle sonuçlanan reaksiyondur. Bu ürünler etrenjit ve jips olup betonda genleşme, çatlak oluşumu ve yüzeyin pul pul dökülmesi şeklinde hasara, dolayısıyla dayanım kaybına sebep olmaktadır. Betonda sülfat etkisiyle dayanım kaybına sadece genleşme oluşumu yol açmamaktadır. Aynı zamanda sülfat etkisiyle hidrate portland çimentosunda başlıca fazlar olan kalsiyum hidroksit ve kalsiyum silikat hi dratının bozulması da yapıdaki adezyon kuvvetlerinin zayıflamasına ve buna bağlı olarak dayanım kaybına neden olmaktadır. Deniz suyunda bulunan sülfat iyonları da çimento harçlarında ve betonda genleşme yaratarak çatlak, dökülme vb. hasarlar oluşturur. Deniz suyunda bulunan kimyasal maddeler (klorür, kalsiyum, sodyum, magnezyum ve sülfat iyonları) nedeniyle betonda dayanıklılık büyük ölçüde yitirilebilmektedir. Betonda sülfat etkisini tespit edebilmek için kullanılan yöntemlerden biri basınç dayanımındaki değişimi belirlemektir. Sülfat etkisiyle beton basınç dayanımında, erken yaşlar hariç artış olmamaktadır (Neville 2004).

Yeryüzünde mevcut elementlerin büyük bir kısmının (90 elementten 80'i) deniz suyunda çözünmüş halde bulunduğu sanılmaktadır. Bu nedenle deniz suyu pek çok katı madde ve gazın çözünmüş halde bulunduğu bir çözeltiyi oluşturur. Bunlardan başka deniz suyunda çözünmüş organik bileşiklerle asılı halde bulunan organik ve inorganik kökenli parçacıklar da vardır (Alkan ve diğ. 2004).

Deniz suyunda değişik türde ve miktarda yabancı maddeler bulunmaktadır (Tablo 1).

Tablo 1 Deniz Sularındaki İyonlar, g/lt [4] .

İyon	Akdeniz	Karadeniz	Dünya ortalaması
Na	11,56	4,90	11,00
K	0,42	0,23	0,40
Mg	1,78	0,64	1,33
Ca	0,47	0,24	0,43
Cl	21,38	9,50	19,80
SO_4	3,06	1,36	2,76

Bunların beton bünyesine girmesiyle, çimento hidratasyon ürünleriyle kimyasal reaksiyonlara girerek yeni ürünler oluştururlar. Özellikle ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz betonda deniz suyunun betona girmesi daha sonra saf suyun betondan buharlaşma yoluyla uzaklaşması sonucu biriken tuzların kristalleşmesi hacim artışı meydana getirir. NaCl kris talleşmesi sırasında 0°C'de 554, 50°C'de 654 atmosfer basınç oluşur (Akman, 1992). Beton boşluklarındaki bu iç basınç hasar oluşturabilir. Sodyum sülfat gibi sülfat tuzları da kristalleşme sonucu betonda NaCl kristalleşmesine benzer etkiler gösterebilirler. Denizdeki klor iyonunun diğer bir olumsuz etkisi beton içindeki donatı üzerinde olmaktadır. Korozyon sonucu beton içerisinde hacim arttırıcı ürünler oluşur. Oluşan bu ürünler betonda çatlamalara neden olabilmektedir (Neville, 2003).

Deniz suyundaki sülfatların betondaki etkisi dış kaynaklı sülfat atağına benzerdir. Denizdeki klor iyonunun bozucu etkisiyle sülfat etkisinin birleşmesinin betonda daha yıkıcı etki oluşturabileceği düşünülse de gerçekte durum böyle değildir. Betona giren deniz suyundaki magnezyum sülfat çimento hidratasyon ürünlerinden kalsiyum hidroksitle reaksiyonu sonucu alçıtaşı ve brusit oluşturur (Akman, 1992). Magnezyum iyonlarıyla uzun süre temas halinde olan betonda kalsiyum magnezyum iyonlarıyla yer değiştirerek magnezyum silikat hidratı (MSH) oluşturur. Bu yapının da bağlayıcılık özelliği yoktur, bu yüzden betonda betonda rijitlik ve dayanım kaybı meydana gelir (Yazıcı ve diğer., 2003).

Değişik oranlarda uçucu kül içeren harç numunelerinin sentetik deniz suyunda 90 gün boyunca bekletil diği bir çalışmada yüksek oranda uçucu kül içeren örneklerin eğilme dayanımlarının yapay deniz suyu etkisi ile arttığı belirlenmiştir. Bu durum klorür, sülfat ve sodyum iyonlarının uçucu külün puzolanik reaksiyonunu aktive etmesiyle açıklanmaktadır (Lorenzo ve diğ., 2003). Başka bir çalışmada, portland çimentosu, doğal puzolan ve silis dumanı içeren beton örnekleri Ölü Deniz ve Kızıl Deniz sularında bir yıl bekletilmiştir. Sülfat çözeltisi ve deniz suyunda geçen bir yıllık süreden sonra sülfat etkisine karşı en iyi performansı %15 silika tozu ve %15 doğal puzolan bileşiminden oluşan betonların sağladığı belirtilmiştir (Shannag ve Shaia, 2003). Sibbick ve diğerleri çalışmalarında, deniz suyuna maruz kalan betonlarda meydana gelen hızlı bozulmanın deniz suyunda bulunan magnezyum iyonu saldırısından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Yapılan elektron mikroskobu ve XRD analizlerinden tomasit, etrenjit, brusit ve hidrate magnezyum silikat gibi reaksiyon ürünlerinin oluştuğu görülmüştür (Sibbick ve diğ., 2003).

Erdoğdu ve diğerleri tarafından, sülfat iyonu konsantrasyonu düşük deniz suyu ile eşdeğer sülfat iyonu konsantrasyonunda sodyum ve magnezyum sülfat çözeltilerine maruz betonun performansı araştırılmış ve silis dumanı ikamesinin etkinliği değerlendirilmiştir. Gerek sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltilerinin, gerekse deniz suyunun silis dumanı içermeyen numunelerin basınç dayanımları üzerinde değişen mertebede kayıplara neden olduğu belirlenmiştir. Neden olduğu kayıp açısından en olumsuz etkiye deniz suyunun sebep olduğu ve yaklaşık 56 haftalık bir dönem sonunda %55 düzeyinde bir kayıp olduğu tespit edilmiştir. Sodyum sülfat çözeltisine maruz numunelerin dayanımlarında 90 haftalık bir dönem sonunda belirlenen kayıp yaklaşık olarak %40 düzeyinde olmuştur. Neden olduğu dayanım kaybı açısından silis dumanı içeren numuneler içinde en olumsuz etkiyi deniz suyunun oluşturduğu belirlenmiştir (Erdoğdu ve Karataş, 2003).

Dongxue ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, sentetik deniz suyunda 28 gün bekletilen portland çimentolu ve yüksek fırın cüruflu harçların basınç ve eğilme dayanımlarının değişimi incelenmiştir. Söz konusu çalışmada portland çimentosu ile üretilen harçların basınç dayanımlarında bir değişiklik olmazken, eğilme dayanımlarının azaldığı belirlenmiştir (Dongxue ve diğ., 1997).

KYB tasarım yöntemleri genellikle, hamur veya harç üzerinde ön çalışma gerektirmektedir. Domone ve Jin'e göre KYB' da harç deneylerinin üstünlükleri, KYB' da harç karakteristiklerinin baskın olması, harcın tasarımın temelini oluşturması ve harçta deney yapmanın daha kolay olmasıdır (Domone ve Jin, 1999). Bu nedenle, bu çalışmada kendiliğinden yerleşen harç (KYH) içinde çimento yerine ikame yöntemiyle C sınıfı uçucu kül (UK) ve silis dumanı (SD) mineral katkı olarak kullanılmış ve bu mineral katkılarla üretilen harç numunelerinin farklı kür (şehir şebeke suyu kürü ve deniz suyu kürü) ortamlarındaki dayanımları incelenmiştir. Öncelikle karışım oranlarını belirlemek için işlenebilirlik deneylerinden yararlanılmıştır. Bununla birlikte harç

karışımlarıyla hazırlanan 40×40×160 mm numuneler üzerinde eğilmede çekme ve basınç dayanımları deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Deneysel Çalışma

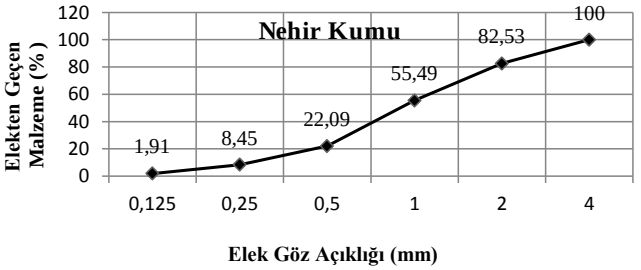
Malzemeler

Bu çalışmada, Elazığ Altınova Çimento Sanayi Tic. A.Ş.'den temin edilen CEM I 42,5 N tipi çimento ile birlikte mineral katkı olarak Soma Yatağan Termik Santralinden elde edilen C sınıfı uçucu kül ve Antalya Eti Elektrometalurji A.Ş.'den temin edilen silis dumanı kullanılmıştır. C sınıfı uçucu kül çimento yerine ağırlıkça %10, %20, %30 ve silis dumanı çimento yerine ağırlıkça %6, %9, %12, %15 oranlarında katılmıştır. Çimento, C sınıfı uçucu kül ve silis dumanının kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2 CEM I 42,5 N Tipi Çimento, C sınıfı UK ve SD'nin Kimyasal Bileşimi ve Fiziksel Özellikleri.

ÖZELLİK	CEM I 42.5 N	UK	SD
SiO_2 (%)	21.12	42.14	91
Al_2O_3 (%)	5.62	19.38	0.58
Fe_2O_3 (%)	3.24	4.64	0.24
CaO (%)	62.94	29.96	0.71
MgO (%)	–	1.78	0.33
K_2O (%)	–	1.13	–
SO_3 (%)	2.66	2.43	–
Klorür (Cl^-) (%)	0.0044	0.0010	–
Serbest CaO (%)	–	4.34	–
Kızdırma Kaybı (%)	3.52	1.34	1.84
Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	3.1	2.20	2.20
Özgül Yüzey Alanı (cm^2/gr)	3490	2900	96.5%< 45µm

Agregalar Elazığ Murat Nehrinden temin edilmiştir. KYH için kullanılan agregaların maksimum tane çapı 4 mm olarak seçilmiştir. Doygun kuru yüzey özgül ağırlığı 2.63 gr/cm^3 olarak bulunan agreganın su emmesi % 1.91 olarak belirlenmiştir. Yapılan elek analizi sonucundaki değerlere ait granülometri eğrisi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1 Kuma ait Analiz Grafiği.

KYH'ta kimyasal katkı olarak 1.06 gr/cm^3 yoğunluğa sahip modifiye polikarboksilat esaslı polimer bir süper akışkanlaştırıcı (SA) olan ViscoCrete Hi-Tech 36 tüm karışımlarda 8 kg/m^3 oranında kullanılmıştır.
Harç karışımlarında ve kür uygulamasında Elazığ şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan deniz suyu Mersin ili Mersin limanından temin edilmiştir. Deniz suyunun kimyasal özellikleri Elazığ İl Özel İdaresi Toprak ve Su Analiz Laboratuvarı'nda yaptırılmıştır. Analiz sonuçları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3 Deniz Suyunun Kimyasal Analizi.

İyonlar	Konsantrasyon (gr/lt)		
	Akdeniz	Mayıs 2012	Ekim 2012
Cl^-	21.38	20.14	18.82
SO_4^{-2}	3.06	2.79	2.57
Ca^{+2}	0.47	0.45	0.40
Mg^{+2}	1.78	1.26	0.92
Na^+	11.56	14.6	17.1
K^+	0.42	0.49	0.51
Tuzluluk	55.8	55.8	54.7

Deney Metodu

Bu çalışmada, ikili karışımlara portland çimentosuna ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında uçucu kül ve %6, %9, %12 ve %15 oranlarında silis dumanı katılmıştır. Üçlü karışımlar uçucu kül ve silis dumanı oranı %30'u geçmeyecek şekilde, portland çimentosuna ağırlıkça %10 oranında uçucu küle %6, %9, %12 ve %15 oranlarında silis dumanı; %20 oranında uçucu küle ise %6 ve %9 silis dumanı katılarak hazırlanmıştır. Elde edilen harçlara ait karışım oranları Tablo 4'de verilmiştir. Üç noktalı eğilme ve basınç deneyleri için hazırlanan 14 tip harç numunesi TS EN 196-1 (2002)'e uygun olarak 40×40×160 mm'lik kalıplara dökülmüştür. 1 gün kalıpta bekletildikten sonra 3, 7, 28, 56, 90 ve 180 gün sonuna kadar 20±2 °C sıcaklıkta şehir şebeke suyu ile doldurulan kür havuzunda bekletilmişlerdir. Ayrıca numuneler deniz suyunda 28, 56, 90 ve 180 gün süreyle kür edilmiştir.

Tablo 4 Karışım Oranları.

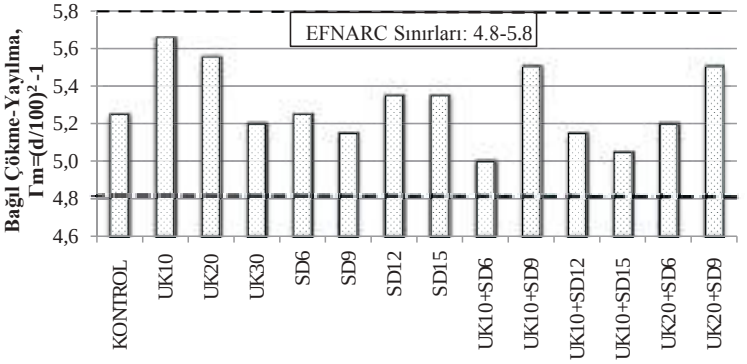
Numune Adı	İçerik (kg/m^3)							
	CEM I 42.5 N	UK	SD	Kum	Su	SA	Su/Toz (Hacimce)	Su/Toz (Ağırlıkça)
UK0 - SD0	650	0	0	1211.8	312	8.0	1.32	0.43
UK10	585	65	0	1240.6	292.5	8.0	1.21	0.40
UK20	520	130	0	1235	286	8.0	1.16	0.40
UK30	455	195	0	1212.5	286	8.0	1.14	0.41
SD6	611	0	39	1130	338	8.0	1.42	0.47
SD9	591.5	0	58.5	1089	351	8.0	1.47	0.49
SD12	572	0	78	1065	357.5	8.0	1.49	0.51
SD15	552.5	0	97.5	1041.2	364	8.0	1.51	0.52
UK10+SD6	546	65	39	1175.7	312	8.0	1.28	0.44
UK10+SD9	526.5	65	58.5	1134.8	325	8.0	1.33	0.46
UK10+SD12	507	65	78	1128	325	8.0	1.31	0.46
UK10+SD15	487.5	65	97.5	1121.3	325	8.0	1.30	0.46
UK20+SD6	481	130	39	1187.4	299	8.0	1.20	0.42
UK20+SD9	461.5	130	58.5	1163.5	305.5	8.0	1.22	0.44

Karışım oranlarının belirlenmesinde EFNARC (2002)'de önerilen mini çökme-yayılma ve mini V-hunisi işlenebilirlik deneylerinden faydalanılmıştır. Hazırlanan harç karışımlarının viskozite ölçümleri Brookfield DV-E model bir cihaz kullanılarak yapılmıştır. Harç karışımlarının viskozite değerleri 1, 2.5, 5, 10, 20, 50, 60 ve 100 devir/dk açısal hızlarda ve karıştırma işleminden hemen sonra ölçülmüştür. Böylece, her bir KYH karışımı için farklı açısal hızlardaki viskozite değerleri (cP) elde edilmiştir.
Hazırlanan 14 tip karışımın her birinden 13 seri 40×40×160 mm boyutlarında numuneler şehir şebeke suyunda (3, 28, 56, 90 ve 180 gün) ve deniz suyunda (28, 56, 90 ve 180 gün) küre maruz bırakılmıştır. Her bir kür periyodu sonunda kürden çıkarılan numuneler 25 ton basınç, 15 ton eğilme kapasiteli UTEST UTCM 6420 makinesinde eğilme ve basınç deneylerine tabi tutulmuşlardır.

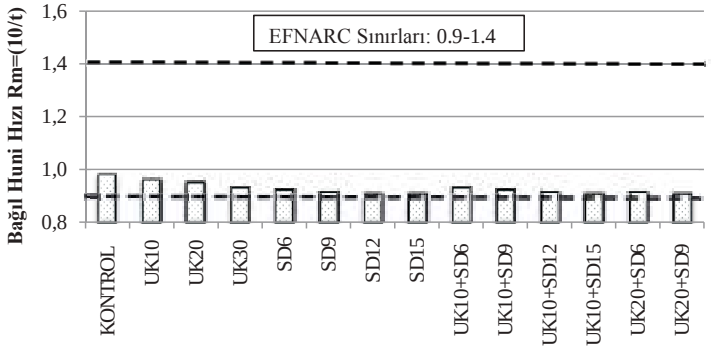
Bulgular ve Tartışma

İşlenebilirlik Deneyleri

Çökme-yayılma değerleri kullanılarak hesaplanan bağıl çökme-yayılma (Γ_m) ve bağıl V-hunisi hızı (R_m) değerleri Şekil 2'deki grafikte verilmiştir. Grafiklerdeki kesik çizgiyle işaretlenen değerler EFNARC sınır değeridir.



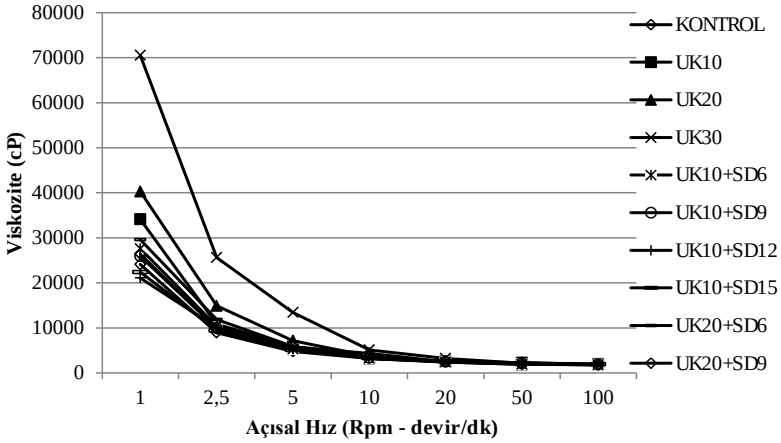
a) Bağıl Çökme-Yayılma Değerleri



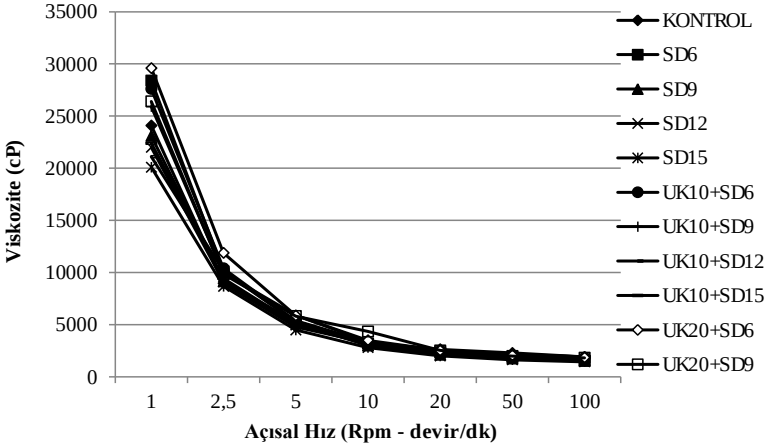
b) Bağıl V-Hunisi Hızı Değerleri

Şekil 2 Kullanılan Karışımların Bağıl Çökme-Yayılma ve Bağıl V-Hunisi Hızı Değerleri.

Bütün karışımların viskozitesi 1, 2.5, 5, 10, 20, 50, 60 ve 100 devir/dk açısal hızlarda ve karıştırma işleminden hemen sonra ölçülmüştür. Böylece, her bir KYH karışımı için farklı açısal hızlardaki viskozite değerleri (cP) elde edilmiş ve viskozite-açısal hız grafikleri çizilmiştir. Harçların genelinde dönel ucun açısal hızının artmasıyla viskozite azalmış ve viskozite eğrileri X eksenine doğru asimptotik bir yaklaşım göstermiştir.



Şekil 3 UK'li ve UK+SD içeren Harçların Viskozite Grafiği



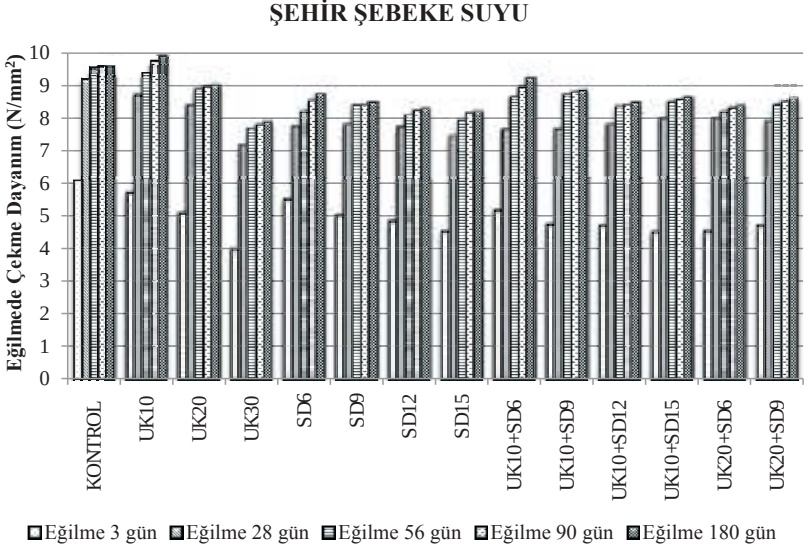
Şekil 4 SD'li ve UK+SD içeren Harçların Viskozite Grafiği.

Şekil 3 incelendiğinde özellikle UK miktarı arttıkça başlangıç değerlerinin çok yüksek olduğu, ilerleyen zamanlarda değerlerin yaklaşık olarak kontrol değerleriyle aynı kaldığı görülmektedir. Böylece UK içeren harçların kohezyonlarının yeterli derecede olduğu söylenebilir. Hazırlanan numunelerde SD miktarı arttıkça viskozite değerlerinin düştüğü görülmüştür. Bu durum Şekil 4 incelendiğinde UK+SD'li karışımlarda da SD miktarının artmasıyla da viskozite değerlerinin düştüğünü göstermiştir.

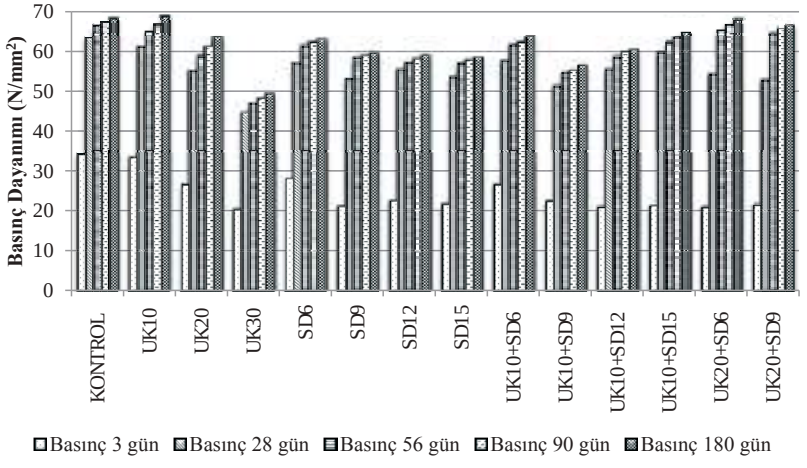
Dayanım Deneyleri

Hazırlanan karışımlar iki farklı kür ortamında bekletildikten sonra farklı kür süreleri için TS EN 196-1 (2002) standardına göre eğilmede çekme ve basınç deneylerine tabi tutulmuşturlar. Deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. 3, 28, 56, 90 ve 180 gün şehir şebeke suyu kür ortamında bekletilen harç numunelerinin üç noktalı eğilmede çekme ve basınç dayanımı değerleri Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.

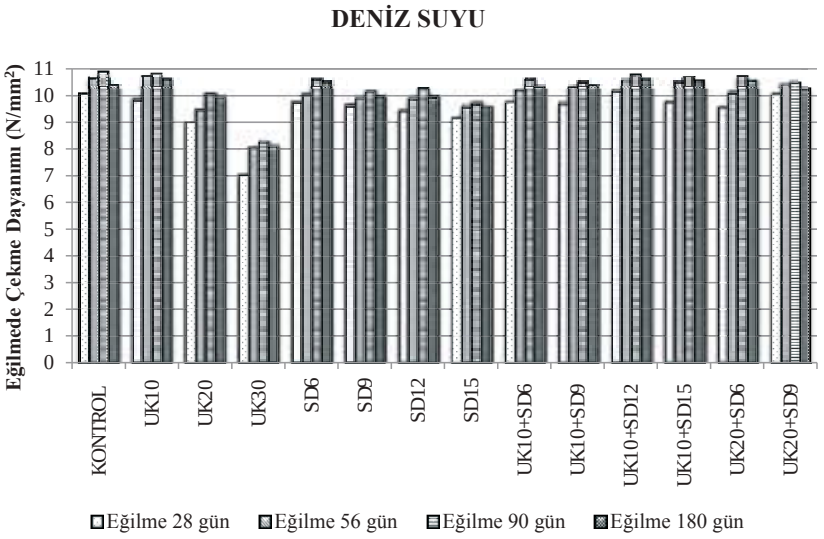


Şekil 5 Şehir Şebeke Suyu Eğilmede Çekme Dayanımı Grafiği.

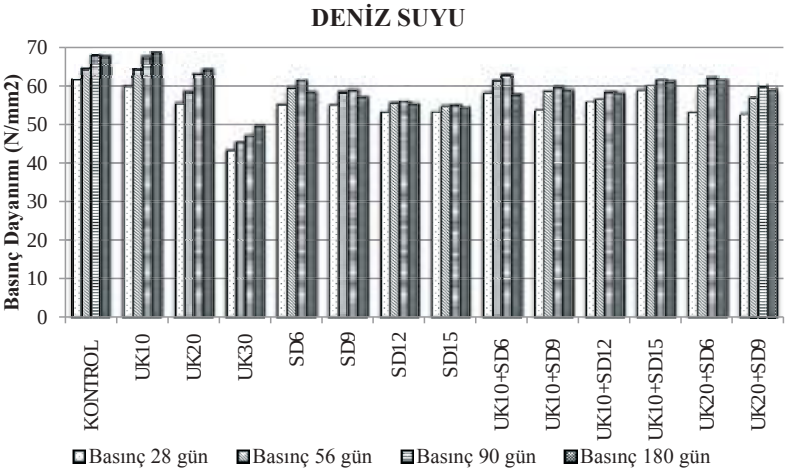


Şekil 6 Şehir Şebeke Suyu Basınç Dayanımı Grafiği.

2. 28, 56, 90 ve 180 gün deniz suyu kür ortamında bekletilen harç numunelerinin üç noktalı eğilmede çekme ve basınç dayanımı değerleri Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 7 Deniz Suyu Eğilmede Çekme Dayanımı Grafiği



Şekil 8 Deniz Suyu Basınç Dayanımı Grafiği.

Şekil 7 ve Şekil 8 incelendiğinde SD ve UK miktarı arttıkça deniz suyunda bekletilen harç numunelerinin eğilmede çekme dayanımlarında 90 günden sonra azalmalar olduğu görülmektedir. Dayanımdaki bu azalma 180 günden sonra daha belirgin olmaktadır. UK içeren ikili numunelerin 180 güne kadar basınç dayanımlarının yükselmeye devam ettiği, diğer karışımlarda 90 günden sonra basınç dayanımlarında düşüş görülmektedir.

Sonuçlar

Deniz suyunun farklı tip ve dozajdaki mineral katkı ile üretilen KYH'ların mekanik özelliklerine etkisinin incelendiği bu çalışmada; taze harç özellikleri için işlenebilirlik ve mekanik özellikleri belirlemek için eğilmede çekme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- UK içeren ve içermeyen harçlarda UK miktarının artmasıyla işlenebilirliğin arttığı görülmüştür.
- SD içeren ve içermeyen harçlarda SD miktarının artmasıyla karışımın su tutma özelliğinin arttığı belirlenmiştir. Böylece, EFNARC (2002)'ın önerdiği yayılma çaplarını elde edebilmek için karışımdaki su miktarı artırılmıştır.
- SD ve UK mineral katkılarının çimentoyla birlikte kullanıldığı harç numunelerinde UK oranı sabit tutulup SD oranı değiştirildiğinde karışımların işlenebilirliği üzerinde SD'nin hâkim olduğu görülmüştür.
- Şehir şebeke suyunda kür edilen numunelerin basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı sonuçları incelendiğinde UK+SD içeren ikili karışımlarda puzolanik malzeme miktarının artması ilk dayanımdaki düşüş oranını artırmıştır. Nihai dayanımlara bakıldığında ikili karışımlarda eğilmede çekme dayanımında en iyi sonucun %4 kayıpla %10UK+%6SD içeren numuneye ait olduğu belirlenmiştir. Nihai basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında ikili karışımlarda en iyi sonucun %1 kayıpla %20UK+%6SD içeren numuneye ait olduğu tespit edilmiştir.
- Eğilmede çekme dayanımları incelendiğinde şehir şebeke suyunda kür edilen numunelere kıyasla deniz suyunda kür edilen numunelerden sadece %30UK içeren numunede çok az bir dayanım kaybı meydana gelmiştir. 180 günlük kür süresinin sonunda tüm karışımların şehir şebeke suyunda kür edilen numunelerle kıyaslandığında eğilmede çekme dayanımlarında artış meydana gelmiştir. 28 günlük kür süresinin sonunda tüm numunelerin basınç dayanımlarında belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir. 90 günün sonunda deniz suyunda bekletilen numunelerin basınç dayanımlarında düşüş gözlenmeye başlamıştır. UK içeren karışımların basınç dayanımlarındaki kayıp belirgin düzeyde olmamakla birlikte UK içermeyen karışımda %14 oranında bir kayıp belirlenmiştir. SD içeren karışımlarda çok düşük bir kayıp görülmüştür. Bu da özellikle C sınıfı UK içeren harçların deniz suyuna karşı iyi bir dirence sahip olduğunu göstermiştir.

Kaynaklar

Akman, M.S., 1992. Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi, İTÜ Basımevi, İstanbul.

Alkan, A., Zengin, B., Yıldırım, C. ve Serdar, S., 2004. Trabzon Açıklarında Deniz Suyunun Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin İncelenmesi, 2001-2003 Sonuç Raporu, Su Ürünleri Merkez Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Trabzon.

Brueckner, R., 2007. Accelerating the Thaumasite Form of Sulfate Attack and an Investigation of Its Effects on Skin Friction , Ph.D. Thesis , Birmingham University .

Domone, PL., Jin, J., 1999. Properties of Mortar for Self -Compacting Concrete. In: Skarendahl A, Petersson O, edi tors. Proceedings of the 1st international RILEM symposium on self compacting concrete. p.109 -120.

Dongxue, L., Xinhua, F., Xuequan, W. and MİNGSHU, T., 1997. Durability study of steel slag cement, Cement and Concrete Research, 27 (7), 983-987.

EFNARC, 2002. Specifications and Guidelines for Self -Compacting Concrete, EFNARC, Association House, 99 West Street, Farnham, UK, www.efnarc.org, ISBN 0953973344, 32p

Erdoğan, T.Y., 2003. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, s 188-203, Ankara.

Erdoğdu, Ş. ve Karataş, E., 2003. Sülfat iyonu konsantrasyonu düşük ortamlara maruz betonun dürabilitesinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi", 5. Ulusal Beton Kongresi Bildiriler Kitabı, s.555-565, İstanbul.

Lorenzo, M.P.,Goni, S. and Guerrero, A.,2003. Role of aluminous component of fly ash on the durability of portland cement -fly ash pastes in marine environment, Waste Managemen t.

Neville, A., 2003. Properties on Concrete, Final Edition, Wiley, Newyork.

Neville, A., 2004. The confused world of sulfate attack on concrete, Cement and Concrete Research , Cilt 34, s. 1275–1296.

Shannag, M.J. andShaia, H.A., 2003. Sulfate resistance of high -perform ance concrete, Cement and Concrete Composites, 25, 363–369.

Sibbick, T.,Fenn, D. andCrammond, N.,2003. The occurrence of thaumasite as a product of seawater attack, Cement and Concrete Composites, 25, 1059–1066.

TS EN 196–1,Mart 2002. Çimento Deney Metotları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara .

Yazıcı, H, Türkel, S., Yiğiter, H. ve Aydın, S., (2003). Beton içindeki bağlayıcı miktarı nın betonun deniz suyuna dayan ıklılığına etkisi. *5. Ulusal Beton Kongresi. Bildiriler Kitabı.* Alaş Matbaas ı.

Kolemanit Kaplı Pomza Agregalarla Üretilen Hafif Betonlarda Klorür Geçirimliliği

Özlem SALLI BİDECİ, Alper BİDECİ
Düzce Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 81620, Düzce
Tel: (380) 542 12 64
E-Posta: ozlembideci@duzce.edu.tr , alperbideci@duzce.edu.tr

Hasan YILDIRIM
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul
Tel: (212) 285 37 58
E-Posta: hasanyildirim@itu.edu.tr

Sabit OYMAEL
Arel Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 34537, İstanbul
Tel: (212) 867 25 00
E-Posta: sabitoymael@arel.edu.tr

Serkan SUBAŞI
Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce
Tel: (380) 542 12 33
E-Posta: serkansubasi@duzce.edu.tr

Öz

Betonda, su/çimento oranı, çimento dozajı gibi parametrelerin yanında agrega kalitesi, agrega boyut dağılımının uygunluğu, beton pas payı da, beton geçirimsizliğinde ve durabiliteye dayalı beton tasarımında dikkate alınması gerekir. Betonun durabilitesi çoğunlukla sıvıların betonun içerisine geçişi ve hareketleriyle ilişkilidir. Klor iyonları beton içine; yüksek miktarda klorür içeren agregaların kullanılması, $CaCl_2$ içeren priz hızlandırıcı kimyasal katkı maddelerinin kullanılması, klorür içeren mineral katkıların kullanılması veya üretilen betonun deniz suyu ortamıyla temas etmesiyle nüfuz edebilir. Bu çalışmada, gözenekli yapıya sahip pomza agregasının hafif beton üretiminde performansını iyileştirebilmek, sertleşmiş betonun dayanımı ve durabilitesini artırabilmek amacıyla pomza agregası yüzeyi kontrol numunesi olarak çimento ile ve 0% (0-CLMCM), 7.5% (7.5-CLMCM), 12.5% (12.5-CLMCM) ve 17.5% (17.5-CLMCM) oranlarında çimento+kolemanit karışımı ile kaplanarak 400 dozlu hafif beton numuneler üretilmiştir. Üretilen beton numunelerin birim ağırlıkları, basınç dayanımları ve hızlı klorür geçirimlilik özellikleri ilgili standartlara göre araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda, çimento ve çimento+kolemanit kaplanmış agregalardan elde edilen beton numunelerin 90 günlük hızlı klorür geçirimliliğine göre, en yüksek değer 0-CLMCM numunelerinden (1127 coulomb), en düşük değer ise 17.5-CLMCM numunelerinden

(337 coulomb) elde edilmiştir. Standart ile kıyaslandığında kontrol ve 0 -CLMCM numunelerini n klor ür geçirgenliğinin "düşük", 7.5-CLMCM, 12.5-CLMCM ve 17.5-CLMCM numunelerinin ise "çok düşük" olduğu belirlenerek literatürde verilen değerlerden 7-8 kat daha düşük klor ür geçirgenliğine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar sözcükler: Hafif B eton, Pomza, Kolemanit, Klor ür Geçirimliliği

Giriş

İnşaat sektöründe son yıllarda görülen büyük ivmelenme, kullanılacak yapı malzemelerinin teknik yönden üstün parametre ve değerlere sahip olmalarının gerekliliği, birçok yeni yapı malzemelerinin kullanımına ve uygulanmasına zemin hazırlamaktadır (Gündüz ve diğ., 2001). Özellikle günümüzde yaşanan fosil enerji kaynaklarının hızlı tüketimi, sera gazının sebep olduğu hava kirliliği, enerji kullanım miktarının en aza indirilme çabası, üretilen malzemelerin doğru ve yerinde kullanılmaması gibi sebeplerle ortaya çıkan sürdürülebilirlik kavramı bu malzemelerin araştırılması ve geliştirilmesine hız kazandırmaktadır. Pomza ve bor madeni de araştırmalarda bu yönleriyle ön plana çıkmaktadır.

Pomza; inşaat sektöründe düşük birim ağırlık, yanma ve yangına karşı direnç, enerji sarfiyatının azaltılması, ısı kaybı ve gürültü kirliliğinin azalması amacıyla da ısı ve ses yalıtımında kullanılmaktadır. Dünya rezervinde büyük paya sahip olduğumuz, bilim ve teknoloji alanında stratejik bir öneme sahip bor madeni de inşaat sektöründe kullanım alanı bulmaya başlamıştır. Yangına karşı direnç, aşınma dayanımı, malzeme üretimin aşamasında enerji tasarrufu gibi özellikleriyle ilave edildiği malzemeye enerji ve dayanım açısından olumlu özellikler kazandırmaktadır. Sağladığı tüm bu olumlu özellikler ve aynı zamanda sürdürülebilir bir kaynak potansiyeliyle pomza ve bor hammaddesiyle yapı malzemeleri üretimi yakın gelecekte hız kazanacaktır.

Betonun dayanıklılık problemleri, betonun geçirimliliği ile başlar. Betonun geçirimsiz olması durumunda, birçok dayanıklılık problemine yol açan su ve zararlı sıvılar beton içerisine nüfuz edemez (Şimşek, 2007). Klor iyonları, çok hızlı hareket ederler ve klor içeren su beton ile temas ettiğinde oldukça hızlı korozyona neden olur. Betonun durabilitesi için, yayılma hızı oldukça önemlidir. Klor iyonlarının yayılmasının ölçülmesinde sabit ve hareketli durumda yayılma olmak üzere iki test metodu vardır. Sabit durumda yayılma testinde disk formunda monte edilen numune arasında iki hücre bölmesi kullanılır. Bir gözüne iyonik solüsyon (çoğunlukla NaCl ve), diğer gözüne ise saf su veya doymuş $Ca(OH)_2$ doldurulur. Hareketli durumda yayılma testinde prizmatik veya uzun silidir numunelerin bir yüzeyi hariç, diğer yüzeyleri iyonları geçirmemesi için kaplanır. Böylece kalan yüzey iyonların tek yönlü geçirimliliğine maruz bırakılır. İki metot karşılaştırıldığında, bağlayıcı klorür kapasitesinin elde edilen sonuçlara etki edeceği unutulmamalıdır (Kurdowski, 2002).

Agrega beton içinde çimento hamuru ile kaplanmış olduğundan ve normalde az boşluk içermesi nedeniyle, betonun geçirimliliği büyük ölçüde çimento hamurunun geçirimliliğine bağlıdır. Geçirimlilik açısından bakıldığında, aynı S/Ç oranında ve diğer şartlarında aynı kalması koşuluyla betonun harçtan, harcında hamurdan daha geçirimli olduğu söylenebilir. Bu durum, beton içinde en zayıf halka olarak nitelendirilen çimento hamuru -agrega ara yüzeyinin etkisiyle açıklanabilir. Agrega-çimento hamuru ara yüzeyinde göreceli olarak S/Ç oranının artması ve kılcal çatlaklar oluşması geçirimliliğin artmasına yol açmaktadır. Çimento hamurundaki ve betondaki boşluklar

mikro, kapiler ve makro olarak gruplandırılabilir. Kalıcılığı büyük ölçüde etkileyenler kılcal (kapiler) ve makro boyutta olanlardır (Baradan, ve diğ., 2010).
Çalışmada, gözenekli yapıya sahip pomza agregasının hafif beton üretiminde performansını iyileştirebilmek, sertleşmiş betonun dayanımı ve durabilitesini artırabilmek amacıyla pomza agregası yüzeyi kontrol numunesi olarak çimento ile ve 0% (0-CLMCM), 7.5% (7.5-CLMCM), 12.5% (12.5-CLMCM) ve 17.5% (17.5-CLMCM) oranlarında çimento+kolemanit karışımı ile kaplanarak 400 dozlu hafif beton numuneler üretilmiştir. Üretilen beton numunelerin birim ağırlıkları, basınç dayanımları ve hızlı klorür geçirimlilik özellikleri ilgili standartlara göre araştırılmıştır.

Materyal ve Metod

Materyal

Agrega: Araştırmada, kaplanmamış, çimento kaplanmış ve çimento+kolemanit kaplanmış olmak üzere üç çeşit pomza agregası ve beton karışımının 0/4 mm'lik agrega grubunu oluşturan doğal kırma kum agregası kullanılmıştır.
Kolemanit: Eti Maden Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğünden temin edilen öğütülmüş kolemanit kullanılmıştır (Kolemanit Analiz Raporu , 2011). Pomza agregası ve kolemanit e ait kimyasal analiz Tablo 1'de verilmiştir (Çimento Kimya Analizi Raporu, 2011).

Tablo 1. Pomza agregası ve kolemanitin kimyasal analizi

Kimyasal Bileşen	B_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	As_2O_3 (ppm)	Kızdırma Kaybı
Pomza	-	74.10	13.45	1.40	1.17	0.35	4.10	3.70	-	-	1.54
Kolemanit	40.09	4.98	0.15	0.029	26.95	2.37	-	0.09	0.26	15	0.27

Çimento: Araştırmada Kırklareli Limak Trakya Çimento Fabrikası'nın TS EN 197-1'e uygun olarak üretilen CEM I 42.5 R çimentosu kullanılmıştır. Çimentoya ait kimyasal ve fiziksel analiz, ilgili standart sınır değerleri ile birlikte Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. CEM I 42.5/R çimentosunun fiziksel ve kimyasal analizi

Bileşen (%)	CEM I 42.5R	TS EN 197-1	Fiziksel Analiz			TS EN 197-1
CaO	63.92	C+S≥%50	**Priz Süresi (Dk.)**	**Başlama**	145	min. 60
SiO_2	19.55			**Bitiş**	195	-
Al_2O_3	5.12	-	**Yoğunluk (g/cm^3)**		3.11	-
Fe_2O_3	2.52	-	**Özgül Yüzey (cm^2/g)**		3912	-
MgO	1.02	Lim.≤%5	**Toplam Hacim Genleşmesi (mm)**		1	max.10
SO_3	2.96	Lim.≤%4	**40µ Elek Üzeri Kalıntı**		23.1	-
Na_2O	0.27	-	**90µ Elek Üzeri Kalıntı**		2.4	-
K_2O	0.67	-	**Basınç Dayanımı (N/mm^2)**	**2 Gün**	25.9	min. 20
Cl-	0.0089	Lim.≤%0.10		**7 Gün**	45.1	-
Kız. Kaybı	4.08	Lim.≤%5		**28 Gün**	-	min. 42.5 max. 62.5
Çöz. Kalıntı	0.36	Lim.≤%5				

Su: Araştırmada Kırklareli şehir içme suyu şebekesinden temin edilen TS EN 1008 standardına uygun su kullanılmıştır.

Pomza agregaları kaplanmamış olarak kullanılmanın yanı sıra %0, %7.5, %12.5 ve %17.5 oranlarında kolemanitin çimentoya ikamesiyle de kullanılmıştır. Kaplama için agregalar 4 -8 mm ve 8-16 mm'lik agrega tane gruplarına ayrılmıştır. Kaplama işleminde özel, döner hacimli kaplama makinesi kullanılmıştır. Kaplama makinesine konulan agregalara, iki kat olacak şekilde çimento veya çimento+kolemanit şerbeti dökülerek, yüzeyinin tamamen kaplanması sağlanmıştır. Her katı ayırmak için agregaların üzerlerine öğütülmüş kolemanit tozu serpilmiştir. Agregalara , aynı kalınlıkta malzeme kaplanmasına çalışılmıştır. Agrega deney numunelerinin %0 B_2O_3'li çimento ile kaplı olanları 0-CLMCM, %7.5 B_2O_3 ile kaplı olanları 7.5-CLMCM, %12.5 B_2O_3 ile kaplı olanları 12.5-CLMCM ve %17.5 B_2O_3 ile kaplı olanları ise 17.5-CLMCM olarak kodlanmıştır.

Metod

Beton Karışım Dizaynı

Çalışmada; TS 2511 taşıyıcı hafif beton standardındaki esaslar dikkate alınarak beton karışım hesabı yapılmıştır. Buna göre toplam agrega hacmindeki kum oranı ağırlıkça %50, 4/8 mm elek aralığındaki agrega oranı %30 ve 8/16 mm elek aralığındaki agrega oranı %20 olarak belirlenmiştir. Beton karışım dizaynı Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Beton karışım dizaynı

Bileşen			Karışım Miktarı (400 Doz)				
			Kontrol	0-CLMCM	7.5- CLMCM	12.5- CLMCM	17.5- CLMCM
Elek Aralığı (mm)	8 - 16	kg	118.88	169.67	163.99	175.10	167.16
	4 - 8		173.93	278.56	275.75	281.69	268.63
	0 - 4		914.25	914.25	914.25	914.25	914.25
Su (kg)			254.53	207.00	205.00	204.00	208.00
Çimento (kg)			400.00	400.00	400.00	400.00	400.00

Bulgular ve Tartışma

Birim Ağırlık

Kuru birim ağırlık deneyi 150x150x150 mm boyutlarında küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Numuneler 48 saat su küründe bekletildikten sonra etüvde 110 °C'de 24 saat kurutulmuştur. Kurutulan numuneler hassas terazide tartılarak boyutları kumpasla ölçülmüş ve kuru birim hacim ağırlıkları deney sonuçları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Kuru birim ağırlık deney sonuçları

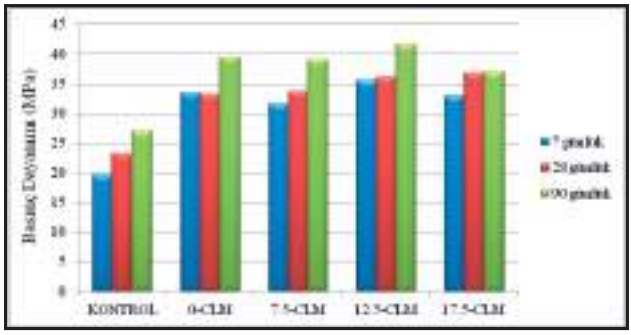
Karışımlar	Birim Ağırlığı (kg/m³)
0-CLMCM	1664
7.5-CLMCM	1898
12.5-CLMCM	1836
17.5-CLMCM	1869
0-CLMCM	1887

Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı deneyi 100x200 mm boyutlu silindir numunelere TS EN 12390 –3 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Toplam 45 adet numune 7, 28, 90 günlük kür süreleri sonunda kırılmak üzere üretilmiştir. Beton numunele rin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları deney sonuçları Tablo 5'te, sonuçlara ait grafiksel gösterim Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 5. Beton numunelerin basınç dayanımları

Karışımlar	Basınç Dayanımları					
	7 gün		28 gün		90 gün	
	(MPa)	%	(MPa)	%	(MPa)	%
Kontrol	19.5	100	23.2	100	27.1	100
0-CLMCM	33.4	171	33.2	143	39.5	146
7.5-CLMCM	31.6	162	33.7	145	39.1	144
12.5-CLMCM	35.5	182	36.2	156	41.7	154
17.5-CLMCM	33.0	169	36.8	159	37.0	137



Şekil 1. Beton numunelerin basınç dayanımları grafiği

Kaplanmamış, çimento ve çimento+kolemanit kaplanmış agregalardan elde edilen beton numunelerin 7 günlük basınç dayanımlarında en yüksek değer 12.5-CLMCM (35.5 MPa) ve en düşük değer kontrol (19.5 MPa) numunelerinden elde edilmiştir. 28 ve 90 günlük en yüksek basınç dayanım değerleri 17.5-CLMCM (36.8MPa) ve 12.5 -CLMCM (41.7 MPa) numunelerinden, en düşük basınç dayanım değerleri ise kontrol (23.2 MPa ve 27.1 MPa) numunelerinden elde edilmiştir.

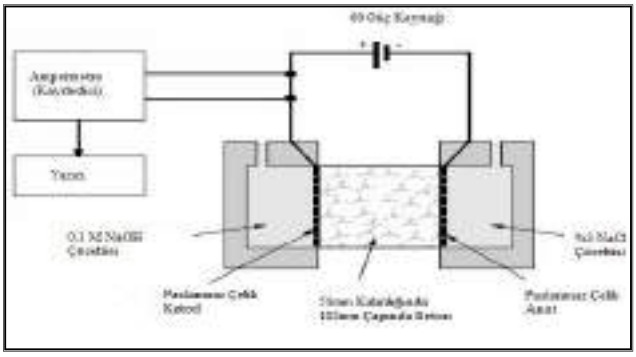
Kontrol numunelerine göre 7, 28 ve 90 günlük beton numunelerin basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. 7 günlük beton numuneler de; 0-CLMCM 'de %71, 7.5-CLMCM 'de %62, 12.5-CLMCM 'de %82 ve 17.5-CLMCM 'de %69, 28 günlük numunelerde 0-CLMCM 'de %43, 7.5-CLMCM 'de %45, 12.5-CLMCM 'de %56 ve 17.5-CLMCM 'de %59, 90 günlük numunelerde ise 0-CLMCM 'de %46, 7.5-CLMCM 'de %44, 12.5-CLMCM 'de %54 ve 17.5-CLMCM 'de %37 artmıştır.

Kaplanmamış, çimento ve çimento+kolemanit kaplanmış agregalardan elde edilen beton numunelerin basınç dayanımları kendi aralarında da incelenmiştir. 7 günlük numunelere göre; kontrol numunelerinde 28 günde %19, 90 günde %39 artış, 0-CLMCM numunelerinde 28 günde %1 azalma, 90 günde %18 artış, 7.5-CLMCM numunelerinde

28 günde %2, 90 günde %18 artış, 17.5-CLMCM numunelerinde ise 28 günde %12, 90 günde %12 arttığı tespit edilmiştir.
TS EN 206-1'e göre [84], hafif beton kontrol numunelerinin LC 25/28, 0-CLMCM, 7.5-CLMCM ve 17.5-CLMCM hafif beton numunelerinin LC 35/38 ve 12.5 -CLMCM hafif beton numunelerinin ise LC 40/44 dayanım sınıfında olduğu belirlenmiştir.

Hızlı klorür geçirimliliği

Hızlı klorür geçirimliliği deneyi ASTM C 1202 standardına uygun olarak yapılmıştır. Deneyde kalınlığı 50 mm, çapı 100 mm olan silindirik numuneler kullanılmıştır. Kürden çıkarılan 28 ve 90 günlük silindirik şeklindeki numunelerin eğrisel yüzeyleri yalıtkan bir malzeme ile kaplanmıştır. Söz konusu numunelerin vakum altında (önce 3 saat içerisindeki) hava boşlukları çıkarılmış ve sonrasında 1 saat saf su emdirilerek doygun yüzey kuru hale getirilmiştir. Daha sonra numuneler bir tarafında NaOH, diğer tarafında NaCl çözeltisi doldurulan deney kabına yerleştirilmiştir (Şekil 2) (Özkul ve Doğan, 2003). Silindirik numuneler 60 voltluk bir elektriksel alana maruz bırakılarak 30 dakika aralıklarla geçen akımın şiddeti (amper) ölçülmüştür. Toplam 6 saat süren deney sonunda şiddet-zaman diyagramındaki alan yardımıyla belirlenen sürede iletilen elektrik yük miktarı (Coulomb) hesaplanmıştır. Elektrik yük miktarı iyon miktarı ile orantılı varsayılarak değerlendirmeye tabi tutulmuş ve deney sonuçları Tablo 6'da ve Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Hızlı klorür direnci deney şeması

Tablo 6. Betonun klor iyonu geçirimlilik sınır değerleri ve 90 günlük numunelerde hızlı klorür geçirimliliği

Sınır Değerleri		Numuneler		
Geçen elektriksel yük miktarı C (coulomb)	**Klor iyonu geçirimliliği**	**Numuneler**	**Geçen elektriksel yük miktarı C (coulomb)**	**Klor iyonu geçirimliliği**
>4000	Yüksek	Kontrol	1115	Düşük
2000-4000	Orta	0-CLM CM	1127	Düşük
1000-2000	Düşük	7.5-CLM CM	655	Çok Düşük
100-1000	Çok düşük	12.5-CLM CM	497	Çok Düşük
< 100	İhmal edilebilir	17.5-CLM CM	337	Çok Düşük

Sonuç ve Öneriler

Çalışma kapsamında; 400 dozlu kaplanmamış, çimento ve çimento+kolemanit kaplanmış pomza agregası kullanılarak hazırlanan hafif betonlar üzerinde yapılan birim ağırlık, basınç dayanımları ve hızlı klorür geçirimlilik deneyleri ve analizlerin sonuçları aşağıda verilmiştir.

- Kaplanmamış, çimento ve çimento+kolemanit kaplanmış agregalardan elde edilen beton numunelerin birim ağırlık değerleri 1664 ile 1898 kg/m³ arasında değişmektedir. Bu değerlerin literatürde verilen üst sınırı (2000 kg/m³) geçmediği görülmüştür.
- Kontrol numuneleriyle, kaplanmış agregalarla elde edilen beton numunelerinden en yüksek basınç dayanımı 12.5-CLMCM numunelerinden ve en düşük basınç dayanımı kontrol numu nelerinden elde edilmiştir. Basınç dayanımları incelendiğinde çimento, çimento+kolemanit katkılarının basınç dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir.
- TS EN 206-1'e göre, hafif beton kontrol numunelerinin LC 25/28, 0 -CLMCM, 7.5-CLMCM ve 17.5 -CLMCM hafif beton numunelerinin LC 35/38 ve 12.5 -CLMCM hafif beton numunelerinin ise LC 40/44 dayanım sınıfında olduğu belirlenmiştir.
- Hızlı klorür geçirimliliği değerleri; kontrol numunelerine göre incelendiğinde, 0-CLMCM'de önemli bir artış gözlenmezken, 7.5-CLMCM, 12.5 -CLMCM ve 17.5-CLMCM numunelerinde %40 -70 arasında azalma tespit edilmiştir. Kontrol ve 0-CLMCM numunelerinin klor ür geçirgenliğinin "düşük", 7.5-CLMCM, 12.5 -CLMCM ve 17.5-CLMCM numunelerinin ise "çok düşük" olduğu belirlenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda, emniyetli olarak %12.5 kolemanit katkılı CEM I 42.5 R çimentosu ile kaplı agregalarla, hızlı klorür geçirimliliği değeri düşük, basınç dayanımı değeri yüksek taşıyıcı özel hafif beton üretilebileceği tespit edilmiştir. Ayrıca farklı puzolanik malzemelerle agregaların kaplanması sağlanarak elde edilecek hafif betonların dayanım ve durabilite açısından özellikleri belirlenebilir.

Kaynaklar

Gündüz, L., Rota, A., Hüseyin, A., ***Türkiye ve Dünyadaki Pomza Oluşumlarının Malzeme Karakteristiği Analizi***, 4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, Sayfa No: 175-188, İzmir, Türkiye, 2001.

Eti Maden Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğü, ***Kolemanit Analiz Raporu***, Balıkesir, 2011.

Kırklareli Limak Trakya Çimento Fabrikası***, Çimento Kimya Analizi Raporu No: 001***, Kimya Laboratuarı, Kırklareli, 07.12.2011.

TS EN 197-1, ***Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri***, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara , 2002.

TS EN 1008, ***Beton-Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler Ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları***, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2003.

TS 2511, ***Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları***, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1977.

TS EN 12390 –3, ***Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini***, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2010.

ASTM C 1202, ***Standart Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Choloride Ion Penetration***, Annual Book of ASTM Standarts, USA, 1997.

Özkul, H., ve Doğan, Ü.A., ***Kendiliğinden Yerleşen Betonların Geçirimlilik Özellikleri***, Beşinci Ulusal Beton Kongresi, Bildiriler Kitabı, Sayfa No: 111-122, İstanbul, 2003.

Şimşek, O., ***Beton ve Beton Teknolojisii***, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2007.

Kurdowski, W., ***Structure and Performance of Cements***, Chapter:11, (Edited by Bensted, J., Barnes, P.), Second Edition, Spon Press, Taylor and Francis Group, New York, 2002.

Baradan, B., Yazıcı, H., ve Ün, H., ***Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)*** , THBB Birliği, İstanbul, 2010.

Sürdürülebilir Gelişme için Betonarme Yapıların Dürabiliteye Göre Tasarımı

Özkan Şengül
İTÜ İnşaat Fakültesi, Maslak, İstanbul
Tel: (0212) 285 37 56
E-Posta: sengulozk@itu.edu.tr

Öz

Yüksek yatırımlar gerektiren yapıların istenilen servis ömürleri süresince belirli bir güvenlik içerisinde işlevlerini yerine getirmeleri beklenir, ancak dürabiliteye bağlı sorunlar sonucu yapı performansı zamanla azalabilir. Yapının yetersiz dürabilitesi büyük ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu kayıplar onarım ve güçlendirme masrafları ile yapı kullanımının sınırlanması sonucu oluşan maliyetleri kapsar. Yapılarda yaygın dürabilite sorunlarıyla karşılaşılmasının temel nedeni yapı tasarımında beton dayanımlarının esas alınması, yeterli basınç dayanımının sağlanması durumunda dürabilitenin de sağlanacağının varsayılmasıydı. Mevcut yapılar üzerinde yapılan incelemeler bu yaklaşımın yetersiz olduğunu ve farklı yapı tasarım yöntemlerinin gerekli olduğunu açıkca ortaya koymaktadır. Sunulan bu çalışmanın temel amacı betonarme yapıların dürabiliteye göre tasarımının sürdürülebilirliğe etkisini ortaya koymaktır. Bu amaçla, seçilen örnek bir yapının korozyon etkisindeki performansı ele alınmış ve ardından yapının farklı beton özelliklerine sahip olması durumunda dürabilite performansındaki değişimler incelenmiştir.

Anahtar sözcükler: Dürabiliteye Göre Tasarım, Korozyon, Beton Bileşimi, Sürdürülebilirlik, Yaşam Döngüsü Maliyeti

Giriş

Hem miktar olarak, hem de maddi bakımdan incelendiğinde, inşaat sektörü günümüzde en çok malzeme tüketen sektörlerin başında gelmektedir. Üretim açısından bakıldığında da bu durumun önemli etkileri vardır. Beton günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesidir. Ermco verilerine göre 2013 yılında Türkiye'de kullanılan hazır beton miktarı yaklaşık 102 milyon m^3 civarında olup Avrupa'da ilk sıradadır (Ermco, 2014). Ayrıca, ülkemizdeki inşaatların tamamında hazır betonun kullanılmadığı dikkate alınırsa beton tüketiminin aslında çok daha fazla olduğu da söylenebilir. Aynı durum dünya ölçeğinde de geçerlidir. Cembureau verilerine göre 2014 yılında dünya toplam çimento üretimi yaklaşık 4 milyar ton olarak tahmin edilmektedir. Yaklaşık bir hesapla, $1m^3$ betonda 300 kg çimento kullanıldığı kabul edilirse, dünyada beton ve sıva gibi çimento esaslı malzemelerin tüketiminin yaklaşık 13 milyar m^3 olduğu söylenebilr.

Betonun temel bağlayıcı malzemesi olan çimento üretimi fazla miktarda enerji gerektiren bir süreçtir. Bir ton çimento üretimi için yaklaşık 5,5 GJ enerji harcanır. Bu bakımdan çimento, üretimi için en çok enerji gerektiren malzemelerden biri olup, beton ana bileşenlerinden olan çimentonun maliyeti beton maliyetinde önemli bir yer tutar. Bunun yanında, çimento üretiminin önemli çevresel etkileri bulunmaktadır. Bir ton Portland çimentosu üretimi sonucunda yaklaşık bir ton CO_2 gazı açığa çıkar, bunun yanında zararlı diğer bazı gazlar da atmosfere verilmektedir. Çimento üretimine bağlı olarak dünya ölçeğinde yıllık yaklaşık 1,4 milyar ton CO_2 üretilmektedir ve bu miktar dünyadaki yıllık CO_2 üretiminin yaklaşık % 7'sini oluşturmaktadır. Bu sera gazı emisyonunun yaklaşık yarısı çimento üretimi sırasında kalkerin pişirilmesi sonucu açığa çıkarken diğer yarısı da üretim enerjisi için fosil yakıtların yakılması sonucu oluşur. Çevreye verilen zararların azaltılması ve çimento maliyetlerinin düşürülmesi amacıyla daha verimli üretim teknolojileri araştırılmakta ve uygulanmaktadır. Daha çevre dostu ve düşük enerji gerektiren çimentoların gelişmesi, üretim süreçlerinde tasarrufların yapılması, malzemelerin daha verimli kullanımı, yapıların ve kentsel altyapının servis ömürlerinin uzatılması, geri kazanım ve çeşitli atık malzemelerin kullanımıyla birlikte çimento ve betonun çevreye verdiği zararların azalacağı beklenmektedir. Geçmiş yıllarla karşılaştırıldığında beton üretimindeki enerji verimliliğinin günümüzde çok daha yüksek olduğu söylenebilir.

Oldukça yüksek yatırımlar gerektiren yapıların istenilen servis ömürleri süresince belirli bir güvenlik içerisinde işlevlerini yerine getirmeleri beklenir, ancak betonun dürabilitesine bağlı sorunlar sonucu yapı performansı zamanla azalabilir. Yapılar servis ömürleri boyunca çeşitli çevresel etkiler altındadır. Bunlar fiziksel, kimyasal veya fiziko – kimyasal yada mekanik etkiler olabilir. Yapı tasarımında bu etkilerin de gözönüne alınması şarttır. Yurdumuzda yaşanan Marmara Depremi yapılarımızdaki dürabilite sorunlarını açıkca ortaya koymuştur. Depremle birlikte betonarme yapılardaki korozyon çatlakları belirginleşmiştir (Taşdemir ve diğ., 1999). Donatı korozyonu betonarme yapılarda karşılaşılan en önemli dürabilite sorunlarından biridir. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı'nın 125000 konut üzerinde yürüttüğü bir inceleme sonucunda bunların %64'ünde korozyon sorunun bulunduğu, %90'ında ise kullanılan malzemelerin standartlara uygun olmadığının belirlendiği ifade edilmektedir (İmo, 2010). Korozyon sonucu donatı çaplarında azalma olurken, oluşan korozyon ürünleri beton paspaylarında çatlamaya yol açarak zararlı maddelerin beton içine girişini ve taşınımını arttırır (Broomfield, 1997). Bunların sonucu olarak yapı elemanlarının taşıma kapasitesinde azalma meydana gelir, bu nedenle yapı güvenliği azalır ve yapıdan beklenen servis ömrü sağlanamaz.

Yapının yetersiz dürabilitesi, yapı güvenliğindeki azalmanın yanında oldukça büyük ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Amerikan İnşaat Mühendisleri Birliği (ASCE) tarafından yapılan araştırmada ülkedeki her dokuz köprüden bir tanesinin yapısal olarak yetersiz olduğu, bunların onarımı veya yenilenmesi için ise her yıl 20 milyar dolar yatırım yapılması gerektiği hesaplanmaktadır. Ekonomik kayıplar onarım ve güçlendirme masraflarının yanında yapı kullanımının sınırlanması sonucu oluşan maliyetleri kapsar. Söz konusu maliyetler özellikle köprü veya tünel gibi ulaşım yapılarında trafiğin aksaması durumunda çok daha büyük önem kazanır. Köprü gibi bir yapının kullanıma kapanması veya sınırlandırılması bu köprüyü kullananlar için artan trafik yoğunluğu ve zaman kaybı anlamına gelir.

Yapılarda bu kadar yaygın dürabilite sorunlarıyla karşılaşılmasının temel nedeni yapı tasarımında beton dayanımlarının esas alınması, yeterli basınç dayanımının sağlanması durumunda dürabilitenin de sağlanacağının varsayılmasıydı. Mevcut yapılar üzerinde yapılan incelemeler bu yaklaşımın yetersiz olduğunu ve dürabiliteye dayalı yapı tasarım yöntemlerinin gerekli olduğunu açıkca ortaya koymaktadır (Cather ve Marsh , 1997). Betonarme yapılardaki dürabilite sorunlarının nedenlerinden bir tanesi de yapı özelliklerindeki dağılımdır (Şengül ve Gjørv, 2008). Yapıların dürabiliteye göre tasarımında beton özelliklerinin yanında beton paspayı gibi yapısal özellikler de ele alınmalı, dürabiliteye bağlı hasarların oluşum hızı gibi etkiler ile bunların dağılımlarının da dikkate alınarak, sınır durumlarla birlikte ele alınması gereklidir. Bu şekilde yapının servis ömrünü belirlemek mümkün olur.

Kalkınma ve gelişme kavramı ile çoğu zaman ekonomik göstergelerle ölçülen refahı seviyesini arttırmaya odaklanırken, günümüzde sürdürülebilir gelişme ile bunun üzerinde beklentilere odaklanılmaktadır. 1987 yılında Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu'nca yapılan tanıma göre sürdürülebilir gelişme; gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılayabilme yeteneğini ortadan kaldırmaksızın şimdiki neslin ihtiyaçlarının karşılanmasıdır. Günümüzün koşullarında, sürdürülebilir gelişmenin sağlanması giderek daha büyük önem kazanmaktadır. Sürdürülebilirlik; çevresel, ekonomik ve sosyal olmak üzere, birbirleriyle bağıntılı etkilere dayanır (ASTM E 2432). Servis ömrü hesaplanabilen veya tahmin edilebilen bir yapıda yaşam döngüsü değerlendirmeleri yapılabilir (TS EN ISO 14040 , 2007). Böyle bir değerlendirmede; yapının ilk inşasından ömrünü doldurup yıkılmasına kadar geçen sürede, çevreye verilen zararlar, karbon izi, enerji ihtiyaçları ve her türlü maliyetler gibi çeşitli faktörler esas alınır. Bu hesaplamalarda sadece ilk yapım değil, tüm işletme, bakım ve onarımlar ile yıkım aşaması da değerlendirmeye dahil edilir. Bu kapsamda, kullanılan malzemelerin üretimi ve malzemelerin inşaat sahasına taşınması için gerekli enerji, bu üretim ve taşınma sırasında çevreye etkileri, yapının kullanımı sırasındaki enerji ihtiyaçları gibi faktörler de esas alınır. Böylece farklı yapı sistemleri, malzemeler veya yöntemlerin karşılaştırılarak en uygun seçimlerin yapılması mümkün olabilir. Bunun bir sonucu olarak da sürdürülebilirlik sağlanabilir.

Sunulan bu çalışmanın temel amacı betonarme yapıların dürabiliteye göre tasarımının sürdürülebilirliğe etkisini ortaya koymaktır. Bu amaçla, farklı özelliklere sahip elemanların klor etkisine bağlı korozyon durumundaki performansı ele alınmakta ve bu etkilerin sürdürülebilirliğe etkisini değerlendirmek için farklı durumlar karşılaştırılmaktadır.

Dürabiliteye Göre Tasarım

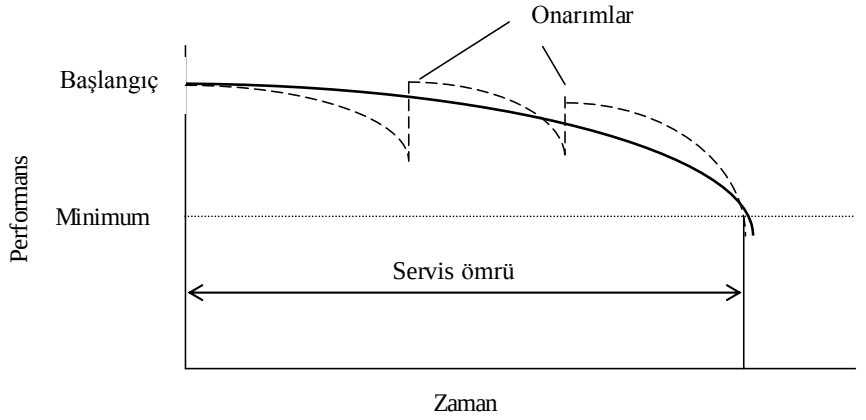
Servis Ömrü

Betonun yetersiz dürabilitesine bağlı sorunlar sonucu yapı performansı zamanla azalır. Yapı tipine bağlı olarak farklı servis ömrü tanımları kullanılmaktadır ancak genel bir tanım olarak; yapının performansı belirli bir değerin altına düştüğünde veya önemli onarımlar gerektiğinde servis ömrüne ulaşıldığı kabul edilebilir. Yapı özelliklerine ve kullanımına bağlı olarak yapıdan beklenen servis ömürleri değişebilir. Tasarımda kullanılabilcek gösterge niteliğindeki bir yapı servis ömrü sınıflandırması Tablo 1'de verilmektedir (TS EN 1990, 2002) .

Tablo 1. Yapı servis ömürleri (TS EN 1990, 2002)

Sınıf	Tasarımda kullanılabilcek gösterge servis ömrü (yıl)	Örnek
1	10	Geçici yapılar
2	10-25	Değiştirilebilir taşıyıcı elemanlara sahip yapılar
3	15-30	Tarım yapıları
4	50	Konut ve kamu yapıları
5	100	Anıtsal binalar, köprüler ve diğer önemli yapılar

Yapıların dürabiliteye göre tasarımının temel ilkesi; öngörülen bir servis ömrü boyunca performansın belirlenen minimum bir değerin altına düşmemesi veya veya önemli onarımlar gerektirmemesi biçiminde özetlenebilir (ISO 15686, 2001). Şekil 1'de gösterildiği gibi betonun yetersiz dürabilitesine bağlı olarak yapı elemanlarının performansı zamanla azalabilir (CEB, 1992). Yapı performansının beklenenden hızlı azalması durumunda servis ömrünün daha kısa olacağı açıktır. Böyle bir durumda, başarılı bir onarımla yapı performansının arttırılması mümkündür. İlerleyen dönemlerde eğer gerek olursa yeni onarımlarla da servis ömrünün beklenen süreye ulaşabilmesi mümkündür. Şekil 1'de bu onarımların etkisi şermatik olarak gösterilmektedir. Yapılan her bir onarımın ayrı bir maliyet olduğu unutulmamalıdır. Onarımların başarısız veya yetersiz olması durumunda ise yapıdaki performans azalışı aynı hızda devam edebilir.



Şekil 1. Beton performansı ve servis ömrü arasındaki ilişki (CEB, 1992)

Dürabilite için Performansa Dayalı Tasarım

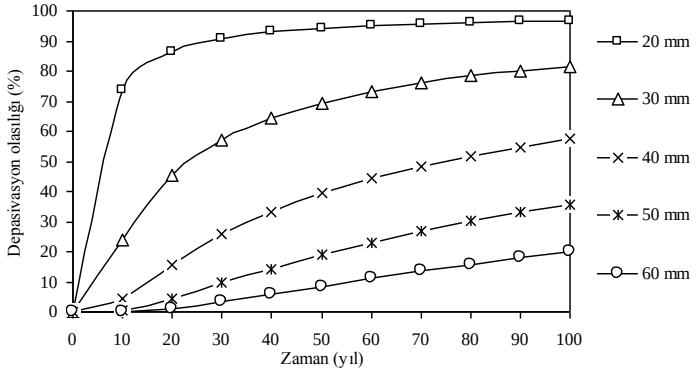
Dürabiliteye göre tasarımında yapının zamana bağlı performansı esas alındığından söz konusu performansa dayalı tasarım yapılmaktadır. Bu amaçla öncelikle performans kriterleri belirlenmelidir. Kriter olarak farklı özellikler dikkate alınabilir. Değişik çevresel etkilerden yapıya en hızlı zarar veren etki belirlenip servis ömrünün belirlenmesinde kriter olarak dikkate alınırsa daha güvenli bir tasarım yapılabilir. Kriterlere kara r verilmesinin ardından, uygun modeller kullanılarak, istenilen servis

ömrünün elde edilmesini sağlayacak beton bileşim özeliklerine karar verilebilir. Bulunan bu sonuçlar yapının mekanik tasarımıyla da uyumlu olmalı, örneğin projedeki basınç dayanımı ve diğer mekanik özelikler güvenli bir şekilde sağlanmalıdır. Betonarme yapılardaki dürabilite sorunları karşılaştırıldığında, en yaygın görülen sorunun beton içindeki donatının korozyonu olduğu söylenebilir. Diğer çevresel etkilerle karşılaştırıldığında, korozyon daha hızlı gelişen bir dürabilite sorunudur. Korozyonla birlikte donatıın çapı azalır ve bunun sonucunda donatının ve dolayısıyla yapı elemanının taşıma gücü düşer. Korozyon ürünlerinin hacmi daha fazla olduğundan bu hacim artışına bağlı olarak beton paspayında çatlamalar ortaya çıkar. Ayrıca, korozyon sonucu beton ile donatı arasındaki aderans da azalır. Tüm bu etkiler sonucunda da yapı elemanının taşıma gücü ve davranışı değişir.

Sunulan bu çalışmada dürabiliteye göre tasarım için donatı korozyonu esas alınmaktadır. Korozyonun klor etkisine bağlı olarak ortaya çıktığı kabul edilmiştir. Dürabilite analizi için servis ömrünün sona erdiği kabul edilen bir sınır durumu tanımlanmalıdır. Kullanılabilirlik sınır durumu veya taşıma gücü sınır durumu gibi farklı sınır durumları tarif edilebilir. Kullanılabilirlik sınır durumunu, korozyon başlangıcı veya paspayının çatlamaya başlaması gibi ekonomik kayıpların başladığı durumdur. Taşıma gücü sınır durumu ise yapı elemanının göçtüğü veya taşıma kapasitesinin büyük oranda kaybolduğu aşama olarak kabul edilebilir (Melchers, 1987). Yeni inşaa edilen bir yapı için; donatının bulunduğu derinlikteki klor iyonu konsantrasyonu kritik klorür konsantrasyona ulaşıldığında depasivasyon oluştuğu ve kullanılabilirlik sınır durumuna erişildiğini kabul edilebilir . Çünkü, bu noktadan sonra bakım ve onarım maliyetleri önemli derecede artar, yapı güvenliği azalmaya başlar. Klor iyonu yayınımı modellenerek iyonların donatıya ulaşma süreleri belirlenebilir (Şengül, 2011). Bu modeldeki bazı parametreler değiştirilerek farklı durumlar için depasivasyon olasılıkları elde edilmiştir. Farklı durumların donatıdaki depasivasyon olasılığına etkileri aşağıda gösterilmektedir.

Paspayı Kalınlığı

Seçilen örnek bir elemandaki paspayı kalınlığının donatıdaki depasivasyon olasılığına etkisi Şekil 2'de gösterilmektedir. Bu örnekte tüm beton özellikleri sabit tutulurken sadece paspayı kalınlığı değiştirilmiştir.



Şekil 2. Paspayı kalınlığının depasivasyon olasılığına etkisi

Donatıyı örten paspayının kalınlığı arttıkça, seçilen bir depasivasyon olasılığına ulaşma süresi de beklendiği gibi uzamaktadır. Yapı tasarımından yola çıkarak, yeni yapılan bir yapı için bu olasılık %10 veya %20 gibi bir değer olarak alınabilir. Zira, beton basınç dayanımı sınıflarının belirlenmesinde de %7 veya %10 gibi bir sınır kabul edilmektedir. Böyle bir depasivasyon olasılığı için, paspayı 20 veya 30 mm iken bu olasılığa ilk birkaç yıl içinde ulaşılmaktadır.

Klorür etkisine bağlı olarak oluşan korozyonun başlayabilmesi için çevresel etkilerden kaynaklanan klorürün yüzeyden içeri doğru taşınımı ve beton paspayını geçip donatıya ulaşması gereklidir. Şekil 2'de görüldüğü gibi paspayı kalınlığı arttıkça klorürün donatıya ulaşması için gerekli süre artmaktadır. Böylece korozyonun başlama süresi artmakta , dolay ısıyla da servis ömrü uzamaktadır. Bu nedenle paspayı özellikleri yapı servis ömrünü doğrudan etkileyen faktörlerden bir tanesidir. Sunulan b öyle bir yöntemle, yeni inşaa edilecek bir yapı için farklı paspayı kalınlıklarına bağlı olarak tasarım aşamasında performans karşılaştırmaları yapmak mümkündür (Taşdemir ve Şengül 2013).

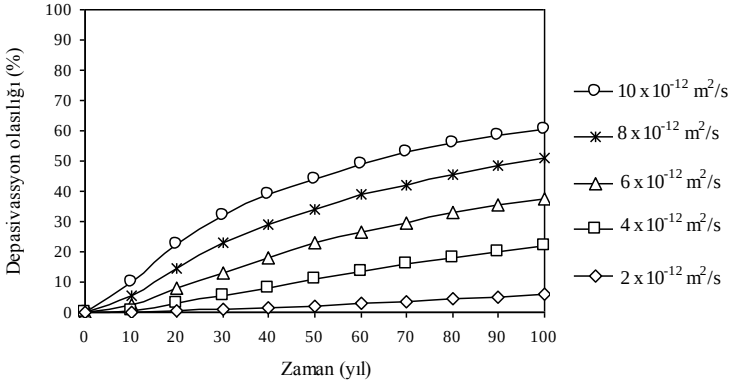
Betonun Klor Geçirimliliği

Betonun k lorür yayınım katsayısının depasivasyon olasılığına etkisi Şekil 3'de gösterilmektedir. Bu karşılaştırmada diğer tüm beton ve paspayı gibi yapısal özellikler sabit tutulurken sadece beton k lorür yayınım katsayısı değiştirilmiştir. Yayınım katsayısının iyonların hareket hızlarını, diğer bir ifadeyle klor geçirimliliğini göstermektedir. Bu katsayının yüksek olması klorür iyonlarının beton içinde daha hızlı ilerlediklerini ifade eder.

Şekilden görüldüğü gibi, diğer tüm parametreler aynı olduğu halde yayınım katsayısındaki artışlar depasivasyon olasılığını önemli derecede arttırmaktadır. %10 veya %20 gibi b elirli bir depasivasyon olasılığı değeri esas alındığında ise, yayınım katsayısının artması bu olasılığa ulaşılması için gerekli süreyi azalmaktadır. Bu durum, kullanılabilirlik sınır durumuna ulaşılması için gerekli süredeki, yani, yeni inşa edilecek bir yapı için yapının servis ömründeki kısalmaya işaret etmektedir. Uzun servis ömrüne sahip bir yapı elde edebilmek için klorür yayınım katsayısı mümkün olduğunca düşük, yani kalitesi yüksek bir beton kullanılması gerektiği, bu modelleme sonuçlarıyla sayısal olarak d a ortaya konulmaktadır. Su/çimento oranı, çimento türü, puzolan kullanımı, hidratasyon derecesi gibi etkenler klorür yayınım katsayısını etkiler. Paspayının kalitesinin arttırılması, yani yayınım katsayısının azaltılması için betonun kürüne de gerekli özen gösterilmelidir. Özellikleri farklı betonlar kullanıldığında, yani klor geçirimlilikleri düşük ve yüksek betonlar karşılaştırıldığında, aynı bir süre için; geçirimliliği düşük olan betonun korozyon olasılığı daha düşük olmaktaktır.

Çeşitli zararlı maddeler ve suyun, çatlaklar ve boşluklar yoluyla betonun içine girmesi ve taşınımı, betonun hasar görmesine yol açan temel mekanizmadır. Özellikle kılcal boşluklar betonun geçirimliliğini etkileyen önemli faktörlerden bir tanesidir ve söz konusu boşlukların azaltılması beton dürabilitesini olumlu yönde etkileyecektir. Bu amaçla atılması gereken ilk adım betonun su/çimento oranını azaltmaktır. Böylece kılcal boşluk miktarı azaltılır. Puzolanik malzemelerin betonda kullanımı da geçirimliliği azaltan bir diğer uygulamadır. Çimentonun hidratasyonu sonucu kalsiyum-silikat-hidrate (CSH) ve kalsiyum hidroksit CH oluşur. Puzolan bu CH ile reaksiyona girerek yeni CSH oluşumunu sağlarlar. Kirecin bağlanması ve yerine yoğun yapıya sahip olan

CSH'ın oluşması beton iç yapısını değiştirir. Yavaş puzolanik reaksiyon nedeniyle uçucu kül veya yüksek fırın cürufu içeren betonların ilk günlerdeki geçirimlilikleri normal betona göre yüksek olabilir. Sonraki yaşlarda ise puzolan içeren betonların geçirimlilikleri çok daha düşük olabilir. Bunu sağlamak için uygun kür yapılması daha da fazla önem kazanır. Uygun kürle birlikte puzolan kullanımı beton iç yapısını modifie ederek kılcal boşluklar azaltılabilir. Kılcal boşlukların azaltılmasını ise beton dürabilitesini önemli oranda iyileştirir. Ayrıca, puzolanik reaksiyona bağlı olarak boşlukların tıkanması da geçirimliliği azaltır.



Şekil 3. Klorür yayınım katsayısının depasivasyon olasılığına etkisi (Şengül, 2011)

Uzun servis ömrüne sahip yapılar elde edebilmek için paspayı kalınlığının arttırılmasının yanında paspayının kalitesi, yani Şekil 3'de gösterildiği gibi geçirimliliği de dikkate alınmalı ve düşük geçirimliliğe sahip, çatlak içermeyen bir paspayı elde edebilmek için kür koşulları gibi çeşitli etkenlere de özen gösterilmedir. Paspayında çatlak bulunması halinde klorun beton yüzeyinden içeriye taşınımı çok hızlı bir şekilde meydana gelir, böylece herhangi bir zamanda, çatlağın olduğu kısımdaki klor konsantrasyonu, çatlak olmayan diğer bölgelere göre çok daha yüksek olur. Çatlaklı kısımdaki bu yüksek klor konsantrasyonu sonucu ise buralarda korozyon çok daha kısa sürede meydana gelir. Ayrıca, bu çatlaklardan başka zararlı etkilerin ve suyun taşınımı da hızla gerçekleştiğinden bu etkiler betona çok daha kolay bir şekilde zarar verebilir.

Yaşam Döngüsü Analizi

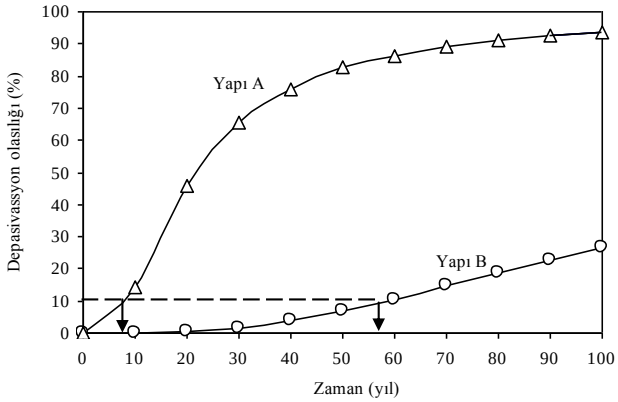
Yaşam döngüsü analizinde; ilk yatırım ve yapım, işletme, onarımlar ve yıkım aşamaları da dahil olmak üzere yapının tüm ömrü boyunca ihtiyaç duyulan enerji, çevreye verilen zarar ile maliyet hesaplanır. Yapıdaki dürabilite sorunları nedeniyle beklenenden daha kısa bir servis ömrüne sahip olması durumunda bu ömrü uzatmak için onarım gereği ortaya çıkacaktır. Yapıların servis ömürleri boyunca çeşitli onarımlar görmeleri ise yaşam döngüsü maliyetini arttırmakta ve kaynaklar yeni yatırımlar için kullanılacağına mevcut yapıların onarımı için kullanıldığından sürdürülebilirliği olumsuz etkilemektedir. Yetersiz dürabiliteye bağlı olarak yapılacak onarımlar, sınırlı olan kaynakların israf edilmesine yol açar. Bu durum özellikle kamu kaynaklarının etkin kullanılmasını kısıtlar.

Yapının servis ömrü boyunca gerekebilecek onarımların sayısına bağlı olarak yaşam döngüsü analizleri gerçekleştirilebilir. Bu analizin ilk adımı betonun servis ömrünün modellenmesidir. Eğer servis ömrünün istenilenden az olması gibi durum söz konusu ise, bu ömrü uzatmak için farklı alternatifler belirlenebilir veya belirli onarımlar gündeme gelir (Şekil 1) Böyle bir durumda, modelleme sonuçlarına dayanarak hangi aralıklarla ve toplam kaç tane onarım gerekli olacağı belirlenebilir. Her bir farklı yapım veya onarım alternatifi için detaylı analizler yapılarak bunlar için gerekli enerji, çevreye verilen zarar ve maliyet hesaplanır.

Betonarme yapıların dürabilite performansını ve dolayısıyla servis ömrünü etkileyen temel parametreler beton bileşimi, bağlayıcı türü ve paspayı kalınlığıdır. Yapıların yaşam döngüsü analiz sonuçlarını etkileyen önemli bir faktör olan onarımların etkilerini inceleyebilmek için betonun geçirimliliği ve paspayı kalınlıklarının etkileri karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, aynı çevresel etkiler altında bulunan, aynı özelliklere sahip iki yapı ele alımıştır. Bunlardan Yapı A'da paspayı kalınlığının 25 mm ve beton klorür iyonu yayınım katsayısının $4{,}5x10^{-12}$ m^2/s olduğu, Yapı B'de ise paspayı kalınlığının 40 mm ve beton klorür iyonu yayınım katsayısının $2{,}5x10^{-12}$ m^2/s olduğu kabul edilmiştir. Burada Yapı A, Portland çimentosu ile üretilmiş, beton geçirimliliğinin fazla, paspayı kalınlığının ise az olduğu bir yapı iken, Yapı B ise öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren, geçirimliliğinin düşük, paspayı kalınlığının ise fazla olduğu bir yapıdır. Bu örnekte betonun klorür yayınım katsayısı ve paspayı kalınlığı dışındaki parametreler ise sabit tutulmuştur. Klor iyonu yayınımı 2. Fick Yasası ile modellenerek klor iyonlarının donatıya ulaşma süreleri belirlenmiştir. Klorür iyonu yayınım katsayısı ve paspayı değerleri değiştirilerek simülasyon programları yardımıyla iki farklı özellikteki yapı için depasivayon olasılıkları elde edilmiştir. Bu iki durum için elde edilen depasivasyon – zaman grafikleri Şekil 4'te verilmektedir.

Şekil 4'te görüldüğü gibi geçirimliliğin yüksek, paspayı kalınlığının ise düşük olduğu Yapı A'da depasivasyon olasılığı çok hızlı bir biçimde artmaktadır. İlk yirmi yıl içindeki depasivasyon, yani donatıların korozyona başlaması olasılığı %50'ye yakındır. Yapı B'de ise 100 yıl sonunda bile ancak %30 olasılığa ulaşılmaktadır. Yeni yapılacak bir yapıda donatı depasivasyonun kullanılabilirlik sınır durumunu oluşturduğu kabul edilirse, ve bunun için % 10 gibi bir sınır olasılık değeri kabul edilecek olursa, Yapı A'nın bu olasılığa ulaşması yaklaşık 10 yıl gibi bir süre alırken, Yapı B için bu süre yaklaşık 55 yıl olarak elde edilmektedir. Kullanılabilirlik sınır durumu için kabul edilen % 10 depasivasyon olasılığının oldukça düşük bir değer olduğu düşünülebilir ancak, yukarıda da belirtildiği gibi, beton sınıflarının belirlenmesinde %7 veya %10 gibi bir sınırlar kabul edilmektedir.

Donatıların depasivasyon olasılıklarını belirlemek için yapılan modellemeler çeşitli kabüllere dayanmaktadır (Şengül, 2011). Dolayısıyla bu kabüllerin gerçek duruma yakın olması elde edilen sonuçların güvenirliğini sağlayacaktır. Elde edilen sonuçlar farklı alternatiflerin karşılaştırılması olanağını sağlayarak en uygun çözümlerin belirlenmesine imkan verir. Bu hesaplamalarda betonlarda herhangi bir çatlak vb. olmadığı varsayılmaktadır. Yukarıda da vurgulandığı gibi paspayında çatlak vb. kusurların bulunması ise halinde zararlı etkilerin beton içerisine çok daha hızlı ve kolay bir biçimde taşınarak beton ve içerisindeki donatı daha kısa sürede hasar görmeye başlayacaktır.



Şekil 4. Farklı özelliklerdeki iki yapı için depasivasyon olasılıklarının değişimi

Yapının her onarımında ilk yapımda kullanılmış olan beton ile onarılacağı kabul edilirse, onarım sonrası yaklaşık aynı sürelerde tekrar onarım gerekeceği söylenebilir. Bu durumda Yapı A'nın 10 yıl arayla onarılması, Yapı B'nin ise 50 yıl arayla onarılması gerekli olacaktır. Dolayısıyla 100 yıllık br servis ömrü elde edilebilmesi için Yapı A'nın toplam 10 defa, Yapı B'nin ise 2 defa onarılacaktır. Bu onarım sayıları yapıların ilk yapımında kullanılan betonlarla onarılması kabülüne dayanmaktadır. Ancak, bu onarımlarda ilk yapımda kullanılan betonlara göre daha geçirimsiz betonlar kullanılması durumundaysa onarıma kadar geçen süre artacak, buna bağlı olarak da belirli bir servis ömü boyunca gerekli onarım sayısı da azalacaktır. Gerekli onarım sayısının azalması ise yapının yaşam döngüsü maliyetini düşürecektir. Onarım maliyetlerinin hesaplanması ise detaylı bir birim fiyat analizini gerektirmektedir. Onarım yöntemlerinin her bir aşamasının ayrıntılı belirlenmesi, gerekli ekipman, malzeme ve işçilik giderlerinin tespiti gereklidir. Yaşam döngüsü analizlerinde sadece farklı betonlar değil, paslanmaz çelik kullanılması, donatıların epoksi kaplanması, beton yüzeyinin su itici vb. ile kaplanması gibi farklı alternatifler de değerlendirilebilir.

Yaşam döngüsü analizlerinde yapının çevreye verdiği zararlar da değerlendirilebilir. Bu ise, birim fiyat analizlerine benzer bir şekilde, ancak fiyatlar üzerinden değil, kullanılan malzemelerin veya yapılan uygulamaların enerji ihtiyacı ve çevreye verdikleri zarar ele alınabilir. Bu analiz de; kullanılan malzemelerin, kimyasalların ve ekipmanların etkileri, bunların onarım yerine taşınması gibi faktörler dikkate alınır. Yapının ilk yapımı dahil geçirdiği tüm evreler için de hesaplanarak yapının yaşam süresi boyunca gerekli enerji ihtiyacı, çevreye olan etkisi ve maliyeti belirlenebilir.

Sonuçlar

Mevcut yapılar üzerinde yapılan incelemeler ve elde edilen deneyimler yapıların dürabilite göre tasarlanmaları gerektiğini ortaya koymaktadır. Yapının yetersiz dürabilitesi büyük ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu kayıplar, onarım ve güçlendirme masrafları ile yapı kullanımının sınırlanması sonucu oluşan maliyetleri kapsar. Belirli bir servis ömrünün elde edilebilmesi için gerekli onarımların sayısı arttıkça yapının yaşam döngüsü maliyeti de artmaktadır. Sürdürülebilir bir gelişmenin

sağlanabilmesi için yapılması gereken; dürabilitesi yüksek, onarım gerektirmeyen veya sınırlı onarımlar gerektiren yapıların elde edilmesidir. Böylece sınırlı ekonomik kaynakların onarımlar için değil, yeni yatırımlar için kullanılması sağlanabilir. Bu kapsamda ilk adım yapının dürabilite performansının gerçekçi bir şekilde modellenmesidir. Böylece, belirli bir servis ömrünün elde edilmesini sağlayacak farklı alternatifler arasından performansı en yüsek olan belirlenebilir. Yaşam döngüsü analizleri ile de bunların sadece maliyetleri değil, enerji ihtiyaçları, çevreye verdikleri zararlar da değerlendirilebilir.

Kaynaklar

ASTM E 2432 (2011) Standard Guide for General Principles of Sustainability Relative to Building s, ASTM International, ABD.

Baker, D. (1999) The Maintenance of the Highways Agency's Structures, in Management of Highway Structures , pp. 7-13, Thomas Telford, London , UK.

Broomfield, J.P. (1997) Corrosion of Steel in Concrete , E & FN Spon, London , UK.

Cather, B. ve Marsh, B. (1997) Service Life of Concrete Structures – Current and Emerging Approaches, International Seminar on the Management of Concrete Structures for Long Term Serviceability , Sheffield.

CEB General Task Group 20 , 1992. Durability and Service Life of Concrete Structures, Durable Concrete Structures , Thomas Telford Ltd.

Ermco (2014), Ready-Mıxed Concrete Industry Statistics – Year 2013 , European Ready Mi xed Concrete Organ ization, 2014.

ISO 15686 (2001) Buildings and constructed assets - Service life planning , International Organization for Standardization, Switzerland.

İmo - İnşaat Mühendisleri Odası (2010) Türkiye'nin Deprem Gerçeği Değerlendirmeleri Raporu , Ankara.

Melchers, R.E. (1987) Structural Reliability – Analysis and Predi ction. Ellis Horwood Limited, West Sussex .

Şengül, Ö. (2011). Klorür Etkisindeki Betonarme Yapıların Dürabilitesi için Olasılığa Dayalı Tasarım, Teknik Dergi , 5409-5423.

Şengül, O. ve Gjørv, O.E. (2008) Electrical Resistivity Measurements for Quality Control during Concrete Construction, ACI Materials Journal , Vol. 105, No.6, 541- 547.

Taşdemir, M.A., Özkul, M.H. ve Atahan, H.N. (1999) Türkiye'deki Son Depremler ve Beton, II. Ulusal Kentsel Altyapı Sempozyumu, Adana.

Taşdemir, M.A. ve Şengül, Ö. (2013) Normal veya Lifli Beton Karışımının Performansa Dayalı Tasarımı", 3. Yapı Denetimi Sempozyumu, İMO, Diyarbakır.

TS EN 1990 (2002) Eurocode -Yapı tasarımının temelleri, Türk Standarları Enstitüsü, Ankara.

TS EN ISO 14040 (2007) Çevre yönetimi - Hayat boyu değerlendirme - İlkeler ve çerçeve, Türk Standarları Enstitüsü, Ankara.

Betonun Donma-Çözülme Dayanıklılığına Deney Koşullarının Etkisi

Yuşa Şahin,
Bozok Üniversitesi, Müh.-Mim. Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, 66900, Yozgat.
Tel: (354) 242 10 01
E-Posta: yusa.sahin@bozok.edu.tr

Yılmaz Akkaya, Mehmet Ali Taşdemir
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, 34469, İstanbul.
Tel: (212) 285 37 71
E-Posta: akkayayil1@itu.edu.tr, tasdemirme@itu.edu.tr

Öz

Dış etkilere açık beton elemanlarda ve betonarme yapılarda düşük hava sıcaklığındaki değişimlere bağlı olarak donma-çözülme etkisi altında hasar oluşmaktadır. Donma-çözülme etkisi sonucu oluşan hasar, pullanma türü yüzeyden parça kopması veya malzeme dökülmesi şeklinde oluşabileceği gibi içsel hasar şeklinde mikro çatlakların oluşmasına bağlı dayanım azalması meydana gelmektedir. Hasarın oluşumu üzerinde donma hızı, don altında geçen süre ve minimum sıcaklık gibi deney koşullarının etkileri farklı hipotezlerin öne sürülmesine yol açmıştır.

Çalışma kapsamında, sıcaklık-zaman çevrimlerinin ayarlanabildiği bir deney cihazında ve gerçek ortam şartlarına daha uygun bir donma-çözülme deneyi olan CIF (Kapiler su emme, İçsel hasar ve Donma-çözülme deneyi) deneyine uygun biçimde incelenmiştir. İki farklı S/Ç (Su/Çimento) oranında hava sürüklenmiş ve sürüklenmemiş betonlar üzerinde deney koşullarının hasar üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bunun için, EN 206-1'de donma-çözülme etkisi altındaki betonlarda önerilen en yüksek S/Ç değeri olan 0,55 oranında hava sürükleyici katkılar kullanılarak farklı hava boşluğu sistemine sahip betonlar üretilmiştir. Düşük S/Ç oranına sahip karışımda ise hava sürükleyici katkı kullanılmamıştır. Çalışma sonucunda, deney koşullarının farklı mekanik özeliklere ve farklı hava miktarlarına sahip betonlarda oluşan hasar ve hasarın türü üzerine etkileri ortaya konmuştur. Ayrıca, hasara uğramış numuneler üzerinde düzlem kesit analizleri yapılmış ve farklı deney koşulları altında oluşan çatlaklar incelenmiştir.

Anahtar sözcükler: Dayanıklılık, Donma-çözülme, Pullanma, Donma hızı, Hava Sürükleyici Katkı.

Giriş

Beton yapılarda donma-çözülme etkisi altında, boşluklarındaki suyun donarak hacminin artm ası sonucu, dayanımdaki azalma ile oluşan içsel hasar ve yüzeyinde zayıf parçaların dökülmesi sonucu oluşan pullanma olmak üzere iki tip hasar görülmektedir. Yüzeyde buz çözücü tuz kullanılması durumunda pullanma hasarı aksi durumda içsel hasar baskın olarak gerçekleşmektedir (Fagerlund, 1995).

Hasarın oluşumu üzerinde donma hızının etkisi farklı hipotezlerin öne sürülmesine neden olmuştur. Powers'ın (1949) hidrolik basınç hipotezinde donma hızının artması hasarı arttırıcı bir parametre olarak yer almıştır. Powers ve Helmuth (1953) yaptıkları deneysel çalışmada hava sürüklenmiş betonlarda donma-çözülme etkisi altında hacim artışı yerine büzülme elde edince osmotik basınç hipotezi veya mikroskobik buz kristalleri gelişmesi olarak bilinen yeni bir hipotez öne sürmüşlerdir. Bu hipotezde ise donma hızı düştükçe hasar artmaktadır. Powers bu ikinci hipotezinde hidrolik basınç hipotezinin deneysel sonuçlara dayanmadığını ve mantıksal çıkarımlara dayanarak ileri sürüldüğünü açıklamıştır. Pigeon ve diğ., (1985) donma hızının etkisini araştırdığı çalışmasında deneysel olarak donma hızının etkisini ortaya koymuş ve Powers'ın hidrolik basınç hipotezindeki teorik sonucu ile karşılaştırmıştır. Bu çalışmalarda buz çözücü tuz kullanılmamıştır ve oluşan hasar içsel donma-çözülme hasarıdır. Buz çözücü tuzun kullanıldığı farklı bir çalışmada ise donma hızının düşmesi pullanma hasarını, artması ise içsel hasarı arttırmıştır (Jacobsen ve diğ., 1997). İncelenen çalışmalarda donma hızının, buz çözücü tuz kullanılması durumuna göre farklı etkidiği görülmüştür.

Donma -çözülme hasarını açıklamaya yönelik bir başka mekanizma ise boşluk içindeki kristalleşme ve bunun boşluk duvarı ile etkileşimi üzerinedir (Scherer, 1999). Erime noktası sıcaklığında, kristaller boşluk yüzeyini tamamen kaplar ve mekanik olarak denge halindedir. Eğer sıcaklık düşerse, kristaller büyümeye çalışacak ve bu büyümeyi engellemek için boşluk duvarı ilave basınç kuvveti sarf edecektir. Bu ilave basınca kristalleşme basıncı denilmektedir (Wardeh vd ., 2010).

Donma hızı, önceki çalışmalarda araştırmacılar tarafından 2-10 °C/saat arasında uygulanmıştır. Standartlarda ise 4-10 °C/saat arasında değişmektedir. Gerçek çevre koşullarında ise bu değerlerin altındadır. Doğada en yüksek donma hızı 1,5-3 °C/saat civarlarındadır. Bu çalışmada ise, en yüksek donma hızı 16 °C/saat'tir. Donma hızı üzerine yapılan çalışmalar, donma hasarı şiddeti ve türü üzerinde birçok bilgi sağlayabilmektedir. Önceki çalışmalarda, donma-çözülme çevrimlerinin etkisi; donma hızı, minimum sıcaklıkta bekleme süresi ve farklı minimum sıcaklıkların uygulanmasıyla araştırılmıştır. İçsel hasar donma-hızının artmasıyla artmaktayken (Powers, 1949, Fagerlund, 1977, Pigeon vd., 1985 ve Jacobsen vd., 1997), pullanma hasarı düşük donma hızlarında artmıştır (Powers, 1955, Jacobsen vd ., 1997).

Çalışmada, farklı donma hızlarına, minimum sıcaklıkta bekleme sürelerine, don altında geçen zamana ve dolayısıyla çevrim sürelerine sahip deney koşullarının donma-çözülme hasarları üzerindeki etkisini araştırmak amaçlanmıştır. Bu amaçla hava sürüklenmiş ve hava sürüklenmemiş betonlar en şiddetli don ortamı olan buz çözücü tuz çözeltisinin uygulandığı bir deneye tabi tutulmuştur. Hava sürüklenmiş betonlarda farklı katkılar kullanılmış ve katkıların kimyasal esaslarının ve oluşturdukları hava boşluğu sistemlerinin bu deney koşullarındaki performansları araştırılmıştır.

Deneysel Çalışmalar

Malzemeler

Çimento

Yapılan deneysel çalışmada CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun özgül ağırlığı 3,15 g/cm^3 ve özgül yüzeyi (Blaine) 3700 cm^2/g'dir. Çimentoya ait kimyasal bileşim Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1 Çimentonun kimyasal bileşimi (%).

CaO	62,63	SrO	0,12	SiO_2	19,59	C_3S	51,70	SO_3	0,10
MgO	3,39	K_2O	0,64	Al_2O_3	5,12	C_3A	8,60	Çözün. kalıntı	0,52
MnO	1,45	Na_2O	0,13	Fe_2O_3	2,94	Cl^-	0,02	Kızd. kaybı	3,47

Agrega

Çalışmada kalker esaslı agregalar kullanılmıştır. Agregaların elek analizleri ve fiziksel özelikleri Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2 Agregaların elek analizleri ve fiziksel özelikleri.

Agrega	Özgül ağırlık (g/cm^3)	Su emme (%)	Elek boyutu, mm - % Geçen								
			0,063	0,25	0,5	1	2	4	8	16	22
Doğal kum	2,62	1,00	0,6	11,6	96,7	98,2	98,5	99,0	100	100	100
Kırma kum	2,70	1,25	4,1	9,5	19,1	32,6	56,4	99,1	100	100	100
Kırma taş I	2,73	0,50	1,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	42,1	100	100
Kırma taş II	2,74	0,48	0,4	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	22,5	100

Hava sürükleyici katkılar

Hava sürükleyici katkıların kimyasal esaslarının etkisinin de incelendiği çalışmada kolofon reçinesi esaslı (R), yağ alkolü türevi esaslı (Y) ve sentetik esaslı (S) olmak üzere üç farklı hava sürükleyici katkı kullanılmıştır.

Beton Karışımları

İki farklı S/Ç oranında hava sürüklenmiş ve hava sürüklenmemiş betonlar üzerinde deney koşullarının hasar üzerine etkileri araştırılmıştır. TS EN 206-1'de donma-çözülme etkisi altındaki betonlarda önerilen en yüksek S/Ç değeri olan 0,55 oranında hava sürükleyici katkılar kullanılarak farklı hava boşluğu sistemine sahip betonlar üretilmiştir. Çimento miktarının sabit olduğu karışımlarda S/Ç oranı ve hava miktarları değişmektedir. Hava sürükleyici katkı kullanılmayan karışımlarda karışım kodları 0,40 ve 0,55 S/Ç oranlarını ifade edecek biçimde sırasıyla 40 ve 55 olarak belirlenmiştir. Hava sürüklenmiş betonlarda, S/Ç oranı ve hava sürükleyici katkının kimyasal esası

belirtilmiştir. Örneğin, 55A-R, S/Ç oranı 0,55 olan ve reçine esaslı hava sürükleyici katkının kullanıldığı karışımı göstermektedir. Düşük S/Ç oranına sahip 40 kodlu karışımda polikarboksilik eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı özelikte yenil nesil bir süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılarak diğer karışımlarla aynı çimento miktarına sahip ve aynı kıvam sınıfında bir karışım elde edilmiştir.

Tablo 3 Beton bileşimleri.

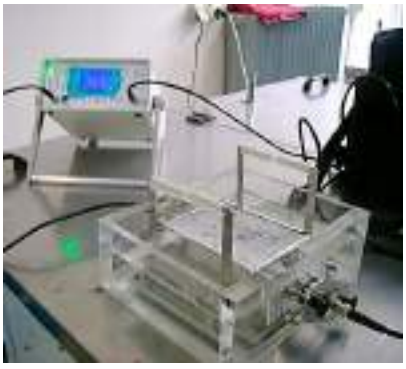
Karışım kodu	Çimento kg/m^{3*}	Su kg/m^3	Doğal kum kg/m^3	Kırma kum kg/m^3	Kırma taş I kg/m^3	Kırma taş II kg/m^3	HSK kg/m^3	SA kg/m^{3**}	Hava miktarı %
40	357	143	449	500	584	391	-	3,57	2,7
55	357	196	425	473	553	370	-	-	1,5
55-R	357	196	415	463	541	362	0,228	-	3,0
55-Y	357	196	409	456	532	356	0,164	-	4,0
55-S	357	196	404	450	526	352	0,082	-	4,8

*Değişen hava hacmine bağlı olarak agrega miktarı değişmekle birlikte, çimento miktarı sabit tutulmuştur.
** Çimentonun ağırlıkça %1'i miktarınca kullanılmıştır. Katkının katı madde miktarı %35'dir.

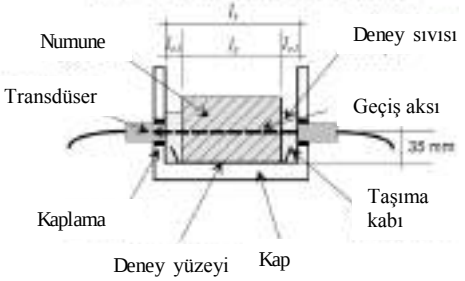
Deneysel Yöntem

Çalışma kapsamında, RILEM TC 176 -IDC (Internal Damage of Concrete due to the frost action) teknik komitesince hazırlanmış CIF deneyi (Kapiler su emme, İçsel hasar ve Donma -çözülme deneyi) uygulanmıştır. CIF deneyi , TSE CEN/TR 15177 standardında içsel hasarın belirlenmesine yönelik bir donma -çözülme deneyi olarak yer almaktadır. RILEM tarafında önerilen ile TSE CEN/TR 15177'de yer alan CIF deneyi arasında numune boyutları, uygulanan deneyler gibi farklılıklar bulunmaktadır.

Uygulanan deney sonucunda ağırlık azalmasına bağlı olarak pullanma hasarı ve ultrases geçiş süresindeki değişime bağlı olarak da içsel hasar belirlenmektedir. Ultrases ölçümleri bir kap içinde yapılmaktadır. Numune taşıma kabıyla birlikte kaba konulur daha sonra kap numunenin üst yüzeyini ıslatmayacak ve transdüserlerden 10 mm yüksekte olacak şekilde deney sıvısı ile doldurulur. Ultrases geçiş hızı ölçümlerine ait açıklamalar Şekil 1'de verilmektedir.



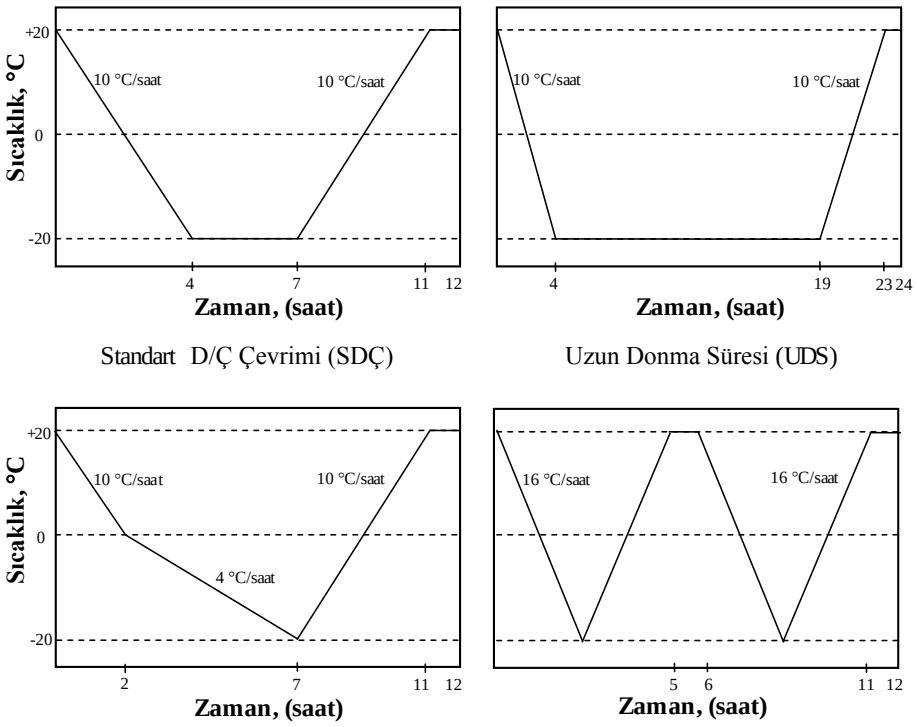
l_t Toplam geçiş uzunluğu
l_s Numune üzerinde geçiş uzunluğu
$l_{c1}+l_{c2}$ Deney sıvısı içinde geçiş uzunluğu



Şekil 1 Ultrases geçiş hızı ölçümü.

Deney Koşulları

Çalışmanın amacı olan deney koşullarının donma-çözülme hasarı üzerine etkisi, CIF deneyinde yer alan standart çevrim de dahil uygulanan farklı donma hızlarına, don altında bekleme sürelerine ve dolayısıyla çevrim sürelerine sahip donma-çözülme çevrimleri ile araştırılmıştır. Deney koşullarına ait sıcaklık-zaman eğrileri Şekil 2'de sunulmaktadır.



Standart D/Ç Çevrimi (SDÇ) Uzun Donma Süresi (UDS)

Yavaş Donma Hızı (YDH) Hızlı Donma Hızı (HDH)

Şekil 2 Standart D/Ç çevrimi ve farklı deney koşullarına ait sıcaklık-zaman grafikleri .

Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Taze Beton Deney Sonuçları

Beton karışımları her bir deney koşulu için farklı zamanlarda tekrar üretilmiştir yani her bir karışım 4 defa üretilmiştir. Bu nedenle taze beton deneylerine ait sonuçlar 4 üretim değerinin ortalamasıdır. Taze beton deneylerine ait sonuçlar Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4 Taze beton deneyleri ne ait sonuçlar.

Kod	Çökme, cm		Birim ağırlık, kg/m^3		Hava miktarı, %	
	Ortalama	Stand. Sapma	Ortalama	Stand. Sapma	Ortalama	Stand. Sapma
40	5,4	0,25	2433	1,77	2,7	0,06
55	5,1	0,25	2381	11,4	1,5	0,00
55-R	6,8	0,50	2337	11,3	3,0	0,14
55-Y	8,0	0,58	2305	2,60	4,0	0,13
55-S	8,6	0,48	2281	8,45	4,8	0,13

Betonlar, tasarım aşamasında hedeflenen kıvam sınıfını (S2, 5-10 cm) sağlamıştır. Malzemeler, bir gün öncesinde laboratuvara konulmuş ve üretimler 21±2 °C'de laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Böylece tüm karışımlarda sıcaklık 21±1 °C elde edilerek, sıcaklığın sonuçlar üzerindeki etkisi azaltılmıştır.

Hava Boşluğu Sistemi Analizleri

Hava boşluğu sistemi parametreleri TS EN 480-11'e uygun olarak petrografik yöntemle belirlenmiştir. Betonlara ait hava boşluğu sistemi parametreleri Tablo 5'te sunulmaktadır.

Tablo 5 Hava boşluğu sistemi parametreleri.

Kod	Hava miktarı %	Özgül yüzey mm^2/mm^3	Aralık faktörü mm	Boşluk frekansı mm^{-1}	Ort., kiriş uzunluğu mm	Hamur/hava oranı
40	3,5	15,4	0,380	0,125	0,300	8,73
55	1,4	10,6	0,805	0,035	0,412	21,8
55-R	2,4	29,1	0,235	0,201	0,170	12,0
55-Y	2,75	36,2	0,198	0,276	0,096	11,1
55-S	3,5	42,5	0,154	0,390	0,091	8,76

Mekanik Özelikler Deney Sonuçları

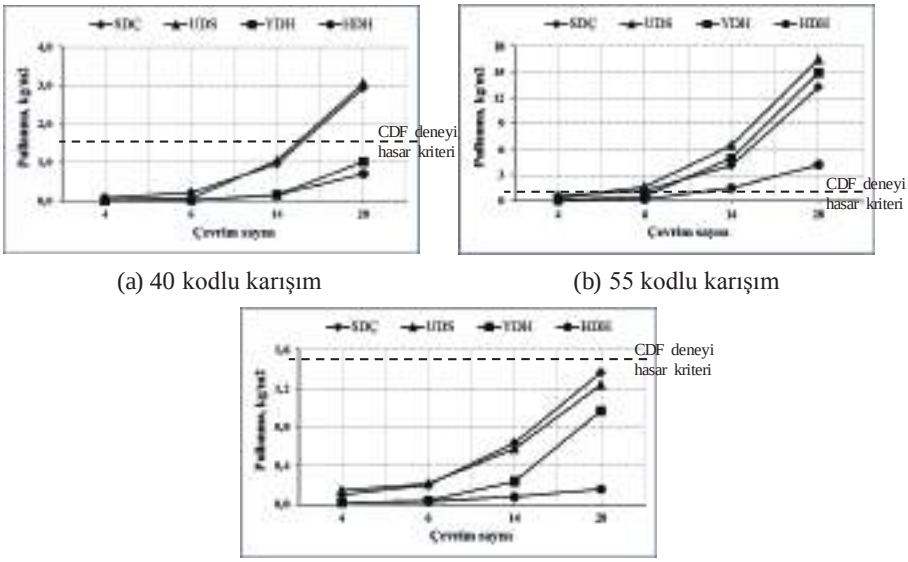
Mekanik özelik deneylerine deneylere ait sonuçlar Tablo 6'da verilmektedir.

Tablo 6 Mekanik özellikler deney sonuçları.

Kod	Basınç dayanımı MPa	Elastisite modülü GPa	Yarma -çekme dayanımı, MPa
40	60,2	33,9	5,4
55	43,0	32,0	4,6
55-R	40,5	29,8	4,0
55-Y	37,5	28,6	3,8
55-S	35,4	26,8	3,4

Donma-Çözülme Deney Sonuçları

Pullama hasarı : Hava sürüklenmemiş 40 ve 55 kodlu karışımlar ile hava sürüklenmiş betonları temsilen 55-R kodlu karışıma ait çevrim sayısı pullanma grafikleri Şekil 3'te verilmektedir.



(a) 40 kodlu karışım (b) 55 kodlu karışım

(c) 55-R kodlu karışım

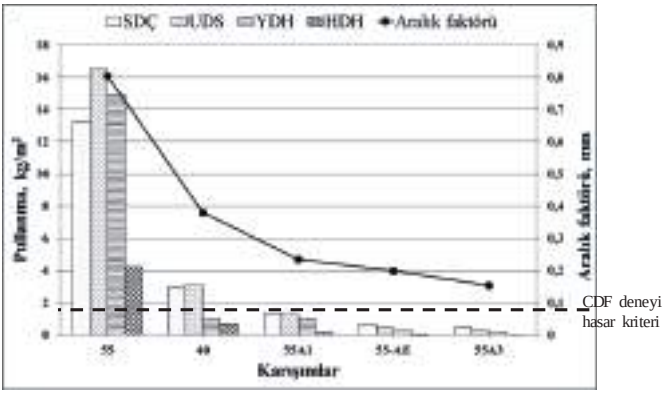
Şekil 3 Pullanmanın çevrim sayısı ile değişimi.

Pullanma çevrim sayısı grafiklerinden hava sürüklenmiş ve hava sürüklenmemiş tüm beton karışımlarında hasarın çevrim sayısı ile arttığı görülmüştür. Donma hızının 16°C/saat olduğu hızlı donma hızı (HDH) koşulunda pullanma hasarı diğer deney koşullarındakilere kıyasla belirgin olarak daha düşük olmuştur. Literatürde yüksek donma hızının donma-çözülme hasarı üzerinde hasarı arttırıcı bir etkisinin olduğu yaygın olarak bilinmektedir. Bununla birlikte bu çalışmalarda buz çözücü tuz kullanılmadığı göz önüne alınmalıdır. Sunulan bu çalışmada ise buz çözücü tuz kullanılmasıyla pullanma hasarı içsel hasara göre baskın çıkmış, dolayısıyla donma hızının yüksek olması hasarı arttırmak yerine azaltmıştır.

Betonların donma-çözülme çevrimleri esnasında minimum sıcaklıkta bir süre bekletildiği SDÇ ve UDS koşulları en fazla miktarda pullanmaya neden olmuşlardır. Bu sonuç, donma-çözülme etkisindeki hasarın nedeni olarak, küçük boşluklardaki henüz donmamış suyun büyük boşluklara hareketinin düşünüldüğü osmotik basınç hipotezini destekleyici bir sonuçtur.

Yüksek S/Ç oranına sahip hava sürüklenmemiş 55 kodlu karışımda tüm karışımlarda pullanma miktarı hasar kriteri değerini aşmıştır. Ayrıca bu karışımda YDH koşulu da SDÇ ve UDS koşulları gibi hasar üzerinde etkili olmuştur. Hava sürüklenmiş betonlarda üzerinde SDÇ, UDS ve YDH deney koşulları hemen hemen aynı mertebede etkili olmuşlar bununla birlikte tüm karışımlarda en fazla hasar SDÇ koşullarında oluşmuştur.

Karışımlara ait 28 çevrim sonunda elde edilen pullanma miktarları ve aralık faktörü değerleri Şekil 4'te verilmektedir.

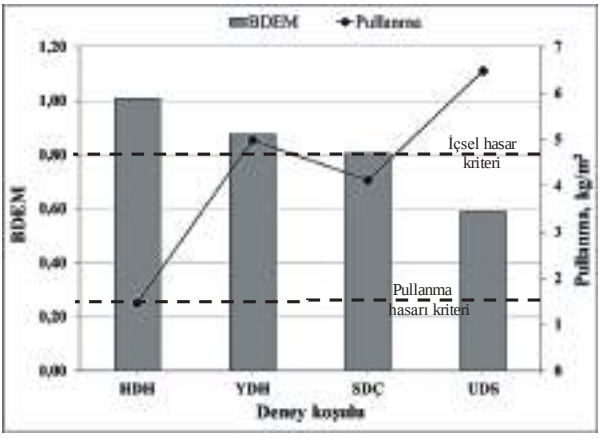


Şekil 4 Karışımlara ait pullanma miktarları ve aralık faktörü değerleri.

Tüm deney koşullarında aralık faktörünün azalmasıyla pullanma hasarı azalmıştır. Donma -çözülme hasarının belirlenmesinde ve değerlendirilmesinde sadece hava miktarı değerlerinin yeterli olmadığı görülmüştür.

İçsel hasar : Hava sürüklenmiş betonlarda ve düşük S/Ç oranına sahip 40 kodlu betonda tüm deney koşullarında yapılan 28 donma-çözülme çevrimi sonucu içsel hasar görülmemiştir. Hava sürüklenmemiş ve yüksek S/Ç oranına sahip 55 kodlu karışımda 4. ve 6. çevrimler sonunda yapılan ölçümlerde içsel hasar görülmezken, 28 çevrim sonunda ise pullanma neticesinde oluşan ağır hasar nedeniyle HDH koşulu hariç içsel hasar ölçümleri yapılamamıştır.

Yüksek S/Ç oranına sahip 55 kodlu karışımın farklı deney koşullarında 14 donma -çözülme çevrimi sonunda belirlenen bağıl dinamik elastisite modülü (BDEM) ve pullanma değerleri Şekil 5'te verilmektedir.

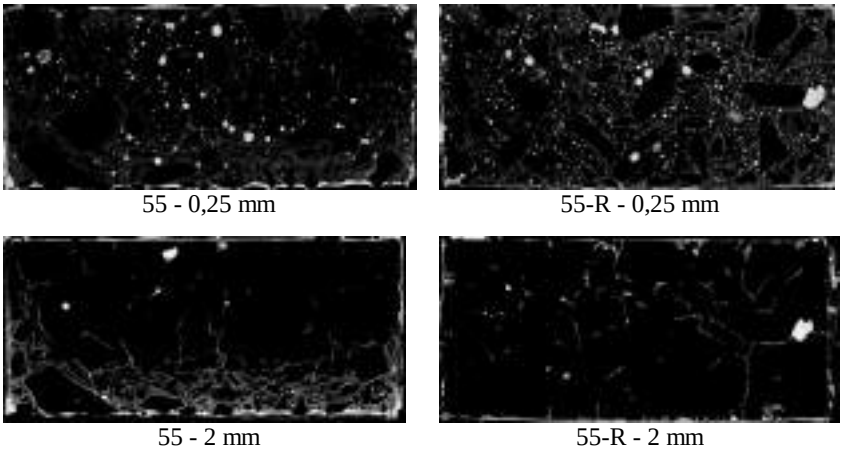


Şekil 5 55 kodlu karışıma ait 14 donma-çözülme çevrimi sonunda elde edilen BDEM ve pullanma değerleri.

Düşük S/Ç oranına sahip 55 kodlu karışımda HDH koşulunda 14 çevrim sonunda içsel hasar oluşmamıştır. Bu deney koşulunda 28 çevrim sonunda ise BDEM 0,75 olmuştur. En ağır içsel hasar UDS koşulunda oluşmuştur. Bu betonda en ağır pullanma hasarı da yine UDS koşulunda görülmüştür. YDH ve SDÇ koşulları karşılaştırıldığında ise daha az içsel hasarın oluştuğu YDH koşulunda pullanma hasarı SDÇ koşuluna kıyasla daha yüksek çıkmıştır.

Düzlem Kesit Analizleri

HDH koşulunda 28 donma-çözüme çevrimine maruz kalmış hava sürüklenmemiş ve hava sürüklenmiş betonlara ait yüzeyden 0,25 ve 2 mm aşındırma yapılarak alınmış fotoğraflar Şekil 6'da gösterilmektedir.



55 - 0,25 mm | 55-R - 0,25 mm

55 - 2 mm | 55-R - 2 mm

Şekil 6 Farklı derinliklerde düzlem kesit görüntüleri.

Hava sürüklenmemiş 55 kodlu karışımda donma-çözülme etkisi sonucu oluşan çatlaklar görüntülenmiştir. Bu betondan 1 mm aşındırılarak alınan görüntüde hasar bölgesi açıkça elde edilmiştir. 2 mm aşındırılarak alınan görüntüde ise hasarın ağır olduğu bölgeler elde edilmiştir. Farklı derinliklerde alınan görüntüler incelendiğinde hasarın yüzeyden başlayarak yan yüzeylerden ilerlediği anlaşılmıştır.

Hava sürüklenmiş betonlarda 0,25 cm aşındırma ile yüzeyden alınan fotoğrafta hava boşluklarının dağılımı elde edilmiştir. 1 mm derinlikten alınan fotoğrafta ise büyük boyutlu hava boşlukları, hapsolmuş hava boşlukları ve agrega etrafında muhtemelen terlemeden dolayı oluşan boşluklar görüntülenmiştir. 2 mm derinlikten alınan görüntüde ise derin hapsolmuş hava boşluğu ve bazı agregalar etrafında oluşmuş boşluklar görüntülenmiştir.

Sonuçlar

1. Düşük S/Ç oranına sahip karışım, mekanik özelikleri daha üstün ve sertleşmiş beton hava miktarı hava sürüklenmiş betonlarla eşit olmasına karşın yeterli özgül yüzeye ve aralık faktörüne değerlerine sahip olmaması nedeniyle hava sürüklenmiş betonlara kıyasla daha düşük donma-çözülme performansı sergilemiştir.

2. Hava sürüklenmemiş betonlarda, yüksek S/Ç (0,55) oranına sahip 55 kodlu karışım tüm deney koşullarında pullanma hasarına uğramış, düşük S/Ç (0,40) oranına sahip 40 kodlu karışımda ise SDÇ ve UDS koşullarında hasar oluşurken, HDH ve YDH koşullarında pullanma değeri hasar kriterinin altında kalmıştır. Hava sürüklenmiş betonlar ise tüm deney koşullarında yeterli performans sağlamışlardır.
3. İçsel donma-çözülme hasarı sadece hava sürüklenmemiş ve yüksek S/Ç oranına sahip betonda oluşmuş ve 14 çevrim sonrasında başlamış 28 çevrim sonunda ise numuneler tamamen içsel hasara uğramıştır.
4. Pullanma hasarı bakımında uzun donma süresi, düşük S/Ç oranına sahip betonlarda yavaş donma hızına kıyasla hasarı arttırmıştır. Yüksek S/Ç oranına sahip betonlarda ise yavaş donma hızı, uzun donma süresi kadar etkili olmuştur.
5. Yapılan çalışma sonunda pullanma hasarı üzerinde minimum sıcaklıkta bekleme süresinin en etkili olduğu bununla birlikte sürenin çok uzun olmasının belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. En düşük hasarlar ise hızlı deney koşulunda elde edilmiştir. Donma hızının yavaş olmasının hasarı arttırdığı en şiddetli pullanma deneyinin düşük donma hızında ve minimum sıcaklıkta bekleme süresi ile oluşturulabileceği belirlenmiştir.
6. Farklı hava sürükleyicilerin kullanıldığı ve hava sürüklenmiş betonlar tüm deney koşullarında yeterli donma-çözülme performansı sergilemişlerdir.

Kaynaklar

Fagerlund, G. (1995). Freeze -thaw resistance of concrete conc rete (Report no. TVBM - 3060). Sweden : Lund Institute of Technology. Retrieved from http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordOId=1291977& fileOId=1 762611

Fagerlund, G. (1977). The international cooperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. Materials and Structures , 58 (10), pp. 231 –253.

Jacobsen, S., Saather, D. H., and Sel levold, E. J. (1997). Frost testing of high strength concrete: frost/salt scaling at different cooling rates. Materials and Structures , Vol. 30, pp. 33 -42.

Pigeon, M., Prevost, J. and Simard, J.M. (1985). Freeze -thaw durability versus freezing rate. Journa l of the American Concrete Institute , 82 (5), pp.684 -692.

Powers, T.C. (1949). The air requirement of frost -resistant concrete, In: Proceedings, Highway Research Board , PCA Bulletin no. 33, Vol. 29, pp.184 –211.

Powers, T.C. and Helmuth, R.A. (1953). Theory of volume changes in hardened Portland cement paste during freezing. In: Proceedings, Highway Research Board , PCA Bulletin no. 33, Vol. 32, pp.286 –297.

Powers, T.C. (1955). Basic considerations pertaining to freezing and thawing tests. In: Proceedings, ASTM International , West Conshohocken, Vol. 55.

Scherer, G.W. (1999). Crystallization in pores. Cement and Concrete Research , Vol. 29, pp. 1347–1358.

Wardeh, G. Mohamed, A .S. M. and Ghorbel, E. (2010). Analysis of concrete internal deterioration due to fro st action. Journal of Building Physics , 35(1), pp.54 –82.

Jeopolimer Betonunun Basınç Dayanımı ve Ultrases Geçirgenliğine Kür Sıcaklığının Etkisi

Ahmet Coşkun, Harun Tanyıldızı
Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Tel: (424) 237 00 00 - 4277
E-Posta: acoskun@firat.edu.tr

Murat Şahin
Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Tel: (424) 237 00 00 - 4274
E-Posta: muratsahin@firat.edu.tr

Öz

Bu çalışmada, alkalilerle aktive edilmiş uçucu kül kullanılarak elde edilen betonun basınç dayanımı ve ultrasonik ses geçirgenliğine kür sıcaklığının etkisi incelenmiştir. Bu amaç için uçucu kül, sodyum hidroksit, sodyum silikat ve agrega kullanılarak 10x10x10 cm boyutlarında beton numuneler üretilmiştir. Maksimum agrega dane çapı 16 mm olarak kullanılmıştır. Numuneler 24 saat boyunca etüvde 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 ve 100 ^{0}C sıcaklıklarda bekletilmiş daha sonra 20 ^{0}C de 28 gün boyunca havada kür edilmişlerdir. Kür süresi sonunda basınç dayanımları ve ultrasonik ses geçirgenliği değerleri incelenmiştir.

Anahtar sözcükler: Jeopolimer, beton, uçucu kül, alkali çözelti, kür sıcaklığı.

Giriş

Günümüzde tüm endüstriler için, çevre koruma ve sürdürülebilir tasarıma yönelik çalışmalar gereklilik göstermektedir. Çimento sektöründe de bu çalışmaları yoğun şekilde yapmaktadır. Endüstri kolları için en önemli sorunlardan biri küresel ısınmadır. Küresel ısınma atmosferik kompozisyondaki değişimin sebep olduğu yeryüzündeki sıcaklık artışının kaçınılmaz bir sonucudur (Kılıç 2013). Dünyadaki yıllık tüketimi 130 milyon tonu bulan portland çimentosuna duyulan ihtiyaç her geçen yıl % 5 oranında artmakta olup betonun diğer bileşenleri olan agrega ve su kaynakları da göz önüne alındığında yılda dünyada 1 milyar ton beton tüketildiği gözlenebilmektedir. Bununla birlikte, taş ocaklarının ve suyun tükenmesi göz ardı edilse bile tükenmektedir. Çimentonun her 1 tonu ile birlikte yan ürün olarak açığa çıkan 1 ton CO_2'in ve diğer üretim esnasında oluşan sera etkisi yapıcı gazların çevreye verdiği zarar değerlendirildiğinde, çimentolu betonun daha ne kadar sürdürülebilir bir malzeme olarak kalacağı tartışma konusudur (Zeybek 2009). Portland çimentolu betonu atık dönüşümü açısından değerlendirildiğinde ise; betona ekonomiklik sağlamak ve atıkları değerlendirmek amacı ile uçucu kül gibi atık malzemeler değeri dönüşümlü olarak

betonun içerisinde çimento miktarının % 40-60'ının yerine kullanılmaktadır. Ancak bu şekilde dahi santrallerde üretilen uçucu külün sadece % 35 'i kullanılabilmektedir (Mehta 2000) . Gelişen teknoloji çimento üretimini, az enerji tüketir ve daha az doğaya zarar verir hale getirmelidir. Bununla birlikte ülkelerde artan çimento ihtiyacı da göz önüne alındığında, çimentolu betonun sürdürülebilir bir malzeme olup olmadığı, yakın zamanda çok daha fazla tartışılır hale gelecektir (Kılıç 2013).

Betonarme ile daha yüksek, daha küçük kesitli yapılar yapma ve bu malzemenin yetersiz görülen bazı özelliklerinin daha da iyileştirilmesi ihtiyacı, bizleri beton içinde daha başka malzemelerde kullanma ve bu malzemelere alternatif arama yoluna itmiştir (Zhaohui, Yunping 2001). Jeopolimer kimyası ile yüksek verimli düşük maliyet ve teknolojili ürünler üretmek mümkündür. Doğal jeolojik minerallerin kimyasal kompozisyonlarının işlenmesiyle üretilen jeopolimer ile ısı direnci yüksek seramiklerden yüksek dayanımlı betona, yapı tuğlasından güçlendirme harcına, elektrik sigortasından radyoaktif atık istifleme ünitelerine kadar pek çok farklı amaca hizmet edebilecek malzemeler elde edilebilmektedir (Davidovids 2008). Jeopolimerlerde karışım aşamasında kullanılan su, işlenebilirlik için kullanılmakta, jeopolimerin kür ve kuruması sırasında jeopolimer içerisinde süreksiz nano boşluklar bırakarak jeopolimeri terk etmektedir. Bu durum jeopolimere hafiflik, ısı yalıtımı ve yangın dayanımı gibi olumlu özelikler kazandırmaktadır (Rangan 2008). Uçucu küllerin alkalilerle aktivasyonu ile elde edilen bağlayıcı kullanılarak üretilen harç ve betonların kuru büzülme değerleri geleneksel betona göre oldukça düşük, donatı ile aderansları ve çevre koşullarına dayanıklılıkları ise oldukça yüksektir (Jaarsveld, Deventer 1999, Zhaohui, Yunping 2001, Cioffi ve diğ. 2003, Topçu, Canbaz 2008, Topçu, Toprak 2008).

Uçucu kül termik santral bacalarından elde edilmiş, içi boş, küresel tanecik yapılı bir atık malzemedir. Uçucu kül tanecikleri amorf camsı yapıda mullit, hematit, megnetit, kuartz gibi kristaller içermektedir. Oluşacak kristal tipleri kömürün çıktığı bölgeye ve baca ısısına bağlıdır. Uçucu külün jeopolimerik üretimlerde kullanımını teşvik eden ise, özellikle F tipi uçucu küllerin içerdiği yüksek Al_2O_3 ve SiO_2 kompozisyonudur. Baca ısısının 1200 ^{0}C ve üstüne çıktığı santrallerde oluşan içi boş ince küresel yapıdaki ve camsılığın yüksek olduğu uçucu küller jeopolimer sentezi için kullanışlıdır. Mikro yapısı incelendiğinde jeopolimer reaksiyonunun alkali aktif çözeltisi ile küresel uçucu kül taneciklerinin bir kısmı reaksiyon vererek jeopolimer, pH'lı alkali ortamda ve alkali silika jeli boş uçucu kül küresi taneciği içine girebilmektedir. Uçucu küllerin alkalilerle aktivasyonu ile elde edilen bağlayıcı kullanılarak üretilen harç ve betonların kuru büzülme değerleri geleneksel betona göre oldukça düşük, donatı ile aderansları ve çevre koşullarına dayanıklılıkları ise oldukça yüksektir. Ayrıca jeopolimerlerin önemli avantajları arasında kısa sürede dayanım kazanmaları, dış etkilere dayanıklılıkları, düşük ısıl iletkenlikleri ve yüksek hacim stabilitesine sahip olmaları sayılabilir (Jaarsveld, Deventer 1999 , Zhaohui, Yunping 2001). Alkali aktivasyonu toksik atık ve nükleer kalıntıların, ağır metal iyonlarının stabilizasyonunda da başarıyla kullanılmıştır (Cioffi ve diğ. 2003). Ayrıca uçucu kül gibi silis ve alüminli endüstriyel atıkların alkali aktivasyonu ile üretilen harçlar, çimento harçlarına göre daha hafiftirler ve dayanıklılık özelikleri daha yüksektir (Topçu, Canbaz 2008, Topçu, Toprak 2008, Yonar 2014).

Bu çalışmada, alkalilerle aktive edilmiş uçucu kül kullanılarak elde edilen betonun basınç dayanımı ve ultrasonik ses geçirgenliğine kür sıcaklığının etkisi incelenmiştir.

Deneysel Çalışma

Malzemeler

Bu tez çalışmasında kullanılan jeopolimer betonunun ana hammaddesi olan uçucu kül, Seyit Ömer Termik Santrali'nden temin edilmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat ($NaSiO_3$), alkaliyi aktifleştirmek için sodyum hidroksit (NaOH) olmak üzere iki farklı alkali çözelti kullanılmıştır. Agrega olarak ise maksimum dane çapı 16 mm dere agregası kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin özellikleri Tablo 1, 2, 3 ve 4'de verilmiştir.

Tablo 1 Uçucu Külün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.

Kimyasal Bileşim (%)	**Uçucu Kül**
S(SiO_2)	57.40
A(Al_2O_3)	20.50
F(Fe_2O_3)	11.99
S+A+F	89.89
CaO	6.49
MgO	3.90
Yoğunluk (g/cm^3)	2.13
KK	0.73

Tablo 2 Sodyum Silikatın (Cam Suyu) Kimyasal Özellikleri.

Kimyasal formül	Na_2SiO_3
Asitik Değer, %	0.05
Yoğunluk (kg/litre)	0.933-0.936
Kaynama Noktası, ^oC	101
Donma Noktası, ^oC	-48
Saflık, %	99.99
Suda Çözünürlüğü (gram/litre)	15
Na_2 / SiO_3	2.05

Tablo 3 Sodyum Hidroksitin Kimyasal Özellikleri.

Kimyasal adı	Sodyum hidroksit, Kostik
Kimyasal formül	NaOH
Molekül ağırlığı	40.01 g/mol
CAS numarası	[1310-73-2]
Erime noktası	318 °C (591 K)
Kaynamanoktası	1.390 °C (1.663 K)
Çözelti yoğunluğu (g/cm^3)	1.36

Tablo 4 Deneylerde Kullanılan Agreganın Özellikleri.

Özellik	**İri Agrega**	**İnce Agrega**
Kuru özgül ağırlık (kg/dm^3)	2.67	2.73
Su emme (%)	2.0	2.1
500 devir aşınma (%)	5.6	-

NumunelerinHazırlanması ve Karışım Oranları

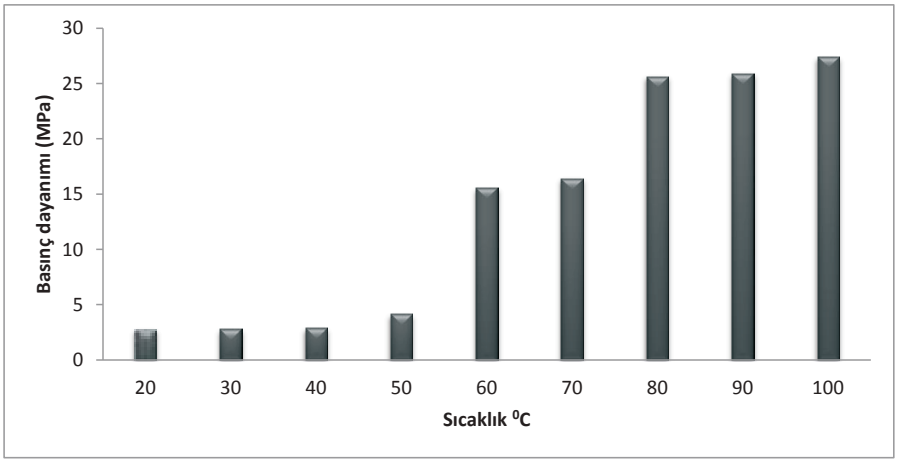
Bu çalışmada agrega olarak maksimum dane çapı 16 mm olan dere agregası, bağlayıcı olarak uçucu kül ve iki farklı alkali çözelti kullanılarak taze beton karışımı üretilmiştir. Taze beton üretilirken ilk başta agregalar ile uçucu kül kuru olarak karıştırılmıştır. Başka bir kapta karıştırılarak hazırlanan alkali çözeltiler, karıştırıcıda bu kuru karışıma eklenerek taze jeopolimer betonu elde edilmiştir. Hazırlanan taze betonun karışım oranı Tablo 5'de verilmiştir. Taze beton 10x10x10 cm lik küp kalıplara yerleştirilerek 24 saat boyunca farklı sıcaklıklarda bekletildikten sonra, 28 gün boyunca 20 ^{0}C de havada kür edilmişlerdir.

Tablo 5 Deneylerde Kullanılan Jeopolimer Betonunun Karışım Oranı.

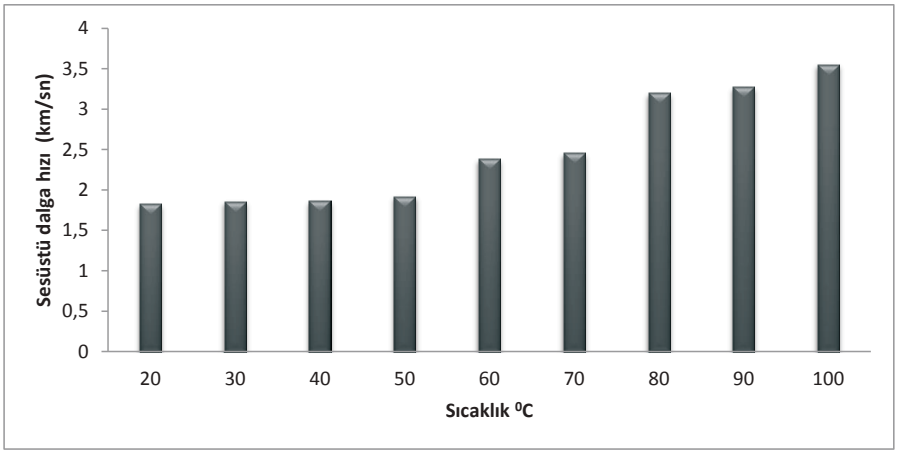
Uçucu Kül (kg/m^3)	**Sodyum Silikat çözeltisi (kg/m^3)**	**Sodyum hidroksit çözeltisi (kg/m^3)**	**Agrega (0-8) mm (kg/m^3)**	**Agrega (8-16) mm (kg/m^3)**
400	197	198	889	580

Deney Sonuçları ve Tartışılması

Bu çalışmada, Seyit Ömer Termik Santrali'nden temin edilen uçucu kül, iki farklı alkaliyle aktive edilerek j eopolimer beton u üretilmiştir. Beton üretiminde maksimum agrega dane çapı 16 mm' dir. Numuneler 24 saat boyunca etüvde 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 ve 100 ^{0}C sıcaklıklarda bekletilmiş daha sonra 20 ^{0}C de 28 gün boyunca havada kür edilmişlerdir. Kür süresi sonunda basınç dayanımları ve ultrasonik ses geçirgenliği değerleri incelenmiştir. Basınç dayanımı değerleri Şekil 1'de, ultrasonik ses geçirgenliği değerleri Şekil 2' de verilmiştir.



Şekil 1 Basınç Dayanımı Değerleri



Şekil 2 Ultrasonik Ses Geçirgenliği Değerleri

Basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, kür sıcaklığının artmasıyla dayanımın arttığı görülmüştür. 60 ^{0}C' ye kadar olan basınç dayanımı değerleri çok düşüktür. En fazla artış oranı % 276 ile 60 ^{0}C de tespit edilmiştir. Literatürde uçucu kül ile üretilen jeopolimer betonunun iyi bir dayanım değerine 60 ^{0}C' de ulaştığı bilinmektedir (Wua, Wua 2014) Vijai ve diğerleri yaptıkları çalışmada portland çimentosunun çevreye verdiği zararlardan dolayı alternatif çimento olarak uçucu külle yapılan jeopolimer betonu üretmişlerdir. Uçucu külle birlikte ince agrega, kaba agrega, sodyum silikat, soydum hidroks it ve su kullanılarak üretilen jeopolimeri ve 60 ^{0}C'de kürdeki basınç dayanımları incelenmiştir. Burada 7 günlük ve 60 ^{0}C'de kürdeki basınç dayanımı 28.31, 28 günlük 60 ^{0}C'de'ki numunenin ise 33.22 MPa basınç dayanımına ulaşılmıştır (Viaji 2010). Bu çalışmada yapılan deney sonuçları incelendiğinde 60 ^{0}C' de üretilen jeopolimer betonunun basınç dayanımı 15,56 Mpa bulunduğu için daha farklı kür sıcaklıkları incelenmiştir. Özellikle bu sıcaklıktan sonraki sıcaklıklar olan 70, 80, 90 ve 100 ^{0}C' de dayanım sürekli artarak 27,39 Mpa' a ulaşmıştır. Jeopolimer bet onunun bu dayanımı kabul edilebilir seviyededir. Kür sıcaklığı ve kür süresinin sadece kimyasal reaksiyonu hızlandırıcı olarak önemli bir rol oynamad ığı, aynı zamanda reaksiyon miktar ını belirlemektedir (Arıöz ve diğ. 2005). Van Jaarsveld ve diğerleri ise, uzun s üre yüksek sıcaklıklarda k ürlenen jeopolimerlerin yap ısının daha zay ıf olabilece ğini bulmu şlard ır (Van Jaarsveld ve diğ. 2002).

Ultrasonik ses geçirgenliği ile basınç dayanımı arasındaki ilişki, literatürde bulunan beton için kurulan ilişkilere benzer bir ilişkidir. Ancak, sesüstü dalga hızı değerleri normal betona göre oldukça düşük bulunmuştur (Neville 1981). Bunun nedeni bağlayıcı olarak kullanılan malzemenin çimento hamuruna nazaran daha gözenekli bir yapıya sahip olması olabilir (Arıöz ve diğ. 2005).

Sonuçlar

- Kür sıcaklıklarına göre basınç dayanımındaki en yüksek artış oranı 60 ^{0}C' de elde edilmiştir.
- En yüksek basınç dayanımı değeri 100 ^{0}C' de elde edilmiştir.
- Kür sıcaklığının artmasıyla, basınç dayanımı değerleri ve ultrasonik ses geçirgenliği değerleri orantılı olarak artmıştır.

Kaynaklar

Kılıç, İ. (2013) Uçucu Kül Esaslı Geopolimerlerin Ekstraksiyonu.

Zeybek, O. (2009) Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.

Mehta, P.K. (2000) Reflections on Recent Advan cements in Concrete Technology Second International Symposium on Cement and Concrete Technology in 2000s, September 6 -10, Vol.1, s.43 -57, Istanbul.

Zhaohui, X. And Yunping, X. (2001) Hardening Mechanisms Of An Alkaline Activated Class F Fly Ash, Cement and Concrete Research , Vol. 31, pp. 1245 -1249.

Davidovits, J. (2008) Geopolymer Chemistry and applications , Saint Quantin, France.

Rangan B.V. (2008) Fly Ash -Based Geopolymer Concrete, Research Report , No.4, Engineering Faculty, Curtin University of Te ch., Perth, Australia, 44s .

Jaarsveld J.G.S., Deventer J.S.J. (1999) Effect Of The Alkali Metal Activator On The Properties Of Fly Ash Base d Geopolymers, Indian Engineering of Chemistry Research , Vol. 38, No.10 , pp. 3932- 3941.

Cioffi R, Maffucci L, and Santoro L. (2003) Optimization Of Geopolymer Synthesis By Calcination And Polycondensation Of A Kaolinitic Residue, Resources Conservation and Recycling , 40. 27-38.

Topçu İ.B. ve Canbaz M. (2008) Alkali Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cüruflu Harçlarda Donma - Çözülme, ESOGÜMüh-Mim Fak. Dergisi , Sayı:21 Sayfa: 1-16.

Topçu İ.B. ve Toprak U. (2008), Alkalilerle Aktive Edilen Uçucu Külle Hafif Tuğla Üretilmesi, 4. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi, İstanbul, Türkiye, 38-45.

Yonar, Y. (2014) Geopolimer Çimentolu Ve Polivinil Alkol Fiberli Betonların Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ.

Wua, Y., Wua, B.(2014) Residual Compressive Strength And Freeze –Thaw Resistance Of Ordinary Concrete After High Temperature, Construction and Building Materials 54, 596–604.

Vijai, K., Kumutha R., Vishnuram B. G., (2010) Effect Of Types Of Curing On Strength Of Geopoymer Concrete, İnternational Journal Of The Physical Sciences, vol:5 9, 1419-1423.

Arıöz, Ö., Tuncan, M., Kılınç, K., Tuncan, A. , Karasu , B., Arıöz, E. (2005) Kür Sıcaklığı Ve Süresinin Jeopolimerik Hamur ve Harçların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi, 4. Uluslararası Katılımlı Seramik, Cam, Emaye, Sir ve Boya Semineri, Eskişehir, Türkiye, 636-648.

Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J. and Lukey, G. C. (2002) The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly Ash and Kaolinite -based Geopolymers , Chemical Engineering Journal , 89(1-3): pp. 63 -73.

Neville, A. M. (1981), Properties of Concrete , 3rd Edition, The English Language Book Society and Pitman P ublishing, London, England .

Alkali ile Aktifleştirilen Uçucu Kül Geopolimer Harcın Mekanik Özellikleri Üzerine Isıl Kür Süresinin Etkisi

Cengiz Duran ATİŞ, Serhan İLKENTAPAR
ERÜ, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri
Tel: (352) 437 00 80
E-Posta: cdatis@erciyes.edu.tr ; serhan@erciyes.edu.tr

Ela Bahşude GÖRÜR, Okan KARAHAN
ERÜ, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri
KSU, Kahramanmaraş Meslek Yüksek Okulu, Kahramanmaraş
Tel: (352) 437 00 80 Tel: (344) 280 25 34
E-Posta: okarahan@erciyes.edu.tr ; ela_gorur@hotmail.com

ÖZ

Bu çalışmada uçucu kül alkali ve ısı ile aktifleştirilerek geopolimer harcın mekanik özellikleri üzerine ısıl kür süresinin etkisi araştırılmıştır. Geopolimer h arçlar Sugözü F sınıfı uçucu külü, CEN referans kumu, sodyum hidroksit ve içme suyu kullanılarak çimentosuz olarak üretilmiştir. Karışım oranları ağırlıkça, kum/ uçucu kül oranı 3, su/uçucu kül oranı 0,29 ve sodyum/uçucu kül oranı 0,1 olarak alınmıştır. Hazırlanan karışımlar 4 saat, 1 gün, 2 gün, 3 gün ve 7 gün süresince 75ºC sıcaklıkta kür edilerek deneylere tabi tutulmuştur. Ayrıca eşdeğer karışımlar 4 saat, 1 gün, 2 gün, 3 gün ve 7 gün süresince 75ºC sıcaklığında küre tabi tutul duktan sonra toplamda kür süresi 28 gün olacak şekilde laboratuar ortamında (23±2ºC ve bağıl nemi %50±5) havada kür edilmiş olup, deneylere tabi tutulmuştur. Alkali ile aktive edilen uçucu kül harçların basınç dayanımı, eğilme çekme dayanımı ve yarma da çekme dayanımı özellikleri ölçülmüştür. Isıl kür süresinin artmasıyla dayanımların önemli oranda etkilenerek arttığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, 75ºC'lik ısıl kür ile 75 MPa mertebesinde basınç dayanımına ulaşılmıştır.

Anahtar sözcükler: Uçucu kül, Geopolimer, Alkali aktivasyon, Harç, Dayanım

Giriş

Ülkemizde enerji üretiminin önemli bir kısmı öğütülmüş kömür veya linyit kullanan termik santrallerden karşılanmaktadır. Bu termik santrallerin en önemli atık malzemesi öğütülmüş kömürün yanması sonucu ortaya çıkan ve baca gazlarıyla sürüklenen çok ince kül parçacıklarıdır. Uçucu kül olarak adlandırılan bu kül parçacıkları elektrostatik veya elektromekanik yöntemlerle filtrelerde veya siklonlarda yakalanmakta, böylece baca gazları ile atmosfere çıkışları önlenmektedir. Bu malzemenin hem atık kontrolünün yapılması hem de ülke ekonomisine kazandırılması önem arz eden konulardan biridir. Uçucu küller kalsiyum oksit içeriklerine ve toplam SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 miktarına göre sınıflandırıldığı bilinmektedir. Kalsiyum oksit içeriği %10'dan fazla ve toplam

$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 \geq$ %50 olan küllere C sınıfı, kalsiyum oksit içeriği %10'dan düşük ve toplam $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 \geq$ %70 olan küller de F sınıfı uçucu kül olarak sınıflandırılır. Her iki sınıf küller puzolanik özelliğe sahip olmakla birlikte C sınıfı külün bir miktar bağlayıcılık özelliği de bulunmaktadır. Uçucu küller, bu özellikleri nedeni ile son zamanlarda birçok ülkede yaygın olarak, mineral katkı malzemesi olarak çimento ile beraber beton üretiminde kullanılmaktadır. Ancak, ülkemizde uçucu külün kullanımı oldukça sınırlıdır.

Bu çalışmada yerel Sugözü F sınıfı uçucu külünün alkali ile aktivasyonu (geopolimerizasyon) metodu ile çimento yerine bağlayıcı olarak kullanılabilirliği ve geopolimer bağlayıcının kullanılabilirlik potansiyeli araştırılmıştır. Özellikle uçucu kül alkali ve ısı ile aktifleştirilerek geopolimer har cın mekanik özellikleri üzerine ısıl kür süresinin etkisi araştırılmıştır. Aşağıda uçucu külün aktivasyonu ile ilgili son yıllarda yapılmış çalışmaların bir kısmı özetlenmiştir.

Guo ve diğerleri (2010), C sınıfı külü %10 Na_2O ile aktive ederek geopolimer karışım hazırlayıp, 8 saat 75ºC kür edildikten sonra 23ºC de 28 gün kür süresini tamamlamıştır. Basınç dayanımının 60 MPa kadar ulaşıldığı belirtilmiştir.

Olivia ve Nikraz (2012) , uçucu kül ile geopolimer üreterek geopolimer özelliklerini etkileyen, kürü sıcaklığı, alkali yüzdesi ve karışım oranları parametreleri üzerinde araştırma yapmışlardır. Basınç dayanımlarının 55 MPa mertebesinde olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca geopolimer karışımların, portland çimentosuna kıyasla deniz suyu ortaml arında mekanik özelliklerinin daha iyi olduğunu bildirmişlerdir.

Nazari ve diğerleri (2011), uçucu kül ve pirinç kabuğu külü ile gepolimer üretmişler ve 60 MPa mertebesinde basınç dayanımına 80ºC'lik ısıl kürde ulaşıldığı bildirmiştir.

Topçu ve Toprak (2009), yaptıkları çalışmada termik santral taban külünü alkali ile aktive etmişlerdir. Aktivasyonda sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanmışlardır. Ürettikleri numuneler i 20 saat 75 °C'de etüvde veya laboratuar da 20 °C'de havada kür olmak üzere iki farklı küre tabii tutmuşlardır. Taban uçucu külü ile 20 MPa civarında dayanımlara ulaşıldığı rapor edilmiştir.

Bakri ve diğerleri (2011), çalışmalarında Portland çimentosuna alternatif malzeme olarak geopolimer beton üretmişler. Uçucu kül tabanlı geopolimerlerin, normal çimentoya göre hem basınç dayanımı hem de işlenebilirlik olarak daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Hardjito ve diğerleri (2005), bağlayıcı olarak F sınıfı uçucu kül ve sodyum hidroksit çözeltisi ile geopolimer betonlar üretmişler. Üretilen numunelerden 40-65 MPa arasında basınç dayanımları elde edildiği belirtilmiştir.

Reddy ve diğerleri (2011), F sınfı uçucu külünü sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktive ederek geopolimer beton üretmişler. Çalışmada farklı kür şartlarının basınç dayanımlarına olan etkisini incele mişlerdir. Sonuçta en yüksek dayanımın 16 M alkali materyal içeren konsantrasyondan elde edildiği raporlamışlardır.

Vijai ve diğerleri (2010), alimün ve silis içeren uçucu kül ile geopolimer elde etmişlerdir. Uçucu kül tabanlı geopolimer çimentoların farklı kürlerde basınç dayanımları incelenmiştir. Uçucu külle birlikte, agrega kullanılmış, aktivatör olarak ise sodyum silikat, sodyum hidroksit su ile birlikte katılarak geopolimer beton üretilmiştir. Numuneler, ortam sıcaklığında ve 60ºC de ayrı ayrı kür edilmiştir. Isıl kür edilen numuneler in 30 MPa dayanıma ulaştığı bildirilmiştir.

Thakur ve Ghosh, (2009) , Hint F sınıfı uçucu külü ile geopolimer üretmişlerdir. Alkali konsantrasyonunun artmasıyla, basınç dayanımının da düzenli olarak arttığı rapor edilmiştir. En yüksek dayanım alkali derişimi yüksek olan numunelerden elde edilmiş olup, 50 MPa civarında olduğu belirtilmiştir.

Sathonsaowa phak ve diğerleri (2009), linyit kömüründen elde edilen uçucu kül ile geopolimer üretmişlerdir. Aktivasyon için sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltileri kullanılmıştır. Linyit külünden ürettikleri geopolimerlerin 60 MPa basınç dayanıma kadar ulaştığı bildirilmiştir.

Deneysel Çalışmalar

Malzemeler ve Özellikleri

Uçucu Kül

Uçucu kül İSKEN-İskenderun Enerji Üretim ve Tic. A.Ş. Sugözü Enerji Santralinden temin edilmiştir. F sınıfı uçucu külün kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Sugözü uçucu külü, $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ değerinin %70'nin üzerinde olması ve CaO miktarının %10'dan az olması nedeniyle F sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül sınıfına girmektedir. Uçucu külün tanecik yoğunluğu 2390 kg/m^3 ve inceliği (>45µm) %12 dir. 28 ve 90 günlük aktivite endeksi sırasıyla %78,20 ve %93,80 dir.

Tablo 1 Uçucu Külün Kimyasal Kompozisyonu (%).

Oksit	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	Na_2O	S.CaO	Cl^-	KK
Uçucu Kül	61.81	19.54	7.01	1.77	0.31	2.43	0.07	0.04	2.20

Standart Kum

Deneylerde TSE EN 196-1'e uygun maksimum agrega boyutu 2 mm olan Rilem Cembureau Standart kumu kullanılmıştır. Standart kumun elek analizi sonucunda belirlenen tane büyüklüğü dağılımı ve standart sınır değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2 Kumun G ranülometrisi ve Standart Sınır Değerleri.

Özellik	Tane Büyüklüğü (mm)					
	0.08	0.16	0.5	1.0	1.6	*2.0*
Kalan (%)	99	87	72	34	6	0
Sınır (%)	99 ± 1	87 ± 5	67 ± 5	33 ± 5	7 ± 5	0

Aktivatör

Deneysel çalışmada aktivatör olarak Zülfikarlar Grubu Akça Kimyadan temin edilen Payet Kostik (Sodyum Hidroksit) kullanılmıştır.

Su

Karışım suyu olarak şehir şebekesinden alınan içme suyu kullanılmıştır.

Yöntem ve Deneyler

Harçlar CEN referans kumu, Sugözü F sınıfı uçucu külü, sodyum hidroksit ve içme suyu kullanılarak çimentosuz olarak üretilmişlerdir. Harç karışımları ağırlıkça,

kum/uçucu kül oranı 3, su/uçucu kül oranı 0,29 ve sodyum/uçucu kül oranı 0,1 olacak şekilde hazırlanmış ve Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3 Geopolimer Harç Karışım Malzeme Miktarları (g).

Rilem Kumu	Uçucu Kül	NaOH	Su
1350	450	80	130

Hazırlanan karışımlar harç kalıpları ile birlikte 4 saat, 1 gün, 2 gün, 3 gün ve 7 gün süresince 75ºC sıcaklıkta kür edilerek, kalıptan çıkarılan numuneler oda sıcaklığına kadar soğuması beklenmeksizin deneylere tabi tutulmuştur. Ayrıca eşdeğer karışımlar 4 saat, 1 gün, 2 gün, 3 gün ve 7 gün süresince 75ºC sıcaklığında küre tabi tutul duktan sonra kalıptan çıkarılarak toplamda kür süresi 28 güne tamamlanacak şekilde laboratuar ortamında (23±2ºC ve bağıl nemi %50±5) havada kür edildikten sonra deneylere tabi tutulmuştur.

Alkali ile aktive edilen uçucu kül harçların üzerinde basınç dayanımı, eğilme çekme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. TS EN 1015 -11 doğrultusunda 40×40×160 mm numuneler üzerinde yürütülen dayanım ölçümlerinde, tek noktadan yükleme deneyi altında harç numunenin kırıldığı gerilme değeri, eğilme dayanımı olarak alınmış; eğilme deneyinden çıkan kırılmış numunelerin çimento test presinde 40 ×40 mm başlık altındaki kırılma değeri ise basınç dayanımı olarak değerlendirilmiştir. Yarmada çekme deneyleri ise 40×40×160 mm numuneler üzerinde uzun kenar boyunca gerçekleştirilmiştir. Eğilme deneylerinde her bir karışım için 3 adet prizma numune kullanılırken, basınç deneylerinde ise eğilme deneyinden geriye kalan 6 adet yarım prizma teste tabi tutulmuştur. Yarmada çekme deneyleri için de 3 adet prizma kullanılmıştır.

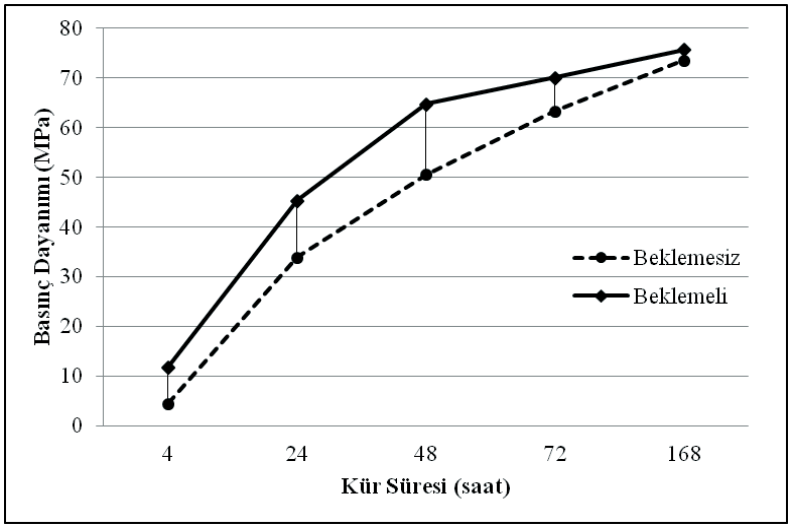
Bulgular

Çalışmada hazırlanan geopolimer harç numunelerin basınç dayanımları Tablo 4'te sunul muştur. Tablo 4'ten de görüleceği üzere ısıl kür süresi artıkça geopolimer harcın basınç dayanımı önemli ölçüde artmaktadır. Dört saat ısıl kür süresinden sonra 4.41 MPa olan harç basınç dayanımı 1, 2, 3 ve 7 günlük ısıl kürden sonra sırasıyla, 33.84, 50.50, 63.32, 73.57 MPa değerlerine ulaşmıştır. Aynı eşdeğer numunelerin uygulanan ısıl kürden sonra toplamda 28 güne kadar laboratuar ortamında bekletildikten sonra elde edilen basınç daya nımları sırasıyla 11.82, 45.30, 64.78, 70.03, 75. 69 MPa olmuştur.

Tablo 4 Geopolimer H arcın Basınç Dayanımı Sonuçları.

No	Kür Süresi	İlave Bekleme Süresi	Basınç Dayanımı	No	Kür Süresi	İlave Bekleme Süresi	Basınç Dayanımı
K1	4 saat	+0	4.41	K6	4 saat	+28 gün	11.82
K2	1 gün	+0	33.84	K7	1 gün	+27 gün	45.30
K3	2 gün	+0	50.50	K8	2 gün	+ 26 gün	64.78
K4	3 gün	+0	63.32	K9	3 gün	+25 gün	70.03
K5	7 gün	+0	73.57	K10	7 gün	+ 21 gün	75.69

Şekil 1'den de görüldüğü üzere ısıl kür süresi arttıkça basınç dayanımların yükseldiği görülmektedir. Bununla birlikte z aman içerisinde bu artışların da önemli ölçüde azaldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 1 Isıl kür süresinin basınç dayanıma etkisi.

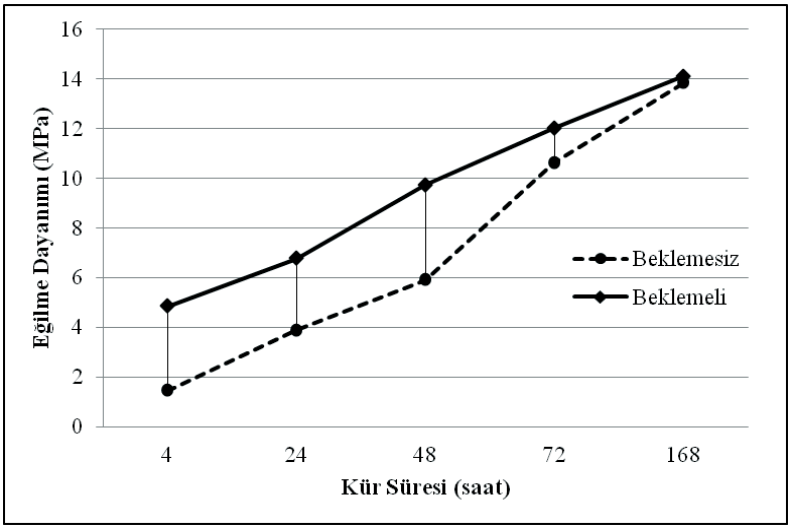
Hazırlanan K1, K2, K3, K4 ve K5 numuneleri (beklemesiz) ile K6, K7, K8, K9 ve K10 numuneleri (beklemeli) sırasıyla basınç dayanımları karşılaştırıldığında kendi içinde dayanım artışlarının yine sırasıyla yaklaşık olarak %168, %34, %28, %11 ve %3 olduğu hesaplanmıştır. Bu dayanım artışları göz önüne alındığında, ısıl kür süresinin artmasıyla basınç dayanımlarındaki artışlarının önemli oranda azaldığı hatta artışın durduğu görülmüştür.

Geopolimer harç numunelerin eğilmede çekme dayanımları Tablo 5'de sunulmuştur. Tablo 5'den görüleceği üzere, ısıl kür süresi artıkça geopolimer harcın eğilme dayanımı basınç dayanımına benzer şekilde önemli ölçüde artmaktadır. Isıl kür süresi 4 saat olan harcın 1.45 MPa olan eğilme dayanımı 1, 2, 3 ve 7 günlük ısıl kürden sonra sırasıyla, 3.87, 5.90, 10.63, 13.83 MPa olmuştur. Aynı eşdeğer numunelere uygulan ısıl kürden sonra toplamda 28 güne kadar laboratuar ortamında bekletildikten sonra elde edilen eğilme dayanımları ise sırasıyla 4.84, 6.76, 9.72, 12.00, 14.10 MPa olmuştur.

Tablo 5 Geopolimer Harcın Eğilmede Çekme Dayanımı Sonuçları.

No	Kür Süresi	İlave Bekleme Süresi	Eğilme Dayanımı	No	Kür Süresi	İlave Bekleme Süresi	Eğilme Dayanımı
K1	4 saat	+0	1.45	K6	4 saat	+28 gün	4.84
K2	1 gün	+0	3.87	K7	1 gün	+27 gün	6.76
K3	2 gün	+0	5.90	K8	2 gün	+ 26 gün	9.72
K4	3 gün	+0	10.63	K9	3 gün	+25 gün	12.00
K5	7 gün	+0	13.83	K10	7 gün	+ 21 gün	14.10

Şekil 2'den de görüldüğü üzere ısıl kür süresi arttıkça eğilme dayanımların önemli ölçüde azalarak arttığı görülmektedir. Hazırlanan K1, K2, K3, K4 ve K5 numuneleri (beklemesiz) ile K6, K7, K8, K9 ve K10 numuneleri (beklemeli) sırasıyla eğilme dayanımları karşılaştırıldığında kendi içinde dayanım artışlarının yine sırasıyla yaklaşık olarak %234, %75, %65, %13 ve %2 olduğu hesaplanmıştır. Bu dayanım artışları göz önüne alındığında, ısıl kür süresinin artmasıyla eğilme dayanımlarındaki artışlarının önemli oranda azaldığı hatta artışın durduğu görülmüştür.



Şekil 2 Isıl kür süresinin eğilme dayanıma etkisi.

Ayrıca 4 saat, 1 gün ve 2 gün ısıl küre tabi tutulan ve 28 güne kadar bekletilen numunelerin eğilme dayanımlarındaki artışın, ona karşılık gelen basınç dayanımlarındaki artıştan daha fazla olduğu görülmüştür. 3 gün ve 7 gün ısıl küre tabi tutulan numunelerin eğilme dayanımlarındaki artışın basınç dayanımlarınkine benzer olduğu görülmektedir.

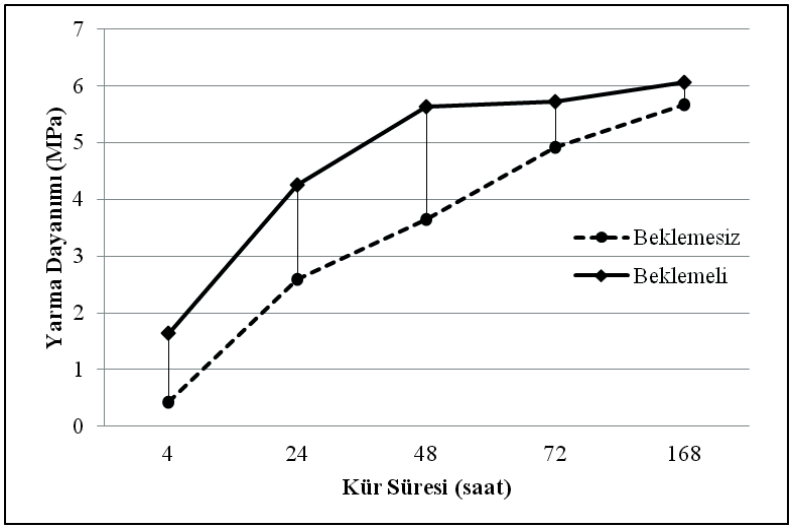
Tablo 6 Geopol imer Harcın Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçları.

Karışım No	Kür Süresi	İlave Bekleme Süresi	Eğilme Dayanımı	Karışım No	Kür Süresi	İlave Bekleme Süresi	Eğilme Dayanımı
K1	4 saat	+0	0.42	K6	4 saat	+28 gün	1.63
K2	1 gün	+0	2.59	K7	1 gün	+27 gün	4.25
K3	2 gün	+0	3.64	K8	2 gün	+ 26 gün	5.63
K4	3 gün	+0	4.91	K9	3 gün	+25 gün	5.72
K5	7 gün	+0	5.67	K10	7 gün	+ 21 gün	6.06

Geopolimer harç numunelerin yarmada çekme dayanımları Tablo 6'da sunulmuştur. Tablo 6'dan görüleceği üzere, ısıl kür süresi artıkça geopolimer harcın yarma dayanımı sonuçlarının eğilme dayanımına benzer şekilde artmakta olduğu görülmektedir. Isıl kür

süresi 4 saat olan harcın 0.42 MPa olan yarmada çekme dayanımı 1, 2, 3 ve 7 günlük ısıl kürden sonra sırasıyla, 2.59, 3.64, 4.91, 5.67 MPa olmuştur. Aynı eşdeğer numunelere uygulan ısıl kürden sonra toplamda 28 güne kadar laboratuar ortamında bekletildikten son ra elde edilen yarmada çekme dayanımları ise sırasıyla 1.63, 4.25, 5.63, 5.72, 6.06 MPa değerlerine ulaşmıştır.

Şekil 3'den de görüldüğü üzere ısıl kür süresi arttıkça yarmada çekme dayanımların önemli ölçüde azalarak arttığı görülmektedir. Hazırlanan K1, K2, K3, K4 ve K5 numuneleri (beklemesiz) ile K6, K7, K8, K9 ve K10 numuneleri (beklemeli) sırasıyla eğilme dayanımları karşılaştırıldığında kendi içinde dayanım artışlarının yine sırasıyla yaklaşık olarak %288, %64, %55, %16 ve %7 olduğu hesaplanmıştır. Bu dayanım artışları göz önüne alındığında, ısıl kür süresinin artmasıyla yarmada çekme dayanımlarındaki artışlarının önemli oranda azaldığı görülmüştür.



Şekil 3 Isıl kür süresinin yarmada çekme dayanıma etkisi.

Ayrıca 4 saat, 1 gün ve 2 gün ısıl küre tabi tutulan ve 28 güne kadar bekletilen numunelerin yarmada çekme dayanımlarındaki artışın, ona karşılık gelen eğilme dayanımlarındaki artışa benzer olduğu görülmüştür.

Sonuçlar

- Uçucu kül ile üretilen geopolimer harcın basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımlarının ısıl kür süresinin artmasıyla genel olarak arttığı görülmüştür. Bunun nedeni nin ise geopolimerizasyon reaksiyonlarının devam etmesinden kaynaklanması olarak gösterilmektedir. Bununla birlikte ısıl kür süresi arttıkça bu dayanım artışlarının da önemli ölçüde azaldığı hatta durduğu anlaşılmaktadır. Bu ise geopolimerizasyon reaksiyonunu oluşturacak malzemelerin ortamdan tükenmesi ile açıklanabilir.

- Geopolimer harcının 75ºC sıcaklıkta 4 saat, 1 gün, 2 gün, 3 gün ve 7 gün ısıl küre tabi tutulup dayanımı ölçülen numuneler (beklemesiz) ile 28 güne kadar bekletilerek dayanımları ölçülen numuneler (beklemeli) karşılaştırıldığında, 28. güne kadar bekleyen numunelerin dayanımlarında artış gözlenmiştir. Dayanım artışlarının ısıl kürden sonra laboratuar ortamına bırakılan numunelerin ortam sıcaklığına düşmesi esnasındaki sıcaklığın, dayanım kazanımlarında etkili olduğu düşünülmektedir. Soğumadan sonraki toplam 28 güne kadar bekletilen numunelerin geopolimerizasyon reaksiyonunun devam etmediği ve dolayısıyla dayanım artışının çok azaldığı ve hatta durduğu düşünülmektedir.

- Sonuç olarak, sodyum hidroksit ile uçucu külü aktive ederek elde edilen geopolimer, 75ºC'lik ısıl kür ile 75 MPa mertebesinde basınç dayanımına ulaşmıştır.

Teşekkür Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince Desteklenmektedir. Proje Numarası: FBA-2014-5380.

Kaynaklar

Guo X., H. Shi and W.A. Dick (2010) Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. Cement Concrete Composites, Vol. 32, No: 2, pp. 142–147.

Olivia M. and H. Nikraz (2012) Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. Materials and Design, Vol. 36, pp. 191-198.

Nazari A., A. Bagheri and S. Riahi (2011) Properties of geopolymer with seeded fly ash and rice husk bark ash. Material Science and Engineering A, Vol. 528, No:24, pp. 7395-7401.

Topçu İ.B. and M.U. Toprak (2009) Alkalilerle aktive edilen taban küllü hafif harç üretimi. Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University, Vol: XXII, No:2, pp. 153-164.

Bakri A.M.M.A., H. Kamarudin, H. Mohamed, C.M. Ruzaidi, A.R. Rafiza, M.T.M. Faheem and A.M. Izzat (2011) Properties and microstructural characteristics of geopolymers using fly ash with different percentages of kaolin at room temperature curing. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, Vol: 5, No: 10, pp. 824-828.

Hardjıto D., S.E. Wallah, D.M.J. Sumajouw and B.V. Rangan (2005) Introducing fly ash-based geopolymer concrete: manufacture and engineering properties. 30th Conference on Our World In Concrete Structures, Singapore, pp: 271-278.

Reddy B., K. Siva, K. Reddy, K. Naveen and J. Varaprasad (2011) Influence of curing condition on compressive strength of cement added low lime fly ash based geopolymer concrete. Journal of Engineering Research and Studie, pp. 103-109.

Vijai K., R. Kumutha and B. G. Vishnuram (2010). Effect of types of curing on strength of geopolymer concrete. International Journal of the Physical Sciences, Vol: 5, No. 9, pp. 1419-1423.

Thakur R.N. and S. Ghosh (2009) Effect of mix composition on compressive strength and microstructure of fly ash based geopolymer composites. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. Vol. 4, No: 4, pp. 68-74.

Sathonsaowaphak A., P. Chindaprasirt and K. Pimraksa (2009) Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. Journal of Hazardous Materials, Vol. 168, No: 1, pp. 44-50.

Türk Standartları Enstitüsü (2009) TS EN 196-1 Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım. Ankara.

Türk Standartları Enstitüsü (2000) TS EN 1015-11 Kagir Harcı Deney Metodları - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini. Ankara.

Alkalilerle Aktive Edilmiş Harçların Düşük Hızlı Darbe Yüklemesi Altında Eğilme Performanslarının İncelenmesi

Mert Yücel Yardımcı[1], Serdar Aydın[2], Murat Tuyan[3]

[1]Yrd. Doç. Dr., Gediz Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fak., İnşaat Müh. Böl., Seyrek Kampüsü, 35665 Menemen-İzmir.
Tel: (232) 355 00 00 - 2353
e-posta: mert.yardimci@gediz.edu.tr

[2]Doç. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fak., İnşaat Müh. Böl., Tınaztepe Kampüsü, 35397 Buca-İzmir.
Tel: (232) 301 70 44
e-posta: serdar.aydin@deu.edu.tr

[3]Araş.Gör., Ege Üniversitesi, Mühendislik Fak., İnşaat Müh. Böl., Bornova Kampüsü, 35397 Bornova-İzmir.
Tel: (232) 388 60 26
e-posta: murat.tuyan@ege.edu.tr

Öz

Bu çalışma kapsamında, alkalilerle aktive edilmiş harçlarda (AAH) ana bağlayıcı olarak kullanılan yüksek fırın cürufu (YFC) yerine belirli oranlarda uçucu kül (UK), silis dumanı (SD) ve metakaolin (MK) ikame edilerek çeşitli AAH karışımları üretilmiştir. Aktivatör olarak, bağlayıcı ağırlığının %4'ü oranında Na_2O içeren ve silikat modülü ($Ms=SiO_2/Na_2O$) 0,8 ve 1,2 olan sodyum hidroksit – sodyum silikat karışımı aktivatör çözeltileri kullanılmış ve AAH karışımlara 100 °C sıcaklıkta 8 saat süreyle buhar kürü uygulanmıştır. Orta noktasından çentik açılan prizmatik eğilme örneklerinin (40x40x160 mm) statik ve darbe yükleri altında yük-sehim eğrileri, eğilme dayanımları, kırılma enerjileri ve düktilite indeksleri belirlenmiştir. Statik yükler altında eğilme deneyi, kapalı devre deplasman kontrollü eğilme presi kullanılarak elde edilmiştir. Darbe yüklemesi ise, 30 cm yükseklikten 40 x 40 x 160 mm boyutlarındaki çentikli örnekler üzerine ağırlık düşürülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, SEM analizleri ile karışımların iç yapıları incelenmiştir.

AAH'ların basınç dayanımı Ms oranındaki artışla artmıştır. SD ikamesi basınç dayanımı, statik ve darbe yüklemesi altındaki eğilme dayanımı ve kırılma enerjisini olumlu yönde etkilerken, MK ikamesi ile söz konusu mekanik özellikler ciddi ölçüde azalmıştır. UK ikamesi ise mekanik özelliklerde az da olsa kayıpla sonuçlanmıştır. Kırılma enerjisi yüksek karışımların (%100 YFC ve %85YFC+%15SD) düktilite indekslerinin düşük olduğu ve daha gevrek davrandıkları ortaya çıkarılmıştır. SEM incelemelerinde elde edilen görüntüler, MK serisinin düşük dayanımının oluşan gözenekli yapıdan, SD ikamesi ile üretilen harçların statik ve darbe yüklemesi altındaki üstün performansının ise yoğun ve çatlaksız yapıdan kaynaklandığını ortaya koymuştur.

Anahtar Sözcükler: alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar, yüksek fırın cürufu, düşük hızlı darbe, kırılma enerjisi

1. Giriş

Son yıllarda Portland Çimentosu dışında bir bağlayıcı üretimi çevresel, ekonomik ve teknik nedenlerden ötürü oldukça popülerdir (Rashad, 2013). Portland çimentosu kullanılmadan bir bağlayıcı üretimine yönelik çalışmalardan en ilgi çekeni, yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül (UK) gibi endüstriyel atıkların alkalilerle aktivasyonudur. Metakaolin, kaolinitik killer, pirinç kabuğu külü ve kırmızı çamur gibi malzemeler (Aydın, 2010, Pacheco-Torgal ve diğ. 2008, Wongpa ve diğ., 2010, Davidovits, 1991) ve bazı doğal puzolanlar da hammadde olarak kullanılmaktadır (Shi ve diğ., 2006). En fazla kullanılan aktivatörler ise, sodyum veya potasyum hidroksit (NaOH, KOH) ile sodyum cam suyu ($nSiO_2Na_2O$) veya potasyum cam suyu ($nSiO_2K_2O$) karışımıdır. En uygun aktivatör, hidroksitler ve çözünebilen silika ile üretilmektedir (Aydın, 2010).

Beton ve kaya gibi yarı gevrek karakterde olan malzemelerin darbe yüklemeleri altındaki performansları, bu malzemelerin toplam performansı açısından son yıllarda göze alınan ve bazı hallerde de doğrudan tasarım parametresi olan bir mühendislik özelliğidir. İnşaat mühendisliğinde kullanılan yapı malzemeleri servis ömürleri boyunca çeşitli nedenlerle darbe yüklerine maruz kalabilmektedir. Bu yüklemeler, darbe yüklerine karşı özel tasarlanmamış yapı elemanlarına çeşitli cisimlerin genellikle kazara çarpması ile (araç çarpmaları, hızlı hareket eden hava taşıtlarının çarpmaları, askeri yapılardaki çarpma olayları, endüstriyel yapılardaki zeminlerde ağır parça düşmeleri sonucu hasarlar gibi) oluşmaktadır. Ayrıca, mermi gibi rijit veya yarı-rijit cisimlerin yüksek hızda çarpmalarından oluşan darbe tesirleri de darbeye maruz kalma nedenleri arasında bulunmaktadır. Yapı elemanlarının ani gelişen darbe yüklemelerine karşı performansları darbe yükünün hızına bağlı olduğu kadar darbeye maruz elemanın yapıldığı malzemenin karakteristik özelliklerine de büyük oranda bağlıdır (Ong ve diğ., 1999). Özellikle çimentolu kompozitlerin lif katkısı ile statik yükler altındaki mekanik özelliklerinin dikkate değer bir biçimde gelişme gösterdiğinin ortaya çıkmasıyla birlikte, aynı iyileşmelerin dinamik yükler altında da olup olmadığının araştırılması son 10-15 yılda popüler araştırma konularından birisi olmuştur. Benzer şekilde, AAH'lar gibi Portland Çimentosu içermeyen karışımların da darbe yüklemesi altındaki performanlarının incelenmesi de önem arz eden bir araştırma alanıdır.

Yapı malzemelerinin darbe yüklemeleri altında performanslarının araştırılmasında başlıca yüksek hızlı ve düşük hızlı darbe test düzenekleri kullanılmaktadır (Suaris ve Shah, 1984). Yüksek hızlı darbe deneyleri, patlama deneyleri ve genellikle donatılı beton plaklar üzerine bir gaz topundan ateşlenen mermilerin 50-100 m/s hızlarda çarpması ile gerçekleştirilen deneylerdir (Almansa ve Canovas, 1999). Ancak sistem çok karmaşık ve pahalı test düzeneklerinden oluşmaktadır. Bu test yöntemleri ile özel ihtiyaçlara karşı malzemelerin performanları belirlenebilmekle birlikte, test sonuçları statik testlerle karşılaştırılabilir mertebelerde olmamaktadır. Düşük hızlı darbe testlerinde ise ihtiyaç duyulan çarpma hızları belirli bir ağırlıktaki rijit bir cismin (örneğin bir çelik parça) genellikle serbest düşme veya çift kolonlu bir düşürme mekanizması kullanılarak serbest düşmeye yakın koşullarda örnek üzerine kontrollü düşürülmesi ile sağlanmaktadır. Bu şekildeki ağırlık düşürme sistemlerinin önemli bir avantajı, belirli bir yükseklikten düşürülen cisimleri göreceli olarak daha düşük ve istenilen hızda kontrollü olarak düşürmeye olanak tanımaktadır. Diğer bir ifade ile yüksek enerji seviyelerinde ancak daha düşük hızlarda darbe testleri yapılabilmektedir. Bu tip testlerde hızlar genellikle bir kaç m/s civarında oluşmaktadır (Ong ve diğ., 1999). Bu testlerde darbeye maruz kalacak kiriş örnekler basit mesnetli koşullara benzer

şekilde mesnetlenerek, orta noktalarından çarpan ağırlığın yarattığı temas yükleri, oluşan mesnet reaksiyonları, kiriş üzerindeki ivmeler ve kirişin orta nokta sehimi çok hızlı data toplama sistemleri kullanılarak kaydedilebilmektedir. Bu şekilde darbe yüklemesi altında elde edilen yük-sehim eğrileri sayesinde örneğin kırılma süreci hakkında değerli bilgiler elde edilebilmekte, sonuçlar statik yükleme ile elde edilen verilerle karşılaştırılabilmektedir. Eğilme örnekleri üzerine kontrollü ağırlık düşürülmesi ile kiriş formundaki örnek üzerinde oluşan yük, deplasman ve ivmelerin kaydedildiği mekanik bir sistem Banthia ve diğ.(1988) tarafından tanıtılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, YFC ağırlığının %4'ü oranında Na_2O ve bu oran için silikat modülü (M_s=SiO_2/Na_2O) 0.8 ve 1.2 olan aktivatör çözeltileri ile aktive edilerek hazırlanan, buhar kürü geçirmiş çentikli prizmatik örneklerin üç noktalı statik ve düşük hızlı darbe yüklemeleri altında eğilme performansları (eğilme dayanımı, kırılma enerjisi, düktilite indeksi ve dinamik artım faktörü) araştırılmıştır.

2. Deneysel Çalışma

2.1. Karışım Özellikleri ve Test Yöntemleri

Kullanılan YFC, UK, SD ve MK'nın üretici firmalarından temin edilen kimyasal analizleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışma kapsamında kullanılan malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri.

	YFC	UK	SD	MK
SiO_2 (%)	38,38	56,55	92,25	52,47
Al_2O_3 (%)	9,63	18,01	0,88	42,21
Fe_2O_3 (%)	0,96	10,16	1,98	0,34
CaO (%)	35,77	4,17	0,51	0,3
MgO (%)	8,10	5,11	0,96	0,26
K_2O (%)	0,99	1,54	0,12	0,9
Na_2O (%)	0,23	0,07	0,45	0,1
SO_3 (%)	0,18	0,39	0,33	--
TiO_2 (%)	0,23	--	--	0,72
MnO	--	--	--	0,01
Kızdırma kaybı (%)	0,88	0,96	1,81	--
Serbest CaO (%)	--	--	--	--
Özgül Ağırlık	2,88	2,16	--	2,60
Özgül yüzey, m^2/kg	413 (Blaine)	250 (Blaine)	--	-

YFC, Ereğli demir çelik fabrikasından temin edilmiş olup, 45 μm elekten geçen malzeme miktarı %90, Blaine özgül yüzey alanı 413 m^2/kg olup, özgül ağırlığı ise 2,88'dir. UK , F sınıfı olup Tunçbilek termik santralinden temin edilmiştir. MK ve SD ticari olarak pazarlanan ürünler olup BASF firmasından temin edilmiştir.
Aktivatör olarak cam suyu ve sodum hidroksit karışımı kullanılmıştır. Kullanılan sodyum hidroksit (NaOH) ve cam suyu Merck firmasınca üretilen ticari ürünlerdir. Sodyum hidroksit %97 saflıkta olup, granül halde temin edilmiştir. Cam suyunun (sıvı sodyum silikat) ort alama kimyasal kompozisyonu %8 Na_2O, %27 SiO_2 ve %65 H_2O'dur. Agrega olarak, kuru özgül ağırlığı 2,57, su emmesi %1,43 ve en büyük tane büyüklüğü 4 mm olan kireçtaşı kullanılmıştır. Harç karışımlarının Agrega / Bağlayıcı oranı 2,75 olup, yayılma değeri 120 ± 3 mm olacak şekilde su ilavesi yapılmıştır. Aktivatör çözeltisi bağlayıcı ağırlığının %4 ü oranında Na_2O içermektedir. Çözeltinin silikat modülü (Ms=SiO_2/Na_2O) ise 0,8 ve 1,2'dir. Karışımlarda kullanılan mineral katkı

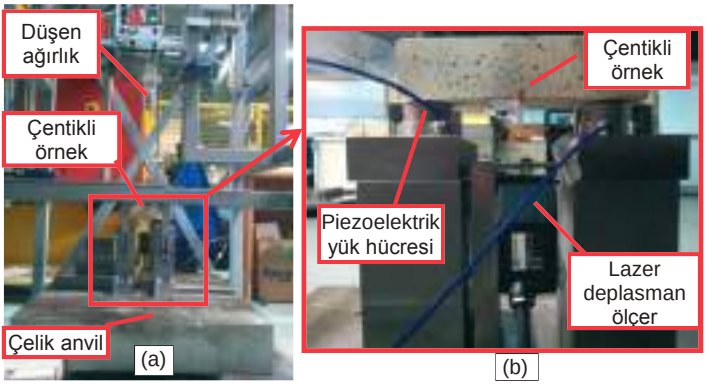
ikame oranları ön denemelerle işlenebilirlik ve büzülme durumları göz önüne alınarak belirlenmiştir. Hazırlanan karışımların bağlayıcı kompozisyonları, yayılma çapı değerleri ve su / bağlayıcı oranları Tablo 2'de görülmektedir.

Tablo 2 . Hazırlanan karışımların su / bağlayıcı oranı ve yayılma çapı değerleri.

Aktivatör	Bağlayıcı	Yayılma çapı (mm)	Su / Bağlayıcı
%4 Na_2O-Ms=0.8	%100 YFC	123	0.38
	%70 YFC+%30 UK	118	0.37
	%85 YFC+%15 MK	118	0.39
	%85 YFC+%15 SD	123	0.25
%4 Na_2O-Ms=1.2	%100 YFC	123	0.38
	%70 YFC+%30 UK	120	0.37
	%85 YFC+%15 MK	117	0.39
	%85 YFC+%15 SD	124	0.25

Harç karışımlarından 40 x 40 x160 mm ayrıtlı prizmatik numuneler hazırlanarak 5 saat ön bekleme süresinin ardından 8 saat süreyle 100 °C sıcaklıkta buhar kürü uygulanmıştır. Buhar kürü geçirmiş örneklere eğilme testlerinden önce elmas bıçakla sulu kesim yoluyla orta noktalarından 6 mm derinliğinde 2 mm genişliğinde çentik açılmıştır. Statik testler kapalı devre deplasman kontrollü elektromekanik üniversal test makinası ile gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında ani enerji boşalmasının önlenmesi ve tüm kırılma süreci boyunca numune kırılıp iki parçaya bölününceye kadar, yük-sehim eğrilerinin kaydedilebilmesi için prese geri besleme olarak, numunelerin orta nokta sehimlerini ölçen Heidenhein marka 1 µm ölçüm hassasiyetinde optik encoder verileri kullanılmıştır. Deney bu şekilde kapalı çevrimli olarak tüm seriler için numune tamamen kırılıp yük taşıyamaz hale gelene kadar 0,01 mm/dak. hızında yapılmıştır.

Düşük hızlı darbe testleri, bu çalışma için özel olarak tasarlanmış bir darbe test cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Darbe test düzeneği: Genel görünüm (a), ölçüm cihazları ve örnek (b).

Bu düzenekte 800 gramdan 15 kg'a kadar ağırlıklar, pinomatik çenelerle 10 cm'den 2 m yüksekliğe kadar otomatik olarak kaldırılmakta ve istenilen yükseklikten otomatik olarak serbest bırakılarak darbe tesiri oluşturulabilmektedir. Düzenekte, düşen ağırlığın üzerine takılmış piezoelektrik yük hücresi ve ivme ölçer ile kiriş ve çarpan cisim arasında çarpma anında oluşan temas yükünün, her iki mesnete monte edilen

piezoelektrik yük hücreleri ile darbe nedeniyle oluşan mesnet reaksiyonlarının, kiriş altına yerleştirilen 2 μm hassasiyetinde temassız lazer sensör ile kiriş orta nokta sehiminin, kiriş altına epoksi ile yapıştırılan ivme ölçer ile de kiriş orta nokta ivmesinin zamanla değişimi eş zamanlı olarak ayrı ayrı 200 kHz data toplama hızında kaydedilebilmektedir. Darbe tesiri ile oluşan eylemsizlik kuvvetleri nedeniyle kiriş örneğin geri sıçramasını önlemek için mesnetlerde ucu döner başlıklı bir sıçrama önleme sistemi kullanılmıştır. Bu sistem, dönmeye izin verirken kirişin düşey deplasmanını önleyerek statik testlerdeki mesnet koşullarını sağlamaktadır. Çalışmada, 858 gram ağırlığındaki alüminyum gövdeli, çelik uçlu silindirik formda bir rijit parça, 300 mm yükseklikten düşürülerek 2,426 m/s çarpma hızında üç noktalı darbe yüklemesi elde edilmiştir. Darbe yüklemesine maruz kalan çentikli kirişin mesnet açıklığı statik testlerdeki gibi 130 mm'dir.

2.2. Dinamik Analiz

Uçlarından basit mesnetlenmiş kirişlerin orta noktasından darbe yüklemesine maruz kalması halindeki dinamik analizinde önemli nokta, kirişe belirli bir hızla çarpan cisim ile kiriş arasında oluşan temas yükünün (Pt) ne kadarının kiriş tarafından karşılandığının belirlenmesidir. Bu çalışmada olduğu gibi, kirişin tek bir darb ede iki parçaya ayrıldığı durumlarda kirişin üzerinde oluşan ve asıl kırılmaya sebep olan kiriş yükü, kirişe etkiyen dış yükten (çarpmayla oluşan temas yükünden) bir miktar küçük olacaktır. Aradaki fark yükleme sırasında oluşan eylemsizlik kuvvetlerinin dengelenmesinde kullanılmaktadır. Dolayısıyla, kirişin üzerine etkiyen ve enerji hesaplarına esas olacak kiriş yükü (Pb) mesnetlerden ölçülen mesnet reaksiyonlarının toplamı olmaktadır (Banthia vd., 1989 ; Zhang v e diğ., 2009; Dancygier v e diğ., 2012).



Şekil 2. Darbe olayı nedeniyle oluşan termas yükü (Pb), mesnet reaksiyonları toplamı (Pb) ve atalet kuvvetlerinin (Pi) darbe süresince değişimi (a) ve darbe sonrası kirişin durumu (b).

Çalışmada tüm örneklerde hem düşen ağırlığın kirişe çarpmasıyla oluşan temas yükü (Pt) hem de her iki mesnette darbe nedeniyle oluşan mesnet kuvvetleri (Pb) ile kirişin orta nokta sehimi doğrudan ölçülmüş ve dinamik yükleme altında kirişin tüm yük-sehim eğrileri elde edilmiştir. Kullanılan darbe düzeneğinden elde edilen ölçümlerde yukarıda bahsedilen dinamik dengenin sağlanıp sağlanmadığı, bir kaç örnekte çentik kenarına yakın bir noktaya ivmeölçer takılarak ölçülen eylemsizlik kuvvetlerinin Banthia ve diğ., (1989) tarafından önerilen analiz yöntemi ile elde edilmesi ile kontrol edilmiştir. Şekil

2-a'da deneyde elde edilen temas yükü (Pt), mesnet reaksiyonlarının toplamından oluşan kiriş yükü (Pb) ve oluşan atalet kuvvetlerinin darbe olayı süresince değişimi ve Şekil 2-b'de ise orta noktasına ivmeölçer takılmış bir kiriş örneğin darbe deneyi sonrası durumu görülmektedir. Şekil 2-a'dan görüldüğü gibi, çarpma sonucu oluşan temas yükü (Pt), kirişte asıl hasara neden olan kiriş yükü (Pb) ile atalet kuvvetlerinin (Pi) toplamına oldukça yakındır.

Hem statik hem de dinamik yükleme altında çentikli kiriş örneklerin yük – sehim eğrileri numune tamamen kırılıp iki parçaya ayrılana kadar elde edildiğinden, serilerin kırılma enerjileri RILEM 50 -FMC (1985)'ye göre (1) ifadesi ile hesaplanmıştır.

$$G_F = \frac{W_0 + m.g.\delta_0}{A_{net}} \qquad (1)$$

Bu ifadede W_0, eğilme deneyinde yük sıfıra inene kadar yük – sehim eğrisi altında kalan alan, m kirisin mesnetleri arasında kalan kısmının ağırlığı, g yerçekimi ivmesi ve A_{net} ise prizmatik eğilme örneğinde çentik açıldıktan sonra kalan net en kesit alanıdır. Kırılma enerjisi, malzemelerin kırılma süreci ile ilgili önemli bilgiler veren bir kırılma parametresi olmasına karşın örnek boyutlarına da bağlı bir parametredir (Beygi ve diğ., 2013). Bu nedenle bazı durumlarda örneğin sünekliği hakkında fikir vermeyebilir. Bu nedenle Chiaia v e diğ. (1998) tarafından önerilen ve (2) ifadesi ile hesaplanan "düktilite indeksi" adı verilen bir parametre ile serilerin süneklikleri karşılaştırılmıştır.

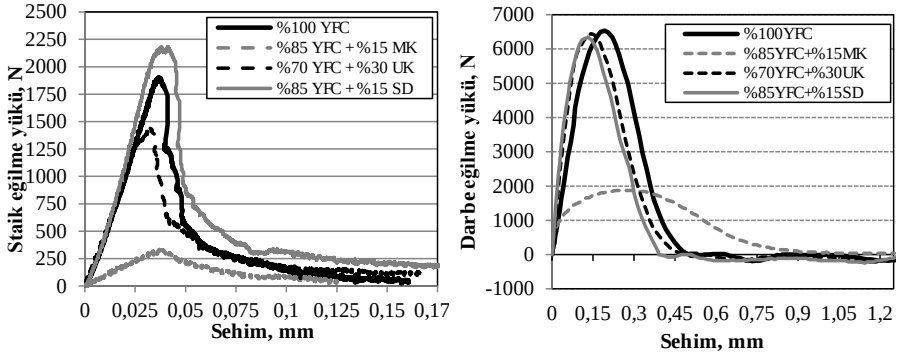
$$D_\sigma = \frac{G_f}{\sigma_n} \qquad (2)$$

Bu ifadede $\sigma_n = c_n.\frac{P_u}{b.d}$ dir. P_u maksimum eğilme yükü, C_n değeri 1 olan bir katsayı, b ve d ise eğilme örneğinin yükseklik ve genişliğidir. Yüksek düktilite indeksi değerleri kompozitte daha yüksek süneklik anlamına gelmektedir (Beygi ve diğ., 2013).

3. Deney Sonuçları ve Tartışma

3.1. Yük – Sehim Eğrileri ve Mekanik Sonuçlar

Statik ve düşük hızlı darbe yüklemelerinden elde edilen tipik yük – sehim eğrileri Şekil 3'de görülmektedir.



Şekil 3. Statik ve darbe yüklemesinde tipik yük – sehim eğrileri (Ms=1,2 serileri).

Serilerin statik yükler altındaki yük-sehim eğrisinin yükselen kısmı, %15 MK ikamesi ile üretilmiş AAH'lar dışında birbirlerine benzerdir. YFC yerine %15 MK ikamesi ile üretilen AAH'larda maksimum eğilme yükü diğer bağlayıcı kombinasyonlarından belirgin şekilde düşük olarak bulunmuştur. Ayrıca, %15 MK ikamesi ile üretilen AAH'ın yük-sehim eğrisinin alçalan kısmının eğimi hem statik, hem de darbe yüklemesinde diğer karışımlara kıyasla düşüktür.

Hazırlanan karışımlardan elde edilen, statik yükleme altında belirlenmiş basınç dayanımları ile statik ve darbe yüklemelerinden elde edilen eğilme dayanımı, kırılma enerjisi ve düktilite indeksi değerleri Tablo 3'de görülmektedir.

Tablo 3 . Serilerden elde edilen mekanik sonuçlar.

Silikat Modülü (Ms)	Bağlayıcı Kompozisyonu	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)		Kırılma Enerjisi (N/m)		Düktilite İndeksi (mm)	
		Statik	Statik	Darbe	Statik	Darbe	Statik	Darbe
0.8	%100 YFC	67,4	7,7	19,5	50	944	0,038	0,25
	%70 YFC+%30 UK	63,5	5,8	19,3	38	1069	0,043	0,28
	%85 YFC+%15 MK	4,6	0,6	4,2	7	542	0,074	0,65
	%85 YFC+%15 SD	70,3	8,8	19,6	44	1019	0,028	0,28
1.2	%100 YFC	75,8	8,0	25	51	1245	0,037	0,26
	%70 YFC+%30 UK	66,4	6,0	24,9	47	1126	0,044	0,24
	%85 YFC+%15 MK	7,9	1,5	7,5	20	754	0,078	0,55
	%85 YFC+%15 SD	75,2	8,9	25,1	64	1033	0,040	0,22

Genel olarak, silikat modülü (Ms) değeri göreceli olarak daha yüksek karışımlarda daha yüksek basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Ms değeri 0,8 olan karışımlarda en yüksek basınç dayanımı değeri 70,3 MPa ile %15 SD ikame edilmiş karışımlara aittir. Bu Ms değerinde %100 YFC ile üretilmiş AAH'larda 67,4 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Ms değerinin 1,2 yapılmasıyla %100 YFC'li karışımda elde edilen basınç dayanımı 75,8 MPa'a yükselmiş ve bu Ms oranında en yüksek basınç dayanımı değeri bu karışımda elde edilmiştir. Öte yandan, %15 SD ikame edilmiş AAH karışımından elde edilen basınç dayanımı da %100 YFC içeren karışıma çok yakındır (75,2 MPa). Ms değeri 0,8 ve 1,2 olan karışımlarda %30 UK ikamesiyle %100 YFC'li karışıma göre sırasıyla % 5,8 ve % 12,4 daha düşük basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan %4 Na_2O içeren ve Ms oranları 0,8 ve 1,2 olan çözeltilerde YFC yerine %15 oranında MK ikamesiyle elde edilen oldukça düşük basınç dayanımı değerleri, kullanılan çözelti oranlarının %15'lik MK ikamesi için uygun olmadığını göstermektedir.

Ms değerinin artmasıyla statik ve darbe yüklemeleri altında elde edilen eğilme dayanımları artmıştır. Her iki Ms oranı için de en yüksek eğilme dayanımları %15 SD ikame edilmiş serilerde, en düşük performans ise % 15 MK ikame edilmiş serilerde elde edilmiştir.

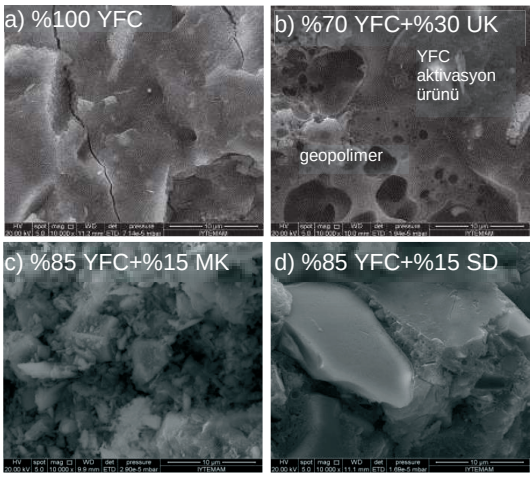
Kırılma enerjilerinin Ms değerindeki artışla artma eğilminde olduğu görülmektedir. En düşük kırılma enerjisi değeri her iki Ms oranı için de, basınç ve eğilme dayanımında olduğu gibi, %15 MK ikame edilmiş serilerde elde edilmiştir. Literatüre paralel olarak , yüksek kırılma enerjisine sahip serilerde göreceli olarak daha düşük düktilite indeksi değerleri elde edilmiştir. Benzer şekilde, en düşük kırılma enerjisi ve basınç dayanımına sahip %15 MK içeren serilerde en yüksek düktülite indeksi değerleri elde edilmiştir. Bu durum , yüksek kırılma enerjiine sahip AAH'lerin muhtemelen daha yoğun mikro

yapılarından dolayı daha gevrek davrandıklarını göstermektedir. Bahsedilen bulgular hem statik yükleme altında hem de darbe yüklemeleri altında birbirlerine paraleldir.

Beklendiği gibi, darbe yüklemesinden elde edilen eğilme dayanımı, kırılma enerjisi ve düktilite indeksi değerleri, statik yüklemeden elde edilen değerlerden daha yüksek elde edilmiştir. Bu durum, tıpkı çimentolu kompozitlerde olduğu gibi AAH'ler üzerinde de yükleme hızının önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Belirli bir mekanik parametren in darbe yüklemesinden elde edilen değerinin, statik yüklemeden elde edilen değerine oranı ile hesaplanan "dinamik faktör" değerleri; basınç dayanımı değerleri 60 – 75 MPa aralığında olan YFC, YFC + SD ve YFC + UK bağlayıcı kompozisyonuna sahip AAH'larda eğilme dayanımı için 2,2 ile 4,2, kırılma enerjisi için ise 16,1 ile 28,1 aralığındadır. Bu dinamik faktörler, çalışmada ulaşılan basınç dayanımı seviyelerine benzer dayanımdaki Portland çimentolu yalın beton için literatürde verilen dinamik faktör değerleri seviyelerindedir (Mindess, ve diğ. 1987).

3.2. Mikroyapı İncelemeleri

Ms değeri 1,2 olan AAH'ın SEM (SE) görüntüleri Şekil 4'de görülmektedir.



Şekil 4. %4 Na_2O (Ms=1.2) olan buhar kürü geçirmiş AAH'ın SEM (SE) görüntüleri.

Bağlayıcı olarak %100 YFC ve %70 YFC + %30 UK kullanılan karışımların matris fazının, %85 YFC + %15 MK ve %85 YFC + %15 SD içeren karışımlara göre daha çatlaklı ancak daha yoğun bir yapıya sahip olduğu göze çarpmaktadır. Yoğun mikroyapı %100 YFC içeren karışımından elde edilen en yüksek basınç dayanımı (75.8 MPa) değerini açıklamaktadır. %85 YFC + %15 MK içeren karışımın matris fazı gözenekli ve sıkı olmayan bir yapıya sahiptir. Bu karışımın mekanik deney sonuçları incelendiğinde oldukça düşük basınç dayanımı ve statik ve darbe eğilme dayanımı değerlerine sahip olduğu görülmektedir ki, elde edilen sonuçlar mikroyapı incelemelerinden de kolaylıkla görülmektedir. %85 YFC + %15 SD içeren karışımın matrisi , nanometre boyutunda gözenekler içerip çatlak içermemesinin bir sonucu olarak, incelenen karışımlar arasında en yüksek statik ve dinamik eğilme dayanımına sahiptir. Ms=0, 8 olan karışımlar ise Ms=1, 2 olan karışımlara kıyasla daha çatlaklı bir mikro

yapıya sahip olup, matris fazının Ca/Si oranı bir miktar daha yüksektir. Bu nedenle mekanik özellikleri daha düşüktür. EDS analizleri, MS=1, 2 olan karışımda %100YFC karışımının Ca/Si oranının 1.24 olduğunu, SD ikamesi durumunda bu oranın 0.56-0.58 değerine kadar düştüğünü göstermiştir. UK ikamesi yapılan durumda geopolimer matris ve C-S-H esaslı matrisin bir arada görüntüleri elde edilmiştir. UK'nın aktivasyonuyla oluşan geopolimer matriste Ca/Si oranı oldukça düşük (0.07) olup, Al ve Si esaslı geopolimer bağlayıcı oluşmuştur. Cürufun aktivasyonu ile oluşan C-S-H esaslı bağlayıcının Ca/Si oranı ise 1.08'dir. Metakaolin ikameli seride ise, bu oran 3 civarındadır.

4. Sonuçlar

%4 Na_2O içeriğine sahip AAH'larda silikat modülünün 0,8'den 1,2'ye çıkarılması ile statik basınç dayanımı ile statik ve düşük hızlı darbe yüklemesinden elde edilen eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi artış göstermektedir. SD ikamesi basınç dayanımı, statik ve darbe yüklemesi altındaki eğilme dayanımı ve kırılma enerjisini olumlu yönde etkilerken, MK ikamesi ile söz konusu mekanik özellikler önemli ölçüde azalmıştır. UK ikamesi ise mekanik özelliklerde az da olsa kayıpla sonuçlanmıştır.

Rijit bir cismin belirli bir yükseklikten basit mesnetlenmiş çentikli prizmatik örnek üzerine düşmesinden dolayı oluşan darbe tesirinde, oluşan mesnet reaksiyonları ile kiriş üzerine etkiyen eylemsizlik kuvvetlerinin toplamı darbe sonucu oluşan temas kuvvetine eşit olmaktadır. Tıpkı Portland çimentolu kompozitlerde olduğu gibi, AAH'lar üzerinde de yükleme hızının önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. AAH'larda eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi için elde edilen dinamik faktör değerleri benzer dayanımdaki Portland Çimentolu karışımlar için literatürde belirtilen mertebelerdedir.

Statik ve darbe yüklemesi altında göreceli olarak daha yüksek kırılma enerjiine sahip AAH'larda elde edilen düktilite indeksleri daha düşük değerlerdedir. Bu durum, muhtemelen daha yoğun mikroyapılarından dolayı, bu serilerin daha gevrek davrandıklarını göstermektedir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenmiş olup (Proje no: 112M262) yazarlar sağladığı destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunar.

Kaynaklar

Rashad, A.M. (2013) A comprehensive overview about the influence of different additives on the properties of alkali -activated slag – A guide for Civil Engineer . Construction and Building Materials , No. 47, pp. 29 -55.

Aydın, S. (2010) Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Bağlayıcılı Lifli Kompozit Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Pacheco -Torgal, F., Castro -Gomes, J., Jalali, S. (2008) Alkali -activated b inders: A review. Part 2. About Materials and Binders Manufacture . Construction and Building Materials, No. 22, pp.1315 -1322.

Wongpa, J., Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., Chindaprasirt, P. (2010) Compressive strength, modulus of e lasticity, and water permeability of inorganic polyme r concrete . Materials and Des ign, No. 31 , pp. 4748- 4754.

Davidovits, J. (1991) Geopolymers: In organic Polymeric New Materials . J. Therm. Anal., No. 37, pp.1633- 1656.

Shi, C., Krive nko, P.V. and Roy, D. (2006) Alkali -Activated Cements and Concretes . USA and Canada:Taylor and Francis .

Ong, K.C.G. , Basheerkhan, M., Paramasivam, P. (1999) Resistance of fibre concrete slabs to low velocity projectile impact . Cement & Conc. Composites , 21, pp. 391- 401.

Suaris, W., Shah, S. P. (1984) Test methods for impact resistance of fiber reinforced concrete . Detroit: American Concrete Institute SP -81, pp. 247- 265.

Almansa, E. M., Canovas, M. F. (1999) Behaviour of normal and steel fiber -reinforced concrete under impact of small projectiles . Cement and Concrete Research , 29, pp. 1807-1814.

Banthia, N. , Mindess, S., Bentur, A., Piegon, M. (1989) Impact testing of concrete usi ng a drop -weight impact machine . Experimental Mechanics 29 (1), pp. 63 -69.

Zhang X .X., Ruiz G ., Yu R .C., Tarifa M. (2009) Fracture behavior of high -strength concrete at a wide range of loading rates . International Journal of Impact Engineering , 36, pp.1204- 1209.

Dancygier, A., Katz, A., Ya rdımcı, M.Y., Yankelevsky, D.Z. (2012) Behavior of high ductility ce ment composite beams under low i mpact , International Journal of Protective Structures . Vol.3, No.2, pp. 177-191.

RILEM Technical Committee 50 -FMC (1985) Draft Recommendation: Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three point bend test on notched beams . Materials and Structures , 18, (106), 287-291.

Beygi, M.H.A., Kazemi, M .T., Nikbin, I.M., Amiri, J.V. (2013) The effect of water to cement ratio on fracture parameters and brittleness of self -compacting concrete . Materials and Design 50, pp. 267-276.

Mindess S ., Banthia N ., Yan C. (1987) Fracture toughness of concrete under impact loading . Cement and Concrete Research 17, pp.231 -241.

Alkalilerle Aktive Edilmiş Harçların Aşınma Dayanıklılığının İncelenmesi

Serdar Aydın[1], Mert Yücel Yardımcı[2]

[1] Doç. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fak., İnşaat Müh. Böl., Tınaztepe Kampüsü, 35397 Buca-İzmir.
Tel: (232) 301 70 44
e-posta: serdar.aydin@deu.edu.tr

[2] Yrd. Doç. Dr., Gediz Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fak., İnşaat Müh. Böl., Seyrek Kampüsü, 35665 Menemen-İzmir.
Tel: (232) 355 00 00 - 2326
e-posta: mert.yardimci@gediz.edu.tr

Öz

Bu çalışma kapsamında, yüksek fırın cürufu (YFC), ağırlığının %2, %4 ve %6'sı oranında Na_2O ve her bir oran için silikat modülü (M_s=SiO_2/Na_2O) 0, 0.4, 0.8 ve 1.2 olan aktivatör çözeltileri ile aktive edilerek hazırlanan harç karışımlarının mekanik özellikleri ve aşınma dayanıklılığı iki farklı kür durumu için araştırılmıştır. Standart su kürüne tabi tutulan alkalilerle aktive edilmiş harçlar (AAH) buhar kürüne tabi tutulan numunelere göre M_s=1.2 hariç bir miktar daha fazla basınç dayanımı göstermiştir. Ayrıca aynı oranda Na_2O içeren karışımlarda Ms oranı arttıkça basınç dayanımı artmıştır. Standart su kürü için %6 Na_2O içeren M_s değeri 0.4 ve üzerinde olan AAH'ın basınç dayanımının Portland çimentolu kontrol karışımına kıyasla daha yüksek. olduğu görülmüştür. Buhar kürü durumunda ise, hem %4 hem de %6 Na_2O içeren, Ms değeri 0.4 ve üzerinde olan AAH karışımlarının ve %2 Na_2O (Ms=1.2) AAH karışımının çimentolu kontrol karışımdan daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu bulunmuştur. Aşınma dayanıklılığı, buhar kürü uygulanması ile ve Ms oranının artması ile artmıştır. Yüksek silikat modüllerine sahip AAH'ın aşınma dayanıklılığının çimentolu klasik harç karışımına oldukça yakın olduğu görülmüştür. % 6 Na_2O (Ms = 1.2) AAH karışımının aşınma etkilerine karşı dayanıklılığının PÇ harçlarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, alkalilerle aktive edilmiş harçların uygun bir aktivatör çözeltisi kullanıldığında gerek mekanik özellikler gerekse aşınma dayanıklılığı bakımından klasik Portland çimentosu harçlarına kıyasla daha üstün performans sergilediği bulunmuştur.

Anahtar Sözcükler: alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar, yüksek fırın cürufu, aktivatör, cam suyu, aşınma dayanıklılığı.

1. Giriş

Portland çimentosu üretimi, kullanılan ham maddeler ve üretimi esnasında açığa çıkan gazlar nedeniyle doğal yapıya zarar vermekte ve çevreyi kirletmektedir. Ayrıca, Portland çimentosu esaslı betonların bazı dış etkilere karşı dayanıklılığı yetersiz olabilmektedir. Bazı durumlarda ise, Portland çimentosu kullanımı ekonomik olmamaktadır. Söz konusu teknik, ekonomik ve çevresel problemler, çimento dışı bir

bağlayıcı madde üretimini ilgi çekici hale getirmektedir (Aydın, 2010). Portland çimentosu kullanılmadan bir bağlayıcı üretimine yönelik çalışmalardan en ilgi çekeni, yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül (UK) gibi endüstriyel atıkların alkalilerle aktivasyonudur. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi amorf karakterli malzemeler bir aktivatör vasıtasıyla aktive edilerek bir bağlayıcıya dönüştürülebilmektedir. En fazla kullanılan aktivatörler, sodyum veya potasyum hidroksit (NaOH, KOH) ile sodyum cam suyu ($nSiO_2Na_2O$) veya potasyum cam suyu ($nSiO_2K_2O$) karışımıdır. En uygun aktivatör, hidroksitler ve çözünebilen silika ile üretilmektedir (Pachero-Togal ve diğ., 2008). Alüminosilikat uçucu küllerin aktivatörlerle reaksiyonu sonucunda "geopolimer" adı verilen amorf yapıdaki inorganik polimerler oluşurken, yüksek fırın cürufunun reaksiyonu sonucunda çimento esaslı bağlayıcılardaki C-S-H jeline benzer hidrate kalsiyum silikat oluşmaktadır (Davidovits , 1991).

Alkali aktivasyonu ile üretilen bağlayıcılar, düşük enerji giderleri, düşük kirletici gaz emisyonları (CO_2, SO_2, NOx vb.) ve çevrenin daha az tahribi (doğal kaynaklar yerine atıkların kullanımı ile) gibi avantajlar sunmaktadır (Palomo, 1999). Ayrıca, atık malzemelerin kullanımıyla, atıkların çevreye verdiği zararlar ve depolama problemleri de azalmaktadır. Bu bağlayıcılar, normal Portland çimentoları ve betonlarına göre erken ve daha yüksek dayanım (Bakharev ve diğ., 1999; Fernandez-Jimenez ve diğ., 1999), daha düşük hidratasyon ısısı (Shi ve diğ., 2006), agresif kimyasallara (Bakharev ve diğ., 2002 ve 2003; Komljenovic ve diğ., 2013) ve donma-çözülme etkilerine (Puertas ve diğ., 2003) karşı daha iyi dayanıklılık, daha güçlü agrega-matris aderansı (Shi ve Xie, 1998) gibi birçok önemli teknik avantaja sahiptir. Bununla birlikte, erken priz alma (Zivica, 2007), yüksek oranda büzülme (Pacheco-Torgal ve diğ., 2008; Collins ve Sanjayan , 1999) ve daha yüksek oranda çiçeklenme (Fernandez-Jimenez ve diğ., 1999) gibi bazı sorunlu yönleri mevcuttur. Karbonatlaşma (Xu ve Pu, 1999; Bakharev ve diğ., 2001a) ve alkali-agrega reaksiyonu (Fernandez-Jimenez ve diğ., 2002; Bakharev ve diğ., 2001b) konularında ise literatürde çelişkili sonuçlar sunulmuştur.

Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcıların aşınma etkilerine karşı dayanıklılığı konusunda kısıtlı sayıda araştırma mevcut olup, aktivatör çözeltisinin kompozisyonun etkisi henüz incelenmemiştir. Pu ve diğ. (1989) AA-YFC betonlarının aşınma dayanıklılığının geleneksel PÇ betonuna kıyasla daha iyi olduğunu bildirmiştir. Hu ve diğ. (2008) çimento esaslı tamir malzemesi ile geopolimerik tamir malzemelerini (NaOH ve sodyum silikat karışımı ile aktive edilmiş %100 metakaolin ve %80 metakaolin+%20 YFC) eski betona aderans ve aşınma dayanıklılığını bakımından kıyaslamıştır. Geopolimerik malzemelerin aşınma dayanıklılığının ve eski betona aderansının çimento bazlıya kıyasla daha iyi olduğu görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında, yüksek fırın cürufu (YFC) ağırlığının %2, %4 ve %6'sı oranında Na_2O ve her bir oran için silikat modülü ($M_s=SiO_2/Na_2O$) 0, 0.4, 0.8 ve 1.2 olan aktivatör çözeltileri ile aktive edilerek hazırlanan, standart su kürü ve buhar kürü geçirmiş harç karışımlarının aşınma etkilerine karşı dayanıklılığı araştırılmıştır.

2. Deneysel Çalışma

Kullanılan yüksek fırın cürufunun (YFC) üretici firmalarından temin edilen kimyasal analizleri ve bazı fiziksel özellikleri de Tablo 1'de verilmiştir. YFC, Ereğli demir çelik fabrikasından temin edilmiş olup, 45 μm elekten geçen malzeme miktarı %90'dır. Hidrolik modül [$(CaO+MgO+Al_2O_3)/SiO_2$] değeri 1,39'dur. Baziklik indeksi ise,

[Kb=(CaO+MgO)/(SiO_2+Al_2O_3)] ise 0,91'dir. XRD analizleri cürufun tamamıyla amorf olduğunu, SEM incelemeleri ise köşeli yapıda olduğunu göstermiştir. YFC'nin Blaine özgül yüzey alanı 413 m^2/kg olup, özgül ağırlığı ise 2,88'dir.

Tablo 1. Yüksek fırın cürufu kimyasal analizi (%).

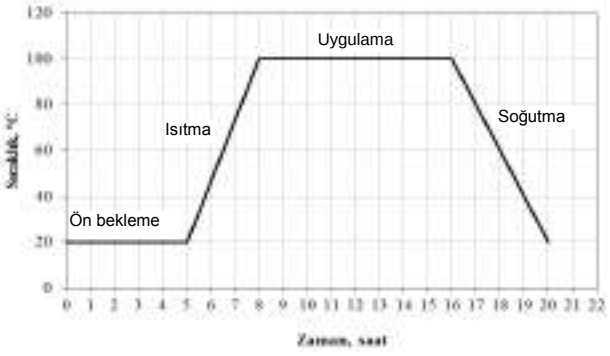
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	TiO_2	Kızdırma kaybı
38,38	9,63	0,96	35,77	8,10	0,99	0,23	0,18	0,23	0,88

Aktivatör olarak cam suyu ve sodyum hidroksit karışımı kullanılmıştır. Kullanılan sodyum hidroksit (NaOH) ve cam suyu Merck firmasınca üretilen ticari ürünlerdir. Sodyum hidroksit %97 saflıkta olup, granül halde temin edilmiştir. Cam suyunun (sıvı sodyum silikat) ortalama kimyasal kompozi syonu %8 Na_2O, %27 SiO_2 ve %65 H_2O'dur.

Alkalilerle aktive edilmiş harçların özelliklerinin kıyaslanması amacıyla Portland çimentosu harçları da üretilmiştir. Denizli Çimento Fabrikasından temin edilen, Blaine inceliği 369 m^2/kg olan CEM I 42.5R tipi çimento kullanılmıştır. Agrega olarak, kuru özgül ağırlığı 2,57, su emmesi %1,43 ve en büyük tane büyüklüğü 4 mm olan kireçtaşı kullanılmıştır.

Harç karışımlarının Agrega/Bağlayıcı oranı 2,75, Su/Bağlayıcı oranı ise 0,40'tır. Aktivatör çözeltisi bağlayıcı ağırlığının %2, %4 ve %6'sı oranında Na_2O içermektedir. Çözeltinin silikat modülü (Ms=SiO_2/Na_2O) ise 0, 0.4, 0.8 ve 1.2'dir.

Harç karışımlarının basınç ve eğilme dayanımı çentikli 40 x 40 x160 mm boyutlu prizmatik numuneler üzerinde, Böhme aşınma dayanıklılığı ise 71 mm ayrıtlı küp numuneler kullanılarak belirlenmiştir. Mekanik özellikler ve aşınma dayanıklılığı standart kür durumunda 28. günde, buhar kürü durumunda ise kür işleminin ardından numune sıcaklığı ortam sıcaklığına düştükten sonra belirlenmiştir. Buhar kürü durumunda, hazırlanan harç karışımları 5 saat ön bekleme süresinin ardından 8 saat süreyle 100 °C sıcaklıkta kür edilmiştir. Uygulanan ısıl işlem çevrimi Şekil 1'de sunul muştur.



Şekil 1. Buhar kürü çevrimi.

Aşınma dayanıklılığı TS 2824 EN 1338 (2005) "Zemin döşemesi için beton kaplama blokları - Gerekli şartlar ve deney metotları" standardına uygun olarak Böhme

aşındırma tablası (Şekil 2) kullanılarak belirlenmiştir. Deneyden önce numuneler 50 °C sıcaklıkta 24 saat süreyle kurutulmuş, numunelerin ağırlıkları ve belirlenen 4 farklı noktadan yükseklikleri ölçülmüştür. Deney cihazına yerleştirilen numuneler üzerine 294 N'luk eksenel yük uygulanmış, aşındırma izine 20 g standart aşındırıcı toz konulduktan sonra 22 devirlik aşındırma turuna maruz bırakılmıştır. Her 22 devirden sonra numune ve tabla yüzeyi temizlenip tekrar standart aşındırıcı toz konulduktan sonra numune 90 derece döndürülüp sıradaki yüzey 22 devirlik aşınma etkisine maruz bırakılmıştır. Böylelikle numune yüzeyi toplamda 352 devirlik aşınma etkisine maruz bırakılmıştır. Deney sonunda numunelerin ağırlık ve yükseklikleri tekrar ölçülmüş, kayıplar belirlenmiştir.



Şekil 2. Böhme aşınma cihazı.

3. Deney Sonuçları ve Tartışma

Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

3.1. İşlenebilirlik

Alkalilerle yüksek fırın cürufunun aktive edilmesiyle üretilen harç karışımlarının yayılma değerleri, Tablo 2'de verilmiştir. Bağlayıcısı Portland çimentosu (PÇ) olan harçlar için yayılma değeri 136 mm'dir. Ms=0 olan karışımlar ve yüksek Na_2O oranında Ms=0.4 olan karışım hariç diğer tüm karışımlar PÇ harçlarına kıyasla daha işlenebilirdir. AAH harçlarında Ms oranının artması ile yayılma değerleri artmıştır. Na_2O oranının artması, Ms=0.4 dışındaki silikat oranları için işlenebilirliği olumlu yönde etkilemiştir.

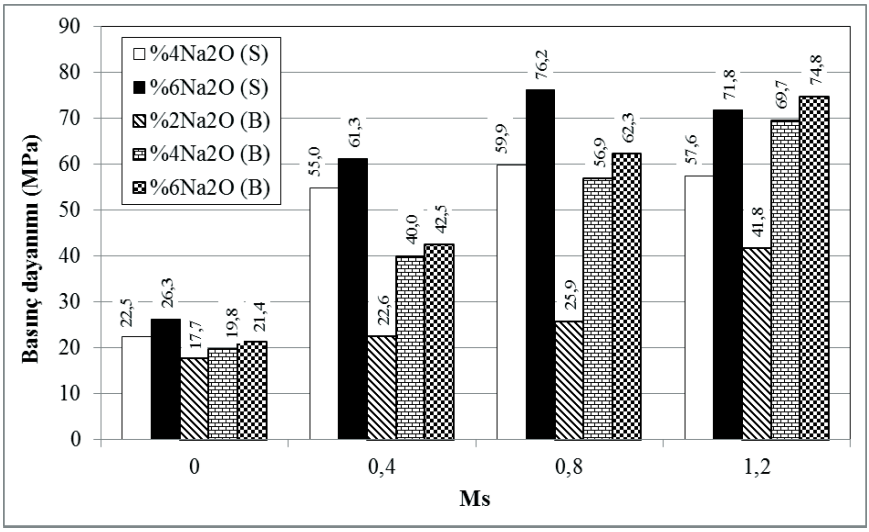
Tablo 2. Harç karışımlarının yayılma çapı (mm).

Na_2O (%)	**Ms**			
	0	**0.4**	**0.8**	**1.2**
2	123	144	152	152
4	125	148	151	155
6	133	128	154	154

3.2. Mekanik Özellikler

Şekil 3'de alkalilerle aktive edilmiş harçların basınç dayanımının değişimi verilmiştir. Bağlayıcısı çimento olan kontrol karışımının basınç dayanımı ise standart su küründe 61.1 MPa, buhar küründe ise 40.2 MPa olarak bulunmuştur.

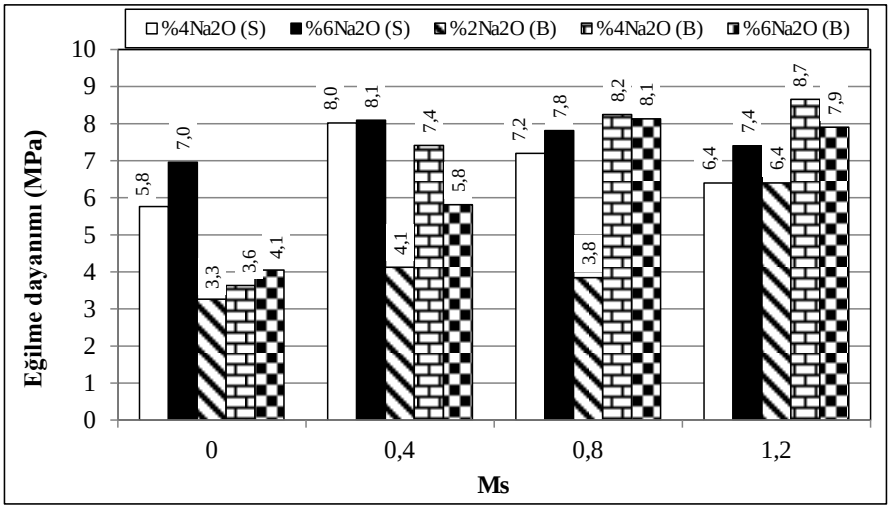
Standart su kürüne tabi tutulan numuneler (S) buhar kürüne tabi tutulan numunelere (B) göre Ms=1.2 hariç daha fazla basınç dayanımı göstermişlerdir. Ayrıca aynı oranda Na_2O içeren karışımlarda Ms oranı arttıkça basınç dayanımı artış göstermektedir. Standart su kürü için Portland çimentolu karışım ve alkalilerle aktive edilmiş YFC karışımlarının basınç dayanımı kıyaslandığında, %6 Na_2O içeren harçlarda Ms=0.4, Ms=0.8 ve Ms=1.2 numuneleri Portland çimentolu kontrol karışımına kıyasla daha yüksek dayanım değerleri vermiştir. Aynı Ms değerleri için %4 Na_2O oranında ise PÇ harçlarına oldukça yakın değerler elde edilmiştir. Buhar kürü için çimentolu karışımla, AAH karışımları kıyaslandığında hem %4 hem de %6 Na_2O içeren karışımlarda Ms=0.4, Ms=0.8 ve Ms=1.2 karışımlarında çimentolu karışımdan daha yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir. Ayrıca %2 Na_2O içeren Ms=1.2 karışımı çimentolu karışımdan daha yüksek dayanım değeri vermiştir.



Şekil 3. Basınç dayanımının Na_2O oranına ve Ms değerine bağlı olarak değişimi.

Şekil 4'de alkalilerle aktive edilmiş harçların eğilme dayanımının değişimi verilmiştir. Düşük Ms oranlarında (Ms=0 ve 0.4) standart su kürü geçiren AAH'lar buhar küründen daha yüksek eğilme dayanımı gösterirken, yüksek Ms oranlarında buhar kürü için daha yüksek değerler elde edilmiştir. Standart su küründe Na_2O oranının artmasıyla eğilme dayanımı artarken, buhar küründe Ms=0 için %6 Na_2O oranında, diğer Ms değerlerinde ise %4 Na_2O oranında en yüksek eğilme değerleri elde edilmiştir. Burada verilen eğilme dayanımı değerleri, çentikli numuneler üzerinde elde edilmiş değerlerdir. Aydın (2010) tarafından daha önce yapılan çalışmalarda aynı özellikteki aktivatör çözeltisi kullanılarak yapılan deneylerde bulunan eğilme dayanımlarına kıyasla, çentikli numunelerden yaklaşık %30 daha düşük eğilme dayanımı elde edilmiştir. Bu durum,

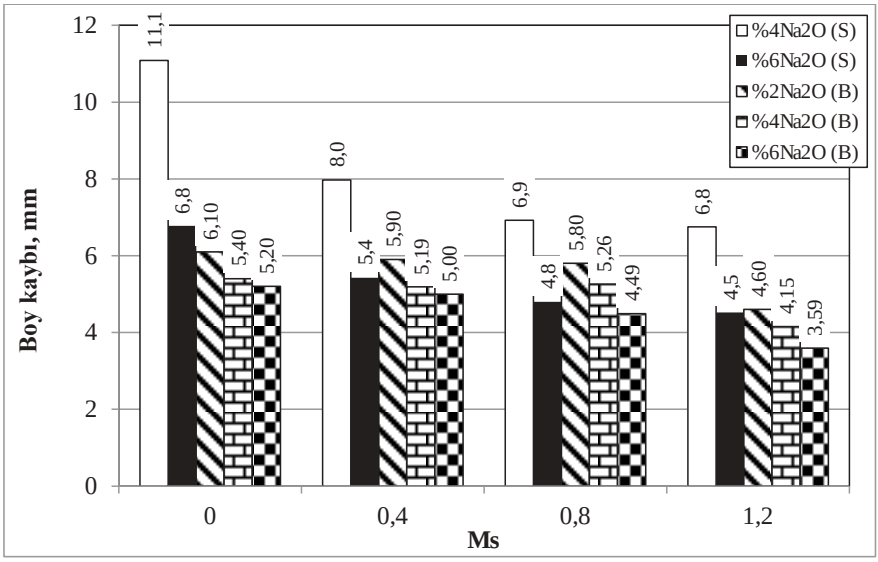
çentik açılması nedeniyle çatlak başlamasının kolaylaşması ve kontrollü olarak tek noktadan ilerlemesin in beklenen bir sonucudur. Öte yandan, genel eğilim oldukça benzerdir. Bağlayıcısı Portland çimentosu olan kontrol karışımının eğilme dayanımı ise standart su küründe 8.5 MPa, buhar küründe ise 6.0 MPa olarak bulunmuştur. Standart su küründe AAH'ın eğilme dayanımı PÇ bağlayıcılı kontrol karışımına kıyasla daha düşük düzeyde iken, buhar küründe Ms=0 haricindeki birçok karışım kontrol karışımından daha yüksek dayanım vermiştir.



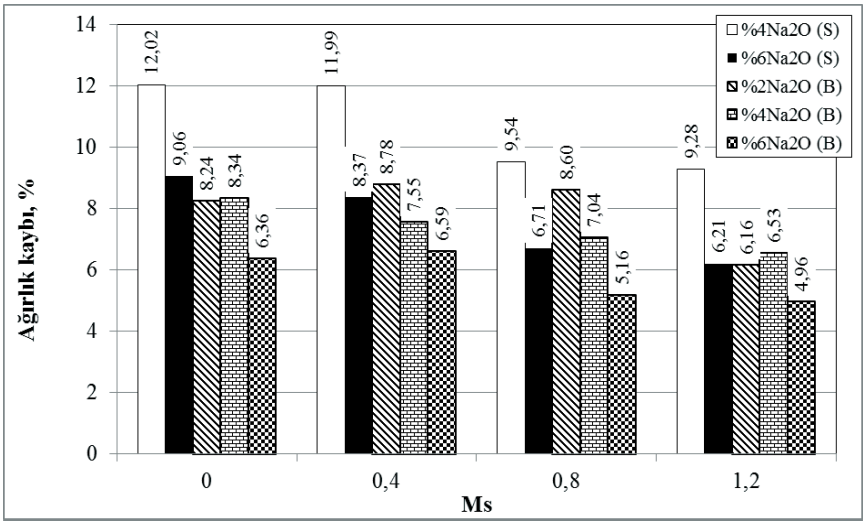
Şekil 4. Eğilme dayanımının Na_2O oranına ve Ms değerine bağlı olarak değişimi.

3.3. Aşınma dayanıklılığı

Alkalilerle aktive edilmiş harçların aşınma deneyinden elde edilen boy ve ağırlık kayıpları sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. Bağlayıcısı çimento olan buhar kürü geçirmiş kontrol karışımının aşınma deneyinde ortalama boy kaybı 4.0 mm, ağırlık kaybı ise %5.65 olarak bulunmuştur. Standart su küründe ise bu değerler sırasıyla 2.8 mm ve %5.25'tir. Buhar kürü geçirmiş Portland çimentolu karışımların aşınma dayanıklılığının standart su kürüne maruz kalmış örneklere kıyasla daha kötü olmasının sebebi hızlı başlangıç hidratasyonundan dolayı hamurdaki hidratasyon ürünlerinin üniform dağılımının daha az olmasının bir sonucudur. Bu durum, özellikle çapı 0.01 µm'den daha büyük kapiler boşlukların dağılımında değişiklikler yaratır. Bu değişiklik bir miktar daha yüksek porozite ile sonuçlanır (Mindess ve Young, 1981).



Şekil 5. Aşınma deneyi boy kaybı.

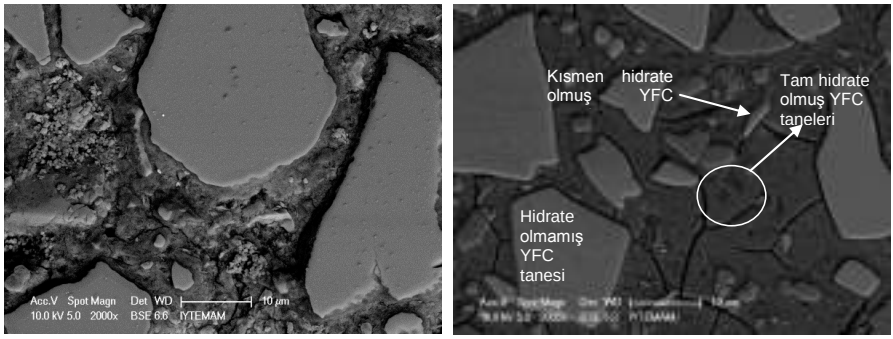


Şekil 6. Aşınma deneyi ağırlık kaybı.

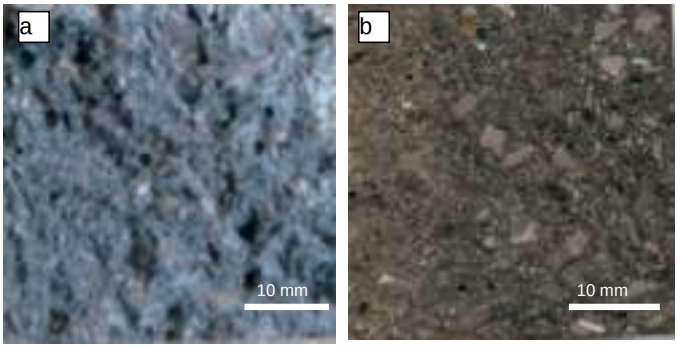
Aşınma deneyleri, Ms oranı arttıkça boy ve ağırlık kaybında azalmalar olduğunu göstermiştir. Buhar kürüne tabi tutulan AA harçlar standart su kürüne göre daha az aşınmış ve daha az ağırlık kaybetmiştir.

Portland Çimentolu karışımlarla, alkalilerle aktive edilmiş YFC karışımları aşınma bakımından kıyaslanacak olursa % 6 Na_2O (Ms = 1.2) karışımı PÇ harçlarından daha az aşınmıştır. Ayrıca %2 ve %4 Na_2O içeren Ms = 1.2 olan buhar kürü numuneleri ve % 6 Na_2O içeren Ms = 0.8 olan buhar kürü numunesi de çimentolu karışıma yakın aşınma

dayanıklılığı göstermiştir. Diğer karışımlar ise, PÇ harçlarına kıyasla daha kötü performans sergilemiştir. Ms oranının artması ile aşınma dayanıklılığının artması, matris fazının dayanımının Ms oranının artması ile gelişmesinin yanı sıra, agrega ve matris arasındaki aderansın artmasına da bağlıdır. M_s değerinin artmasıyla oluşan dayanım artışı, YFC tanelerinin hidrate olan kısımlarının artması ile daha fazla bağlayıcı oluşumuna ve matrisin Ca/Si oranın azalması ile bağlayıcılık özelliğinin artmasına bağlanmıştır (Aydın, 2010). Şekil 7'de verilen SEM (BSE) görüntülerinden silikat modülünün artması ile YFC tanelerinin hidrate olan kısımlarındaki artış açıkça görülmektedir. Şekil 8'de ise, eğilme deneyi sonrasında oluşan kırılma yüzeyleri görülmektedir. Silikat modülü yükseldikçe kırılma yüzeyinin düzgünleşmesinin daha iyi agrega-matris ara yüzeyinin bir sonucudur.



Şekil 7. %6 Na_2O içeren AAH'ın SEM (BSE) fotoğrafları a) Ms=0 b) Ms=0.4.



Şekil 8. %6 Na_2O içeren AAH'ın eğilme deneyi sonrası kırılan parçaların yüzey fotoğrafları a) Ms=0 b) Ms=1.2.

4.Sonuçlar

Deneysel çalışma sonuçları, uygun bir aktivatör çözeltisi kullanıldığında gerek mekanik özellikler gerekse aşınma dayanıklılığı bakımından klasik Portland çimentosu harçlarına kıyasla daha üstün performans a sahip olan harçların üretilebileceğini göstermiştir.

Bağlayıcısı yüksek fırın cürufu olan alkalilerle aktive edilmiş harçların mekanik özellikleri ve aşınma dayanıklılığı üzerinde kür yönteminin ve aktivatör özelliklerinin (Na_2O oranının ve silikat modülünün) önemli oranda etkili olduğu görülmüştür. Buhar kürü geçirmiş alkalilerle aktive edilmiş harçların aşınma dayanıklılığı standart su kürü uygulananlara kıyasla daha yüksek olarak bulunmuştur. Alkalilerle aktive edilmiş harçlarda en iyi aşınma dayanıklılığı aktivatör olarak %6 Na_2O içeren silikat modülü 1.2 olan karışımlara buhar kürü uygulanması durumunda elde edilmiştir. Bu karışımın mekanik özellikleri ve aşınma dayanıklığı bağlayıcısı Portland çimentosu olan karışımdan daha yüksektir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenmiş olup (Proje no: 112M262) yazarlar sağladığı destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunar.

Kaynaklar

Aydın, S. (2010) Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Bağlayıcılı Lifli Kompozit Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Bakharev, T., Sanjayan, J.G. and Cheng, Y.B. (1999) Alkali Activation of Australian Slag Cements, Cement and Concrete Research , No. 29, pp. 113- 120.

Bakharev , T., Sanjayan , J.G. and Cheng , Y.B. (2001a) Resistance of alkali -activated slag concrete to carbonation. Cement and Concrete Research , No. 31, pp. 1277 –1283.

Bakharev , T., Sanjayan , J.G. and Cheng , Y.B. (2001b) Resistance of alkali -activated slag concrete to alkali -aggregate reaction. Cement and Concrete Research , No. 31, pp. 331–334.

Bakharev, T. , Sanjayan, J. G. and Cheng, Y. B. (2002) Sulfate Attack on Alkali - Activated Slag Concrete, Cement and Concrete Research , No.32, pp. 211- 216.

Bakharev, T. , Sanjayan, J.G. and Cheng, Y. B. (2003) Resistance of Alkali -Activated Slag Concrete to Acid Attack , Cement and Concrete Research , No. 33, pp. 1607-1611.

Collins , F.G. and Sanjayan , J.G. (1999) Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete. Cement and Concrete Research , No. 29, pp. 455–458.

Davidovits, J. (1991) Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials , J. Therm. Anal. , No. 37, pp. 1633 -1656.

Fernandez -Jimenez, A., Palomo, J .G. and Puertas, F. (1999) Alkali -Activated Slag Mortars -Mechanical Strength Behavior, Cement and Concrete Research , No. 29, pp. 1313-1321.

Fernandez -Jimenez A. and Puertas F. (2002) The alkali –silica reaction in alkali - activated granulated slag mortars with re active aggregate. Cement and Concrete Research , No. 32, pp. 1019–1024.

Hu, S., Wang, H., Zhang, G. and Ding, Q. (2008) Bonding and abrasion resistance of geopolymeric repair material made with steel slag, Cement and Concrete Composites, Vol. 30, No. 3, pp. 239–244.

Komljenovic, M., Bašcarevic, Z., Marjanovic, N. and Nikolic, V. (2013) External sulfate attack on alkali-activated slag, Construction and Building Materials, Vol. 49, pp.31–39.

Mindess S. and Young J.F. (1981) Concrete. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.

Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. and Jalali, S. (2008) Alkali-Activated Binders: A review. Part 2. About Materials and Binders Manufacture, Construction and Building Materials, No. 22, pp. 1315-1322.

Palomo, A., Grutzeck, M. W. and Blanco, M. T. (1999) Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future, Cement and Concrete Composites, No. 29, pp. 1323-1329.

Pu, X., Gan, C., Wu, L., and Chen, J. (1989) Properties of alkali-slag (JK) concrete. Bulletin of Chinese Ceramic Society (in Chinese), Vol. 1, pp. 5–11.

Puertas, F., Amat, T., Fernandez-Jimenez, A. and Vazquez, T. (2003) Mechanical and Durable Behaviour of Alkalin Cement Mortars Reinforced with Polypropylene Fibres, Cement and Concrete Research, No. 33, pp. 2031-2036.

Shi, C., Krivenko, P.V. and Roy, D. (2006) Alkali-Activated Cements and Concretes, USA and Canada:Taylor and Francis.

Shi, C. and Xie, P. (1998) Interface between Cement Paste and Quartz Sand in Alkali-Activated Slag Mortars, Cement and Concrete Research, No. 28, pp. 887-896.

Türk Standartları Enstitüsü (2005) TS 2824 EN 1338: Zemin döşemesi için beton kaplama blokları - Gerekli şartlar ve deney metotları, Ankara.

Xu B and Pu X. (1999) Study on solid alkaline AAS cement. In: Krivenko, editor. Second international conference on alkaline cements and concretes, Kiev, Ukraine, . pp. 58–63.

Zivica V. (2007) Effects of type and dosage of alkalin activator and temperature on the properties of alkali-activated slag mixtures. Construction and Building Materials, No. 21, pp. 1463–1469.

Alkali ile Aktive Edilmiş Silis Dumanlı ve Zeolitli Harçların Özellikleri

Niyazi Uğur KOÇKAL[1], Cem OĞUZ[2]
[1] Akdeniz Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 07058, Antalya
[2] Akdeniz Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, 07058, Antalya

ÖZ

Çevresel koruma ve enerji tasarrufu konularına olan alakanın son zamanlarda giderek artması geleneksel yapı malzemelerine alternatif malzemelerin araştırılmasına sebep olmuştur. Bu araştırmaların amaçları arasında öncelikli olarak malzeme üretimi için gereken enerjiyi düşürmek ve sera gazı salımlarını azaltmak gelmektedir. Bu çalışmada, farklı oranlarda silisyum metalinin veya ferrosilisyum alaşımlarının üretimi sırasında elde edilen yan ürün silis dumanı ve doğal zeolitin, yine farklı molarite değerlerine sahip sodyum hidroksit çözeltileri ile aktive edilmeleri suretiyle Portland çimentosu kullanılmadan harçlar üretilmiştir. Tüm harçlarda kalker kökenli kırma kum kullanılmıştır. Harçları oluşturan bileşenler üzerinde fiziksel ve kimyasal deney ve analizlerin yanında, taze halde harç numuneler üzerinde kıvam tayini, sertleşmiş halde harç numuneler üzerinde de birim hacim ağırlık, görünür boşluk oranı, su emme oranı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Bununla birlikte, numuneler üzerinde bazı mikro-yapı analizleri de gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, molarite ve silis dumanı oranının artması su emme ve görünür boşluk miktarını azaltırken, dayanımlarda da artış gözlemlenmiştir.

Anahtar sözcükler: Alkali aktivasyon, silis dumanı, doğal zeolit, harç

Giriş

Çimento endüstrisi, sürekli CO_2 emisyonu ve fabrikasyon sürecine eşlik eden hammadde (kireçtaşı ve kil gibi) ocakları nedeniyle çevreye dost bir sektör olarak görülmemektedir (Sayed and Zeedan, 2012) . Avrupa Çimento Birliği çimento üretiminin 2008 yılında dünya genelinde 2.83 milyar tonluk CO_2 emisyonundan (toplam emisyonun kabaca %2.3' ü) sorumlu olduğunu rapor etmiştir (Rashad and Khalil, 2013) . Aynı zamanda, üretim esnasında enerji sarfiyatı da söz konusudur. Dünyanın farklı yerlerinde çoğu araştırmacı, çimento kaynaklı bu ciddi konular üzerinde çözümler bulmak için çalışmaktadır (Sayed and Zeedan, 2012) . Bulunan çözümlerden biri de, inorganik alumina -silikat polimerin geliştirilmesiyle polimerik çimento üretmektir. Endüstriyel yan ürünlerin alkalin bir sıvıyla reaksiyonu sonucunda bir bağlayıcı elde edilebilmektedir.

Son yıllarda, alkali aktiveli curuflar, yüksek dayanım, düşük ısı çıkışı, düşük porozite, hidratların düşük çözülürlüğü, kimyasal saldırılara direnç gibi üstün özelliklerinin yanında enerji tasarrufu ve düşük maliyetleri yüzünden çoğu ülkede geliştirilmektedir (Živica, 2006). Sonraları, curufun yanısıra, başka doğal ve/veya endüstriyel yan ürünler

de alkali ile aktive edilmeye başlanmıştır. Lee ve diğ. (2014), alkali aktiveli uçucu kül/curuf hamurunun büzülme üzerine etkilerini incelemişler ve alkali aktiveli hamurların, normal Portland çimentolu hamurdan daha fazla kuruma büzülmesi sergilediklerini tespit etmişlerdir. Yusuf ve diğ. (2014), çelik curufu ve aktivatör oranının, alkali aktiveli öğütülmüş çelik cürufu (UÇC) /ultra-ince palmiye yağı yakıt külü (UPYYK) hamur ve harçlarının büzülmelerine etkilerini değerlendirmiş ve % 20 UPYYK -UÇC yerdeğişimi ile maksimum basınç dayanımı elde edilmiş ise de, harca % 40' a kadar UÇC eklenmesi dayanım ve büzülme performansını optimize etmiştir. Farid (2014), alkali aktiveli geri dönüşümlü tuğlalar, camsuyu ve ticari kostik soda tozu kullanarak ürettiği aluminasilikat harçların priz zamanı ve dayanım gelişiminin NaOH-mevcut serbest silik a oranına bağlı olduğunu belirlemiştir. Jo ve diğ. (2012), doğal zeolit ve alkali ativatör (NaOH) ile hazırlanan harçların basınç dayanımlarının alkali aktivatör, agraga ve karışım auyu miktarına göre değiştiğini belirtmişlerdir. Torgal ve diğ. (2011), alkali aktiveli metakaolin bazlı harçların işlenebilirliğinin, sodyum hidroksit konsantrasyonu artışı ve metakaolinin yüksek miktarda kalsiyum hidroksitle yerdeğişimi ile azaldığını saptamışlardır. Aydın ve Baradan (2013), çelik lif donatılı aktive edilmiş curuf/silis dumanı harçlarının davranışlarını araştırmış ve alkali aktiveli harçların mekanik performansının portland çimentolu kontrol harcına kıyasla çok daha üstün olduğunu tayin etmişlerdir. Tashima ve diğ. (2013), petrol rafinelerinin yan ürünü olan katalizör tortusunu alkali aktiveli harçlarda kullanmış ve H_2O/katalizör tortusu oranındaki azalışın basınç dayanımındaki artışa sebep olduğunu beyan etmişlerdir.

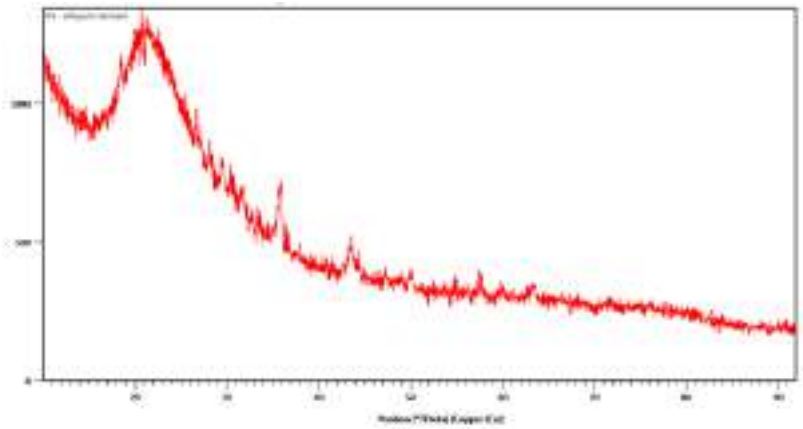
Bu çalışmada, silis dumanı ve/veya doğal zeolit farklı molaritelerde sodyum hidroksit çözeltileriyle aktive edilmeleri ile elde edilen harçlarda kıvam, birim hacim ağırlık, görünür boşluk oranı, su emme oranı ve basınç dayanımlarının tespiti gerçekleştirilmiş ve bu özelliklerin değişimlerinin sebepleri mikro yapı çalışmalarıyla araştırılmıştır.

Malzeme ve Yöntem

Deney ve analizlerde kullanılacak numunelerin bileşenleri

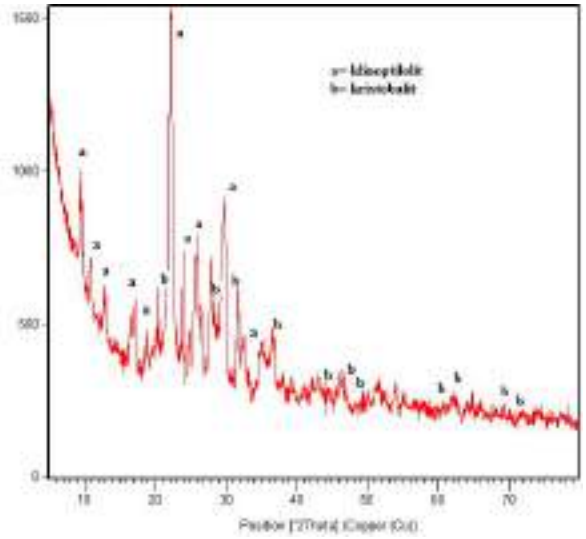
Silis dumanı: Silis dumanı, silisyum metali veya ferrosilisyum alaşımlarının ergime yöntemi ile üretimi sırasında elde edilen, temel bileşeni küresel, amorf SiO_2 partiküllerinden oluşan, yüksek düzeyde puzolanik aktiviteye sahip çok ince taneli bir yan üründür. Bu malzeme, Antalya' da faaliyet gösteren Etibank Elektrometalurji İşletmesi' nden temin edilmiştir. Özgül ağırlığı 2.2 gr/cm³ ve özgül yüzey alanı (BET) 31.410 m^2/gr' dır. Silis dumanının amorf yapıya sahip olduğu Şekil 1' de X-ışın difraktogramından anlaşılmaktadır.

Doğal zeolit: Bu malzeme, kristal yapıya sahip alümino-silikatlar olup, kompozisyon olarak kil minerallerine benzemekte ancak üç boyutlu nano ve mikro gözenekli yapılarıyla kil minerallerinden ayrılmaktadır. Volkanik faaliyetler esnasında ortaya çıkan lav ve küllerin göl, deniz veya yer altı sularıyla buluşarak kimyasal reaksiyon sonucu oluşmuşlardır.



Şekil 1 Silis dumanının X-ışın difraktogramı.

Çalışmada kullanılan doğal zeolitin özgül ağırlığı 2.1 gr/cm³ ve BET özgül yüzey alanı 34.872 m^2/gr olup, çoğunluğunu klinoptilolit kristalinin oluşturduğu mineralojik yapısı Şekil 2' de X-ışın difraktogramında gösterilmiştir.



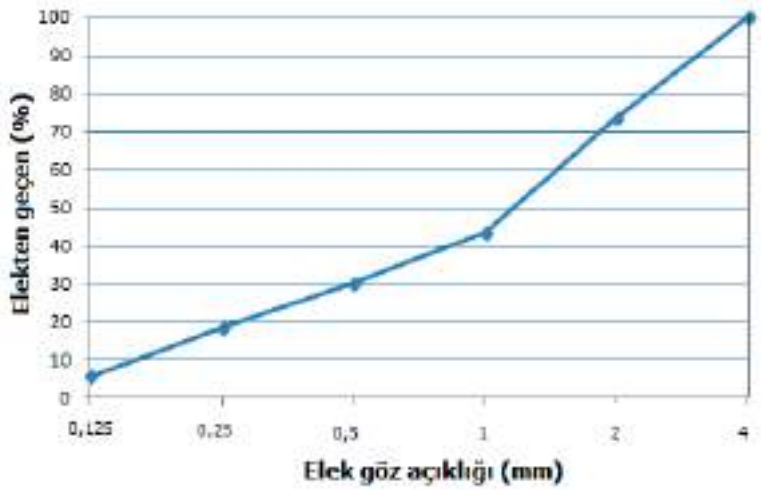
Şekil 2 Doğal zeolitin X-ışın difraktogramı.

Harç üretiminde kullanılan silis dumanı ve zeolitin kimyasal kompozisyonları Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1 Harçtaki bağlayıcıların kimyasal kompozisyonu (%).

Oksit	SiO_2	Al_2O3	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	CaO	Fe_2O_3	ZnO	Cr_2O_3
Silis dumanı	89.11	1.00	2.74	1.18	0.80	0.45	1.11	0.45	0.52	2.31
Zeolit	73.29	15.50	1.24	<0.11	2.40	0.01	4.82	1.93	-	-

Agrega: Numune üretiminde ince agrega kalker kökenli kırma kum kullanılmıştır. Özgül ağırlığı 2.71, su emme oranı % 1.9 ve incelik modülü 2.3' tür. Agrega tane boyut dağılım grafiği Şekil 3' te verilmiştir.



Şekil 3 İnce agreganın tane boyut dağılımı.

Alkali aktivatör: Alkali aktivasyonu için beyaz renkte nem çekici (higroskopik) katı pelet halinde % 97 saflıkta sodyum hidroksit, belli miktarlarda su ile karıştırılmış, çözelti halinde karışımlara ilave edilmiştir. Alkali aktivasyonunda kullanılan suyun kritik özelliği sadece işlenebilirliği sağlaması ve nihai geopolimer yapının bir parçası olmamasıdır (Davidovits , 2008; Lloyd and Rangan, 2009) . Başka bir ifadeyle, su kimyasal reaksiyon da yer almamakta, kürleme ve kuruma esnasında bünyeyi terk etmektedir. Bununla birlikte, Al Bakri ve diğ. (2011), işlenebilirliği arttırmak için süper akışkanlaştırıcı veya ilave suyun karışıma eklenebileceğini, ancak süper akışkanlaştırıcının geopolimerin dayanımı üzerinde ters bir etkisi olduğunu, öyle ki ilave suyun süper akışkanlaştırıcı eklenmesinden daha yüksek dayanımlar verdiğini belirtmişlerdir.

Harç numunelerin hazırlanması ve üzerilerinde yapılan çalışmalar

Alkali aktivatör olarak kullanılan sodyum hidroksit çözeltisi 6, 8 ve 10 molarlık olmak üzere üç farklı molaritede hazırlanmıştır. Silis dumanı-zeolit oranları 100/0, 80/20, 60/40 ve 40/60 olacak şekilde dört değişik bağlayıcı kompozisyonu seçilmiştir. Ağırlıkça çözelti:bağlayıcı:ince agrega oranı, sırasıyla 0.8:1:2.5 olacak şekilde, karışıma girecek bileşen miktarları belirlenmiştir. Bileşenler uygun sıra ile nizami bir şekilde mikserde önce düşük devirde sonra yüksek devirde belirli bir süre karıştırılmış, akma tablasında yayılma çapları ölçülerek kıvamları tayin edildikten sonra 40*40*160 mm ebatlarında prizma kalıplara yerleştirilmişlerdir. Sonrasında, fırına konan numuneler 60 ^{o}C' de 24 saat boyunca bekletilip, dışarı alınmış, kalıplardan çıkartılan numuneler deney zamanları olan 1, 7 ve 28 güne kadar laboratuar ortamında 24 ^{o}C sıcaklık ve % 60 bağıl nemde muh afaza edilmişlerdir. Sertleşmiş numuneler üzerinde birim hacim ağırlık, görünür boşluk oranı, su emme oranı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmış ve ayrıca, SEM-EDX ve XRD analizleri de gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin kodlamasındaki sayılar sırasıyla, alkali çözeltisinin molaritesini, ağırlıkça silis dumanı ve doğal zeolit yüzdelerini belirtmektedir.

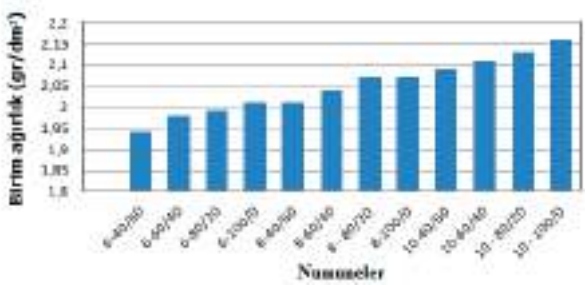
Bulgular veTartışma

Taze halde gerçekleştirilen kıvam tespit deneyleri neticesinde, aktive edilmiş harçların yayılma çaplarının 10.6 cm ile 14.4 cm aralığında olduğu belirlenmiş ve yayılma çap değerlerinin çözelti molaritesi artışı ile önce arttığı sonra azaldığı ve zeolit miktarının azalmasıyla yükseldiği görülmüştür. Bahadure ve Naik (2013) çalışmalarında alkali aktivatör molaritesinin artmasıyla çökmenin arttığını söylerken, Nuruddin ve diğ. (2011) çözelti molaritesi artışının işlenebilirliği düşürdüğünü belirtmişlerdir. Tablo 2' de numunelerin yayılma çapları verilmektedir.

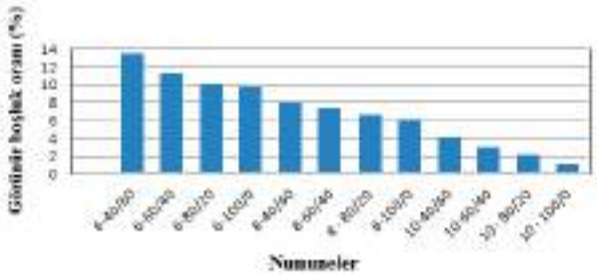
Tablo 2 Taze harç numunelerin yayılma çapı değerleri.

Numune	6-100/0	6-80/20	6-60/40	6-40/60	8-100/0	8-80/20	8-60/40	8-40/60	10-100/0	10-80/20	10-60/40	10-40/60
Yayılma çapı (cm)	13.3	12.9	12.8	12.4	14.4	13.8	13.8	13.6	12.1	12.0	11.8	10.6

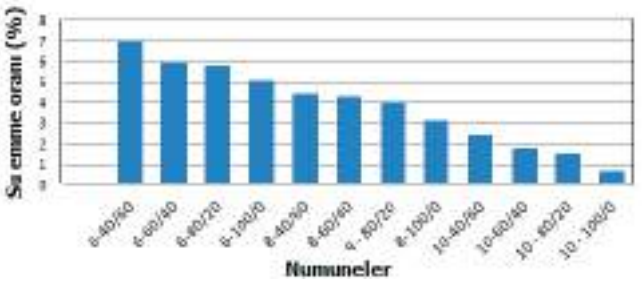
Şekil 4-6 harçların sırasıyla, birim ağırlık, görünür boşluk oranı ve su emme oranı değerlerini vermektedir. Birim ağırlıklar 1.94 ile 2.16 gr/dm^3 arasında değişmekte olup, molarite ve silis dumanı artışıyla yükselmektedir. Bunun yanında, su emme ve görünür boşluk oranları molarite ve silis dumanı yüzdesi artışları ile düşmektedir.



Şekil 4 Harçların birim ağırlık değerleri.

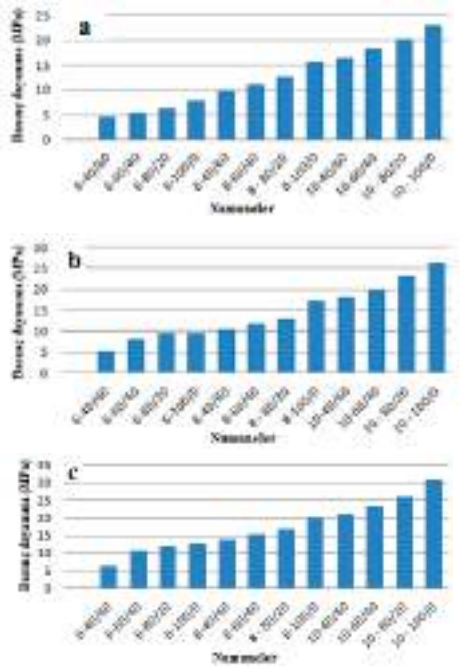


Şekil 5 Harçların görünür boşluk oranı değerleri.



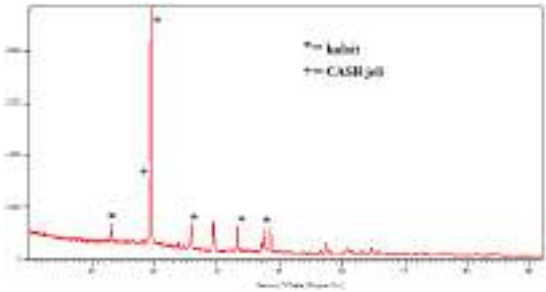
Şekil 6 Harçların su emme oranı değerleri.

Harçların 1, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri Şekil 7' de gösterilmektedir. Alkali aktivatör olan sodyum hidroksit çözeltisinin molaritesi ve bağlayıcı olarak silis dumanı miktarı arttıkça üretilen harçların basınç dayanımları da artmıştır. Bununla birlikte, 6 molar çözeltili, % 40 silis dumanı, % 60 doğal zeolit bağlayıcılı numune 28. günde 6.4 MPa değerle en düşük dayanıma sahipken, 10 molar çözelti ve % 100 silis dumanı içeren harç numune 30.8 MPa ile en yüksek dayanımı göstermiştir.



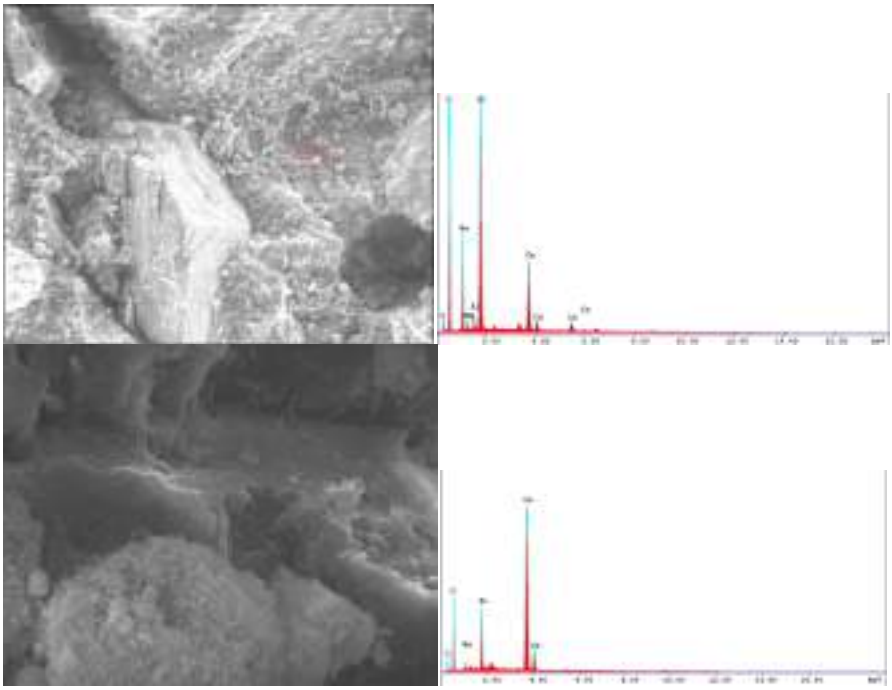
Şekil 7 Harçların a) 1 günlük, b) 7 günlük c) 28 günlük basınç dayanımı değerleri.

Harç numuneler üzerinde yapılan X-ışını difraksiyonu analiz sonucunda, kalsiyum karbonat ve kalsiyum silikat hidrat jelinin varlığı saptanmıştır (Şekil 8). Ayrıca, Puertas ve diğ. (2006), $2\theta = 29.18^{o}$ civarında düşük yoğunlukta bir sinyalin mevcudiyetinin CSH jelinin varlığına işaret etse de, yarı kristal yapıya sahip olmasından dolayı, oluşan bu jeli X- ışını difraksiyonu ile tanımlayabilmenin zorluğundan bahsetmişlerdir.



Şekil 8 10-60/40 numunesinin X -ışın difraktogramı.

Taramalı elektron mikroskobu yardımıyla elde edilen görüntüler neticesinde, molarite ve silis dumanının numunelerde arttırılmış olması, matrisin daha yoğun olmasını sağlamış, zeolit miktarı ile molaritenin düşmesi ise daha granüler bir bünyenin oluşumuna neden olmuştur.



Şekil 9 10-80/20 numune (altta), 10-60/40 numune (üstte) SEM-EDS görüntüleri.

Bunlara ilave olarak, Şekil 9' da yer alan görüntüler üzerinde bazı noktalardan enerji saçılımlı spektrometresi ile yapılan incelemede, 10-80/20 numunesinin kimyasal kompozisyonunun çoğunlukla Ca, Si ve Na' dan oluştuğu görülmüştür. Benzer şekilde, 10-60/40 numunesinin kimyasal kompozisyonunda ise Si, Na ve Ca' un yanı sıra düşük miktarda Mg ve Al bulunduğu saptanmıştır.

Sonuç

Yakın zamanda sürdürülebilirlik algısının daha da artması ile çevreye ve dolayısıyla canlı sağlığına zarar veren faaliyetlere alternatif çözümler getirilmeye çalışılmaktadır. Bu sebeple, dünya inşaat sektöründe en fazla kullanılan malzemelerden biri olan çimentonun hammadde temini ve üretimi sırasında ortaya çıkan zararı azaltmak amacıyla da arayışlar sürmektedir. Bunlardan biri de, doğal ve/veya endüstriyel yan ürünlerin alkalilerle aktive edilmek suretiyle çimento kullanılmadan beton ve harçların üretilmesidir.

Bu deneysel çalışmada, doğal bir malzeme olan zeolit ile endüstriyel bir atık olan silis dumanı değişen miktarlarda farklı molaritelerdeki sodyum hidroksitle aktive edilerek $60^{o}C$' de 24 saat kürlenmiştir. Deney ve analizler, çalışmada üretilen harçların yapı sektöründe farklı ihtiyaç alanlarında kullanılabilir olduğunu göstermekle birlikte, ileride bu konuyla ilgili yapılacak çalışmalarda, uçucu kül, curuf vb. bağlayıcıların camsuyu, sodyum hidroksit, potasyum hidroksit gibi alkalilerle aktivasyonu sonrası farklı sıcaklık ve koşullar altında değişik bekleme sürelerinde üretilecek numunelerin büzülme ve durabilite gibi özelliklerinin de tayininin maliyetler de gözetilerek yapılmasının gerekliliği söz konusudur.

Kaynaklar

Al Bakri, M.M., H. Mohammed, H. Kamarudin, I. Khairul Niza and Y. Zarina (2011) Review on fly ash-based geopolymer concrete without Portland Cement. Journal of Engineering and Technology Research, Vol. 3, No. 1, pp. 1-4.

Aydın, S. and B. Baradan (2013) The effect of fiber properties on high performance alkali-activated slag/silica fume mortars. Composites: Part B, Vol. 45, No. 1, pp. 63-69.

Bahadure, B.M. and N.S. Naik (2013) Effect of Alkaline Activator on Workability and Compressive Strength of Cement Concrete with RHA. International Journal of Computational Engineering Research, Vol. 03, No. 5, pp. 15-20.

Davidovits, J. (2008) Geopolymer Chemistry and Applications. Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France.

Farid, S.B.H. (2014) Practicable activated aluminosilicates mortar. Ceramics International, Vol. 40, No. 9, pp. 15027-15032.

Jo, B.W., J.S. Choi, K.W. Yoon and J.H. Park (2012) Material characteristics of zeolite cement mortar. Construction and Building Materials, Vol. 36, pp. 1059-1065.

Lee, N.K., J.G. Jang and H.K. Lee (2014) Shrinkage characteristics of alkali-activated fly ash/slag paste and mortar at early ages. Cement & Concrete Composites, Vol. 53, pp. 239-248.

Lloyd, N. and V. Rangan (2009) Geopolymer Concrete-Sustainable Cementless Concrete. ACI Special Publication SP-261, 10th ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues, pp. 33-53.

Nuruddin, M.F., S. Demie, M. Fareed Ahmed and N. Shafiq (2011) Effect of Superplasticizer and NaOH Molarity on Workability, Compressive Strength and Microstructure Properties of Self -Compacting Geopolymer Concrete. World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 5, No. 3, pp. 1308 -1315.

Puertas, F., M. Palacios and T. Vázquez (2006) Carbonation process of alkali-activated slag mortars. Journal of Materials Science , Vol. 41, No. 10, pp. 3071 -3082.

Rashad, A.M. and M.H. Khalil (2013) A preliminary study of alkali -activated slag blended with silica fume under the effect of thermal loads and thermal shock cycles. Construction and Building Materials, Vol. 40, pp. 522 -532.

Sayed, M. and S.R. Zeedan (2012) Green binding material using alkali activated blast furnace slag with silica fume. HBRC Journal, Vol. 8, No. 3, pp. 177 -184.

Tashima, M.M., J.L. Akasaki, J.L.P. Melges, L. Soriano, J. Monz ó, J. Pay á and M.V. Borrachero (20 13) Alkali activated materials based on fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC): Influence of SiO_2/Na_2O and H_2O/FCC ratio on mechanical strength and microstructure. Fuel, Vol. 108, pp. 833 -839.

Torgal, F.P., D. Moura, Y. Ding and S. Jalali (2011) Composition, strength and workability of alkali -activated metakaolin based mortars. Construction and Building Materials, Vol. 25, No. 9, pp. 3732 -3745.

Yusuf, M.O., M.A. Megat Johari, Z.A. Ahmad and M. Maslehuddin (2014) Shrinkage and strength of alkaline activated ground steel slag/ultrafine palm oil fuel ash pastes and mortars. Materials and Design , Vol. 63, pp. 710 -718.

Živica, V. (2006) Effectiveness of new silica fume alkali activator. Cement & Con crete Composites , Vol. 28, No. 1, pp. 21 -25.

Transmikser Yıkama Suyunun Beton Üretimine Geri Kazanımı

M. Hulusi Özkul, Ü. Anıl Doğan
İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi
E-Posta: hozkul@itu.edu.tr , doganunal@itu.edu.tr

Öz

Hazır beton üretiminin her geçen gün artmasıyla birlikte tesise geri dönen transmikserlerin yıkanmasında kullanılan su miktarı da artmaktadır. Dünyanın pek çok bölgesinde yüksek alkalin özelliği nedeniyle beton yıkama suyu tehlikeli atık kategorisinde görülmektedir. Ülkemizde birçok hazır beton tesisinde yıkama suları çökeltme havuzlarına boşaltılmaktadır. Iri tanelerinden arındırılmış yıkama suyunun beton üretimine geri kazanımı hem çevresel hem de ekonomik nedenlerle giderek daha önemli bir konu haline gelmektedir.

Bu çalışmada bir hazır beton tesisinin çökeltme havuzundan alınan yıkama suyunun beton üretiminde kullanımı incelenmiştir. Öncelikle yıkama suyu özgül ağırlığı ile su içerisinde bulunan katı madde miktarı arasındaki ilişki belirlenmiş ve TS EN 1008 standardı ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Toplam bağlayıcı miktarı 330 kg/m^3 olarak seçilen betonlarda 4 farklı bağlayıcı bileşeni ve 3 farklı karışım suyu özgül ağırlığı (3 farklı ince malzeme içeriği) kullanılmıştır. Seçilen bağlayıcı miktarının kontrol karışımlarında tamamı CEM I çimentosu ile üretilmiş ve diğer karışımlarda bu miktarın %25, %50 ve %75'i yüksek fırın cürufu ile yerdeğiştirilmiştir. Farklı bağlayıcı kompozisyonlarına sahip beton karışımlarının her biri, 1,00 (şebeke suyu), 1,05 ve 1,10 g/cm^3 özgül ağırlığına sahip su ile hazırlanmıştır. Toplam 12 değişik betondan oluşan çalışmada 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımının belirlenmesi için 15x15x15 cm boyutlarında küp numuneler, kılcal su emme katsayılarının belirlenmesi için ise 7x7x28 cm boyutlarında prizma numuneler üretilmiştir.

Anahtar sözcükler: Geri dönüşüm, Sürdürülebilirlik, İşlenebilirlik, Basınç dayanımı Kılcallık.

Giriş

Hazır beton sektöründe çevrenin kirletilmemesine ve doğal kaynakların korunmasına yönelik önlemler alınmalıdır. Transmikserlerin yıkanması sırasında harcanan suyun bir bölümünün ve geri dönen betonun agregalarının ayrıştırılarak yeniden kazanılması düşünülmelidir. Ortalama olarak her bir transmikserin yıkanması için ½ m^3 su harcandığı (Ekolu and Dawneerangen, 2010) düşünülürse her bir beton tesisinde büyük miktarda suyun sadece bu amaçla harcandığı söylenebilir. Beton üretimi sırasında her

metre küp beton başına 100 litre suyun yıkama amacı ile kullanıldığı belirtilmiştir (Muszynski and Chini, 2002). Bu suyun geri kazanılması ile hem ekonomiye hem de çevre korunmasına katkı yapılacağı açıktır.

Yıkama suyunun betona katılmasının taze beton özelliklerine etkisi incelenmiş, priz süresini kısalttığı ve işlenebilirliği düşürdüğü belirtilmiştir (Su et al., 2002). Benzer bir çalışmada içerdiği hidrate çimento elemanları ve kalsiyum hidroksit nedeniyle hızlandırıcı etkisi olduğu görülmüştür (Neuwald, 2010). Geçirimlilik özellikleri açısından yıkama suyundaki ince malzemenin kılcal su emmeyi azalttığı ve boşluk miktarını düşürdüğünü gösteren çalışmalar vardır (Sandrolini and Franzoni, 2001). Basınç dayanımı açısından yapılan karşılaştırmada, şebeke suyu ile yapılan betonlara göre dayanımların arttığı kaydedilmiştir (Wasserman, 2012). Buna karşılık, eşit işlenebilirliğe sahip betonlar için basınç dayanımının %4-8 oranında azaldığını gösteren çalışmalar da vardır (Chatveera and Lertwattanaruk, 2009). Bir başka çalışmada ince agreganın %5'ine kadar yıkama havuzu çamuru betona katılmış ve dayanımların etkilenmediği belirtilmiştir (Özbora ve diğ., 2011). Öte yandan, sertleşmiş beton özelliklerinden olan rötrenin arttığı ve asit etkisine direncin azaldığı yönünde bulgular da vardır (Chatveera ve diğ., 2006). Hazır beton tesislerinde elde edilen transmikser yıkama sularından sadece karma suyu olarak değil aynı zamanda kür amacı ile de yararlanılabileceği belirtilmiştir (Mehta, 2001). Yapılan diğer bir çalışmada ise artan çimento miktarı ve azalan su/çimento oranı nedeniyle dayanımın arttığı ve geçirimliliğin azaldığı gözlenmiştir (Borger ve diğ., 1994). Bazı çalışmalarda ise yıkama suyuna geciktirici katkı katılarak hidratasyon süresi uzatılmıştır (Muszynski ve diğ., 2002) ve daha sonra beton üretiminde kullanılmıştır. Taze beton özelliklerini etkilemekle birlikte mekanik özellikleri ve hızlı klor geçirimlilik değerleri ve korozyon başlama sürelerini olumsuz olarak etkilemediği kaydedilmiştir.

Bu çalışmada birim ağırlıkları 1,05 ile 1,15 arasında değişen transmikser yıkama suyu değişik oranlarda cüruf (%0,25, %50 ve %75) içeren betonlara karma suyu olarak ilave edilmiş ve basınç dayanımı ile kılcallık incelenmiştir.

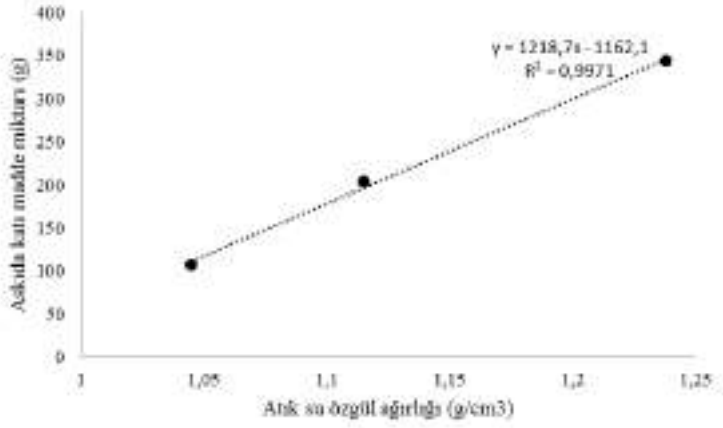
Deneysel Çalışma

Malzemeler

Beton teknolojisinin günümüzde geldiği üretim seviyesi itibarıyla öncelikle çevre üzerinde neden olduğu olumsuz etkinin azaltılması ve aynı zamanda maliyetin düşürülmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışma Kumcular Beton firması ile birlikte yapılmıştır. İçerisinde askıda katı madde bulunan, agregalardan arındırılmış atık su, adı geçen firmanın Samandıra tesisinden elde edilmiş, laboratuvarda gerçekleştirilen üretimlerde üç farklı özgül ağırlıktaki (1.00, 1.05 ve 1.10) karışım suyunun hazırlanmasında kullanılmıştır

Bağlayıcı olarak CEM I/42,5 R normal portland çimentosu ve granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. İnce agrega olarak, sırasıyla 2,67 kg/dm^3 ve 2,72 kg/dm^3 özgül ağırlıklara sahip doğal ve kırma kum ile birlikte iri agrega olarak 22 mm. maksimum boyutlu ve 2,74 kg/dm^3 özgül ağırlığında kırmataş kullanılmıştır. Üretilen tüm karışımlarda sabit dozajda (çimento ağırlığına göre %1.3) yüksek oranda su kesici kimyasal katkıdan faydalanılmıştır.

Atık su olarak tanımlanan transmikser yıkama suyundan faklı özgül ağırlıklara sahip örnekler alınarak kurutulmuş ve özgül ağırlığı ile askıda katı madde miktarı arasındaki ilişki Şekil 1'deki gibi belirlenmiştir. Daha sonra kurutulan toz halindeki katı maddenin özgül ağırlığı ölçülmüştür. Bulunan 2.07 g/cm ^{3} değerinin TS EN 1008 standardında verilen 2.10 g/cm^3 değeri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Yıkama suyunun kimyasal analiz sonuçları ise Tablo 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1 Yıkama suyunun özgül ağırlığı ile askıda katı madde miktarı arasındaki ilişki

Tablo 1 Transmikser yıkama suyu kimyasal analiz sonuçları

Bileşik adı	**İlgili standart**	**Sonuç**	**Sınır değer**
Sülfat (SO_4^{2-})	EPA 9038	31 ppm	2000 ppm
Klorür (Cl^-)	TS EN 196 -2	29 ppm	Öngerilmeli beton 500 ppm Betonarme 1000 ppm Metal içermeyen beton 4500 ppm
Sodyum oksit (Na_2O)	TS EN 196 -2	90 ppm	-
Potasyum oksit (K_2O)	TS EN 196 -2	107 ppm	-
Toplam alkali	TS EN 196 -2	160 ppm	1500 ppm
pH	TS EN 1008	12.6	≥ 4
Koku	TS EN 1008	yok	Herhangi bir koku bulunmamalı
Renk	TS EN 1008	berrak	Açık sarı veya berrak olmalı
Askıda katı madde	TS EN 1008	0.115 kg/L d=1.056	Çökelti miktarı 4 ml'den az olmalı
Organik Madde	TS EN 1008	Açık sarı	NaOH ilavesi sonrası: Açık sarı veya berrak olmalı
Pb^{2+}	TS EN 1008	< 10 ppm	100 ppm
P_2O_5	TS EN 1008	< 10 ppm	100 ppm
Zn^{2+}	TS EN 1008	< 10 ppm	100 ppm
Nitrat (NO^{3-})	EPA 9038	< 10 ppm	500 ppm

Beton Karışımları

Toplam ol arak 12 farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Beton karışımları tasarımında karışım suyu özgül ağırlığı ve bağlayıcı bileşimi bağımsız değişkenler olarak seçilmiştir. Şebeke suyu ile üretilen kontrol karışımları yanı sıra karışım suyu özgül ağırlığı 1.05 ve 1.10 g/cm^3 olacak şekilde 2 ayrı seri beton dökülmüştür. Her bir seride bağlayıcının tamamı CEM I 42,5 Portland çimentosu olan betonların yanında çimento miktarının %25, %50 ve %75'i yüksek fırın cürufu ile ağırlıkça yerdeğiştirilmiş karışımlar üretilmiştir. Yıkama suyu ile hazırlanan karışımlarda karışım suyu içerisindeki katı madde hacmi kadar bağlayıcı azaltılmış ve toplam su miktarının sabit tutulması amacıyla aynı miktarda su ilave edilmiştir.

Tablo 2'de gösterilen beton bileşimlerinin kodlarındaki ilk üç rakam bağlayıcı içerisindeki çimento yüzdesini, sondaki iki rakam ise karışım suyu özgül ağırlığının virgülden sonraki kısmını işaret etmektedir. Yani, örnek olarak 75C05 ile gösterilen karışımda bağlayıcının ağırlıkça %75'i çimento, %25'i cüruftan oluşmuş ve bu beton özgül ağırlığı 1.05 olan su ile hazırlanmıştır.

Tablo 2 Beton bileşimleri

Üretilen Betonlar	**Malzemeler (kg/m^3)**				
	Çimento	**Cüruf**	**Su**	**Yıkama suyundan gelen katı madde**	**Toplam Agrega**
100C00	330	-	190	-	1858
100C05	300	-		20.3	1858
100C10	279	-		34.1	1858
75C00	248	82		-	1852
75C05	225	75		20.3	1852
75C10	209	70		34.1	1852
50C00	165	165		-	1848
50C05	150	151		20.3	1848
50C10	139	141		34.1	1848
25C00	82	248		-	1840
25C05	75	226		20.3	1840
25C10	70	212		34.1	1840

Tüm betonlar 0.04 m^3 hacminde düşey eksenli bir karıştırıcıyla karıştırılmış ve her karışımdan 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı deneyleri için 150 x 150 x 150 mm boyutlarında küp, 28 günlük kılcal su emme deneyleri için 70 x 70 x 280 mm boyutlarında prizma numuneler alınmıştır.

Yapılan Deneyler

Beton numuneler 1 gün kalıpta tutulduktan sonra deney gününe kadar 20±1 ^{o}C sıcaklıktaki su içinde saklanmıştır. Basınç deneyler 3, 7 ve 28. günde yapılmıştır. Kılcallık deneyleri ise 28. günde 7x7x28 cm boyutlarındaki prizmalardan kesilen numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numuneler önce 70 ^{o}C sıcaklıkta sabit ağırlığa gelene kadar kurutulmuş, sonra yan yüzeyleri parafin kaplanarak alt yüzeylerinden emilen su miktarları 100 dakika süre ile ölçülmüştür.

Deney Sonuçları ve Değerlendirme

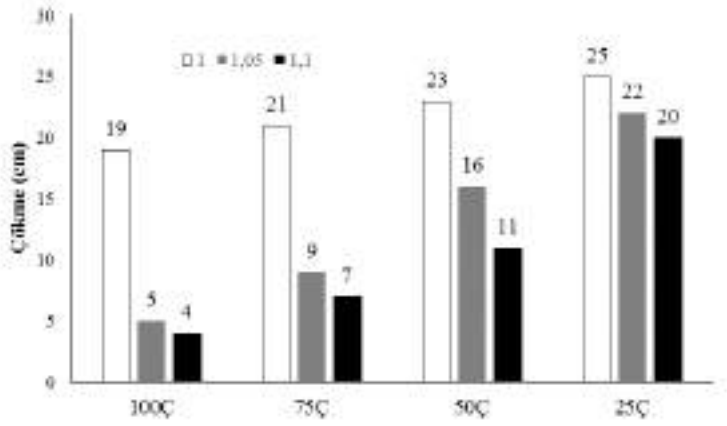
Taze Beton Özellikleri

Transmikser yıkama suyunun beton üretiminde kullanılması durumunda hem kıvam kaybının hem de priz süresinin kısaldığı birçok çalışmada tespit edilmiştir. Yakın zamanda gerçekleştirilmiş bir çalışmada da (Dogan ve Özkul, 2014) artan karışım suyu özgül ağırlığının kısalan priz süresi anlamına geldiği gösterilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3 Yıkama suyu özgül ağırlığının çimento hidratasyonu üzerinde etkisi.

	Yıkama suyu özgül ağırlığı (g/cm^3)			
	1.00	**1.10**	**1.15**	**1.20**
pH		12.80	12.89	12.97
Priz başlangıcı	155d	140d	120d	115m
Priz sonu	285d	260d	235d	225m

Şekil 2'de sunulan çökme değerleri incelendiğinde karışım suyu içerisindeki katı madde artışının neden olduğu kıvam kaybının, bağlayıcının %50 ve daha fazlası cüruftan oluşan karışımlarda ihmal edilebilir düzeyde olduğu, asıl kıvam kaybının %100 ve %75 çimento içeren karışımlarda meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bu sonuçlara göre atık su içerisindeki hidrate çimento elemanları ve alkalin ortamın sadece çimento hidratasyonunu hızlandırdığı ve çimentonun azalmasıyla birlikte bu olumsuz etkinin azaldığı söylenebilir. Öte yandan, çimentonun bir bölümünün cürufla yer değiştirmesinin sadece şebeke suyu kullanılarak üretilen betonların işlenebilirliğini de arttırdığı Şekil 2'de görülmektedir.

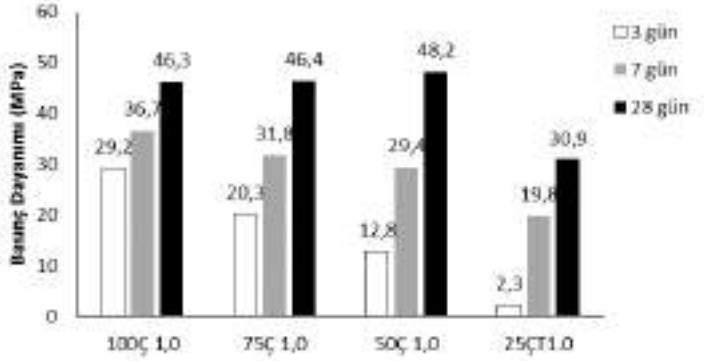


Şekil 2 Karışım suyu özgül ağırlığının beton işlenebilirliğine etkisi

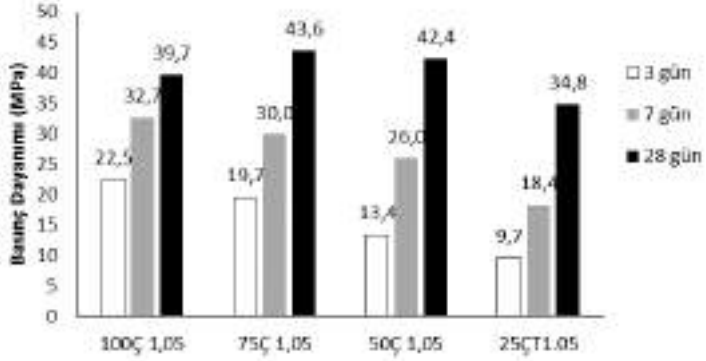
Setleşmiş Beton Özellikleri

Basınç Dayanımı

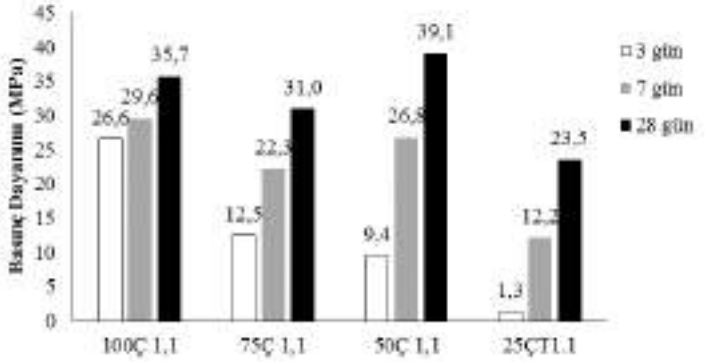
Özgül ağırlıkları 1.00 (şebeke suyu), 1.05 ve 1.10 g/cm^3 olan karışım suyu kullanılarak üretilen betonlar üzerinde gerçekleştirilen basınç dayanımı deney sonuçları sırasıyla, Şekil 3, 4 ve 5'te verilmiştir.



Şekil 3 Şebeke suyu ile üretilen betonların basınç dayanımı değerleri



Şekil 4 Yoğunluğu 1.05g/cm^3 olan su ile üretilen betonların basınç dayanımı değerleri



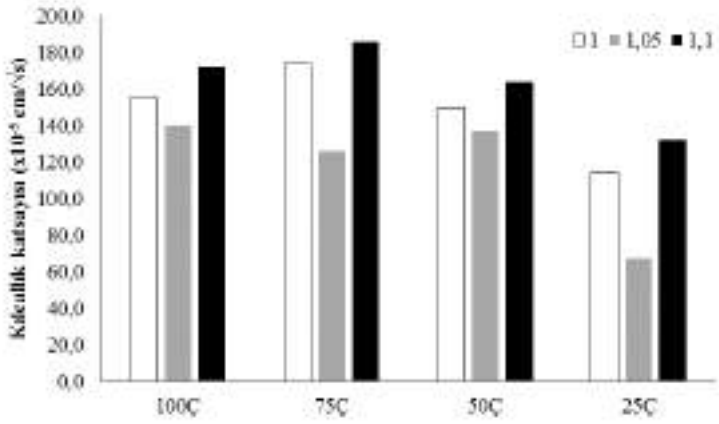
Şekil 4 Yoğunluğu 1.10g/cm^3 olan su ile üretilen betonların basınç dayanımı değerleri

Şebeke suyu ile üretilen betonlarda beklenildiği üzere toplam çimentonun her %25'i ile yerdeğiştiren cürufun 3 günlük basınç dayanımlarında %30 civarında azalmaya neden olduğu, bu azalmanın etkisinin 7 günlük basınç dayanımlarında düştüğü, 28 günlük basınç dayanımlarında ise %50 oranındaki yerdeğiştirme miktarına kadar olumlu etkisi olduğu görülmüştür. Benzer davranışa yıkama suyu ile üretilen betonlarda da rastlanılmıştır.

Üretilen betonlarda kullanılan karışım suyunun özgül ağırlığı arttıkça hemen her yaştaki basınç dayanımlarında azalma ile karşılaşılmıştır. Transmikser yıkama suyu içerisinde askıda bulunan katı parçacıkların bağlayıcı ile yerdeğiştirdiği düşünüldüğünde, bu malzemenin özgül ağırlığının hem çimento hem de cüruftan daha düşük olması ve yerdeğiştirmenin hacimce yapılması nedeniyle, askıdaki katı maddenin bağlayıcı özellikte olduğu kabul edilse de toplam bağlayıcı kütlesinde azalma, dolayısıyla su/bağlayıcı oranında artış meydana gelmektedir. Tablo 1'de verilmiş olan bileşimlerde artan askıdaki katı madde miktarıyla birlikte bağlayıcı dozajındaki azalmaların bileşime giren katı madde miktarıyla kapatılamadığı görülmektedir. Bu nedenle basınç dayanımlarında görülen azalma normal kabul edilmelidir. Kaldı ki, yıkama suyu içerisindeki katı maddenin bağlayıcı yerine dolgu malzemesi olarak değerlendirilmesi daha uygun gözükmektedir.

Kılcal Su Emme

Bu çalışmada üretilen betonların hesaplanan kılcallık katsayıları Şekil 5'te görülmektedir. Bağlayıcı kompozisyonundan bağımsız olarak değerlendirilirse, özgül ağırlığı 1.05 g/cm^3 olan karışım suyu kullanılarak üretilen betonlarda en düşük miktarda kılcal yolla su emme meydana geldiği söylenebilir. Karışım suyu özgül ağırlığının 1.10 g/cm^3 seviyesine çıkarılması durumunda şebeke suyu ile üretilen betonlardan daha yüksek kılcallık katsayıları elde edilmiştir. Betonların basınç dayanımına aynı paralellikte yansımayan bu durumun karışım suyunda askıda bulunan ince taneli malzemenin kılcal boşlukların sürekliliğini bozmasından kaynaklandığı sonucuna varılabilir.



Şekil 5 Bağlayıcı bileşimi ve karışım suyu özelliklerinin kılcallık katsayıları üzerine etkisi

Diğer taraftan, bağlayıcı bileşimine bağlı olarak yorumlanır ise, en düşük dayanıma sahip olan ve sadece bağlayıcı miktarının %25'i çimento olan karışımlarda en düşük kılcallık katsayıları tespit edilmiştir. Burada da yüksek fırın cürufu hidratasyonu sonucu kılcal boşluk sürekliliğinin bozulması kaynaklı olarak söz konusu sonuçların elde edildiği sonucuna varılabilir.

Sonuçlar

Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

1. Transmikser yıkama suyunun beton üretiminde kullanılması durumunda hem kıvam kaybının hem de priz süresinin kısalmakta, ancak bu durum atık su içerisindeki katı madde ile çimento arasındaki etkileşimden kaynaklanmaktadır. Beton bileşimindeki çimentonun cüruf ile artan oranlarda yerdeğiştirilmesi ile kıvam kaybının önemli ölçüde azaldığı görülmüştür.
2. Bu çalışmada yıkama suyu içerisinde bulunan katı maddenin tamamının hacimce 1:1 oranında bağlayıcı ile yer değiştirilmesi ve aynı zamanda özgül ağırlık farkından dolayı karışıma giren katı madde ile çıkan bağlayıcı kütlesinin aynı olmaması sonucu artan su/bağlayıcı oranı nedeniyle tüm karışımların her yaştaki basınç dayanımlarında azalma meydana gelmiştir. yıkama suyu içerisindeki katı maddenin bağlayıcı yerine dolgu malzemesi olarak değerlendirilmesi daha uygun gözükmektedir.
3. İki faklı yıkama suyu özgül ağırlığı arasında düşük olan 1.05 g/cm^3 değerinin betonun kılcallık katsayısı üzerinde olumlu, 1.10 g/cm^3 değerinin ise olumsuz etki oluşturduğu görülmüştür. Kıvam ve basınç dayanımı sonuçları da gözönüne alındığında yıkama suyunun beton özelliklerine önemli dercede zarar vermeden geri kazanılabilmesi için karışım suyunun özgül ağırlığının 1.05 g/cm^3'e eşit veya daha düşük seviyede bulunması gerektiği söylenebilir.

Teşekkür Yazarlar, b u çalışmaya verdikleri destekten dolayı Kumcular Beton Santralleri A. Ş.'ye teşekkür ederler

Kaynaklar

Borger, J., Carrasquillo, R. L. ve Fowler D. W. (1994) Use of Recycled Wash Water and Returned Plastic Concrete in the Production of Fresh Concrete, Advn. Cem. Bas. Mat. , 1, 267-74.

Chatveera, B. ve Lertwattanaruk, P. (2009). Use of ready -mixed concrete plant sludge water in concrete containing an additive or admixture. Journal of Envi ronmental Management. Vol. 90, pp. 1901 -1908.

Chatveera, B., Lertwattanaruk, P. ve Makul, N. (2006). Effect of sludge water from ready -mixed concrete plant on properties and durability of concrete. Cement & Concrete Composites. Vol. 28, pp. 441- 450.

Doga n, U.A. ve Özkul, M.H. (2014). Utilization of Washout Water In Ready -Mixed Concrete Producti on, 11th International Congress on Advances in Civil Engineeri ng, October 21 -25, Istanbul, Turkey.

Ekolu S.O. ve Dawneerangen, A. (2010). Evaluation of recycled wa ter recovered from a ready -mix concrete plant for reuse in concrete. Journal of The South African Institution of Civil Engineering. Vol. 52, pp. 77 -82.

Justness, N. (2002). Porosity a nd Diffusivity of Concrete with Long -Term Compressive Strength Increase Due to Addition of the Set Accelerator Calcium Nitrate. 9th International Conference on Durability of Materials and Components. March 17 -21, Brisbane, Australia.

Mehta, P. K. (2001) Reducing the environmental impact of concrete, Concrete International , 61-66.

Muszynski, L. ve Chini, A. (2002). Re -using wash water in ready -mixed concrete operations. Concrete. Vol. 36, 2, pp. 16 -18.

Neuwald, A. D. (2010) Treating and Recycling Concrete Process Water , National Precast Concrete Association
Archive - 2004-2008.

Özbora A. A., Yüceer, Z., Bekler, A., Erenoğlu, T. ve Tarhan, M. (2011) Geri dönüşüm ünitesi sularının beton karma suyu olarak kullanımı,Beton 2011, THBB Kongresi, 271-279

Sandrolini, F. ve Franzoni, E. (2001). Waste wash water recycling in ready -mixed concrete plants. Cement and Concrete Research . Vol. 31, pp. 485 -489.

Su, N., Miao, B. ve Liu, F. (2002). Effect of wash water and underground water on properties of concrete. Cement and Concrete Research . Vol. 32, pp. 777 -782.

TS EN 1008. (2003). Mixing water for concrete – Specification for sampling , testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete. Turkish Standards Institution.

Won, J. P., Huwang, U. J., Kim, C. K. ve Lee, S. J. (2013). Mechanical perfor mance of shotcrete made with a high -strength cement -based mineral accelerator. Construction and Building Materials , Vol. 49 pp 175 –183.
.

Makro-Sentetik Lif Katkılı Geri Kazanılmış Agregalı Betonların Özellikleri

Kutalmış Recep Akça
Sakarya Üniversitesi
İnşaat Mühendisliği
Sakarya
Tel: (264) 295 70 39
akca@sakarya.edu.tr

Özgür Çakır
Yıldız Teknik Üniversitesi
İnşaat Mühendisliği
İstanbul
Tel: (212) 383 51 33
cozgur@yildiz.edu.tr

Metin İpek
Sakarya Üniversitesi
İnşaat Mühendisliği
Sakarya
Tel: (264) 295 64 76
metini@sakarya.edu.tr

Özet

Ülkemizde gerçekleştirilmekte olan kentsel dönüşüm projesi ile birlikte yıllık 5 milyon tondan fazla inşaat ve yıkıntı atığı oluşması öngörülmektedir. Depolama sahalarının yetersizliği ve atıkları depolamanın ülke ekonomisine getireceği yük göz önünde bulundurul malı, meydana gelen atıklar geri kazanılarak yeniden değerlendirilmelidir. Bu sebeple, atık molozlardan elde edilecek geri kazanılmış agregaların yeniden beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması, çalışmanın temel konusu olmuştur. Bu amaçla planlanan deneysel çalışmada, beton karışımında bulunan doğal iri agregalar (I nolu mıcır ve II nolu mıcır), aynı granülometriye sahip geri kazanılmış agregalar ile %25-30-55 oranlarında yer değiştirilmiştir. Ayrıca, hacimce %0-1-1,5 oranlarında polipropilen lif de kullanılarak beton serileri oluşturulmuştur. Üretilen betonların taze halde çökme miktarları, birim ağırlıkları ve hava içerikleri; sertleşmiş halde ise birim ağırlık, basınç dayanımı ve yarma çekme dayanımları belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, geri kazanılmış agregaların en yüksek oranda kullanılması ile basınç dayanımının %40, yarma çekme dayanımının ise %26 oranında düştüğü gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, polipropilen lif içeriğinin artması ile geri kazanılmış agregalı betonların çekme dayanımlarının %31'e kadar iyileşebildiği, buna bağlı olarak yarma/basınç oranlarının da artış gösterdiği görülmüştür. Tüm deney sonuçları değerlendirildiğinde, geri kazanılmış agregaların betonda en uygun kullanım şeklinin II nolu mıcır granülometrisinde (8-32 mm) %30 oranında olduğu, polipropilen liflerin ise optimum kullanım oranının %1 olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Beton, kentsel dönüşüm, geri kazanılmış agrega, polipropilen lif, basınç dayanımı, yarma çekme dayanımı

1. GİRİŞ

Ülkemizde 5 Ekim 2012 tarihinde başlayan ve 20 yıl sürmesi beklenen Kentsel Dönüşüm çalışmaları sonucunda yıllık en az 4-5 milyon ton inşaat ve yıkıntı atığı oluşması beklenmektedir (Karaca, 2012). Kentsel katı atıkların %13-%30'u arasında bir kısmını oluşturan inşaat yıkıntı atıklarının (Huang ve diğ., 2002), çevresel zararlarının

azaltılması ve ekonomik açıdan kazanca dönüştürülmesi, Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler için büyük önem taşımaktadır. Lennon (2005) inşaat ve yıkıntı atıklarının %90'ının geri kazanılmasının mümkün olduğunu bildirmiş, günümüzde sürdürülebilir malzeme ve yeşil bina kavramları ile birlikte geri dönüşüm büyük önem kazanmıştır. Yapı malzemelerinin kullanımının sürdürülebilirlik bakış açısı ile yönetilmemesi, hammadde ve enerji gibi doğal kaynakların ve de doğal alanların tahrip edilmesine sebep olacaktır. Sürdürülebilir malzeme akışının sağlanması ancak geri dönüşüm ile mümkündür. Geri dönüşüm ile birlikte, "atık" olarak adlandırılan malzemeler "yan ürün" olarak değer kazanacaktır.

İnşaat ve yıkıntı atıklarının, kırma ve eleme gibi işlemler yardımıyla farklı tane boyutuna sahip fraksiyonlara indirgenmesi sonucu elde edilen, karakteristik olarak doğal agrega yüzeyinde ilişik halde bulunan eski harç kalıntısına sahip agregalara "*geri kazanılmış agregalar*" adı verilmektedir. Doğal kaynakların hızla tükeniyor olması ve çevre duyarlılığının toplumları alternatif malzeme arayışına itmesiyle birlikte, geri kazanılmış agregaların yeni beton üretiminde kullanılabilirliği ile ilgili çalışmalar dünya genelinde hız kazanmıştır. Öncelikli olarak dolgu malzemesi şeklinde değerlendirilen geri kazanılmış agregaların, kapsamlı bilimsel çalışmalar ve sarf edilen kayda değer ilerlemeler yardımıyla daha geniş bir kullanım alanına sahip olabileceği anlaşılmıştır. Nataatmadja ve Tan (2001) ve Mulder ve diğ. (2007) gibi araştırmacıların, geri kazanılmış agregaların Hollanda, Avustralya ve ABD'de çoğunlukla yol inşaatlarında taban malzemesi olarak kullanıldığını bildirmelerine rağmen, Kartam ve diğ. (2004) ve Rakshvir ve Barai (2006) gibi araştırmacılar bu malzemelerin dolgu malzemesi olarak kullanımından ziyade yeniden beton üretiminde de kullanılabileceğini belirtmiştir. Yüzeylerindeki eski harç kalıntısı sebebiyle boşluklu bir yapıda olan geri kazanılmış agregalar, karakteristik olarak daha yuvarlak tane şekline, daha düşük özgül ağırlık ve aşınma direncine ve daha yüksek su emme kapasitesine sahiptir (Topçu, 1997; Corinaldesi, 2010; Matias ve diğ., 2013). Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, doğal agrega miktarının %20-30 oranlarında geri kazanılmış agrega ile yer değiştirmesinin betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinde kayda değer olumsuz bir etkisi bulunmadığı görülmüştür (Durmuş ve diğ., 2009; Xiao ve diğ., 2012; Thomas ve diğ., 2013) . Ancak, geri kazanılmış agregaların heterojen bir yapıya sahip olması ve dayanımlarının yıkılan yapının malzeme kalitesine bağlı olması büyük bir risk oluşturmaktadır. Bu nedenle, yapısal risk faktörü düşük olan saha betonları ve prefabrik elemanlar gibi alanlarda kullanılmasının daha uygun olacağı düşünülmüştür. Günümüzde bu tip uygulamalarda lif kullanımının arttığı görülmektedir. Bununla birlikte, saha betonlarında rötre çatlakları sıklıkla görülmekte, önlem olarak lif kullanımı da ön plana çıkmaktadır. Geri kazanılmış agregaların yeniden beton üretiminde kullanılabilirliğinin ve polipropilen lif içeriği ile birlikte kullanılması durumunda performanslarının değerlendirilmesinin amaçlandığı bu çalışmanın, geri kazanılmış agregalı lifli betonların kullanımının yaygınlaştırılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Malzemeler

Deneysel çalışmalarda CEM I 42,5 R tipi çimento, içilebilir nitelikte şehir şebeke suyu, doğal agrega (kum, I nolu mıcır ve II nolu mıcır), geri kazanılmış iri agrega, süper akışkanlaştırıcı katkı ve polipropilen lif kullanılmıştır. Deneyde kullanılan polipropilen

esaslı makro sentetik lifler dalgalı şekle sahip, 50 mm uzunluğunda ve 1 mm çapındadır. Life ait fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan polipropilen lifin teknik özellikleri.

Lif Tipi	Boy (mm)	Çap (mm)	Narinlik (l/d)	Çekme dayanımı (MPa)	Özgül ağırlık (kg/dm^3)	Ergime sıcaklığı (^{o}C)	Ateşleme noktası (^{o}C)
Polimer	50	1	50	550	0,91	164	>550

Çalışmada kullanılan geri kazanılmış agregalar (GKA), İSTAÇ geri kazanım tesislerinde, İstanbul genelinde yürütülen kentsel dönüşüm çalışmalarından elde edilmiştir. Temin edilen GKA'nın içeriği Şekil 1 ve Tablo 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Geri kazanılmış agrega içeriği.

Tablo 2. Geri kazanılmış agrega yüzdesel içeriği.

İçerik	%
Beton parçacıkları	97,53
Tuğla parçacıkları	1,74
Alçı parçacıkları	0,20
Midye kabukları	0,17
Sıva kırıkları	0,13
Nehir agregası	0,13
Fayans kırıkları	0,10

Deneysel çalışmalarda kullanılacak doğal ve geri kazanılmış agregaların tamamında özgül ağırlık, mevcut su içeriği, su emme miktarı (doygun duruma gelmesi için gerekli yüzdesel su içeriği) ve Los Angeles aşınma oranı deneyleri ilgili standartlara (TS EN 1097) uygun olarak yapılmış, sonuçları Tablo 3'te gösterilmiştir. Doğal agregalarda elek analizi deneyleri yapılmış, geri kazanılmış iri agregalar aynı granülometride karışımlara dahil edilmiştir. Bu doğrultuda GKA I ve GKA II, sırasıyla I ve II nolu mıcır granülometrisine sahip geri kazanılmış agregayı ifade etmektedir.

Tablo 3. Agregaların fiziksel özellikleri ve karışımda kullanılma oranları.

Agrega	Tane yoğunluğu (kg/dm^3)	Mevcut su içeriği (%)	DKY su içeriği (%)	L.A. aşınma (%)	Karışım oranı (%)
Kum (0/4)	2,75	0,335	1,0	-	45
Mıcır I (4/16)	2,73	0,2	0,267	30	25
Mıcır II (8/32)	2,67	0	0,67	24	30
GKA I (4/16)	2,52	3,38	4,34	41	25
GKA II (8/32)	2,35	2,95	4,59	41	30

2.2. Karışım Oranları ve Beton Serileri

Beton karışım hesapları TS 802'ye uygun olarak yapılmış, hedef dayanım C25/30 olarak belirlenmiştir. Tüm serilerin aynı kıvam sınıfında bulunması amaçlanmış, kullanılan süper akışkanlaştırıcı katkı miktarı ile uygun kıvam aralığı elde edilmiştir. Ayrıca, agregalarda deneyler ile belirlenmiş su emme oranları dikkate alınarak, agregaların doygun hale gelmesi için karışım hesaplarında gerekli su düzeltmeleri yapılmıştır. GKA'lar, doğal iri agregalar ile aynı oran ve granülometride karışımlara dahil edilmiştir. I nolu ve II nolu mıcırlar GKA ile yer değiştirilmiş, bu şekilde elde edilen serilerin her birisine %1 ve %1, 5 oranlarında polipropilen lif de ikame edilmiştir. Sonuç olarak 12 ayrı beton serisi elde edilmiş olup, beton serilerine ait kodlamalar ve 1 m^3 beton için gerekli karışım oranları Tablo 4'te gösterilmiştir.

Beton serilerine ait kodlamalarda kullanılan "N" doğal agregayı; "GK" geri kazanılmış agregayı; 1 ve 2 rakamı I ve II nolu mıcır granülometrisini; A,B ve C harfleri de sırasıyla %0-1-1,5 lif oranını ifade etmektedir. Bu kodlamaya göre örneğin; GK12 -C kodlu numunede GK12 ifadesi, I nolu ve II nolu mıcır granülometrisine sahip geri kazanılmış agregayı, C harfi de %1,5 lif içeriğini temsil etmektedir .

Tablo 4. Bir m^3 beton için karışım oranları.

Numune Kodu	Çimento (kg)	Su (kg)	Kimyasal Katkı (%)	Lif (kg)	Agregalar (kg)				
					Kum	Mıcır I	Mıcır II	GKA I	GKA II
N-A	318	169	2	-	835	469	576	-	-
GK1-A			2,1	-	835	-	576	454	-
GK2-A			2	-	835	469	-	-	507
GK12-A			2,2	-	835	-	-	454	507
N-B			2	9,00	823	462	568	-	-
GK1-B			2,1	9,00	823	-	567	448	-
GK2-B			2	9,00	823	462	-	-	500
GK12-B			2,2	9,00	823	-	-	448	500
N-C			2	13,50	818	459	564	-	-
GK1-C			2,1	13,50	818	-	563	445	-
GK2-C			2	13,50	818	459	-	-	496
GK12-C			2,2	13,50	818	-	-	445	496

2.3. Yapılan Deneyler

Üretilen beton serilerinde taze ve sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır. Sertleşmiş beton deneylerinin tamamı 28. günde yapılmış olup, numuneler deney gününe kadar 20±2 °C sıcaklıkta kirece doygun su içerisinde kür edilmiştir. Tüm beton serilerinde taze beton deneyleri kapsamında çökme miktarları, birim ağırlık ve hava içerikleri; sertleşmiş beton deneyleri kapsamında birim ağırlık, basınç dayanımı ve yarma çekme dayanımları ilgili standartlara (TS EN 12350 ve TS EN 12390) uygun olarak belirlenmiştir. Basınç dayanımı deneylerinde 15x15x15 cm boyutlarındaki küp numuneler , yarma çekme dayanımı deneylerinde ise 15/30 cm boyutlu silin dir numuneler kullanılmıştır.

3. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Taze Beton Deneyleri

Taze beton deneylerine ait deney sonuçları Tablo 5'te verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, GKA ve lif içeriğinin artması ile birlikte çökme miktarlarının da bir miktar düştüğü görülmüştür. Lif içeriğinin işlenebilirliği olumsuz etkilemesi ve GKA'ların daha yüksek su emme oranlarına sahip olması, çökme miktarının düşmesine sebep olmuştur. Buna rağmen, uygun miktarda akışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile tüm beton serilerinin 10-15 cm aralığında bir çökme değerine sahip olduğu gözlemlenmiş, böylece aynı kıvam sınıfında (S3) yer almaları sağlanmıştır.

Tablo 5. Taze beton deney sonuçları.

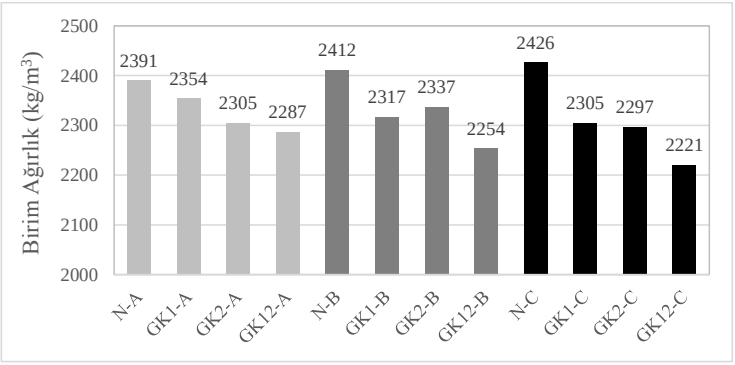
Beton serileri	N-A	GK1-A	GK2-A	GK12-A	N-B	GK1-B	GK2-B	GK12-B	N-C	GK1-C	GK2-C	GK12-C
Çökme (cm)	14	13	12	11	12	11	11	10	12	10	11	10
Hava İçeriği (%)	1,1	1,2	1,1	1,6	1,3	1,4	1,2	1,5	1,3	1,4	1,4	1,7
Birim Ağr. (kg/m^3)	2433	2375	2346	2302	2427	2333	2351	2276	2442	2321	2314	2248

GKA'ların özgül ağırlıkları, boşluklu yapıları sebebiyle doğal agregalara göre daha düşüktür (Tablo 3). Bu sebeple, GKA kullanılan beton serilerinin birim ağırlıklarında da düşüş gözlemlenmiştir. Lif kullanım yüzdesinin artışının da taze betonun birim ağırlığı üzerinde benzer etkiye sahip olduğunu söylemek mümkündür. Ayrıca, GKA ve lif kullanımı taze betonda hava içeriğini de bir miktar arttırmış, referans seride %1,1 olan hava içeriği %1,7'ye kadar yükselmiştir. GKA'ların boşluklu yapısı ve liflerin agrega tane dağılımlarını etkilemesi, hava içerikleri açısından etkili olmuştur.

3.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

3.2.1. Birim Ağırlık

Sertleşmiş beton serilerinin 28. günde belirlenen birim ağırlıkları Şekil 2'de verilmiştir.

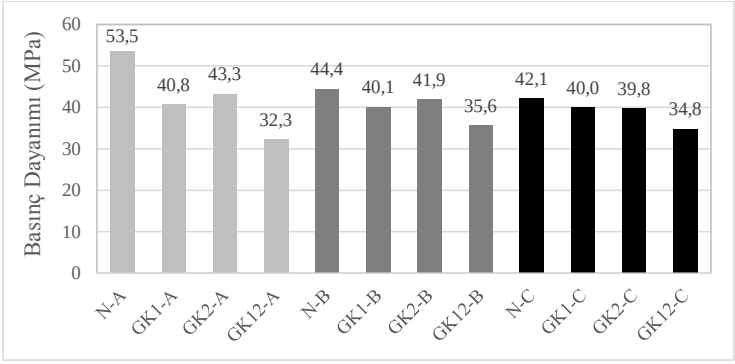


Şekil 2. Birim ağırlık deney sonuçları.

Deney sonuçları incelendiğinde, GKA ve lif kullanımı ile birlikte birim ağırlık değerlerinin genellikle düştüğü görülmektedir. Birim ağırlık değerindeki azalma, en yüksek GK12-C serisinde gözlemlenmiştir. İri agregasının tamamı GKA olan %1,5 lif içeriğine sahip bu serinin birim ağırlığında, doğal agregalı lifsiz referans seriye (N-A) göre %7, aynı lif içeriğine sahip doğal agregalı seriye (N-C) göre ise %8 düşüş tespit edilmiştir. GKA'nın boşluklu yapısından dolayı düşük özgül ağırlığa sahip olması, içeriğinin artması ile birlikte beton birim ağırlığının düşmesine sebep olmaktadır (Durmuş ve diğ., 2009; Hoffmann ve diğ., 2012). Benzer şekilde, polimer liflerin de düşük (0.91 kg/dm^3) özgül ağırlığa sahip olması birim ağırlık değerlerindeki düşüşlerde etkili olmaktadır.

3.2.2. Basınç Dayanımı

Beton serilerinin 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 3'te verilmiştir.



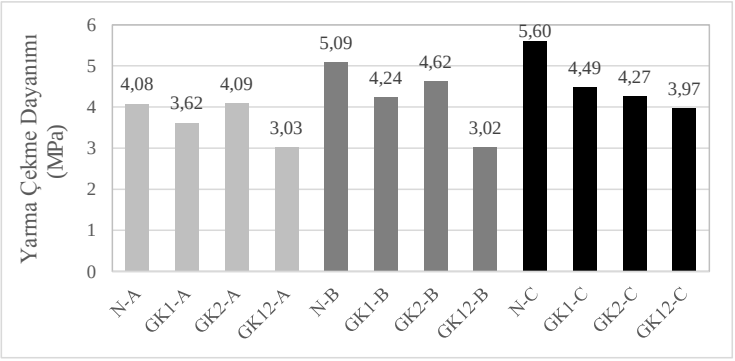
Şekil 3. Basınç dayanımı deney sonuçları.

Şekil 3'te verilen grafik incelendiğinde, en yüksek basınç dayanımına sahip beton serisinin doğal agregalı lifsiz referans beton serisi (N-A) olduğu, en düşük dayanıma sahip serinin ise %39,7 düşüş ile iri agregasının tamamı (karışımdaki agrega miktarının %55'i) GKA olan GK12-A serisinin olduğu görülmektedir. Genel olarak, lif içeriğinin basınç dayanımı üzerinde kayda değer bir etkisi gözlemlenmezken, GKA içeriğinin artması ile birlikte basınç dayanımının düştüğü tespit edilmiştir. Agrega yer değiştirme oranı %25 olmasına rağmen GK1-A ve GK1-B gibi numunelerde, GK2-A ve GK2-B gibi yer değiştirme oranı %30 olan serilere göre düşüşün fazla olması ise ince taneli geri kazanılmış agregaların daha yüksek su emme kapasitesine sahip olması ile açıklanmaktadır. Basınç dayanımında GKA kullanımına bağlı olarak gözlemlenen düşüşlerin, beton dayanımını doğrudan etkileyen agrega dayanımının düşük olması ile açıklanması mümkündür. GKA'ların mekanik özellikleri, yıkılan yapılarda kullanılan beton basınç dayanımının yanı sıra yapıda kullanılan harçlar, tuğla, kiremit ve buna benzer malzemelerin dayanımlarına da bağlıdır. Çalışmada kullanılan GKA'ların elde edildiği mevcut yapıların beton dayanımlarının 8-10 MPa seviyelerinde olduğu da bilinmektedir (Mazılıgüney ve diğ., 2008). Normal bir agrega ya ait kayacın basınç

dayanımının en az 100 MPa olması gerektiği düşünüldüğünde (Baradan ve diğ., 2012), GKA'lı betonların basınç dayanımlarında bir miktar düşüş gözlemlenmesi kaçınılmazdır. Buna rağmen, GKA'lar ile üretilen betonların yapısal taşıyıcı beton olarak nitelendirilmesi olasıdır. Böylece, 32-43 MPa aralığında basınç dayanımına sahip beton üretilmesinin mümkün olduğu görülmüştür.

3.2.3. Yarma Çekme Dayanımı

28 günlük beton serilerinin deneysel olarak belirlenen yarma çekme dayanımları Şekil 4'te verilmiştir.

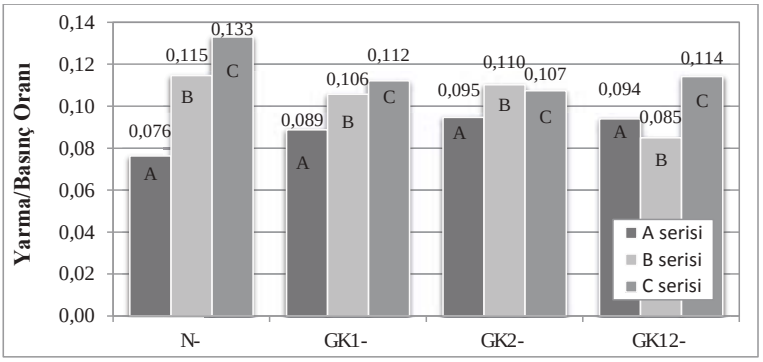


Şekil 4. Yarma çekme dayanımı deney sonuçları.

Deney sonuçları incelendiğinde, en yüksek yarma çekme dayanımına sahip serinin 5, 60 MPa ile %1, 5 lifli doğal agregalı beton serisi (N-C) olduğu, en düşük dayanıma sahip serinin ise 3,02 MPa ile GK12 -A ve B serilerinin olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, ince taneli GKA'ların yüksek su emme miktarları nedeniyle yer değiştirme oranı %30 olan serilerin %25 olan serilerden daha yüksek yarma çekme dayanımına sahip olabildiği görülmüştür. Lifsiz seride %30 oranında II nolu mıcır granülometrisinde GKA içeren GK2 -A serisinin referansa (N -A) çok yakın dayanıma sahip olması ise, GKA'ların pürüzlü yüzeyleri sayesinde aderansa olumlu katkı yapabilmeleri ile açıklanmaktadır (Matias ve diğ., 2013). Bununla birlikte, GKA yer değiştirme oranının %30'u geçmesi durumunda ise dayanımın gözle görülür biçimde düştüğü gözlemlenmektedir. Genel olarak yarma çekme dayanımının GKA kullanımı ile bir miktar düştüğü, ancak dayanımın lif kullanımı sayesinde iyileştirilebildiğini söylemek mümkündür. Lif içeriğinin %0'dan %1'e yükseltilmesi ile GK12 tipi numunelerde herhangi bir değişiklik gözlemlenmemekle birlikte; agrega yer değiştirme oranları sırasıyla %0-25-30 olan N, GK1 ve GK2 tipi numunelerde %25, %17 ve %13 artış gözlemlenmiştir. Lif içeriğinin %0'dan %1,5'e yükseltilmesi durumunda ise agrega yer değiştirme oranları sırasıyla %0-25-55 olan N, GK1 ve GK12 tipi num unelerde sırasıyla %37, %24 ve %31 artış elde edilmiştir. Yarma çekme dayanımlarında liflere bağlı gözlemlenen artışların nedeni, teknik özellikleri Tablo 1'de verilen polimer liflerin yüksek çekme dayanımına (550 MPa) sahip olmasıdır. GKA içeren seriler arasında en yüksek yarma çekme dayanımına sahip beton serisi 4,62 MPa ile %1 lif içerikli GK2-B serisidir.

3.2.4. *"Basınç Dayanımı / Yarma Çekme Dayanımı" Oransal İlişkisi*

28 günlük numunelerde yarma çekme dayanımının basınç dayanımına oranının lif içeriğine bağlı değişimi incelenmiş, grafiksel olarak Şekil 5'te verilmiştir. Geri kazanılmış agrega miktarının yarma/basınç oranına belirli bir etkisi bulunmazken, lif miktarının artması ile tüm serilerde yarma/basınç oranının arttığı açık bir şekilde görülmektedir. Bu durumun; lif içeriğinin basınç dayanımı üzerinde gözle görülür bir etkisi olmamasına rağmen, yarma çekme dayanımını artırmış olması ile açıklanması mümkündür. Tüm serilerin yarma/basınç oranları göz önüne alındığında çekme dayanımı değerlerinin, basınç dayanımının ortalama %10,3'üne karşılık geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 5. Yarma/basınç oransal ilişkisi.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Su emme oranları yüksek olan GKA'lar betonun işlenebilirliğini olumsuz etkilemekle birlikte, uygun tipte ve miktarda akışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile istenen işlenebilirliğin elde edilmesi mümkündür. GKA ve lif içeriğinin artması, taze ve sertleşmiş betonun birim ağırlığını ve taze betonda hava içeriğini de bir miktar arttırmaktadır. Basınç dayanımı üzerinde lif içeriğinin kayda değer bir etkisi görülmemekle birlikte, GKA'lar genel olarak basınç dayanımını olumsuz etkilemiştir. Ancak, GKA'nın beton karışımında kullanılma oranı kadar tane büyüklüğü dağılımının da önemli olduğu görülmüştür. Yarma çekme dayanımı da GKA kullanılması ile düşmüş olsa da, %30 oranında iri taneli GKA kullanılması durumunda düşüş belirgin değildir. Bununla birlikte lif içeriğinin artması, yarma çekme dayanımlarına olumlu katkıda bulunmuş, bu sebeple yarma çekme dayanımının basınç dayanımına oranı da artış göstermiştir. Ancak, işlenebilirlik gibi sakıncalar ve beton serilerinin mekanik performansları göz önünde bulundurulduğunda, optimum lif içeriği bu çalışma için %1 olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada kentsel dönüşüm projesi kapsamında yıkılan, beton dayanımı 8-10 MPa olan mevcut yapılardan elde edilen geri kazanılmış agregalar ile 32-43 MPa aralığında basınç dayanımına sahip beton üretilmesinin mümkün olduğu görülmüştür. Diğer bir

deyişle, geri kazanılmış agregalar kullanarak C30/37 sınıfında taşıyıcı betonlar üretilebilmiştir. Fakat geri kazanılmış agregaların heterojen bir yapıya sahip olması ve dayanımlarının yıkılan yapının malzeme kalitesine bağlı olarak değişmesi sebebiyle, yapısal risk faktörü düşük olan, günümüzde lif kullanımının yaygınlaştığı saha betonları ve prefabrike elemanlar gibi alanlarda kullanılması daha uygundur.

Kaynaklar

Baradan, B., Yazıcı, H., Türkel, S., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Tosun, K., Aydın, S., Yardımcı, M.Y., Topal, A. ve Öztürk, A.U. (2012) Beton. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, Türkiye.

Corinaldesi, V. (2010) Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. Construction and Building Materials, Vol. 24, pp. 1616-1620.

Durmuş, G., Şimşek, O. ve Dayı, M. (2009) Geri dönüşümlü iri agregaların beton özelliklerine etkisi. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Vol. 24, pp. 183-189.

Hoffmann, C., Schubert, S., Leemann, A. ve Motavalli, M. (2012) Recycled concrete and mixed rubble as aggregates: influence of variations in composition on the concrete properties and their use as structural material. Construction and Building Materials, Vol. 35, pp. 701-709.

Huang, W.L., Lin, D.H., Chang, N.B. ve Lin, K.S. (2002) Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process. Resources Conservation&Recycling, Vol. 37, pp. 23-37.

Karaca, F.M. (2012) İstanbul Tuzla-Aydınlı inşaat ve yıkıntı atıkları geri kazanım tesisi işletimi. Atık Yönetimi Sempozyumu, 26 Nisan, Antalya.

Kartam, N., Al-Mutairi, N., Al-Ghusain, I. ve Al-Humoud, J. (2004) Environmental management of construction and demolition waste in Kuwait. Waste Management, Vol. 24, pp. 1049-1059.

Lennon, M. (2005) Recycling construction and demolition wastes. A Guide for Architects and Contractors.

Matias, D., Brito, J.D., Rosa, A. ve Pedro, D. (2013) Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates-influence of the use of superplasticizers. Construction and Building Materials, Vol. 44, pp. 101-109.

Mazılıgüney, L., Yaman, İ.Ö., Azılı, F. (2008) In-situ concrete compressive strength of residential, public and military structures. 8th International Congress on Advances in Civil Engineering, 15-17 Eylül, Famagusta, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti.

Mulder, E., De Jong, T.P.R. ve Feenstra , L. (2007) Closed cycle construction: an integrated process for the seperation and reuse of C&D waste. Waste Management , Vol. 27, pp. 1408-1415.

Nataatmadja, A. ve Tan, Y.L. (2001) Resilient response of recycled concrete road aggregates. Journal of Transportation Engineering , Vol. 127, pp. 450-453.

Rakshvir, M. ve Barai, S.V. (2006) Studies on recycled aggregates-based concrete. Waste Management & Research , Vol. 24, pp. 225-233.

Thomas, C., Setien, J., Polanco, J.A., Alaejos, P. ve De Juan, M.S. (2013) Durability of recycled aggregate concrete . Construction and Building Materials , Vol. 40, pp. 1054-1065.

Topçu, İ.B. (1997) Physical and mechanical properties of concrete produced with waste concrete. Cement and Concrete Research , Vol. 27, pp. 1817-1823.

Xiao, J., Li, W., Fan, Y. ve Huang, X. (2012) An overview of study on recycled aggregate concrete in China 1996-2011. Construction and Building Materials , Vol. 31, pp. 364-383.

Çimentolu Yonga Levha Atıklarının Çimento Üretiminde Kullanılması

Mustafa Yılmaz[a], Mustafa Tokyay[b], İ. Özgür Yaman[b]

[a] Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Savunma Sanayii Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü, Ankara, Turkey

[b] Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Üniversiteler Mahallesi, Dumlupınar Bulvarı No:1, Çankaya 06800 Ankara, Turkey

Öz

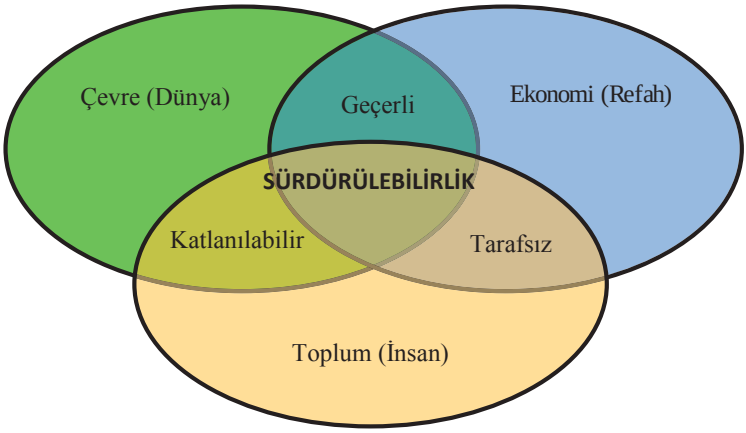
Günümüzde çimentolu yongalevhalar (ÇYL) binaların gerek iç gerekse dış yapılarında oldukça sık kullanılan bir çeşit duvar malzemesidir. Bir kompozit malzeme olarak incelenmesi gereken ÇYL içeriğinde bağlayıcı olarak çimento, lif olarak ise ahşap yonga (talaş) bulunmaktadır. ÇYL üretim prosesi incelendiğinde belli bir kıvama getirilen çimento hamuru ahşap yonga liflerle birlikte karıştırılmakta ve basınç altında bir plaka haline getirildikten sonra yüksek sıcaklık altında belli bir süre bakımı yapılmaktadır. ÇYL üretimi sırasında yapılan kenar kesme operasyonlarında önemli miktarda ÇYL atığı (ÇYLA) ortaya çıkmaktadır. Esas itibariyle ahşap yonga ve hidrate olmuş çimento içeren bu atığın halen ekonomik bir değeri bulunmadığı gibi üretim alanından da uzaklaştırılması gereklidir. Atığın bertaraf maliyeti olan nakliye ve dökme bedelini azaltmak, çevre kirliliğini ortadan kaldırmak, çimento fabrikalarında kullanılan hammaddelerin ve doğal enerji kaynaklarını kullanımını azaltmak ve doğaya daha az CO_2 gazı salınımına yardımcı olmak amacıyla bu atıkların çimento üretiminde gerek alternatif yakıt gerekse hammadde olarak kullanılabileceği düşünülmüştür. Bu amaçla ÇYLA farklı oranlarda çimento hammaddeleri ile karıştırılarak farin numuneleri hazırlanmış ve aynı ısıl koşullara maruz bırakılarak klinker üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu makalede ÇYLA atığı kullanılarak laboratuvarda elde edilen çimento numunelerinin bazı özellikleri tartışılarak ÇYLA atığının çimento üretiminde başarıyla kullanılabildiği gösterilmiştir.

Anahtar sözcükler: Sürdürülebilirlik, Çimento Üretimi, Birlikte İşleme, Çimento Yonga Levha (ÇYL), Çimento Yonga Levha Atık(ÇYLA), Yakıt

Giriş

Sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir kalkınmaya ilişkin olarak kullanılan en yaygın tanım 1987 yılında Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Komisyonun'ca "İnsanlığın, gelecek kuşakların gereksinimlerine cevap verme yeteneğini tehlikeye atmadan, günlük ihtiyaçlarını temin ederek yapılan kalkınma" olarak yapılmıştır [1]. Buna göre sürdürülebilirlik gereksinimleri çevresel, ekonomik ve sosyal olmak üzere üç grupta gösterilir. Ancak, çoğu zaman bu faktörler arasında birbiriyle çatışan ve çelişen

ihtiyaçlar ortaya çıkmaktadır. Örneğin, temiz bir havaya hepimizin ihtiyacı bulunmakta, evimizden işimize ulaşımda da bir taşıt kullanımına ihtiyaç duymakta, ancak bu taşıtın da soluduğumuz havayı kirlettiği bilinmektedir. Buna rağmen halen taşıt kullanımı giderek artmaktadır. Bu ve benzeri olaylarda ortaya çıkan ve birbiriyle çatışan gereksinimler bir topluma uyarlanacak olursa, ekonomik, ekolojik ve sosyal faktörlerin hepsinin birarada değerlendirildiği çok daha zor bir durum oluşur (Şekil 1).



Şekil 1. Sürdürülebilirlik için gerekli olan üç ana ayak [2].

Bilindiği üzere çimento genellikle doğadan elde edilerek belirli bir oranda karıştırılan kalker, kil ve demir cevheri gibi maddelerin 1450 °C sıcaklığa kadar pişirilmesi ve ardından ortaya çıkan klinkerin bir miktar alçıtaşıyla birlikte öğütülmesi ile elde edilir. Çimento üretimi, prosesinde kullanılan öğütme ve yüksek sıcaklıklarda pişirme nedeniyle yüksek enerji gerektirir. Öte yandan pişirme sırasında özellikle kalkerin içindeki CO_2'nin açığa çıkması sonucunda sera gazı emisyonlarına önemli bir katkısı olur.

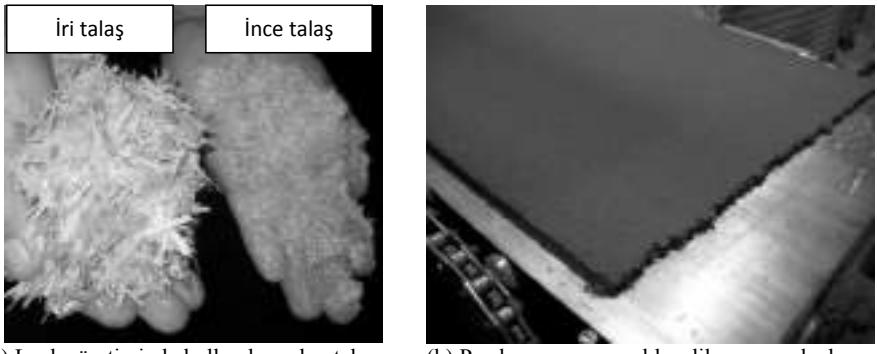
Günümüzde çimento sanayi, toplumun ihtiyaçlarını karşılamak için yeterli çimento temin etme görevini yaparken üretiminde tükettiği yakıt ve hammadde gereksinimleri ile emisyonlarını azaltmaya, dolayısıyla sürdürülebilir kalkınma ilkelerini gözardı etmemek için çalışmalar sürdürmektedir. Atık malzemelerin çimento sanayinde kullanılması, yani birlikte işlenmesi, bu hedeflerin gerçekleştirilmesi için katkıda bulunmaktadır. Birlikte işleme, endüstriyel proseslerde, birincil yakıt ve hammaddenin uygun atık malzeme ile ikame edilmesidir. Çimento sanayinde atıkların birlikte işlenmesi, yenilenemeyen malzemelerin azami ölçüde ikamesini sağlamaktadır. Temel kural olarak, alternatif yakıt / hammadde olarak kabul edilen atıklardan, organik kısmı ısıl değeri olarak, mineral kısmı ise malzeme değeri olarak çimento üretiminde yer alır. Çimento sanayi üretim işleminin özelliklerine göre, aşağıdaki maddeler bu amaçla birlikte kullanılabilir [3]:

- Önemli ısıl değere sahip olan alternatif yakıtlar (atık yağlar v.b.)
- Mineral bileşeni, çimento üretimine uygun maddeler (uçucu kül v.b.)
- Isıl değeri ve mineral bileşenleri uygun olanlar (kullanılmış lastikler v.b.)

Ancak, bazı alternatif malzemeler her iki gereksinimi de karşılayarak, çimento sanayinde birlikte işlenebilecek malzemeler ile ilgili genel kriterleri belirlemeyi

zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada incelenecek olan yonga levha atığı da bu maddelerden biridir.

Çimentolu yonga levhalar (ÇYL) binaların gerek iç gerekse dış yapılarında oldukça sık kullanılan bir çeşit duvar malzemesidir. Bir kompozit malzeme olarak incelenmesi gereken ÇYL içeriğinde bağlayıcı olarak çimento, lif olarak ise ahşap yonga yani odun tal aşı bulunmaktadır. ÇYL üretim prosesi incelendiğinde belli bir kıvama getirilen çimento hamuru ahşap yonga liflerle birlikte karıştırılmakta ve belirli bir basınç altında bir plaka haline getirildikten sonra belli bir süre yüksek sıcaklığa maruz bırakılmaktadır (Resim 1). ÇYL üretimi sırasında yapılan kenar kesme işlemlerinde önemli miktarda ÇYL atığı ortaya çıkmaktadır. Esas itibariyle yaklaşık olarak %30 oranında ahşap yonga ve %70 oranında hidrate olmuş çimento içeren bu atığın halen ekonomik bir değeri bulunmadığı gibi üretim alanından da uzaklaştırılması gereklidir.



(a) Levha üretiminde kullanılan odun talaşı (b) Preslenme sonrası elde edilen yonga levha

Resim 1. Yonga levha üretimi

Literatürde ÇYL üretiminde farklı liflerin ve atık malzemelerin kullanımına ve bu şekilde üretilen levhaların performansına ilişkin birçok çalışma bulunmasına karşın [4-6], ÇYL üretiminde ortaya çıkan atıklarının değerlendirilmesine yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Dolayısıyla, bu çalışmada ÇYL üretim prosesi sonucunda ortaya çıkan atıkların ve esasen ahşap yonga ve hidrate olmuş çimento içeren malzemenin yeniden çimento üretiminde kullanılmasına ilişkin olarak laboratuvarda yapılan deneysel bir araştırmanın sonuçları verilecektir.

Deneysel Program

Çalışmada bir firmadan temin edilen çimentolu yonga levha atıkları bilyeli değirmende öğütülmüştür. Öğütülen çimentolu yonga levha (ÇYL) atığına ASTM D 5865 standar dına uygun olarak yakıt analizi yapılmıştır (Tablo 1). ÇYL atığının gerçek çimento üretiminde bir ön ısıtıcıdan geçmesi esnasında kuruyacağı düşünülerek üst ve alt kalori değerleri sırasıyla tablodaki ilk kolonda belirtilen 937 kcal/kg ve 840 kcal/kg olarak seçilebilir. Bu değerler ise çimento üretiminde kullanılan tipik bir petrokokun ısıl değerinin 8000 kcal/kg olduğu düşünüldüğünde, petrokokun yaklaşık 1/10'una karşılık gelmektedir.

Tablo 1. Çimentolu Yonga Levha Atığı (ÇYLA) Yakıt Analizi

ÇYLA Numunesi	Kuru ÇYLA (105 ^{0}C)	Havada Kuru ÇYLA (40 ^{0}C)	Orijinal ÇYLA
Kaba Rutubeti (%)	-	-	1,80
Bünye Rutubeti (%)	-	4,69	4,61
Uçucu Madde (%)	32,56	31,03	30,47
Kül (%)	66,74	63,61	62,47
Toplam Kükürt (%)	0,62	0,59	0,58
Hidrojen (%)	1,98	1,89	1,85
Üst Kalori (kcal/kg)	937	893	877
Alt Kalori (kcal/kg)	840	774	751

ÇYLA atığı yanında kullanılacak diğer malzemeler katkısız çimento üretiminde kullanılacak hammaddeleri oluşturmaktadır. Bir çimento fabrikasından tedarik edilen bu malzemeler arasında farin, düzeltici kalker ve kömür külü bulunmaktadır. Çimentolu yonga levha atığı ile klinker üretiminde kullanılacak diğer hammaddelerin pişirilmeden önce Tablo 2'de belirtilen kimyasal analizi yapılmıştır. Bu çalışma bulguları farin karışım oranlarının oluşturulmasında girdi olarak kullanılmıştır.

Tablo 2 ÇYLA ile referans hammaddelerin kimyasal analiz sonuçları

% Kimyasal Bileşen	ÇYLA	Referans Farin	Düzeltici Kalker	Referans Kömür Külü
Kız. Kayb.	35,84	35,28	42,74	0,84
SiO_2	19,30	13,02	0,59	42,51
Al_2O_3	4,12	3,83	0,24	19,30
Fe_2O_3	1,70	2,11	0,13	7,24
CaO	34,06	44,27	55,09	15,63
MgO	1,36	0,87	0,69	2,09
SO_3	2,36	0,07	0,04	8,45
Na_2O	0,83	0,27	0,04	0,31
K_2O	0,48	0,30	0,21	1,82
TiO_2	0,18	-	-	0,94

Çalışmanın bu kısmında ÇYLA ve referans hammaddeler kullanılarak farin karışımları hazırlanmıştır. Bu farinlerin karışım oranları Tablo 3'de gösterilmiştir. Karışım oranlarının belirlenmesi için kimyasal açıdan yapılan değerlendirmede ÇYLA numunesi, referans farin ve düzeltme kalkeri ile pişebilirliğin karşılaştırılması amacıyla sabit bir kireç doygunluk faktörü kullanılarak tipik bir klinker kompozisyonu oluşturacak şekilde farin numunesi (Farin 1) ve ÇYLA numunesi (Farin 2) ayrı ayrı, ayrıca referans farin, ÇYLA numunesi ve düzeltme kalkerinden oluşan üç farklı karışım numunesi (Farin 3, Farin 4, Farin 5) hazırlanmıştır. Farin numunelerin e 800 kcal/kg pişme kalorisi esas alınarak, referans kömür ve ÇYLA atığının kalorifik analizine göre % 8,62'den başlayarak karışım oranlarına göre değişen kömür ilavesi de yapılmıştır.

Daha sonra hazırlanan farinlerin kimyasal analizleri yapılmış ve çimento modülleri belirlenmiştir. Tablo 4'de ilk iki farin numunesinin kireç doygunluk faktörleri arasında büyük farklılıklar gözlenmektedir. Düzeltici kalker kullanılarak hazırlanan diğer farin numunelerinin ise hesaplanan modülleri büyük oranda referans farine benzerdir.

Tablo 3. Hazırlanan farklı farinlere ait karışım oranları

Farin No	Referans Farin	ÇYLA	Düzeltme Kalkeri	Referans Kömür
#1	100	0	0	8,62
#2	0	100	0	7,63
#3	92,31	5	2,69	8,56
#4	84,66	10	5,34	8,52
#5	61,62	25	13,38	8,36

Tablo 4. Hazırlanan Farinlerin Kimyasal Analizi ve Çimento Modülleri

% Kimyasal Bileşen	Farin #1	Farin #2	Farin #3	Farin #4	Farin #5
Kızdırma Kaybı	35,28	35,84	35,51	35,73	36,2
SiO_2	13,02	19,30	1,00	12,98	2,93
Al_2O_3	3,83	4,12	3,75	3,67	3,42
Fe_2O_3	2,11	1,70	2,04	1,96	1,74
CaO	44,27	34,06	44,05	43,83	43,17
MgO	0,87	1,36	0,89	0,91	0,97
SO_3	0,0	2,36	0,18	0,30	0,64
Na_2O	0,27	0,83	0,29	0,31	0,38
K_2O	0,30	0,48	0,31	0,31	0,33
Çimento Modülleri					
Kireç doygunluk faktörü	104,54	56,76	104,52	104,45	104,35
Silis modülü	2,19	3,32	2,25	2,31	2,50
Alumina modülü	1,82	2,42	1,84	1,87	1,96

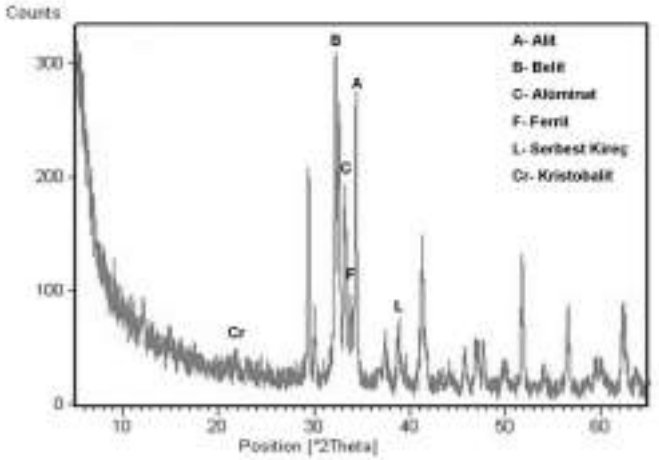
Daha sonra, hazırlanan bu 5 farklı farin numunesine laboratuvarda pişebilirlik analizi yapılmıştır. Bu amaçla hazırlanan farin numuneleri 1200, 1300, 1350, 1400 ve 1450 ºC sıcaklıklarda programlı ısıtmaya tabi tutularak her sıcaklıkta serbest CaO oranları ölçülmüştür (Tablo 5). 1450 ºC oluşturulan klinkerlerde serbest CaO değerlerinin sırasıyla % 3.49, 0.23, 3.80, 3.77 ve 3.84 olarak hesaplanması 1, 3, 4 ve 5 nolu farinlerin pişme karakteristiklerinin zor olduğu (% S.CaO > 2,00), 2 nolu % 100 çimentolu yonga levha atığından oluşturulan farinde ise pişmenin iyi olduğunu (% S.CaO < 2,00) göstermektedir.

Tablo 5. Farklı pişme sıcaklıklarında klinkerlerdeki serbest CaO (%)

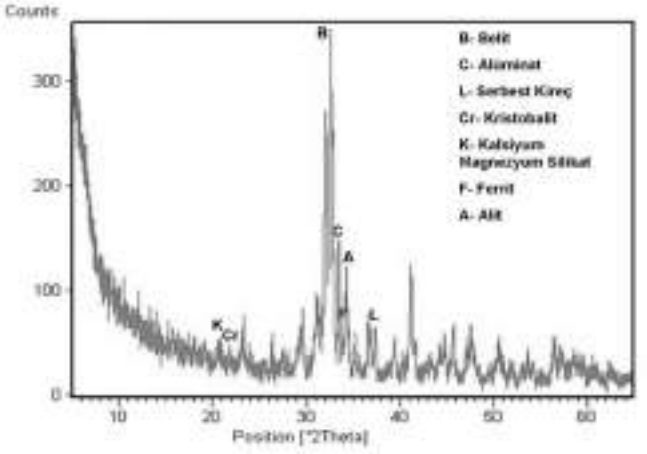
Farinlerden üretilen klinker numuneleri	Pişirme Sıcaklığı (ºC)				
	1200	1300	1350	1400	1450
Klinker #1	17,78	8,05	5,71	4,62	3,49
Klinker #2	0,74	0,68	0,57	0,37	0,23
Klinker #3	17,62	8,85	5,52	5,32	3,80
Klinker #4	18,86	8,75	6,12	5,27	3,77
Klinker #5	18,50	8,63	6,58	5,56	3,84

Daha sonra serbest kireç miktarının en az olduğu sıcaklık 1450 ^{0}C olduğundan klinkerizasyon işlemi bu sıcaklıkta gerçekleştirilerek oluşan klinkerlerin mineralojik yapısı incelenmiştir (Şekil 2 ve 3). İkinci klinker numunesi dışındaki bütün klinker numunelerinde ana fazlar olarak nitelendirilen alit, belit, aluminat ve ferrit yapıları

gözlemlenmiştir. Tamamen ÇYLA atığından oluşan klinker numunesinde ise CaO kaynağı yetersiz olmasından (kireç doygunluk faktörünün düşük olması) dolayı alit yapısı gözlenmemiştir. Şekil 2'de birinci ve ikinci klinkerlerden, Şekil 3'de ise farklı oranlarda ÇYLA kullanılarak elde edilen klinkerlere ait XRD grafikleri verilmiştir. Tüm klinkerler CuKα=1.5406 Aº ışıması kullanılarak 5º ile 65º arası 2θ skalasında 1º/min tarama hızı ile incelenmiştir.



(a) Klinker #1 (%0 ÇYLA)

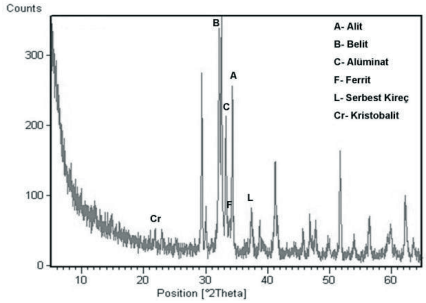


(b) Klinker #2 (%100 ÇYLA)

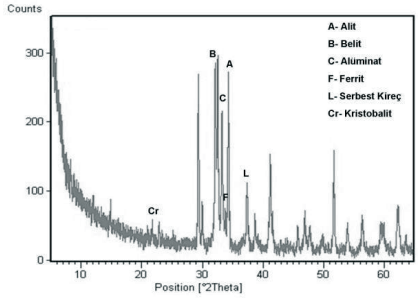
Şekil 2.1450 ºC sıcaklıkta üretilen ilk iki klinkere ait XRD grafikleri

Ayrıca, klinker numunelerine ait farklı boyut ve görünümdeki granüllerin parlak kesitleri hazırlanmış ve numunelerin, polarize mikroskop ile mikro yapıları incelenmiştir. Resim 2'de örnek olarak ilk iki klinkere ait polarize mikroskop görüntüleri verilmiştir. Klinker-1 numunesinde gözenekli bir yapı ve belit kümelerinden ileri gelen homojen olmayan faz dağılımları görülmektedir. Serbest kireç de kümeler halinde bulunmaktadır. Kristal boyutları incelendiğinde genelde, alit ve belit biraz iri boyutlu olduğu (25-30 mikron) olduğu görülmüştür. Bazı bölgelerde normal

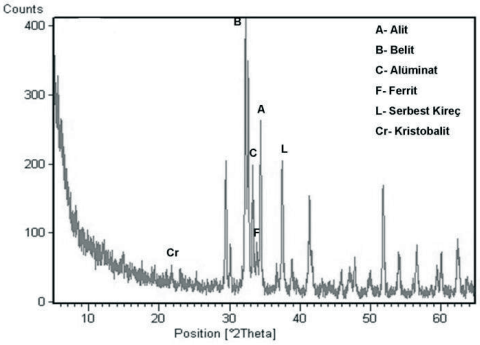
boyutlu alit ve belit kristallerine de rastlanmıştır. Kristal şekilleri normal olup; sıvı faz ince kristalizedir. Diğer klinker granüllerinin mikroyapı incelemesi sonucunda, tamamen atıktan oluşan klinker hariç diğer numunelerde silikat fazlarına ait (alit ve belit) normal faz dağılımı ve diğer klinker fazları (sıvı faz ve serbest CaO gibi) görülmüş; ancak tamamen atıktan oluşan klinker numunesinde sadece belit fazı ve sıvı faz görülmüştür (Resim 2b). Farklı oranlarda ÇYLA kullanımı ile elde edilen klinkerlere ait polarize mikroskop görüntüleri ise Resim 3'te verilmiştir.



(a) Klinker #3 %5 ÇYLA atığı

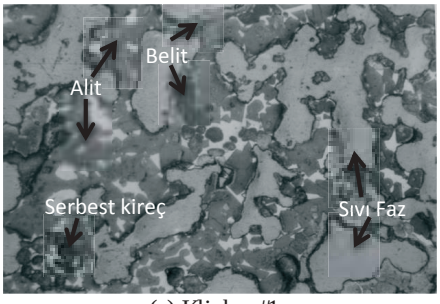


(b) Klinker #4 %10 ÇYLA atığı

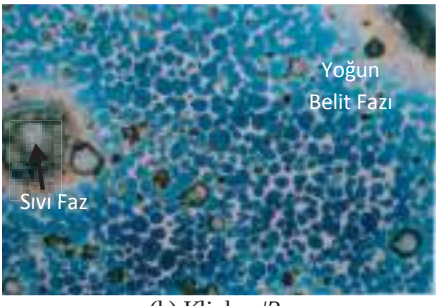


(c) Klinker #5 %25 ÇYLA atığı

Şekil 3.Farklı ÇYLA oranlarıyla üretilen klinkerlere ait XRD grafikleri



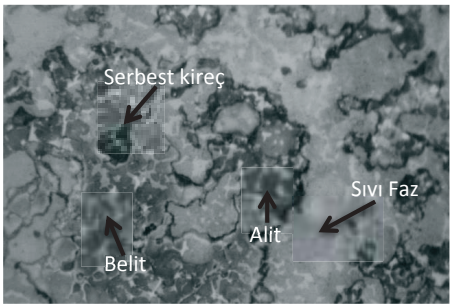
(a) Klinker #1



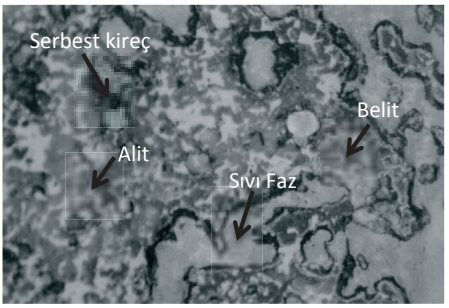
(b) Klinker #2

Resim 2. 1450 °C sıcaklıkta üretilen ilk iki klinkere ait polarize mikroskop görüntüleri

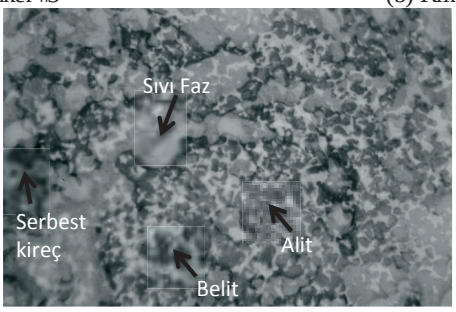
Laboratuvarda elde edilen klinkerlerde dikkat çekici en önemli fark tamamen atıktan oluşan klinkerde tespit edilen çok düşük LSF değeri ile yüksek sıvı faz oranıdır. Farin kaynaklı bu çok düşük kireç doygunluk değeri ile yüksek silika ve alümina modulü değerleri diğer klinkerlerde elde edilen tipik klinker bileşenlerinin oluşmasını etkileyen ana etkenlerdir.



(a) Klinker #3



(b) Klinker #4



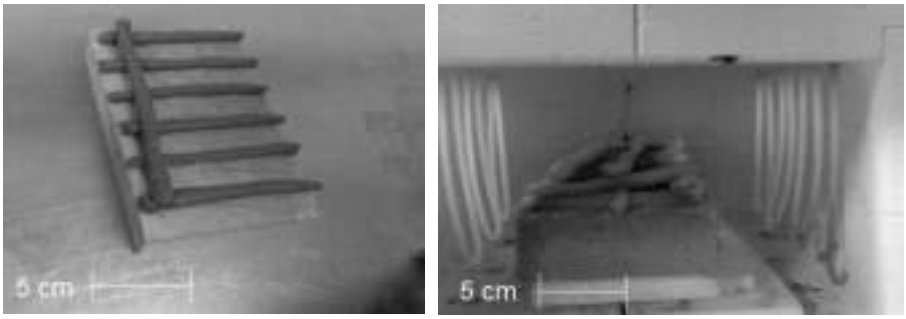
(c) Klinker #5

Resim3. Farklı ÇYLA oranlarıyla üretilen klinkerlere ait polarize mikroskop görüntüleri

Klinkerlerin özellikleri bu şekilde tespit edildikten sonra ikinci aşamada bu klinkerden çimento elde edilmiş ve çimento harcının dayanımı belirlenmiştir. Bu amaçla laboratuvardaki küçük bir fırında çoklu klinker üretimi yapılmıştır. Öncelikle bir farine ait farklı karışım oranları kuru bir şekilde karıştırıldıktan sonra karışımın fırın içinde erimeden kaynaklı akmayı azaltmak için farine yaklaşık % 10 oranında su eklenerek hamur haline getirilmiştir. Daha sonra bu farin hamuruna makarna şekli verilmiş ve Resim 4'te gösterildiği gibi bu hamurlar 3 kat üstüste dizilerek fırına klinker üretimi için yerleştirilmiştir. Fırına konulan her bir klinker kompozisyonu aşağıda belirtildiği şekilde standart bir pişirme işlemine tabi tutulmuştur:

- Malzemeler fırına girdikten sonra sıcaklık oda sıcaklığından 1200 °C'ye 100 dakikada çıkacak şekilde ayarlanır
- Fırın sıcaklığı 1200 °C'ye ulaştığında malzeme bu sıcaklıkta 20 dakika bekletilir.
- Beklemenin ardından 1300 °C'ye 4 dak. da çıkartılır.
- 1300 °C' de 16 dakika bekleyen malzeme 1350 °C'ye 2 dak. çıkar ve 18 dak. Bekletilir.
- Beklemenin ardından 1450 °C'ye 2 dak. çıkartılır ve 18 dak. da bu sıcaklıkta bekledikten sonra ardından fırından çıkartılarak oda sıcaklığında soğutulur.

Bu şekilde yapılan bir pişirme işlemi sonucunda bir seferde yaklaşık 150 g klinker üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Çimento harç dayanımını belirlemek için ilk üç klinker kompozisyonu için yaklaşık 5 kg klinker üretilmiş, ve daha sonra her bir klinker türüne % 5 alçıtaşı eklenerek laboratuvardaki bilyeli değirmende benzer inceliğe getirilmiştir. Üretilen üç çimentonun özellikleri Tablo 6'da verilmiştir.



a) Farin hamurlarının hazırlanması b) Fırında pişirme işlemi

Resim 4. Farin Pişirme İşlemi

Tablo 6. Çimentoların kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal Özellik	K1(%0 ÇYLA)	K2(%100 ÇYLA)	K3(%5 ÇYLA)
Kızdırma Kaybı (%)	1,5	0,83	1,69
SiO_2 (%)	18,80	27,43	18,71
Al_2O_3 (%)	6,08	7,23	5,86
Fe_2O_3 (%)	3,43	3,53	3,38
CaO (%)	65,62	53,67	65,5
MgO (%)	0,97	2,07	1,03
SO_3 (%)	2,54	3,12	2,68
Na_2O (%)	0,64	1,44	0,8
K_2O (%)	0,06	0,65	0,23
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0,30	0,91	0,27
Serbest CaO (%)	3,01	0,69	4,04
C_3S (%)	59,01	0	56,13
C_2S (%)	9,38	78,64	11,3
C_3A (%)	10,31	13,19	9,81
C_4AF (%)	10,44	10,74	10,29
Fiziksel Özellik			
Yoğunluk (g/cm^3)	3,12	3,15	3,11
Özgül Yüzey -Blaine (cm^2/g)	5190	5050	4910
Mekanik Özellik - Basınç Dayanımı (MPa)			
2 günlük	32,9	2,0	31,2
7 günlük	48,0	2,2	44,7
28 günlük	55,3	3,2	53,4

Tablo 6'dan da görüldüğü gibi çimento türleri benzer kimyasal kompozisyona sahiptirler. K1 en fazla alit fazına sahip çimento türüdür. Erken dayanımlarda alit fazı çok önemlidir. Çimento inceliğindeki artış erken dayanımları artırmaktadır. Tablo 6'dan

K1 çimentosunun biraz daha ince olduğu da görülmektedir. Bahsedilen bu parametreler K1 çimento türü için en uygun seviyede olduğundan bu çimento dayanım açısından en yüksek değere sahiptir.

Daha önce de belirtildiği üzere K2 çimentosu atıktan oluşmuştur. Çimentolu yonga levha üretiminde kullanılan çimento türü CEM-II/B-M (P-L) 32,5R'dir. Bu çimento türü yüksek oranda silika kökenli mineral katkılar içermektedir. Bu nedenle gerek XRD gerekse polarize mikroskop görüntülerine göre bu çimentoda alit fazı, belit fazı ortamda yeterince serbest kireci bulamadığından oluşamamıştır. Belit fazı da çimentoya geç dayanım verdiğinden çimentonun dayanımı diğer ikisine göre oldukça düşüktür.

Son olarak referans farine % 5 ÇYLA katılarak üretilen K3 çimentosu mekanik özellikler bakımından K1'e göre kısmen daha düşük dayanım vermiş olsa da kimyasal özellikleri bakımından K1 çimentosuna benzerlik göstermektedir.

Sonuç

Bu deneysel çalışma sonucunda bir tesisin üretim atığı olan ve içeriğinde yaklaşık olarak %30 ahşap yonga ve %70 oranında hidrate olmuş çimento bulunan ÇYLAnın, başka bir sanayi dalı olan çimento üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla yapılan deneysel çalışma sonucunda klinker üretiminde tamamen ÇYLA atığı kullanıldığında oluşan klinkerde alit fazının oluşmadığı ancak %5, %10 veya %25 oranında farine ikame edildiğinde tipik bir klinker yapısının elde edilebildiği gerek XRD gerekse optik mikroskobisi yöntemleriyle gösterilmiştir. Daha sonra yine laboratuvar ölçeğinde çoklu pişirme yapılarak çimento üretilmiş ve üretilen bu çimentonun dayanımının referans çimentosuna benzer nitelikte olduğu da gösterilmiştir. Dolayısıyla, ÇYLA atığının belirli bir oranda gerek hammadde gerekse yakıt olarak çimento üretiminde tekrar kullanılabileceği görülmüştür.

Teşekkür

Bu çalışma Sanayi Bakanlığı ve Tepe Betopan firmalarınca San-Tez programı kapsamında 00682.STZ.2010-2 no'lu proje olarak desteklenmiştir. Yazarlar ayrıca TÇMB Ar-Ge Enstitüsüne deneylere verdikleri katkıdan dolayı teşekkür ederler.

Kaynaklar

[1] Worldbank (2014), http://www.worldbank.org/depweb/english/sd.html , son erişim tarihi, Kasım 2014.

[2] EUPAVE (2009), Concrete Roads: A Smart and Sustainable Choice, Brussels.

[3] CEMBUREAU (2009), Sustainable cement production: Co-processing of Alternative Fuels and Raw Materials in the Cement Industry , Brussels.

[4] Aggarwal, L.K., (1995), Bagasse-reinforced cement composites . Cement and Concrete Composites , Vol. 17 (2), pp. 107-112

[5] Olorunnisola, A.O. and Adefisan, A.O. (2007) , Trial Production and Testing of Cement-Bonded Particleboard from Rattan Furniture Waste . Wood and Fiber Science, Vol 34 (1), pp. 116-124.

[6] Okino, E.Y.A., de Souza, M.R., Santana, M.A.E., Alves, M.V.S. and Teixeira, D.E., (2004), Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood . Cement & Concrete Composites, Vol. 26 (6), pp. 729–734.

Yüzey İyileştirme Metotları Uygulanan Geri Kazanılmış Agregaların Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik Özelliklerine Etkisi

Erhan Güneyisi
Gaziantep Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 27310, Gaziantep
Tel: (0342) 3172410
E-Posta: guneyisi@gantep.edu.tr

Mehmet Gesoğlu
Gaziantep Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 27310, Gaziantep
Tel: (0342) 3172404
E-Posta: mgesoglu@gantep.edu.tr

Zeynep Algın
Harran Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 63000, Şanlıurfa
Tel: (0414) 3183000
E-Posta: zyilmaz@harran.edu.tr

Halit Yazıcı
Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35160 İzmir
Tel: (0232) 3017044
E-Posta: halit.yazici@deu.edu.tr

Öz

Bu bildiride, yüzeyleri iyileştirilen Geri Kazanılmış (GK) agregaların Kendiliğinden Yerleşen Betonların (KYB) reolojik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Laboratuar ortamında üretilen geleneksel beton numunelerin birincil (çeneli) ve ikincil (konik) kırıcı sistemi ile kırılması sonucunda Geri Kazanılmış İri (GKİ) agregalar elde edilmiştir. Bu agregaların özelliklerini iyileştirmek amacıyla 4 farklı iyileştirme yöntemi kullanılmıştır. Bunlardan birincisi geri kazanılmış agregaların asidik çözeltide bekletilmesi, ikincisi cam suyu solüsyonunda bekletilmesi, üçüncüsü çimento-silis dumanı şerbetinde bekletilmesi ve dördüncüsü ise iki aşamalı karıştırma yöntemleridir. GKİ agregalar kendiliğinden yerleşen beton karışımlarda % 100 doğal iri agrega yerine kullanılmıştır. Tüm karışımlarda su/bağlayıcı oranı ve çimento dozajı sabit kabul edilmiş olup, çimento miktarının %20'si oranında uçucu kül çimento yerine kullanılmıştır. Sıfıra yakın düşük akma gerilmesinden dolayı lineer olmayan kayma katılaşması davranışı gösteren GKİ agregalarla üretilen KYB'ların reolojik özelliklerini tanımlamak amacıyla geleneksel Bingham modeli yerine bu çalışmada Herschel-Bulkley modeli kullanılmıştır. GKİ agregalara uygulanan iyileştirme metotlarının KYB'ların kayma katılaşması davranışına etkisi reolojik analizler kullanılarak araştırılmıştır. Üretilen KYB'ların bariz bir kayma katılaşma özelliği göstermesinden dolayı Herschel-Bulkley modelinin yeterince iyi bir şekilde bu betonların reolojik özelliklerini tanımladığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, yüzey iyileştirme metotları ve özellikle cam suyu ile iyileştirmenin KYB'ların reolojik özelliklerini önemli bir miktarda iyileştirdiği görülmüştür.

***Anahtar sözcükler*:** Geri kazanılmış iri agrega, Kendiliğinden yerleşen beton, Reoloji, Yüzey iyileştirme yöntemleri.

Giriş

Dünya çapında kentsel alanlarda beton yapıların planlanmasında ve gereksinimlerindeki değişiklikler nedeniyle, büyük miktarda inşaat ve yıkıntı atıkları oluşmaktadır. Avrupa, Amerika ve Japonya'da yıllık olarak 900 milyon ton inşaat ve yıkıntı atığı oluştuğu tahmin edilmektedir (WBCSD, 2009). Büyük kentler için inşaat ve yıkıntı atıklarının yönetimi önemli bir problem olduğundan, çevre kirliliği ve sınırlı doğal kaynakların tüketimi açısından, inşaat ve yıkıntı atıklarının geri dönüşümü ve tekrar kullanımı tercih edilmektedir. İnşaat endüstrisinin doğal agregaya bağımlılığına bir alternatif sunmasından ötürü ve doğal agrega kaynaklarının kritik yetersizlik problemi nedeniyle, inşaat ve yıkıntı atıklarının GK agrega olarak geri dönüşümü önemli bir husustur. Amerika, Japonya, Avustralya ve pek çok Avrupa ülkeleri için inşaat ve yıkıntı atıklarında GK agrega üretimi ortak bir uygulama pratiğidir. Örneğin 2010 yılı verilere göre, Almanya, Birleşik Krallık, Hollanda, Fransa ve A.B.D.'de toplamda yaklaşık 286 milyon ton GK agrega üretilmiştir (Construction Materials Recycling Association , 2013; European Aggregates Association , 2012).

Genel olarak GK agregaların üretiminde iki aşamalı kırıcı sistemi kullanılmaktadır. Hedeflenen agrega boyutu geri kazanılmış agregaların kalitesini etkilemektedir (Etxeberria ve diğ., 2007; Hansen , 1985; Hansen and Narud , 1983; Hasaba ve diğ., 1981; Japanese researchers in BCSJ , 1978). Şekil 1'de görüldüğü gibi, doğal agrega yüzeyine yapışmış eski çimento harcı GK agregayı doğal agregadan ayıran bir unsurdur. Agregadaki sertleşmiş eski çimento harcının kalitesi ve miktarı direkt olarak GK agreganın fiziksel özelliklerini etkilemektedir (Etxeberria ve diğ., 2007; Padmini ve diğ., 2009; Kou ve Poon , 2010; Tam ve diğ., 2005; Tam ve Le, 2007; López-Gayarre ve diğ., 2009). Bu bağlamda, GK agrega doğal agregadan daha düşük yoğunluğa, daha yüksek su emme kapasitesine ve daha düşük dayanıma sahip bir agrega çeşidi olarak nitelendiril mektedir (Padmini ve diğ., 2009; Chakradhara Rao ve diğ., 2011; Katz , 2003; Tam ve Tam , 2007; Tabsh ve Abdelfatah, 2009). GK agreganın şekli ve dokusu esas itibariyle kırıcı tipine bağlı olup, betonun işlenebilirliğini de etkilemektedir (Rashwan and AbouRizk , 1997).



Şekil 1 Geri kazanılmış agrega.

Bazı araştırmalarda (Tattersall ve Banfill , 1983; Tattersall , 1973; Wallevik ve Geiker , 2007; Feys ve diğ., 2007) kendiliğinden yerleşen taze betonun reolojik davranışı Bingham modeli ile tanımlanmış olmasına karşın, son araştırmalar (Feys ve diğ., 2009; Feys ve diğ., 2008) gösteriyor ki, KYB'ların lineer olmayan kayma katılaşması

davranışına sahip olmasından dolayı Bingham modeli bu reolojik davranışı tanımlamada yetersiz kalmaktadır. KYB'nun reolojik özelliklerini daha iyi tanımlayan diğer matematiksel modellerlerin kullanılması gerektiği anlaşılmaktadır, zira Bingham modelinde düşük akma gerilmesinden sapmanın yanında bazen negatif akma gerilmesi sonucu oluşmaktadır (De Larrard ve diğ., 1998; Cyr ve diğ., 2000).

KYB üzerinde yapılan reolojik çalışmalar, Herschel-Bulkley modelinin kayma katılaşması davranışının modellenmesi konusunda tatminkar sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bu model ile akış indis değeri kullanılarak lineer ilişkiden farklılaşma sağlanmaktadır (Feys ve diğ., 2009; Feys ve diğ., 2008; De Larrard ve diğ., 1998). Böylece, Herschel-Bulkley modeli, KYB'nun kayma katılaşması davranışının reolojik modellemesinde ve akma gerilmesi değerinin yüksek bir tahminle yapılmasında kullanılmaktadır. Bu bildiride, lineer olmayan kayma katılaşması davranışını daha iyi tanımlamasından ötürü Herschel-Bulkley modeli kullanılarak, yüzeyleri iyileştirilen GK agregaların KYB'nun reolojik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. KYB'nun bu davranışı pratik anlamda önem arz etmektedir, zira betonun uygulama sahasında karıştırılması ve pompalanması gibi süreçlerinde, taze beton yüksek kayma hızında uygulanmaktadır. Bu yüksek kayma hızında, plastik viskozite ve kayma katılaşması davranışı, kayma gerilmesi üzerinde akma gerilmesine nazaran daha baskın olmaktadır. Bu reolojik davranışın pratikte gözardı edilmesi, yüksek boşaltma düzeylerinde betonun gerekli olan pompalanma basıncının daha az bir seviyede kullanılması sonucunu doğurarak, iş sahasındaki çalışanların yanlış yönlendirmesine sebebiyet verebilir (Feys ve diğ., 2009).

Bu bildiride yüzeyleri iyileştirilen GKİ agregaların KYB'ların reolojik davranışına etkisi araştırılmıştır. Böylelikle, GKİ agregaların KYB'larda pratik kullanımlarının reolojik anlamda hangi esaslara bağlı olacağı, hangi reolojik modellerin bu analizlerde daha gerçekçi sonuçlar vereceği, GKİ agregalara uygulanan iyileştirme metotlarının KYB'ların reolojik özelliklerini nasıl etkilediği ve model parametrelerinin nasıl değiştiği konuları incelenmiştir.

Malzeme ve Yöntem

Malzemeler

Bu çalışmada portland çimentosu, uçucu kül, doğal ince agrega, geri kazanılmış iri agrega ve süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Çimento olarak TS EN 197-1 standartlarına uygun portland çimentosu (CEM I 42.5N) kullanılmıştır. ASTM C 618 standardına göre F tipi uçucu kül Yumurtalık-Sugözü termik santralinden elde edilmiştir. Çimento ve uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Süperakışkanlaştırıcı olarak özgül ağırlığı 1.07 olan Polikarboksilik-eter türü akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Maksimum dane boyutu 4 mm olan doğal nehir kumu ve kırma kum kullanılmıştır. Özgül ağırlık ve su emme değerleri nehir kumu için 2.66 gr/cm^3 ve %0.55, kırma kum için ise 2.45 gr/cm^3 ve %0.92'dir. Laboratuvar ortamında hazırlanmış geleneksel beton numuneler, primer (çeneli) ve sekonder (konik) kırıcı sistemi kullanılarak, maksimum 16 mm çapında GKİ agregaya dönüştürülmüştür. 2007 Deprem yönetmeliğinde deprem bölgelerinde yapılacak tüm betonarme binalarda C20'den daha düşük dayanımlı beton kullanılamaz ifadesi yer aldığından dolayı, üretilen betonun karakteristik dayanımı 20 MPa olarak seçilmiştir (DBYBHY, 2007). 150×150×150 mm'lik betonlardan, iki aşamalı kırıcı sistemi kullanılarak geri

kazanılmış agregalar üretilmiştir. İlk aşamada bu betonlar, Şekil 2(a)'da görülen laboratuvar tipi çeneli kırıcıda, biri sabit diğeri hareketli iki çene arasında kırılarak Şekil 2(c)'de görüldüğü gibi parçalara ayrılmıştır. İkinci adımda ise, çeneli kırıcıdan çıkan malzemeler, Şekil 2(b)'de görülen laboratuvar tipi konik kırıcıda, koninin kendi ekseni etrafında dönmesi ve darbe etkisiyle kırılarak istenilen dane boyutuna getirilmiştir (Şekil 2(d)). Böylelikle, çeneli kırıcının malzemeyi sıkıştırarak kırmasıyla, yapraksı olan agrega daneleri, konik kırıcının ezme ve darbe etkisiyle, kübik bir forma dönüştürülmüştür.

Tablo 1 Çimento ve Uçucu Külün Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri.

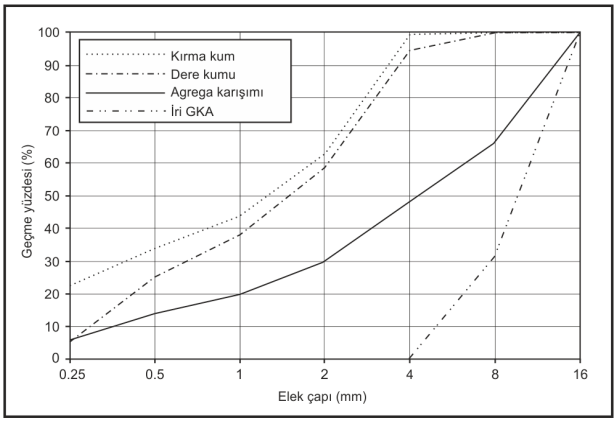
Kimyasal Analiz	**Portland Çimentosu**	**Uçucu Kül**
CaO (%)	64.35	4.24
SiO_2 (%)	20.08	56.2
Al_2O_3 (%)	4.63	20.17
Fe_2O_3 (%)	2.84	6.69
MgO (%)	2.07	1.92
SO_3 (%)	2.85	0.49
K_2O (%)	-	1.89
Na_2O (%)	-	0.58
Kızdırma Kaybı (%)	2.56	1.78
Fiziksel Özellikler		
Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	3.18	2.25
Özgül Yüzey (cm^2/g)	3183	2870



Şekil 2 İki aşamalı kırıcı sistemi: (a) primer kırıcı (çeneli), (b) sekonder kırıcı (konik), (c) çeneli kırıcıdan elde edilen beton parçalar ve (d) konik kırıcıdan elde edilen geri kazanılmış agregalar.

Konik kırıcıdan çıkan GK agregalar elek analizine tabi tutulmuştur. Kullanılan GK agreganın, doğal agreganın granülometri eğrisine uyumlu olabilmesi için, GKİ agrega ağırlığının %70'nin 8-16 mm ve %30'nun 4-8 mm boyutunda olması gerektiği

belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan tüm agrega tipleri ve beton karışımda kullanılan agrega karışımına ait granülometri eğrisi Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3 Agregaların granülometri eğrisi.

Üretilen Geri Kazanılmış İri Agregalara Uygulanan Yüzey İyileştirme Yöntemleri

Elde edilen GKİ agregaların yüksek su emme kapasitesi gibi fiziksel özelliklerini iyileştirmek amacıyla 4 farklı iyileştirme yöntemi kullanılmıştır. Bunlardan birincisi GKİ agregaların hidroklorik asit (HCl) çözeltisinde bekletilmesi, ikincisi cam suyu (CS) solüsyonunda bekletilmesi, üçüncüsü çimento-silis dumanı (ÇSD) şerbetinde bekletilmesi ve dördüncüsü ise iki aşamalı karıştırma (İAK) yöntemidir. GKİ agregalara uygulanan bu yüzey iyileştirme metotları aşağıda özetlenmiştir.

- GKİ agregalar oda sıcaklığında 24 saat HCl (hidroklorik asit) çözeltisinde bekletilmiştir. Daha sonra asidik çözeltiyi kaldırmak için GKİ agregalar saf suda bekletilmiştir.
- GKİ agregalar 30 dakika cam suyu solüsyonunda bekletilmiştir. Solüsyondan alınan agregalar fazla solüsyonun sızması için 10 dakika askıda bekletilmiş ve daha sonra agrega tanelerinin birbirine yapışmasını önlemek amacıyla yaklaşık 1 saat etüvde kurutulmuştur.
- GKİ agregalar çimento-silis dumanı şerbeti içerisinde 30 dakika bekletildikten sonra geniş elekler üzerine serilmiştir. Daha sonra bu agregalar 28 gün suda bekletilmiştir.
- İki aşamalı karıştırma yönteminde, bir miktar su ve çimento ile uçucu külün 1 dakika boyunca karıştırılmasıyla elde edilen sulu karışıma GKİ agregalar ilave edilmiştir. Agrega boşluklarının ve yüzeylerinin bu sulu karışımla kaplanmasını sağlamak amacıyla ek olarak 1 dakika daha karıştırma işlemi yapılmıştır. Daha sonra karışım oranları dahilinde kalan tüm malzemeler karışıma eklenmiş ve iki dakika daha karıştırma işlemine devem edilmiştir.

Karışım Özellikleri

Elde edilen GKİ agregalara uygulanan yüzey iyileştirme yöntemlerinin kendiliğinden yerleşen betonun reolojik özelliklerine etkisini araştırmak için KYB'lar üretilmiştir. Tüm karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0.38 ve toplam bağlayıcı miktarı 550 kg/m^3 olarak

sabit tutulmuş olup, uçucu kül toplam bağlayıcı miktarının %20'si oranında kullanılmıştır. Doğal ince agrega olarak nehir kumu ve kırma kum kullanılmıştır. Üretilen KYB'ların karışım oranları ve 28 günlük küp basınç dayanımları Tablo 2'de verilmiştir. Çimento ve uçucu kül ile GKİ agrega ilk olarak kuru olarak karıştırılmıştır. Daha sonra nehir kumu ve kırma kum ilave edilmiştir. Su ve süperakışkanlaştırıcı karıştırılarak karışıma aşamalı olarak eklenmiş ve yaklaşık olarak 3 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra hava kabarcıklarının dışarı çıkmasını sağlamak amacıyla beton karışım 1 dakika bekletilmiş ve son olarak karışım 1-2 dakika daha karıştırılarak karışım işlemi tamamlanmıştır.

Tablo 2 KYB'ların Karışım Oranları ve Basınç Dayanımları

Karışım Adı	w/b	Çimento	Uçucu Kül	Su	SA	İnce Agrega		GK İri Agrega		f_c (MPa)
						Doğal Kum	Kırma Kum	8-16 mm	4-8 mm	
		(kg/m^3)								
GKA	0.38	440	110	209	9.35	523.4	224.6	493.5	211.5	53.1
GKA -HCl	0.38	440	110	209	9.35	523.4	224.6	495.9	212.8	55.4
GKA -CS	0.38	440	110	209	7.70	524.8	225.2	476.4	204.6	57.9
GKA -İAK	0.38	440	110	209	9.35	523.4	224.6	493.5	211.5	59.9
GKA -ÇSD	0.38	440	110	209	9.35	523.4	224.6	444.6	190.8	50.1

Not:
GKA: Geri kazanılmış agrega ile üretilen beton karışımı, GKA -HCl: Hidroklorik asit ile iyileştirilen geri kazanılmış agrega ile üretilen beton karışımı, GKA -CS: Cam suyu ile iyileştirilen geri kazanılmış agrega ile üretilen beton karışımı, GKA -İAK: İki aşamalı karıştırma yöntemi uygulanan beton karışımı, GKA -ÇSD: Çimento-silis dumanı şerbeti ile iyileştirilen geri kazanılmış agrega ile üretilen beton karışımı, SA: Süperakışkanlaştırıcı, f_c: 28 günlük basınç dayanımı.

Deneyler

Üretilen KYB'ların reolojik davranışını belirlemek için Şekil 4'de gösterilen ICAR reometre test cihazı kullanılmıştır. KYB karışımı 305 mm çapına sahip bir kabın içerisine dökülmüştür. Kanadın altında ve üstünde 87.5 mm'lik bir yükseklik kalacak şekilde, 127 mm çapında ve yüksekliğindeki dört bıçaklı kanat, taze beton numunenin merkezine yerleştirilmiştir. Her bir karışım için akış eğrisi, kırınım hızının ve süresinin, nokta sayısının, nokta süresinin, başlangıç hızı ve son hız değerlerinin sisteme girilmesi ile elde edilmiştir. Test başlama detayları, 0.50 dev/s sabit hızda 20 saniyelik ön kayma periyodunu izleyen 0.50 dev/s'den 0.05 dev/s'ye kademeli alçalan 8 akış eğrisi noktasını içerir. Dört bıçaklı kanat ilk olarak 20 s'lik kırınım periyodunda 0.5 dev/s hızda dönmektedir. Tork ölçümleri 0.50 dev/s'den 0.05 dev/s'ye kademeli alçalan 8 dönme hız aralığı için kaydedilmiştir. Böylece, dönme hızı ve buna karşılık gelen tork değerleri, KYB karışımlarının reolojik davranışlarını tanımlayan gerekli akış eğrilerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Tablo 3 'den de görüldüğü üzere, Denklem (1) ve (2)'de Bingham ve Herschel –Bulkley modellerinin denklemleri verilmiş olup, tork ve dönme hızının bu değerleri, karşılaştırma amaçlı olarak geçerli olan temel reolojik birimler e dönüştürülmüştür. Bu dönüştürme, Bingham malzemeleri için geçerli olmasına rağmen, Reiner –Riwlin denklemi ile yapılabilir (Tablo 3 , Denklem (3) ve (4)). Sonuç olarak, lineer olmayan reolojik eğrilik bu metodu geçersiz kılmakta olup, Reiner –Riwlin denkleminin lineer olmayan malzemeler için kullanımının Herschel–Bulkley modeli ile mümkün olduğu belirtilmiştir (Heirman ve diğ., 2008). Bu modelin dönüşüm denklemleri Tablo 3 'de Denklem (5)-(7)'de verilmiştir.



Şekil 4 Reometre cihazı.

Tablo 3 Bingham ve Herchel -Bulkley Modelleri ve Dönüşüm Formülleri.

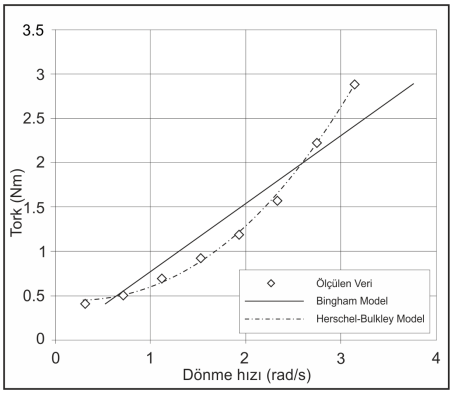
	Bingham modeli		Herschel–Bulkley modeli	
Denklemler	$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}$	(1)	$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$	(2)
	τ = kayma gerilmesi (Pa) τ_0 = akma gerilmesi (Pa) μ = plastik viskozite (Pa s)		$d\gamma/dt$ = kayma oranı (1/s) K =kıvam faktörü (Pa s^n) n =akış indisi	
Dönüşüm Formülleri	$\tau_0 = \frac{G}{4\pi h}\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2}\right)\frac{1}{\ln(R_o/R_i)}$	(3)	$\tau_0 = \frac{G_{HB}}{4\pi h}\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2}\right)\frac{1}{\ln(R_o/R_i)}$	(5)
	$\mu = \frac{H}{8\pi^2 h}\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2}\right)$	(4)	$K = \frac{H_{HB}}{2^{2n+1}\pi^{n+1}h} n^n \left(\frac{1}{R_i^{2/n}} - \frac{1}{R_o^{2/n}}\right)^n$	(6)
			$n = J$	(7)
	G = tork ve dönme hızı arasındaki lineer ilişkiden elde edilen 'akma torku' (Nm) h = betonon konulduğu silindir kabın yüksekliği (m) R_i = iç yarıçapı (m)		R_o = dış yarıçap (m) H = tork ve dönme hızı arasındaki lineer ilişkiden elde edilen eğim (Nm s) G_{HB}, H_{HB}, J = tork-dönme hızı ilişkisi için Herschel–Bulkley modeli parametreleri	

Bulgular ve Tartışma

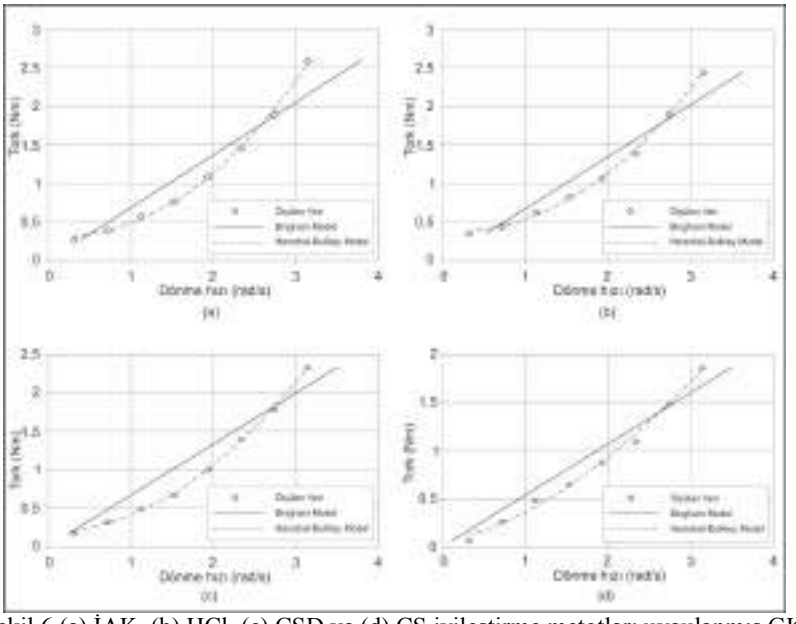
Kendiliğinden yerleşen taze betonun döküm ve yerleşmesi sırasında performansına etki eden en önemli özelliğin, betonun reolojik davranışı olduğu söylenebilir. Akışkan harç durumundaki iri agrega veya akışkan çimento hamuru durumundaki kum taneleri ayrışmaya uğramadan homojen dağılımlarını korumalıdır. Bu açıdan reolojik davranışın, agregaların boyutuna, türüne ve içeriğine bağlı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir .

Şekil 5'de tork-dönme hızı arasındaki ilişki kontrol karışımı için verilmektedir. KYB'nun kayma katılaşması davranışı açık bir şekilde görülmekte olup, bu lineer olmayan reolojik davranışın modellenmesinde Herschel-Bulkley modelinin Bingham modelinden çok daha iyi bir şekilde ölçüm sonuçlarıyla uyum sağladığı anlaşılmaktadır. İAK, HCl, ÇSD ve CS iyileştirme metotları uygulanmış GKİ agregalar ile üretilmiş KYB karışımları üzerinde yapılmış reolojik bulgular ve tork-dönme hızı arasındaki ilişkiler Şekil 6'da sunulmuş olup, bu ilişkilerin tümünde kayma katılaşması davranışı gözlemlenmiştir. Bu lineer olmayan davranışın lineer Bingham modeli yerine, Herschel - Bulkley modeli kullanılarak çok daha hassas bir şekilde tanımlanabileceği görülmektedir. Bu araştırma kapsamında hazırlanan KYB karışımlarının reolojik davranışlarını tanımlamada kullanılan Herschel-Bulkley modellerinin detayları Şekil

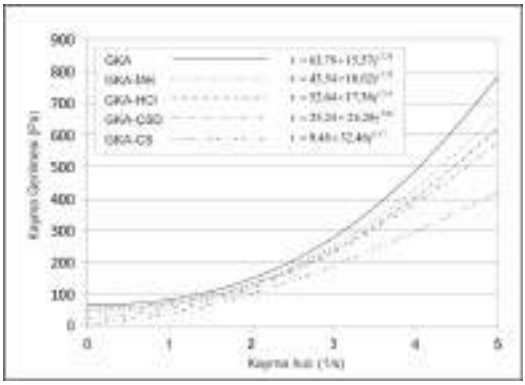
7'de verilmekte olup, bu modellerin temel aldığı kayma gerilmesi ile kayma hızı arasındaki ilişkiler sunulmuştur. Uygulanan yüzey iyileştirme yöntemlerinin KYB karışımlarının reolojik özelliklerini etkilediği ve kontrol karışımına kıyasla kayma katılaşmasını azaltarak pratik uygulamalar açısından faydalı bir etki gösterdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 5 Kontrol karışımı için tork-dönme hızı arasındaki ilişki.



Şekil 6 (a) İAK, (b) HCl, (c) ÇSD ve (d) CS iyileştirme metotları uygulanmış GK agregalar ile üretilmiş KYB karışımları için tork-dönme hızı arasındaki ilişkiler.



Şekil 7 Tüm KYB karışımları için Herschel-Bulkley modelini temel alan akış eğrileri.

Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı yüzey iyileştirme yöntemleri uygulanan GKİ agregaların, hazırlanan KYB karışımlarının reolojik özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Üretilen KYB'ların bariz bir kayma katılaşma özelliği göstermesinden dolayı Herschel-Bulkley modelinin yeterince iyi bir şekilde bu betonların reolojik özelliklerini tanımladığı sonucuna varılmıştır. Yüzey iyileştirme metotları ve özellikle cam suyu ile iyileştirmenin KYB'ların reolojik özelliklerini önemli bir miktarda iyileştirdiği görülmüştür. Yüzey iyileştirme yöntemlerinin uygulanması, Herschel-Bulkley modelinde akış indisi değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Bu bağlamda, reolojik kayma katılaşması davranışında bir azalma sağlanarak, GKİ agregaların pratik anlamda KYB karışımlarında kullanılabilirliği, bu betonların daha az enerji ve kapasiteyle proses edilebilmeleri konusunda faydalı sonuçlar elde edilmiştir.

Kaynaklar

Chakradhara Rao , M., Bhattacharyya , S., S. Barai (2011) Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. Mater Struct, Vol. 44, No. 1, pp. 205-220.
Construction Materials Recycling Association. Concrete Recycling.org; 2013.
Cyr, M., Legrand , C., M. Mouret (2000) Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives. Cem Concr Res , Vol.30, pp. 1477–1483.
DBYBHY, (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi
De Larrard, F., Ferraris , C.F., T. Sedran (1998) Fresh concrete: a Herschel –Bulkley material. Mater Struct , Vol.31, pp. 494–498.
European Aggregates Association , (2012) Annual review 2011 –2012. Brussels, Belgium.
Etxeberria , M., Vazquez , E., Mari , A., M. Barra (2007) Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. Cem Concr Res , Vol. 37, No. 5, pp. 735-742.
Feys, D., Verhoeven , R., G. De Schutter (2007) Evaluation of time independent rheological models applicable to fresh self -compacting concrete . Appl. Rheol. , Vol. 17, No. 5, pp. 56244(1-10).

Feys, D., Verhoeven, R., G. De Schutter (2008) Fresh self-compacting concrete, a shear thickening material. Cement and Concrete Research, Vol. 38, pp. 920–929.
Feys, D., Verhoeven, R., G. De Schutter (2009) Why is fresh self-compacting concrete shear thickening?. Cement and Concrete Research, Vol. 39, pp. 510–523.
Hansen, T.C. (1985) Elasticity and drying shrinkage of recycled aggregate concrete. ACI J, Vol. 82, No. 5, pp. 648-652.
Hansen, T.C. and H. Narud (1983) Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. Concr Int, Vol. 5, No. 1, pp. 79–83.
Hasaba S, Kawamura M, Torik K, Ta kemoto K. Drying shrinkage and durability of the concrete made of recycled concrete aggregate. Transactions of the Japan Concrete Institute 1981;3:55–60.
Heirman, G., Vandewalle, L., D. Van Gemert An analytical solution of the Couette inverse problem for shear thickening SCC in a wide-gap concentric cylinder rheometer, Paper accepted for publication in Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics.
Japanese researchers in BCSJ, (1978) Study on recycled aggregate and recycled aggregate concr ete. Building Contractors Society of Japan Committee o disposal and reuse of concrete construction waste, summary in Concrete Journal, Japan, Vol. 16, No. 7, pp. 18–31 (in Japanese).
Katz, A. (2003) Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. Cem Concr Res, Vol. 33, No. 5, pp. 703–711.
Kou, S.C. and C.S. Poon (2010) Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates. Cem Con cr Compos, Vol. 32, No. 8, pp. 649–654.
López-Gayarre, F., Serna, P., Domingo-Cabo, A., Serrano-López, M.A., López-Colina, C. (2009) Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. Waste Manage, Vol. 29, no. 12, pp. 3022–3028.
Padmini, A.K., Ramamurthy, K., Mathews, M.S. (2009) Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. Constr Build Mater, Vol. 23, No. 2, pp. 829–836.
Rashwan, S. and S. AbouRizk (1997) Research on an alternative method for reclaiming leftover concrete. Concr Int, Vol. 19, No. 7.
Wallevik, O.H. and M.R. Geiker (2007) Course on the Rheology of Cement Based Particle Suspensions, DTU, Copenhagen, Lecture notes.
WBCSD, (2009). The cement sus tainability initiative: recycling concrete. In: Klee H, editor. Geneva (Switzerland): World Council for Sustainable Business Development, pp. 1–42.
Tabsh, S.W. and A.S. Abdelfatah (2009) Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. Constr Build Mater, Vol. 23, No. 2, pp. 1163–1167.
Tam, V.W.Y., Gao, X.F., Tam, C.M. (2005) Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. Cem Concr Res, Vol. 35, No. 6, pp. 1195–1203.
Tam, V.W.Y. and K.N. Le (2007) Aggregate testing using 2nd-, 7th- and 10th-order interpolation polynomials. Resour Conserv Recycl, Vol. 52, No. 1, pp. 39–57.
Tam, V.W.Y. and C.M. Tam (2007) Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. J Mater Sci, Vol. 42, No. 10 pp. 3592–3602.
Tattersall, G.H. and P.F.G. Banfill (1983) The Rheology of Fresh Concrete, Pitman, London.
Tattersall, G.H. (1973) The rationale of a two-point workability test. Mag. Concr. Res., Vol. 25, pp. 169–172.

Uzun Süre Hizmet Veren Beton Yol Kaplamalarının Temel Malzemesi Olarak Yerinde Yeniden Kullanılması: Doğu Karadeniz Bölgesi Uygulamaları

İnş. Yük. Müh. MuhammetÇELİK, Doç.Dr. Muhammet VefaAKPINAR
Trabzon İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü
Tel:(0462) 334 12 06
E-Posta: m.celik53@gmail.com

Öz

Karadeniz Bölgesi köy yollarında alttemel ve temel eksikliği nedeniyle bölgede yapılan sathı kaplamalar çok kısa ömürlü olmaktadır ve birçok köyde birinci yılını doldurmadan hizmet dışı kalmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların ise sathi kaplamalardan biraz daha uzun süre hizmet verdiği, ancak maliyetlerinin yüksek olduğu ve bir süre sonra özellikle alttemel/temel eksikliği nedeniyle bozulduğu gözlemlenmiştir. Bu makalede arazi çalışmalarında bölgede yaklaşık 25 yıl önce yapılan beton yol kaplamaların (rijit) bazılarının teknik özellik olarak yeterli olmamasına rağmen halen bakım onarım gerekmeksizin hizmet verdiği görülmüştür. Rijit kaplamaların bölgede ortaya çıkan ulaşım sorunlarına daha iyi cevap verdiği, uzun hizmet süresi sonunda (20 yıl ve üstü) rijit kaplamaların üzerinde oluşan bozulmaların ulaşıma engel oluşturmadığı ancak konforu azalttığı görülmüştür.Bozulan kaplama tiplerinden asfalt esnek kaplamaların, sökülüp yeniden yapılması gerekmektedir. Teorikte bitümlü malzeme tekrar kullanılabilmektedir, ancak Karadeniz Bölgesi köy yolları için ekonomik ve uygulanabilir olmaması nedeniyle pek tercih edilen bir metot değildir. Öte yandan rijit kaplamalar bölgede konforu çok azaltacak kadar bozulduğunda, üzerine yapılacak kaplama tiplerine alttemel ve temel tabakası olarak tekrar kullanılmaktadır. Alttemel ve temel olarak kullanılan eski rijit kaplamalar oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan mekanistik ampirik çalışmaları ile; temel malzemesi eski rijit kaplama olan esnek kaplamalar, temel malzemesi plentmiks olan esnek kaplamalardan daha dayanıklı ve uzun ömürlü olduğu görülmüştür. Ayrıca ilk yapım ve 30 yıllık proje ömrü süresince maliyet açısından değerlendirildiğinde rijit ve kompozit yol üstyapıların asfalt esnek üstyapılardan daha az maliyetli oldukları görülmüştür. Son olarak rijit ve kompozit üstyapı kaynakların daha uzun ve görev süresi bittikten sonra yerinde tekrar kullanım imkânı sağladığından sürdürülebilir özellik taşımaktadır.

Anahtar sözcükler: Rijit, Esnek, Kompozit, Köy yolları, Sürdürülebilirlik

Giriş

Günümüzde doğal kaynakların tükenmesi gibi sıkıntılarda boy göstermeye başlamıştır. Bu nedenle doğal kaynakların daha faydalı kullanılması için bütün inşaat sektörlerinde olduğu gibi yol inşaatı sektöründe de sürdürülebilir malzeme kullanımını yaygınlaştırma çalışmaları başlatılmıştır. (Temren, 2011) Türkiye'de inşaat işlerinin önemli bir kısmı ulaşım sektöründe özellikle karayolu yapımında kullanılmaktadır. Bu nedenle sürdürebilir malzeme ihtiyacı yol yapımında oldukça ön plana çıkmaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğünün 2013 Bütçesi 6.9 Milyar Dolardır. 2014 Bütçesi ise 7.1 Milyar dolar olmuştur (www.kgm.gov.tr) Her geçen yıl yol yapım bakım ve onarım maliyetleri de artmaktadır. İllerde Karayollarının yanı sıra Belediyeler, Özel İdareler ve Orman Müdürlükleri tarafından da yollar yapılmakta ve bakım onarım sağlanmaktadır. Bu denli cidi maliyetlerin sürdürülebilir malzemeden olması gelecek nesillere kaynak aktarımı ve doğanın korunması için önemli bir kazanç sağlayacaktır.

Yol yapımının her aşamasında sürdürülebilir malzemeler kullanılarak hem maliyetlerin azalmasında hem de malzemelerin daha randımanlı kullanılması sağlanabilir. Bunun için projelendirme aşamasında karar verilirken farklı alternatiflerin değerlendirilmesi gerekmektedir. Karadeniz Bölgesi Köy Yollarında projelendirme aşamasında bu tarz önlemler açısından güzel bir örnek teşkil etmektedir. Yol üstyapısında, esnek kaplama alternatifleri olarak karşımıza rijit (beton) kaplama ve kompozit kaplama çıkmaktadır. Bölgede köy yollarında 3 kaplama tipi ile yapılmış yollar bulunmaktadır. Bölgede 20-25 yıllık rijit kaplamalar halen daha hizmet vermekte olup beton yolların servise açık olması bölgenin şartlarına dayanıklılığını göstermektedir. Bunun yanı sıra bölgede bazı rijit kaplamalar zaman ile oluşan bozulmalardan dolayı sürüş konforunu yitirmiştir. Bu yollar üzerine yapılan ortalama 5-7 cm binder kaplama ile oluşturulan kompozit kaplamalar, gayet konforlu sürüş imkânı sağlamaktadır.

Karadeniz Bölgesinde Esnek ve Rijit Kaplamaların Sürdürülebilirlik Açısından Karşılaştırılması

Türkiye'nin en uzun köy yolu ağına sahip bölgesi Karadeniz Bölgesidir. Bölgede köy yolu ağı diğer bölgelere göre oldukça fazla olup yol ağının uzunluğu nedeniyle istenilen kalitede ve kalınlıkta alt temel veya temel malzeme dökülememektedir. Özellikle bölgenin fiziki şartları nedeniyle köy yollarında oldukça fazla bakım onarım veya yeniden yapım ihtiyacı duyulmaktadır. Bakım onarım ve yeniden yapım ihtiyacı tükenen kaynakların kısa vadede tekrar yol üstyapısı yapımında kullanılmasına neden olmaktadır. Rijit kaplamalar gelen trafik yükünü geniş alana yayarak ilettikleri için, esnek kaplamaya oranla temel ve alttemel ihtiyacı daha az duymaktadır. (Yeğinobalı, 2009) Bölgenin köy yollarında birçok yerde rijit kaplama uygulaması görülmektedir. Bu kaplamalar yaklaşık 30 senedir bakım onarım ihtiyacı duymadan hizmet vermeye devam etmektedir. Türkiye'nin en fazla rijit kaplama köy yolu ağı yine Karadeniz Bölgesinde bulunmaktadır (www.tuik.gov.tr). Bölgenin köy yollarında yağışlı iklim yapısı ve soğuk hava koşulları nedeniyle köy yollarında bozulmaların fazlalığı ve geri dönüşüm maliyetlerinin oldukça yüksek olmasına neden olmaktadır. Bölgede genellikle esnek kaplamanın ekonomik ömrünü bitirdiği birçok yolda, esnek kaplama kaldırılarak atıl halde depolanmakta veya çeşitli atık depolama sahasına dökülmektedir. Bölgede kullanılan rijit kaplamaların bozulmaları durumunda genellikle yolda alttemel olarak kullanılmakta böylelikle sağlam bir altyapı oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra çimento içerisinde uçucu kül gibi atık malzemeler kullanılır. Bu durum beton yolların doğaya kirletecek atık malzemelerin değerlendirilmesini sağlamaktadır.

Yapılan Çalışmalar

Arazi Çalışmaları

Bölgede Köy yollarında kullanılmış rijit kaplamaların durumları hakkında bilgi edinebilmek için 2013 yılının haziran ayında Trabzon İli Merkez İlçe, Zafanoz caddesi üzerinden ve bu caddeye bağlanan 20 yıllık Bulak köyü soğuksu mevki yolu üzerinden 20 adet silindir karot numune alınmıştır (Çelik, 2014). Zafanoz caddesi mücavir alan içerisinden başlayarak, Bulak, Çilekli, Kavala, Dolaylı, İncesu, Yeşilyurt, Yeşilbük, Esenyurt, Pınaraltı ve Çağlayan mahallelerine (Büyükşehir olmadan önce Köy) ulaşım sağlayan bir grup köy yoludur. Yolun trafik yoğunluğu diğer köy yollarına göre oldukça fazladır. Ayrıca yol Trabzon Maçka Gümüşhane Karayolunun alternatifi durumundadır. Yolun bir kısmı vatandaşın işçiliğini yaptığı beton kaplama lardan oluşmaktadır.Numune alınan yerlerde yol kalınlığı 12-20 cm arası ölçülmüştür. Genelde çatlak görülen yerlerden ve tahmini tekerlek yükünün bineceği yerlerden 10 cm çapında silindir numune ler alınmıştır. Numunelerin 2 tanesi kalınlığı 10 cm altında çıktığı için, bir adet numunede karot makinesinden çıkartılırken ikiye ayrıldığı için teste tabi tutulmamıştır. Geri kalan 17 silindir numune basınç dayanım testi yapılması için laboratuar ortamına getirilmiştir.

Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modeller

Sonlu elemanların beton ve asfalt kaplamlardaki uygulamaları son 20 yıldır geniş bir kullanım alanı kazanmıştır. (Akpınar, 2008), (Akpınar, 2001), (Akpınar, Romanoschi, 2003), (Akpınar, Özcanan, Zandi, Karpuz, Mahdizadeh, Akpınar, 2010), (Akpınar, Hancock, Hossain, Gisi, 2001), yaptıkları çalışmalarda yol kaplamlarındaki gerçek trafik yüklemleri altındaki birim şekil değiştirme ve gerilmeleri sonlu elemanlar programları kullanarak gerçek değerlere yakın sonuçlar bulmuşturlar.

ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak, Şekil.2'de gösterildiği gibi arazide veriler ile elde edilmiş rijit kaplamanın kompozit kaplama haline getirilmiş hali tasarlanmıştır. Bunun yanı sıra aynı programda ideal bir bitümlü sıcak karışım ile yapılmış esnek kaplama tasarlanmıştır. Ancak karşılaştırma yapabilmek için tasarımlarda ortak kabuller yapılmış ve mümkün mertebe gerçek değerler kullanılmaya çalışılmıştır.

Beton üç fazlı anizotropik gevrek elastik malzeme olarak tanımlanır. Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak köy yollarında rijit ve esnek kaplamaları modellerken, programa elastisite modülü, poisson oranı ve birim hacim ağırlığı girilmiştir. Rijit kaplamalarda tasarım için kullanılan elastisite modülleri araziden alınan numunelerin basınç dayanım deneyi sonucu elde edilmiş verilerine göre belirlenmiştir.

Çalışmamızda karayolları genel müdürlüğü fenni şartnamesi (AASHTO) dâhil yol şartnamesine ve Karadeniz bölgemizde sıkça karşılaştığımız esnek üstyapı kesiti göz önünde bulundurularak esnek üstyapısı modellenmiştir. L. Gevrek (Gevrek, 2008) tarafından hazırlanan "Yol Katmanlarında Meydana Gelen Gerilme Dağılımının Ansys Bilgisayar Programın İle Nonlineer Sonlu Eleman Analizi" konulu yüksek lisans tezinde kullanılan elastisite modülü, poisson oranı ve birim hacim ağırlığı bu makale kapsamında yapılan tasarımda kullanılmıştır. S. Özcanan ve M. V. Akpınar tarafından yayınlanan "Esnek Üstyapılarda Kritik Tekerlek ve Aks Konfigürasyonların Mekanistik Analizlere Göre Tespit Edilmesi" adlı makalede, esnek üstyapının katmanlarında kullanılan elastisite modülleri, poisson oranları ve birim hacim ağırlıkları, makale içerisinde kullanılan değerler ile örtüşmektedir. (Özcanan, Akpınar, 2014) Bu bilgiler ışığında hazırlanan modelde şu kabuller yapılmıştır.

1. Tasarım Yükü: Yasal tek dingil yükü olan 11.5 ton alınmıştır (Karayolları, 1997). Tekerlekler çift tekerlek alınmıştır. Yani bir dingilde 4 tekerlek kullanılmıştır. Tekerleklerin kaplamaya temas eden yüzey alanı araz iden alınan 30 verinin ortalaması olarak 10*30 cm yani 300 cm² girilmiştir.
2. Altyapısı bitmiş ham yolda taban zeminin özellikleri, Karadeniz Bölgesi köy yollarında değişiklik gösterebilmektedir. Kimi yerlerde sağlam kaya blokları kimi yerlerde sıkışmış CBR'ı yüksek kayalar kimi yerlerde ise zayıf zemin türleri görülmektedir. Tasarım sırasında kritik olan zayıf zemin üzerine tasarım yapılmıştır. Bu nedenle zayıf zeminin elastisitemodülü50 MPa alınmıştır. Birim hacim ağırlığı 2200 kg/m³, poisson oranı 0,3 alınmıştır. Kırma taş ile hazırlanan temel için, plentmiks temelin bilgileri girilmiştir. Bitümlü sıcak karışım olarak hazırlanan kaplama tasarımlarında binder tabakası elastisite modülü 3000MPaplentmiks temel elastisite modülü 600 MPa Alınmıştır. İki katmanında poisson oranı 0,35 alınmıştır. Esnek kaplama birim hacim ağırlığı, 2400 kg/m³, plentmiks temelin birim hacim ağırlığı 2200 kg/m³ alınmıştır (Gevrek, 2008), (Özcanan, Akpınar, 2014). Arazi çalışmaları sonucu beton C12/15 basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle beton modellenirken C12/15 değeri olan 25800 alınmıştır. Beton birim hacim ağırlığı 2400 kg/m³ ve poisson oranı 0,2 alınmıştır (Pintea, Traian 2012).
3. Plakların kalınlıkları: Zayıf zemin 30 cm sabit. Üstünde bulunan kırma taş veya beton temel 15 veya 20 cm. En üst bitümlü sıcak karışımdan yapılan kaplama ise sıkıştırılmış hali ile5 veya 7 cm alınmıştır. Plaklar X yönünde 100 cm Z yönünde 100 cm olarak düzenlenmiştir.
4. Granüller malzemeyi yans ıtan "Solid 186" element tipi ile alttemel, temel ve bitümlü sıcak karışım modellenmiştir. Taban zemin "Solid 45" ile modellenmiştir. Beton kaplama " Solid 65 Concrete "olarak modellenmiştir. Malzemeler tamamen elastik kabul edilerek statik çözümlemeleri yapılmıştır.Taban zemin altı plak alanı tamamı ankastre mesnet ile sabitlenmiştir.

Maliyet Karşılaştırması

Bu bölümde, bölgede uygulanan esnek kaplama ile kompozit kaplamanın toplam hizmet süresi boyunca maliyetlerinin karşılaştırılmaları verilmiştir. Maliyet hesaplanırken, ilk yapım maliyetine, bakım onarım ve yeniden yapım maliyeti de hesaba eklenecektir. Hizmet süresi boyu maliyet hesabı yapılacak olan kompozit kaplamalar eski rijit kaplamlardır. Bu nedenle ilk yapım maliyeti olarak rijit kaplama verilecektir. Maliyet hesapları 2013 birim fiyatlara göre hazırlanmıştır. Analizler Trabzon ili konkasör veya plente ortalama 25 km mesafede bir köy yolu için düzenlenmiştir. Bitüm, Batman Rafinerisinden 654 km mesafeden nakledilecek şekilde hesaplanmıştır. Rijit üstyapılar hakkında Karayolları Genel Müdürlüğü'nün hali hazırda yayınlamış olduğu bir yapım rehberi bulunmamaktadır. Ayrıca Mülga Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü veya benzeri kurumlarında yayını olmadığından her il hatta ilçe ve köylerde farklı yöntemler ile rijit üstyapı yapmaktadır. Esnek üstyapılar içinde farklı uygulamalar mevcuttur. Bu nedenle Karadeniz Bölgesi köy yollarında uygulanan hem rijit hem de esnek üstyapıya ait maliyet analizleri çıkartılırken bölgede uygulanan plaka kalınlıklarının ortalamas ı alınmıştır. Bu değerler Tablo.1'de verilen AASHTO'ya ait 3-10 milyon tekerrür sayısına sahip plaka kalınlıkları ile örtüşmektedir (AASHTO, 1986)

Tablo.1 Dingil Yüküne göre Üstyapı kalınlıkları.

Esnek Üstyapı	**T8,2: 8,2 tonluk eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısı - Yolun hizmet ömrü boyunca**										
Üstyapı (cm)	**3-10 Milyon**	**10-20 Milyon**	**20-30 Mil.**	**30-40 Milyon**	**40-50 Milyon**	**50-65 Milyon**	**65-80 Milyon**	**80-100 Milyon**	**100-160 Milyon**	**160-250 Milyon**	**>250 Milyon**
Aşınma	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Binder	8	6	6	6	7	7	7	8	8	8	8
Bitümlü Temel	0	8	9	10	10	11	12	12	14	16	18
P. miks Temel	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Kırmataş Temel	25	20	20	20	20	20	20	25	25	25	25
DerzliDonatısızRijit Üstyapı	**T8,2: 8,2 tonluk eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısı - Yolun hizmet ömrü boyunca**										
Üstyapı (cm)	**3-10 Milyon**	**4-10 Mil.**	**20-30 Milyon**	**30-40 Milyon**	**40-50 Milyon**	**50-65 Milyon**	**65-80 Milyon**	**80-100 Milyon**	**100-160 Milyon**	**160-250 Milyon**	**>250 Milyon**
Beton Kaplama	19	22	23	25	25	26	27	30	33	36	38
Alttemel	20	20	20	20	25	25	25	25	25	25	25

Bulgular

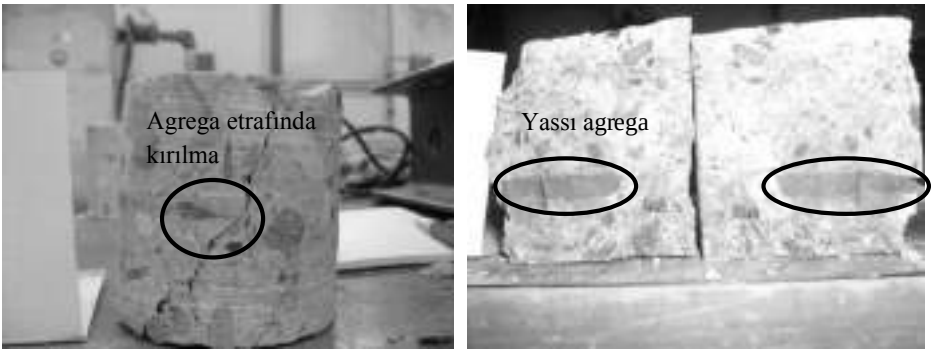
Numune Dayanım Testi Sonuçları

Araziden yaklaşık 20 yıldır hizmet veren yollardan alınan numuneler üzerinden basınç testleri yapılmıştır. Yaklaşık 20 sene önce kısıtlı imkânlar ve genellikle işçiliğin köylüler tarafından yapılmasından dolayı yeterince kalın beton yollar yapılamamıştır (Ortalama 20 cm civarında olması gerekirken birçok yerde 15 cm altında).

Tablo.2 Araziden alınan karot numunelerin basınç dayanım testi sonuçları

Mevki	No	Boy (cm)	Ortalama Boy (cm)	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
Bulak Soğuksu Mevki	1	9	9,83	Numune 10 cmden kısa çıkmıştır	
Bulak Soğuksu Mevki	2	12		9,8	9,8
Bulak Soğuksu Mevki	3	8,5		Numune 10 cmden kısa çıkmıştır	
Çatak Yeşilyurt Dolay Grup Yolu	1	15	14,6	11,2	12,6
Çatak Yeşilyurt Dolay Grup Yolu	2	15		15,6	
Çatak Yeşilyurt Dolay Grup Yolu	3	16,5		14,2	
Çatak Yeşilyurt Dolay Grup Yolu	4	13		9,3	
Çatak Yeşilyurt Dolay Grup Yolu	5	15		13,3	
Çatak Yeşilyurt Dolay Grup Yolu	6	13		11,9	
Dolaylı Köy içi Grup Yolu Üstü	1	15	14,3	12,8	10,8
Dolaylı Köy içi Grup Yolu Üstü	2	15,5		10,2	
Dolaylı Köy içi Grup Yolu Üstü	3	13		8,5	
Dolaylı Köy içi Grup Yolu Üstü	4	14		11,8	
Dolaylı Köy içi Grup Yolu Üstü	5	14		10,3	
Dolaylı Köy içi Grup Yolu Üstü	6	14		11,1	
Dolay çıkış Çağlayan Yolu	1	19	20,4	10,5	
Dolay çıkış Çağlayan Yolu	2	22		Numune karot makinesi içersinde kırıldı	
Dolay çıkış Çağlayan Yolu	3	20		9,1	12,7
Dolay çıkış Çağlayan Yolu	4	21		15,3	
Dolay çıkış Çağlayan Yolu	5	20		15,9	

Yeterince kalınlık olmaması beton yolun daha fazla bozulmasına neden olmuştur. Beton yolların bazılarında kırılmamış pürüzsüz dere taşı kullanılmıştır. Dere taşının pürüzsüz yapısı agrega ile çimento arası bağı azalttığından bazı kırılmalar agrega etrafından oluşmuştur. Beton yolların birçoğu el veya betonyer ile karıştırılan beton ile yapılmıştır bu durum çimentonun homojen dağılmasını engellemiştir. Ayrıca imalat kolaylığı için kullanılan fazla su yine aynı şekilde çimento hamurunu güçsüzleştirmiştir. Bazı numuneler çimento hamurundan kırılmıştır. Son olarak bazı numunelerde kil veya istenmeyen agregalar tespit edilmiş (yassı agregalar gibi), agrega granülometresine dikkat edilmediği hatta ince malzemenin daha çok kullanıldığı görülmüştür. (Şekil.1) Bu nedenlerden dolayı numuneler oldukça düşük basınç dayanımlarında kırılmıştır. Genel olarak vatandaşın kendi döktüğü veya devletin malzeme ve araç yardımı vatandaşın kendi işçiliği ile yaptığı yollar olduğu unutulmamalıdır. Numunelerin basınç dayanımları Tablo.2'de verilmiştir. Basınç dayanım sonuçları ortalama olarak C8/10 ile C12/15 arasında çıkmıştır. Yolların ortalama 20 yıldır hizmet veriyor olması ve trafiği aksatacak hiçbir olumsuzluğun bulunmaması, bu denli düşük dayanımlara sahip beton yolların bile sürdürebilir bir yol malzemesi olduğunu göstermektedir.



Şekil.1 Silindir karot numuneler

Ansys Sonuçları Değerlendirilmesi

ANSYS programı kullanılarak tasarlanan modeller üzerinde aynı yük ile yapılan yüklemelerde elde edilen gerilme ve birim şekil değiştirme bilgileri ile dingil tekerrür sayıları Tablo.3'de verilmiştir. Şekil.2'de görüldüğü gibi plentmiks temele sahip esnek kaplamalar ile rijit temele sahip kompozit kaplamalardan daha fazla gerilmeye maruz kalmaktadır. Bu bilgiler ışığında aynı kalınlıklarda beton ve plentmiks temele sahip iki esnek kaplama karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar için Finn Tarafından 1977'de geliştirilmiş olan dingil tekerrür sayısını veren formüller kullanılmıştır. Buna göre esnek plak altında bulunan X yönündeki çekmeden kaynaklı oluşan birim şekil değişmeler ile Yorulma çatlaklarının oluşmasını sağlayacak dingil tekerrür sayısına, Alttemelin hemen üstünde oluşan Y yönünde basınçtan kaynaklı birim şekilde değiştirmeler ile de tekerlek izinden dolayı çatlak oluşturacak dingil tekerrür sayısı hesaplanmıştır. Ampirik formülden yola çıkarak ulaşılan tekerrür sayısı, kompozit kaplamalar ile esnek kaplamalar arasındaki kullanım ömrünün oranını ortaya çıkartılmıştır. Ancak bu ampirik formül tam olarak gerçeği yansıtmamaktadır. Nitekim modellemeden kaynaklı durumlarda hesaba katıldığından yüksek dingil tekerrür rakamları ortaya çıkmıştır.

Ancak bu rakamlar oranlamak için yeterli doğruluktadırlar. Bu nedenle sonuç arazi gözlemleri ile desteklenmiş veriler kullanılarak verilmiştir (Finn, 1977).

$$\log N_{f_{yorulma}} = 15.947 - 3.291 \log(\epsilon_t/10^{-6}) - 0.854 \log(E_{AC}/10^3)$$

$N_{f\ yorulma}$: Yorulmadan kaynaklı çatlaklar için gerekli dingil tekerrür sayısı
ϵ_t: Esnek plak altı oluşan x doğrultusunda birim şekil değiştirme
E_{AC}: Esnek kaplamanın Elastisite Modülü (434782 Psi=3000 MPa)

$$N_{f_{Tekerlek\ İzi}} = 1{,}077 * 10^{18}(10^{-6}/\epsilon v)^{4{,}4843}$$

$N_{f\ Tekerlek\ İzi}$: Tekerlek izinden kaynaklı çatlaklar için gerekli dingil tekerrür sayısı
ϵ_v: Alt Temelin hemen üzerinde oluşan y doğrultusunda birim şekil değiştirme

Tablo .3 Ansys ile hazırlanan modellerde, gerilme ve birim şekil değiştirmeler

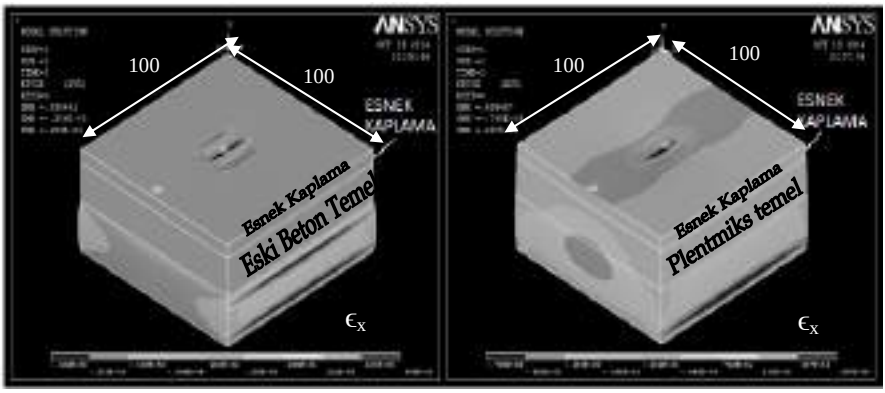
Tek Dingil (11.5 Ton) altında 1*1 m Plak En üst katman Esnek kaplama.									
		Esnek Kaplama Kalınlığı cm	Temel Kalınlığı cm	X Doğrul. oluşan Mak. Gerilme (MPa)	Y Doğrul. Oluşan Mak. Gerilme (MPa)	Esnek Plak Altında X Doğrul. ϵ_x	Alttemel Üstünde Oluşan Y doğrul. ϵ_y	Yorulma Çatlakları oluşt. Dingil Tekerrür Sayısı	Tekerlek İzi Oluşt. Dingil Tekerrür Sayısı
Plentmiks temele sahip Esnek kaplamalarda gerilme, birim şekil değiştirme ve Tekerrür Sayıları									
PlentMix Temelli		5	15	-3,31694	-3,01897	$2{,}34*10^{-4}$	$9{,}987*10^{-4}$	788 552	38 181
		7	15	-2,93364	-3,53	$2{,}17*10^{-4}$	$8{,}324*10^{-4}$	1 010 648	86 411
		5	20	-2,94604	-3,02973	$2{,}071*10^{-4}$	$8{,}250*10^{-4}$	1 180 320	89 746
		7	20	-2,64379	-3,53628	$1{,}92*10^{-4}$	$6{,}912*10^{-4}$	1 512 864	198 875
Eski rijit kaplamaların üzerine yapılan esnek kaplamalarda şekil değiştirme gerilme ve Tekerrür sayıları									
C12/15	Beton temelli	5	15	-1,17314	-3,11897	$1{,}696*10^{-4}$	$3{,}843*10^{-4}$	2 274 049	2 765 529
		7	15	-1,45725	-3,64789	$9{,}877*10^{-5}$	$3{,}698*10^{-4}$	19 769 696	3 286 107
		5	20	-1,05537	-3,12369	$1{,}427*10^{-4}$	$3{,}643*10^{-4}$	4 015 133	3 514 506
		7	20	-1,34784	-3,65045	$8{,}475*10^{-5}$	$3{,}489*10^{-4}$	22 305 513	4 265 615
C20/25		7	20	-1,3375	-3,64128	$5{,}473*10^{-5}$	$1{,}815*10^{-4}$	94 063 265	74 219 757

Tablo .3'deki verilere göre X doğrultusunda beton temelli kaplamalar, plentmix temelli esnek kaplamalardan yaklaşık %50 daha az gerilmeye maruz kalmaktadır. Y doğrultusunda gerilmeler yaklaşık aynıdır. Dingil tekerrür sayılarına bakıldığında plentmix temelli esnek kaplamaların tekerlek izinden kaynaklı çatlaklara 38 bin ile 200 bin arasında ulaştığı beton temelli kompozit kaplamalarda ise bu sayının en az 2,7 milyon olduğu görüşmüştür. Beton kaplamanın arazi verilerindeki gibi C12/15 yerine C20/25 yapıldığında ise en az 18 kat tekerlek izi çatlaklarına dayanıklı olduğu görülmüştür. Beton temelli kompozit kaplamalar, esnek üstyapıdan yorulma kaynaklı çatlaklar da en az 3 en fazla 19 kat daha dayanıklı olduğu görülmektedir. C12/15 yerine C20/25 yapıldığında bu oranın 62 kata çıktığı görülmektedir.

Maliyet Karşılaştırması

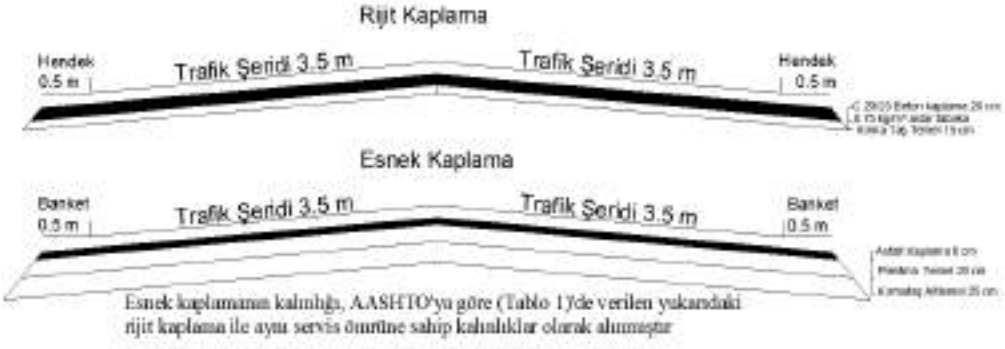
Karadeniz Bölgesi köy yollarında uygulanan esnek ve kompozit kaplamaya ait 2013 yılı birim fiyatlarına göre yapılan maliyet analizleri yapılmıştır. Bölgede uygulanan kompozit yollar eski beton yollardan oluştuğundan öncelikle 1 km uzunluğunda beton yolun birim fiyat analizi hesaplanmış ve Tablo.4 'de pozları ile birlikte verilmiştir. Arazi çalışmalarında beton yolların ortalama C12/15 basınç dayanımına sahip ve ortalama kalınlıkları 15 cm civarında olduğu görülmüştür. Ancak maliyeti hesaplanan rijit kaplama şekil 3'de gösterilen 15 cm kırma taş üzerine m²'ye

0,75 kg astar gelecek şekilde hazırlanmış temel üzerine 20 cm kalınlığında C25/30 beton kaplamadan oluşmaktadır. Yol genişliği 7 metredir. Her iki tarafta 0,5 m toplam 1 m hendek betonu bulunmaktadır. İkinci analiz Tablo.1'de verilen AASHTO'ya göre dingil tekerrür sayısında rijit kaplamaya denk gelen esnek kaplama fiyatı hesaplanmış ve poz detayları Tablo. 5'de verilmişti. Bu sayede aynı tekerrür sayısına sahip üstyapı kaplamaları incelenmiştir. Maliyeti hesaplanan esnek üstyapı 25 cm alttemel malzemenin üzerinde 20 cm plentmiks temel ve bunların üzerinde de sıkıştırılmış 8 cm binder tabaka bulunmaktadır. Yol genişliği 7 metredir. Her iki tarafta 0.5 m banket bulunmaktadır.



Şekil. 2 Plentmix ve beton temellere X doğrultusunda birim şekil değiştirme

Karadeniz Bölgesi köy yollarında 30 yıllık maliyet olarak yolların ilk yapım, yeniden yapım ve bakım onarım maliyetleri hesaba katılmıştır. Tablo.4'de gösterildiği gibi bu hesapta esnek kaplamalar bölgenin olumsuz fiziksel özellikleri nedeniyle 10 yılda bir yeni binder tabaka ile güçlendirilmiş bunun yanı sıra her sene regraj çalışması iki senede birde yama çalışması maliyetleri eklenmiştir. Regraj ve yama çalışmalarına ait veriler Mülga Trabzon İl Özel İdaresinden alınmıştır. Rijit kaplamalar ise 20 sene boyunca hizmet vermiş ve bu sırada sadece bakım onarım çalışması olarak regraj masrafı eklenmiş daha sonra ise kompozit kaplama haline getirilmiştir. Kompozit kaplama yapıldıktan sonra her sene esnek kaplama gibi bakım onarım uygulanmıştır.



Şekil.3 Maliyeti hesaplanan rijit ve esnek kaplamaların en kesitleri.

Tablo.4 2013 Fiyatlarına göre 1 km rijit kaplamalı üstyapı inşaatı yaklaşık maliyeti.

S.No	Birim Fiyat No	İŞ AÇIKLAMASI	Ölçü	Miktar	Birim Fiyat	Tutar
1	Y.16.050/05	C25/30 Basınç Dayanımlı Beton Yol Nak.	m^3	1600	115,60 TL	184.960,00 TL
2	KGM/6040	1" malzemeden temel Hazırlanması	m^3	1200	22,09 TL	26.508,00 TL
3	N-042	Konkasöre yola Taş Nakli	ton	2760	9,33 TL	25.750,80 TL
4	N-122	Bitüm Nakli (Batman-Depo)	ton	5,25	133,10 TL	698,78 TL
5	N-042	Depo şantiye astar nakli	ton	5,25	9,33 TL	48,98 TL
6	04.610/1B	Bitüm Bedeli	ton	5,25	1.120,00 TL	5.880,00 TL
7	21.001	Ahşaptan yapılan seri kalıp	m^2	400	8,05 TL	3.220,00 TL
8	4365	roley tank gibi kaplarda taşınan malzemenin dep.	ton	5,25	1,75	9,1875
9	4393	Distrübütör mak.astarmalzemesi püskürt.	da	1	41,83	41,83
1 km Rijit üstyapı KDV HARİÇ TOPLAM FİYAT:					**247.117,58 TL**	

Tablo.5 2013 Fiyatlarına göre 1 km esnek kaplamalı üstyapı inşaatı yaklaşık maliyeti.

	Poz No	İŞ AÇIKLAMASI	Ölçü	Miktar	Birim Fiyat	Tutar
1	KGM/6200 -A	Bitümlü Sıcak Temel Karışım Malz. (Tip-A)	Ton	1472	14,80 TL	21.785,60 TL
2	KGM/4378	Asfalt yolların makine ile süpürülmesi	da	8	11,36 TL	90,88 TL
3	KGM/4440	Plentte karışımın haz. finişerle ser.Sıkış.	ton	1472	28,43 TL	41.848,96 TL
4	N-042	Konkasörden Plente Agrega Nakli	ton	1398,4	9,33 TL	13.047,07 TL
5	N-042	BSK yola Nakli	ton	1472	9,33 TL	13.733,76 TL
6	N-122	Bitüm Nakli	ton	73,6	133,10 TL	9.796,16 TL
7	04.610/1B	Bitüm Bedeli	ton	73,6	1.120,00 TL	82.432,00 TL
8	KGM/6100/3	Plentmiks Temel Hazırlanması	ton	3520	23,29 TL	81.980,80 TL
9	N-042	Konkasörden Yola Agrega Nakli	ton	3520	9,33 TL	32.841,60 TL
10	KGM/6030	Alttemel Yapılması	m^3	2000	12,24 TL	24.480,00 TL
11	N-042	Konkasöre yola Agrega Nakli	ton	4400	9,33 TL	41.052,00 TL
1 km Esnek üstyapı KDV HARİÇ TOPLAM FİYAT:						**363.088,33 TL**

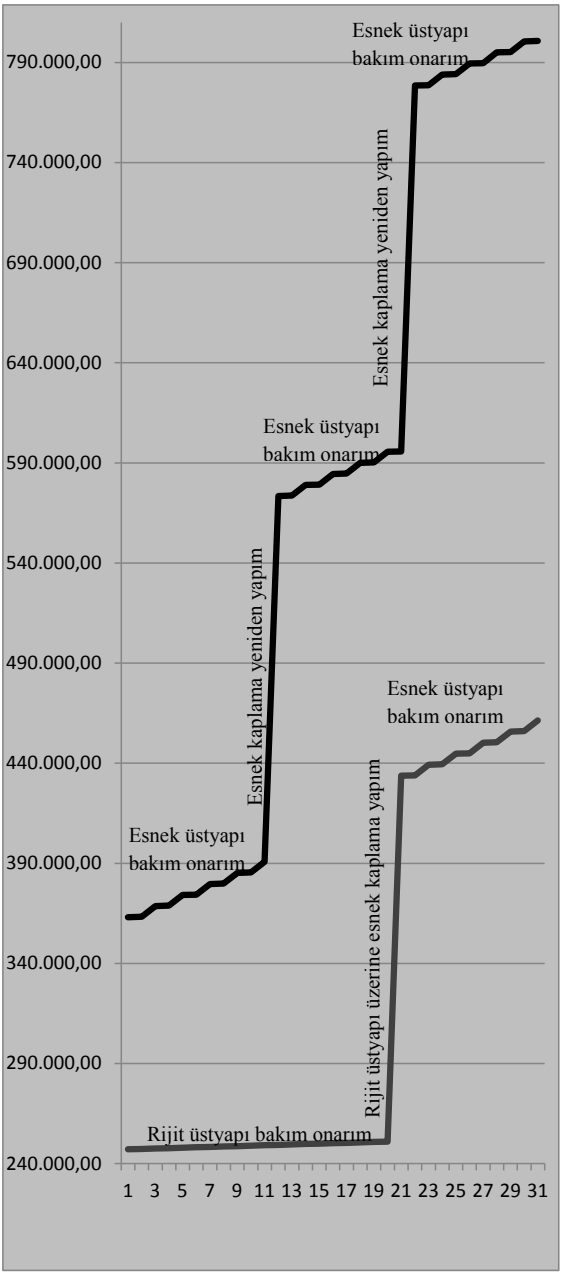
Sonuç ve Öneriler

Yapılan gözlemler ve deneylerde Karadeniz Bölgesinde köy yollarında eski rijit kaplamaların halen daha hizmet verdikleri görülmüştür. Bunlardan bazıları 30 seneye yakın süredir hizmet vermektedir. Yine rijit kaplamaların zamanla oluşan bozulmaları neticesinde oluşan konforsuzluk yapılan 5-7 cm sıkıştırılmış binder tabakası ile giderilmektedir. Bu şekilde yapılan kompozit kaplamalarında esnek kaplamaya oranla daha uzun süre bozulmadan hizmet verdikleri bölgede birçok köy yolunda görülmektedir. Bölgedeki köy yollarından alınan numunelerin basınç dayanımları ortalama C8/10 ile C12/15 dayanımlarına sahip betonlar oldukları görülmüştür. Bu halleri ile 30 yıldır hizmet verdikleri düşünüldüğünde C20/25 basınç dayanımına sahip beton yolların gerekli teknik özelliklere uyularak yapıldığında köy yollarında daha az aşınma ve bozulmalar olacağından yeniden yapım sıkıntısını ortadan kaldıracaktır.

Maliyet karşılaştırması incelendiğinde Tablo.6 verileri ışığında rijit kaplamaların ilk yapım maliyeti esnek kaplamalardan %32 daha az olduğu görülmektedir. Kompozit kaplamalar ile esnek kaplamaları 30 yıllık toplam maliyet açısından karşılaştırdığımızda, kompozit kaplamaların %42 daha az maliyetli oldukları görülmektedir. Ayrıca esnek kaplamalarda her yıl tükenebilir kaynaklar ile bakım onarım ihtiyacı görülmektedir. Oysa rijit kaplamaların üzerine yapılan kompozit kaplamalar daha dayanıklı olmakta kaynakların sürdürülebilir kullanımına imkân sağlamaktadır.

Tablo. 6 Esnek ve Kompozit kaplamanın yıllara göre toplam maliyetleri.

Yıl	25 cm Alttemel 20 cm Plentmiks Temel 8 cm Binder	Kompozit Kaplama İlk 20 Sene Rijit sonra 8 cm Binder
	BSK (TL)	Kompozit Kap. (TL)
0	363.088,33	247.117,58
1	363.291,66	247.320,91
2	368.612,39	247.524,24
3	368.815,72	247.727,57
4	374.136,45	247.930,90
5	374.339,78	248.134,23
6	379.660,51	248.337,56
7	379.863,84	248.540,89
8	385.184,57	248.744,22
9	385.387,90	248.947,55
10	390.708,63	249.150,88
11	573.443,06	249.354,21
12	573.646,39	249.557,54
13	578.967,12	249.760,87
14	579.170,45	249.964,20
15	584.491,18	250.167,53
16	584.694,51	250.370,86
17	590.015,24	250.574,19
18	590.218,57	250.777,52
19	595.539,30	250.980,85
20	595.742,63	433.715,28
21	778.477,06	433.918,61
22	778.680,39	439.239,34
23	784.001,12	439.442,67
24	784.204,45	444.763,40
25	789.525,18	444.966,73
26	789.728,51	450.287,46
27	795.049,24	450.490,79
28	795.252,57	455.811,52
29	800.573,30	456.014,85
30	800.776,63	461.335,58



Şekil.4 Esnek ve Kompozit kaplamanın yıllara göre toplam maliyetlerinin grafiği.

Ayrıca yapılan bilgisayar modellerinde de yine kompozit kaplamaların esnek kaplamalara oranla daha uzun ömürlü oldukları tespit edilmiştir. Buna göre tekerlek izinden dolayı oluşan çatlaklarda en az 70 kat yorulmadan dolayı oluşan çatlaklarda ise 3 ile 19 kat arasında daha dayanımlı olduğu görülmüştür. Ayrıca bilgisayar modellerinde C20/25 beton ile hazırlanmış modellerde bu oranların çok daha fazla arttığı tespit edilmiştir.

Bölgede yol ağının uzunluğu düşünülecek olursa kaynakları iyi değerlendirerek gelecek nesillere iyi ulaşım şartları hem de tükenebilir kaynakları bırakabilmek için rijit üstyapı ve sonrasında kompozit kaplama yapılması teşvik edilmelidir. Rijit kaplamalar bölgenin ulaşım sorununu giderdikleri gibi esnek kaplamalardan en az 4 -5 kat daha uzun olan ömürlü olmaktadır. Ayrıca rijit üstyapılar belirli bir süre hizmet verdikten sonra üzerine yapılan esnek (kompozit k aplamalara) temel görevi görmektedir bu hali ile kırma taş temel veya plentmix temellerden daha dayanıklı olmaktadır. Bu şekilde temel görevi yapan eski beton yollar hiçbir masraf yapılmadan sürdürülebilir kaynak olarak kullanılmaya devam edilmektedir. Ayrıca eski beton yollar konkasörlerde kırılarak elde edilecek agregalar yine beton yol yapımında kullanılabilir. Bu konuda Almanya'da çeşitli başarılı uygulamalar yapılmıştır. (Ecevit, 2007). Esnek kaplamalar bölgede genellikle ekonomik ömrünü bitiremeden bozulmakta ve geri dönüşüm maliyetleri nedeniyle kaldırılıp çöpe atılmaktadır. (Ilıcalı, Tayfur, Özen, Sönmez, ve Eren, 2001) Son olarak rijit kaplamanın yerli ve tükenmeyecek kaynaklardan üretiliyor olması nedeniyle sürdürülebilirlik açısından esnek üstyapıdan oldukça avantajlıdır.

KAYNAKÇA:

Temren Z. (2011), Asfalt Üstyapıların Sürdürülebilirliği, 2. Karayolları Ulusal Kongresi Bildirimler Kitabı, Syf. 30-40, Ankara

KGM http://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/Butce.aspx

Yeğinobalı A. (2009), Niçin Beton Yol, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Arge Enstitüsü, Ankara.

TUİK, Köy Yolları Hakkında İstatistiksel Bilgiler http ://www.tuik.gov.tr Türkiye İstatistik Kurumu.

Çelik, M. (2014), Karadeniz Bölgesi Köy Yolları İçin Rijit Ve Esnek Kaplamanın Mekanistik Ve Maliyet Açısından Karşılaştırılması, Yüksek Lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Akpınar, M. V. (2008), "Effects of Truck Load Position on Longitudinal Joint Deterioration", Indian Journal of Engineering Matrials Science, IJEMS, Vol. 15, pages. 41-50

Akpınar, M. V., J. Hancock, and M. Hossain, A. J. Gisi, (2001), Theoritical Investigation of Cross Tensioned Concrete Pavement, 7 th International Conference on Concrete Pavements, September , Orlando, Florida, USA.

Akpınar, M. V., S. Özcanan, Y. Zandi, O. Karpuz, B. Mahdizadeh, Y.Z, Akpınar, (2010), "Accelerated Pavement Testing Pit Dimension Effects on Pavement Stress

Analysis, 9th International Congress on Advances in Civil Engineering, pp. 27 -30 September , Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey.

Akpınar, M. V., S. Romanoschi, (2003), Yollarda Derz Çatlakların Önlenmesi İçin Sıkıştırma Makinesinin Konumunun Mekanistik Analizlerle Tespit Edilmesi", XIII. Ulusal Mekanik Kongresi konferans, 8 -12 Eylül, 1-5 pp., Gaziantep

Akpınar, M. V., (2001), Defining Roller Compactor Position and Slope of Tapered Surface in a Longitudinal Joint Construction Using 2 -D Finite Element Model. Kansas State University.

Gevrek, L. (2008), Yol Katmanlarında Meydana Gelen Gerilme Dağılımının Ansys Bilgisayar Programı İle Nonlineer Sonlu Eleman Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Kocatepe Üniversitesi, Afyon.

Özcanan, S., Akpınar, M.V. (2014), Esnek Üstyapılarda Kritik Tekerlek ve Aks Konfigurasyonunların Mekanistik Analizlere Göre Tespit Edilmesi, sayfa 6625, IMO Journal, Cilt 25 Sayı 1.

Karayolları Trafik Yönetmeliği, (1997), T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Karayolla rı Genel Müdürlüğü, Ankara.

Pintea, A. veTraian, O. (2012), Elastic Deformation Of Concrete. Determination Of Secant Modulu s Of Elasticity In Compression , Technical University of Cluj -Nap oca, Napoca, Romanya.

AASHTO , (1986), American Association of State Highway and Transportation Officials, Guide for Design of Pavement Structur es, Washington, D.C.

Finn, F. (1977), The Use of Distress Prediction Sub systems for the Design of Pavement Structures. Proceedings , 4th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan. Ann Arbor, MI.

Ecevit O. (2007), Karayollarında Rijit Üstyapı Uygulamaları ve Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ. ve Eren, K. (2001), Asfalt ve Uygulamaları, İsfalt Bilimsel Yayınları No:1 , İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İstanbul,

Ham Pirinç Kabuğunun Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Betonda Polipropilen Lif Yerine Kullanılabilirliğinin Araştırılması

Büşra AKTÜRK, Nabi YÜZER, Nihat KABAY
Yıldız Teknik Üniversitesi, Davutpaşa Kampüsü
İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
Tel: +90 (212) 383 5240
E-Posta: bucar@yildiz.edu.tr ; nyuzer@yildiz.edu.tr ; nkabay@yildiz.edu.tr

Hasan BİRİCİK
Maltepe Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
Tel: +90 (216) 626 1050/2405
E-Posta: hasanbiricik@maltepe.edu.tr

ÖZ

Yüksek sıcaklık, betonda büyük hasarlara, betonun fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinde ciddi değişimlere neden olan başlıca etkilerden biridir. Bu değişimler sonucunda, özellikle yüksek dayanımlı betonda, çatlaklar ve parça atmalar meydana gelir. Yüksek buhar basıncı nedeni ile meydana gelen parça atma sorununun engellenmesi için beton tasarımında polipropilen, naylon vb. sentetik liflerden yararlanılmaktadır.

Özellikle polipropilen lifler (PP), yüksek sıcaklık etkisi altında düşük ergime derecesi ile (~160˚C) beton içerisinde birbiri ile bağlantılı boşluklar yaratarak parça atma hasarını başarılı bir şekilde engellemektedir. Ancak PP, üretimi sırasında neden olduğu çevre kirliliği nedeni ile sürdürülebilir bir malzeme değildir.

Son yıllarda yüksek sıcaklık etkisine maruz kalacak betonda PP yerine ham pirinç kabuğu (PK) kullanılması ile ilgili araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada da, tarımsal bir atık olan PK'nın yüksek sıcaklığa maruz kalacak betonda PP yerine kullanılması ile atık bir malzemenin değerlendirilmesi hedeflenmektedir. PK ve PP katkılı, bazalt agregalı betonların yüksek sıcaklık etkisi altında mekanik özellikleri ve açığa çıkan CO ve CO_2 gazlarının miktarları karşılaştırılmıştır.

Çalışmadan, sürdürülebilir bir malzeme olan PK'nın, mekanik özelliklerde bir miktar düşüşe neden olmakla birlikte, PP'ye göre daha az zararlı gaz açığa çıkardığı, belirli oranlarda betonda PP yerine kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Beton; mekanik özellikler; polipropilen lif; pirinç kabuğu; yüksek sıcaklık; zararlı gaz ölçümü.

1. Giriş

Dürabilite problemin den biri olan yüksek sıcaklık, kalıcı hasarlar oluşturarak yapının servis dışı kalmasına, can ve mal kaybına neden olabilmektedir.

Herhangi bir nedenle yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinde birtakım değişiklikler görülür (Alonso ve diğ., 2003). Bu değişimlerin sonucunda özellikle yüksek dayanımlı betonda (YDB) çatlaklar ve parça atmalar meydana gelir (Kalifa ve diğ., 2001;. Han ve diğ., 2005; Kanema ve diğ., 2007). Parça atmanın engellenmesi için polipropilen (PP) gibi polimer, sentetik liflerin beton içinde ilave katkı olarak kullanılması en çok bilinen yöntemlerdendir. PP lifler düşük sıcaklıklarda ergiyerek (~160˚C) yerini birbiri ile bağlantılı boşluklara bırakır ve bu boşluklar sayesinde beton içinde meydana gelen buhar basıncı azaltılmış ve parça atmalar engellenmiş olur (Zeiml ve diğ., 2006).

Kalifa vd. yap tıkları çalışmada yüksek dayanımlı betonda 1kg/m ^{3}'lük PP lif ilavesinin betonda parça atmayı engellediğini belirtmişlerdir (Kalifa ve diğ., 2001). PP liflerin betonda kullanımı işlenebilirliği azaltmakta, ayrıca yüksek sıcaklık etkisi altında bozularak CO ve CO_2 gibi zararlı gazların açığa çıkmasına neden olmaktadır. PP'nin yanması ile açığa çıkan CO seviyesinin insan sağlığını etkileyecek düzeyde olduğu bilinmekte ve bununla birlikte PP'nin üretimi sırasında da büyük miktarda çevre kirliliği yaşanmaktadır (Purohit ve Orzel, 1998; Ehrenstein, 2001).

Bu çalışma, yüksek sıcaklık etkisine maruz kalacak betonlarda PP lif kullanımının yerine sürdürülebilir ve atık bir malzeme olan pirinç kabuğunun (PK) betonda kullanılabilirliğini araştırmayı hedeflemektedir.

Pirinç, dünyada milyarlarca insanın ana besin kaynağıdır. 2011 yılında tüm dünyada yaklaşık 722 milyon ton pirinç üretilmiş ve üretim sonucu bu miktarın yaklaşık %20'si kadar pirinç kabuğu elde edilmiştir. Türkiye'de ise 2007 yılından 2011'e dek pirinç üretimi artmış ve 2011'de 540 bin ton pirinç üretimi yapılmıştır (http://www.pdd.org.tr/pirinc -sektor -raporu). PK, %50 selüloz, %25-30 lignin ve yaklaşık %15-20 silis içerir. Kimyasal içeriği yetiştirildiği bölgenin coğrafi yapısına, iklime, hasat zamanında kullanılan gübrenin içeriğine bağlıdır. Havalı ortamda yakıldığında ağırlıkça %18-22 gibi bir oranda kül elde edilir (Mazlum , 1989).

Pirinç kabuğu günümüze dek pek çok alanda kullanılmıştır; yakıt, hafif beton üretiminde hafif agrega, düşük ısıl iletkenlik katsayısı (0,036-0,086W/mK) nedeniyle yalıtım malzemesi olarak ve külü puzolan olarak betonda kullanılmıştır (Mazlum, 1989).

Yüzer vd. normal dayanımlı betonla yaptıkları çalışmada PK'yı %1,5, 3 ve 5 oranlarında kullanarak yüksek sıcaklık etkisi altında serilerin performansını belirlemişlerdir. Buna göre basınç dayanımında PK miktarının artması ile %4, 16 ve 25'lik düşüşler meydana gelmiş ve %1,5 katkılı seride dayanım kaybının önemli düzeyde olmadığını belirtmişlerdir (Yuzer ve diğ., 2013). Aktürk ve diğ. nin (2013) YDB'de (105MPa ve üzeri) yaptığı çalışmada, PK ilavesinin betonun basınç dayanımını önemli ölçüde düşürmediği ve belirli oranlarda (çimento ağırlığının %3'ü) kullanıldığında parça atmayı engellediği belirtilmiştir. Aynı çalışmada, yüksek sıcaklık etkisinde PK ve PP katkılı betonlardan çıkan gazların miktarı karşılaştırıldığında,

300˚C'ye kadar %3 PK katkılı serinin daha düşük zararlı gaz açığa çıkararak daha iyi bir performans gösterdiği, 300-900˚C arasında ise aynı performansı gösteremediği gözlenmiştir. Bu betonlarda kullanılan agreganın kalker esaslı olması nedeniyle açığa çıkan CO_2 gazında da önemli bir fark gözlenmemiştir.

Bu çalışmada, bazalt agregası kullanılarak, PK ve PP katkılı betonların yüksek sıcaklık etkisinde mekanik özellikleri ve açığa çıkan CO ve CO_2 gazlarının miktarları karşılaştırılmıştır.

2. Deneysel Çalışma

2.1 Kullanılan Malzemeler ve Üretilen Karışımlar

Çalışmada CEM I 42,5R tipi Portland çimentosu, puzolan olarak; yüksek fırın cürufu ve silis dumanı kullanılmıştır. Beton agregası olarak bazalt kırma taşı, bazalt ve kuvars kumu, kimyasal katkı olarak ise süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Agrega karışımlarının granülometrisi TS 706'ya göre yapılmış ve en büyük tane boyutu 12mm olarak seçilmiştir.

Çimento ve puzolanların kimyasal bileşimi Tablo 1'de, agregaların fiziksel özellikleri ise Tablo 2 'de verilmiştir.

Tablo 1. Çimento ve puzolanların kimyasal bileşimi.

Kimyasal Bileşim	Çimento	Silis Dumanı	Yüksek Fırın Cürufu
CaO (%)	63,10	<1	33,80
SiO_2 (%)	18,70	>85	41,00
Al_2O_3 (%)	4,70	-	13,20
Fe_2O_3 (%)	3,35	-	1,15
Na_2O	0,37	-	-
K_2O	0,71	-	-
MgO (%)	1,43	-	7,25
SO_3 (%)	3,40	<2	0,35
Kızdırma Kaybı (%)	2,94	<4	0,00
Özgül Ağırlık (g/cm³)	3,10	2,30	2,78
Özgül Yüzey (Blaine, cm^2/g)	3941	-	5465

Tablo 2. Agregaların fiziksel özellikleri.

Malzeme	Özgül ağırlık (g/cm³)	D_{max} (mm)
Bazalt	2,80	12
Bazalt kumu	2,78	4
Doğal kum	2,66	1

Polipropilen lif ve ya pirinç kabuğu da ilave katkı olarak farklı oranlarda kullanılmıştır. PP ve PK'nın fiziksel özellikleri Tablo 3'te yer almaktadır.

Tablo 3. Polipropilen lif ve pirinç kabuğunun fiziksel özellikleri.

Malzeme	Özgül Ağırlık (g/cm^3)	Uzunluk (mm)	Narinlik oranı	Ergime sıcaklığı (˚C)
Pirinç kabuğu	0,122	~8	-	~220
Polipropilen	0,910	12	24-32	160

Aynı Portland çimentosu (CEM I 42,5R) ve puzolanlar kullanılarak su/bağlayıcı oranı 0,42 olan yedi beton karışımı üretilmiştir. Üretilen tüm betonlarda su/bağlayıcı oranı, agrega granülometrisi ve maksimum agrega tane boyutu sabit tutulmuştur. Çimento miktarı 450kg/m^3 olup, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı sırasıyla %10 ve %5 olmak üzere ikame edilmiştir. Beton serilerde yeterli işlenebilirliğin sağlanması amacıyla %1,4-1,8 oranlarında süper akışkanlaştırıcı kullanılmış ve tüm serilerde S3 sınıfı kıvam sağlanmıştır.

PP ve PK mikt arları toplam bağlayıcı miktarı esas alınarak ve önceki çalışmalarımızdan (Yuzer ve diğ., 2013; Aktürk ve diğ., 2013) faydalanılarak belirlenmiştir. PP lifler bağlayıcı ağırlığına göre, %0,2, 0,4 ve 0,5 olmak üzere 3 farklı oranda kullanılmıştır. PK ise yine bağlayıcı ağırlığının %0,5, 1,5 ve 3 oranlarında betona ilave edilmiştir. Seriler içerdikleri lif tipi ve miktarına göre kodlanmıştır. Örneğin %0,5 PP içeren seri PP-0.5 olarak ifade edilmiştir.

Üretilen beton karışımlarının malzeme miktarları Tablo 4'te verilmiştir. Hazırlanan numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak 28. güne kadar sıcaklığı 20±2˚C olan kirece doygun suda bekletilmiştir.

Tablo 4. 1m^3 beton için tüm serilerin malzeme miktarları.

Malzeme/Seri	R	PP-0.2	PP-0.4	PP-0.5	PK-0.5	PK-1.5	PK-3
Çimento (kg/m^3)	450	450	450	450	450	450	450
Su (kg/m^3)	189	189	189	189	189	189	189
Bazalt (kg/m^3)	1260	1260	1260	1260	1260	1260	1260
Bazalt kumu (kg/m^3)	267	267	267	267	267	267	267
Doğal kum(kg/m^3)	250	250	250	250	250	250	250
Silis dumanı (kg/m^3)	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5
Yüksek fırın cürufu (kg/m^3)	45	45	45	45	45	45	45
PP (kg/m^3)	-	0.9	1,8	2,25	-	-	-
PK (kg/m^3)	-	-	-	-	2,25	7,75	13,50
Superakışkanlaştırıcı(%)	1,4	1,6	1,7	1,8	1,4	1,5	1,6

2.2 Deney Yöntemi

Yüksek sıcaklığa maruz kalacak numuneler sıcaklık öncesi beton içerisindeki serbest suyun buharlaşması ve ani patlamaların önlenmesi amacıyla 24 saat süresince 100±5°C'de etüvde bekletilmiş, ardından fırına yerleştirilmiştir. Fırının kapasitesi 1200˚C olup, ısınma hızı tüm serilerde 4˚C/dk olarak seçilmiştir.

Tüm numuneler hedef sıcaklığa (900˚C) ulaştıktan sonra 2 saat süresince hedef sıcaklıkta ve bu süre sonunda fırın içerisinde oda sıcaklığına gelene dek bekletilmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin mekanik deneyleri 29. günde gerçekleştirilmiştir.

2.3 Mekanik Deneyler

Tüm serilerde yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası basınç ve yarma dayanımları ile elastisite modülleri belirlenmiştir.

Basınç dayanımı TS EN 12390-3 standardına göre 4 adet Φ100/200mm silindir numunede gerçekleştirilmiş, yarma dayanımı ise EN 12390-6 standardına göre 4 adet Φ100/100mm'lik silindir numunelerde belirlenmiştir. Elastisite modülü ASTM C469'a göre tüm serilerde belirlenmiştir. Basınç dayanımı, yarma dayanımı ve elastisite modülü için elde edilen sonuçlar Şekil 1-3'te verilmiştir.

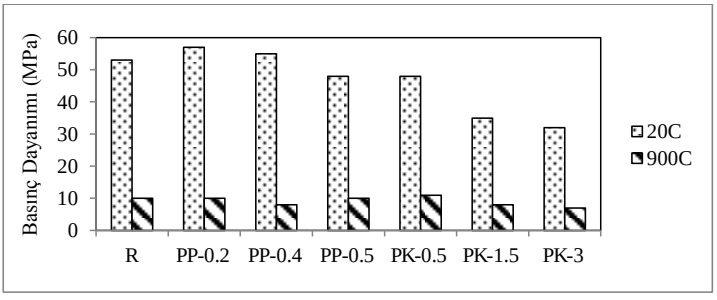
2.4 Zararlı Gaz Ölçümü

Her seride 4 adet Φ100/200mm'lik ve 4 adet Φ100/100mm'lik silindirler fırına yerleştirilmiş ve yüksek sıcaklık süresince beton serilerinden açığa çıkan zararlı gazlardan CO ve CO_2 miktarları baca gazı analiz cihazı yardımıyla belirlenmiştir. Sıcaklık süresince belirli aralıklarla gaz miktarı ölçülmüş ve sıcaklık-gaz miktarı değişimi Şekil 5-8'de verilmiştir.

3. Deney Sonuçları ve Değerlendirmesi

3.1 Mekanik Deney Sonuçları

Tüm beton serilerinin yüksek sıcaklık etkisi öncesi ve sonrası 28 günlük dayanımları belirlenmiştir. Sıcaklık-basınç dayanımı değişim grafiği Şekil 1'de gösterilmiştir.



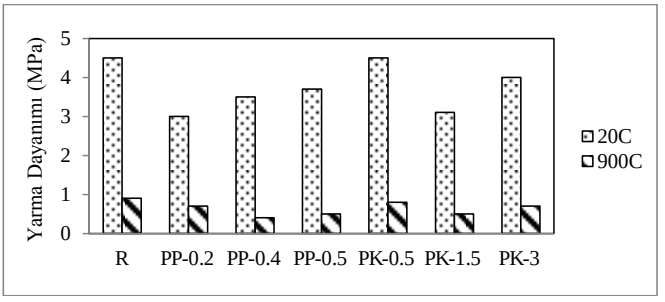
Şekil 1. Tüm serilerin basınç dayanımı-sıcaklık değişimi.

Tüm serilerin oda sıcaklığındaki dayanımları karşılaştırıldığında en yüksek değeri 57MPa ile PP-0.2 serisi almıştır. PP-0.5 serisi hariç PP lifli seriler ve referans seri yüksek dayanımlı beton olarak nitelendirilebilir. PP lif miktarı arttıkça dayanım değerleri sırasıyla 55 ve 48MPa'ya düşmüştür. Bu düşüşün liflerin meydana getirdiği boşluklardan kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

PK'lı serilerin basınç dayanımı PP lifli serilere göre daha düşüktür. PK-0.5 serisinin basınç dayanımı 48MPa'dır ve PK miktarının %0,5'ten 1,5 ve 3'e çıkarılması ile dayanım ancak 35 ve 32MPa değerlerine ulaşabilmiştir. Buna göre betona %3 oranında PK ilavesi, beton basınç dayanımının referans betona göre %40 kadar azalmasına neden olmuştur.

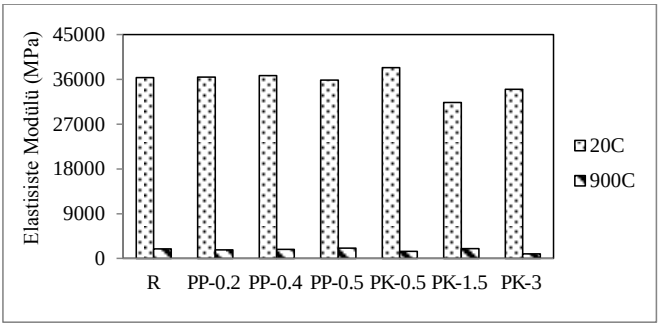
Yüksek dayanımlı betonlarda yüksek sıcaklık etkisi altında karşılaşılan parça atma-patlama sorunu hiçbir seride görülmemiştir. Betonun yüksek sıcaklığa maruz kalması sonucu 100˚C'den sonra serbest su, 300˚C'den sonra ise kimyasal bağlı su buharlaşır ve beton dayanımı oluşan boşluklar nedeniyle düşer. Sıcaklık 500-600˚C'ye ulaştığında ise normal dayanımlı bir beton, dayanımının yaklaşık yarısını kaybeder. 900˚C'ye ulaşan betonlar dayanımlarının büyük bir kısmını kaybederler (Bazant, 1996). Çalışmada 900˚C sonrası tüm serilerin dayanımı 7-11MPa arasında değişmiştir. Beton seriler, orijinal dayanımlarının ancak % 20'sini koruyabilmiştir.

Yarma dayanımı, betonun çekme dayanımının dolaylı olarak belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Lifler yüksek çekme dayanımları nedeniyle betonun çekme dayanımını arttırarak, daha sünek bir davranış elde edilmesini sağlarlar (Ersoy, 2001). PP liflerle güçlendirilmiş betonların, lifsiz betonlara göre özellikle yüksek sıcaklık sonrası çekme dayanımlarının korunduğuna dair çalışmalar bulunmaktadır (Behnood ve Ghandehari, 2009; Ramezanianpour ve diğ., 2013; Gao ve diğ., 2012). Yapılan çalışmada, PP lif ve PK kullanımının referans seriye göre yarma dayanımını bir miktar düşürdüğü görülmüştür. Şekil 2'ye göre PP lif ve PK ilavesi ile yarma dayanımının iyileştirilmediği söylenebilir. 900˚C sonrası serilerin yarma dayanımları 0,4-0,9MPa arasında değişmiştir.



Şekil 2. Tüm serilerin yarma dayanımı-sıcaklık değişimi.

Elastisite modülü malzemelerin şekil değiştirmeye karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilmektedir (Onaran ,2000). Şekil 3'ten de görüleceği üzere, tüm PP'li seriler referans beton ile yaklaşık aynı değerleri almıştır ve elastisite modülünde kayda değer bir farklılık görülmemiştir. PK'lı serilerde ise %10-15'lik düşüşler gerçekleşmiştir. 900˚C sonrası ise tüm serilerin elastisite modülü 1000-2000 MPa arasında kalmıştır (Şekil 3).

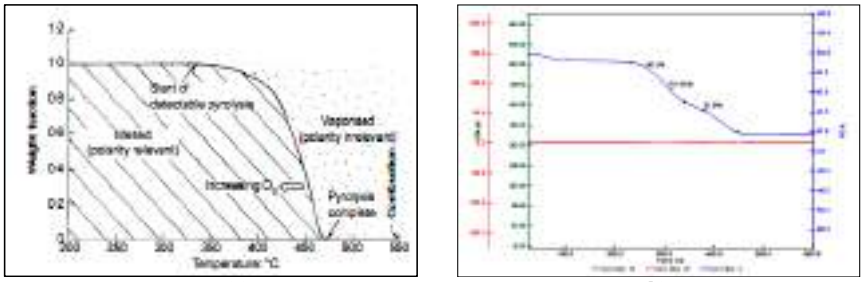


Şekil 3. Tüm serilerin elastisite modülü-sıcaklık değişimi.

3.2 Zararlı Gaz Ölçümü

PP lifler yüksek sıcaklık etkisi altında ergir ve bozulur. PP lifin termo gravimetrik analizi (TGA) sonucu elde ed ilen verilere göre; 160˚C'de ergime başlar, 460˚C civarında maksimum bozulma gerçekleşir ve 475˚C'de bozulma tamamlanır ve 550˚C'de yanma gerçekleşir (Şekil 4 (a)) (Khoury ve Willoughby, 2008). Bu sonuca göre, PP lifli serilerde, 550˚C'de maksimum zararlı gaz çıkışı beklenir.

PK organik ve inorganik kompozit bir malzemedir. Organik kısmı selüloz, hemiselüloz ve linyinden, inorganik kısım ise yüksek miktarda silika, K^+, Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, and Cl^- 'den oluşur (Mazlum, 1989). Selüloz ve linyinin kimyasal formülü sırasıyla $(C_6H_{10}O_5)n$ and $C_9H_{10}O_2$'dir. PK'nın yanma sıcaklığını belirlemek amacı ile yapılan TGA sonucuna göre serbest suyun 100˚C'de buharlaşması ile PK ağırlığında %10'luk bir azalma meydana gelmiş, 220-450˚C arasında yapısal bozulmadan dolayı ağırlık kaybı %82'lere ulaşmıştır. Şekil 4 (b)'den de görüleceği gibi, PK 450˚C civarında yanarak küle dönüşmektedir. Bu nedenle, 450˚C civarında PK'lı serilerden yüksek miktarda zararlı gaz çıkışı olması beklenir.

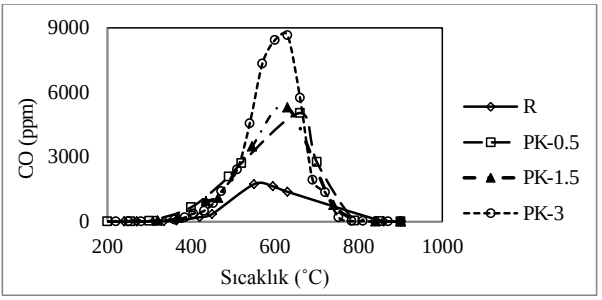


(a) (b)

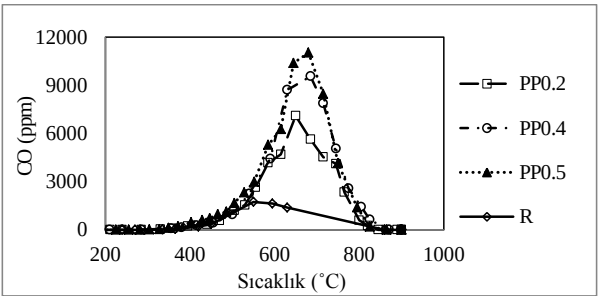
Şekil 4. (a) PP lifin sıcaklık etkisi altında ağırlık kaybı (Khoury ve Willoughby, 2008). (b) PK'nın termo gravimetrik analiz sonucu.

Çalışma sonucunda teorik bilgileri destekler nitelikte 200˚C'ye kadar herhangi bir gaz çıkışı görülmemiştir. 400-600˚C arasında belirgin bir CO artışı görülmekte, 650˚C civarında ise maksimum değerlere ulaşmaktadır. PP-0.5 serisi 11023ppm ile en yüksek değeri, referans seri ise 1733ppm ile en düşük değeri almıştır. 600-700˚C'den sonra

beton içerisine gömülü lifler tamamen yandığı için daha fazla gaz çıkışı görülmemiştir. PP ve PK katkılı seriler karşılaştırıldığında PK-3 serisi hariç PK serileri PP'lilere göre daha az gaz çıkışına neden olmuş ve daha iyi performans göstermişlerdir (Şekil 5-6).

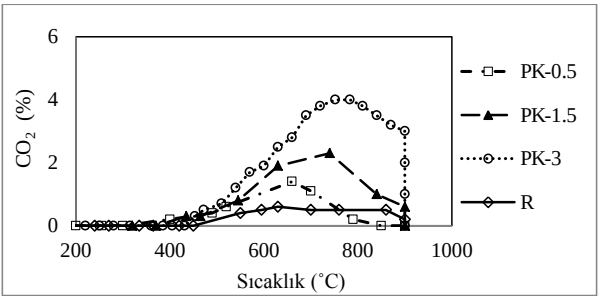


Şekil 5. PK serilerinin sıcaklık-CO miktarı değişimi.

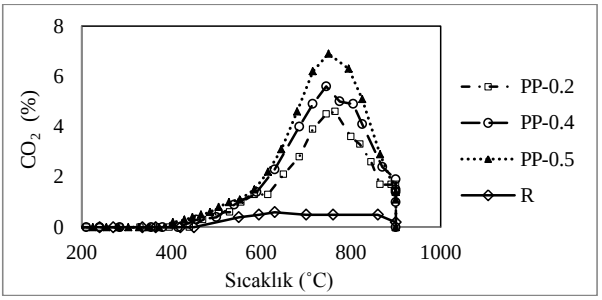


Şekil 6. PP serilerinin sıcaklık-CO miktarı değişimi.

CO ve CO_2 miktar artışı orantılı olduğu için CO için elde edilen sonuçlar CO_2 için de geçerlidir. CO'dan farklı olarak, CO_2'nin maksimum değerlere ulaştığı sıcaklık 700˚C civarındadır. PK katkılı seriler PP'li serilere göre daha az gaz çıkışına neden olup, daha iyi performans göstermişlerdir. Referans seride kayda değer bir CO_2 miktarı ölçülmemiş, maksimum CO_2 miktarı %6,9 ile PP-0.5 serisinde görülmüştür. PP lifli serilerde maksimum değerler %4,6-6,9 arasında iken, daha yüksek miktarlarda kullanılan PK serilerinde maksimum değerler %2-4,5 arasında olmuştur (Şekil 7-8).



Şekil 7. PK serilerinin sıcaklık-CO_2 miktarı değişimi.



Şekil 8. PP serilerinin sıcaklık-CO_2 miktarı değişimi.

4. Sonuçlar

Tarımsal bir atık ve sürdürülebilir bir malzeme olan pirinç kabuğunun yüksek sıcaklığa maruz kalacak betonda polipropilen lif (PP) yerine kullanılmasının araştırıldığı bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1-Yüksek sıcaklık etkisi altında meydana gelen parça atma olayı herhangi bir seride gözlenmemiştir.

2-PK ve PP'nin betonda kullanımının basınç dayanımında bir miktar düşüşe neden olduğu, PK ve PP miktarı arttıkça bu azalmanın arttığı belirlenmiştir. PP ile PK'nın performansı kıyaslandığında, PK'nın daha fazla düşüşe neden olduğu söylenebilir.

3-PK ve PP kullanımının yarma dayanımında bir iyileşme sağlamadığı, PK miktarının artması ile yarma dayanımının azaldığı gözlenmiştir.

4-Elastisite modülü PK ve PP ilavesi ile kayda değer bir değişim göstermemiştir.

5-Yüksek sıcaklık etkisinde lif katkıları bozulmuş ve PK-3 serisi haricindeki PK serileri PP'li serilere göre daha az gaz açığa çıkararak daha iyi performans göstermişlerdir.

Kaynaklar

Alonso,C., Andrade, C. and Khoury, G.A. (2003) Course on Effect of Heat on Concrete_ Porosity & Microcrackin g. International Centre for Mechanical Science . 9-13 June 2003, Udine, Italy .

Aktürk, B., Yüzer, N. and Kabay, N. (2013) Mechanical Properties and Released Gas Analysis of High Strength Concrete with Polypropylene and Raw Rice Husk under High Temperature Effect. ICCET 2013 - International Conference on Concrete Engineering and Technology , Paris, Fran ce, pp. 43 -48.

Bazant, Z.P. and Kaplan, M.F. (1996) Concrete at High Temperatures . Longman Group Limited, London.

Behnood, A. and Ghandehari, M. (2009) Comparison of Compressive and Splitting Tensile Strength of High -Strength C oncrete With and Without Polypropylene Fiber s Heated to High Temperatures. Fire Safety Journal , Vol.44, pp. 1015-1022.

Ehrenstein, G.W. (2001) Polymeric Materials -Structure –Properties -Applications . Munich, 2001.

Ersoy, H.Y. (2001) Kompozit Malzemeler ., İstanbul.

Gao, D. Yan D. and Li, X. (2012) Splitting strength of GGBFS concrete incorporating with steel fiber and polypropylene fiber after exposure to elevated temperatures . Fire Safety Journal, Vol.54, pp. 67–73.

Han, C. G. Hwang, Y.S. Yang S.H. and Gowripalan N. (2005) Performance of Spalling Resistance of High Performance Concrete with Polypropylene Fiber Contents and Lateral Confinement. Cement and Concrete Research , Vol. 35, no.9, pp.1747 -1753.

Kalifa, G. Chene, C. and Galle, C. (2001) High-tempe rature Behavior of HPC with Polypropylene Fibers from Spalling to Microstructure . Cement and Concrete Research , Vol. 31, no.10, pp. 1487 -1499.

Kanema, M., Morais, M .V.G., Noumowe, Gallias, A.J.L. and Cabrillac R. (2007) Experimental and numerical studies of thermo -hydrous transfers in concrete exposed to high temperature. Heat Mass Transfer , Vol. 44, pp.149 -164.

Khoury G. A. and Willoughby, B. (2008) Polypropylene fibers in heated concrete. Part1: Molecular structure and materials behavior . Magazine of C oncrete Research , Vol. 60, no.2, pp.125- 136.

Mazlum, F. (1989) Pirinç Kabuğu Kulunun Puzolanik Özellikleri ve Kulun Çimento Harcının Dayanıklılığına Etkisi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Onaran, K. (2000) Malzeme Bilimi . İstanbul.

Purohit and R.A. Orzel (1998) Polypropylene: A Literature Review of the Thermal Decomposition Products and Toxicity . International Journal of Toxicology , Vol. 2, pp. 221-242.

Pirinç üretim istatistikleri (http://www.pdd.org.tr/pirinc -sektor -raporu), 09 Eylül 2014.

Ramezanianpour, A .A. M. Esmaeili, S.A. Ghahari and M.H. Najafi (2013). Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durabilit y, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers. Construction and Building Materials, Vol. 44, pp.411 –418.

Yuzer, N. Cinar, Z. Akoz, F. Biricik, H. Yalcin Gurkan, Y. Kabay, N. and Kizilkanat, A.B. (2013) Influence of Raw Rice Husk Addition on Struct ure and Properties of Concrete. Construction and Building Materials, Vol.44, pp. 54 -62.

Zeiml, M., Leithner, D., Lackner, R. and Herbert, M.A. (2006) How Do Polypropylene Fibers Improve the Spalling Behavior of In -Situ Conc rete. Cement and Concrete Research , Vol. 36, no.7, pp. 929 -942.

Soğuk Bağlanmış Uçucu Kül Agregaları ile Üretilmiş Kauçuklu Hafif Betonların Mekanik Özellikleri

H. Yıldırım[1], T. Özturan[2]

[1]İnşaat Müh., Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, hasan.yildirim@boun.edu.tr
[2]İnşaat Müh., Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, ozturan@boun.edu.tr

Öz

Bu çalışma, iri agrega olarak soğuk bağlanmış uçucu kül agregaları ve lastik talaş (tire chips, TC) ile üretilmiş hafif betonların bazı fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemek amacıyla yapılmıştır. Uçucu kül agregaları, kauçuk kırıntıları ve polipropilen liflerle güçlendirilmiştir. % 0.1 (L1P) ve % 0.5 (L5P) kauçuk kırıntısı ile % 0.1 (L1F) polipropilen lif kullanılarak güçlendirilmiş hafif agregalar ve herhangi bir g üçlendirme işlemi uygulanmamış kontrol (LC) amaçlı hafif agregalar kullanılarak 0.40 su/çimento oranı ile üretilmiş hafif betonların basınç ve yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü, eğilme dayanımı ve tokluk değerleri incelenmiştir. Beton karışımlarında iri agrega olarak kırma taş yerine hafif agrega ve lastik talaş kullanılmasının elastisite modülü ve dayanım özellikleri üzerinde faydalı bir etkisi gözlenmemiştir. Hafif betonların dayanım kaybı, hafif agreg aların harç fazı ve doğal agregalara göre daha zayıf olmalarına, lastik talaş ile harç fazı arasındaki aderans problemine ve lastik talaş yüzeylerinde tutulmuş ekstra hava boşluklarının varlığına bağlanabilir. Ancak, iri agrega olarak hacimce eşit miktarda lastik talaş ve hafif agreganın birlikte kullanımı lastik kauçuğun enerji soğurma ve çatlak köprüleme kapasitesine bağlı olarak, sadece hafif agrega kullanımına göre tokluk değerini artırmıştır. Ayrıca, iri agrega olarak hacimce eşit miktarda kırma taş ve hafif agreganın birlikte kullanımı ile üretilen beton numuneler ile iri agrega olarak sadece hafif agrega ların kullanıldığı beton numunelerden polipropilen lif takviyeli uçucu kül agregası içerenler agrega yüzeyine de çıkan bu liflerin beton ma trisine ekstra tutunma sağlaması ve olası çatlakları önlemesi nedeniyle daha yüksek eğilme dayanımı ve tokluk değerine sahiptir.

Anahtar Kelimeler: *soğuk bağlama; lif takviyeli peletler; kauçuklu beton; tokluk.*

Giriş

Hafif betonların kullanımı yapı elemanlarında kesit alan larının küçültülmesiyle yapı ölü yükünü azaltmak, yapıda kullanılacak çelik donatı miktarını azaltmak ve ısı ve ses yalıtımını artırmak gibi çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca, hafif betonlar da uçucu külün hem çimentonun bir k ısmı ile yer değiştirmesi hem de uçucu külden üretilen yapay hafif agrega kullanılması sera gazı salınımında ciddi azalma sağlayıp doğal agrega kaynaklarının hızlı bir şekilde tüketilmesini de önlemektedir. Hafif agregaların cinsi ve özellikleri üretilecek hafif betonların birim hacim ağırlık, dayanım ve dayanıklılık özelliklerini belirler. Uçucu kül hafif agregalarının üretilmesinde genelde soğuk bağlama ve sinterleme olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır (Baykal ve Doven, 2000; Harikrishnan ve Ramamurthy, 2006) . Soğuk bağlama yöntemi enerji yoğun bir süreç olan sinterlemeye göre daha ekonomiktir. Bununla birlikte, soğuk bağlama uçucu külün puzzolanik aktivitesine bağlı olup bu yöntemle daha düşük dayanımlı agrega üretilmektedir . Gesoğlu (2004) ve Gesoğlu ve diğ. (2004, 2006, 2007)

özgül ağırlığı 1.72–180 aralığında olan soğuk bağlanmış uçucu kül agregaları üretmişlerdir. Yüzeyi sodyum silikat ve silis dumanı harcı ile kaplandığında bu agregala rın su emme oranı ağırlıkça %27'den sırasıyla %3 ve %18'e düşmüştür. Yüzeyi sodyum silikat ile kaplanmış agregalardan üretilen hafif betonun basınç ve yarmada çekme dayanımı ile elastisite modülü daha yüksek olmuştur. Koçkal (2008) ile Koçkal ve Özturan (2010, 2011a) sinterleme metoduyla ürettikleri cam tozu ve bentonit içeren uçucu kül agregaları ve soğuk bağlama metoduyla ürettikleri katkısız uçucu kül agregaları ile sırasıyla LWGC, LWBC, LWCC hafif betonlarını üretmişler ve fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. LWCC, LWBC, LWGC hafif betonlarının taze halde hava miktarı ve yoğunluk değerleri sırasıyla % 3.9, 4.3, 4.1 ve 1991, 1960, 1975 kg/m^3, sertleşmiş halde basınç ve yarmada çekme dayanımı ile elastisite modülü değerleri ise 42.3, 53.5, 55.8 MPa , 3.7, 4.8, 4.9 MPa ve 19.6, 26.0, 25.7 GPa olarak ölçülmüştür.

Diğer taraftan, atık lastiklerin atık depolama alanlarında yok edilmesi yerine atık lastiklerden elde edilen lastik kırıntılarının gerek yalıtım ve dolgu malzemesi olarak yol altyapısında (Siddique ve Naik, 2004) gerekse ince ve iri agrega olarak hafif beton üretiminde (Li ve diğ., 2004) kullanılması da çevre sorunlarının azaltılmasında ve üretilen hafif betonun avantajları nedeniyle tavsiye edilmiştir. Ancak, y üksek şekil değiştirme ve enerji absorbe etme kapasitesine sahip kauçuklu betonlar darbe etkisi altında yüksek direnç göstermelerine rağmen çimento hamuru ve kauçuk kırıntıları arasındaki tutunma problemlerinden dolayı basınç ve çekme kuvvetlerine karşı çok daha hassastırlar (Khatip ve Bayomy, 1999).

Deneysel Çalışma

Malzemeler

Özgül ağırlıkları 3.14 g/cm^3, özgül yüzeyleri ise sırasıyla 3910 ve 3770 cm^2/g olan iki tip CEM I 42.5 R Portland çimentosu hafif agrega ve beton üretiminde kullanılmıştır. Zonguldak Çatalağzı Termik Santralinden temin edilen, özgül ağırlığı 2.06 g/cm^3 ve özgül yüzeyi 2880 cm^2/g olan F tipi uçucu kül ve 12 mm uzunluğunda, 32µ çapında ve 250 MPa çekme dayanımına sahip polipropilen lifler ile maksimum tane uzunluğu 4 mm olan la stik kırıntıları da hafif agrega üretiminde kullanılmıştır. Diğer taraftan, 10-40 mm uzunluğundaki lastik talaşları (TC) ise iri agrega olarak kauçuklu hafif beton üretiminde değerlendirilmiştir. Özgül ağırlıkları sırasıyla 2.65 ve 2.70 g/cm^3 olan doğal ve kırma kum (0-4 mm) ile 2.70 g/cm^3 olan kırma taş No 1 (4 -8 mm) ve No 2 (8 -16 mm) de soğuk bağlanmış uçucu kül hafif agregaları (4-16 mm) gibi beton üretiminde kullanılmıştır. Taze betonun istenen işlenebilirliğini sağlamak için naftalin sülfonat esaslı Rheobuid -1000 süper akışkanlaştırıcısı (SP) tercih edilmiştir.

Hafif Agregaların Üretilmesi

Hafif uçucu kül agregaları soğuk bağlama işlemiyle Şekil 1'de görünen 40 cm çapında ve 15 cm çeper yüksekliğine sahip peletleme diski kullanılarak üretilmiştir. Kontrol ve lif takviyeli hafif agregaların üretilmesi için kuru karışımlar daha önce Baykal and Döven (2000) tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarına binaen 43° eğim ve dakikada 45 kez dönüş hızına ayarlanmış diske yerleştirilmiş ve topaklanma süreci sonunda küresel peletler elde etmek amacıyla disk dönerken toplam malzemenin ağırlıkça %23-

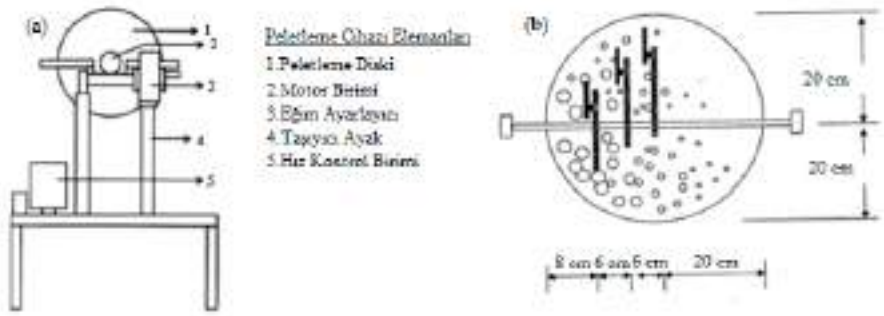
27'si kadar su ilk 10 dakika boyunca kuru karışıma püskürtülmüştür. Su püskürtme işlemi tamamlandıktan sonra oluşan peletlerin daha iyi sıkışma ve pekleşmesi ve dolayısıyla dayanımlarını artırmak için disk ekstra 10 dakika daha döndürülmüştür. Hafif agregaların üretilmesinde kullanılan çimento miktarı ağırlıkça uçucu külün %10'dur. Lifle güçlendirilmiş uçucu kül peletleri üretmek için kontrol amaçlı üretilmiş hafif agrega lara (LC) sırasıyla hacimce % 0.1 Polipropilen lif (L1F), % 0.1 (L1P) ve % 0.5 (L5P) lastik kırıntısı takviye edilmiştir. Üretilmiş peletler taze halde plastik torbalara konduktan sonra sertleşmeleri için 20 ˚C ve % 80 bağıl nem özelliklerine sahip kür odasında 28 gün muhafaza edilmiştir.

Uçucu Kül Agregaları Üzerine Testler ve Ölçümler

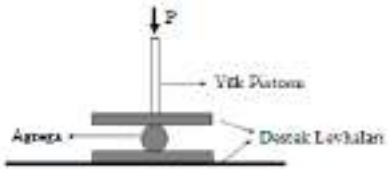
Kür işlemi tamamlandıktan sonra uçucu kül peletleri elenerek kırma taş No 1 ve No 2 ile ikameli kullanılabilecek şekilde gruplandırılmıştır. Hafif agregaların birim ağırlık, özgül ağırlık ve su emme oranları bulunduktan sonra Şekil 2'deki gibi yüklenmiş peletlerin ezilme dayanımları aşağıdaki formül aracılığıyla hesaplanmıştır (Koçkal ve Özturan, 2011b).

$$\sigma = \frac{2.8 * \mathrm{P}}{\pi * X^2}$$

Formülde P ezilme yükü X ise yükleme noktaları arasındaki mesafedir. Ortalama ezilme dayanımını hesaplamak için her grup agregadan ortalama çapı 12 mm olan rastgele 40 pelet seçilmiştir.



Şekil 1. (a) Peletleme cihazı ve (b) Diskin şematik görüntüsü.



Şekil 2. Agrega yükleme konfigürasyonu.

Beton Karışım Tasarımı

450 kg çimento dozajı ve 0.40 su/çimento oranı ile üretilen kontrol amaçlı betonlarda 228 kg/m^3 doğal ve 570 kg/m^3 kırma kum ile her birinden 490 kg/m^3 olmak üzere kırma taş No 1 ve No 2 kullanılmıştır. Hafif betonların üretilmesinde ise LC, L1P, L5P ve L1F uçucu kül hafif agregaları kırma taş No 1 ve No 2 iri agregalarıyla, TC ise yalnızca kırma taş No 2 ile hacimce yer değiştirilerek kullanılmıştır. Beton üretiminde kullanılan malzeme miktarları Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan malzeme miktarları (kg/m^3).

Üretim Planı	İri Agrega							SP	
	Kırma Taş		LC	L1P	L5P	L1F	TC	(%)	(kg/m^3)
	No 1	No 2							
CCSt(4-16)	490	490	-	-	-	-	-	1.2	5.4
CSt(4-8)TC(8-16)	490	-	-	-	-	-	185	3	13.5
LC(8-16)CSt(4-8)	490	-	290	-	-	-	-	1	4.5
LC(4-16)	-	-	581	-	-	-	-	1	4.5
L1P(8-16)CSt(4-8)	490	-	-	292	-	-	-	1	4.5
L1P(4-16)	-	-	-	584	-	-	-	1	4.5
L5P(8-16)CSt(4-8)	490	-	-	-	292	-	-	1	4.5
L5P(4-16)	-	-	-	-	584	-	-	1	4.5
L1F(8-16)CSt(4-8)	490	-	-	-	-	290	-	1	4.5
L1F(4-16)	-	-	-	-	-	578	-	1	4.5
LC(4-8)TC(8-16)	-	-	290	-	-	-	185	3	13.5
L1P(4-8)TC(8-16)	-	-	-	292	-	-	185	3	13.5
L5P(4-8)TC(8-16)	-	-	-	-	292	-	185	3	13.5
L1F(4-8)TC(8-16)	-	-	-	-	-	290	185	3	13.5

Beton Numunelerin Dökümü ve Kürleme

Hafif agregaların yüksek su emme probleminden kaynaklanabilecek çökme kaybını minimize etmek için beton karışımı hazırlanmadan önce hafif agregalar 24 saat süresince suya daldırılmış ve sonra suya doygun yüzey kuru hale gelinceye kadar 1 saat müddetle eleklerde bekletilmiştir. Beton karışımların hazır hale gelmesiyle taze betonun çökme, birim ağırlık ve hava miktarı ölçülmüştür. Üretilen betonların basınç ve yarmada çekme dayanımı ile elastisite modülü değerlerini ölçmek için 100*200mm ölçülerinde silindir numuneler, eğilme dayanımı ve tokluk değerlerini ölçmek için de 100*100*500 mm ölçülerinde kiriş numuneler dökülmüş, laboratuar koşullarında 24 saat kalıplarda bekletildikten sonra 20˚C sıcaklığa ve %85 bağıl nem oranına sahip kür odasında 56 gün muhafaza edilmiştir.

Deney Sonuçları Ve Değerlendirilmesi

Uçucu Kül Agregalarının Özellikleri

Hafif agregaların birim ağırlık, özgül ağırlık, su emme oranları ve ezilme dayanımları Tablo 2'de gösterilmiştir. Hafif agregaların çapı büyüdükçe artan yoğunlukları ve sahip

oldukları boşluk oranının azalması ve bu boşlukların daha çok kapalı olması nedeniyle su emme oranları daha önce Koçkal and Özturan (2011c) tarafından yapılan çalışmada da görüldüğü gibi düşmüştür. Hafif agregalar lastik kırıntısı ile takviye edildiğinde ezilme dayanımları ortalama 3.78 MPa değerinden 4.19 MPa değerine yükselmiş, lastik kırıntı oranı arttığında ise 3.90 MPa değerine düşmüştür. Diğer taraftan polipropilen lif takviyeli agregaların ortalama ezilme dayanımı ise kontrol grubuna göre az da olsa düşüktür.

Tablo 2. Uçucu kül agregalarının özellikleri.

Özellikler	LC		L1P		L5P		L1F	
	4-8	8-16	4-8	8-16	4-8	8-16	4-8	8-16
Birim Ağırlık, (g/cm^3)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Özgül Ağırlık (SDYK)	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
Su Emme, %	28.2	24.4	27.9	24.1	27.6	24.9	25.4	24.5
Ortalama Ezilme Dayanımı (MPa)	3.78		4.19		3.90		3.53	
Standart Sapma (MPa)	0.89		0.84		0.92		0.86	

Taze Beton Özellikleri

Beton karışımları 14±2 cm çökme değerini sağlamak için gerekli miktarda su azaltıcı katkı kullanılarak dökülmüştür. Lastik talaşın iri agrega olarak kullanıldığı betonlar dışındaki tüm karışımlar işlenebilir ve kohesif olup segregasyon göstermemişlerdir. Tablo 3'te görüldüğü gibi iri agrega olarak hafif agregalarla kırma taş beraber kullanıldığında birim ağırlık 2425 kg/m^3'ten 2170 kg/m^3'e düşmüş, hava miktarı ise %1.10'dan %2.10'a yükselmiştir. İri agrega olarak sadece uçucu kül peletleri kullanıldığında ise taze betonun birim ağırlığı 1975 kg/m^3'e düşmüştür. Bununla birlikte, lastik talaşın hafif agregalarla birlikte iri agrega olarak kullanıldığı betonların biri ağırlığı önemli oranda düşmüş ve 1590 kg/m^3 olarak gerçekleşmiştir. Hava miktarı ise %18.50'ye kadar yükselmiştir.

Tablo 3. Taze betonların özellikleri.

Üretim Planı	Birim Ağırlık (kg/m^3)	Çökme (cm)	Hava Miktarı (%)
CCSt(4-16)	2425	13.5	1.10
CSt(4-8)TC(8-16)	1770	15.5*	16.83
LC(8-16)CSt(4-8)	2190	15	2.10
LC(4-16)	1975	16	3.50
L1P(8-16)CSt(4-8)	2190	14	2.10
L1P(4-16)	1985	15.5	3.10
L5P(8-16)CSt(4-8)	2170	14	1.70
L5P(4-16)	1980	15	3.10
L1F(8-16)CSt(4-8)	2190	14	2.10
L1F(4-16)	2000	16	3.20
LC(4-8)TC(8-16)	1630	15.5*	15.86
L1P(4-8)TC(8-16)	1625	15*	17.87
L5P(4-8)TC(8-16)	1620	16*	16.34
L1F(4-8)TC(8-16)	1590	16*	18.50

*Kayma Çökmesi

Sertleşmiş Betonun Özellikleri

Basınç Dayanımı, Yarmada Çekme Dayanımı ve Elastisite Modülü

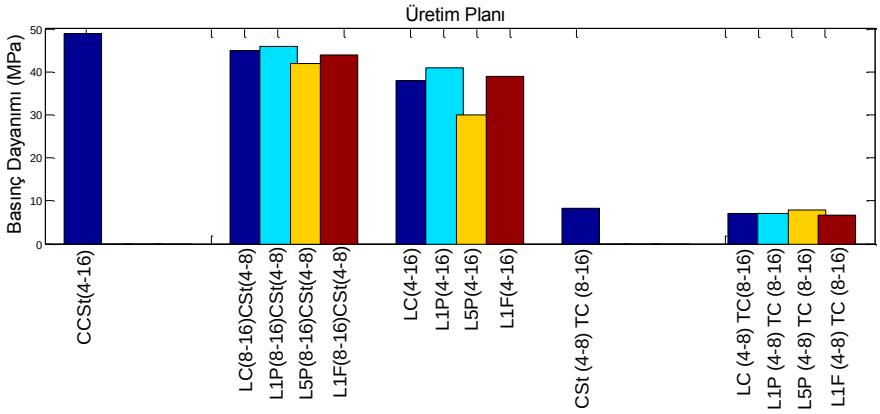
Tablo 4 'te görüldüğü gibi iri agrega olarak kırma taş yerine tamamen hafif agrega kullanıldığında hafif agregaların boşluklu yapısı ve düşük dayanımına bağlı olarak üretilen betonların basınç dayanımı 49.0 MPa'dan 29.8 MPa'a, yarmada çekme dayanımı 4.71'den 2.82 MPa'a, elastisite modülü ise 25.7 GPa'dan 19.7 GPa'a kadar düşmüştür. Gesoğlu ve diğ. (2004)'de 0.35 su/çimento oranı ile ürettikleri betonlarda kullandıkları soğuk bağlanmış uçucu kül agregası miktarı arttırıldığında basınç dayanımının 40.1 MPa'dan 29.1 MPa'a, yarmada çekme dayanımının 3.22'den 2.58 MPa'a, elastisite modülünün ise 22.4 GPa'dan 18.2 GPa'a düştüğünü gözlemişlerdir.

Tablo 4. Sertleşmiş betonların özellikleri.

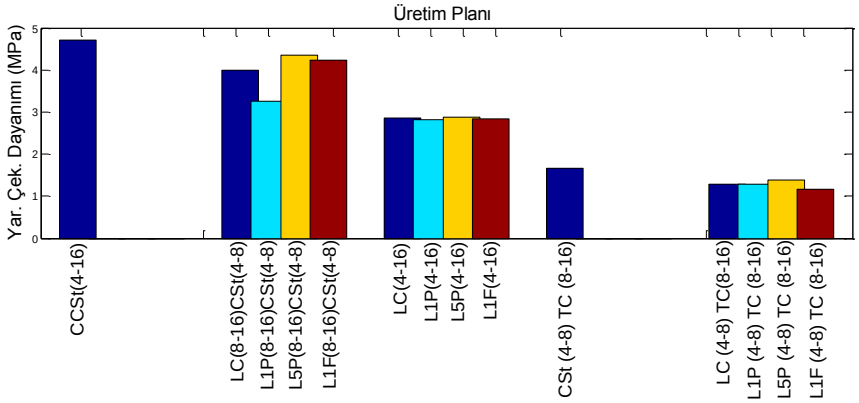
Üretim Planı	Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Tokluk (N mm)
CCSt(4-16)	49	25680	4.71	9.38	3616
CSt(4-8)TC(8-16)	8.17	9598	1.67	4.32	3056
LC(8-16)CSt(4-8)	45.42	23432	4	7.29	2096
LC(4-16)	38.3	20750	2.86	4.69	1462
L1P(8-16)CSt(4-8)	46.48	24642	3.26	6.86	2181
L1P(4-16)	41.09	20251	2.82	4.91	1080
L5P(8-16)CSt(4-8)	41.65	23580	4.35	7.0	1943
L5P(4-16)	29.8	19689	2.87	4.84	1071
L1F(8-16)CSt(4-8)	43.69	23857	4.24	7.98	2380
L1F(4-16)	39.37	20229	2.83	6.21	1948
LC(4-8)TC(8-16)	7.04	8517	1.29	3.27	2402
L1P(4-8)TC(8-16)	7.04	6984	1.29	3.16	3047
L5P(4-8)TC(8-16)	7.91	7398	1.39	3.41	1861
L1F(4-8)TC(8-16)	6.75	6504	1.16	3.05	1654

Üretilen betonların basınç ve yarmada çekme dayanımları ile elastisite modüllerindeki değişim sırasıyla Şekil 3, 4 ve 5'te gösterilmiştir. İri agrega olarak uçucu kül agregalarının kullanıldığı beton serileri içerisinde % 0.1 lastik kırıntısı takviyeli agregalardan üretilmiş betonların basınç dayanımı değeri en yüksektir. Kullanılan lastik kırıntısı oranı % 0.5'e yükseldiğinde ise üretilen betonun basınç dayanımı aynı seri içerisinde en düşük olmuştur. İri agrega olarak kırma taş ve hafif agregalar beraber kullanıldığında % 0.5 lastik kırıntısı ve % 0.1 polipropilen lif takviyeli uçucu kül agregalarından üretilen beton serilerinde yarmada çekme dayanımı diğer serilere göre daha yüksektir. İri agrega olarak lastik talaş kullanıldığında ise söz konusu mekanik özellikler tüm beton serileri için ciddi miktarda düşüş göstermiştir. Gesoğlu ve diğ. (2004) benzer şekilde ince agrega olarak doğal kum, iri agrega olarak da kırma taş kullanıldığında basınç dayanımını 75.8 MPa, yarmada çekme dayanımını 4.1 MPa ve elastisite modülünü 45.9 GPa olarak elde etmişlerdir. Ancak toplam agreganın hacimce % 50'si kadar lastik kırıntısı ve lastik talaş sırasıyla ince ve iri agrega olarak

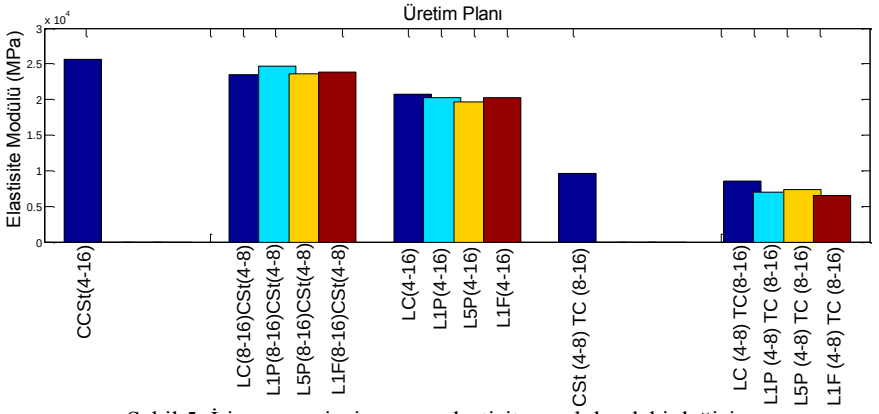
kullanıldığında basınç dayanımı 10.5 MPa'a, yarmada çekme dayanımı 0.9 MPa'a ve elastisite modülü 7.6 GPa'a düşmüştür.



Şekil 3. İri agrega cinsine göre basınç dayanımındaki değişim.



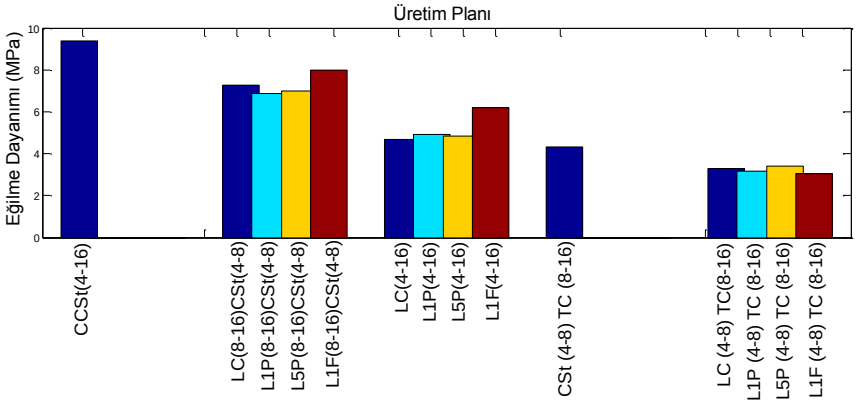
Şekil 4. İri agrega cinsine göre yarmada çekme dayanımındaki değişim.



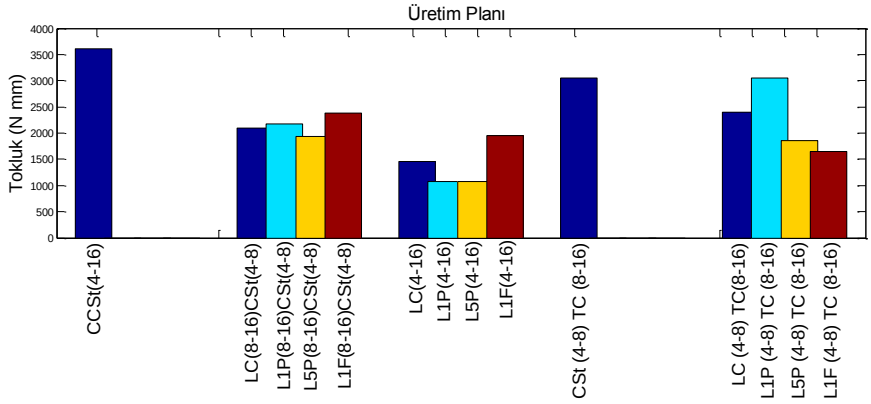
Şekil 5. İri agrega cinsine göre elastisite modülündeki değişim.

Eğilme Dayanımı ve Tokluk

Tokluk, donatılı veya donatısız betonların enerji emme kapasitesi olarak tanımlanır ve değeri betonun eğilme testi sırasında elde edilen yük-çökme eğrisinin altındaki alana eşittir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre iri agrega olarak sadece kırma taş kullanılan beton serisinin eğilme dayanımı ve tokluk değeri diğer beton serilerine göre daha yüksektir. Kırma taş yerine herhangi bir hafif agreganın veya lastik talaşın ikame edilmesi dayanım kaybından dolayı betonların eğilme dayanımlarını ve tokluk değerlerini düşürmüştür. Ancak, iri agrega olarak hacimce eşit miktarda lastik talaş ve hafif agreganın birlikte kullanılması Şekil 6'da görüldüğü gibi iri agrega olarak tamamen hafif agreganın kullanılması durumuna göre tokluk değerini arttırmıştır. Bu pozitif katkı lastik talaş kullanımının betonun basınç dayanımı ve elastisite modülündeki düşüşlerle ilintili olarak yük taşıma kapasitesini ve eğilme rijitliğini azaltmasına rağmen mikro çatlakların ilerlemesini önlemesi ve böylece çatlakların birleşmesini geciktirmesine bağlı olarak betonun şekil değiştirme ve enerji emme kapasitesini ciddi bir şekilde arttırmasına bağlanabilir. Lastik talaşın beton üretiminde kullanılması sonucu aynı katkı daha önce yapılan çalışmalarda da gözlenmiştir (Turatsinze ve Garros, 2008; Khaloo ve diğ., 2008).



Şekil6. İri agrega cinsine göre eğilme dayanımındaki değişim.



Şekil 7. İri agrega cinsine göre tokluk değerlerindeki değişim.

Şekil 6 ve 7'de görüldüğü gibi iri agrega olarak hacimce eşit miktarda uçucu kül agregası ve kırma taşın birlikte kullanılması durumunda veya tamamen uçucu kül agregaları kullanıldığında üretilen beton serileri içerisinde polipropilen lif katkılı agregaların kullanıldığı beton serisinin eğilme dayanımı ve tokluk değeri agrega yüzeyine çıkan bu liflerin beton matrisine ekstra tutunma sağlaması ve olası çatlakları önlemesi nedeniyle diğerlerinkinden yüksek olmuştur.

Sonuçlar

Uçucu kül agregalarıyla üretilmiş betonlar işlenebilir ve kohesif olup segregasyon göstermemişlerdir. İri agrega olarak kırma taş yerine tamamen veya kısmen uçucu kül peletlerinin kullanılması betonun bahsedilen mekanik özelliklerini düşürmüş ancak birim ağırlığının da % 20 civarında azalmasını sağlamıştır. Lastik talaşın beton karışımlarında kullanımı ise betonların hava muhtevasını ciddi bir şekilde arttırmış ve basınç dayanımı açısından taşıyıcı yapı elemanları olarak kullanımını kısıtlamıştır. Ancak, iri agrega olarak hacimce eşit miktarda lastik talaş ve hafif agreganın birlikte kullanımı, iri agrega olarak tamamen hafif agrega kullanımına göre üretilen betonun tokluk değerini attırmıştır. Ayrıca, yine hafif agregalarla lastik talaşın birlikte kullanıldığı beton serilerinden L1P(4-8)TC(8-16)'nin tokluk değeri kırma taş ve hafif agregaların birlikte iri agrega olarak kullanıldığı beton serilerininkinden daha yüksektir. Bu noktada, lastik talaş kullanılarak üretilecek betonda matris fazı ile lastik talaş taneleri arasındaki aderans probleminden ve lastik talaşın yüzeyinde ekstra boşluk tutmasından dolayı lastik talaş kullanımının betonun temel mekanik özellikleri üzerindeki olumsuz etkilerini gidermek için puzzolanik katkı ile birlikte kullanılmasının ve optimum kullanım oranının belirlenmesinin faydalı olabileceği söylenebilir. Diğer taraftan, polipropilen lif katkılı agregaların tamamen veya kırma taş ile birlikte iri agrega olarak kullanıldığı beton serilerinin eğilme dayanımı ve tokluk değerleri diğerlerine göre daha yüksek olmuştur.

Kaynaklar

Baykal, G. and Doven, A.G. (2000) Utilization of Fly Ash by Pelletization Process; Theory, Application Areas and Research Results. Resources Conservation and Recycling, Vol. 30, No. 1, pp. 59 -77.

Gesoglu, M. (2004) Effects of Lightweight Aggregate Propert ies on Mechanical, Fracture and Physical Behaviour of Lightweight Concretes , Ph.D. Thesis, Boğaziçi University , Istanbul, Turkey.

Gesoglu, M., Ozturan, T. and Guneyisi, E. (2004) Shrinkage Cracking of Lightweight Concrete Made with Cold -Bonded Fly Ash Aggregates. Cement and Concrete Researc h, Vol. 34, No. 7, pp. 1121- 1130.

Gesoglu, M., Ozturan, T. and Guneyisi, E. (2006) Effect s of Cold-Bonded Fly Ash Aggregate Properties on the Shrinkage Cracking of Lightweight Concretes. Cement & Concrete Composites , Vol. 28, No . 7, pp. 598-605.

Gesoglu, M., Ozturan, T. and Guneyisi, E. (2007) Effects of Fly Ash Properties on Characteristics of Cold-Bonded Fly Ash Lightweight Aggregates. Construction and Building Materials , Vol. 21, No. 9, pp. 1869 -1878.

Harikrishnan, K.I. and Ramamurthy, K. (2006) Influence of Pelletization Process on the Properties of Fly Ash Aggregates. Waste Management , Vol. 26, No. 8, pp. 846 -852.

Khaloo, A.R., M. Dehestani, and P. Rahmatabadi (2008) Mechanical Properties of Concrete Containing A High Volume of Tire –Rubber Particles. Waste Management, Vol. 28, No. 12, pp. 2472- 2482.

Khatib, Z.K. and Bayomy, F.M. (199 9). Rubberized Portland Cement Concrete. Journal of Materials in Civil Engineering , Vol. 11, No. 3, pp. 206 -213.

Kockal, N.U. (2008) Effects of Lightweight Fly Ash Aggregate Properties on the Performance of Lightweight Concretes , Ph.D. Thesis, Boğaziçi University, Istanbul, Turkey.

Kockal, N.U. and Ozturan, T. (2010) Effects of Lightweight Fly Ash Aggregate Properties on the Behavior of Lightweight Concretes. Journal of Hazardous Materials , Vol. 179, No. 1 -3, pp. 954 -965.

Kockal, N.U. and Ozturan, T. (2011a) Strength and Elastic Properties of Structural Lightweight Concretes. Materials and Design , Vol. 32, No . 4, pp. 2396 -2403.

Kockal, N.U. and Ozturan, T. (2011b) Characteristics of Lightweight Fly Ash Aggregates Produced with Different B inders and Heat Treatments. Cement & Concrete Composites , Vol. 33, No. 1, pp. 61 -67.

Kockal, N.U. and Ozturan, T. (2011c) Durability of Lightweight Concretes with Lightweight Fly Ash Aggregates. Construction and Building Materials , Vol. 25, No . 3, pp. 1430-1438.

Li, G.Q., M.A. Stubblefield, G. Garrick, J. Eggers, C. Abadie, and B.S. Huang (2004) Development of Waste Tire Modified Concrete. Cement and Concrete Research , Vol. 34, No. 12, pp. 2283- 2289.

Siddique, R. and Naik ,T.R. (2004). Pr operties of Concrete Containing Scrap -Tire Rubber - An Overview. Waste Management , Vol. 24, No. 6, pp. 563 -569.

Turatsinze, A. and M. Garros (2008) On The Modulus of Elasticity and Strain Capacity of Self-Compacting Concrete Incorporating Rubber Aggregate s. Resources Conservation and Recycling , Vol. 52, No. 10, pp. 1209 -1215.

Kentsel Dönüşüm Sonucu Oluşan Molozların Geri Dönüşümle Betonda Kullanımı – Silis Dumanı Katkılı Geri Kazanılmış Agregalı Betonlar

H. Dilbas[a], M. Şimşek[b]
[a, b] *Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34220 Istanbul, Türkiye*
[a] Tel: (0 212) 383 51 51
Eposta: hdilbas@yildiz.edu.tr
[b] Tel: (0 212) 383 51 46
Eposta: msimsek@yildiz.edu.tr , mesutsimsek@gmail.com

Ö. Çakır
Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34220 Istanbul, Türkiye
Tel: (0 212) 383 52 42
cozgur@yildiz.edu.tr

ÖZ

Toplum taleplerinin aşırı tüketim yönünde değişimi nedeniyle daha fazla kaynağa ihtiyaç duyulmaktadır ve bu durum dünyada kaynakların aşırı tüketimine neden olmaktadır. Son yıllarda, tüketim toplumunun bir sonucu olarak kentleşmenin hızlı bir şekilde gerçekleşmesi, yıkım ve yapım aktivitelerinin aşırı ölçekte artmasına neden olmaktadır. Ülkemizde 2012 yılında başlatılan Kentsel Dönüşüm kapsamında çok yüksek miktarda inşaat atığı çıkması beklenmekle birlikte, bu atıkların depolanması ve çevresel etkilerinin değerlendirilmesi önem taşımaktadır. İnşaat sektöründe sürdürülebilirlik kapsamında bu atıkların betonda geri kazanılmış agrega olarak kullanımı oldukça önemli bir yaklaşımdır. Bu deneysel çalışma, oluşan/oluşacak geri dönüşüm atıklarını değerlendirerek, silis dumanının geri kazanılmış agregalı (RA) betonda kullanılabilirliğini araştırmayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda , kentsel dönüşüm kapsamında yıkılmış bir binadan elde edilen molozlar geri kazanılmış agrega olarak çeşitli oranlarda (%0-30-40-70-100) beton üretiminde kullanılmıştır. Ayrıca, beton endüstrisinin yaygın olarak kullandığı bir diğer atık-yan ürün olan silis dumanı da çimento ile ağırlıkça yer değiştirmeli olarak %0-5-10 oranlarında kullanılmıştır. Çalışma kapsamında; üç grup halinde on beş beton serisi üretilmiş ve üretilen betonların fiziksel (yoğunluk ve su emme) ve mekanik (basınç, elastisite modülü ve yarmada çekme) özellikleri incelenmiştir. Yarmada çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiler irdelenmiş, numunelerin deneysel elastisite modülleri ile çeşitli standartlarda yer alan teorik bağıntılarla hesaplanan elastisite modülleri kıyaslanmıştır. Betonda silis dumanı ile geri kazanılmış agrega kullanımı durumunda, %30 geri kazanılmış agrega ve 5% silis dumanı katkısı uygun karışım oranları olarak elde edilmiştir. Geri kazanılmış agrega kullanımı ile beton elastisite modülü değerinin azaldığı gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: *Kentsel dönüşüm, geri kazanılmış agrega, silis dumanı, betonun fiziksel ve mekanik özellikleri, deneysel ve teorik elastisite modülü, standartlar.*

1. Giriş

İnşaat atıklarının kontrolsüz biçimde doğaya salınmasıyla doğa her geçen gün daha da kirletilmektedir. Bununla birlikte özellikle beton üretiminde oldukça yüksek miktarlarda kullanılan ve kaynakları hızla tüketilen agrega temininde sıkıntılar yaşanmaktadır. Her geçen gün yapım çalışmalarında ve yıkım işlerinde artışlar gözlendiği de dikkate alındığında, inşaat sektöründe sürdürülebilir büyümenin sağlanabilmesi için tedbirler alınması gerekmektedir. Sürdürülebilir büyüme kavramının yaygınlaşması ile çoğu ülke çeşitli alanlarda geri kazanılmış agreganın kullanılabilirliği için araştırmalara fonlar aktarmış ve bu agregalar için yasalar, yönetmelikler, araştırma programları ve politika tedbirleri ni uygulamaya koymuşlardır. Bu kapsamda Avrupa Agrega Birliği (UEPG)'nin yıllık incelemesinde Birleşik Krallık, Almanya'dan sonra ikinci sırada geri kazanılmış agrega üreten ülke konumundadır (Avrupa Agrega Derneği (2012)). Avrupa Birliği'nin yenilenmiş direktifleri doğrultusunda yıkıntı atığı geri kazanım oranı, 2020 yıllarında en az %70 olarak hedeflemiştir (Avrupa Parlamentosu (2008)).

Ülkemizde, 16 Mayıs 2012 tarihli ve 6306 sayılı "Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun" mevcut yapıların durumunu düzenlemektedir. Bu kanun uyarınca, yapının sahip olduğu mühendislik hizmeti durumu ve/veya kentsel plana uygunluk durumu ve/veya afet riskine maruz kalma durumu açısından bir eksiklik bulunması, o yapının veya yapıların yıkılması ve mevcut Türk Standartları çerçevesinde tekrar inşası gerekmektedir. Mart 2006'da İstanbul Büyükşehir Belediyesi ve İstanbul Çevre Yönetimi San. ve Tic. A.Ş. bir plan hazırlamış ve bu plan "Yapı ve Yıkıntı Atıkları Yönetim Planı" olarak isimlendirilmiştir. Buna göre, her bir belediyede yerel atıkları toplamak üzere aktarma merkezleri kurulması ve bu aktarma merkezleri aracılığı ile atıkların, İstanbul'un Anadolu ve Avrupa yakasında yerleştirilecek olan yapı atığı tesislerine gönderilmesi planlanmıştır (Ölmez ve Yıldız (2008)). Geri kazanılmış agrega ile ilgili yapılan çalışmalar Türkiye'de son zamanlarda hızlanmıştır (örneğin Topçu İ. B. (1997) ve Corinaldesi ve Moriconi (2009)). Birçok ülkede geri kazanılmış agrega üzerine detaylı çalışmalar yapılmış ve ortak bilgi birikimi bu yeni konu üzerinde oluşmaya başlamıştır (Kou ve diğ. (2007), Kou ve diğ. (2008) ve Kou ve diğ. (2013)). Yapılan çalışmalarda varılan ortak görüş, genellikle geri kazanılmış agrega oranının beton da artışı ile mekanik dayanımların düştüğü şeklindedir. Ayrıca, geri kazanılmış agreganın oransal artışı beton yoğunluğunu düşürmekte ve su emme oranını art ırmaktadır. Karşılaşılan bu olumsuz özelliklerin iyileştirilmesi de daha önce yapılan çalışmalarda irdelenmiştir (Kou ve diğ. (2007), Kou ve diğ. (2008), Kou ve Poon (2013), Fonteboa ve Abella (2008) ve Dilbas, H ve diğ. (2014)). Türkiye'de 6306 sayılı "Kentsel Dönüşüm Kanunu" kanunu neticesinde oluşacak yıkımlarla elde edilen/edilecek molozların saklanması ve çeşitli yollarla bertaraf edilmesi şu an ülke gündeminde yeni ve güncel bir konu olarak yer almaktadır.

Bu kapsamd a planlanan ve gerçekleştirilen çalışmalarda, yapısal ve yıkım atıklarının mevcut durumunun ve mühendislik yapılarında kullanılabilirliğinin tespiti için örnek olması bakımından, söz konusu Kanun çerçevesinde yıkılan bir binaya ait molozlar laboratu ara get irilmiş ve laboratuvar tipi çeneli kırıcı ile kırılarak beton karışımı için uygun granülometriye getirilmiştir. Molozlar, geri kazanılmış ince agrega (RA1), geri kazanılmış iri agrega (RA2) ve geri kazanılmış kum (RA3) olarak üç farklı dane boyutunda üretilmişler ve depolanmışlardır. Geri kazanılmış agregaların granülometrisi, sırasıyla doğal agregalı betonda kullanılan doğal ince agrega (NA1), doğal iri agrega

(NA2) ve doğal kum (NA3) ile aynıdır. RA1, RA2 ve RA3 sırasıyla NA1, NA2 ve NA3 ile birebir yer d eğiştirilerek kullanılmıştır. Toplamda beş adet beton serisi daha eklenmesi ile beton karışımlarında mineral katkı olarak %0-5-10 oranl arında silis dumanı kullanılmış ve 3 grup halinde 15 adet beton serisi elde edilmiştir. Bu deneysel çalışmada, Dilbas ve diğ. (2014) tarafından yapılan çalışmaya ek olarak, %100 geri kazanılmış agregalı ve %0-5-10 oranlı silis dumanlı beton numuneler üretilmiştir. Deneyler 28 günlük betonlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yarmada çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki ile ilgili irdelemelerde bulunulmuş, doğal agregalı beton ve geri kazanılmış agregalı betonların elastisite modülü değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Standartlarda verilen teorik formüllerce elde edilen elastisite modülü değerleri ile deneysel elastisite modülü değerleri karşılaştırılmıştır.

2. Deneysel Çalışma

2.1. Malzemeler

Beton üretiminde, kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilen TS EN 197 -1 (2012) 'e uygun genel amaçlı Tip I Portland Çimentosu ve ASTM C 1240-12 'ye uygun silis dumanı kullanılmıştır. Doğal agregalı beton üretiminde, kırılmış bazalt agregası ve dere kumu kullanılmıştır. Geri kazanılmış agrega kaynağı, İstanbul İli Sütlüce Mahallesi'nde 6303 sayılı Kentsel Dönüşüm Kanunu kapsamında yıkılmış bir binaya ait molozlardır. Yıkıntı atığı molozlar, sahada ve laboratu arda olmak üzere toplamda iki adımda geri kazanılmış agregaya dönüştürülmüştür. Bu adımlardan ilki, yıkıntı alanında molozun bileşenlerinin (beton, yalıtım malzemesi, sıva vs.) sınıflandırılmaksızın toplanmasından ve ardından toplanan molozların çekiç yardımıyla yaklaşık olarak 30 mm çapa sahip olacak şekilde küçültülmesi ile ufalanan agregalar daha sonra çeneli kırıcı ile daha da ufaltılmıştır. Doğal ve geri kazanılmış agregaların bileşenleri ve fiziksel özellikleri Tablo 2-3 'te görülmektedir. Polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi, beton üretiminde sabit işlenebilirliği (S4) sağlamak üzere kullanılmıştır. Geri kazanılmış agregalar beton üretiminde kullanılmadan önce suya doygun hale ge tirilmiştir.

Tablo 1 Çimento ve silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri.

İçerik	Silis Dumanı	Çimento
SiO_2 (%)	> 85	22.0
CaO (%)	< 1	64.9
SO_3 (%)	< 2	2.7
Al_2O_3 (%)	-	5.9
Fe_2O_3 (%)	-	3.5
MgO (%)	-	0.9
İç yapı	Mikro silika	-
Yoğunluk (g/cm^3)	0.55-0.70	3.16
Klor oranı (%)	<1	-
Spesifik yüzey alanı (m^2/kg)	15000	3540
Aktivite indeksi (%)	>95	-
Partikül oranı (<0,045mm)	< 40%	-
Kızdırma kaybı (%)	-	1.2

2.2. Beton Üretimi ve Kürü

Geri kazanılmış agregalı betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için laboratuarda beton serileri üretilmiştir. Karışım programına doğal agregalı beton serisi de eklenmiş, toplamda on beş adet beton karışımı S4 işlenebilme sınıfında üretilmiş ve Tablo 5'te verildiği gibi kodlan mıştır.

Tablo 2 Geri kaz anılmış agregaların bileşenleri.

Bileşenler	RA1 (%)	RA2 (%)	RA3 (%)
Beton parçası	84.64	72.32	*100* [a]
Seramik ve kiremit	4.96	10.68	-
Tuğla	5.48	10.4	-
Mermer	4.92	5.01	-
Strapor	-	0.11	-
Diğer (yalıtım malzemeleri, duvar kâğıdı, alçı vs.)	-	1.58	-
Toplam (%)	**100**	**100**	***100*** [a]

Tablo 3 Agregaların fiziksel özellikleri.

Agrega türü	Yoğunluk (g/cm^3)	Su emme (%)	Nem içeriği (%)
NA1	2.75	0.8	0.67
NA2	2.72	0.6	0.53
NA3	2.55	1.2	1.05
RA1	2.33	3.8	2.10
RA2	2.23	4.3	2.32
RA3	2.20	3.5	2.04

([a] RA3'ün küçük çaplı bileşenleri nedeniyle, RA3'ün bileşen sınıflandırması yapılamamıştır. Buna ek olarak, RA3'ün bileşenlerinin rengi büyük çoğunlukla gridir ve bileşenlerin hepsi beton parçası olarak kabul edilmiştir)

Beton karışım oranları Tablo 6'da verilmiştir. Her seri için 3'er adet numune üretilmiş, 24 saat kalıpta bekletilmiş ve deney gününe kadar (28. gün) 20±2 ^{o}C sıcaklıkta kirece doygun su içerisinde kür edilmiştir. Yarmada çekme, su emme ve yoğunluk deneyleri 100Øx200 mm boyutlu silindir numuneler de, bas ınç ve elastisite modülü deneyleri ise 150Øx300 mm boyutlu numuneler de gerçekleştirilmiştir.

2.3. Deneyler

Doğal agregalı beton ve geri kazanılmış agregalı betonlara ait fiziksel ve mekanik deneyler 28 günlük beton numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her bir karışıma ait taze beton üzerinde çökme deneyi yapılmıştır. Deney sonuçları Tablo 7 sunulmaktadır. 28 günlük kürün ardından sertleşmiş beton numunelerin basınç ve yarmada çekme deneyleri TS EN 12390-3 (2010)'ne uygun olarak yapılmıştır. Her bir beton serisinin ortalama b asınç ve yarmada çekme deney sonuçları Tablo 7'de verilmiştir. Numunelere ait yoğunluk ve su emme deneyleri 28 günlük kürün ardından TS 3526 (1980) 'ne uygun olarak yapılmıştır. Elde edilen beton numune sonuçlarına ait ortalama değerler ve yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranları Tablo 7'de verilmiştir. Numunelere ait elastisite modülleri ASTM C 469 (2002) standardına uygun olarak elde edilmişlerdir. Herbir numuneye ait elastisite modülü deneyi yapılmış ve verileri ayrı ayrı kaydedil miştir.

Elastisite Modülü - Deneysel Analiz 150Øx300 mm boyutlu silindirik numuneler üzerinde basınç dayanımı deneyi yapılması esnasında, yük-yer değiştirme değerleri elektronik kompressometre yardımıyla kaydedilmiştir. Bu veriler kullanılarak betonlara ait gerilme-birim şekil değiştirme verileri hesaplanmıştır. Bu bildiri çalışmasında, gerilme-şekil değiştirme eğrisi belirleme işleminde, son nokta olarak en büyük gerilmenin sonrasında en büyük gerilmenin %70'ine denk gelen nokta belirlenmiştir (Haktanır (2009)). Önceki çalışmalarda (örn. (Haktanır (2009)) Denk.1'de genel hali verilen eşitlik, deney sonuçları ile yakın sonuçlar verdiği görülmüştür (korelasyon

katsayısı (R^2>0,99)). Bu nedenle , gerilme-şekil değiştirme değerleri için uydurulan denklem (Denk.1) şu şekilde kullanılmıştır:

$$\sigma = A \times \varepsilon + B \times \varepsilon^2 \quad (1)$$

Burada; σ gerilme ve birimi MPa , ε birim şekil değiştirme ve birimsiz, A ile B denklem katsayıları ve bu katsayıların birimi MPa 'dır. Sonuç olarak; bu çalışmada genel formu Denk.1'de verilen eşitlik kullanılmış ve başlangıçtan itibaren en büyük basınç gerilmesinin ardından bu değerin %70'ine kadar olan tüm noktalar kullanılarak, noktalara en uygun korelasyonlu bir eğri denklemi uydurulmuştur. Elde edilen denklemler ile uygunluk değerleri (R^2) Tablo 8'de sunulmaktadır.

Elastisite modülü - Teorik Analiz Bu çalışmada, çeşitli standartlarca (Türk Standartları Enstitüsü (Şubat 2000), Amerikan Beton Enstitüsü (2010) ve Avrupa Standardizasy on Komitesi (2004)) sunulan elastisite modülü formülleri üzerinde çalışılmış ve hesaplanan elastisite modülleri sonuçları ile deneysel olarak elde edilen elastisite modülü verileri Tablo 9'da sunulmuştur. Standartların önerdiği teorik formüller Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4 Standartlarda verilen teorik elastisite modülü formülleri.

Standart	Teorik elastisite modülü formülü	
TS 500	$E = 14000 + 3250\sqrt{f_{ck}} \quad (\text{MPa})$	(2)
ACI 318M -05	$E = w_c^{1,5} 0.043 (f'_c)^{0,5} \quad (\text{MPa})$	(3)
ACI 318M -05	$E = 4700\sqrt{f'_c} \quad (\text{MPa})$	(4)
EN 1992 -1-1	$E = 22 \times (f_{cm}/10)^{0,3} \quad (\text{GPa})$	(5)

Tablo 4'de TS 500'de $f_{ck}(\text{MPa})$ karakteristik basınç dayanımıdır. Basınç dayanımı ise şu şekilde bulunmaktadır:

$$f_{cm} \geq f_{ck} + 1.0 \quad (\text{MPa}) \quad (6)$$

$$f_{c,min} \geq f_{ck} - 3.0 \quad (\text{MPa}) \quad (7)$$

Denk. 6-7'te, $f_{cm}(\text{MPa})$ gruptaki ortalama basınç dayanımı ve $f_{c,min}(\text{MPa})$ gruptaki en küçük basınç dayanımıdır. Tablo 4'de ACI 318M-05'de w_c (kg/m^3) grubun beton yoğunluğu ve $f'_c(\text{MPa})$ gruptaki ortalama basınç dayanımı değeridir. İlk denklem (Denk. 3) beton yoğunluğu 1440-2480 kg/m^3 olan betonlar için ve ikinci denklem (Denk. 4) normal betonlar için geçerlidir. Bu denklemler için hesaplanan elastisite modülü değerleri sırasıyla "ACI 318M-05 (1)" ve "ACI 318M-05 (2)" şeklinde gösterilmiştir. Ayrıca Tablo 4'de EN 1992-1-1 'de $f_{cm}(\text{MPa})$ grupt aki ortalama basınç dayanımıdır.

2.4. Deney Sonuçları

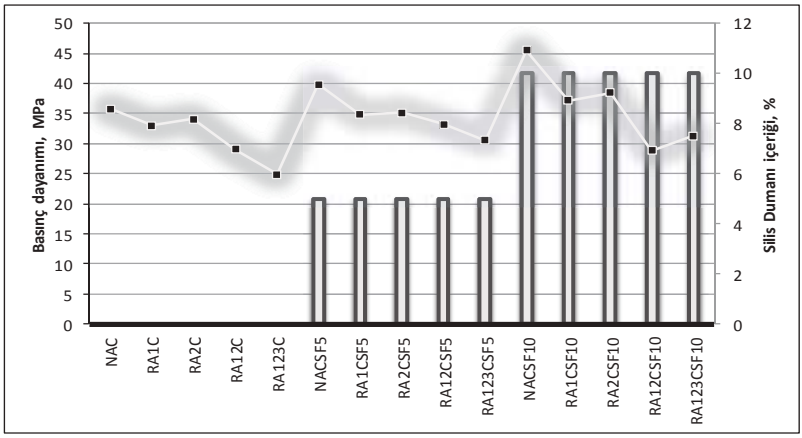
Basınç dayanımı deneyleri 28. günde yapılmış, sonuçlar Şekil 1 ve Tablo 7'de verilmiştir. Deneysel sonuçlara göre; basınç dayanımı, geri kazanılmış agreganın doğal agrega ile yer değiştirmesi sonucu azalmaktadır. Kırılan numuneler görsel olarak incelendiğinde, geri kazanılmış agregalı betonlarda kırılmaların yoğun olarak geri kazanılmış agregalarda oluştuğu görülmüştür. Ayrıca, genel anlamda silis dumanı beton dayanımını olumlu ölçüde artırmıştır (Tablo 7) (Corinaldesi ve Moriconi (2009)) .
Sadece basınç dayanımı göz önüne alındığında, sırasıyla %40 ve %30 geri kazanılmış agrega içeren ve silis dumanı katkılı RA1CSF10 ve RA2CSF10 numuneleri nin doğal agregalı beton (NAC) yerine kullanılmasının uygun olduğu görülmektedir. Benzer durum, RA2CSF5 serisi için de geçerlidir.

Tablo 5 Beton karışımlarına ait notasyonlar ve açılımları.

Notasyon	Açıklama
NAC	NA1, NA2 ve NA3 içeren doğal agregalı beton
RA1C	RA1, NA2 ve NA3 içeren beton
RA2C	NA1, RA2 ve NA3 içeren beton
RA12C	RA1 ve RA2 ve NA3 içeren beton
RA123C	RA1, RA2 ve RA3 içeren beton
NACSF5	NA1, NA2 ve NA3 ile silis dumanı (%5) içeren doğal agregalı beton
RA1CSF5	RA1, NA2 ve NA3 ile silis dumanı (%5) içeren beton
RA2CSF5	NA1, RA2 ve NA3 ile silis dumanı (%5) içeren beton
RA12CSF5	RA1 ve RA2 ve NA3 ile silis dumanı (%5) içeren beton
RA123CSF5	RA1, RA2 ve RA3 ile silis dumanı (%5) içeren beton
NACSF10	NA1, NA2 ve NA3 ile silis dumanı (%10) içeren doğal agregalı beton
RA1CSF10	RA1, NA2 ve NA3 ile silis dumanı (%10) içeren beton
RA2CSF10	NA1, RA2 ve NA3 ile silis dumanı (%10) içeren beton
RA12CSF10	RA1 ve RA2 ve NA3 ile silis dumanı (%10) içeren beton
RA123CSF10	RA1, RA2 ve RA3 ile silis dumanı (%10) içeren beton

Tablo 6 Beton karışım oranları.

Karışımlar		İçerikler (kg/m^3)									
		Su	Bağlayıcı		Kimyasal Katkı	Doğal Agrega			Geri Kazanılmış Agrega		
			Çimento	Mineral Katkı		NA1	NA2	NA3	RA1	RA2	RA3
1. Grup	NAC	175	350.0	0	0.096	777	576	538	0	0	0
	RA1C	175	350.0	0	0.289	0	576	538	648	0	0
	RA2C	175	350.0	0	0.289	777	0	538	0	463	0
	RA12C	175	350.0	0	0.289	0	0	538	648	463	0
	RA123C	175	350.0	0	0.385	0	0	0	648	463	486
2. Grup	NACSF5	175	332.5	17.5	0.289	777	576	538	0	0	0
	RA1CSF5	175	332.5	17.5	0.385	0	576	538	648	0	0
	RA2CSF5	175	332.5	17.5	0.385	777	0	538	0	463	0
	RA12CSF5	175	332.5	17.5	0.385	0	0	538	648	463	0
	RA123CSF5	175	332.5	17.5	0.420	0	0	0	648	463	486
3. Grup	NACSF10	175	315.0	35.0	0.501	777	576	538	0	0	0
	RA1CSF10	175	315.0	35.0	0.462	0	576	538	648	0	0
	RA2CSF10	175	315.0	35.0	0.385	777	0	538	0	463	0
	RA12CSF10	175	315.0	35.0	0.385	0	0	538	648	463	0
	RA123CSF10	175	315.0	35.0	0.420	0	0	0	648	463	486



Şekil 1 Betonların basınç dayanımı değerleri ve içerdikleri silis dumanı oranları.

Dayanım sınıfları bakımından incelendiğinde, RA1CSF10 ve RA2CSF10 serilerinin basınç dayanımı ve beton sınıfı C30/37'dir. %100 geri kazanılmış agrega ile C30/37 hedef basınç dayanımı dikkate alınarak üretilen RA123CSF5 ve RA123CSF10 betonları C25/30 dayanım sınıflarını sağlamışlardır. Geri kazanılmış beton numunelere ait tüm elastisite modülü değerleri, normal agregalı betonlara ait tüm elastisite modülü değerlerinden daha düşüktür. Burada etken olarak geri kazanılmış agrega içeriği ve zayıf özellikleri gösterilebilir. Çünkü geri kazanılmış agrega oranı betonda arttıkça numunelere ait elastisite modülü değerleri de azalmaktadır ve agrega elastisite modülü değeri azalması beton elastisite modülü değerini de azaltmaktadır (Dilbas ve diğ. (2014)) Ayrıca, elastisite modülü üzerinde silis dumanının olumlu etkisi de görülmektedir (Dilbas ve diğ. (2014)).

Konu ile ilgili önceki çalışmalar incelendiğinde, doğal agregalı betonların elastisite modülü üzerinde etkili parametreler i (basınç dayanımı ve yoğunluk gibi) kullanılarak teorik formülasyonların oluşturulduğu görülmektedir (Yıldırım ve Sengun (2011), Topçu (2005), Topçu (2007) ve Aslani ve Nejadi (2012)). Topçu (2007) çalışmasında, kompozit modellerin beton elastisite modülü için tahmin amaçlı olarak kullanılabileceğinden ve hesaplarda veri olarak kullanılmasının uygun olmadığından bahsetmektedir. Topçu (2005) diğer bir çalışmasında, ürettiği beton numunelerin elastisite modülünü, teorik olarak elde etmek için kompozit model ler kullanmış, agrega elastisite modülünün artışı ile sayısal sonuçların dağılımında artış olduğuna değinmiş ve betonun ela stisite modülü üzerine agrega elastisite modülü etkisini sayısal olarak göstermiştir. Ayrıca, Aslani ve Nejadi (2012) yaptıkları tarama makalesi çalışmasında, elastisite modülü formülasyonu üzerine yapılan çalışmalara değinmişler ve birçok makaleden elde ettikleri elastisite modülü formülleri ile standartlardaki formüllere de değinerek yeni bir elastisite modülü tahmin formülünü makalelerinde sunmuşlardır. Bu çalışmada (Aslani ve Nej adi (2012)), normal betonlar için Dinakar ve diğ. tarafından sunulan ve ACI 318 (2005)'in önerdiği elastisite modülü formüllerinin iyi sonuçlar verdiğinden bahsedilmektedir ki bu iki formül, sadece basınç dayanımını değişken parametre olarak içermektedir. Yıldırım ve Sengun (2011), çalışmalarında standart altı ve standart normal betonlar üretmiş, basınç dayanımları ve elastisite modülü parametreleri arasındaki ilişkileri incelemişlerdir. Bu çalışmada (Yıldırım ve Sengun (2011)), deneysel çalışma sonuçlarına dayanarak, beton basınç dayanımlarının geniş

aralıkları için (standartlardaki gibi) tek tip formül kullanmanın uygun olmadığı ve bunun yerine farklı tipteki betonlar için farklı elastisite modülü tahmin formüllerinin kullanımının daha iyi sonuçlar vereceği bilgisine yer verilmektedir (Aslani ve Nejadi (2012)).

Bu çalışmada, irdelenen standartların (Türk Standartları Enstitüsü (Şubat 2000), Amerikan Beton Enstitüsü (2010) ve Avrupa Standardizasyon Komitesi (2004)) önerdikleri teorik formüller dikkate alındığında, genel anlamda ACI 318M-05 (2), deneysel verilere yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Öte yandan, TS 500 ve EN-1992-1-1 standartları, elastisite modülü tahmininde sapmalar göstermiştir (Tablo 9). Standartların kullandıkları bağımsız değişkenler incelendiğinde, yakın sonuç veren ACI 318M-05 (2)'nin basınç dayanımı ve yoğunluk parametresi ni, diğer standartların ise sadece basınç dayanımı parametresini değişken olarak aldıkları görülmektedir.

Bu bilgiler ışığında geri kazanılmış agregalı betonların elastisite modülü değerleri incelendiğinde sadece basınç dayanımını dikkate alan standartlar, elastisite modülü tahmininde yetersiz kal dıkları söylenebilir. Farklı basınç dayanımlarına sahip betonlar için farklı elastisite modülü tahmin formüllerinin kullanımının daha iyi sonuçlar verebileceğine değinilmiş (Aslani ve Nejadi (2012)) ve buna istinaden farklı basınç dayanımlarına sahip betonlar için (örn. geri kazanılmış agregalı betonlar), farklı elastisite modülü tahmini formüllerinin kullanımının uygun olabileceği belirtilmiştir.

Tablo 7 Numunelere ait deney sonuçları.

Notasyon	Silis dumanı (%)	Geri kazanılmış agrega içeriği(%)	Çökme (cm)	Çökme sınıfı	Basınç dayanımı (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (MPa)	Yoğunluk (kg/m^3)	Su emme (%)	Yarmada çekme dayanımı/ basınç dayanımı
NAC		0	17	S4	35.8	2.25	2478	4.8	0.063
RA1C		40	19	S4	33.0	2.24	2202	7.0	0.068
RA2C	0	30	18	S4	34.1	2.41	2234	6.4	0.071
RA12C		70	18	S4	29.1	1.58	2038	9.1	0.054
RA123C		100	18	S4	24.9	1.29	1992	9.5	0.052
NACSF5		0	18	S4	39.9	2.62	2347	5.4	0.066
RA1CSF5		40	19	S4	34.8	2.52	2175	7.7	0.072
RA2CSF5	5	30	17	S4	35.2	2.97	2211	7.2	0.084
RA12CSF5		70	18	S4	33.2	1.92	2031	10.1	0.058
RA123CSF5		100	19	S4	30.6	1.58	2060	9.0	0.052
NACSF10		0	19	S4	45.5	3.40	2375	3.6	0.075
RA1CSF10		40	16	S4	37.2	2.46	2200	5.5	0.066
RA2CSF10	10	30	20	S4	38.5	2.63	2252	4.7	0.068
RA12CSF10		70	16	S4	28.9	1.62	2061	7.2	0.056
RA123CSF10		100	17	S4	31.3	2.07	2001	9.1	0.066

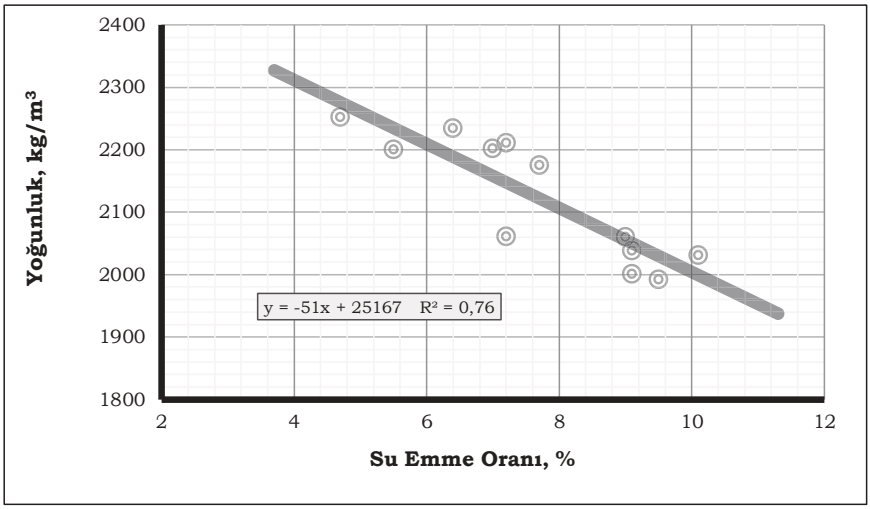
Tablo 8 Numunelerin A ve B denklem sabitleri ile denklemlerin uygunluk katsayıları.

Notasyon	$\sigma = A \times \varepsilon + B \times \varepsilon^2$		
	A (MPa)	B (MPa)	Korelasyon katsayısı (R^2)
NAC	33859	-8.E+06	0.9987
RA1C	27079	-6.E+06	0.9991
RA2C	29361	-5.E+06	0.9988
RA12C	26723	-6.E+06	0.9987
RA123C	12290	-4.E+06	0.8070
NACSF5	30100	-5.E+06	0.9987
RA1CSF5	28238	-5.E+06	0.9982
RA2CSF5	29401	-5.E+06	0.9998
RA12CSF5	25609	-5.E+06	0.9991
RA123CSF5	18197	-2.E+06	0.9988
NACSF10	32392	-5.E+06	0.9989
RA1CSF10	30028	-6.E+06	0.9973
RA2CSF10	30978	-6.E+06	0.9979
RA12CSF10	26096	-5.E+06	0.9977
RA123CSF10	24056	-3.E+06	0.9988

Tablo 9 Teorik ve deneysel elastisite modülü değerleri.

Notasyon	*Deneysel sonuçlar*		Teorik sonuçlar			
	Kiriş	*Teğet*	TS 500	ACI 318M - 05 (1)	ACI 318M - 05 (2)	EN-1992-1-1
NAC	*28830*	*29651*	31801	31775	28122	32254
RA1C	*23437*	*20559*	31801	25524	26999	31476
RA2C	*25167*	*23261*	31801	26514	27446	31787
RA12C	*22896*	*20483*	30250	21341	25354	30310
RA123C	*13805*	*9863*	28534	19048	23453	28926
NACSF5	*25619*	*23633*	33227	30883	29688	33321
RA1CSF5	*25541*	*22805*	31801	25730	27726	31981
RA2CSF5	*25571*	*23968*	31801	26523	27885	32091
RA12CSF5	*22026*	*19576*	31801	22678	27081	31533
RA123CSF5	*17668*	*15424*	31801	22240	25999	30771
NACSF10	*27721*	*25692*	34555	33571	31703	34660
RA1CSF10	*24968*	*22828*	33227	27063	28666	32628
RA2CSF10	*21162*	*23738*	33227	28514	29163	32966
RA12CSF10	*22098*	*20596*	30250	21629	25267	30248
RA123CSF10	*21581*	*20616*	31801	22509	26295	30980

Yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranı incelendiğinde %5 silis katkısının, bu oranı genellikle artırdığı gözlenmektedir. NAC için bu oran 0,063 olarak elde edilmişken, silis dumanı katkısız geri kazanılmış agregalı betonlar (RA1C, RA2C, RA12C ve RA123C) incelendiğinde RA içeriğinin %30'a kadar artırılması ile bu oran artmış ve %30 sonrası için azalmıştır. Geri kazanılmış agrega kullanımının, yarmada çekme dayanımı üzerindeki etkisinin basınç dayanımı üzerindeki etkisine göre farklı olması bu oranların oluşumunda etkilidir denilebilir (Tablo 7). Geri kazanılmış agrega katılması ile betonların su emme oranları artmış ve ters orantılı olarak da yoğunlukları azalmıştır (Şekil 2).



Şekil 2 Geri kazanılmış agregalı betonlar için su emme ve yoğunluk ilişkisi.

Geri kazanılmış agregalarda bulunan eski harç kalıntısının boşluklu ve kırıklı yapıya sahip olması, geri kazanılmış agregalı beton un yoğunluğunun doğal agregalı betonlara göre daha düşük, su emme değerlerinin ise daha yüksek olmasına neden olmuştur (Dilbas ve diğ.(2014). Tablo 7 incelendiğinde, geri kazanılmış agregalı ve silis dumanı katkılı betonların yoğunlukları, doğal agregalı betonlara kıyasla daha düşüktür. Geri kazanılmış agregalı betonların basınç dayanımları doğal agregalı betonlar ile birbirine benzerdir (örn. RA1CSF10 ve RA2CSF10).

3. Sonuçlar ve Öneriler

Yapılan deneyler neticesinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

1. Sadece basınç dayanım sonuçları dikkate alındığında, doğal agrega ile %30 oranında geri kazanılmış agrega ve %5-10 oranlarında silis dumanı kullanılması ile C30/37 basınç dayanım sınıflı betonlar elde edilebilmektedir.

2. C30/37 hedef basınç dayanımlı beton karışım tasarımı kullanılarak betonda %100 doğal agrega kullanımı ile C30/37 basınç dayanım sınıflı betonlar ve %100 geri kazanılmış agrega kullanılması ile C25/30 basınç dayanımına sahip betonlar elde edilmiştir.

3. Yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranı incelendiğinde, beton karışımlarına %5 silis dumanı katılması genellikle bu oran üzerinde olumlu etki yapmıştır. Ayrıca, geri kazanılmış agreganın %30 oranında kullanımı ile de bu oran artmış, fakat %30 ve üzerinde geri kazanılmış agrega kullanılması ile azalma göstermiştir.

4. Teorik elastisite modülü tahmini yapan standartlardan sadece basınç dayanımını bağımsız değişken olarak kullanan standartlar geri kazanılmış agregalı betonun elastisite modülü tahmininde yetersiz kalmış, basınç dayanımı ve yoğunluk parametrelerini bağımsız değişken olarak kullanan standart formülü ise yakın sonuçlar vermiştir. Geri

kazanılmış agregalı betonların teorik elastisite modülü tayininde, bu durumun dikkate alınmasının uygun ola cağı kanaatine varılmıştır.

5. Betonda kullanılan geri kazanılmış agrega oranı arttıkça, betonun yoğunluğu azalmış, su emme değeri artmıştır.

6. Geri kazanılmış agrega ile silis dumanının kullanımı sonucu doğal agregalı betonlar ile aynı basınç dayanım sınıfında ve doğal agregalı betonlara kıyasla daha düşük yoğunlukta betonlar elde edilmiştir.

Bilgi

Bu bildiri çalışması, bildiri yazarlarından İnş. Yük. Müh. Hasan DİLBAS'ın yüksek lisans tezinin bir bölümünü içermektedir.

KAYNAKLAR

Aslani F. ve Nejadi S. (2012) Mechanical properties of conventional and self - compacting concr ete: An analytical study. Construction and Building Materials, Vol. 36, pp. 330–347.

Amerikan Beton Enstitüsü (2005) ACI-318: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, U.S.A.

Amerikan Beton Enstitüsü (2010) ACI-318M-05: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, U.S.A.

Corinaldesi V. ve Moriconi G. (2009) Influence of Mineral Additions on The Performance of 100% Recycled Aggregate Concrete. Construction and Building Mate rials, Vol. 23, pp. 2869 -2876.

Dilbas, H., Şimşek, M. ve Çakır, Ö. (2014) An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume. Construction and Building Materials, Vol. 61, pp. 50 -59.

Avrupa Agrega Derneği (2012) Annual Review 2011 –2012, Brussels, Belgium.

Avrupa Standardizasyon Komitesi (2004) EN 1992 -1-1: Design of Concrete Structures – Part 1 -1: General Rules for Buildings. Brussels.

Avrupa Parlementosu (2008) Directive 2008/98/EC o f The European Parliament and of The Council of 19 November 2008 on Waste and Repealing Certain Directives, Brussels, Belgium.

Fonteboa, B.G. ve Abella, F.M. (2008) Concretes With Aggregates From Demolition Waste and Silica Fume. Materials and Mechanical Properties. Building and Environmental, Vol. 43, pp. 429 -437.

Haktanır T. (2009) Experimental Determination of Modulus of Elasticity of Concrete, 1st International Conference on Concrete Technology, Tabriz, Iran.

Kou S. -C., Poon C. -S. ve Chan D. (2007) Influence of Fly Ash As Cement Replacement on The Properties of Recycled Aggregate Concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 19, pp. 709–717.

Kou S. -C., Poon C. -S. ve Chan D. (2008) Influence of Fly Ash As A Cement Addition on The Hardened Properties of Recyc led Aggregate Concrete. Materials and Structure, Vol. 41, pp. 1191–1201.

Kou S. -C. ve Poon C. -S. (2013) Long -Term Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete Prepared wi th The Incorporation of Fly Ash , Cement an d Concrete Composites, Vol. 37, pp. 12-19.

Ölmez E. ve Yıldız Ş. (2008) İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Yönetimi ve Planlanan İstanbul Modeli. Kent Yönetimi, İnsan ve Çevre Sorunları '08 Sempozyumu, İstanbul, Türkiye.

Topçu İ. B. (1997) Physical and Mechanical Properties of Concretes Produced with Waste Concrete. Cem Concr Res, Vol. 27, pp. 1817 -1823.

Topçu İ. B. (2005) Alternative estimation of the modulus of elasticity for dam Concrete. Cem Concr Res, Vol. 35, pp. 2199 –2202.

Topçu İ. B. (2007) Betonda Elastisite Kuramı ve Baraj Betonları için Statik E-Modülünün Kompozit Modellerle Tahmini. İMO Teknik Dergi, Yazı 268, pp. 4055-4067.

Türk Standartları Enstitüsü (Şubat 2000) TS 500 Betonarme Yapıların Tasarım Ve Yapım Kuralları. Ankara, Türkiye.

Yıldırım H. ve Sengul O (2011) Modulus of elasticity of substandard and normal concretes . Construction and Building Materials Vol. 25, pp. 1645 –1652.

Mermer Tozu Katkılı Çelik Lifli Betonların Mekanik Özellikleri

Merve AÇIKGENÇ
Fırat Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23119
Elazığ
merveacikgenc@firat.edu.tr

Kürşat Esat ALYAMAÇ
Fırat Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23119
Elazığ
kealyamac@firat.edu.tr

Zülfü Çınar Ulucan
Fırat Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23119 Elazığ
zculucan@firat.edu.tr

ÖZ

Geleneksel beton, çekme dayanımı ve çekme birim deformasyon kapasitesi çok düşük olan gevrek bir malzemedir. Gevrek kırılmayı önlemek ve daha sünek bir davranış elde etmek için geleneksel beton karışımına kısa kesilmiş çelik teller eklenerek, çelik lifli betonlar üretilir. Literatürde Çelik Lifli Betonun (ÇLB) performansının arttırılması hususundaki çalışmalar artarak devam etmektedir. ÇLB'de boşluk oranı azaldıkça mekanik özelliklerin artacağı öngörülmektedir. Dolayısıyla boşluk doldurma özelliği olan ince bir malzemeden faydalanılarak ÇLB'nin performansı arttırılabilir. Bu amaçla, bu çalışmada, ÇLB'nin mekanik özelliklerinin arttırılması için atık bir malzeme olan mermer tozu kullanılmıştır. Madencilik sektörünün Türkiye'de her geçen gün gelişmesiyle mermer fabrikalarından kaynaklı önemli bir atık problemi ortaya çıkmıştır. Depolanması mümkün olmayan atık mermer çamuru, mermer tozu haline getirildikten sonra betonda kullanılabilmektedir. Mermer tozu ÇLB karışımlarında ince agrega ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Mermer tozu miktarı arttıkça belli bir değere kadar mekanik özelliklerin arttığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, mermer tozu kullanılarak, mekanik özellikleri daha iyi, çevreci ve ekonomik ÇLB üretilebileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Çelik lifli beton, mermer tozu, dayanım, tokluk

Giriş

Gevrek bir malzeme olan betonun, çatlamaya veya çatlak yayılımına karşı düşük direnci ve dolayısıyla düşük çekme dayanımı inşaat mühendisliği uygulamaları açısından bir dezavantaj ve yapı tasarımlarını sınırlayıcı bir problem olmuştur. Bu dezavantaj geniş açıklıklı elemanlarda beton malzemesinin maliyetinin artmasına da sebep olmaktadır. Zamanla geniş açıklıklı ve narin yapı elemanlarına ihtiyaç duyulması ve bu alandaki teknolojik gelişmeler, betonun kısa-ayrık ve teknik özellikleri yüksek lifler ile takviye

edilmesinde büyük rol oynamış ve Lifli Beton kavramının doğmasına sebep olmuştur. Lifli beton, çimento, su, ince ve iri agrega ve kısa-ayrık lifler içeren özel bir beton türüdür. Uygulamada ihtiyaca göre malzeme (cam, polipropilen, çelik vs.), şekil (düz, dalgalı vs.) ve geometri (boy, çap, narinlik) bakımından farklı lif tipleri mevcuttur. Bu lif tipleri içerisinde ise en çok kullanılan tip, betona kazandırdığı üstün özellikler sayesinde çelik liflerdir. Çelik lif içeren lifli betonlar ise Çelik Lifli Beton (ÇLB) adını almaktadırlar (ACI 544.1R, 2002; Brant, 2008; Mehta ve Montei ro, 2006). Geleneksel (lifsiz) beton ile karşılaştırıldığında, ÇLB'nin birçok üstün özelliği ortaya çıkmaktadır. Temelde, betona katılan liflerin amacı çatlak oluşumunu geciktirmek veya çatlak yayılımını önlemek olduğundan bu özellik betona süneklik kazandırır. Üstelik bu özelliğinden dolayı ÇLB'nin çekme dayanımı, geleneksel betona göre oldukça artar ve deformasyon yapabilme kapasitesi dolayısıyla tokluğu geleneksel betonunkine göre önemli ölçüde gelişir (Açıkgenç vd., 2015; Banthia ve Sappakittipakorn , 2007; Mehta ve Monteiro, 2006; Nataraja vd., 1999).

Bilindiği gibi toz malzeme (uçucu kül, silis dumanı vs.) kullanımı lifli betonda mekanik özellikler açısından yarar sağlamaktadır. Hatta ÇLB'de agrega kompozisyonunda ince malzeme miktarının arttırılması veya toz malzemeler ilave edilmesi gerek işlenebilirlik gerek mekanik özellikler açısından tavsiye edilen bir durumdur. Bu durumda toz malzeme artışı, beton i çindeki boşluk oranını azaltır ve liflerin sıyrılma direncini arttırır, bu sayede ÇLB'nin mekanik özellikleri artar (ACI 544.1R, 2002; Kang vd., 2013; Kim vd., 2012; Köksal vd. 2008). Bu çalışmada ise toz malzeme olarak mermer tozu (MT) seçilmiştir. Bugüne kadar MT ile yapılan çalışmalarda gerek çimento gerek ince agrega ile yer değiştirilerek kullanılabilmiştir. Mermer tozu (MT), mermer üretimi sırasında mermer çamuru olarak ortaya çıkan atık bir malzemedir. MT, ülkemizde ciddi sorunlar oluşturan bir atık olması, hem geleneksel betonda hem de özel beton türlerinde kullanılması ve beton özellikleri üzerinde belli bir ölçüye kadar pozitif etki yapması sebebiyle tercih ed ilebilir (Aliabdo vd., 2014; Alyamaç ve İnce, 2009; Demirel , 2010; Ergün, 2011; Gesoğlu vd., 2012). ÇLB'de bugüne kadar silis dumanı ve uçucu kül gibi toz malzemeler ile ilgili birçok çalışma yürütülmüş ve olumlu sonuçlara ulaşılmış olsa da MT kullanımı henüz gerçekleşmemiştir. Literatürdeki bu eksiği gidermek ve bu atık malzemenin ÇLB'de de değerlendirilebilir olduğunu göstermek amacı ile yürütülen bu çalışmada, ince agrega ile %10, 15 ve 20 oranlarında yer değiştirilen mermer tozunun ÇLB'nin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Deneysel Çalışma

Mermer tozunun ÇLB'de değerlendirilmesi ve mekanik özelliklere etkisini araştırmak amacıyla çimento dozajı, su/çimento oranı, çelik lif tipi ve miktarı aynı olan ÇLB karışımları üretilmiştir. MT içermeyen (referans) ÇLB'ler ile ince agregası %10, 15 ve 20 oranlarında MT ile yer değiştirilmiş ÇLB numuneleri üretilmiştir. Mekanik özellikler üzerinde MT etkisini araştırmak üzere, basınç, yarma ve eğilme deneylerinin sonuçları ile ÇLB'lerin tokluk özellikleri tespit edilmiştir.

Malzeme Özellikleri

Çalışmadaki tüm ÇLB karışımlarında CEM I 42,5 N tipi portland çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1 Çimentonun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.

Kimyasal Özellikler	%	Mekanik Özellikler		
SO_3	2,6	Basınç Dayanımı	2 gün	22,4
MgO	2,1	(N/mm^2)	7 gün	39,4
Cl	0,007		28 gün	51,0
Kızdırma Kaybı	1,7	Fiziksel Özellikler		
Çözünmeyen Kalıntı	0,3	Başlangıç priz süresi (dk)	161	
		Son priz süresi (dk)	260	
		Hacim sabitliği (mm)	0,4	
		Yüzey alanı (cm^2/gr)	3749	
		Özgül ağırlık	3,1	

Çelik liflerin eklenmesi ile taze ÇLB'de işlenebilirlik kaybı meydana geldiği bilinmektedir (Uygunoğlu, 2011; ACI 544.1R, 2002). Bu çalışmada üretilen ÇLB'lerde uygun işlenebilirlikte taze karışımlar elde etmek amacıyla özgül ağırlığı 1,1 g/cm^3 olan polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı (*SA*), her karışımda sabit miktarda kullanılmıştır.

Çalışmada kancalı uçlu çelik lifler bütün karışımlarda hacimce %1 oranında kullanılmıştır. Kullanılan liflerin özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

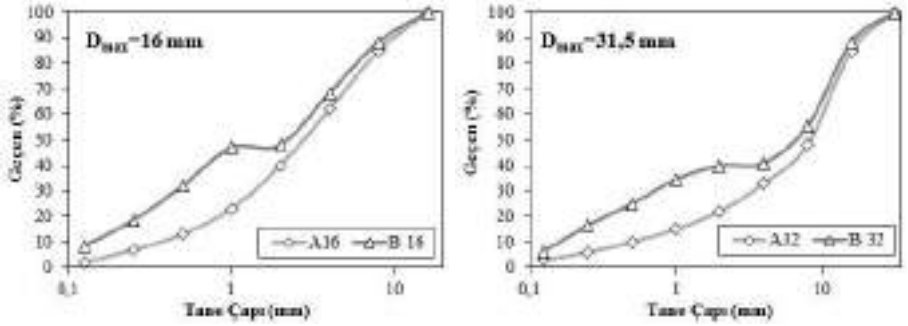
Tablo 2 Çelik Liflerin Özellikleri.

Lif Narinliği ($\lambda=l/d$)	Lif Boyu l (mm)	Lif Çapı d (mm)	Elastisite Modülü E (GPa)	Çekme Dayanımı f_t (MPa)
80	60	0,75	200	1250

Agrega olarak kalker esaslı kırmataş temin edilmiştir. Bu agreganın özellikleri Tablo 3'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan agregalar ise maksimum agrega çapı (D_{max}) bakımından farklı olarak iki grupta toplanmıştır. Ayrıca her grup, bir normal (*A*) bir de kesikli (*B*) agrega granülometrisi özelliği göstermektedir. Agregaların granülometrileri Şekil 1'de görülmektedir.

Tablo 3 Agreganın Özellikleri.

	31,5~8mm	8~2mm	1mm~filler
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	2,68	2,60	2,58
Su emme (%)	0,3	2,2	3,0



(a) (b)

Şekil 1 Agrega granülometrileri.

Şekil 1'de görüldüğü gibi çalışmada dört tip granülometri kullanılmıştır. Bunlar, tip (normal ve kesikli) ve D_{max} (16 ve 31,5 (32) mm) açısından farklılık göstermektedir. Çalışmada normal granülometri *A*, kesikli granülometri ise *B* olarak adlandırılmıştır.

Elazığ Organize Sanayi Bölgesi'nden temin edilmiş beyaz mermer tozunun, fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 4'de görülmektedir. Atık bir malzeme olan mermer tozu (MT) çalışmada, ince agrega (d<4 mm) ile hacimce yer değiştirilerek kullanılmıştır.

Tablo 4 Mermer Tozunun Özellikleri .

Özellik	Beyaz Mermer Tozu
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	2,71
Özgül Yüzey (cm^2/g)	4372
SiO_2 (%)	0,94
Fe_2O_3 (%)	0,46
$CaCO_3$ (%)	97,35

Karışım Oranları

Çalışmada bütün ÇLB karışımları, sabit çimento dozajı ve sabit S/Ç oranı kullanılarak üretilmiştir. Tablo 5'de üretilen ÇLB karışım oranları görülmektedir. Görüldüğü gibi karışımlarda MT hacimce %10, 15 ve 20 oranlarında ince agrega ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. İnce agrega, tüm agrega kompozisyonu içerisinde 4 mm göz açıklıklı elekten geçebilen malzemenin tamamıdır (TS 706 EN 12620, 2009). Ayrıca MT içeremeyen ÇLB karışımları ise referans olarak tasarlanmıştır. Böylece toplamda 16 adet ÇLB serisi üretilmiştir. Karışımlarda MT'nin taze beton üzerine etkisinin tespit edilebilmesi için kimyasal katkı miktarı sabit tutulmuştur.

Tablo 5 Karışım Oranları.

Karışım Kodu	ÇLB karışım oranları (kg/m^3)						
	PÇ	S/Ç	SA	Çelik Lif	Agrega		MT
					İri (>4mm)	İnce (<4mm)	
A16	350	0,5	7,0	78,5	702	1129	0
A32	350	0,5	7,0	78,5	1252	600	0
B16	350	0,5	7,0	78,5	581	1244	0
B32	350	0,5	7,0	78,5	1102	744	0
A16-10M	350	0,5	7,0	78,5	702	1016	118
A32-10M	350	0,5	7,0	78,5	1252	540	63
B16-10M	350	0,5	7,0	78,5	581	1119	130
B32-10M	350	0,5	7,0	78,5	1102	669	78
A16-15M	350	0,5	7,0	78,5	702	959	177
A32-15M	350	0,5	7,0	78,5	1252	510	94
B16-15M	350	0,5	7,0	78,5	581	1057	196
B32-15M	350	0,5	7,0	78,5	1102	632	117
A16-20M	350	0,5	7,0	78,5	702	903	236
A32-20M	350	0,5	7,0	78,5	1252	480	126
B16-20M	350	0,5	7,0	78,5	581	995	261
B32-20M	350	0,5	7,0	78,5	1102	595	156

ÇLB'ler granülometrilerine, D_{max}'a ve içerdikleri MT oranına göre isimlendirilmişlerdir. Karışım kodunun ilk karakteri granülometri tipini (normal *A*, kesikli *B*), bunu takip eden rakam D_{max}'ı temsil etmekte ve daha sonra MT oranı belirtilmektedir. Örneğin çelik lifli A32-15M karışımı, ince agregasının %15'i MT ile yer değiştirilmiş, D_{max}=31,5 (32) mm ve normal granülometriye sahip ÇLB'dir. MT oranı belirtilmemiş ÇLB'ler MT katkısı olmadan üretilen referanslar numunelerdir.

Deney Programı

Çalışmada MT'nin ÇLB'nin mekanik özelliklerine etkisini incelemek amacıyla 28 gün boyunca suda kür edilmiş numuneler üzerinde basınç, yarma ve eğilme deneyleri sırasıyla TS EN 12390-3 (2010), TS EN 12390-6 (2010) ve TS 10515 (1992) standartlarına uygun şekilde yapılmıştır. Her bir ÇLB serisinin basınç ve yarma deneyleri için en az 3'er adet standart küp numunesi, eğilme deneyi içinse en az 3 adet 150x150x500 mm boyutlarında kiriş numunesi kullanılmıştır.

Deneysel Sonuçların Tartışılması

Tablo 6'da deney sonuçlarından elde edilen, taze ve sertleşmiş beton özellikleri verilmiştir. Basınç (f_c), yarma (f_{st}) ve eğilme (f_{ft}) dayanımları için en az üçer numune üzerinde deney yapılmış ve sonuçlarının ortalaması alınmıştır.

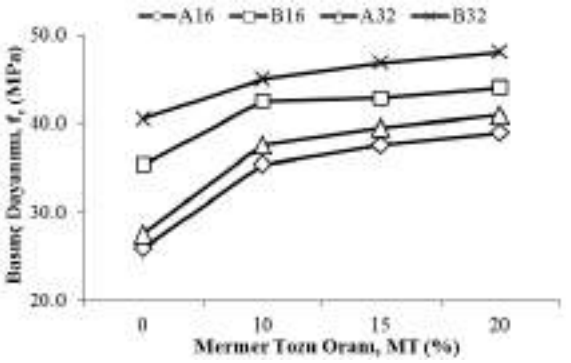
Tablo 6 ÇLB'lerin Taze ve Sertleşmiş Beton Özellikleri.

Seri	Ve-Be Süresi (s)	f_c (MPa)	f_{st} (MPa)	f_{ft} (MPa)
A16	10	25,9	3,5	6,6
A32	13	35,4	4,2	9,5
B16	2	27,5	4,0	7,5
B32	7	40,6	5,1	10,5
A16-10M	14	35,4	4,5	7,8
A32-10M	18	42,6	5,2	10,5
B16-10M	4	37,6	5,1	8,5
B32-10M	10	45,0	5,9	11,9
A16-15M	15	37,6	5,1	8,2
A32-15M	19	42,9	5,4	10,8
B16-15M	5	39,5	5,3	9,0
B32-15M	12	46,9	6,2	12,1
A16-20M	16	39,0	5,2	8,3
A32-20M	21	44,1	5,6	10,8
B16-20M	7	41,0	5,5	9,2
B32-20M	13	48,1	6,3	12,2

İnce agrega ile yer değiştirilerek kullanılan atık MT'nin ÇLB'nin mekanik özelliklerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Taze betonların özelliği Ve-Be deneyi ile belirlenmiştir. Karışımlarda kullanılan MT oranı arttıkça işlenebilirliğin bir miktar azaldığı tespit edilmiştir. Bu azalma miktarı literatürde yer alan çalışmalarla benzerlik göstermektedir (Alyamaç ve Aydın, 2015). Kesikli granülometriye sahip agrega içeren betonlar diğerlerine kıyasla daha işlenebilir betonlardır. Fakat kesikli granülometrinin segregasyona sebep olabileceği de unutulmamalıdır (Neville, 1991). Bu çalışmada da kullanılan granülometriler arasında kesikli granülometri ile üretilmiş ÇLB'lerin, diğerlerine kıyasla daha işlenebilir olduğu gözlemlenmiştir.

Basınç Dayanımı

Şekil 2'de ÇLB'lerin MT içeriği ile değişen basınç dayanımları grafiği görülmektedir. Bilindiği gibi D_{max} artışı mekanik özellikleri olumlu etkilemektedir (Mehta ve Monteiro, 2006; Neville, 1991). Burada da g örüldüğü gibi D_{max}=31,5 mm ile üretilmiş ÇLB'lerin basınç dayanımları, D_{max}=16 mm ile üretilmiş olanlarınkinden büyüktür. Ayrıca kesikli (*B*) granülomteriye sahip ÇLB'lerin dayanımları da diğerlerine göre daha büyük çıkmıştır.

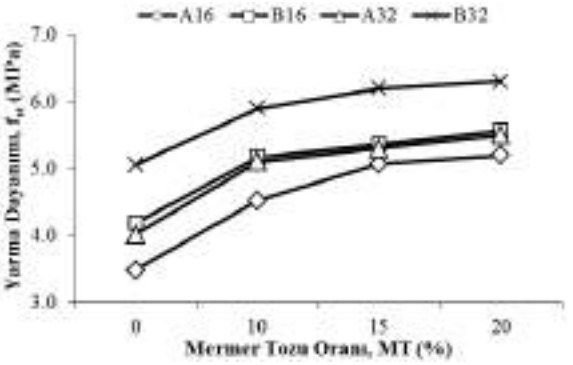


Şekil 2 ÇLB'lerin basınç dayanımları.

İnce agrega ile yer değiştirilen MT, ÇLB'lerin basınç dayanımlarını arttırmıştır. %10 oranında MT kullanımı basınç dayanımlarını, referanslara göre arttırmıştır. Bu orandan sonra basınç dayanımı artışları oldukça küçük düzeydedir.

Yarma Dayanımı

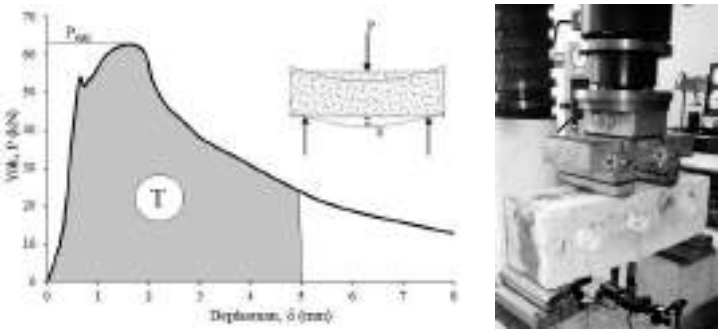
Yarma dayanımında da basınçta olduğu gibi D_{max}'ın artması veya kesikli (*B*) granülometrinin sonuçlar üzerinde olumlu etkisi vardır. MT arttıkça ÇLB'lerin yarma dayanımları artmıştır (Şekil 3).



Şekil 3 ÇLB'lerin yarma dayanımları.

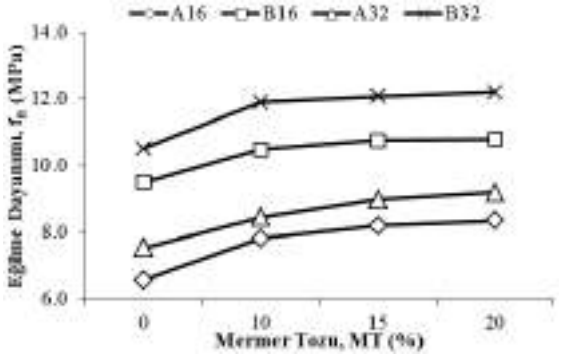
Eğilme Dayanımı

Çelik liflerin betona kazandırdığı önemli özellikler arasında deformasyon yapabilme kapasitesinin bulunduğundan daha önce bahsedilmişti. Bu çalışmada da eğilme deneyi sırasında 5 mm'ye kadar deplasman yaptırılan kiriş numunelerinin yük ve deplasman değerleri kaydedilmiş ve ÇLB'lerin yük-deplasman grafikleri çizdirilmiştir. Şekil 4'de eğilme deneyi sonucunda B16-15M numunesinden elde edilmiş tipik bir yük (P) – deplasman (δ) grafiği görülmektedir. Bu grafikten iki parametre elde edilmiştir. Bunlar, numuneleri n en büyük yükte (P_{max}) meydana gelen eğilme dayanımları ve tokluk değerleridir.



Şekil 4 Tipik yük-deplasman grafikleri ve eğilme deneyi.

Şekil 5'de ÇLB'lerin eğilme dayanımları görülmektedir. Bu dayanım değerleri, ÇLB numunelerinin eğilme deneyi sırasında ulaştıkları en büyük yük değeri (P_{max}) kullanılarak hesaplanmış dayanımlardır.



Şekil 5 ÇLB'lerin eğilme dayanımları.

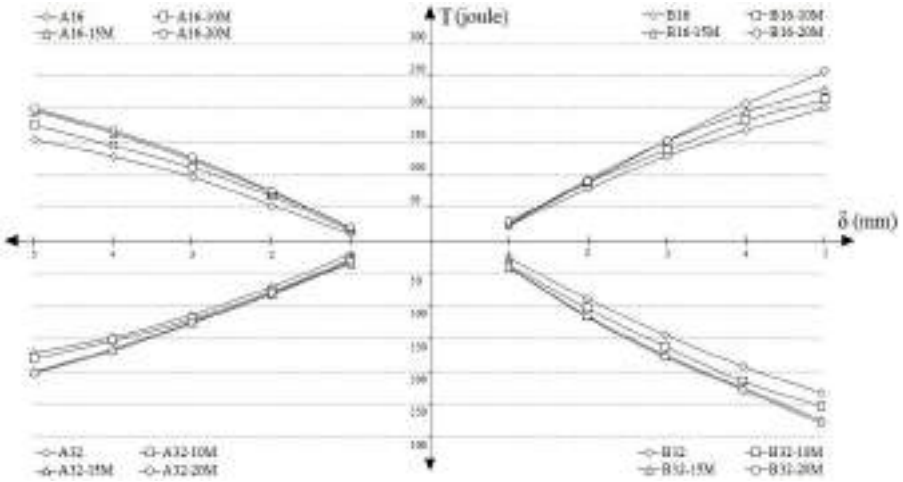
Şekil 5'de görüldüğü gibi, D_{max} ve granülometri farkı, eğilme dayanımı üzerinde de basınç ve yarma dayanımlarında da ortaya çıkan davranışı sergilemişlerdir. D_{max} arttıkça eğilme dayanımı artmış ve *B* granülometrisi her iki D_{max} için daha üstün performans sergilemiştir. MT ilavesi ise eğilme dayanımlarını arttırıcı etki yapmıştır (Şekil 5).

Buraya kadar olan dayanım değerlerinin hepsinde, MT'nin ince agrega ile yer değiştirmesi (özellikle *A16* granülometrisi üzerinde) olumlu etki yapmış ve bu malzemenin ÇLB'de değerlendirilebilir olduğunu kanıtlamıştır.

Tokluk

ÇLB'nin önemli özellikleri içinde en önemli parametre tokluktur. Tokluk (*T*), ÇLB'nin yük altında enerji yutma kapasitesidir. Normal betonun tokluğundan çok daha üstün olan ÇLB'nin tokluğu yük (*P*) - deplasman (δ) grafiğinin altında kalan alana eşittir. Betonda ilk çatlağın meydana gelmesinden sonra da yük taşımaya devam edebilen ÇLB'nin tokluğu, liflerin beton matristen sıyrılırken yuttuğu enerji ile alakalıdır (Bentur ve Mindess, 2005).

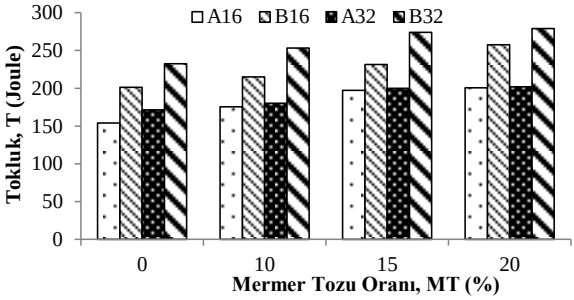
Bu çalışmada eğilme tokluğu değerleri hesaplanmış ve MT'nin tokluk üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Eğilme deneyi kiriş numunesi 5 mm deplasmanı tamamlayana kadar devam ettirilmiş ve bu süre içinde numunelere ait P ve δ verileri toplanmıştır. Şekil 6'da verilen grafikte dört farklı granülometri için tokluk değerleri her deplasman değeri için hesaplanmıştır. Örneğin 1 mm deplasman değerindeki tokluk, *P-δ* grafiğinin 0'dan 1 mm'ye kadar olan kısmının altında kalan alan, hesaplanarak elde edilmiştir. Aynı şekilde diğer deplasman değerleri için de 0'dan ilgili deplasmana kadar olan *P-δ* grafiğinin altında kalan alanlar hesaplanmıştır. Şekil 7'de ise δ=5 mm için en büyük tokluk değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 6'da görüldüğü gibi MT tokluk üzerinde olumlu etki yapmıştır. Tokluk değeri genellikle %15'e kadar artış göstermiş daha sonra neredeyse sabitlenmiştir. MT'nin %10 oranında kullanımı genel olarak ÇLB'lerin tokluklarını %5~14 oranında arttırırken, MT'nin %15 oranında kullanımı %15~28 ve %20'ye çıkması %18~30 oranında bir artış sağlamıştır.



Şekil 6 ÇLB'lerin tokluk değerleri.

Tokluk açısından *B* granülometrisi *A*'dan daha iyi bir performans sergilese de, tokluğun MT ile artması, en çok *A16* granülometrisinde etkili olmuştur. En büyük tokluk artış oranı her zaman *A16* granülometrisine sahip ÇLB'lerde gözlemlenmiştir (Şekil 6 ve 7).

D_{max} artışının tokluğu önemli ölçüde etkilemediği bilinmektedir (Chenkui ve Guofan, 1995). Bu çalışmada ise D_{max} artışı, tokluğu özellikle kesikli granülometri için olumlu etkilemiş ve en fazla %19 oranında bir artış sağlamıştır (Şekil 7).



Şekil 7 Tokluk değerlerinin MT ile değişimi.

Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada atık bir malzeme olan MT'nin ÇLB'de değerlendirilmesi mekanik özellikler bakımından araştırılmış ve olumlu sonuçlara ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- Beklendiği gibi, MT işlenebilirlik miktarını azaltmıştır. Ancak bu azalma miktarı oldukça küçük ve kimyasal katkı kullanılarak telafi edilebilecek bir seviyededir. Bu nedenle MT'nin ÇLB'de kullanılmasında işlenebilirlik açısından bir sakınca görülmemektedir.
- Bütün karışımlarda MT oranı arttıkça dayanım miktarlarının arttığı tespit edilmiştir. D_{max}=16 mm, MT oranı %20 olan serilerde, *A* (normal) granülometrisi için basınç, yarma, eğilme dayanımları ve tokluk sırasıyla %50, %50, %27 ve %30, *B* (kesikli) granülometrisi için sırasıyla %19, %25, %16 ve %20 artmaktadır. Benzer artış D_{max}=31,5 mm için de görülmektedir. Dayanımlardaki bu farklı artış miktarları toz malzeme kullanıldığında granülometrinin önemini ortaya koymaktadır.
- ÇLB'de mekanik özellikler açısından granülometri büyük önem taşımaktadır. Bununla beraber agrega içerisindeki toplam toz malzeme miktarının da mekanik özellikleri değiştirdiği tespit edilmiştir. ÇLB karışımları tasarlanırken mekanik özelliklerin maksimum değerlere ulaşması isteniyorsa, optimum granülometri ve toz agrega miktarı tespit edilmelidir.
- MT Türkiye'de yaygın olarak bulunan ve ekonomik bir atıktır. Dolayısıyla ÇLB gibi özel bir beton türünde kullanılması ekonomik ve çevreci bir yaklaşım olarak görülmekte ve tavsiye edilmektedir.

Teşekkür Bu çalışma FÜBAP MF 1329 nolu proje ile desteklenmiştir. Çalışmada kullanılan çelik liflerin temin edilme sürecine verdikleri destekten dolayı Kemerli Metal Çelik Mobilya Malzemeleri Makina San. ve Tic. Ltd. Şti.ne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

American Concrete Institute (2005) ACI 544.1R-96: State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. Michigan.

Açıkgenç, M., Ulaş, M., Alyamaç, K.E. (2015) Using an Artificial Neural Network to Predict Mix Compositions of Steel Fiber -Reinforced Concrete. Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 40, pp. 407–419.

Aliabdo, A.A., Abd Elmoaty, A.E.M., Auda, E.M. (2014) Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. Construction and Building Materials, Vol. 50, pp. 28–41.

Alyamaç, K.E. ve Aydın, A.B. (2015) Concrete Properties Containing Fine Aggregate Marble Powder. KSCE Journal of Civil Engineering, DOI 10.1007/s12205-015-0327-y, pp. 1-9.

Alyamaç, K.E. ve İnce, R. (2009) A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. Construction and Building Materials, Vol. 23, No. 3, pp. 1201–1210.

Banthia, N. and Sappakittipakorn, M. (2007) Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. Cement and Concrete Research, Vol. 37, No. 9, pp. 1366–1372.

Bentur, A. and Mindess, S. (2005) Fibre Reinforced Cementitious Composites. Elsevier Science Publishing, New York, USA.

Brandt, A.M. (2008) Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. Composite Structures, Vol. 86, No. 1-3, pp. 3–9.

Chenkui, H. and Guofan, Z.(1995) Properties of steel fibre reinforced concrete containing larger coarse aggregate. Cement and Concrete Composites, Vol. 17, No. 3, pp. 199-206.

Demirel, B. (2010) The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete. International Journal of the Physical Sciences, Vol. 5, No. 9, pp. 1372-1380.

Ergün, A. (2011) Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. Construction and Building Materials, Vol. 25, No. 2, pp. 806–812.

Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Kocabağ, M.E., Bayram, V., Mermerdaş, K. (2012) Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash. Construction and Building Materials, Vol. 37, pp. 160–170.

Kang, S.H., Kim, J.J., Kim, D.J., Chung, Y.S. (2013) Effect of sand grain size and sand-to-cement ratio on the interfacial bond strength of steel fibers embedded in mortars. Construction and Building Materials, Vol. 47, pp. 1421–1430.

Kim, J.J., Kim, D.J., Kang, S.T., Lee, J.H. (2012) Influence of sand to coarse aggregate ratio on the interfacial bond strength of steel fibers in concrete for nuclear power plant. Nuclear Engineering and Design, Vol. 252, pp. 1– 10.

Köksal, F., Altun, F., Yiğit, İ., Şahin, Y. (2008) Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes. Construction and Building Materials , Vol. 22, No. 8, pp. 1874–1880.

Mehta , P.K. and Monteiro , P.J.M. (2006) Concrete: Microstructure, Properties and Materials. 3th ed ition, McGraw -Hill, New York , USA.

Neville, A.M. (1991) Properties of C oncrete . 3th ed ition, Pitman , London, England .

Nataraja , M.C., Dhang , N., Gupta , A.P. (1999) Stress-strain curves for steel -fiber reinforced concrete under compression. Cement and Concr ete Compos ites, Vol. 21, No. 5-6, pp. 383- 390.

TS 10515 (1992) Beton-Çelik tel takviyeli-Eğilme mukavemeti deney metodu. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS 706 EN 12620 (2009) Beton Agregaları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 12390 -3 (2010) Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 123 90-6 (2010) Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerin in yarmada çekme dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Uygunoğlu, T. (2011) Effect of fiber type and content on bleeding of s teel fiber reinforced concrete. Constr uction and Building Mater ials, Vol. 25, No. 2, pp. 766–772.

İnşaat ve Yıkıntılardan Geri Kazanılan Agregaların Çeşitli Beton Elemanların Üretiminde Değerlendirilmesi

Fatih Özalp, Halit Dilşad Yılmaz, Ömer Kaya
İSTON, İstanbul Beton Elemanları ve Hazır Beton Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş.
Tel: (216) 446 70 80
E-Posta: iston@iston.com.tr

Mustafa Kara, Yasemin Kılıç
TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi
Tel: (262) 677 20 00
E-Posta: MAM.bilgi@tubitak.gov.tr

Öz

Çalışmada, inşaat ve yıkıntı atıklarından geri kazanılan agregaların çeşitli beton elemanlarının üretiminde kullanım kriterlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, İstanbul sınırlarında oluşan inşaat ve yıkıntı atıklarının kaynağında seçimli olarak ayrıştırılmış ve belirli boyutlara getirilmiş beton grubu atık malzemelerin hazır beton, beton boru, p arke taşı ve prefabrike ürünler gibi çeşitli beton üretimlerinde endüstriyel ölçekte kullanımı araştırılmıştır. Elde edilen geri kazanılan agregaların fiziksel özelikleri belirlenmiş ve normal agregalarla kıyaslanmıştır. Ayrıca, üretilen beton karışımlarının fiziksel ve mekanik özeliklerinin yanı sıra dürabilite özeliklerinin belirlenmesine ilişkin çalışmalar da yapılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Beton, Geri kazanım, Agrega, İnşaat, Yıkıntı, Geri kazanılan agrega.

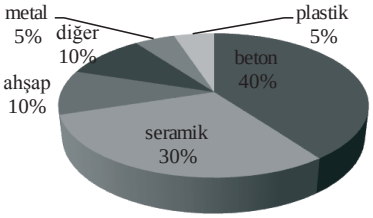
Giriş

Gelişen teknoloji ve nüfus artışının getirdiği çevre sorunlarından biri olan katı atıklar günümüzün en önemli çevre problemlerden biridir . Yapı sektöründe son yıllarda görülen büyümenin sonucu olarak, yapılan her türlü inşaat faaliyeti sonucu açığa çıkan inşaat ve yıkıntı atıkları katı atıkların önemli bir yüzdesini oluşturmaktadır.

Ekonomik ömürlerini tamamlayan yapıların yıkılmasının yanında, kentsel dönüşüm faaliyetleri ve deprem gibi doğal afetler sonucu ortaya çıkan inşaat atıklarının taşınması özellikle büyük şehirlerde çevre sorunlarına yol açmaktadır. Bununla birlikte , artan agrega ihtiyacı sonucu hammadde kaynaklarının azalması geri dönüşüm agregalarını kullanm ayı zorunlu hale getirmiştir. Yapılan bir çalışmaya göre, İstanbul'da yıllık agrega tüketimi yaklaşık 100 milyon ton civarındır (Öztürk ve diğ., 2007). Agrega kaynaklarının İstanbul'da başlıca inşaat mahallerine , hazır beton ve asfalt tesislerine

uzaklığı 50-75 km arasındadır. Mevcut agrega kaynaklarının tükenmesiyle şehir merkezlerinden uzaklaşılarak bulunan yeni agrega ocakları ekonomik ve çevresel açıdan sorunlar oluşturmaktadır.

Servis ömrünü dolduran ve zamanla değişen yeni yapısal gereksinim ve şartları karşılayamayan yapıların yıkımı ve deprem gibi bazı doğal afetlerin sonucu oluşan inşaat atıkları; beton, metal ve seramik gibi yapı malzemelerinden oluşur. Yapılan bir çalışmada inşaat yıkıntılarının bileşimi aşağıda verilen şekildeki gibi tahmin edi lmiştir. (Oikonomou , 2005).



Şekil 1 İnşaat yıkıntılarının bileşimi (Oikonomou , 2005).

Yapılan bir çalışmada beton yapıların yıkılması sonucunda oluşabilecek çevresel sorunlar şu şekilde gruplandırılmıştır; atmosferik kirlenme, yer altı suyunun kirlenmesi, arazi kirlenmesi, toprak kirlenmesi, diğer kirlilikler (gürültü kirliliği, vibrasyon, toz kirliliği ve koku) (Öztürk, 2005).

Beton atıklarından agrega geri kazanım tesisleri doğal agrega ocaklarından farklı olmaya cak biçimde beton atıklarını farklı boyutta fraksiyonlara ayıracak birincil ve ikincil kırıcılardan oluşur. Örnek bir tesis şeması aşağıdaki Şekil 2'de görülmektedir. Ülkemizde özellikle İstanbul ve diğer büyük şehirlerde agrega ihtiyacının karşılanması, ekonomik ve çevresel sorunlardan dolayı giderek daha zor hale gelmektedir. İnşaat sektörünün büyüklüğü ve devam eden yapım-yıkım çalışmaları dikkate alındığında, rehabilitasyon ve yıkım çalışmaları sırasında oluşacak atık betonların değerlendirilmesi için geri kazanılan agrega kullanımının dünyadaki birçok ülke gibi ülkemizde de yaygınlaştırılması gerekmektedir.



Şekil 2 Geri kazanılan agrega üretim şeması (Eguchi ve diğ., 2005).

Dünya genelinde geri kazanılan agrega ile ilgili standartların incelenmesi sonucunda bu tip agrega ile ilgili deney sonuçlarına, atığın kaynağına ve atığın içeriğine göre bazı sınıflandırmalar yapılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda farklı ülkelerde beton üretimlerinde izin verilen geri kazanılan agrega kullanım oranları Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1 Bazı ülkelerde izin verilen geri kazanılan agrega kullanımı (Roos, 2002).

Ülkeler	Uygulamalar	Geri kazanılan agrega hacimce (%)	Geri kazanılan ince agrega kullanımı	Beton sınıfı	Diğer malzemelerin kütlece yüzdesi
Belçika	Agresif olmayan çevresel etkilerde	0-100	Doğal agreganın standartlarını sağladığı durumlarda	Agregaya bağlı olarak en fazla C30/37	< 1 mineral olmayan karışımlar
Danimarka	Agresif olmayan çevresel etkilerde	> 4 mm olan kısım için 0-100	İzin veriliyor	Agregaya bağlı olarak en fazla 21 Mpa	-
Almanya	Kuvvetli kimyasal etki ve betonarme haricinde	Beton kırıkları için sadece 0-42	< 2 mm olan kısım için max %7	En fazla C35/45	< 0.2 ahşap ve plastik malzeme
Japonya	Nemsiz elemanlarda	Beton kırıkları için sadece 0-42	İzin veriliyor	Agregaya bağlı olarak en fazla C30/37	Max 10 kg/m^3 alçı & max 2 kg/m^3 asfalt
Hollanda	Agresif olmayan çevresel etkilerde	Beton kırıkları için sadece 0-20	%20'ye kadar izin veriliyor	Bütün beton yapı standartlarına göre	Max %1 bitüm & max 0.15 organik malzeme
ABD	Beton, betonarme elemanlarda	Beton kırıkları için sadece 0-100	İzin veriliyor	ACI 318-95' e göre	-

Deneysel Çalışmalar

Çalışmada farklı boyutlara sahip beton atıklarından elde edilen agregaların özeliklerinin belirlenmesi ve bunların doğal agregalarla kıyaslanabilmesi için bazı agrega deneyleri yapılmıştır. Daha sonra geri kazanılan agregaların doğal agregalarla farklı oranlarda yer değiştirmesiyle beton karışımları hazırlanmıştır. Bu karışımlar üzerinde mekanik deneyler ve dürabilite deneyleri yapılmıştır. Çalışmanın son kısmında bu agregaların kullanıldığı beton karışımları ile endüstriyel ölçekli üretimler yapılmış ve bu endüstriyel ürünlerin özelikleri belirlenmiştir.

Kullanılan Malzemeler

Çimento: Kullanılan çimento CEM I 42,5R türü olup özgül ağırlığı 3,14 g/cm^3, blaine özgül yüzeyi 345 m^2/kg'dır. Çimento bileşimini gösteren tablo aşağıda yer almaktadır.

Tablo 2 Çimento bileşimi.

Bileşen	Bileşen Yüzdesi (%)
SiO_2	19,80
Al_2O_3	4,43
Fe_2O_3	3,20
CaO	63,70
MgO	1,08
SO_3	2,59
Na_2O eşdeğeri	0,50
Klorür (Cl^-)	-
Kızdırma kaybı	2,77

Agrega: Çalışmada kullanılan geri kazanılan ince ve iri agregalar inşaat ve yıkıntı atıklarından ayrıştırılan beton atıklarıdır. Geri kazanılan ince ve iri agregaların ve doğal agregaların granülometrik bileşimleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3 Geri kazanılan ince agregaların granülometrileri.

Elek Boyutu (mm)	Geri kazanılan ince agrega (0-5 mm) %Geçen	Geri kazanılan ince agrega (0-12 mm) %Geçen	Geri kazanılan iri agrega (5-12 mm) %Geçen	Geri kazanılan iri agrega (12-22 mm) %Geçen
31,5	100	100	100	100
16	100	100	100	81
8	100	99	96	9
4	100	84	8	2
2	80	69	1	1
1	46	58	1	1
0,5	27	48	0	0
0,25	11	22	0	0
0,125	7	8	0	0
0,063	6	6	0	0

Geri kazanılan agregalarının bazı deney sonuçları Tablo 4 ve 5'de verilmektedir. Aynı tablolarda doğal agregaların deney sonuçları da gösterilmiştir.

Tablo 4 Geri kazanılan iri agrega ve normal iri kırmataş agregaların fiziksel özellikleri.

Fiziksel Özelikler	Geri kazanılan iri agrega (12-22mm)	Normal kırmataş (12-22mm)	Geri kazanılan iri agrega (5-12mm)	Normal kırmataş (5-12mm)
Sıkı birim ağırlık (kg/m^3)	1350	1547	1278	1564
Gevşek birim ağırlık (kg/m^3)	1229	1352	1160	1381
Görünen özgül ağırlık (kg/m^3)	2700	2750	2700	2760
Su emme (%)	7,9	0,8	9,0	0,8
Çok ince malzeme muhtevası (%)	1,2	0,55	0,70	0,92
Yassılık indeksi (%)	7,1	9	-	-
Los Angeles aşınma (%)	38,5	21,9	-	-

Tablo 5 Geri kazanılan ince agrega ve normal ince kırmataş agregaların fiziksel özellikleri.

Fiziksel Özelikler	Geri kazanılan ince agrega (0-5 mm)	Geri kazanılan ince agrega (0-12 mm)	Normal taş tozu (0-5mm)	Normal kum (0-3mm)
Sıkı birim ağırlık (kg/m^3)	1462	1469	1823	1554
Gevşek birim ağırlık (kg/m^3)	1298	1348	1540	1246
Görünen özgül ağ. (kg/m^3)	2690	2690	2820	2700
Su emme (%)	10,8	8,5	1,1	1,1
İncelik modülü	3,70	4,00	3,51	2,04
Metilen mavisi	1,0	1,25	1,0	0,75
Su içeriği (%)	0,73	0,55	1,19	6,76
Çok ince malz. içeriği (%)	4,33	6,15	10,94	0,6
Kum eşdeğer (%)	67	62	76	92
Organik madde tayini	*	*	*	*

**Referans renge göre açık.*

Taze ve Sertleşmiş Beton Deneyleri

Çalışmaların birinci bölümünde hazır beton ve bazı prefabrik ürünlerde kullanılabilecek S4 kıvam sınıfına giren karışımlar üretilmiştir. İkinci kısımda ise parketaşı, bordür, beton ve betonarme boru gibi ürünlerin üretiminde kullanılan sıfır çökmeli (slamplı) beton karışımları hazırlanmıştır. Hazır beton tasarımında beton dayanım sınıfı C 25/30 ve sıfır çökmeli beton tasarımında beton dayanım sınıfı C 30/37 olarak belirlenmiştir.

Kıvam sınıfı S4 olan hazır beton tasarımlarında, geri kazanılan beton agreg aları toplam yer değiştirmeleri %40, %30 ve %20 olarak belirlenmiştir. Bu yer değiştirme oranlarında yalnızca ince agregaların yer değiştirmesi, yalnızca iri agregaların yer değiştirmesi ve ince ve iri agregaların eşit oranda birlikte yer değiştirmesi olmak üzere 3 farklı çeşidi uygulanmıştır. Numune kodlamalarında, yer değiştirme oranları 2 haneli sayı, ince agrega yer değiştirmesi 'F', iri agrega yer değiştirmesi C, ince ve iri agregaların birlikte yer değiştirmesi 'FC' ve normal (referans) betonlar ise 'Referans ' olarak ifade edilmiştir. Sıfır çökmeli beton karışımlarında ise yer değiştirme oranları %25 ve %15'tir. Bunun yanında iri agrega yer değiştirmesi (5-12 mm ve 12-22 mm) boyutlar için sırasıyla 'N1' ve 'N2' olarak ve sadece kırmataş tozu yer değiştirmesi 'T' ile gösterilmiştir.

Hazır beton grubu beton karışımlarında katı madde oranı % 30 ve yoğunluğu 1,1 g/cm^3 olan polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı, çimento ağırlığının % 1,8'i oranında kullanılmıştır. Aynı kimyasal katkı sıfır çökmeli grubu betonlar da çimento ağırlığının % 1 'i oranında kullanılmıştır. Hazır beton grubu denemelerde su/çimento oranı 0,55 iken, diğer grupta bu oran 0,40 olarak belirlenmiştir. Referans betonun karışım oranları aşağıdaki tabloda verilmektedir.

Tablo 6 Betonda kullanılan malzemeler (Kg/m^3).

Beton Sınıfı	Çimento (Kg)	Kum (Kg)	Kırmataş tozu (Kg)	Kırmataş No1 (Kg)	Kırmataş No 2 (Kg)	Beton Kıvamı
C25/30	310	483	469	483	485	S4
C30/37	360	480	465	671	288	Sıfır çökme

Basınç Deneyi: Basınç deneyleri 150x150x150 mm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde yapılmış ve sonuçlar aşağıdaki tabloda verilmektedir.

Tablo 7. Küp basınç dayanım sonuçları.

Deneme	Ortalama basınç dayanımı (MPa)		Deneme (0-Çökmeli)	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	
	7 gün	28 gün		7 gün	28 gün
40FC	18,7	24,2	25T	26,2	27,9
40C	19,3	22,4	25N1	27,5	32,5
40F	17,7	22,2	15T	25,1	27,3
30FC	21,5	25,1	15N1	31,9	34,2
30C	22,1	28,5	15N2	31	36,8
30F	23,3	27,4	Referans	32,3	37,8
20FC	25,4	31			
20C	24,1	29,5			
20F	21,8	29,3			
Referans	28,9	36,4			

Yarmada Çekme Deneyi: Yarmada çekme deneyi için 150x150x150 mm küp numuneler üretilmiştir. Deneyler sonucunda yarma mukavemetleri TS EN 12390–6 'ya göre hesaplanmıştır (Tablo 8).

Tablo 8 Yarmada çekme deney sonuçları.

Karışımlar (C25/30)	Yarmada çekme dayanımı (MPa)	Karışımlar (0-Çökmeli)	Yarmada çekme dayanımı (MPa)
	28 gün		28 gün
40FC	2,9	25T	3,5
40C	3,1	25N1	3,7
40F	3,4	15T	3,1
30FC	3,6	15N1	4,2
30C	3,0	15N2	4,3
30F	3,2	Referans	4,4
20FC	3,2		
20C	2,9		
20F	3,2		
Referans	3,9		

Hızlı Klor Geçirimliliği Deneyi: ASTM C1202'ye göre yapılan hızlı klor geçirimliliği deneylerinde numuneden geçen akım değeri Tablo 9 'da verilmiştir.

Tablo 9. Hızlı klor geçirimliliği deneyi sonuçları.

Deneme	Geçen elektriksel yük miktarı (Coulomb)	Geçirimlilik sınıfı (ASTM C 1202)	Deneme (0-Çökmeli)	Geçen elektriksel yük miktarı (Coulomb)	Geçirimlilik sınıfı (ASTM C 1202)
40FC	6122	Yüksek	25T	6710	Yüksek
40C	5627	Yüksek	25N1	4266	Yüksek
40F	8018	Yüksek	15T	2630	Orta
30FC	6345	Yüksek	15N1	3657	Orta
30C	6550	Yüksek	15N2	2366	Orta
30F	5816	Yüksek	Referans	2425	Orta
20FC	4921	Yüksek			
20C	5442	Yüksek			
20F	3811	Orta			
Referans	2941	Orta			

Endüstriyel Ölçekli Çalışmalar

Endüstriyel ölçekli deneysel çalışmalar kapsamında, beton atıklarından geri kazanılan agregalar, farklı oranlarda yer değiştirilerek beton ürünler üretilmiş ve bu ürünlerin ilgili standartlarda belirtilen deney ve analizleri yapılmıştır.

Geri Kazanılan Agregalar Kullanılarak Üretilen Parketaşı

İnşaat ve yıkıntı atıklarından elde edilen agregalar normal agregalarla, (0-5)mm boyutlarına %20 ve (5-12) mm boyutlarına %20 olmak üzere toplamda %40 oranında yer değiştirilerek parke taşı üretilmiştir. Bu parke taşı üretimlerine ait beton karışım oranları ve TS 2824 EN 1338 standardına göre yapılan yarmada çekme dayanımı, su emme ve aşınma dayanımı deney sonuçları Tablo 10'de görülmektedir.

Tablo 10 Geri kazanılan agregalarla üretilen parke taşı karışımları ve test sonuçları.

Karışım	Çimento miktarı (kg/m^3)	Kum (kg/m^3)	(0-5) mm Normal kırmataş / 0-5mm atık (kg/m^3)	Normal kırmataş (5-12) mm / atık (5-12) mm (kg/m^3)	28. günde yarma dayanımı (MPa)	28. günde su emme (%)	28. günde aşınma (mm)
Referans	360	519	504 / 0	1037 / 0	4,2	5,4	23,0
%40 Yer değ.	360	509	98 / 376	608 / 378	2,4	8,7	25,0

Geri Kazanılan Agregalar Kullanılarak Üretilen Bordür

İnşaat ve yıkıntı atıklarından geri kazanılan agregalar kırmataş tozu ve kırmataş no1 agregaların yerine ayrı ayrı %25 oranında yer değiştirilerek bordür üretilmiştir. Üretilen bordürlere ait karışım oranları ve TS 436 EN 1340 standardına göre yapılan deney sonuçları aşağıda verilmiştir.

Tablo 11 Geri kazanılan agregalarla üretilen bordür taşı karışımları ve deney sonuçları.

Karışım	Çimento miktarı (kg/m^3)	Kum (kg/m^3)	Normal kırmataş (0-5 mm) / atık (0-5) mm (kg/m^3)	Normal kırmataş (5-12) mm / atık (5-12) mm (kg/m^3)	28. günde eğilme dayanımı (MPa)	28. günde su emme (%)	28. günde aşınma (mm)
Referans	420	486	471 / 0	970 / 0	5,0	4,6	22,0
%25taş tozu	420	477	0 / 443	953 / 0	3,9	6,1	24,0
%25 no1	420	476	462 / 0	475 / 443	4,4	5,3	22,5

Geri Kazanılan Agregalar Kullanılarak Üretilen Beton ve Betonarme Borular

İnşaat ve yıkıntı atıklarından geri kazanılan agregalar (0-5) mm ve (5-12) mm boyutlarına %10'ar olmak üzere toplamda %20 oranında doğal agregalarla yer değiştirilerek beton ve betonarme boru lar üretilmiştir. Çapı 300 mm beton ve 800 mm betonarme boru üretimlerine ilişkin karışım oranları, basınç ve TS 821 EN 1916 standardına göre yapılan boru tepe yükü deney sonuçları aşağıda gösterilmektedir.

Tablo 12 Geri kazanılan agregalarla üretilen beton ve betonarme boru tepe yükü dayanımı deney sonuçları.

Boru çapı (mm) ve yer değ. oranı	Çimento miktarı (kg/m^3)	Kum (kg/m^3)	Normal kırmataş (0-5) mm/Atık (0-5) mm (kg/m^3)	Normal kırmataş (5-12) mm / Atık (5-12) mm (kg/m^3)	Kırma taş (12-22) mm (kg/m^3)	28. günde basınç mukavemeti (MPa)	Tepe yükü (kN/m)
Ref. 300	400	841	342 / 0	762 / 0	0	48,3	49
300, %20	400	828	150 / 179	558 / 180	0	37,8	43
Ref. 800	400	544	378 / 0	719 / 0	292	52,2	140,4
800, %20	400	536	186 / 178	517 / 178	288	42,6	129,8

Sonuçlar ve Değerlendirme

Yapılan agrega deney sonuçlarına göre, geri kazanılan agregaların sıkı ve gevşek birim ağırlıkları doğal agregaların altında değerlere sahiptir. Bu durum un geri kazanılan agregaların etrafına yapışmış halde bulunan boşluklu çimento harcından kaynaklandığı düşünülebilir. Geri kazanılan agregaların su emme değerleri, doğal agregalarla büyük farklılık göstermiştir. Doğal agrega su emme değerleri %1-2 civarındayken, geri kazanılan agregaların su emme değerleri iri boyutlarda %8, ince boyutlarda %10'a kadar çıkmıştır. Su emme yüzdesi yüksek olan agreganın betonda kullanılması beton su ihtiyacını artırdığı için beton dayanımını ve dayanıklılığını olumsuz etkilemektedir. Laboratuvar ölçekli üretilen beton numunelerin hızlı klor geçirimliliği değerleri bu bilgiler ile paralel olarak geri kazanılan agrega ile üretilen betonlarda daha yüksek değerler almıştır. İri agregalarda yapılan Los Angeles aşınma deneyi sonuçları incelendiğinde geri kazanılan agregaların aşınma değerleri, doğal agregalara kıyasla %43 artış göstermiştir. Aşınma değerinin yüksek olması özellikle tretuvar vb. aşınmaya maruz kalabilecek saha uygulamalarında betonun servis ömrünün öngörülen seviyenin altına düşmesine sebep olabilir. Yapılan kum eşdeğeri, metilen mavisi , yassılık ve

organik madde tayini deneylerinde geri kazanılan ve doğal agregaların benzer sonuçlar verdiği görülmüştür.

Geri kazanılan agregaların daha düşük özgül ağırlığa sahip olmasına bağlı olmak üzere taze beton birim ağırlıklarının beklendiği gibi geri kazanılan agregalarla üretilen betonlard a düşüş gösterdiği görülmüştür. Basınç dayanımı tayini için yapılan deneylerde 28 günlük sonuçlar incelendiğinde; hazır beton denemeleri için %20 yer değiştirme oranı olan karışımlarda ortalama %20 mukavemet düşüşü, %30 yer değiştirme oranında yaklaşık %30 düşüş, %40 yer değiştirme oranında yaklaşık %40 mukavemet düşüşü görülmüştür yer değiştirme ile dayanım kaybı arasında lineer bir ilişki ortaya çıkmaktadır. Sıfır çökmeli denemelerinde ise, karışım yer değiştirme %25 olan numunelerin basınç mukavemetlerinde ortalama %11 düşüş, %15 yer değiştirme oranlı numunelerde ise ortalama %4 mukavemet düşüşü görülmüştür. Ayrıca iri agregalara yapılan yer değiştirme, ince agregalara kıyasla daha yüksek dayanım sonuçları verdiği ortaya çıkmıştır.

Hazır beton ile ilgili denemelerde f arklı yer değiştirme oranları yarma-çekme mukavemetini doğrudan etkilememiştir. Sıfır çökmeli denemelerde ise, iri agrega yer değiştirme yapılan numuneler, ince agrega yer değiştirmesi yapılan numunelere göre daha yüksek sonuçlar vermiştir. Geri kazanılan agrega yer değiştirme oranlarının azalması ile hızlı klor geçirimliliğinde azalma gözlemlenmiştir. Toplam yer değiştirme oranlarının yanında boyutsal yer değiştirme geçirimlilik özelliklerine etki etmediği görülmüştür. Sonuç olarak betonda geri kazanılan agrega kullanımının özellikle betonun mekanik ve d ürabilite özellikleri açısından kayıplara neden olduğu, doğal agrega ile yer değiştirme oranlarının azaltılması ile bu olumsuz etkilerin de azaldığı tespit edilmiştir.

Endüstriyel üretim çalışmaları sonrasında ürünlerle ilgili ürün standartları çerçevesinde deneyler yapılmış olup, şu sonuçlara ulaşılmıştır. Parketaşı üretimlerinde geri kazanılan agrega yer değiştirmesi %40 oranında gerçekleştirilmiştir. Parketaşlarında bu yer değiştirme oranında %43 yarma mukavemeti değeri düşüşü gözlemlenmiştir. Su emme deney sonuçları geri kazanılan agrega yer değiştirmeli ürünlerde referans ürünlere göre daha yüksek değerler almıştır.

Bordürlerde, kırmataştozu boyutunda yer değiştirme %22, no1 boyutunda yer değiştirme %14 eğilme mukavemeti kaybına sebep olmuştur. Bordürlerde parketaşlarına benzer biçimde geri kazanılan agrega kullanılan bordürlerin aşınma değeri ve su emme değerleri referans numunelere göre daha fazla çıkmıştır.

Beton boruların üretiminde kullanılan karışımlarının küp basınç dayanımlarında yaklaşık %22, betonarme boruların üretiminde kullanılan karışımların küp basınç dayanımında ise yaklaşık %18 mukavemet kaybı görülmüştür Sızdırmazlık deneylerinde tüm numunelerin su sızdırmazlığının sağlandığı belirlenmiştir. Tepe yükü dayanımı deney sonuçlarında ise geri kazanılan agrega kullanılmayan şahit beton-betonarme boruların tepe yükü dayanımının geri kazanılan agrega kullanılan borulardan yüksek olduğu görülmüştür. Geri kazan ılan agrega kullanılan borularda tepe yükü değerleri referans beton borulara göre yaklaşık %12, referans betonarme borulara göre yaklaşık %7,5 düşüş göstermiştir. Ancak TS 821 EN 1916 beton -betonarme boru ürün standardında üreticinin beyanına dayalı bir tepe yükü dayanım sınıfı verilmektedir. Bu sebeple tepe yükünde yaşanan dayanım düşüşü, boru üreticisi tarafından beyan edilecek dayanım sınıfı değerlerinin düşmesine neden olacaktır.

Tüm bu endüstriyel çalışmalardan anlaşılacağı üzere geri kazanılan agregaların uygun şekilde ayrıştırılması ve sınıflandırılması ile kullanımı mümkün olmakla birlikte ilgili ürün standardının gerektirdiği özeliklerin elde edilmesi için daha düşük oranlarda yer değiştirme yapılmalı ve sonuçların ilgili standardı sağladığı rutin olarak kontrol edilmelidir.

Teşekkür
Bu çalışma "İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Geri Dönüşümü ve Kullanım Kriterlerinin Belirlenmesi Projesi " kapsamında desteklenmiştir. Çalışmanın proje sahibi Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Altyapı ve Kentsel Dönüşüm Hizmetleri Genel Müdürlüğü olup proje koordinatörü ise TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezidir. Proje'ye katkıda bulunan kuruluşlar İSTON A.Ş., İSTAÇ A.Ş., İSFALT A.Ş. ve AKÇANSA Çim. San. ve Tic. A.Ş. dir .

Kaynaklar

ASTM C 1202, (2012) Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration , American Society for Testing and Materials , USA.

Eguchi K., Teranishi K., Nakagome A., Kishimoto H., Shinozaki K. and Narikawa M., (2007) Application of recyc led coarse aggregate by mixture to concrete construction, Construction and Building Materials 21 , 1542–1551.

Roos, F. (2002) Ein Beitrag zur Bemessung von Beton mit Zuschlag aus Rezyklierter Gesteinskörnung nach DIN 1045-1, Ph.D. Thesis , Technische Universität München.

Oikonomou, N. D., (2005) Recycled concrete aggregates , Cement and Concrete Composites 27 , 315-318.

Öztürk Ö., Çelikkol M. ve Erkan M. (2007). Türkiye Agrega Sektör Raporu, Kasım-Aralık, 52-56.

Öztürk, M, (2005) İnşaat/Yıkıntı Atıkları Yönetimi, Ankara

TS 436 EN 1340, (2005) Zemin döşemesi için beton bordür taşları - Gerekli şartlar ve deney metotları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS 706 EN 12620+A1, (2009) Beton Agregaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS 821 EN 1916, (2005) Beton borular ve bağlantı parçaları - Donatısız, çelik lifli ve donatılı, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS 2824 EN 1338, (2005) Zemin döşemesi için beton kaplama blokları - Gerekli şartlar ve deney metotları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 12390 -6, (2010) Sertleşmiş Beton Deneyleri Bölüm 6: Yarmada Çekme Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Hazır Beton Üretiminde Çevresel Uygulamalardaki Gelişmelere Bir Bakış

Prof.Dr.Nilay Coşgun, Prof.Dr.Tülay Esin
Gebze Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, 41400Gebze /Kocaeli
nilaycosgun@gyte.edu.tr , tesin@gyte.edu.tr

Araş.Gör.Selin Öztürk
Gebze Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, 41400Gebze /Kocaeli
selinozturk@gyte.edu.tr

Özet

Türkiye'de, yapı üretiminde en temel malzeme olan betonun endüstriyel üretimi son yıllarda hızlı bir gelişim ve yaygınlaşma sürecine girmiştir. Şehircilik ve Çevre Bakanlığı'nın açıklamalarına göre; kentsel dönüşüm sürecinde Türkiye genelinde 6,5 milyon konutun yıkılıp yeniden inşa edilmesinin hedeflendiği belirtilmektedir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012). Bu bağlamda hazır beton üretiminin artması kaçınılmazdır. 2012 verilerine göre, Türkiye'de hazır beton üretimi son on yılda 3,5 kat artarak yaklaşık 93 milyon m^3, hazır beton üretim tesisi sayısında ise %40 artış olmuştur. Dolayısıyla özellikle trafik yoğunluğunun yaşandığı kentlerde hazır beton tesislerinin kentlerin hemen her bölgesinde kurulmasına yol açmıştır. Bu gelişim ve yaygınlaşma paralelinde hazır beton üretiminin çevresel etkilerinin değerlendirilmesi önem kazanmaktadır.

Bu çalışma, "Beton 2004 Kongresi"nde sonuçları paylaşılan çalışmanın yinelenmesi niteliğini taşımaktadır. Amaç, son on yıllık süreçte hazır beton üretiminde çevresel etkiye neden olan sorunların çözümüne yönelik sürdürülebilirlik ilkelerinin uygulanma seviyelerinde gelinmiş olan nota ve gelişmelerin ortaya konmasıdır. Yapı üretimi alanında "sürdürülebilirlik ilkesine" uygunluk, her aşamanın çevresel etkilerinin bilinmesi ve önleyici tedbirlerin alınmasıyla mümkün olmaktadır.

Anahtar sözcükler: Hazır Beton, Sürdürülebilirlik, Beton Tesisleri.

Giriş

Yapı üretiminde temel malzeme olan betonun endüstriyel üretimi son yıllarda hızlı bir gelişim ve yaygınlaşma sürecine girmiştir. Türkiye'de oldukça genç fakat gelişimini sürdüren bir sektör olan hazır beton sektörü, yapılaşmanın artması ve artan nüfusun etkisi sonucunda nicelik ve nitelik açısından her geçen yıl büyümektedir. 2003-2012 yılları arasında hazır beton üretimi % 360,8 artarak 25,8 milyon m^3'den 93,1 milyon m^3'e ulaşmıştır (Türkiye Hazır Beton Birliği, 2013). Ancak bu artış özellikle çevresel faktörleri ve ekolojik dengeyi de etkilemektedir . Yapı malzeme ve elemanlarının ekolojik özellikleri, kullanıldıkları yapıların ekolojik özelliklerini, dolayısıyla çevresel etkilerini büyük ölçüde belirlemektedir.

Çevre dostu üretim teknolojilerinin geliştirilmesi, yaygınlaştırılması ve özendirilmesinin önemsendiği, 1999 Davos Zirvesi Birleşmiş Milletler Küresel İlkeler Sözleşmesine (Global Compact Program me) katılan ülkemizde de bu bağlamda yapı malzemesi üretim teknolojilerinin *ekolojik, çevre dostu, çevresel değerlere en az zarar veren süreçler*den oluşması beklenmektedir (Coşgun, Esin, 2006). Bu sürecin etkin bir şekilde uygulanması çevresel değerlerin sürdürülebilirliği açısından gereklidir. Ülkemizde ekolojik zararları azaltmaya yönelik yönetmelikler bulunmaktadır. Ancak bunların uygulanma ve denetleme açısından başarılı olup olmadığı konularının irdelenmesi gerekmektedir .

Bu çalışmada, "Beton 2004 Kongresi"nde "Hazır Beton Üretiminin "Çevresel Etkiler" Açısından Değerlendirilmesi" başlıklı bildiri ile sonuçları paylaşılan çalışmanın yöntemi (gözlem, anket vb.) esas alınmış ve geçen 10 yıllık süreçte tesislerde çevresel uygulamalar konusundaki gelişmeler araştırılmıştır. 2004 yılından bu yana artan yapılaşma faaliyetlerine de bağlı olarak gereksinimi artan hazır beton üretiminin çevresel etkiler açısından değerlendirilmesi yapılarak geçen zaman içerisinde hazır beton üretiminde çevresel etkiye neden olan sorunların çözümüne yönelik sürdürülebilirlik ilkelerinin uygulanma seviyelerinde gelinmiş olan nokta ve gelişmelerin ortaya konması amaçlanmıştır.

Hazır Beton Üretiminin Çevresel Etkileri

Artan nüfus ve konut ihtiyacına bağlı olarak üretimi ve kullanımı yaygınlaşan hazır betonun çevresel etkileri de sürdürülebilirlik kapsamında önem kazanmaktadır. Yapı endüstrisinin her alanında olduğu gibi, hazır beton üretiminde ve sonrasında taşınmasında, doğal ve kentsel çevreye doğrudan etki etmektedir. Bu etki, hazır beton tesisinin kuruluş aşamasından, üretilen betonun şantiyeye teslim edilmesine kadar devam etmektedir. Bu bağlamda, hazır beton sektöründe üretimden, taşıma ve uygulamaya kadar her aşamada, çevre konusunda eğitim ve bilinçlendirme çalışmalarıyla farkındalık oluşturulması önem kazanmaktadır.

Dayanıklılık, kullanım sürecinde fazla bakım onarım gerektirmemesi gibi faktörler betona ekolojik bir özellik kazandırmaktadır. Ancak hazır betonun üretimi esnasında kullanılan ham maddelerin, doğal kaynakların, tüketilen enerji ve sonrasında ortaya çıkan atıkların çevreye olan etkileri çevresel sürdürülebilirliği olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle hazır beton sektöründe rol alanların bu konuya önem vermesi beklenmektedir.

Hazır beton üreticileri tesislerin bulunduğu bölgede çevreyi korumak ve zarar ları önlemek/azaltmak için gerekli tedbirleri almalıdır. Beton üretim tesislerinde, kirli su ve diğer sıvılar ile çimento ve filler, diğer toz atıklar, artık beton ve gürültü dikkate alınması gereken başlıca çevre kirliliği faktörleridir. Bu tesislerde gerekli önlemlerin alınmaması halinde çevre kirliliği meydana gelmektedir. Bunların bilinen olumsuz sonuçları ise çevresel değerlerin, dolayısıyla insan sağlığının bozulmasıdır.

Hazır betonun üretiminin çevresel etkileri; doğal kaynakların tüketimi, enerji tüketimi, atıkların etkisi, hava kirliliği ve gürültü olmak üzere dört başlık altında incelenebilir;

Doğal Kaynakların Tüketimi

Yapılaşma faaliyetleri her yıl küresel olarak kullanılan taş, çakıl ve kumun % 40'nı, doğal ahşabın %25'ini, suyun % 16'sını ve enerjinin % 40'ını tüketmektedir. Hazır beton endüstrisi de beton üretiminde kullanılan hammadde ve doğal kaynakların tüketimiyle bu oranların oluşmasında etkilidir (Ngowi,2001). Sürdürülebilirlik performansı açısından, su yönetimi, atık su deşarjı ve hammaddelerin geri kazanılarak, tekrar kullanılabilmesinin önemi hazır beton sektöründe öne çıkmaktadır. Kullanımdan sonra ortaya çıkan atık durumundaki kaynakların yeniden kullanımından kaynaklanabilecek ekonomik a vantajlar, mevcut agrega kaynaklarının gün geçtikçe tükenmesi ve yeni agrega kaynak arayışları, artan üretim maliyetleriyle birlikte, tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de geri kazanım uygulamalarının geliştirilmesini gerektirmektedir.

Beton bileşiminde en büyük orana (yaklaşık %75) sahip olan ag rega (kum, çakıl, kırmataş vb.), doğal kaynakları giderek tükenen ve standartlara uygun, temiz, kaliteli örneklerinin bulunması güç bir malzeme olarak, hazır beton sektöründe önemli bir yere sahiptir. 1999 yılında İstanbul'da düzenlenen II. Ulusal Kırmataş Sempozyumu'nda da bu konuya değinilerek bu alanda ciddi planlamalar yapılıp, önlemler alınmazsa, yakın gelecekte, kaynakların tükenme tehlikesi olabileceği konusu üzerinde durulmuştur. Betonun hammaddesini oluşturan agrega kullanımının artacağı ve acilen yeni kaynakların bulunması gerektiği vurgulanmaktadır.

Hazır beton üretiminde sorun oluşturan diğer bir doğal kaynak ise suyun yoğun kullanımıdır. Bu sistemde beton karma suyu da dahil olmak üzere, transmikserin dışının taşımadan önce ve sonra, içinin ise betonun teslimi sonrasında yıkanması, tesiste toz emisyonunu önlemek için kullanılan yağmurlama sistemleri nedeniyle su tüketimi söz konusu dur.

Enerji Tüketimi

Beton agrega, çimento ve su ile üretilmektedir. Betonun hacimsel olarak %65 ila % 75'ini oluşturan agrega doğal olarak kıyılardan veya dere yataklarından ya da yapay olarak taş kırma makineleri ile elde edilmektedir. Agrega eldesinde ve beton karışımında kullanılan makinelerin tükettikleri enerji ve nakli ye sırasında harcanan enerji de beton üretiminde kullanılan toplam enerjiye yansımaktadır. Ancak beton üretiminde tüketilen en büyük enerji payı çimento üretimi için harcanan enerji miktarıdır. Çimento üretimi için kullanılan enerji miktarı yaklaşık 100 kilowattsaat/ton olup beton üretimi için kullanılan enerjinin %90'dan fazlasını kapsamaktadır (Esin, Coşgun, 2004).

Hazır betonu enerji kullanımı yönüyle değerlendirmek için beton malzemenin üretim, kullanım ve geri dönüşüm süreçlerinin tümünü birden dikkate almak gerekmektedir. Hazır betonun tesislerde üretimi ve taşınması aşamalarında tüketilen yoğun enerji hazır beton malzemenin enerji etkinliği için olumsuz bir sonuç doğurmaktadır.

Atıkların Etkisi

Hazır betonun üretimi ve sonrasında ortaya çıkan atıklar ve artan beton katı atıkların büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Beton atıkların bileşiminde bulunan çimento,

kimyasal katkılar vb. maddeler nedeniyle bırakıldığı yerdeki doğal yapıyı etkilemekte, yaşam alanlarını yok etmektedir.

Tesislerde çökertme havuzlarından alınan çamurlar ile yıkama tamburlarından alınan ve değerlendirilemeyen katı atıkların kurutma yatağına aktarılarak suyundan ayrıştırılması gerekir. Kurutma yatağında süzülen atık sular tekrar çökertme havuzlarına verilerek geri kazanılabilir. Artan betonlar, tesis içinde betonlanabilecek sahalarda, kent mobilyalarının yapımında, bordür taşı vb. imalatında veya uygun bir yere dökülüp daha sonra kırılıp dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Katı atıkların kontrolü ve yönetimi bağlamında bu atıkların geri dönüşümünün sağlanması çevresel etkilerin azaltılması açısından önemlidir (Gürer, Akbulut ve diğ., 2004). Bu konuda yapılan çalışmalar çok yaygın olmamakla birlikte birkaç tesiste yapılan alan çalışmasında incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

Mikser araçlarının dışının ve tozlanmış sahaların yıkanması sonucunda atık sular oluşmaktadır. Bu atık sular ile kimyasal madde ve yakıt depolarından oluşabilecek sızıntılar da toprak kirliliğinin, dolayısıyla da su kirliliğinin kaynağı olmaktadır. Hazır beton üretim alanlarında yıkama suyunun alkalinite düzeyi 12 pH'a kadar çıkabilmektedir (Coşgun, Esin, 2004). Yağmur suyu ve yıkama sularının tesis çevresine taşınmasını önleyici sistemler kurulması gerekmektedir.

Hava Kirliliği ve Gürültü

Hazır beton üretiminde taşıma, depolama, üretim yerine aktarma sırasında oluşan toz emisyonları hava kirliliğine neden olmaktadır. Hazır beton tesislerinde tozlu maddelerin üretimi, parçalanması, tasnifi doldurulması ve diğer işlemleri sırasında ortaya çıkan tozlu gazlar, açıkta depolanan tozlu yığma malzemeler rüzgarla taşınacak toz emisyonları kaynaklarıdır. Tesislerden kaynaklanan hava kirliliği etkisini, toz filtre sistemi, rüzgar kesici toprak yığınları, rüzgar kesici bitkiler, rüzgar koruyucuları, naylon brandalar ve nemlendirme sistemleri ile azaltmak/önlemek mümkündür.

Tesislerdeki makine ve araçlar ile taşıma araçlarının gürültüsü de önemli bir çevresel etkidir. Bu etki araçlara takılan susturucularla ve dikkatli kullanımla, düzenli bakım ve denetimle, tesis çevresinde ses perdeleme sistemi, ağaçlandırılma, toprak setler ile azaltılabilmektedir (Alkan, 2012).

Hazır Beton Üretiminde Çevresel Uygulamalar

Çalışma kapsamında, hazır beton üretiminin kaynak kullanımı, enerji tüketimi, atıklar ile olası kirlilikler ve ilgili yönetmeliklere uygunluk düzeyi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, Gebze ve İstanbul Anadolu yakasında hazır beton üretim alanlarına yönelik çalışma yapılmıştır. Üretim alanları rasgele seçilirken, farklı firmalara ait olmalarına özen gösterilmiştir. Kalıcı tesisler kadar geçici kurulan tesisler de çalışma kapsamında tutulmuştur. Hazır beton üretim alanları yöneticilerinden bilgi alınırken, aynı zamanda gözlem yapılmıştır. Bu çalışma için, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın yayınlamış olduğu çevre mevzuatında yer alan ilgili yasa ve yönetmelikler (Yönetmelik 1, 2, 3, 4, 5) Avrupa Hazır Beton Birliği (ERMCO) yayınları ve Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB) yayınları çerçevesinde değerlendirme kriterleri belirlenmiştir.

Alan çalışmasında 20 hazır beton üretim alanında gözlem yapılmıştır. Yapılan ziyaretlerde tesislerde hazır betonun üretim alanlarında çevresel etkileri azaltıcı çalışmalar konusuna çoğunlukla önem verildiği gözlenmiştir. Bununla birlikte, THBB üyesi olmalarına rağmen çoğu tesisin üretim alanlarında mevzuata tam olarak uyulduğu söylenemez. Bu durumun THBB'nin yasal yaptırımının olmayışından kaynaklandığı düşünülmektedir

Tesisleri ziyaret edilen firmaların tümünün THBB üyesi olup ilgili yönetmeliklerde belirtilen belgelere sahip olduk ları belirlenmiştir. Üretim alanlarının %50'si yerleşim bölgesinde, %20 endüstri bölgesinde, diğerleri ise taş ocağı bölgesindedir. Tesislerin tamamında yaş sistem üretim yapılmaktadır.

Araştırma kapsamındaki üretim alanlarının tümünde çökeltme havuzunun bulunması, toplanan suyun geri dönüştürülerek yeniden kullanımını sağlamaktadır. Bu da toplam su tüketimini azaltması açısından olumlu olarak değerlendirilmektedir. Buna karşılık özellikle agreganın geri dönüşümünü sağlayan beton geri dönüşüm sistemlerinin yaygın olmaması kaynak korunumu açısından etkinliği azaltmaktadır.

Yapılan araştırma kapsamında hazır beton üretiminde en çok elektrik enerjisi kullanıldığı belirlenmiştir. Bu nedenle, hazır betonun üretimi için gereken enerjinin daha verimli sistemler den sağlanması gerektiği ve bu amaçla araştırma yapılmasının ülkemiz için ekonomik ve çevresel gelişme için pozitif bir adım olacağı düşünülmektedir.

Kaynak ve enerji tüketimi ile ilgili olarak; gözlem yapılan üretim alanlarında bu üretilen yıllık beton miktarlar ı en yüksek 350.000 m^3 iken en düşük 80.000 m^3 olarak belirlenmiştir. Üretim miktarı doğrultusunda tesislerin 1 m^3 beton üretimi için yıllık elektrik harcamaları ile ilgili 2.3 - 9.2 kw arasında değişen değerler verilmiştir. Yakıt tüketiminin de 1 m^3 için yaklaşık 100 ton/yıl olduğu ifade edilmiştir. Hammadde geliş mesafeleri ile suyun ve kullanılan hammaddelerin tüketim miktarları konusunda birkaç tesis dışında sağlıklı veriler elde edilememiştir. Buna göre hammadde tüketim miktarları en yüksek tesisin 700.000 ton/yıl olduğu bilgisi verilmiştir.

Emisyon azaltıcı tedbirler ile ilgili olarak; üretim alanlarının % 30'unun kagir duvarla çevrelendiği, ancak duvar yüksekliğinin yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Duvara ilaveten ağaç veya bitki duvarı ile çevreleme % 40'ında gözlenmiştir. Bu oranın düşük olması özellikle tesislerin var olan bitki ve ağaçları kullanmaları, ilaveten bir yeşillendirme yoluna gidilmemesindendir. Tesislerin tamamına yakınının zemini beton kaplama, kalanlar ise asfalt, kaplı olduğu görülmüştür. Agrega depolama alanlarının tamamında zemini betondur ve geçmiş senelere nazaran toz emisyonunu önlemede gerekli uygulamaların yapıldığı gözlenmiştir. Agrega depolama alanları tamamı duvar çevrili ve duvarla birlikte üst örtü uygulaması bulunmaktadır. Tesislerin tamamında tozu önleme amaçlı nemlendirme yapıldığı ifade edilmiştir. Agrega bunkerlerinin ve taşıyıcı bantların çoğunlukla örtülü (kapalı) sistem olduğu gözlenmiştir. Çimento silolarından kaynaklanan toz emisyonlarına karşı, alan çalışması yapılan bütün tesislerde torbalı veya temizlenen türden olmak üzere filtreler kullanılmaktadır. Çimento silosu filtre temizlik periyodu 1 veya 3 ay olarak belirtilmiştir. Filtre temizliği sırasında çevreye toz yayılmasına karşı alınan önlemler konusunda net bir cevap alınamamıştır.

Su ve katı atık yönetimi konusunda; üretim alanlarının hemen hepsinde çökeltme havuzu bulunduğu gözlenmiştir. Çökeltme havuzuna doğru zemin eğimi yapıldığı, sadece birinde ise zemin eğimine ilaveten kanallarla yönlendirme yapıldığı belirlenmiştir. Genelde kapatılma kararı verilmiş taş ocaklarına aktarıldığı belirtmiştir. Gözlem yapılan alanların %20 sinde beton ayrıştırıcı geri dönüşüm sistemi bulunmaktadır. Ayrıca %80'i transmikserlerinin, taşıma sırasında yollara beton sıçramasını önleyici, ekolojik kapaklı olduğunu belirtmiştir. Mikserlerde artan betonun herhangi bir yere dökülmemesi konusunda titizlik gösterildiği belirtilmiş olmakla birlikte, az da olsa üretim alanı yakınında yol kenarlarında beton kalıntıları gözlenmiştir. Akaryakıt, yağ, kimyasal madde depolamada etiketlemeye çoğunlukla uyulduğu, ancak sızıntı olasılığına karşı geçirimsiz duvar ve zemin uygulamasına özen gösterilmediği anlaşılmıştır.

Gürültü konusundaki önlemler açısından; bir tesis dışında nakliye araçlarında gürültü engelleyici düzenleme olmadığı belirlenmiştir. Şehir içinde ve yerleşim bölgesinde bulunan üretim alanlarında, araçlarda hız kesici sistemler olduğu belirtilmiştir.

Hazır beton üretim alanlarının çoğunluğunda 1-3 ay aralıkla, bir kısmında ise her gün iç denetim yapıldığı belirtilmiştir. Gürültü ölçüm periyodu ile ilgili gerekli ölçümlerin uzmanlarca yapıldığı öğrenilmiştir. Şehir dışında ve endüstri bölgelerinde yer alan tesislerde gürültü etkisinin diğerlerine göre daha az önemsendiği anlaşılmıştır. Toz emisyonu ve atık su ile ilgili denetim aralıkları konusunda 3 ay, 6 ay, 1yıl gibi farklı cevaplar alınmıştır. Denetimler ilgili belediyeler, İSKİ ve Çevre Bakanlığı tarafından yapılmaktadır.

Değerlendirme

Yapılan alan çalışması ile edinilen veriler ile 1994 yılında yapılan çalışmanın verileri değerlendirilmiş ve meydana gelen değişim ve gelişmeler ortaya konulmaya çalışılmıştır. 'Tablo 1''de anket sorularının içeriği ve kriterler 'Tablo 2''de ise 2004 yılı verileri ile 2014 yılının verileri gösterilmiştir.

Tablo 1 Hazır Beton Tesislerine Yöneltilen Anket Sorularının İçeriği ve Kriterleri.

Tesis Yeri	Tesislerin Kurulduğu Yıllar
Bulunduğu Bölge	Yerleşim Bölgesi,Endüstri Bölgesi,Taş Ocağı Bölgesi
Üretim Tipi	Kuru Karışım,Yaş Karışım,Karma Karışım
Tesis Alanının Zemini	Beton,Asfalt,Toprak,Kaya
Beton Üretim Miktarı m3/yıl	Yıllık Beton Üretim Miktarı m3 cinsinden
Kaynak Tüketim Miktarı ton/	Agrega,Çimento ve Su Kaynaklarının Yıllık Tüketim Miktarı ton cinsinden
Kullanılan Enerji türü ve miktarı	Elektrik(kw),Doğalgaz,Mazot lt/yıl Tüketimi
Emisyon Önleyici Tedbirler	Ağaçlandırma,Bitki Duvarı,Kapalı Duvar,Hakim Rüzgara göre Yerleşim
Belgeler	Atık su izin Belgesi,Emisyon izin Belgesi,TSE,ISO,TMİB Üyesi
Agrega Kaynaklı Emisyon Azaltıcı Önlemler	Duvar,Ağaç-Bitki, Nemlendirme, Örtülü Taşıyıcı Bant,Sarımadan Boşaltma-Kepçeleme,Rüzgarı Önlemek İçin Ortüme
Çimento Kaynaklı Emisyon Denetimi	Çimento Silosu Torbalı Filtre,Çimento Silosu Temizliği, Temizlik Periyodu,Kapalı Sistem Temizlik,Toz Ölçüm Periyodu
Mikserde Artan Beton	Çökeltme Havuzu , Periyodik Havuz Temizliği,Geri Dönüşüm Sistemi, Taşınır Taşıt Depolarına, Resti İçi Kanal Önemi,Atık Su Denetimi,Ekolojik Kapak
Kimyasal Atık	Etiketleme,Geçirimsiz Duvar/Zemin, Sızıntı Denetim Periyodu
Gürültü Azaltıcı Önlem	Hız Kesici Sistemler,Gürültü Önleyici Tedbirler,Gürültü Ölçüm Periyodu
Eğitim-Bilinç	İç ve Dış Personel Eğitimi,Tesis İçi Genel Denetim

Tablo 2 2004-2014 Yılları Verilerinin Karşılaştırılması.

Kriterler	2004	2014
Tesis Yaşı	0-5 Yıl: % 30 , 5-10 Yıl: % 60, 10+ Yıl : % 10	0-5 Yıl: % 05 , 5-10 Yıl:% 15 , 10+ Yıl :% 80 Hiç Gözgörünmeyen % 20
Bulunduğu Bölge	%40 Yerleşim, %10 Tarım Arazisi, %20 Kırsal Alan, %30 Endüstri Bölgesi	%40 Yerleşim, %00 Tarım Arazisi, %20 Kırsal Alan, %30 Endüstri Bölgesi
Üretim Tipi	%70 Yığ.Kenşyon, %25 Kırma Kenşyon	%100 Yığ.+Kenşyon
Tesis Alanının Tahmini	%30 Beton, %30 Asfalt, %20 Toprak	%60 Beton, %25 Asfalt, % 15 Toprak+Mıcır
Beton Üretim Miktarı m3/yıl	1.200.000 m3/yıl (T. Tesis Tarafından Bilgiler Paylaşılmamıştır.)	1.800.000 m3/yıl(B.Tesis Tarafından Bilgiler Paylaşılmıştır)
Kaynak Tüketimi Miktarı (ton)	212.500 Ton Su, 1.625.700 Ton Agrega, 322.500 Ton Çimento	847.000 Ton Su, 2.700.000 Ton Agrega, 970.000 Ton Çimento
Kullanılan Enerji türü ve miktarı	%80 Elektrik, %5 Doğalgaz, %15 Elektrik+Mazot	% 100 Elektrik
Emisyon Önleyici Tedbirler	%25 Ağaçlandırma+ Bitki Duvarı + Kapalı Duvar, %10 Bitki Duvarı+Kapalı Duvar, %25 Kapalı Duvar, % 5 Ağaçlandırma	%15 Ağaçlandırma+ Bitki Duvarı + Kapalı Duvar , % 20 Ağaçlandırma, % 20 Bitki Duvarı+Kapalı Duvar+%35 Hakim Rüzgara Göre Yerleşim
Belgeler	% 80 THBB Üyesi	%100 THBB Üyesi
Agrega Kaynağı Emisyon Azaltıcı Önlemler	6 Kriterden En Az 3 ünü sağlayan Tesis Oranı:%50	6 Kriterden En Az 3 ünü sağlayan Tesis Oranı: %70
Çimento Kaynaklı Emisyon Önlemleri	5 Kriterden En Az 1 ini sağlayan Tesis Oranı:%30	5 Kriterden En Az 1 ini sağlayan Tesis Oranı: % 70
Mikserde Artan Beton	7 Kriterden En Az 4 ünü Sağlayan Tesis Oranı:% 40	7 Kriterden En Az 4 ünü Sağlayan Tesis Oranı:% 80
Kimyasal Artık	Bilinçlendirme+Değirmenli Duvar+Üzerini Kapatma+ Kuru Operasyon:%40 Bilinçlendirme+Elemek Operatörü % 60, Depolama Olmayan % 5	Bilinçlendirme+Değirmenli Duvar+Üzerini Kapatma+ Kuru Operasyon:%75 Bilinçlendirme +Elemek Operatörü % 5, Depolama Olmayan % 10
Verimlilik Azaltıcı Önlemler	4 Kriterden En Az 2 sini sağlayan Tesis Oranı:% 10	4 Kriterden En Az 2 sini sağlayan Tesis Oranı: % 80
Eğitim Bilinç	Personel Eğitimi+Genel Denetim: %80	Personel Eğitimi+Genel Denetim: %100

- THBB üyesi hazır beton tesislerindeki artış önemli bir boyuttadır. THBB'ne üyelik kriterlerinden birinin de çevresel etkilere karşı önlem almak olduğu düşünüldüğünde bu gelişmenin olumlu olduğu anlaşılmaktadır.
- Çalışma kapsamında 10 tanesi geçici, 10 tanesi kalıcı beton tesisi seçilmiş ve incelenmiştir. Geçen 10 yıllık süreçte daha önce seçilmiş tesislerden farklı olarak son dönemlerde sayıları artan geçici beton tesislerinde çevresel önlemlerin daha az önemsendiği görülmüştür. Özellikle birkaç tesiste kamu yararı olduğu ve geçici bir tesis olduğu gerekçesiyle gerekli önlemlerin alınmadığı görülmüştür.
- Kaynak ve enerji tüketimi ile ilgili olarak; gözlem yapılan üretim alanlarında 10 yıl öncesi ile karşılaştırıldığında 1994 yılında yıllık beton üretim miktarı en yüksek 200.000 m³, en düşük 18.000 m³ iken günümüzde bu miktarlar en yüksek 350.000 m^3, en düşük 80.000 m^3 tür. Üretim faaliyetlerinde % 75 - % 80 gibi ciddi artışlar gözlenmiştir. İhtiyaca bağlı olarak kurulan kalıcı/geçici beton tesislerinin kuruluş, üretim ve sonraki aşamalarda çevresel etki faktörünü göz önünde bulundurmaları gerekmektedir.

- Emisyon önleyici tedbirler bağlamında 10 yıllık süreçte bir gelişme olmadığı belirlenmiştir. Tesislerde ortaya çıkan toz emisyonları özellikle insanların solunum yo llarını etkilemekte ve çeşitli rahatsızlıkların ortaya çıkmasına neden olmaktadır (Türk Tabipleri Birliği, 2012). Bu konuda yıllar içerisinde gelinen noktada hazır beton tesislerinin şehir içinde ve yerleşim alanları yakınında kurulmaya başlanması ya da önceden yerleşim alanları dışında kurulmuş ancak yeni yapılanmalarla yerleşim alanları içinde kalmış tesislerin alınması gereken tedbirlerin alınmadığı ya da yetersiz kaldığı görülmüştür. Bunlar basit ve düşük maliyetli önlemler olmasına rağmen, araştırma yapılan üretim alanlarında yaygın uygulanmadığı ve özellikle geçici kurulan üretim alanlarında bu konuda hiçbir sorumluluğun alınmadığı ve konunun önemsenmediği de belirlenmiştir.

- Hazır beton üretiminden kaynaklanan katı atık oluşumu konusunda yalnızca bir tesiste tam anlamıyla bir geri dönüşüm ve yeniden kullanma faaliyetlerine rastlanılmıştır. Geri dönüşüm için de enerji kullanımı gerekmektedir. Betonun geri dönüşüm işlemi için tüketilen enerjinin, beton üretimi için tüketilen ilk enerjiden % 5 daha fazla olduğu ifade edilmektedir (Gao, Ariyama ve diğ., 2001).Geri dönüştürmek için gereken sistemin pahalılığı bazı tesislerde, geri dönüşüm yerine betonun uygun bir beton eleman üretimi, yol yapımı vb. amaçlarla değerlendirilebilmesine olanak sağlamaktadır. Ancak bu konuda da tesislerin yalnızca % 30'undan olumlu geri dönüş alınabilmiştir.

- Hazır beton üretim tesislerinin çevresel etkilerine yönelik yönetmelik ve diğer düzenlemelerin uygulanmalarını sağlamak için yaptırım gücü yüksek denetimlerin düzenli olması gerekmektedir. Ayrıca denetim periyotları ile ilgili farklı bilgiler verilmesinden bu konuda bir takım eksikliklerin olduğu görülmektedir. Oysa yaptırımların ve denetimlerin güçlü olduğu ülkelerde, hazır beton çevre dostu endüstri sınıfına girmektedir (Ruhlin, 1995).

Sonuç

Son 10 yıllık süreçte, özellikle Çevre Müdürlükleri ve THBB tarafından yapılan denetimlerin artmış olmasına rağmen uygulama bazında tesislerde önemli değişiklik olmadığı gözlenmiştir. 1994 yılında yapılmış olan çalışmada ziyaret edilen bazı tesislerin tekrar ziyaret edilmesiyle anlaşılmıştır ki, geçen süre boyunca sadece bazı zorunluluklar dışında olması gerekenler uygulanmamış ve iyileştirme yoluna gidilmemiştir.

Teknolojik gelişmelere ve artan ihtiyaca bağlı olarak tesis ve üretim miktarındaki artışlara rağmen günümüzde çevre mevzuatına uyma bilincinin, yaptırım gücünün veya denetimlerin yeterli olmadığı, yani tam olarak uygulamaya aktarılamadığı ortaya çıkarmaktadır. Yapılan alan çalışmasında, tesisler arasında çevresel uygulamalarla ilgili çok farklı durumların olduğu gözlenmiştir. Bazılarında sorunlara çözüm getiren uygulamaların büyük oranda gerçekleşmesine rağmen bazılarında belli oranlarda, bazılarında ise hiç önemsenmediği görülmüştür. Bu konuda tesislerin bulundukları yer, kalıcı veya geçicilik durumları, tesislerce çevre mevzuatındaki maddelerin yerine getirilmemesinin nedeni olarak öne sürülmektedir. Ancak yönetmelikler her alanda ve şartta uygulanmalıdır ki, çevresel değerlerin sürdürülebilirliği oluşturulabilsin.

Yağmur suyunun kullanımı ve su geri dönüşüm sistemlerinin kullanılmasının yaygınlaştırılması gerektirmektedir. Malzemenin üretim aşamasında kullanılan hammadde miktarları, yenilenebilir veya tükenebilir oluşları, harcanan enerji miktarı ve atıkların miktarı ve doğaya etkileri irdelenmelidir.

Her endüstriyel üretim gibi yapı malzeme üretim teknolojilerinin de ekolojik, çevre dostu, çevresel değerlere en az zarar veren süreçlerden oluşması beklenmektedir. Bu nedenle, yapı malzemesi üretim sistemlerinin çevresel etkilerinin araştırılarak ortaya konması, alınması gereken önlemlerin geliştirilmesi açısından üretimin öncesinde, üretim esnasında ve sonrasında bu alanda rol alanların bilinçli olması gerekmektedir. Hazır beton üretim tesislerinden kaynaklanan katı atık kirliliği konusu, ekolojik nedenler ve sürdürülebilir bir gelişme için beraberinde atık yönetimi ve atıkların geri

dönüşümü konusu üzerinde durulmasının önemini göstermektedir. Bu bağlamda yapılan denetlemeler, tesis içi ve dışı eğitimler çevresel değerlere farkındalığın oluşumunda görev ve sorumluluk bilincinin atması için gerekli görülmektedir.

Kaynaklar

Coşgun, N., Esin, T., (2004) Hazır Beton Üretiminin 'Çevresel Etkiler' Açısından Değerlendirilmesi, Beton 2004 Hazır Beton Kongresi, s.433-441, 10-12 Hazir an, İstanbul.

Coşgun, N., Esin, T., (2006) A Study Regarding the Environmental Management System of Ready Mixed Concrete Production in Turkey , Building and Environment, 41(8), pp. 1099–1105.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Yaşanabilir Çevre ve Şehirler, Riskli Yapılar Daire Başkanlığı, http://www.csb.gov.tr/db/altyapi/webmenu/webmenu8291.pdf (Erişim: 13.11.2014)

Esin, T., Coşgun, N.,(2004) "Betonarme Yapım Sistemlerinin Ekolojik Açıdan Değerlendirilmesi", II. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi, TMMOB Mimarlar Odası İstanbul Büyükkent Şubesi, s.353-364, 6-8 Ekim , İstanbul.

Gao, W., Ariyama, T., Ojima, T. and Meier, A., "Energy Impacts of Recycling Disassembly Material in Residential Buil dings", Energy and Building , Volume 33, Issue 6, July 2001, Pages 553 –562

Gürer, C., Akbulut, H., Kürklü, G.,(2004) "İnşaat Endüstrisinde Geri Dönüşüm ve Bir Hammadde Kaynağı Olarak Farklı Yapı Malzemelerinin Yeniden Değerlendirilmesi", V.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, ss. 28-36, 13-14 Mayıs, İzmir.

İbrahim ALKAN, "HAZIR BETON ÜRETİM TESİSLERİ", www.ktcmo.org/documents/betonbulten.doc *(erişim: 15.10.2014)*

Ngowi,A.B, (2001)''Creating Competitive Advantage by Using Environment-Friendly Building Processes'',Building and Environment 36,291-298.

Ruhlin, D.E., (1995)"The Environmental Regulation of Ready Mixed Concrete Operations İn The United States" XI. European Ready Mıxed Concrete Congress. Ermco 95 , İstanbul-Turkey, 547 -552.

Türk Tabipleri Birliği, (2012), Türk Tabipleri Birliği Dilovası Raporu,Türk Tabipleri Birliği Yayınları .
http://www.ttb.org.tr/kutuphane/dilovasirpr.pdf (Erişim:12.11.2014).

Türkiye Hazır Beton Birliği,(2013),2012 Yılı Hazır Beton Sektörü İstatistikleri, http://www.thbb.org/Files/File/statistics/istatistik2013.pdf (Erişim: 13.10.2014).

Yönetmelik 1, Çevresel Etki Değerlendirme Yönetmeliği, 23028 sayılı Resmi Gazete, 23.06.1997.

Yönetmelik 2,Gayri Sıhhi Müesseseler Yönetmeliği, 22516 sayılı Resmi Gazete, 02.11.1986.

Yönetmelik 3,Gürültü Kontrol Yönetmeliği, 19308 sayılı Resmi Gazete, 11.12.1986.

Yönetmelik 4,Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği, 19269 sayılı Resmi Gazete, 02.11.1986.

Yönetmelik 5,Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, 19919 sayılı Resmi Gazete, 04.09.1998.

Türkiye'de Uçucu Küllü Betonlar İçin Yaşam Döngüsü Analizi

Meltem Tangüler
ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü,
06800 Ankara, Türkiye
Tel: (312) 210 54 97
E-Posta: tmeltem@metu.edu.tr

Dr. Petek Gürsel
Kalifor niya Üniversitesi,
İnşaat ve Çevre Mühendisliği Bölümü,
Berkeley, Kaliforniya 94720, ABD

Yrd. Doç. Dr. Çağla Meral
ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü,
06800 Ankara, Türkiye
Tel: (312) 210 24 62
E-Posta: cmeral@metu. edu.tr

Öz

Günümüzde artan çevresel bilince paralel olarak ulusal ve uluslararası çevresel politikalar giderek katılaşmaktadır. Her yıl milyarca ton tüketilen beton da bu çerçevede mercek altındadır. Sektör gerek büyük miktarda doğal kaynak ve enerji tüketmesi gerekse çimento üretimi kaynaklı - başta CO_2 olmak üzere - salımların yüksek olması sebebi ile eleştirilmektedir. Bu eleştiriler alternatif yollar ile çözümlenmeye çalışılmaktadır. Beton ve çimento üretiminde uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi puzolanik özellik gösteren endüstriyel atıkların kullanımı ile daha sürdürülebilir ve çevre koşullarına karşı daha dayanıklı nihai ürünler elde edilebilmektedir . Bahsi geçen atıklardan kömüre dayalı termik santrallerin yan ürünü olarak açığa çıkan uçucu küller gerek kolaylıkla ulaşılabilir olmaları, gerekse uygun inceliğe ve kimyasal yapıya sahip olmaları nedeniyle en fazla kullanılan çimento ikame malzemelerindendir. Uçucu küllerin uygun kullanımı ile betonda yeterli hatta daha üstün performans elde edilebilmektedir. Bu çalışma, Türkiye'de üretilen uçucu küllü beton karışımlarının çevresel performansını hesaplamayı amaçlamaktadır. Çalışmada ana çevresel performans ölçütü olarak 1 m^3 betonun küresel ısınma potansiyeli (KIP) alınmıştır. Literatürden farklı oranlarda uçucu kül içeren beton karışımları seçilmiş, karışımların KIP leri Kaliforniya Üniversitesi - Berkeley'de geliştirilen "*Green Concrete LCA*" yaşam döngüsü analizi yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda Türkiye ortalama elektrik dağılımı ve Türkiye Çimento Sektörü ortalama yakıt karışımı kullanılmıştır. Uçucu kül sevkiyat mesafesinin KIPe etkisini anlamak için bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Çalışma sonunda daha sürdürülebilir beton üretimi için çimentonun uçucu kül ile ikamesinin uygun bir seçenek olduğu gösterilmiştir.

Anahtar sözcükler: Yaşam Döngüsü Analizi (YDA), Küresel Isınma Potansiyeli (KIP), Uçucu kül (UK) , Beton, Çimento, Sürdürülebilirlik, CO_2 emisyonu

Giriş

Beton düşük maliyetli olması, suya karşı yüksek direnç göstermesi, istenilen formda üretilebilmesi, çevresel etmenlere karşı yüksek dayanıklılığa sahip olması ve kolaylıkla ulaşılabilir malzemelerden yapılması gibi özelliklerinden dolayı dünyada en çok kullanılan yapı malzemesidir. Her yıl beton üretimi için çok büyük hacimlerde çimento, agrega ve su tüketilmektedir. 2013 yılında dünya çapında 4 milyar ton çimento üretilmiştir (van Oss, 2014). Tipik bir betonun yaklaşık %12'sinin portland çimentosundan, %8'ini n sudan ve %80'inin agregadan oluştuğu dikkate alındığı zaman (P. K. Mehta & Monterio, 2006) 2013 yılında üretilen 4 milyar ton çimento ile beraber yaklaşık 26.7 milyar ton agrega ile 2.7 milyar ton su tüketildiği varsayılabilir. Bu durum sadece 2013 yılında yaklaşık 33.4 milyar ton beton üretildiği anlamına gelmektedir. Göz önünde bulundurulması gereken bir diğer husus da betonun ana bağlayıcısı olan portland çimentosu üretiminin yüksek miktarda ham madde ve enerji gerektirmesi dir. Ayrıca bu üretim, dünyada küresel ısınmaya yol açan en önemli parametrelerinden biri olan CO_2 emisyonlarının yaklaşık %5-8'ine sebebiyet vermektedir (Lloyd, Provis, van Deventer, & Deventer, 2009; P. K. Mehta, 2001) .

Günümüzde artan çevresel bilince paralel olarak ulusal ve uluslararası çevresel politikalar da giderek katılaşmaktadır. Betonun ve çimentonun bu denli fazla üretiminin ve tüketiminin çevresel etkilerinin olması kaçınılmazdır. Beton ve çimento sektörü gerek büyük miktarda doğal kaynak ve enerji tüketmesi gerekse çimento üretimi kaynaklı başta CO_2 olmak üzere emisyonların yüksek olması sebebi ile eleştirilmektedir. Bu haklı eleştiriler alternatif çözüm yollarıyla aşılmaya çalışılmaktadır.

Çimento temelli sistemlerde (sıva, harç, beton gibi) uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi puzolanik özellik gösteren endüstriyel atıkların kullanımı ile CO_2 emisyonu minimize edil ebilmekte, doğal kaynaklar ile enerjiye olan gereksinim azalmakta dır (Celik, Meral, Mancio, Mehta, & Monteiro, 2014; Celik, Jackson, et al., 2014; Celik, Meral, Gursel, et al., 2014; P. K. Mehta, 2001, 2002) . Böylece çimento temelli sistemler daha sürdürülebilir olarak üretilebilmekte dir. Bahsi geçen atıklardan kömüre dayalı termik santrallerin yan ürünü olarak açığa çıkan uçucu küller kolaylıkla ulaşılabilir olmaları, öğütme gerektirmeden çimento ikame malzemesi olarak kullanılabilmeleri ve kimyasal yapılarının uygunluğu nedenleri ile en fazla kullanılan çimento ikame malzemelerindendir. Uçucu küllerin uygun kullanımı ile betonda yeterli hatta daha üstün teknik performans elde edilebilmektedir. Örneğin, uçucu kül içeren betonlar genellikle işlenebilirliği daha yüksek, hidratasyon ısıları daha düşük betonlardır. Bu betonların erken yaşlardaki basınç dayanımları uçucu kül içermeyen betonlara kıyasla daha düşük olmasına karşın ileriki yaşlardaki dayanımları neredeyse ayn ı hatta bazen daha yüksek seviyelere çıkabilmektedir. Bu tip betonlar ın çevresel etmenler sebebiyle oluşabilecek bozulmalara karşıda daha dayanıklı betonlar olduğu bilinmektedir (Celik, Meral, Gursel, et al., 2014; Malhotra & Ramezani anpour, 1994; P. K. Mehta & Monterio, 2006; Technical Committee 67 -FAB Use of Fly Ash in Building, 2005) . Uçucu küllerin beton ve çimento sanayiinde kullanılması ile aksi takdirde atık olarak değerlendirilecek bu ürünün çevresel zararları ve depolama mali yetleri asgariy e indirilerek ekonomik, ekolojik ve teknik açıdan birçok fayda sağlanmaktadır.

Modern Betonun Ana Bileşenleri

Beton, bağlayıcı bir maddeye gömülmüş agrega parçalarından oluşan kompozit bir malzemedir (P. Mehta & Monteiro, 2006) . Daha basit bir anlatımla beton; çimento, agrega ve su ile gerektiğinde mineral ve kimyasal katkıların birlikte karılması sonucu elde edilen ve nihai üründen işlenebilirlik, dayanım ve kalıcılık özelliklerinin beklendiği bir malzemedir. Portland çimentosu modern betonun ana bağlayıcı malzemesidir. 1 ton portland çimentosu üretebilmek için yaklaşık 1.65 ton ham madde (kalker ve kil) tüketilir. Değişik tip çimento üretimi söz konusu olduğu zaman eklenen katkı maddelerinden dolayı kullanılan ham madde oranı değişiklik gösterebilir (Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu, 2000) . Kum, çakıl, kırmataş gibi değişik boyutlardaki taneciklerden oluşan agregalar betonun hacimsel olarak %60 -%80'ini kaplar. Hem beton maliyeti ni düşürmesi hem de betonda oluşan büzülme ve çatlakları azaltıcı etkisi düşünüldüğünde beton üretiminde teknik ve ekonomik faydaları bulunmaktadır. Modern beton karışımlarında çimento, su ve agreganın yanı sıra sıklıkla kullanılan diğer bir bileşen kimyasal ve mineral katkılardır. Betonda kimyasal katkıların kullanım oranları diğer bileşenlere göre oldukça düşüktür; ancak kullanımları neticesinde çevresel şartlara bağlı olarak istenilen özelliklerde beton üretimine olanak sağlayabilirler. Örneğin süper-akışkanlaştırıcılar ile hava sıkışımı ve prizlenme gecikmesi olmadan işlenebilirlik artırılabilir; hızlandırıcılar ile prizlenme ve dayanım artışı hızlandırılabilir; geciktirici katkılar ile çimento hidratasyon hızı düşürülerek prizlenme süresi artırılabilir (Ozcelik, Gürsel, & Meral, 2013). Betonda kullanılan mineral katkılara örnek olarak ise puzolanlar verilebilir. Puzolanlar kendi başlarına az ya da hiç bağlayıcı özelliği bulunmayan, ancak çok ince öğütülmesi durumunda nemli ortamlarda ve normal sıcaklıkta çimento hidratasyonu sonucu oluşan $Ca(OH)_2$ ile kimyasal reaksiyona girip bağlayıcı özelliği bulunan bileşenler üreten silisli ve alümin-silisli kökenli maddelerdir (ASTM C 219 - 07a, 2007). Puzolanik özelliğe sahip endüstriyel yan ürünler olan uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanı hem çimento ikame malzemesi olarak hem de beto na doğrudan eklenerek kullanılabilen mineral katkı malzemeleri arasında sayılabilir. Taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini etkileyen bu mineral katkıların betonda uygun oranda kullanımı ile birçok teknik avantaj elde edilebilmektedir. Söz konusu bu endüstriyel yan ürünlerin beton üretiminde kullanılmasıyla toplumların mevcut ekonomik gelişmesine yapılacak katkının yanı sıra çevresel zararı en aza indirgeyerek sürdürülebilir bir üretim yapılması mümkün olabilmektedir.

Uçucu Kül Üretimi

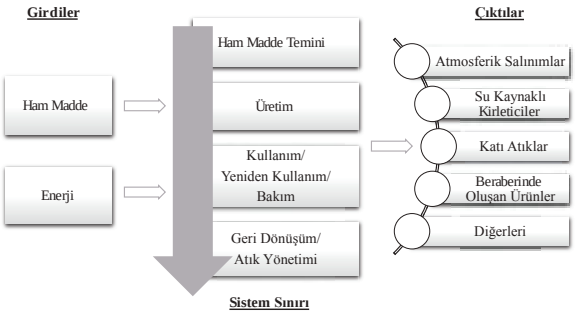
Uçucu kül (UK), kömür kullanarak elektrik enerjisi elde edilen termik santrallerde pulverize kömürün yakılması sonucu ortaya çıkan yan ürünlerden biridir. Pulverize kömürün yanma işlemi esnasında kömürün karbon ve yanıcı malzemelerden oluşan organik kısmı yanarken kil, şeyl, kuvartz gibi safsızlıklardan oluşan inorganik kısmı baca gazları içinde askıda kalır. Askıda kalan külün bir kısmı taban külü olarak toplanırken çok daha büyük bir kısmı baca gazlarıyla taşınarak mekanik ve elektrostatik filtreler yardımıyla UK olarak tutulur ve depolanırlar (Tokyay, 2013). Dünya'da enerjiye olan talebin artmasına paralel olarak kömür tüketimi artmış ve bu durum uçucu kül üretiminde (yıllık 750 milyon ton) önemli bir artışla sonuçlanmıştır. Ancak, üretilen bu uçucu küllerin sadece yaklaşık %25'inin inşaat, tarım ve kimya gibi sektörlerde geri

kazanımının sağlandığı ve yaklaşık %75'inin atık olarak bertaraf edildiği tahmin edilmektedir (Blissett & Rowson, 2012) . İnşaat sektörü uçucu külün geri kazanılmasına öncülük etmektedir. Bu sektörde uçucu kül beton, katkılı çimento, tuğla ve gaz beton üretiminde, zemin stabilizasyonunda ve dolgularda kullanım alanı bulmaktadır (Tangüler, Meral, & Aslam, 2014).

Türkiye'de de elektrik enerjisi üretiminde kömür yakan termik santrallerin önemli bir rolü vardır. Türkiye'nin neredeyse tüm bölgelerinde kömür yakan termik santraller bulunmaktadır. Bu santrallerde çoğunlukla linyit, çok azınlıkta da taş kömürü yakılmaktadır. Termik santrallerde linyit yakımı %17 ile %46 aralığında kül üretimiyle sonuçlanmaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu'nun açıkladığı verilere göre ülkemizde 2008 yılında 25.5 milyon ton mineral atık (kül, uçucu kül, cüruf, alçı) üretilmiş ve bu atıkların %3'ü satılmış, %16'si madenlerde değerlendirilmiştir. Kalan %80'i ise atık olarak depolanmış ya da denize boşaltılmıştır (Turkish Statistical Institute, 2008) . Bir termik santralde açığa çıkan mineral atıkların çok büyük bir kısmını uçucu küller oluşturmaktadır. Eğer bu atıkların yaklaşık %80'inin uçucu küllerden oluştuğu varsayılırsa, yıllık Türkiye uçucu kül üretimi yaklaşık 20 milyon ton olarak hesaplanabilir (Tangüler, Meral, & Gursel, 2014) .

Yaşam Döngüsü Analizi (YDA)

Toplumların çevresel bilincinin artığı günümüzde, projeler artık sadece maliyet ve teknik performans değerlendirmesi yapılarak değil aynı zamanda proje bazlı ham madde ve enerji tüketimi ile oluşabilecek çevresel problemler de dikkate alınarak tasarlanmaya çalışılmaktadır. Söz konusu çevresel etkiler detaylı ve sistematik bir biçimde yaşam döngüsü analizi (YDA) ile analiz edilebilmektedir (Gürsel & Meral, 2012) . YDA, bir ürün veya hizmetin üretilmesi için gerekli ham madde temininden itibaren, üretim, sevkiyat, tüketici tarafından kullanım ve son olarak kullanım sonrası atığa dönüşümünü içeren yaşam döngüsünün her aşamasındaki çevresel etkileri (İklim değişikliği, ötrifikasyon, asidifikasyon, toksik emisyonlar gibi.) belirlemek, raporlamak ve yönetmek için kullanılan bir yöntemdir (Rebitzer et al., 2004) . Tipik bir YDA için yer alan yaşam döngüleri Şekil 1'deki gibidir.



Şekil 1. YDA'nın aşamaları (U.S. Environmental Protection Agency, 2006) .

YDA; amaç ve kapsamın belirlenmesi, envanter analizi, etki analizi ve yorumlama olmak üzere dört temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada projenin amacı, kapsamı,

detayları ve sınırları belirlenir. İkinci aşama olan envanter analizinde projenin yaşam döngüsü boyunca tüketilen tüm girdiler ile kullanım sonucu oluşan tüm çıktılar saptanır. Ham madde, enerji, su gibi girdiler ile kullanım sonucu oluşan atık, emisyon gibi çıktıların göz önünde bulundurulduğu bu aşamayı etki analizi takip eder. Etki analizinde envanter analizinde belirlenen girdi ve çıktıların insanlar ile çevre üzerindeki etkileri değerlendirilir. Son aşama olan yorumlama bölümünde ise envanter ve etki analizleri sonuçları birlikte değerlendirilerek tespit edilen çevresel etkilerin azaltılması yönünde iyileştirme çalışmaları yapılır (Tangüler, Meral, & Gursel, 2014). YDA sonucu çevresel etki performansları açıkça görüldüğü için söz konusu etkilerin asgariye indirgenebileceği en uygun seçimler yapılabilir ya da var olan sistemlerde iyileştirmeler yapılarak sürdürülebilirlik artırılabilir.

YDA'nın, bir ürünün ya da hizmetin yaşam döngüsünün hangi aşamalarını kapsadığına bağlı olarak "beşikten mezara", "beşikten kapıya", "beşikten beşiğe" ve "kapıdan kapıya" olmak üzere farklı türleri vardır. Bir ürünün ya da hizmetin ham madde temininden (beşik) atık bertarafına (mezar) kadar tüm yaşam döngüleri düşünülerek analiz yapılıyorsa bu durum "beşikten mezara"; ham madde temininden (beşik) fabrikaya iletim aşamasına (kapı) kadar tüm süreçleri kapsayacak şekilde analiz yapılıyorsa bu durum "beşikten kapıya" olarak adlandırılmaktadır. Eğer "beşikten mezara" yapılan YDA, döngünün son aşaması olan atık bertarafı geri kazanım ile sonuçlanıyorsa "beşikten beşiğe" olarak anılmaktadır. Son olarak, tek bir aşamaya ait yaşam döngüsü ele alınıyorsa bu yaklaşım "kapıdan kapıya" olarak adlandırılır (Demirer, 2011). Bu çalışmada bir ürün ya da hizmetin yaşam döngüsünün kısmen ele alındığı "beşikten kapıya" yaklaşımı uygulanmıştır.

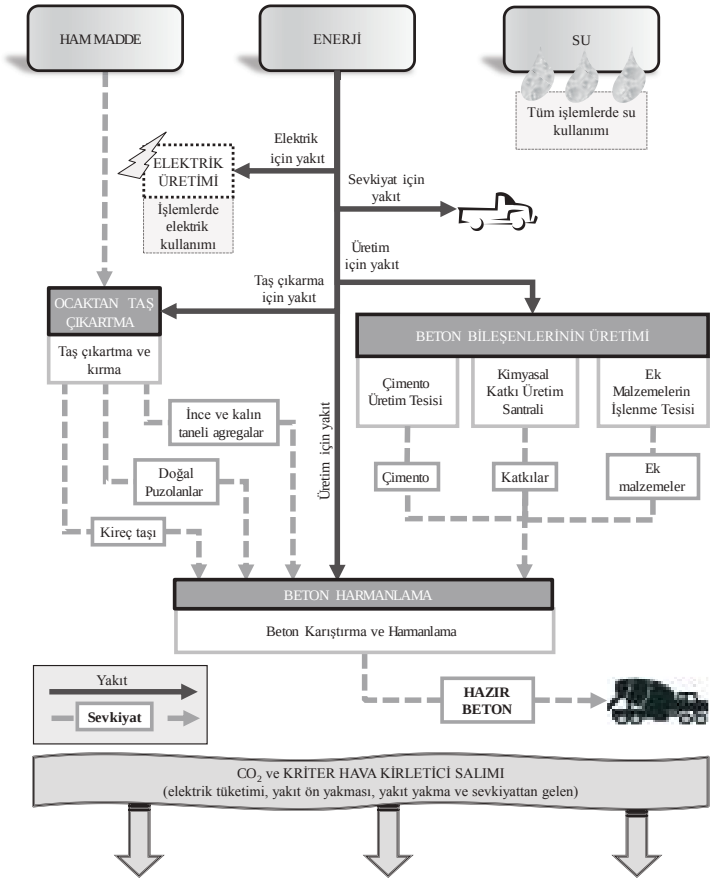
YDA' da sonuçlar ise küresel ısınma, asidifikasyon, ötrifikasyon, stratosferik ozon tüketimi gibi etki kategorileri formunda sunulur. Etkiler, bir sistemdeki tüm girdi ve çıktıların doğal kaynaklar, insanlar, bitkiler ve hayvanlar üzerindeki tüm etkileri olarak tanımlanabilir. Bu çalışmada etki kategorisi küresel ısınma, karakterizasyon faktörü küresel ısınma potansiyelidir. YDA sonuçları fonksiyonel birim başına düşen CO_2 eşdeğerlerine dönüştürülerek sunulmuştur.

Beton Üretimi İçin YDA

Betonun yaşam döngüsü analizi yapılırken ham madde temini, ocaktan taş çıkarma, ezme, enerji tüketimi, su tüketimi, çimento üretimi, katkı üretimi, sevkiyat vb. olmak üzere üretim için gerekli tüm aşamalar ele alınır ve bu aşamaların çevresel etki performansları araştırılır. En büyük çevresel etkinin çimento üretiminden kaynaklandığı bilinse de agrega, kimyasal katkı, uçucu kül üretimi, sevkiyat gibi aşamaların çevresel etkisi yadsınamaz. Bu yüzden yaşam döngüsünün her aşaması detaylı olarak düşünülmelidir. Betonun yaşam döngüsü beşikten kapıya yaklaşımıyla Şekil 2'de görüldüğü gibidir.

Bu bildiride seçilen beton karışımlarının küresel ısınma potansiyelleri Kaliforniya Üniversitesi, Berkeley Kampüsü'nde (UC Berkeley) geliştirilen Excel tabanlı "GreenConcrete LCA" (Gursel & Horvath, 2012) yazılımı kullanılarak eşdeğer CO_2 emisyonları cinsinden hesaplanmıştır. Hesaplamalar yapılırken Türkiye koşulları (mevut beton ve çimento üretim yöntemleri ile teknolojileri düşünülerek) göz önünde bulundurulmuştur. Elektrik üretimi dağılımı ile çimento yakıt dağılımı için EÜAŞ' nin 2011 yılında yayınladığı veriler göz önünde bulundurulmuştur (doğal gaz: %45.61,

hidro : %22.95, linyit: %17.04, taş kömürü: %11.63, diğer kaynaklar: %2.77) (Elektrik Üretim A.Ş., 2011). Çimento üretiminde ön ısıtıcılı ya da ön kalsinatörlü kuru sistemin kullanıldığı varsayılmıştır. Çimento üretiminde kullanılan yakıt dağılımı petrokok: %35.48, linyit: %34.08, taş kömürü: %27.95, doğal gaz: %1.75 ve atık yağ: 0.74 olarak alınmıştır (Elektrik Üretim A.Ş., 2011). Sevkiyat aracı olarak kamyon ve sevkiyat mesafeleri olarak ise çimentonun beton santraline uzaklığı 50 km, uçucu külün 20 km ve diğer tüm mesafeler için 30 km varsayımı yapılmıştır.



Şekil 2. Betonun yaşam döngüsü şeması (Gursel & Horvath, 2012; Ozcelik et al., 2013)'dan uyarlanmıştır.

Seçilen Uçucu Küllü Beton Karışımları için Hesaplamalar

Bu çalışma için literatürden (Poon, Lam, & Wong, 2000) farklı oranlarda uçucu kül içeren beton karışımları seçilmiş ve karışım oranları Tablo 1'de verilmiştir. Seçilen karışımlarda kullanılan UK 3860 cm^2/g Blaine inceliğine sahiptir. Ağırlıkça %56.8 SiO_2, %28.2 Al_2O_3, %5.3 Fe_2O_3 ve %5.2 MgO'dan oluşmaktadır; CaO oranı ise %3'ün altındadır.

Tablo 1. Beton karışım oranları (Poon et al., 20 00).

Su/Bağlayıcı Oranı	UK (%)	Bileşenler (kg/m^3)					*Süper-akışkanlaştırıcı (l/m^3)
		Su	Çimento	UK	İnce agrega	Kaba agrega	
0.24	0	150	637	0	711	936	18.4
0.24	25	150	475	158	681	924	18.3
0.24	45	148	347	283	639	920	23.7

* Hesaplamalarda naftalin bazl ı süper-akışkanlaştırıcının yoğunluğu (katı oranı %38.5) 1.077 kg/l olarak alınmıştır.

Seçilen karışımların 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları Tablo 2'de yer almaktadır. Beklendiği üzere uçucu kül ihtiva eden betonların erken dayanımı kontrol numunesine göre (%0 UK) daha düşüktür. Fakat zaman içerisinde ilerleyen puzolanik reaksiyonlar sonucunda ileri dönem dayanımları kontrol karışımı seviyesine gelmekte ve hatta daha üzerine çıkabilmektedir (Bkz. Tablo 2).

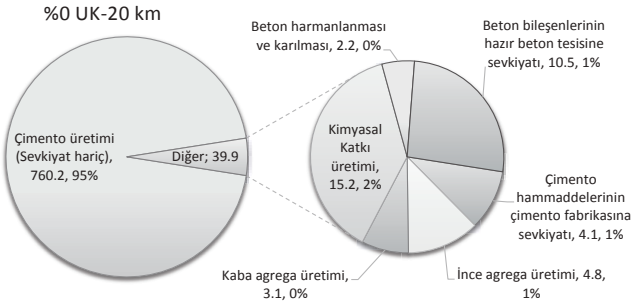
Tablo 2. Karışımların basınç dayanımı sonuçları (MPa) (Poon et al., 2000).

UK (%)	3 Günlük	7 Günlük	28 Günlük	90 Günlük
0	70.0	79.5	97.4	110.2
25	62.3	74.6	105.9	124.5
45	42.5	56.3	89.4	107.2

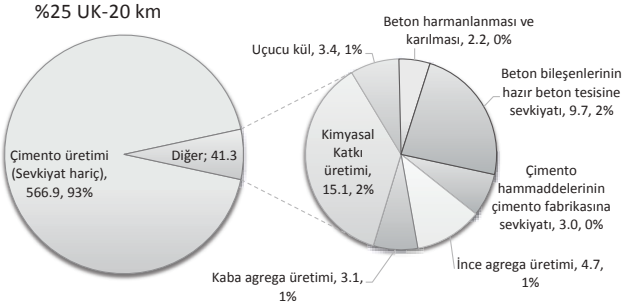
Bu karışımlara has çimento hamurlarının 3 günlük hidratasyon ısıları izotermal kalorimetre ile incelenmiş ve artan uçucu kül miktarına bağlı olarak hidratasyon ısılarında (sırası ile 211.7, 178.7 ve 134.9 kJ/kg-çimento hamuru) düşüş gözlenmiştir. Uçucu kül ihtiva eden betonlarda , başta kütle betonları ve sıcak havada dökülen betonlar olmak üzere, hidrataston ısısına bağlı problemlerin büyük bir kısmı bu sayede asgariye indiril ebilmekte dir. Karışımların kalıcılıkları açısından 90-günlük betonların klor geçirgenlikleri test edilmiş ve artan uçucu kül oranının betonun klor geçirgenliğini çok büyük oranda (sırası ile 1133, 181 ve 160 C) azalttığı görülmüştür. Son olarak, 90 günlük betonların gözenek yapıları ve geçirgenlikleri cıva girişim porozimetresi ile araştırılmış ve yine artan uçucu kül oranı ile betonların ortalama hacimsel gözenek çapında ve porozitesinde (sırası ile %6.86, %5.37 ve %5.66) azalma görülmüştür. Sonuç olarak uçucu kül ikames i ile yüksek teknik performanslı betonlar elde edilmiştir (Poon et al., 2000).

Bu bildiride t eknik performansları hakkında bilgi sahibi olunan karışımlarının çevresel performansları incelenmiştir. Bu kapsamda "GreenConcrete LCA" yazılımı aracılığıyla beton karışımlarının yaşam döngüsü analizleri yapılmış ve karışımlarının üretim aşamasından inşaat alanına sevkiyatına kadar tüm aşamalarda açığa çıkan eşdeğer CO_2 emisyonları hesaplanmıştır. Sonuçlar %0 UK içeren beton (kontrol) için Şekil 3'te, %25 UK içeren beton için Şekil 4'te ve %45 UK içeren beton için Şekil 5'te detaylı olarak gösterilmiştir. Her 3 analizde de uçucu kül üretim sahasının beton tesisine uzaklığı 20 km olarak varsayılmıştır. Seçilen beton karışımların Türkiye'de üretilmesi durumunda 1 m^3 beton başına %0 UK içeren karışım için 800.14 kg-CO_2, %25 UK içeren karışım için 608.16 kg-CO_2, %45 UK içeren karışım için 460.96 kg-CO_2 açığa çıkmaktadır. Şekillerden görüldüğü üzere küresel ısınmaya en büyük pay (sırası ile yaklaşık %95,

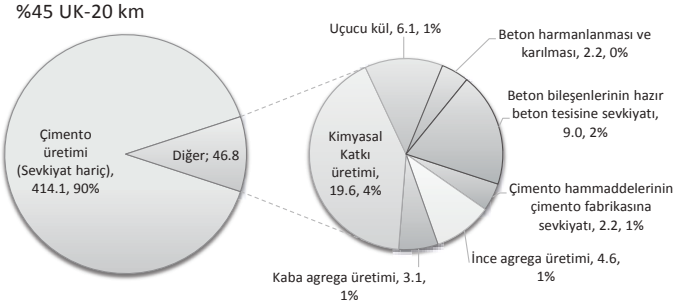
%93 ve %90) portland çimentosu üretiminden gelmektedir. Çimento üretiminin yanında; kaba ve ince agrega üretimi, çimento ham maddelerinin çimento fabrikasına sevkiyatı, beton bileşenlerinin hazır beton tesisine sevkiyatı, betonun harmanlanması ve karılması, kimyasal katkı üretimi ile uçucu kül kaynaklı emisyonlar oldukça düşük mertebelerde kalmaktadır. Uçucu kül kullanımından kaynaklı emisyon miktarı ise her iki beton karışımında da (%25 UK, %45 UK) toplam emisyonların yaklaşık %1'i değerindedir.



Şekil 3. %0 UK içeren beton karışımı için KIP sonuçları (kg- eşdeğer CO_2/m^3-beton) .



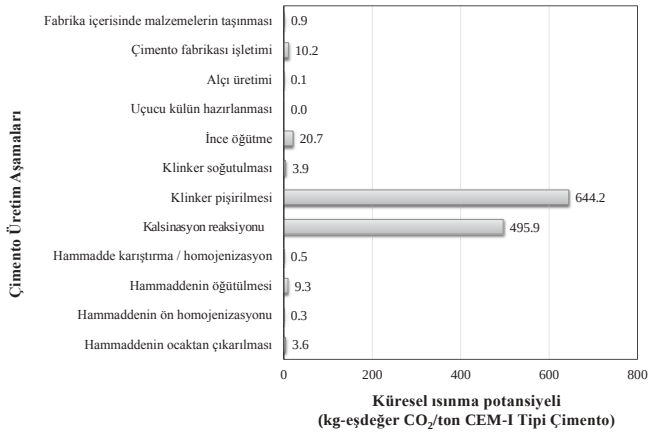
Şekil 4. %25 UK içeren beton karışımı için KIP sonuçları (kg-eşdeğer CO_2/m^3-beton).



Şekil 5. %45 UK içeren beton karışımı için KIP sonuçları (kg-eşdeğer CO_2/m^3-beton)

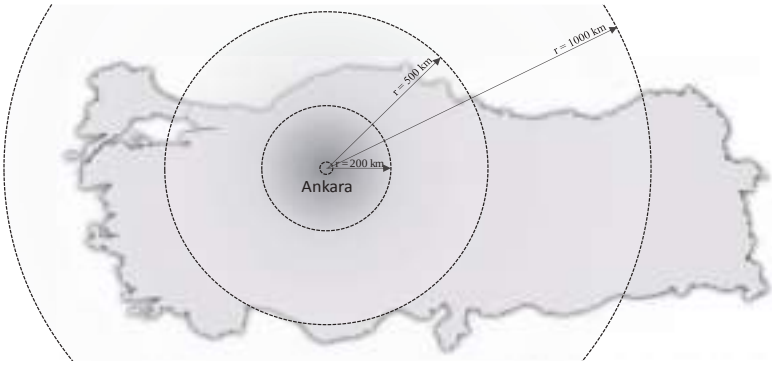
YDA sonuçlarına bakıldığında beton üretiminde küresel ısınma potansiyeli en yüksek parametre nin çimento üretimi olduğu görülmüştür. Türkiye'de 1 ton CEM -I tipi çimento

üretimi için yaklaşık 1189.6 kg CO_2 emisyonuna yol açmaktadır. Çimento üretiminin neden olduğu emisyon değerlerini adım adım incelediğimizde emisyonların çok büyük bir kısmının klinker pişirilmesi (644.2 kg-CO_2) ve kalsinasyon (495.9 kg-CO_2) kaynaklı olduğunu görmekteyiz (Bkz. Şekil 6). Çimento üretimi kaynaklı toplam eşdeğer CO_2 emisyonun yaklaşık %96'sını bu iki aşama oluşturmakta, diğer üretim aşamalarının toplam küresel ısınma potansiyeline etkisi olduk ça düşük kalmaktadır.



Şekil 6. Türkiye'de 1 ton portland çimento su üretiminden kaynaklı küresel ısınma potansiyeli (kg-CO_2/m^3 beton).

Analizlerde uçucu kül üretim sahasının beton tesisine uzaklığı 20 km olarak alınmıştır. Çalışma kapsamında bu mesafenin eşdeğer CO_2 emisyonu üzerindeki etkisini saptamak amacıyla aynı analizler mesafenin 200 km, 500 km ve 1000 km olduğu durumlar için tekrarlanmıştır (Şekil 7).



Şekil 7. UK üretim sahasının beton tesisine olan mesafesi.

Mesafelere göre açığa çıkan eşdeğer CO_2 emisyon miktarları Tablo 3'te özetlenmiştir. Beklenildiği gibi uçucu külün sevkiyat mesafesi artıkça toplam CO_2 emisyonu artmaktadır. Örneğin; mesafe 1000 km'ye çıktığında emisyon değerlerinde %25 UK için %3, %45 UK için %8 gibi bir artış söz konusudur. Ancak uçucu kül kullanımı

sayesinde emisyon değerlerinde sırasıyla %21 ve %38 gibi bir azalma sağlanabildiği için mesafe ne kadar uzak olursa olsun betonda uçucu kül kullanımı ile CO_2 emisyonu kayda değer ölçüde azaltılabilmektedir.

Tablo 3. 1 m^3 beton üretimi kaynaklı küresel ısınma potansiyelinin UK sevkiyat mesafesine göre değişimi (kg- eşdeğer CO_2 / m^3 beton).

%UK	20 km	200 km	500 km	1000 km
%0	800.1	800.1	800.1	800.1
%25	608.2	611.8	617.9	628.0
%45	461.0	467.5	478.4	496.5

Sonuçlar

Bu bildiride teknik özellikleri hakkında fikir sahibi olunan %0, %25 ve %45 uçucu kül (UK) içeren üç farklı beton karışımının sebep olduğu küresel ısınma potansiyelleri (KIP) Türkiye koşulları göz önüne alınarak beşikten-kapıya YDA yöntemi ile eşdeğer CO_2 emisyonu cinsinden hesaplanmıştır. Beton üretimi kaynaklı KIP lerin çimentonun uçucu kül ikamesi ile büyük ölçüde azaltılabileceği görülmüştür. Hesaplanan YDA sonuçları literatürden elde edilen deneysel veriler (Poon et al., 2000) ile beraber değerlendirildiğinde betonda uçucu kül kullanımı ile sadece çevresel değil aynı zamanda teknik avantajların da sağlandığı görülmektedir. Çalışma kapsamında ikincil olarak uçucu kül sevkiyat mesafesinin KIP üzerindeki etkisi araştırılmış; uçucu külün Türkiye'nin en batısından en doğusuna sevkiyatı bile söz konusu olsa uçucu küllü beton üretimindeki eşdeğer CO_2 emisyonunun kontrol betonun a (%0 UK) göre çok daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda, Türkiye için uçucu kül sevkiyat mesafesinin eşdeğer CO_2 emisyonu açısından önemli bir fark yaratmadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, uçucu külün çimento ve beton sanayiinde geri kazanımı ile hem insanlar hem de doğa üzerinde zararlı etkileri bulunan bir atık değerlendirilmekte; depolama ve bertaraf masraflarından kurtulunmakta ve daha sürdürülebilir bir üretim yapılabilmektedir.

Teşekkürler

Bu çalışma ODTÜ BAP-08-11-2014-014 kod numaralı proje ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

ASTM C 219 (2007). *Standard Terminology Relating to Hydraulic Cement* (pp. 1–3).

Blissett, R. S., & Rowson, N. a. (2012). A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. *Fuel*, *97*, 1–23.

Celik, K., Jackson, M. D., Mancio, M., Meral, C., Emwas, a.-H., Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). High-volume natural volcanic pozzolan and limestone powder as partial replacements for portland cement in self-compacting and sustainable concrete. *Cement and Concrete Composites*, *45*, 136–147.

Celik, K., Meral, C., Gursel, P., Mehta, P., Horvath, A., & Monteiro, P. J. M. (2014). Mechanical Properties, Durability, and Life-Cycle Analysis of Self-consolidating Concrete Mixtures Made with Blended Portland Cements Containing Fly Ash and Limestone Powder. *Cement and Concrete Composites*, 56, 59-72.

Celik, K., Meral, C., Mancio, M., Mehta, P.K., & Monteiro, P.J.M. (2014). A comparative study of self-consolidating concretes incorporating high-volume natural pozzolan or high-volume fly ash. *Construction and Building Materials*, *67*, 14–19.
Demirer, G. N. (2011). *Sürdürülebilir Üretim ve Tüketim Yayınları - I : Yaşam Döngüsü Analizi*. Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
Elektrik Üretim A.Ş. (2011). *Electricity Generation Company 2011 annual report* (pp. 1–75).
Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu. (2000). *Çimento Hammaddeleri* (pp. 1–54).
Gursel, A. P., & Horvath, A. (2012). GreenConcrete LCA Tool. Berkeley.
Gürsel, A. P., & Meral, Ç. (2012). Türkiye'de Çimento Üretiminin Karşılaştırmalı Yaşam Döngüsü Analizi. In *2. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü* (pp. 1–13). Urla-İzmir.
Lloyd, R. R., Provis, J. L., van Deventer, J. S. J., & Deventer, J. S. J. (2009). Microscopy and microanalysis of inorganic polymer cements . 1 : remnant fly ash particles. *Microscopy and Microanalysis*, *44*(2), 608–619.
Malhotra, V. M., & Ramezanianpour, A. A. (1994). *Fly Ash in Concrete*.CANMET.
Mehta, P. K. (2001). Reducing the environmental impact of concrete. *Concrete International*, (October), 61–66.
Mehta, P. K. (2002). Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development, (July), 23–28.
Mehta, P. K., & Monterio, P. (2006). *Concrete:Microstructure, Properties, and Materials*. Berkeley:McGraw-Hill.
Ozcelik, G., Gürsel, A. P., & Meral, Ç. (2013). Yapı Kimyasallarına Çevresel Çerçeveden Bakış. *Uluslararası Katılımlı Yapılarda Kimyasal Katkılar 4 . Sempozyumu ve Sergisi* (pp. 179–197). Ankara.
Poon, C. S., Lam, L., & Wong, Y. L. (2000). A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash. *Cement and Concrete Research*, *30*, 447–44555.
Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Pennington, D. W. (2004). LCA part 1: framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, *30*(5), 701–20.
Tangüler, M., Meral, Ç., & Aslam, I. (2014). Early-Age Performance of Binary Fly Ash- Portland Cement Blends. In *Eurasia 2014 Waste Management Symposium, 28-30 April* (pp. 1–10). İstanbul, Türkiye.
Tangüler, M., Meral, Ç., & Gursel, A. P. (2014). Merging Mechanical and Environmental Performance of Turkish Fly Ash-Portland Cement Mortars. In *11th International Congress on Adv. in Civil Engineering, 21-25 October* (pp. 1–8).
Technical Committee 67-FAB Use of Fly Ash in Building. (2005). *RILEM Report 7 - Fly Ash in Concrete: Properties and Performance*. (K.Wesche, Ed.) (p. 284). London · New York · Tokyo · Melbourne · Madras.
Tokyay, M. (2013). Betonda UK, GYFC ve SD'nin Rolü: Mevcut Bilgi Birikimi. In *Beton 2013 Hazır Beton Kongresi, 21-23 Şubat* (pp. 201–238).
Turkish Statistical Institute. (2008). *Mineral wastes generated by thermal power plants*. Turkey.
U.S. Environmental Protection Agency. (2006). *Life cycle assessment: Principles and practice* (pp. 1–80). Cincinnati, Ohio.
Van Oss, H. G. (2014). *U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries - Cement* (pp. 38–39).

Silis Dumanı ve İnce Kumun Poroz Kaplama Betonu Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi

Orhan Karpuz
Gümüşhane Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bağlarbaşı Mah. 29000,Gümüşhane
Tel: 0456 233 74 25/ 1635
E-Posta: orhankarpuz@hotmail.com

Metin Mutlu Aydın
Akdeniz Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dumlupınar Bulvarı, 07058 Antalya
Tel: 0242 227 44 00/ 4354
E-Posta: metinmutluaydin@gmail.com

Taşkın Tanrıverdi
Gümüşhane Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bağlarbaşı Mah. 29000,Gümüşhane
E-Posta: tsknrvrdi@hotmail.com

Öz

Geçirimli karayolu üstyapı tasarımı son yollarda oldukça gelişmekte olan bir yol yapım tekniği olarak dikkat çekmektedir. Poroz beton uygulamaları ise geçirimli üstyapı tasarımlarında kullanılan önemli bir kaplama malzemesidir. Geleneksel kaplamalarda görülen yağmur suyunun kaplama yüzeyinden kenara doğru akıtılarak uzaklaştırılmasının aksine, geçirimli üstyapı örneklerinde yağmur suları kaplama altı drenaj tabakasından kenara doğru akıtılarak uzaklaştırılmaktadır. Bu sayede kaplama yüzeyinde su filmi oluşmamakta, seyir güvenliği ve konfor artmaktadır. Ancak geçirimli poroz beton içerisindeki % 15-20 oranındaki boşluk nedeniyle bu tip kaplamaların dayanım değerleri oldukça azalmaktadır. Geçirimlilik kapasitesini azaltmadan dayanım değerlerini artırmak amacıyla birçok deneysel çalışma yürütülmektedir. Bu çalışma kapsamında ise silis dumanı ve ince kumun poroz betonun mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Çimento ile ağırlıkça yer değiştirilerek % 4, % 8, % 12 ve % 16 oranlarında silis dumanı; % 15, % 30, % 45 ve % 60 oranlarında ince kum kullanılmıştır. Basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, geçirimlilik, birim hacim ağırlığı ve irtibatlı boşluk oranı ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan çimentoyla yer değiştirilerek silis dumanı kullanılmasının basınç dayanımını arttırdığı ve yarmada çekme dayanımını fazla etkilemediği; ince kum kullanılmasının basınç dayanımını ve yarmada çekme dayanımını azalttığı; her iki katkının irtibatlı boşluk oranını ve geçirimlilik kapasitesini azalttığı görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Poroz beton, silis dumanı, ince kum, geçirimli kaplama, üstyapı.

Giriş

İnsanların ulaşım ihtiyaçlarını karşılamalarına yardımcı olan ulaştırma biçimlerinden birisi de karayoludur. Önemli ulaşım araçlarından birisi olan tekerlekli taşıtların kullanımının artması ile birlikte ulaşım konforu ve güvenliğini sağlayacak yüzey oluşturma ihtiyacı da artmıştır. Bu ihtiyacı gidermek amacıyla zaman içinde birçok çalışma yürütülmüş ve çeşitli üstyapı tipleri elde edilmiştir. Bunlar; rijit (beton), esnek (asfalt) ve karışık olmak üzere üç farklı şekilde yapılmaktadır. Rijit üstyapılar, ağır ve yüksek hacimli trafiğe sahip yollarda granüler bir temel tabakası üzerine yapılan beton plaktan oluşur. Esnek üstyapı, çok tabakalı bir yapıdadır. Alt tabakaları dren kabiliyeti yüksek granüler malzemelerden, üst tabakaları ise yüksek stabilite ve sürüş konforu için bitümlü karışımlardan oluşmaktadır. Karışık tip üstyapılar, zamanla bozulmuş beton kaplamaların üzerine sıcak bitümlü karışım takviyesi yapılarak ya da çimentolu temel tabakası üzerine asfalt kaplama yapılarak oluşturulur.

Konfor ve güvenlik üzerinde, yola gelen yağış sularının uzaklaştırılması ve yağış anındaki görüş koşulları gibi özellikler etkilidir. Yol yüzeyinde yağmur anında oluşacak su filmi, tekerlek ile yüzey arası sürtünme direncini azaltarak taşıtların kızaklaması tehlikesini arttırır. Kaplama yüzeyindeki yağış suları, enine eğimle kenarlara akıtılarak uzaklaştırılabildiği gibi, yolun üstyapısı geçirimli inşa edilerek de daha hızlı bir şekilde uzaklaştırılabilir. Yağış anında taşıt seyir hızlarının azalma nedeni, öndeki taşıtların su sıçratmasıyla arkadaki taşıt sürücülerinin görüş mesafelerinin azalması ve fren mesafesinin artmasından kaynaklanan tedirginliktir. Geçirimli üstyapılar, yol yüzeyinde su birikmesine fırsat vermediklerinden taşıtların su sıçratmasını çok önemli ölçüde azaltırlar. Ayrıca bu tip üstyapıların boşluklu yüzeyi ve içyapısı, trafiğin oluşturduğu gürültünün azımsanmayacak bir kısmını absorbe ettiğinden, taşıtlardan ve hareketlerinden kaynaklı çevreyi rahatsız edici gürültü, normal geçirimsiz üstyapıya göre daha azdır (Ceylan, 1999). Geçirimli üstyapılarla ilgili ilk çalışmalar 1967 yılında İngiltere'de, orta ağırlıktaki trafik koşullarında yapılmış, daha sonra ağır trafik koşulları altındaki durum araştırılmıştır. Danimarka ve Norveç'te de otoyollarda ve havaalanlarında kullanılmıştır. ABD'de Dallas'taki askeri havaalanında, Hollanda'da otoyollarda uygulanmıştır. Fransa'da ise Nantes deneme yolunda incelenmiş, Paris şehri içinde ve şehirlerarası yollarda geçirimli üstyapılar uygulanmıştır (Ceylan, 1999)., Poroz betonla ilgili ciddi çalışmalar ise 1980'li yıllarda ABD ve Japonya'da başlamıştır (Ghafoori ve Dutta, 1995). Yol yapımında stabilitenin sağlanması açısından en önemli konulardan biri suyun drenajıdır. Gerek yüzey suyunun gerekse yer altı suyunun yol yapısından drene edilmesi yüksek maliyetlere sebep olmaktadır. Drenaj amaçlı olarak geliştirilen bu tekniğin sağladığı şu avantajlardan da söz etmek mümkündür: Kaplamada %20'yi bulan orandaki hava boşlukları, yüzey suyunun, hızla yol yüzeyinden alt tabakalara doğru drene olmasını sağlar. Böylelikle, yol yüzeyinde su birikintileri ve göllenmeler olmayacağından ve gece sürüşünde, yol yüzeyinde aynalama etkisi oluşmayacağından, şerit çizgileri ve trafik işaretleri daha kolay görülebilir, yansıma sebebiyle oluşabilecek kazaların önüne geçilebilir (Yağcı, 1991). Normal betonla kıyaslandığında poroz beton yüksek bir geçirgenliğe sahiptir. Bundan dolayı yağmur suyu hızlı bir şekilde zemine nüfuz edebilir ve yeraltı su kaynakları zamanla yenilenebilir. Bu ise, doğal kaynakların korunmasına yardım eder. Bundan dolayı poroz beton kaplama yakınlardaki ağaçların toprak içindeki kökleri yardımıyla daha fazla hava ve su almasına izin verir. Poroz beton kaplama açık renklidir

fakat açık hücre yapısı ısının atmosfere yansımasını azaltır. Yağmur yağarken, poroz beton asfalt gibi sel suyu akışını ve dolayısıyla da yağmur sularının aktığı su kütlelerini ısıtmaz. Aynı zamanda tutulan yağmur suyu betonun üzerindeki havayı soğutur, çünkü bu tıpkı buharlaşırken tenimizi serinleten ter gibidir. Bu yeryüzünün sıcaklığını ve nemliliğini ayarlayabilir ve şehirlerdeki ve kentsel alandaki sıcak ada olgusunu ortadan kaldırır. Kentsel alanlarda yol gürültüsünü azaltmak için çitler ve bariyerler inşa etmek de maliyetli olabilir. Bir alternatif olarak, yola poroz beton döşenmesi gürültüyü ve maliyetleri azaltabilir (Yağcı, 1991).

Geçirimli beton yol üstyapıların uygulanması henüz ülkemizde mevcut değildir. Bu konudaki eksikliği azaltmak ve bu tip üstyapıların önemini vurgulamak için bu çalışma kapsamında geçirimli kaplama betonunu özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla silis dumanı ve ince kum katılmasının etkileri incelenmiştir. Bu amaçla yaklaşık % 15 oranında boşluk yapısına sahip bir poroz betonun, boşluk sebebiyle zayıflayan mekanik özelliklerine, silis dumanı ve ince kumun olumlu yönde etki edip etmediği ve ediyorsa bu etkinin derecesi belirlenmeye çalışılmıştır.

Deneysel Çalışma

Kullanılan Malzemeler

Agrega: Poroz beton karışımlarda Gümüşhane ili merkezinde yer alan Arazlar Konkasör Tesislerinden temin edilen kalker kökenli agrega kullanılmıştır. Agrega yığınının genelinin kübik şekilli danelerden oluştuğu, yassı ve uzun dane oranının az olduğu gözlemlenmiştir. Karışımlar hazırlanmadan önce, kullanılacak iri agrega 8 ve 4 mm eleklerden elenerek ana yığından ayrılmıştır. Daha sonra iyice yıkanarak doygun yüzeyi kuru (DYK) halde kapalı plastik kaplarda muhaf aza edilmiştir. Agreganın kullanıldığı haliyle yani doygun kuru yüzeyli birim hacim ağırlık değeri belirlenmiştir. Deneyden elde edilen değer, beton yol standartlarında belirtilen max %30 sınırını aşmadığından agrega uygun görülerek kullanılmıştır. Kaba agregaya ve ince kuma ait özellikler Tablo 1'de verilmiştir. İnce kum olarak, yukarıda bahsedilen agrega yığınından 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm ve 0.125 mm ölçülü eleklerden elenen 1.0 - 0.125 mm arası malzeme çimentoyla ağırlıkça % 15, % 30, % 45 ve % 60 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. İnce kumun granülometrisi ise Tablo 2 ' de verilmiştir.

Tablo 1. Kaba Agregaya ait fiziki özellikler.

Kayaç türü	Kalker
Boyut, mm	4 – 8
Yoğunluk, gr / cm^3	2,705
Aşınma Miktarı (LA), %	23

Tablo 2. İnce kumun granülometrisi.

Elek Çapı, mm	Geçen, % P
1	100
0,5	65
0,25	30
0,125	0

Çimento: Gümüşhane ili Tekke mevkiinde yer alan Aşkale Çimento A.Ş. firmasına ait fabrikadan temin edilen CEMI 42.5 türü normal portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler aşağıdaki tabloda verilmiştir. Konuyla ilgili literatürde yer alan çalışmalarda yaygınlıkla kullanıldığından, karşılaştırma maksatlı olarak CEMI 42.5 tercih edilmiştir. Her bir poroz beton numunesi hazırlanmasında 575 gr çimento kullanımı esas alınmıştır.

Tablo 3. CEMI 42.5 Çimentosunun fiziksel, kimyasal ve basınç dayanımı özellikleri.

Kimyasal Özellikler		Fiziksel Özellikler	
SiO_2 (%)	18.51	Ç.Kalıntı	0.86
Al_2O_3 (%)	4.23	45 Mikron Elek Kalıntısı	2
Fe_2O_3 (%)	3.38	90 mikron elek kalıntısı	0
CaO (%)	60.46	Özgül Yüzey (Blaine) (cm^2/g)	3627
MgO (%)	2.79	Priz Başlama Süresi (Dk)	195
SO_3 (%)	3.11	Priz Sona Erme Süresi (Dk)	240
Kızdırma Kaybı (%)	3.53	Özgül Ağırlık (g/cm^3)	3.10
Na_2O (%)	0.33	Genleşme (Le Chatelier - mm)	1
K_2O (%)	0.74	Standart Kıvam Su Miktarı	30.7
Cl^- (%)	0.0106	Basınç Dayanımı, MPa	
Toplam (%)	97.42	1 Gün Kürlü	13.1
Ölçülemeyen (%)	2.58	2 Gün Kürlü	28
Serbest Kireç (%)	0.68	28 Gün Kürlü	57.8

Silis Dumanı: Çimentonun ağırlıkça % 4, % 8, % 12, % 16'sıyla yer değiştirilerek kullanılmıştır. Silis dumanının özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 4. Silis dumanının özellikleri.

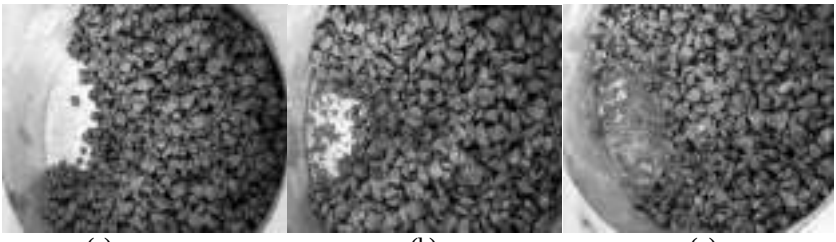
Şekilsiz SiO_2	Min (gerçek % 96,1)
H_20 (nem)	Max (gerçek % 0,19)
Kızdırma Kaybı	L.O.I Max.(gerçek % 1,81)
+45 mikron üzeri	Max (gerçek % 0,58)
Hacim Yoğunluğu	0,55 - 0,65 kg/dm^3
İncelik, BET	Min. (gerçek 23,36 m^2/gr)

Akışkanlaştırıcı Katkı: Üretilen poroz beton karışımlarında su/çimento oranı 0,27 olduğundan yeterli işlenebilirliğin sağlanabilmesi için su azaltıcı kimyasal katkı kullanılması gereklidir. Bu maksatla Sika firmasına ait Viscocrete Hi-Tech 32 isimli ürün kullanılmıştır. Kimyasal yapısı, modifiye polikarboksilat esaslı polimerdir. Üçüncü nesil bir hiper akışkanlaştırıcıdır. Kahve renginde bir sıvıdır. Çimento ağırlığının % 0.6 - % 1' i oranında karışım suyuna ilave edilerek kullanılmıştır. % 0,52'lik bir miktarı dahi çimento

harcının kıvamı üzerinde oldukça etkili olduğundan her bir karışım için kullanım yüzdesi ayrı ayrı belirlenmiştir.

Poroz Beton Karışımların Hazırlanması

Literatürde yapılan araştırma neticesinde üretilen tüm poroz beton karışımlar için sabit olmak üzere su / bağlayıcı madde oranı 0,27 ve çimento / agrega oranı 0,213 olarak seçilmiştir. Yukarıda da bahsedildiği üzere her bir 100 x 200 mm silindirik numune için 2700 gr agrega, 575 gr hidrolik bağlayıcı ve 156 gr su kullanılmıştır. Poroz betonun en öncelikli konusu çimento harcının kıvamıdır. Agrega danelerini saracak-örtecek yeterli yumuşaklıkta olmalı fakat sıkıştırma sırasında agrega arası boşluklara düşerek kalıbın dip kısmına doğru hareket edecek kadar da akıcı olmamalıdır. Eğer bu şekilde bağlayıcı harcı akıcı olursa, poroz betonun üst kısmı ile alt kısmı farklı mekanik özelliklere sahip olacak ve boşluklar arası irtibat kanalları tıkanacağından bir bütün haliyle poroz beton tabakanın geçirimliliği önemli oranda azalacaktır. Kıvam ayarı, hiper akışkanlaştırıcı katkı miktarıyla yapılmıştır. Yukarda bahsedilen husus ışığında deneme karışımları yapılmıştır (Şekil 1. a,b,c). Şekil 1.b'de az miktarda fakat Şekil 1.c'de fazla miktarda çimento harcının akması durumla rı bariz görülmektedir. Şekil 1.a'da olduğu şekilde tüm karışımlarda uygulanacak bir kıvam belirlenmiş ve belirlenen kıvam değeri yayılma çapı deney aleti kullanılarak ölçülmüştür (ASTM C230). Belirlenen kıvama göre diğer karışımlar için de belirlenen katkı miktarları ve tüm karışım değerleri aşağıdaki tabloda topluca verilmiştir.



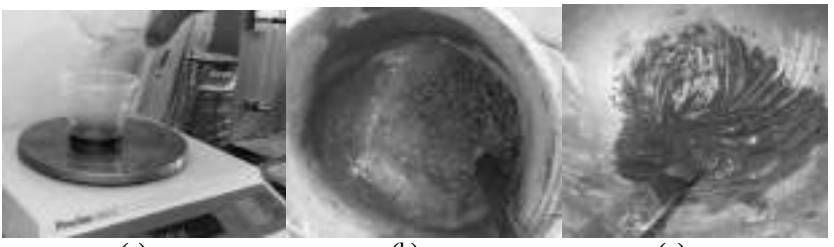
(a) (b) (c)

Şekil 1. Deneme karışımları: a-normal, b -az akıcı, c-çok akıcı.

Tablo 5. Poroz beton karışımlarda kullanılan malzemeler ve miktarları (g).

Karışım No	İri Agrega	Çimento	Silis Dumanı	İnce Agrega	Su	Hiper Akışkanlaştırıcı.
P	2700	575	0	0	156	6
S4	2700	552	23	0	156	6
S8	2700	529	46	0	156	6,2
S12	2700	506	69	0	156	6,5
S16	2700	483	92	0	156	6,7
İ15	2700	488,75	0	86	156	5
İ30	2700	402,5	0	172	156	4,5
İ45	2700	316,3	0	259	156	4
İ60	2700	230	0	345	156	4
8-30	2700	357	46	172	156	5
16-30	2700	311	92	172	156	5

Karışımlar hazırlanırken önce akışkanlaştırıcı hassas terazide tartılıp bir behere alınmış ve miktarı belirlenmiş su katılarak karıştırılmıştır (Şekil 2.a). Sonra ağırlığı belirlenmiş çimentoya spatula ile yedirilerek ilave edilmiştir. Çimento harcı başlangıçta yarı kuru bir görüntü vermiştir (Şekil 2.b). Karışım önce düşük sonra yüksek hızda iyice karıştırılmıştır. Tüm bu karıştırma işlemi 5 dakika kadar sürmüştür. İşlem sonucunda yüzeyi parlak, hareke te dirençli fakat yavaşca akma eğiliminde bir çimento harcı (Şekil 2.c) ortaya çıkmıştır.



(a) (b) (c)

Şekil 2. (a) Hiper akışkanlaştırıcı ve su miktarı ayarı, (b) akışkanlaştırıcı ilk katıldığı anlardaki çimento ve (c) iyice karıştırıldıktan sonraki çimento harcı.

Çimento harcının üzerine doygun kuru yüzey haldeki miktarı belli agrega ilave edilmiş ve agrega daneleri üzerinde eşit miktarda homojen bağlayıcı filmi oluşuncaya kadar spatula yardımıyla el gücüyle karıştırılmıştır. Laboratuvarda mevcut küçük ve büyük mikserler kazan içinde dönen palet sistemli olduklarından, beton karma işlemi sırasında, agreganın palet-kazan yüzeyi arasında sıkışıp kırılarak gradasyon değişimine uğramasından ve bunun sonuçları etkilemesinden çekinilmiştir. Dolayısıyla tercih bu yönde olmuştur. Üretilecek deney numuneleri için konuyla ilgili literatürde yaygınlıkla kullanıldığından 100 x 200 mm silindir kalıplar tercih edilmiştir. Hazırlanan bir poroz beton karışım harcı, iç yüzeyi gresle hafifçe yağlanmış silindirik kalıbın içeresine üç tabakada yerleştirilmiştir. Her tabakada spatula ucuyla 20 - 25 darbe yapılarak karışım üniform şekilde yerleştirilmiş ve ön sıkıştırma gerçekleştirilmiştir. Daha sonra sarsma tablası üzerine konulmuş ve 4 sn süreyle vibrasyona maruz bırakılarak niha i sıkışma sağlanmıştır. Bir saat kadar bekletildikten sonra poroz beton numuneler, kalıbıyla beraber kür havuzuna konulmuştur.

Poroz Beton Numunelerin Test Edilmesi

Belirlenen kür süresini tamamlamış poroz beton numunelere önce geçirimlilik testi uygulan mış, sonra birim hacim ağırlık ölçümleri alınmış, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Üç numunenin ortalaması karışım değeri olarak alınmıştır. Poroz beton numuneleri kalıptan çıkartmak için CBR deney seti krikosu kul lanılmıştır. Kriko boyu 200 mm'den az olduğundan çıkarma işlemi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Normal betonda kullanılan hava ya da su basıncı teknikleri poroz betondaki boşluklar nedeniyle etkili olmadığından kullanılamamıştır. Numune üst yüzeyleri düzgün olmadığından ve sıkışmaya bağlı olarak 200 mm'den daha fazla yüksekliklere sahip olduklarından laboratuvardaki başlık düzeltme cihazında yükseklikleri 200 mm'ye ayarlanmış ve düzeltme işlemleri yapılmıştır (Şekil 3). Birim hacim ağırlık

ölçümlerinden önce poroz beton numunelerin düzeltilen yüzeylerindeki öğütme kalıntıları iyice yıkanıp temizlenmiştir.



Şekil 3. Numunelerin alt ve üst kısımlarının makinede düzeltilmesi.

Geçirimlilik Deneyi: İnşaat sektöründe kullanılan 100 mm çaplı sert plastik dirsekten ikisi su geçirmez şekilde birleştirilerek bir "U" oluşturulmuş ve metal kova içine sıkıştırılarak sabitlenmiştir. Deneye tabi tutulacak numunenin kalıbının üstüne boş bir kalıp koyularak yükseltilmiş ve su sızdırmaması için ara çizgi boyunca bantlanmıştır. Bu haliyle "U" şeklindeki düzeneğin kauçuk contalı ucuna yerleştirilmiştir. Bir şerit metrenin ilk 2,5 cm'lik kısmı belirgin hale getirilerek kalıbın içine dik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra kalıbın içinde 25-26 cm yüksekliğinde su olacak şekilde doldurulmuş ve dolum işlemi bitirilip su yüksekliği 23 cm'ye indiğinde kronometre çalıştırılmış, su yüksekliği 2,5 cm olduğunda kronometre durdurulmuştur. İki defa tekrarlanan ölçümlerin ortalaması geçirimlilik kapasitesi için saniye olarak kaydedilmiştir. 28 günlük kürlü numunelerden ölçümler alınmış ve her karışım için ortalama değer belirlenmiştir.

Birim Hacim Ağırlık ve Boşluk Oranları: Darası sıfırlanmış terazinin su içindeki kefesine beton numuneler yerleştirilip suya batırılmış ve ağırlık değişimi olmayıncaya kadar beklendikten sonra okunan değer "*sudaki ağırlık*" olarak kaydedilmiştir. Poroz numuneler sudan çıkartılırken bir miktar su da beraberlerinde çıktığından kovadaki suya ara ara takviye yapılmıştır. Sudan çıkartılan numune bir gün süreyle kuruması için dışarıda bekletildikten sonra terazide normal şekilde tartılmış ve "havadaki ağırlık" değeri olarak kaydedilmiştir. 100x200 mm ölçüsünde bir silindirin hacmi 1570,8 cm^3' dür. Birim hacim ağırlık değeri şu şekilde hesaplanmıştır:

Birim Hacim Ağırlığı = Havadaki Ağırlık / 1570,8

Poroz beton içerisinde iki türlü boşluk oranı vardır. Birincisi çimento harcıyla sarılmış agrega daneleri arasındaki tüm boşlukları kapsayan genel anlamda "*boşluk*" oranıdır. İkincisi ise poroz betonun üst yüzeyi ile alt yüzeyi arasında birbiriyle irtibatlı olan boşlukların oranıdır. Buna da "*irtibatlı boşluk*" denmektedir ve şu şekilde hesaplanmıştır:

İrtibatlı Boşluk Oranı = 1- (Havadaki Ağırlık – Sudaki Ağırlık) / 1570,8

Basınç Dayanımı: Basınç dayanımını belirlemek için 7 günlük üç adet ve 28 günlük 3 adet numune kullanılmıştır. Standarda (TS EN 12390-2) ve (TS EN 12390 -3) uygun olarak teste

tabi tutulmuştur. Test için laboratuvardaki bilgisayar kontrollü basınç presi kullanılmıştır (Şekil 4.a).

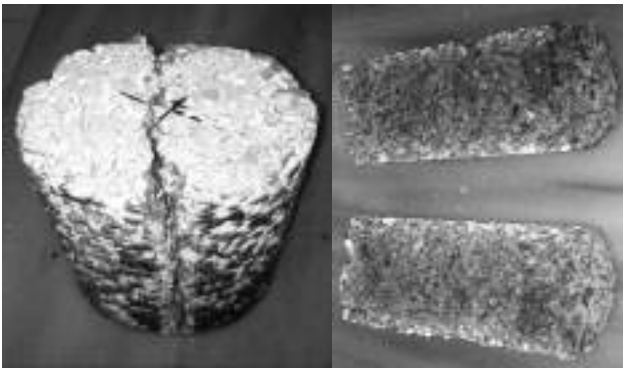
Yarmada Çekme Dayanımı: Literatürde yaygınlıkla kullanıldığından bu çalışmada, eğilmede çekme yerine yarmada çekme deneyi tercih edilmiştir. Poroz beton numuneleri bu deney için uygun aparata yerleştirilerek basınç presinde kırılmıştır (Şekil 4.b). Yarmada çekme dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır: Burada F_{ct}, MPa cinsinden yarmada çekme dayanımı olmak üzere; F, Newton cinsinden kırılma yüküdür.

$$F_{ct} = 2 \times F / (\Pi \times 200 \times 100)$$



Şekil 4. (a) Labaratuvardaki bilgisayar kontrollü basınç presi ve (b) yarmada çekme dayanımı aparatı.

Yerleştirmeden önce poroz beton numunelerin kesit orta noktaları işaretlenmiştir. Kırılma şekli aşağıda (Şekil 5) verilmiştir.



Şekil 5. Yarmada çekme deneyinde kırılmış poroz beton numuneler.

Bulgular ve İrdelemeler

Geçirimli poroz kaplama betonunda çimentoya silis dumanı ve ince kum katılarak elde edilen on farklı karışım üzerinde gerçekleştirilen deneyler ve ölçümler sonucunda elde

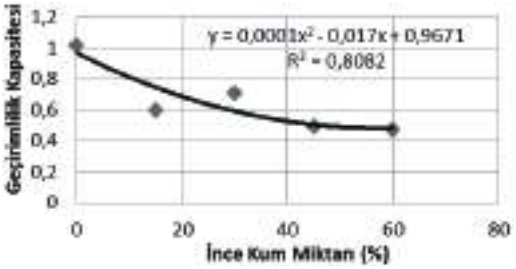
edilen geçirimlilik kapasitesi, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, birim hacim ağırlık ve boşluk oranları değerleri aşağıdaki tabloda topluca verilmiştir.

Tablo 6. Deneylerden elde edilen tüm değerler.

Karışım No	Geçirim Kapst. (cm/sn)	Birim Hac. Ağr. (gr/cm^3)	İrtibatlı Boşluk %	7 Günlük Basınç MPa	28 Günlük Basınç MPa	28 Günlük Çekme MPa
P	1,02	2,202	10,56	3,33	3,90	2,45
SD4	0,55	2,240	6,63	4,03	4,36	2,50
SD8	0,64	2,224	7,34	4,51	3,38	2,38
SD12	0,49	2,245	5,88	4,49	4,97	2,56
SD16	0,54	2,226	7,41	4,20	5,28	2,04
İK15	0,60	2,209	9,87	2,70	4,03	2,14
İK30	0,71	2,197	10,04	3,18	4,20	1,93
İK45	0,49	2,218	8,95	2,36	2,22	1,62
İK60	0,47	2,211	8,36	1,51	2,06	1,21
8-30	0,64	2,229	8,68	4,27	4,45	2,24
16-30	0,68	2,235	5,41	4,19	4,30	2,05

Silis Dumanı ve İnce Kumun Geçirimlilik Kapasitesine Etkileri

En yüksek geçirimlilik kapasitesi 1,02 cm/sn ile katkısız P karışımında, en düşük geçirimlilik kapasitesi ise 0,47 cm/sn değeri ile ince kumlu İK60 karışımında ölçülmüştür. Katkılı poroz beton karışımların tümünde geçirimlilik kapasitesi azalmıştır. Azalma miktarı en düşük % 30 ile İK30 karışımında, en yüksek % 53,9 ile İK60 karışımında gerçekleşmiştir. Silis dumanı artışıyla beraber geçirimlilik kapasitesinde anlamlı bir değişim olmamıştır. İnce kum miktarının artışı ile geçirimlilik kapasitesi de azalma göstermiştir (Şekil 6). Geçirimlilik kapasitesine etki eden faktörlerden biri çimento harcının kıvamı ve kohezyonudur. Silis dumanı miktarı arttıkça kohezyonun arttığı, ince kum miktarı arttıkça kohezyonun azaldığı gözlenmiştir.

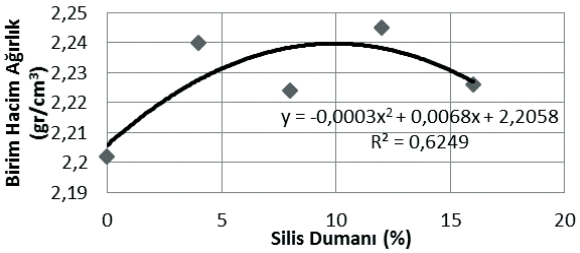


Şekil 6. İnce kum miktarı – geçirimlilik kapasitesi ilişkisi.

Silis Dumanı ve İnce Kumun Birim Hacim Ağırlık ve İrtibatlı Boşluk Oranına Etkileri

En düşük birim hacim ağırlık değeri 2,202 gr/cm^3 ile katkısız P karışımında, en yüksek değer ise 2,245 gr/cm^3 ile SD12 karışımında ölçülmüştür. Poroz beton karışımların birim hacim ağırlık değerleri katkılarla beraber genel olarak artmıştır. Dolayısıyla poroz betona

silis dumanı ve ince kum katıldığında karışımın daha iyi sıkıştığı söylenebilir. Katkıların artış miktarı ile birim hacim ağırlık artışı arasında anlamlı ilişkiler tespit edilememiştir. Ancak genel olarak silis dumanının ince kuma göre daha fazla artışa neden olduğu söylenebilir (Şekil 7). Silis dumanında artış % 1 - % 1,95 arasında gerçekleşmişken ince kumlu karışımlarda artış % 0,3 - % 0,73 arasında gerçekleşmiştir.

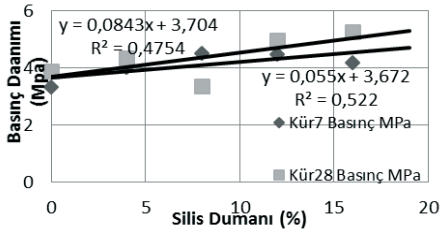


Şekil 7. Silis dumanı – Birim hacim ağırlık ilişkisi.

İrtibatlı boşluk oranı değeri katkı katıldığında azalmıştır. Silis dumanı katkılı karışımlardaki azalma ince kumlu karışımlardakinden daha fazla olmuştur. İK15 ve İK30 karışımlarındaki azalma az, İK45 ve İK60 karışımlarındaki azalma fazla olmuştur. İnce kumlu karışımlardaki azalma % 4,9 - % 20,8 arasında gerçekleşmişken silis dumanı katkılı karışımlardaki azalma % 29,8 - % 44,3 arasında gerçekleşmiştir. SD8-İK30 ve SD16-İK30 karışımlarına bakıldığında silis dumanı artışının poroz beton karışımın irtibatlı boşluk oranını azalttığı söylenebilir.

Silis Dumanının ve İnce Kumun Basınç Dayanımına Etkileri

Basınç dayanımı deneylerinde elde edilen yük-zaman eğrilerinin bir örneği aşağıda verilmiştir. Silis dumanı miktarı arttığında poroz betonun basınç dayanımı da artmıştır (Şekil 8.b). Yedi günlük kür numunelerinde en fazla artış % 35,4 ile SD8 karışımında 4,51 MPa değeriyle gerçekleşmiştir. Yirmi sekiz günlük kürlü numunelerde en fazla artış % 35,3 ile SD16 karışımında 5,28 MPa değeriyle gerçekleşmiştir. Bu sonuç literatürdeki çalışmalar (Yang J., 2003; Zhuge Y., 2010) ile de paralellik göstermiştir. Zhuge, çalışmasında, % 10 silis dumanı katılmasının poroz betonun basınç dayanımını % 18,8 arttırırken, porozite ve geçirimliliği azalttığı sonucuna ulaşılmıştır. Yang, çalışmasında % 6 silis dumanı katkısının basınç dayanımını arttırırken geçirimliliği azalttığı sonucuna varmıştır.

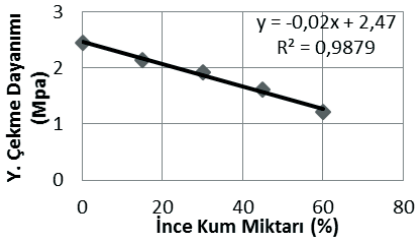


Şekil 8. Silis dumanı - basınç dayanımı ilişkisi.

Poroz beton karışımda çimentonun bir kısmıyla ince kum yer değiştirdiğinde basınç dayanımı azalmıştır. Yedi günlük basınç dayanımlarının tümü baz karışımdan düşük çıkmıştır. En fazla azalma % 54,6 ile İK60 karışımında meydana gelmiştir. Yirmi sekiz gün kürlü olanlarda İK15 ve İK30 karışımlarında basınç dayanımında artış olurken, İK45 ve İK60 karışımlarında düşüş olmuştur. En fazla artış % 7,7 ile İK30 karışımında, en fazla azalış % 47,1 ile İK60 karışımında meydana gelmiştir. SD8-İK30 ve SD16-İK30 karışımlarının basınç dayanımları katkısız baz karışımın basınç dayanımından daha fazla olmuştur. S8-İK30 karışımının basınç dayanımı S16-İK30 karışımından % 3,5 daha fazladır.

Silis Dumanı ve İnce Kumun Yarmada Çekme Dayanımına Etkileri

Yarmada çekme deneylerinden elde edilen yük - zaman eğrilerinin bir örneği aşağıda verilmiştir.



Şekil 9. İnce kum – yarmada çekme dayanımı ilişkisi.

Poroz beton karışımlarda silis dumanı içeriği arttıkça yarmada çekme dayanımında anlamlı bir değişim olmamıştır. Hem artış hem azalışın olduğu düzensiz bir dağılım görülmüştür. SD12 karışımına kadar fazla bir değişim olmamışken, en düşük dayanım 2,04 MPa değeri ve % 16,7 azalış ile SD16 karışımında oluşmuştur. Karışıma ince kum katılması yarmada çekme dayanımını fazlasıyla azaltmıştır (Şekil 9.b). En fazla azalış %50,6 ve 1,21 MPa değeriyle İK60 karışımında gerçekleşirken en az düşüş % 12,6 ve 2,14 MPa değeriyle İK15 karışımında gerçekleşmiştir. SD8-İK30 ve SD16-İK30 karışımları baz karışımdan daha az çekme dayanımı göstermelerine rağmen SD8-İK30 karışımı ince kumlu karışımlardan daha fazla çekme dayanımı göstermiştir.

SONUÇLAR

Geçirimli poroz kaplama betonlarında silis dumanı ve ince kumun mekanik özellikler üzerindeki etkileri konusunda gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında, birbirinden farklı özelliklerde hazırlanan on üç karışımın 100x200 mm ölçekli numuneleri üzerinde gerçekleştirilen geçirimlilik, birim hacim ağırlık, irtibatlı boşluk, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı ölçümlerinden elde edilen veriler ışığında aşağıdaki kanılara varılmıştır.

- %16 Silis dumanı katılarak basınç dayanımında % 35,3 oranında bir artış gerçekleşmiştir. Elde edilen en yüksek basınç dayanımı değeri 5,28 MPa olmuştur.

- Poroz betona çimentoyla yer değiştirilerek ince kum katılması yarmada çekme dayanımını önemli oranda azaltmaktadır.
- Poroz betona çimentoyla yer değiştirilerek % 12' den fazla silis dumanı katılması, yarmada çekme dayanımı açısından olumsuz etki yapabilmektedir.
- Özellikle % 30'dan fazla ince kum katılması basınç dayanımını azaltmaktadır.
- Silis dumanı basınç dayanımını önemli oranda arttırmaktadır.
- Silis dumanı ya da ince kum katılması poroz betonda birbiriyle irtibatlı boşluk oranını azaltmaktadır. Silis dumanının etkisi daha fazla olmaktadır.
- Silis dumanı ve ince kum katılması sıkışmayı arttırarak birim hacim ağırlığını arttırmaktadır. Bu konuda silis dumanının etkisi ince kumdan daha fazladır.
- Silis dumanı ve ince kum katılması poroz betonun geçirimlilik kapasitesini önemli oranda azaltmaktadır. İnce kumun olumsuz etkisi daha fazla olmaktadır.
- Tüm karışım agregaların aynı su muhtevasına sahip yığından olmayışları, her numunenin tek tek hazırlanması ve sıkıştırılması, bazı faktörlerde düzensiz değişimler olmasına sebebiyet vermiştir. Varılan sonuçlar kesin olmayıp, daha güvenilir sonuçlar için yukarda bahsedilen uy gulama hatalarının giderilerek, daha fazla ve kapsamlı deneylerin yapılması gerekmektedir.

Kaynaklar

ASTM C 230/C 230M (1999) Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement.

Ceylan, C. (1999) Lifli Geçirimli Beton Yol Üstyapısının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi. İTÜ, FBE, Türkiye.

Ghafoori, N. and Dutta, S. (1995) Laboratory investigation of compacted Nofines concrete for paving materials . J. Struct. Eng., ASCE , Vol. 7, No.3.

TSE (2010) TS EN 12390 -2, Beton – Sertleşmiş beton deneyleri – Bölüm 2: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabi tutulması, Ankara.

TSE (2010) TS EN 12390 -3, Beton – Sertleşmiş beton deneyleri – Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, Ankara.

Yağcı, İ. Ş. (1991) Geçirimli Beton Yol Üstyapısının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi. İTÜ, FBE, Türkiye.

Yang, J. and Jiang, G. (2003) Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. Cement and Concrete Research Journal , Vol. 33, No. 3.

Zhuge Y. (2010) Investigation of the Effect of Various Additives on the Strength of Environmentally Friendly Permeable Concrete, Southern Region Engineering Conference , Australia.

SÜRDÜRÜLEBİLİR BETONLARIN HAVAALANI APRON SAHASINDA KAPLAMA OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

İsmail DOĞAN, Muhammet Vefa AKPINAR,
Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü
Tel: 0555 826 71 19
mvakpinar70@yahoo.com

Mehmet T.SEFEROĞLU, Ayşegül G.SEFEROĞLU
Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü
Tel: 0530 406 24 62
mtseferoglu@gmail.com

ÖZ

Son yıllarda geri dönüştürülmüş yapı malzemelerine olan talep, bu alandaki çalışmaların ekonomik tasarruf sağlaması sebebiyle artış göstermiştir. Farklı alanlarda çeşitli sebeplerle performansını yitiren yapılarda (bina, köprü, karayolu beton kaplaması vb.) bulunan beton malzemesi belirli aşamalardan geçirilerek tekrar kullanılabilir hale getirilebilmektedir.

Beton kaplamalar sürekli dış ortamda bulundukları için hava sıcaklığının artması ve azalması durumlarında günlük sıcaklık farklarından dolayı sürekli basınç ve çekme gerilmelerine maruz kalmaktadır. Meydana gelen bu gerilmelere trafik yüklerinin de eklenmesi ile ilave gerilmeler oluşmakta ve bu ilave gerilmeler de beton kaplamaların derz kenarında ve plaka köşelerinde malzeme kopmalarına neden olmaktadır.

Bu çalışmada, önceden yapılmış çalışmalardaki geri dönüştürülmüş agregalar (RCC) kullanılarak üretilen betonlardan elde edilen mekanik özellikler, sonlu elemanlar programında girdi verisi olarak kullanılmıştır. RCC oranının ağırlıkça %15, %30 ve %50 olması durumunda üretilen betonun fiziksel ve mekanik özellikleri ile modelleme yapılmıştır. Bu modelden elde edilen sonuçlar, RCC kullanılmadan elde edilen betonun performansı ile kıyaslanmıştır. Programda, farklı oranda RCC içeren havaalanı beton kaplamaları modellenerek gün içerisindeki sıcaklık farklarının neden olduğu basınç ve çekme gerilmeleri, zamana bağlı ısıl analizle incelenmiştir. Ülkemizde yaygın olarak kullanılan tipteki bir yolcu uçağının kaplamaya uygulayacağı statik yük, günlük sıcaklık farkı ile birlikte Ansys sonlu elemanlar programındaki modele statik olarak etki ettirilmiş ve modelde meydana gelebilece k deformasyonlar ve birim şekil değiştirmeler incelenmiştir. RCC kullanımının % 50'ye varan oranlarda kullanılarak beton elde edilmesi durumunda havaalanı apron bölgesinde kullanılmasının sakıncası olmayacağı kanaatine varılmıştır.

Anahtar sözcükler: RCC, Havaalanı beton kaplaması, Gerilme, Isıl analiz, Sonlu elemanlar

GİRİŞ

Türkiye, 2010 yılı itibariyle hazır beton üretiminde dünyada 3. sırada yer alırken; Avrupa'da ilk sırada yer almaktadır. Türkiye'de beton üretiminin artış göstermesinin sebebi olarak , son yıllarda inşaat sektöründe yaşanan büyüme, nüfusun artmasıyla konut ihtiyacının artması, en çok betonarme yapıların tercih edilmesi, kentsel dönüşüm projeleri, h avaalanı, köprü ve baraj inşaatı çalışmalarının artması olarak gösterilebilir (T.C. Doğu Marmara Kalkınma Ajansı Düzce Yatırım Destek Ofisi 2013). Beton üretiminin artmasına neden olan bu gelişmelerden dolayı betonun önemli bir kısmını oluşturan agregaların tüketiminin artması da kaçınılmaz olmuştur.

Doğal kaynakların tüketiminin azaltılması olarak bilinen atıkların geri dönüşüm uygulamaları, çevresel çalışmalardan biridir. Bu atıkların önemli bir kısmını inşaat atıkları oluşturmaktadır ve inşaat atıklarının %40'ını da beton atıkları oluşturmaktadır (Nik. D. Oikonomou 2005). Beton atıklarının geri dönüşümü yapılarak betonun %55 - %80'ini oluşturan agreganın tekrar kullanılması hem agrega üretimi sırasında çevreye verilen zarar ı hem de doğal agrega tüketimini azaltacaktır (Köken, A. 2008).

Son yıllarda geri dönüştürülmüş yapı malzemelerine talep oldukça artış göstermiştir. Özellikle beton agregalarının RCC olarak kullanılması yaygın hale gelmiş ve bu konuda birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, RCC kullanılarak üretilen betonların mekanik ve fiziksel özellikleri Ansys sonlu elemanlar programında girdi verisi olarak kullanılarak havaalanı apron bölgesinde RCC ile üretilecek beton kaplamada sıcaklık farklarından dolayı oluşabilecek sıcaklık dağılımı, bu dağılıma bağlı olarak beton kaplamalardaki oluşabilecek birim şekil değiştirme miktarları incelenecektir. Apron bölgesinin seçilme nedeni uçakların park alanı olması ve park süresince kaplamalara statik yük etki ettirmesidir. Günlük sıcaklık farkının fazla olması beton kaplamalarda oluşacak gerilmeleri artıracağından Diyarbakır ilinde Ekim ayındaki ortalama en yüksek sıcaklık farkının yaşandığı gün baz alınarak sonlu elemanlar programında sıcaklık verisi olarak kullanılmıştır.

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Köken, A. ve Köroğlu, M.A. (2008) yapmış oldukları çalışmada, mukavemeti 20 MPa olan atık betonlardan elde edilen RCC agregalarının fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Farklı oranlarda dönüşüm agregasına sahip beton numuneler hazırlamışlardır. Bütün karışımları aynı dozajda üretilerek karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak , ürettikleri n betonlarda RCC oranı arttıkça beton mukavemetinin düştüğünü tespit etmişlerdir (Köken, A. 2008).

Durmuş ve diğ. (2009) beton atıklarından elde edilen iri agregaların beton özelliklerine olan etkisini incelemişlerdir. Çalışmada; kırma iri agrega yerine %0, %10, %20, %30, %40, %50 ve %100 oranlarında iri geri dönüşüm beton agregası kullanarak karakteristik beton dayanımı 30 Mpa olan (C30) beton üretmişlerdir. Üretilen beton ların karakteristik dayanımları; %0 için 43,92 MPa, %10 için 39,99 MPa, %20 için 38,93 MPa, %30 için 37,09 MPa, %40 için 33,34 MPa, %50 için 32,76 MPa ve %100 için ise 29,33 MPa olarak bul unmuştur. Karakteristik dayanımı 30 MPa ol an betonlar ın hedef dayanımı 37 MP a olacağından geri dönüşümden elde edil en iri agregaların beton üretiminde %30 oranına kadar kullanılabileceği sonucuna varmışlardır (Durmuş ve diğ. 2009).

Seferoğlu, M. T. (2013) çalışmasında beton kaplamaların ısıtılması ve buna bağlı olarak kaplamalarda sıcaklık farkından dolayı oluşabilecek gerilmeleri incelemiştir. Yapılan çalışmada beton kaplamaların içerisine ısıtıcı kablolar döşemek suretiyle soğuk havaya maruz bırakılan beton kaplamaları ısıtarak kaplama derinliği boyunca oluşan sıcaklık dağılımının eksponansiyel olarak değiştiğini gözlemlemiştir. Oluşan sıcaklık farkından dolayı beton kaplamaların yüzeyinde çekme, tabanında basınç gerilmelerinin olduğunu belirtmiştir. Çalışmanın sonunda yüzeyde oluşacak çekme gerilmelerinin karşılanabilmesi için donatı gereksinimi olabileceği fikrini ileri sürmüştür (Seferoğlu, M.T. 2013).

RCC ile üretilen betonun yol kaplamalarında kullanılması ile ilgili çalışmalardan biride Smith tarafından 2009 yılında yapılmıştır. Beton kaplamalar için gerekli olan termal ve mekanik özellikler bu çalışmadan esinlenilmiştir. Bu parametreler; termal özellikler için ısı iletim katsayısı, ısı kapasitesi, ısıl genleşme katsayısı olup mekanik özellikler için: Beton basınç dayanımı, elastisite modülü, eğilme dayanımı ve poisson oranıdır. Smith, yaptığı çalışmada RCC kullanımının yol kaplama betonu için kaynak olabileceği hususunu araştırmıştır. Bu çalışmada %0, %15, %30 ve %50 oranlarında RCC kullanılarak karakteristik dayanımı 30 MPa olan beton üretilmiş, %15ve %30 oranlarında geri dönüşüm agregası ile üretilen betonlar hedef dayanımı sağlamıştır. %0 RCC ile üretilen beton ise 36 günde hedeflenen dayanıma ulaşmıştır. Üretilen betonun basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ısıl genleşme katsayısı Tablo 1 'de özetlenmiştir (James, S.T. 2009).

Tablo 1 . RCC 'nin Bazı Özellikleri(James, S.T. 2009)

	RCC Oranı			
	% 0	**% 15**	**% 30**	**% 50**
Basınç dayanımı (MPa)	27,60	40,90	42,10	35
Eğilme mukavemeti (MPa)	6,0	7,2	7,3	6,3
Isıl Genleşme Katsayısı (10^{-6}/°C)	7,28	6,60	5,27	4,1

Sonlu elemanların beton ve asfalt kaplamlardaki uygulamaları son 20 yıldır geniş bir kullanım alanı kazanmıştır. Akpınar, M. V., (2008), Özcanan, S,(2013), Akpınar, M. V., D.T, (2001), Akpınar, M. V., S. Romanoschi, (2003), Akpınar, M. V., S. Özcanan, Y. Zandi, O. Karpuz, B. Mahdizadeh, Y.Z, Akpınar, (2010), Akpınar, M. V., Hancock, J., M. Hossain, A. J. Gisi, (2001), yaptıkları çalışmalarda yol kaplamlarındaki gerçek trafik yüklemleri altındaki birim şekil değiştirme ve gerilmeleri sonlu elemanlar programları kullanarak gerçek değerlere yakın sonuçlar bulmuşturlar.

Beton Kaplamalarda Oluşan Gerilmeler

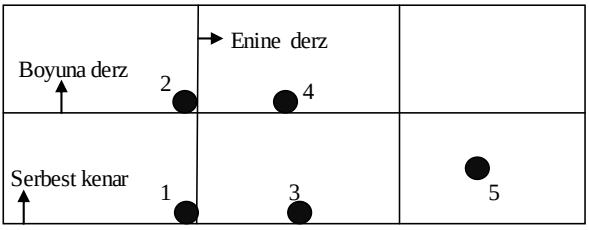
Beton kaplamalar genellikle geniş ve ince beton plaklardan üretilirler. Betonun mekanik karakteristiklerine (eğilmede çekme, yorulma, vb.) göre tasarımı yapılan beton kaplamalar çevre ve trafik etkilerinin sebep olduğu gerilmelere geniş ve ince plaklarla karşı koyarlar. Bu gerilmeler; taşıt yükleri, periyodik ısı değişimleri, periyodik hacimsel değişmeler, plak ile temel arasında sürtünme, plaklar arasındaki düşey sürtünme ve yük transferi dir.

Teker Yüklerinden Dolayı Oluşan Gerilmeler

Beton plağa etki eden teker yükü; teker yükünün pozisyonuna, büyüklüğüne ve temas alanına bağlıdır. Plak bu gibi parametrelere bağlı olarak dış bükey olarak deformasyona uğrar. Bu deformasyonlar sonucu plakta gerilmeler oluşur. Teker yükü plağın farklı bölgelerinde farklı gerilmeler oluşturmaktadır. En kritik gerilme serbest plağın köşesine yük etkimesi halinde ve en düşük gerilme plağın orta noktasına yük etkimesi halinde oluşmaktadır.

Teker Yükünün Pozisyon Etkisi

Aşağıdaki şekilde beton plakta gerilme oluşturabilecek teker yüklerinin pozisyonları verilmiştir (Şekil 1). Teker yükünün pozisyonu sonucu oluşabilecek gerilmelerin büyükten küçüğe doğru; 1>2>3>4>5 şeklinde olacağı söylenebilir. Çünkü statik basınç altında en kritik gerilme serbest plak köşesine yük etkimesi durumunda oluşurken en düşük gerilme plak orta noktasında oluşmaktadır. Ancak beton kaplamalardaki günlük sıcaklık farkından dolayı iç bükey bir şekil alan kaplama orta noktadan statik yüke maruz bırakılacak olursa en kritik gerilmeler bu durumda ortaya çıkmaktadır. Çalışmamız kapsamında yapılan termal analizler neticesinde beton kaplama iç bükey bir şekil almıştır. Bu nedenle uçak yükleri kaplama orta noktasından etki ettirilmiş ve en kritik gerilmelerin ortaya çıkması sağlanmıştır.



Şekil 1. Teker Yükü Pozisyonu

Isı Değişimlerinden Kaynaklanan Gerilmeler

Gece ve gündüz arası sıcaklık farklarından dolayı beton plaklar ın kenar ve köşeleri yukarı veya aşağı doğru kıvrılırken, bu kıvrılan beton plakta gerilmeler oluşur. Böylece plaklar bu noktada zeminle temas halinde olma z ve kaplamadaki teker yüklerinin yarattığı eğilmede çekme gerilmesi de artar.

Eğer beton plağın alt kısmı üst kısmından daha soğuk ise kenarlardan yukarı doğru kıvrılmaya çalışacaktır. Bu durumda kenar ve köşeleri zeminle temas edemediği için konsol gibi davranacaktır ve beton plağın kenar veya köşelerine teker yükü etkimesi ile beton plakta mey dana gelen gerilmeler kritik olabil ecektir. Eğer beton plağın üst kısmı alt kısmında daha sıcak ise bu sefer beton plak aşağı doğru kıvrılacaktır. Beton plak zeminle temas edemediği içi plağın orta noktasına yük etkimesi durumunda kritik gerilmeler oluşacaktır.

MALZEME VE YÖNTEM

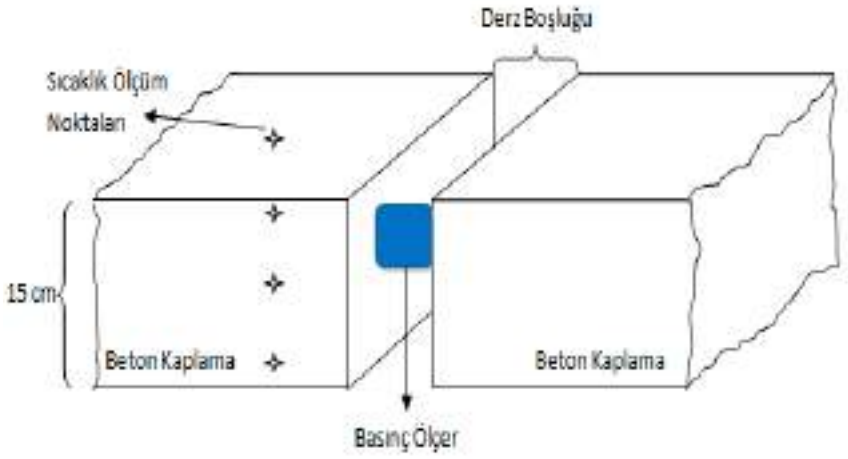
Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme yapılarak analizler yapılmıştır. RCC katkılı beton ile ilgili deneysel çalışma yapılmadığı için model için gerekli olan parametreler daha önce yapılan çalışmalardan alınmıştır.

Model iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada beton plağın içinde oluşan başlangıç sıcaklık değerlerinin belirlenmesi için Türkiye'de ilk kez kurulan Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hızlandırılmış Yol Testi Laboratuvarı'nda (HYTL) bulunan beton plak üzerinde çalışma yapılmıştır. Bu aşamada beton kaplama içerisindeki sıcaklık dağılımlarının nasıl olduğu incelenmiş ve esas yapılacak çalışmaya ışık tutması sağlanmıştır. İkinci aşama ise, laboratuvarda elde edilen sıcaklık değerleri ile tahmin yapılarak model için gerekli olan beton plak içi sıcaklık başlangıç değerleri ve daha önceki çalışmalardan geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen betonun mekanik ve ısıl özellikleri Sonlu Elemanlar Programına (ANSYS) girdi verisi olarak kullanılmış ve analiz yapılmıştır.

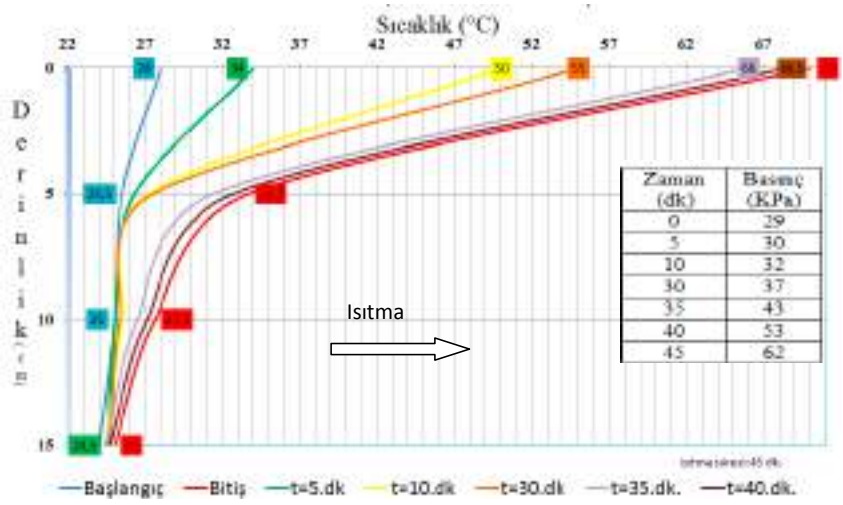
Hızlandırılmış Yol Testi Laboratuvarı Çalışması

HYTL'nın Karadeniz Teknik Üniversitesi Ulaştırma Anabilim dalında KTÜ Bilimsel Araştırmalar Dairesi Başkanlığı ve TÜBİTAK 1001 proje desteğiyle 2009 yılından beri faaliyettedir. Laboratuvar, demir yolu, hava alanı pistleri ve benzeri yapıların gerçek koşullardaki dinamik yüklemelerini birebir tem sil edebilme imkânına sahiptir. 30 metre uzunluğunda ve 6 metre genişliğinde boyutlara sahiptir. Hızlandırılmış Yol Test düzeneğinin 15 m uzunluğundaki dinamik yükleme düzeneği, çalışma prensibi bakımından Dünyada ikinci Avrupa da ise örneği mevcut değildir. Gerçek kamyonların yol kaplama larında oluşturduğu ek moment yüklerini birebir uygulamaktadır. 12 m'lik etkili deney mesafesi ile oldukça önemli bir özelliğe sahiptir.

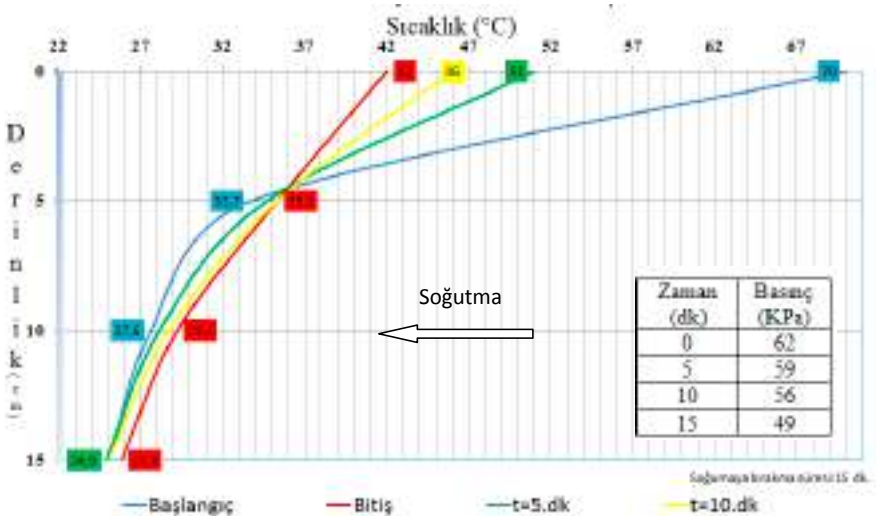
Laboratuvarda bulunan Trabzon İl Özel idaresi tarafından inşa edilmiş 6 m genişliğinde 15 cm kalınlığında C25 sınıfı beton yol kaplamasına 45 dakika boyunca 240 ^{o}C sabit sıcaklık verilmiş ve 45. dakikadan sonra sıcaklık kaynağı kapatılmıştır. 15 dakika boyunca soğumaya bırakılmış ve hem sıcaklıklardaki hem de basınçlardaki düşüşler gözlemlenmiştir. 5 cm, 10 cm ve 15 cm derinliklerde sıcaklık ölçer cihazlar yerleştirilmiş ve beton plak derinliği boyunca sıcaklık değişimleri ölçülmüştür. Ayrıca bu çalışmada beton plağın derz bölgesine basınç sensörü yerleştirilerek sıcaklığa bağlı olarak beton yol kaplaması derz bölgesinde oluşabilecek yatay basınç değerleri ölçülmüştür (Şekil 2). Beton plağın iç sıcaklığı ve derz bölgelerinde ölçülen sıcaklık değişimleri Şekil 3 ve Şekil 4 'de verilmektedir.



Şekil 2. Hızlandırılmış Yol Testi Beton Kaplamalarının Sıcaklık ve Basınç Ölçümü



Şekil 3. Beton Kaplamanın Isıtılması Durumunda Sıcaklık ve Basınç Değişimleri

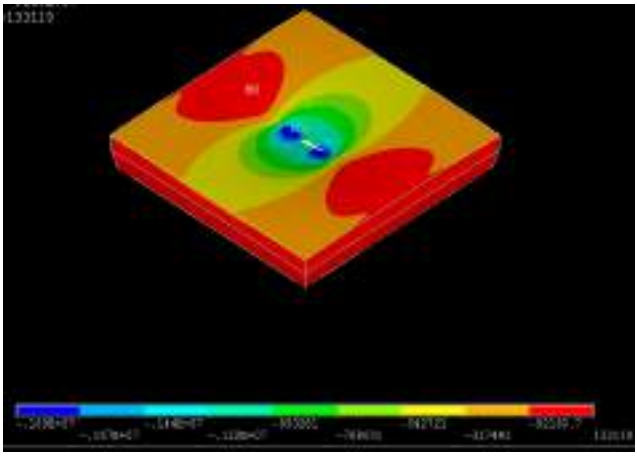


Şekil 4. Beton Kaplamanın Soğutulması Durumunda Sıcaklık ve Basınç Değişimleri

Yapılan bu deney neticesinde beton kaplama içerisindeki sıcaklık dağılımının eksponansiyel olarak değiştiği ve derz bölgesinde kaplamaların yatayda yaptığı basınçların sıcaklık değişimiyle önemli ölçüde değişken olduğu sonucuna varılmıştır. Bu durum Ansys sonlu elema nlar modelinden alınan sonuçların hem doğruluğunu kontrol etmemizde bize yardımcı olmuş hem de beton kaplamaların sıcaklık etkisi altında nasıl bir davranış sergilediği hakkında bilgi vermiştir.

Sonlu Elemanlar Modeli

Modeli meydana getiren yapıda beton plak ve zemin boyutları sırasıyla 5x5x0,3 m ve 5x5x0,5 m'dir. Beton plak ve zeminden oluşan model 160000 adet elemana ayrılmıştır (Şekil 5). Sıcaklık yükleri olarak Metroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün sitesindeki saatlik sıcaklık verileri kullanılmıştır. Verilerin alındığı yer olarak yakın dönemde en fazla sıcaklık farkının meydana geldiği Diyarbakır ili seçilmiştir. Kaplamaya etkiyen teker yükünün belirlenmesinde ise Türkiye'deki havaalanlarında en fazla operasyon yapan Boeing 737-800 tipindeki uçağın özelliklerinden faydalanılmıştır.



Şekil 5.Sıcaklık Etkisi ve Teker Yükü Altında Kaplama Tabakasının Durumu

Malzeme özellikleri

%0, %15, %30 ve %50 oranlarında RCC ile üretilen beton plağın ve temel zeminin malzeme özellikleri Tablo 2'de verilmektedir. Beton plağın parametreleri, RCC ile üretilen betonun yol kaplaması olarak kullanılması konusunda en kapsamlı çalışma olan Smith'in doktora tezinden alınmıştır (James, S.T. 2009) .

Tablo 2. Beton Plak ve Temel Zeminin in Malzeme Özellikleri (James, S.T. 2009)

Özellikleri	RCC İle Üretilen Beton				Temel Malzemesi
	%0	%15	%30	%50	
Elastisite Modülü(N/mm^2)	31000	34500	35100	33200	120
Basınç Dayanımı(N/mm^2)	27,60	40.90	42.10	35	-
Özgül Ağırlığı (kg/m^3)	2350	2325	2320	2306	1800
Isı İletim Katsayısı($J/m\text{-}s\text{-}^oC$)	1,81	1,74	1,73	1,69	0,30
Isı Kapasitesi($J/kg\text{-}^oC$)	1063,10	964,69	945,00	889,88	850
Termal Genleşme Katsayısı ($10^{-6}/^oC$)	7,28	6,60	5,27	4,10	-

Yük Parametreleri

Teker yükü olarak Türkiye'de havaalanlarında operasyon yapan Boeing 737 -800 tipi uçağın teker yükü kullanılmıştır. Uçağın burun kısmında 2 adet ve ana iniş takımında ise 4 adet teker vardır. Uçağın ana iniş takımları dual teker tipi olup dual tekerler arasındaki uzaklık 86 cm'dir. Uçağın kalkış ağırlığı 79015 kg'dır (Boeing, 2013). Uçak ağırlıklarının %5'i burun tekerlerine, % 95' i ise ana iniş takımlarına intikal etmektedir (Tunç, A. 2003). Uçak ağırlığının % 95'ine denk gelen yük hesap edilerek dual tekere düşen yük miktarı statik yük olarak uygulanmıştır.

Sıcaklık yükleri (Tablo 3) Metroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün internet sitesinden elde edilerek modele etki ettirilmiş ve zamana bağlı termal analizle beton kaplamadaki sıcaklık dağılımı belirlenmiştir. Bu işlemlerin tamamı farklı oranlarda kullanılan geri dönüşüm agregaları için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3 . Diyarbakır İli Saatlik Sıcaklık değerleri

Saat	Sıcaklık (^oC)
06:00	18
09:00	25
12:00	27
15:00	29
18:00	25
21:00	18
24:00	15
03:00	13
06:00	16

Beton içi başlangıç sıcaklık değeri KTÜ HYTL'nda yapılan çalışma sonucu yorumlanarak yaklaşık değerler kullanılmıştır. Beton içi sıcaklık değeri belirlenirken saat 06:00'daki çevre sıcaklığı baz alınarak plak derinliği boyunca her 5 cm'de sırasıyla 15.5 ^oC, 15.2 ^oC, 14.9 ^oC, 14.6 ^oC, 14.3 ^oC ve 14 ^oC olduğu ve zeminin sıcaklık değeri için ise beton plağın taban sıcaklık değeri ile aynı olduğu kabul edilmiştir. Teker temas alanı 0,13 m^2 olarak hesaplanarak gerçekte oluşan yarım eliptik dikdörtgen temas alanına eşdeğer olan dikdörtgen teker temas alanı olarak belirlenmiştir.

ÇIKTILAR ve DEĞERLENDİRMELER

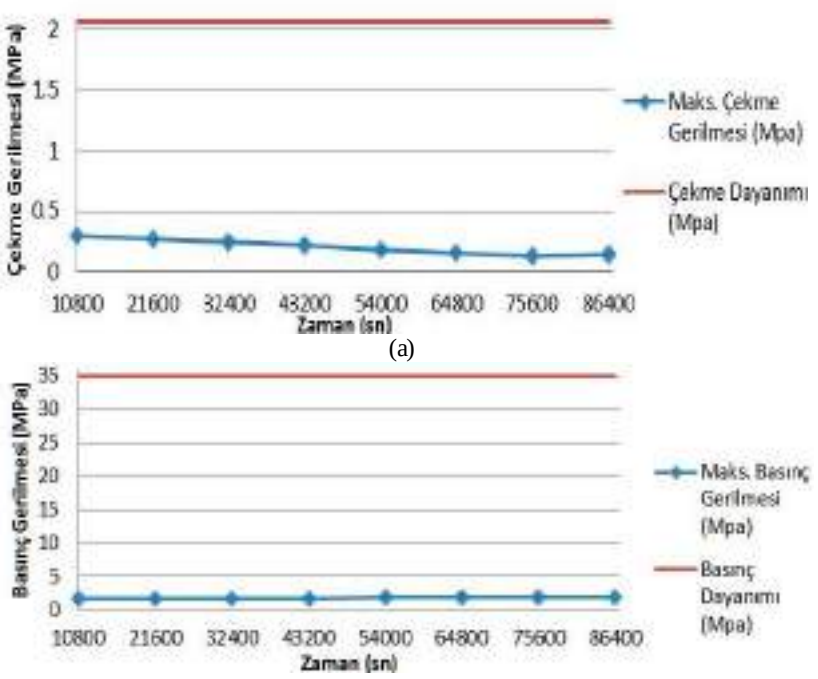
Sıcaklık Dağılımı ve Statik Yükleme

Çevre sıcaklığı maksimum 29 ^oC minimum 13 ^oC olarak belirlenmiş ve sonuç olarak bu sıcaklıklara maruz kalan kaplama derinliği boyunca sıcaklık değişimleri zamana bağlı termal analizle gözlemlenmiştir. Toplam analiz süresi 24 saat olarak seçilmiştir. Modellenen beton kaplamaların üst yüzeye yakın bölgelerinde sıcaklık değişimi hava sıcaklığından direk etkilenirken alt yüzeyleri zeminle temas halinde olduğu için zemin bir nevi yalıtım malzemesi görevi yaparak ısı değişiminden fazla etkilenmemesini sağlamıştır. Ayrıca gece sıcaklığının gündüz sıcaklığından düşük olması sonucu, beton kaplamalar soğumaya başlamış fakat beton kaplamaların alt ve üst yüzeyi başlangıç sıcaklıklarının altına düşmemiş ve beton kaplamanın üst yüzeyinin alt yüzeyinden daima daha sıcak olduğu görülmüştür. Zamana bağlı termal analiz sonunda modele girilen sıcaklık verileri kaplamanın iç bükey bir hal almasını sağlamıştır. Yani kaplama yüzeyinde genleşme daha fazla olurken tabanında daha az genleşme gözlemlenmiştir. Bu durum kaplama yüzeyindeki sıcaklık dağılımının analiz boyunca tabandaki sıcaklıklardan daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir.

Seçilen uçak tipinin tekerlek yükü temas alanına etki ettirilerek statik analiz gerçekleştirilmiştir. Statik analize başlamadan önce zamana bağlı termal analiz sonucunda orta ya çıkan sıcaklık dağılımı verileri ek yük olarak modele atanmıştır. Bu sayede hem sıcaklık hem de statik yükün aynı anda modellenmesi sağlanmıştır.

Birim Şekil Değiştirme, Çekme ve Basınç Dayanımı

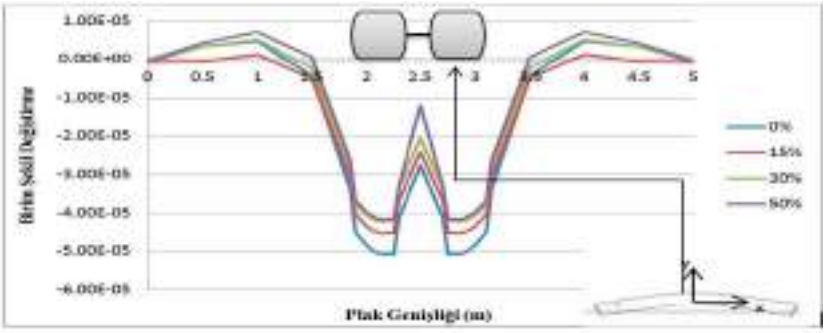
Beton plakta meydana gelen birim şekil değiştirmeler, çekme ve basınç dayanım sonuçları incelendiğinde geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen beton plağın belirtilen sıcaklık ve uçak yükü altında belirli ölçülerde deformasyona uğradığını ancak aşırı gerilmelerin oluşmadığı sonucuna varılmıştır. Yani betonun basınç ve çekme dayanımları ile modelden elde edilen gerilme ve birim şekil değiştirme verileri farklı geri dönüşüm agregalarından elde edilen betonlar arasında kıyaslandığında betonda oluşan maksimum gerilmeler betonun besınç ve çekme dayanımlarını aşmadığını (çekme dayanımı açısından 1/6 katı, basınç dayanımı açısından ise 1/10 katı olduğu) anlaşılmaktadır. %0, %15%, %30 ve %50 geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen beton plaklarda gün içinde oluşan maksimum gerilmelerin zamana (sn) göre değişimi hesaplanmış ve en fazla çekme ve basınç gerilmelerinin yaşandığı % 50 katkılı betonun sonuçları Şekil 6a ve 6b de verilmiştir.



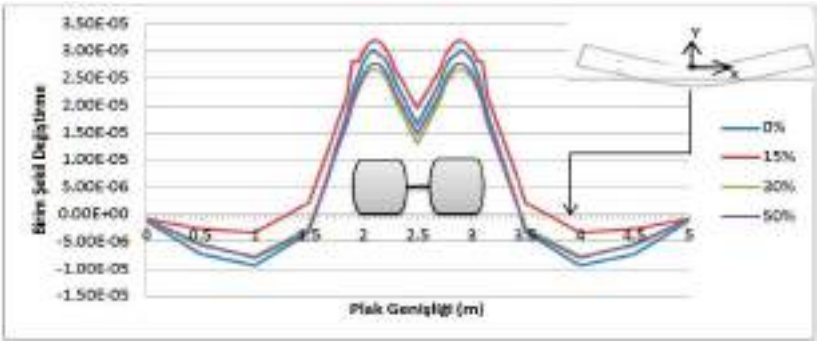
Şekil 6. %50 için Beton Plağın (a) Çekme ve Oluşan Maksimum Gerilmeler. (b) Basınç Dayanımı ve Oluşan Maksimum Gerilmeler.

%0, %15, %30, %50 oranlarında geri dönüşütürülmüş agrega ile üretilen beton kaplamanın karşılaştırılmalı olarak üst ve alt yüzeyindeki birim şekil değiştirmeleri Şekil 7 ve 8'de verilmiştir. Yapılan analiz sonucu oluşan maksimum birim şekil değiştirme gece 03:00' da meydana gelmiştir. Her iki yüzeydede birim şekil

değiştirmeler betonun varsayılan kopma birim şekil değiştirmesi (ε_{max}= 0.003) değerinden oldukça düşük değerlerde olduğu görülmüştür.



Şekil 7. Plak Genişliği Boyunca Plağın Üst bölgesinde Meydana Gelen Karşılaştırmalı Birim Şekil Değiştirmeler



Şekil 8. Plak Genişliği Boyunca Plağın Alt bölgesinde Meydana Gelen Karşılaştırmalı Birim Şekil Değiştirmeler

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada sürdürülebilir betonların havaalanı apron sahasında kaplama olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. RCC oranının ağırlıkça %15, %30 ve %50 olması durumunda üretilen betonun fiziksel ve mekanik özellikleri ile modelleme yapılmış ve zamana bağlı termal analizle statik yükleme durumunun aynı anda olması durumundaki etkisi incelenmiştir.

%0, %15%, %30 ve %50 geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen betonun havaalanı apron bölgesi kaplama malzemesi olarak kullanılması durumunda 16 ^{o}C'lik günlük sıcaklık farkının yaşanması durumunda kaplamada oluşabilecek birim şekil değiştirme, basınç ve çekme gerilemeleri incelenmiştir. % 50 oranında ki RCC kullanımının en kritik sonuçları doğurduğu görülmüş ancak bu durumda bile kaplama betonu dayanım değerlerinin çok altında bir sonuç çıktığı anlaşılmıştır. Birim şekil değiştirme değerlerinin en fazla kaplama üst yüzeyine yakın bölgelerde olduğu gözlemlenmiştir. RCC kullanımının % 50'ye varan oranlarda kullanılarak beton elde edilmesi durumunda havaalanı apron bölgesinde kullanılmasının sakıncası olmayacağı kanaatine varılmıştır.

KAYNAKLAR

Akpınar, M. V., Hancock, J., M. Hossain, A. J. Gisi, (2001), Theoritical Investigation of Cro ss Tensioned Concrete Pavement, 7th International Conference on Concrete Pavements, September , Orlando, Florida, USA.

Akpınar, M. V., D.T, (2001) Defining Roller Compactor Position and Slope of Tapered Surface in a Longitudinal Joint Construction Using 2 -D Finite Element Model. Kansas State University.

Akpınar, M. V., S. Romanoschi, (2003), Yollarda Derz Çatlakların Önlenmesi İçin Sıkıştırma Makinasinin Konumunun Mekanistik Analizlerle Tespit Edilmesi", XIII. Ulusal Mekanik Kongresi konferans, 1 -5 pp., Gaziantep, 8 -12 Eylül,

Akpınar, M. V., (2008), Effects of Truck Load P osition on Lon gitudinal Joint Deterioration",Indian Journal of Engin eering Matrials Science, IJEMS, Vol.15,pp. 41- 50

Akpınar, M. V., S. Özcanan, Y. Zandi, O. Karpuz, B. Mahdizadeh, Y.Z, Akpınar, (2010),"Accelerated Pavement Testing Pit Dimension Effects on Pavement Stress Analysis, 9th International Congress on Advances in Civil Engineering, pp. 27 -30 September , Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey.

Boeing, (2013) Air Plane Charecteristics For Airport Planning. http://www.boeing.com/assets/pdf/commercial/airports/acaps/737.pdf

T.C. Doğu Marmara Kalkınma Ajansı Düzce Yatırım Destek Ofisi, (2013) Yapı Malzemeleri Raporu, Düzce.
http://www.dogumarmarabolgeplani.gov.tr/pdfs/YAPI%20MALZEMELER%C4%B0.pdf

Durmuş, G. (2009) Geri Dönüşümlü İri Agregaların Beton Özelliklerine Etkisi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 24, Sayı 1, Sayfa 183-189.

James, S.T. (2009) Recycled ConcreteAgregate – A ViableAgregate Source for Concrete Pavements, Ph. D Thesis, University Of Waterloo, The Canada.

Köken, A. (2008) Atık Betonların Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliği, Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler MYO Teknik Online Dergi, Cilt 7, Sayı 1, Sayfa 86 - 97.

Nik. D. Oikonomou, (2005) Recycled concrete aggregates, Cement&Concrete Composites , Vol. 27, pp 315–318.

Seferoğlu, M.T. (2013). Havaalanı Rijit Kaplamalarında Farklı Beton Sınıfları İçin Sıcaklık Değişimini Sonlu Elemanlar ve Deneysel Çalışmalarla Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye.

Tunç, A. (2003) Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları. 1. Baskı, Asil Yayın Dağıtım, Ankara, Türkiye.

Özcanan, S, Akpınar, M. V., (2013), Esnek Üstyapılarda Kritik Tekerlek ve Aks Konfigürasyonların Mekanistik Analizlere Göre Tespit Edilmesi", IMO Journal,

IŞIK GEÇİREN FOSFORESANLI BETON

Arş. Gör. Murat SAYDAN, Doç. Dr. Ülkü Sultan KESKİN

Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fak. İnşaat Müh. Bölümü, KONYA
Tel: (0332) 223 20 37
E-Posta: muratsaydan@selcuk.edu.tr, ulkusyilmaz@selcuk.edu.tr

Öz

Son birkaç yüzyılda Dünya üzerinde sanayileşmeyle ve nüfus artışıyla birlikte artan enerji ihtiyacının karşılanması için, özellikle gelişmekte olan ülkelerde, hali hazırda en kolay ve ilk kurulum giderleri bakımından en ucuz enerji üretme yöntemi olan fosil yakıtlardan enerji üretimi hızla artmaktadır. Bu üretimin artmasıyla ortaya çıkan sera gazları (CO_2, CO) sebebiyle, küresel ısınma ve iklim değişiklikleri Dünyadaki canlılığın devamını olumsuz etkilemeye başlamıştır. Şüphesiz bu durumu düzeltmek için, enerji elde etme yöntemlerinin yinelenebilir kaynaklarla değiştirilmesinin yanında, tüm diğer sektörlerle birlikte, yapılarda da enerjinin tasarruflu kullanılması büyük önem arz etmektedir. Yapılarda kullanılan enerjinin tasarrufu çok önemli ölçüde yapı malzemeleriyle sağlanmaktadır. Bu yüzden özellikle son yıllarda, yapılarda ve yapı malzemelerinde inovatif yöntemler ve çözümler sıklıkla uygulanmaya başlanmıştır. Yapıların güneş ışıklarından daha fazla faydalanmasını sağlayan bu sistem, yapılara, hem mimari açıdan görsel bir güzellik, hem de enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu çalışmanın amacı, ışık geçiren ve fosforesanlı betonun, ışık geçirebilme kapasitesini ve diğer yapı elemanlarından enerji yönünden farkını irdelemek, ışık geçiren betona bir de fosforesan özellik kazandırarak mimari açıdan görsel güzelliğini artırmak ve daha da önemlisi bu tarz betonların, geceleri ışıklandırmanın çok mümkün olmadığı ortamlarda ışık yaymasını sağlayarak ekstra bir işlevinin olmasını sağlamaktır. Bu çalışma kapsamında yüzey alanının %2'si kadar plastik optik fiber içeren, ışık geçiren fosforesanlı beton numunesi üretilmiştir. Ayrıca bu numune üzerinde 10 watt gücünde led, 30 watt gücünde led ve 50 watt gücünde halojen akkor ışık kaynaklarıyla fotometrik ışık geçirgenliği deneyleri yapılmış ve sırasıyla %0.80 , %0.69 ve %0.77 oranlarında ışık geçirebilme değerleri bulunmuştur. Ayrıca ışık geçiren betonla yapılacak bir yapı dış cephesinin, halihazırda günümüzde sıklıkla kullanılan yalıtılmış cam + pencere ve kagir duvar + pencere cephe kaplama sistemleriyle ısı kaybı yönünden farkı hesaplanmaya çalışılmış ve sırasıyla 22.328 W/K, 52 W/K, 22.328 W/K ısı kayıpları bulunmuştur. Yine aynı sistemler için sırasıyla 23.24 W, 22.12 W, 105.6 W güneş enerjisinden kaynaklanan ısı kazançlarının olabileceği hesaplanmıştır.

Anahtar Sözcükler: ışık geçiren, fosforesanlı, beton, enerji.

Giriş

Dünya üzerinde, binlerce yıldır, insanlar çeşitli medeniyetler kurmuşlar ve yüzlerce eser inşa etmişlerdir. Bu eserlerin birçoğu günümüze kadar ulaşabilmiş, bir kısmı ise çeşitli olaylar sebebiyle (deprem, savaş vb.) yok olmuştur. Bu medeniyetlere ve yapılara baktığımızda, insanlar ilk yapılardan itibaren, yapılarının içerisinde gün ışığından faydalanmaya çalışmışlardır. Bunlara örnek olarak erken Roma dönemlerinde yapılıp altlarına pencere yerleştirilmiş çeşitli kubbeler, kemerler örnek olarak gösterilebilir. Hatta icat edilen birçok yapı elemanlarının icat edilme sebebinin de gün ışığından yararlanmak olduğunu söylemek abartılı olmayacaktır.

Fosil yakıtların sıklıkla kullanıldığı günümüzde, yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanma isteği yapı alanında oldukça farklı malzemelerin ve yapı türlerinin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Yeşil bina olarak tanımlanan bu yapıların birçoğu, kendi elektriğini üreten, gün ışığından en fazla yararlanan yapılar olarak karşımıza çıkmakta olup, bu tür yapılar çeşitli kurumlar tarafından da ödüllendirilmektedir. Ekonomik büyüme, bilim-teknoloji alanındaki faaliyetlerinin artışı ve dünya nüfusunun hızla artması, tüm dünyada yeraltı ve yerüstü yapılarının hızla artmasına yol açmıştır. Bu ekonomik büyüme döngüsü içinde artan nüfus, insanların gelirlerindeki artışlar ve teknolojik gelişmeler, insanların enerjiye olan bağımlılığını gittikçe arttırmaktadır. Enerji üretimi ise, günümüzde halen çok fazla fosil yakıt kullanımı sebebiyle, çevreyi çok fazla kirleten ve üretim yöntemleri açısından çok pahalı olan bir sektördür. Uluslararası Enerji Ajansının (IEA) 2012 verilerine göre 2011 yılında petrol, doğalgaz ve kömürün enerji üretimindeki payları %81 dolaylarındadır. Yine aynı ajansın verilerine göre 2011 yılında enerji kaynaklı CO_2 salınımının 31,2 GT (Gri Tahmin) olduğu, bunun yürürlükteki enerji politikaları göze alındığında 2035 yılında 37,0 Gt'ye çıkacağı, bu artışın da dünya sıcaklığını ortalama 3.6 derece artıracağı tahmin edilmektedir (IEA, 2012). Burada sözü edilen Gri Tahmin yöntemi, yetersiz ve eksik bilgiye sahip olunan sistemlerde, özellikle de pek çok değişkene bağlı olan veri setlerinde kullanılmak üzere Grey – Markov tarafından geliştirilen bir zaman serisi analizi yöntemidir (Kumar & Jain, 2010). Gerçek hayat problemlerinde de sıklıkla GT yönteminde de temel olarak anılan yetersiz ve eksik bilgi varsayımları altında kararlar alınmaktadır (Yilmaz & Yilmaz, 2013).

IEA'nın raporunda da belirtildiği gibi, günümüzde etkisini gösteren ve dünyamızın geleceğini tehdit eden küresel ısınmanın en büyük sebebi; enerji üretme işlemlerinde kullanılan fosil yakıtlardan ötürü çevreye salınan CO_2 konsantrasyonudur. Doğaya saldığımız sera gazlarının artması, bu gazların adeta koruyucu bir örtü görevi yaparak, güneşten gelen ışınların atmosferden daha az yansımasına, böylece atmosferdeki sıcaklığın artmasına (sera etkisi) sebep olmaktadır. Isınan hava ve yeryüzü dünyadaki en büyük karbondioksit tutucu olan kutup buzullarının erimesine ve havada serbest halde bulunan CO_2 miktarının artmasına sebep olmaktadır. Bu döngü artarak etkisini devam ettirmekte ve bir evreden sonra geri dönülemez bir aşamaya geçebilmektedir. İşte bu yüzden her alanda olduğu gibi yapılarda da enerjiyi en verimli şekilde kullanmak,

küresel ısınmanın çevre üzerindeki etkilerini azaltmak açısından önemli bir sorumluluktur.

Son yıllarda dünya üzerindeki yapılarda gün ışığından daha fazla yararlanılmasını sağlamak için yenilikçi bir malzeme ortaya çıkmıştır. Optik fiberlerin düzgün bir şekilde elemanın ışık geçirme yönüne paralel olarak yerleştirilerek ışığın bir yüzeyden diğer yüzeye optik fiberler aracılığıyla geçmesiyle ışığı geçiren bu malzemeye "ışık geçiren beton" denmiştir.

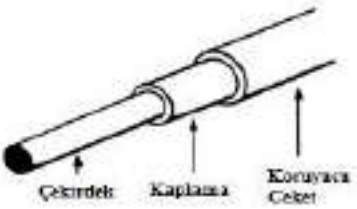
Işık geçiren beton ilk olarak 2003 yılında Macar mimar Aron Losonczi tarafından, mimari tasarım amacıyla, LiTraCon adıyla, optik fiber ve beton karıştırılarak üretilmiştir. Aron Losonczi bu buluşuyla 2005 yılında German Red Dot mimari ödülü almıştır (Heights, 2011). Daha sonra Macaristan'da LiTraCon adını verdiği bir şirket kurmuş, halen de bu şirket bünyesinde ışık geçiren beton üretip pazara sunmaktadır (www.litracon.hu). Işık geçiren betonla ilgili ilk bilimsel çalışmalardan biri 2007 yılında yapılmıştır. "Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering 2007" de sunulan bildiride polistren optik fiberler kullanılarak üretilen ışık geçiren betonun bazı basit optik özellikleri ve mekanik özellikleri incelenmiştir (Abou-Zeid, Fahmy, & Alia, 2007). 2009 yılında Zhi Zhou, Ge Ou, Ying Hang, Genda Chen, Jinping Ou isimli 5 çinli araştırmacı, ışık geçiren betonun, içeriğindeki plastik optik fiber oranlarına göre, bir yüzüne gelen ışığın yüzde kaçını geçirebildiğini ve plastik optik fiberlerin betonun mukavemeti üzerine etkilerini incelemişlerdir (Zhou, Ou, Hang, Chen, & Ou, 2009) . A.G. Mainini ve ark. (2012) ise bünyesinde PMMA (polimetilmetakrilat) fiber içeren beton panellerin fotometrik özelliklerini ve ışık geçirebilme kabiliyetlerini ölçmüşler ve buna göre radyal olarak fiber yerleştirilen beton panellerin ışık geçirebilme performanslarını irdelemişlerdir (Mainini, Poli, Zinzi, & Cangiano, 2012) .

Işık Geçiren Beton

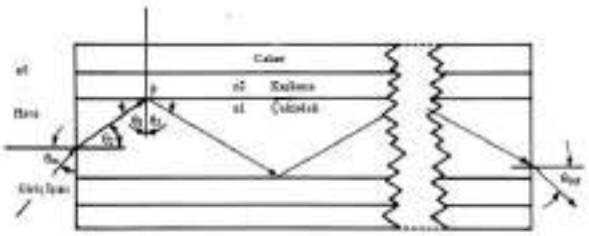
Işık geçiren beton, bünyesinde ışık geçiren polimer optik fiberlerin kullanıldığı, dayanımı ve durabilitesi yüksek, iç ve dış mekanlarda kullanılabilen bir beton elemandır.

Optik Fiberler

Işık geçiren betona ışık geçirebilme kapasitesi kazandıran optik fiberler genelde 3 bölümden oluşur. Merkezde asıl ışığı ileten çekirdek bölgesi vardır. Bu bölge silika esaslı cam veya Polimetilmetakrilat (PMMA) gibi cama benzeyen polimer bir plastikden de oluşabilir. Çekirdek bölgesinin dışında, bu bölgeyi kaplayan, genellikle çekirdekteki malzemeden farklı bir silika-cam veya silikon gibi bir polimer türünden oluşan bir kaplama malzemesi vardır. Optik fibere ışını iletme kapasitesini kazandıran da asıl bu kaplama tabakasıdır. Bu kaplama tabakasındaki malzemenin yoğunluk indeksine göre optik fiberin ışın iletme kapasitesi değişiklik gösterebilir. En dışında ise bu iki tabakayı korumak için kullanılan plastik bir kaplama tabakası da bulunabilir.



Şekil 1 Optik fiberlerin yapısı.



Şekil 2 Optik fiberlerin ışığı iletme prensibi.

Optik fiberlerin ışığı iletme fonksiyonları basit optik kuralları ile açıklanabilir. Şöyle ki, fiberin ucundan giren ışın dalga boyuna göre fiberin çekirdek bölgesinden sistemi terk etmeye çalışır. Çekirdek bölgesinin dışındaki kaplama tabakasındaki yoğunluk farkından dolayı ışın kırılarak tekrar çekirdek bölgesine döner. Böylece fiber boyunca kırılarak ilerler. Her kırıldığında çekirdek bölgesinden dışarıya çıkmak isteyen ışınlar, çekirdek bölgesi ve kaplama arasındaki yoğunluk farkından dolayı tekrar çekirdek bölgesine doğru kırılır. Böylece ışın fiberin yüzeyinden değil, diğer ucundan sistemi terk etmiş olur.

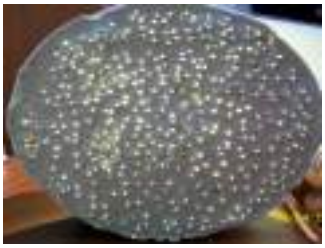
Işık Geçiren Beton Harcı

Şeffaf beton üretiminde en önemli yapı malzemesi, inşaat mühendislerinin vazgeçemediği en önemli malzemelerden birisi olan çimentolu harçlardır. Bilindiği üzere bu harcın üretimi hem ucuz hem de kolay olduğu için günümüzde sıkça tercih edilmektedir. Aynı şekilde şeffaf betonun üretiminde de çimentolu harçlar kullanılabilir. Ancak üretilecek malzemenin kullanım yerine, beklenilen performansa, durabilitesine göre değişik harçlar da kullanılabilmektedir (Ostroverkhova, Shirota, & Kageyama, 2013).

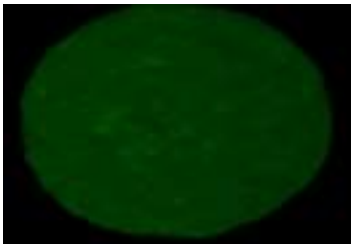
Işık Geçiren Fosforesanlı Betonun Üretilmesi

Bu çalışma kapsamında ışık geçiren fosforesanlı bir beton numunesi üretilmiştir. Numuneyi üretmek için ilk olarak 7cm çapında ve 6 cm boyunda bir PVC boru parçası ve oyun hamuru, kalıp hazırlamak için kullanılmıştır. Düz bir mukavva üzerine yaklaşık 5 mm kalınlığında düzgün bir şekilde oyun hamuru serilmiş ve üzeri boru parçasıyla kapatılmıştır. Daha sonra yüzey alanının %2'si kadar oranda, 1 mm çaplı plastik optik fiberlerden 6 cm uzunluklarda kesilmiş ve bu optik fiberler PVC boru parçasının içerisinde kalan oyun hamuruna rastgele ekilmiştir. Harç olarak da BASF firmasına ait Emaco S55 isimli, çimento esaslı, polimer takviyeli, tek bileşenli, kendiliğinden yerleşen toz grout harcı kullanılmıştır. Ayrıca bu harcın içerisine, malzemeye gelen ışık enerjisinin bir kısmını harcın içerisinde hapsedebilmek ve gün ışığı olmadığında bu enerjiyi ortama tekrar verebilmek için, harcın toplam ağırlığının %10'u kadar, yüksek saflıkta toz fosfor ilave edilmiştir. İyice karıştırılarak hazırlanan bu harç, 4 cm kalınlığında, kalıba dökülmüş ve numune uygun koşullarda kürlenmiştir.

Kürlenen numune kalıptan çıkarıldıktan sonra fazlalık olan plastik optik fiberler kesilmiş numunenin iki yüzü de zımparalanarak pürüzsüz bir yüzey elde edilmeye çalışılmıştır (Şekil 3 ve 4).



Şekil 3 Işık geçiren fosforesanlı beton (gündüz).



Şekil 4 Işık geçiren fosforesanlı beton (gece).

Deneysel Yöntem

Işık Enerjisinin Ölçülmesi

Işık enerjisi genel olarak 2 farklı şekilde ölçülür. Bunlardan birisi olan radyometrik test, ışık enerjisinin bir cisim üzerindeki fiziksel etkilerinin direk olarak ölçülmesiyle yapılır. Bu test ışığın cisim üzerindeki etkilerini direk olarak belirlememizde bize daha kesin sonuçlar verir. Bu yöntemle insan gözünün direk olarak görebildiği veya göremediği dalga boylarındaki ışık enerjisinin belirlememizi sağlar. Işık enerjisini ölçmenin bir diğer yöntemi de fotometrik test yöntemidir. Bu yöntem ile ışığın aydınlatma oranını belirleyebilmek mümkündür. Bu yüzden bu yönteme ışığın algısal ölçüm yöntemi de denebilir. Fotometrik ölçü birimleri, insan gözünün görebildiği dalga boyları olan 400 – 700 nm arasındaki dalga boylarında normal bir insan gözüyle bile seçilebilir.

Işık geçiren betonun ışık geçirebilme kapasitesini ölçmek için fotometrik ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Deney için kullanılan malzemeler (Şekil 5); 1 mm kalınlığında kesik huni haline getirilmiş siyah karton, Lüksmetre, 7 cm çapında ve 4 cm kalınlığında deney numunesi, karanlık oda, projektör ayağı, 10 watt led ışık kaynağı, 30 watt led ışık kaynağı, 50 watt halojen akkor ışık kaynağıdır.

Deneyler lüksmetrenin dışarıdan gelecek gün ışığından etkilenmemesi için karanlık odada gerçekleştirilmiştir. Deney numunesi siyah kartondan yapılan huninin dar kısmına, huninin merkezi numunenin merkeziyle çakışacak şekilde yerleştirilmiştir. Numunenin ışık geçirgenliğini ölçmeden önce ışık kaynağının 1 m^2 alanı aydınlatma değeri (lüks), karton huninin boyu olan, ışık kaynağına 32 cm mesafeden ölçülmüştür. Daha sonra ucuna numune yerleştirilen karton huninin geniş çaplı tarafı ışık kaynağının etrafına kaplayacak şekilde yerleştirilmiş ve etrafından ortama ışık yayılmaması için siyah renkli tekstil ürünleriyle sarılmıştır. Daha sonra devre tamamlanarak, ışık geçiren betonun diğer yüzüne gelen ışık, numunenin tam üzerinden lüksmetrenin sensörü sayesinde ölçülmüştür (Şekil 6). Tüm bu aşamalar 10 watt'lık led, 30 watt'lık led ve 50 watt'lık halojen akkor ışık kaynakları ile tekrarlanmıştır.



Şekil 5 Deney düzeneği.



Şekil 6 Işık miktarının ölçülmesi.

Deneylerde kullanılan numune 7 cm çapında, 4 cm kalınlığında, içerisinde yüzey alanının %2'si kadar Polimetil-metakrilat optik fiber içeren ışık geçiren ve fosforesanlı beton numunesidir.

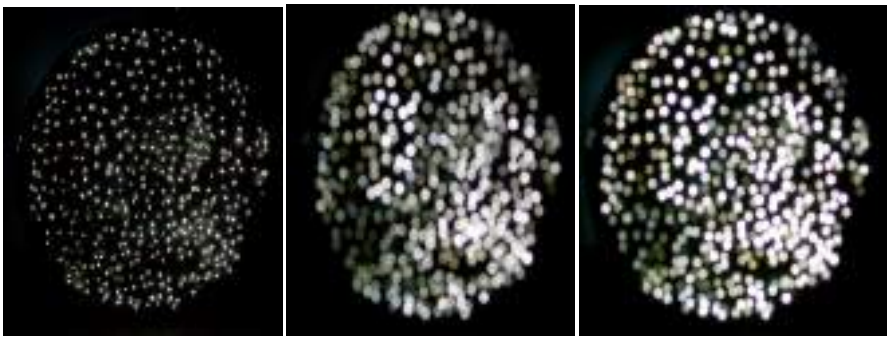
Deney Sonuçları

Deney Sonuçlarına göre bünyesinde toplam alanının % 2'si kadar optik plastik fiber kullanılarak üretilen ışık geçiren betonun ışık geçirme kapasitesi şöyledir.

Çizelge 1 Işık geçiren betonun ışık geçirme kapasiteleri ve oranları.

Işık kaynağı türü	Işık kaynağının aydınlatma gücü(Lüks)	Numunenin diğer yüzüne geçen ışık(Lüks)	Işığı geçirme Oranı
10 watt led	1520	12.25	% 0.80
30 watt led	6120	37.30	% 0.69
50 watt halojen	9010	69.95	% 0.77

Bu sonuçlardan da görüleceği üzere ışık geçiren betonun bir yüzeyine gelen ışık miktarı ile diğer yüzeyine geçebilen ışık miktarı kıyaslandığında düşük oranda ışık geçirebilir olarak görünmesine karşın, bu oran malzeme içerisindeki optik fiber miktarına, plastik optik fiberlerin üretildiği malzemenin özelliklerine, kullanılan plastik optik fiberlerin çaplarına göre oldukça farklı sonuçlar gösterir (Şekil 7).



a) 10 Watt led ışık kaynağı altında. b) 30 Watt led ışık kaynağı altında. c) 50 Watt halojen ışık kaynağı altında.

Şekil 7 Çeşitli ışık kaynakları altında ışık geçiren betonun ışığı geçirmesi.

Işık Geçiren Betonun Diğer Cephe Kaplama Yöntemleriyle Kıyaslanması

Güneş helyum ve hidrojen gazlarından oluşan bir yıldızdır. 4 tane hidrojen çekirdeği çok yüksek bir sıcaklıkta birleşerek bir helyum çekirdeği oluşturur. Bu olaya "Füzyon" denir. Güneşte oluşan helyum miktarı harcanan hidrojen miktarından daha azdır. Aradaki fark güneşten ışın olarak çıkan enerjiyi verir. Bu enerji güneş radyasyonu olarak bilinir ve güneşten dünyamıza kadar gelen ve dünyaya ısı ve ışık sağlayan enerji de bu enerjidir. Bu ışınım atmosferde ortalama 1.35 kW/m^2 değerindedir. Ülkemiz gibi güneş ışınlarından fazla miktarda yararlanan ülkelerde ise yeryüzüne ulaşan güneş enerjisi değeri kabaca 1000 W/m^2 dolaylarındadır. Bu enerji yeryüzündeki canlılığın devam etmesini sağlarken, hem yeryüzünü aydınlatmaya hem de ısıtmaya yarar.

Daha önce de bahsedildiği gibi yüksek enerji verimliliğine sahip yapılar tasarlamanın belki de önemli adımı güneş enerjisinden maksimum düzeyde faydalanmaktır. Güneş enerjisinden daha fazla faydalanmamızı sağlayan ışık geçiren betonla yapılan cephe kaplaması ile günümüzde sıklıkla kullanılan diğer cephe kaplama yöntemleri olan, cam giydirme cephe kaplaması ve normal duvar + pencere cephe kaplamaları arasında ısıl kazanç ve kayıplar yönünden bir kıyaslama yapmak için, TS825'den alınan değerlere göre yine eşitlik 1 ve 2'den hesaplanan yapı elemanlarının ısıl iletim katsayıları ve ısıl iletim hesap değerleri çizelge 1'de verilmiştir. Bu verilere göre bu çalışmada, 10 m^2 alana sahip, Konya ilinde, ayrık nizam olarak konumlandırılmış bir yapıdaki, kuzey yönündeki bir cephe örneği için hesaplamalar yapılmıştır (TSE, 2009).

$$R = \frac{d}{\lambda^h} \qquad (1)\ (\text{TS } 825)$$

R : Isıl geçirgenlik direnci (m^2.K/W),
d : Yapı bileşeninin kalınlığı (m),
λ^h : Isıl iletkenlik hesap değeri (W/m.K)

Bir yapı bileşeninin toplam ısıl geçirgenlik direnci (1/U), yapı bileşenlerinin ısıl geçirgenlik dirençlerine (R), yüzeysel ısıl iletim direnç değerleri (R_i, R_e) eklenerek eşitlik 2 ile hesaplanır.

$$\frac{1}{U} = R_i + R + R_e \qquad (2)\ (\text{TS } 825)$$

1/ U : Yapı bileşeninin toplam ısıl geçirgenlik direnci (m^2.K/W),
Ri : İç yüzeyin yüzeysel ısıl iletim direnci (m^2.K/W),
Re : Dış yüzeyin yüzeysel ısıl iletim direnci (m^2.K/W)'dir.

Çizelge 2 Hesaplarda kullanılan yapı elemanlarının ısıl iletim hesap değerleri ve katsayıları.

Sıra No	Malzeme veya bileşenin çeşidi	Isıl İletim Hesap değerleri (W/mK)	Isıl İletim Katsayıları(U)(W/m^2K)	Isıl İletim Katsayıları (U)(W/m^2K)	
1	Yalıtım Camı+PVC Doğrama		5.2 (camlar arası 9mm boşluklu, PVC doğramalı)		
2	Poli-metil metakrilat	0.25	1.639 (10 cm uzunluğunda)	**Birlikte**	1.491
3	Işık geçiren Beton Harcı (İnce agregalı normal beton) (B.H.K=2200 kg/m^3)	1.65	3.703 (10 cm kalınlığında)		
4	Kagir Duvar (B.H.K=2000 kg/m^3)	0.96	2.127 (25 cm kalınlığında)	**Birlikte**	0.581
5	Poliüretan ısı yalıtım levhası	0.040	0.684 (5 cm kalınlığında)		

Tabloda verilen değerlere göre yapı elemanlarından iletim ve taşınım yoluyla meydana gelen ısı kaybı eşitlik 3 ile hesaplanabilir.

$$\sum AU = U_D A_D + U_P.A_P + U_k.A_k + 0.8\ U_T.A_T + 0.5\ U_t A_t + U_d A_d + 0.5 U_{ds} A_{ds} \qquad (3)\ (\text{TS } 825)$$

U_D : Dış duvarın ısıl geçirgenlik katsayısı W/m^2K,
U_P : Pencerenin ısıl geçirgenlik katsayısıW/m^2K,
U_k : Dış kapının ısıl geçirgenlik katsayısı W/m^2K,
U_T : Tavanın ısıl geçirgenlik katsayısı W/m^2K,
U_t : Zemine oturan tabanın /döşemenin ısıl geçirgenlik katsayısı W/m^2K,
U_d : Dış hava ile temas eden tabanın ısıl geçirgenlik katsayısı W/m^2K,
U_{ds} : Düşük sıcaklıklardaki iç ortamlar ile temas eden yapı elemanlarının ısıl geçirgenlik katsayısı W/m^2K,
A_D : Dış duvarın alanı. m^2,
A_P : Pencerenin alanı m^2,
A_k : Dış kapının alanı m^2,
A_T : Tavan alanı. m^2,
A_t : Zemine oturan taban/döşeme alanı m^2,
A_d : Dış hava ile temas eden tabanın/döşemenin alanı m^2,
A_{ds} : Düşük sıcaklıklardaki iç ortamlar ile temas eden yapı elemanlarının alanı m^2.

Bu çalışmada sadece 1 yapı elemanı ve 1 cephe için hesap yaptığımızda, eşitlik 3'e göre bulunan ısı kaybı Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3 Cephe kaplama yöntemlerine göre ısı kayıpları.

Sıra No	Cephe Kaplama Yöntemi	Isıl İletim Katsayıları (U)(W/m^{2}K)	Isı Kayıpları (W/K)
1	Pencere (2 m^2) + Kagir duvar (8 m^2)	Pen. 5.2 Duv. 0.581	15.048
2	Pencere (2 m^2) + Işık geçiren beton (8 m^2)	Pen. 5.2 Bet. 1.491	22.328
3	Tüm pencere (10 m^2)	Pen. 5.2	52

Ayrıca yine aynı cephe kaplama yöntemleri için aralık ayında, kuzey yönünde, Konya ilinde gerçekleşen, eşitlik 4 ve eşitlik 5 'den hesaplanan güneş enerjisi kazanımları Çizelge 4'de verilmiştir.

$$\Phi_{s,ay} = \sum r_{i,ay} \times g_{i,ay} \times I_{i,ay} \times A_i \qquad (4)\ (\text{TS } 825)$$

$r_{i,ay}$: "i" yönünde saydam yüzeylerin aylık ortalama gölgelenme faktörü (Ayrık binaların bulunduğu yerlerde 0.8)
$g_{i,ay}$: "i" yönündeki saydam elemanların güneş enerjisi geçirme faktörü,
$I_{i,ay}$: "i" yönünde dik yüzeylere gelen aylık ortalama güneş ışınımı şiddeti, (kuzey cephe için 22 W/m^2)
A_i : "i" yönündeki toplam pencere alanı (m2)

$$g_{i,ay} = F_w.g_{\perp} \qquad (\text{Işık enerjisi geçirme faktörü}) \qquad (5)\ (\text{TS } 825)$$

Fw : Camlar için düzeltme faktörüdür.(Fw = 0,8) alınır.
$g\perp$: Laboratuvar şartlarında ölçülen ve yüzeye dik gelen ışın için güneş enerjisi geçirme faktörüdür (yalıtım camları için 0.75).

Eşitlik 5 'de belirtilen ışık enerjisi geçirme faktörü, ışık geçiren beton için, ışık geçirebilme kapasitesi deneylerinden bulunan değerlerin ortalaması alınarak bulunmuştur.

Çizelge 4 Cephe kaplama yöntemlerine göre güneş enerjisi ısı kazançları.

Sıra No	Cephe Kaplama Yöntemi	Toplam ışık geçiren yüzey (m^2)	Güneş enerjisi ısı kazançları (W)
1	Pencere (2 m^2) + Kagir duvar (8 m^2)	2	22.12
2	Pencere (2 m^2) + Işık geçiren beton (8 m^2)	2.16	23.24
3	Tüm pencere (10 m^2)	10	105.6

Değerlendirme ve Sonuçlar

Yapılan çalışmada bünyesinde yüzey alanının %2'si kadar plastik optik fiber içeren betonun 10, 30 ve 50 watt'lık farklı ışık kaynaklarına tabi tutulması sonucunda bünyesinden ışık geçirebilme kabiliyetlerinin %0.69 - %0.80 arasında değiştiği

görülmüştür. Bu oranın ışık kaynağının cinsinden ziyade ışık geçiren betonun bünyesindeki plastik optik fiber oranına göre değişkenlik gösterdiği deney sonuçlarının birbirine çok yakın olmasından anlaşılmaktadır. Ayrıca çalışmada 10 m^2'lik dış ortama açık bir bina cephesi baz alınarak bu cephenin, ayrı ayrı, yalıtılmış kagir duvar + yalıtımlı pencere, ışık geçiren beton + yalıtımlı pencere ve sadece yalıtılmış cam + pencere'den yapılmış olduğu varsayılarak bu farklı yapı malzemelerinin her biri için ısı kayıpları ve ısı kazançları hesaplanmış, buna göre en fazla ısı kaybı tamamen yalıtılmış cam + pencere olan sistemde 52 W /K, en az ısı kaybı olan cephenin ise yalıtılmış kagir duvar + pencere olan sistemde 15.048 W /K olarak hesaplanmıştır. Yine bu sistemler için güneşten kaynaklanan ısı kazançları, cephenin kuzey yönlü, Konya ilinde, aralık ayındaki ortalama güneş enerjisi varsayılarak, en fazla tamamen yalıtılmış cam + pencere olan sistem için 105.6 W, en az kagir duvar + pencere sistem için 22.12 W olarak hesaplanmıştır. Işık geçiren beton için ise aynı varsayımlarla, 22.328 W/K ısı kaybı, 23.24 W güneş enerjisinden kaynaklanan ısı kazancı olabileceği hesaplanmıştır. Bu sonuçlardan da görüldüğü üzere, hem ısı hemde ışık kazancı olan ışık geçiren betonun iyi bir performans sergilediği, bünyesindeki optik fiber oranlarının ve çaplarının artırılmasıyla daha iyi bir performans sergileyebileceği beklenmektedir. Ayrıca bu çalışmada üretilen bünyesine bir miktar fosforesan malzeme eklenmiş ışık geçiren beton, gündüzleri depoladığı ışık enerjisini geceleri ortama yayabilmekte, bu da hem iç ortamlarda geceleri aydınlatma enerjisi ihtiyacını bir miktar düşürebilmekte hem de ortamlara estetik bir görünüm kazandırmaktadır. Enerjinin çok değerli olduğu günümüzde bu tarz yenilikçi yapı malzemelerinin yaygınlaşmasının hem dünyamız açısından hem de sektördeki paydaşlar açısından olumlu olacağı düşünülmektedir.

Kaynaklar

Abou-Zeid, M. N., Fahmy, E. H., & Alia, D. A. . (2007). Properties of translucent concrete. Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering 2007.

Heights, A. (2011). CO2 based Ventilation Control Transparent Concrete Made of Optical Fibers. *ASHRAE* , 8.

IEA. (2012). WORLD ENERGY OUTLOOK.

Kumar, U., & Jain, V. K. (2010). Time series models (Grey-Markov, Grey Model with rolling mechanism and singular spectrum analysis) to forecast energy consumption in India. *Energy*, *35*(4), 1709–1716. doi:10.1016/j.energy.2009.12.021

Mainini, A. G., Poli, T., Zinzi, M., & Cangiano, S. (2012). Spectral Light Transmission Measure and Radiance Model Validation of an

innovative Transparent Concrete Panel for Façades. *Energy Procedia*, *30*, 1184–1194. doi:10.1016/j.egypro.2012.11.131

Ostroverkhova, O., Shirota, Y., & Kageyama, H. (2013). *Handbook of Organic Materials for Optical and (Opto)electronic Devices*. *Handbook of Organic Materials for Optical and (Opto)electronic Devices* (pp. 3–82). Elsevier. doi:10.1533/9780857098764.1.3

TSE. (2009). TS 825 - Binalarda Isı Yalıtım Kuralları.

Yilmaz, H., & Yilmaz, M. (2013). Forecasting CO2 Emissions For Turkey By Using the Grey Prediction Method. *Journal of Engineering and Natural Sciences (Sigma)*, *31*(444), 141–148.

Zhou, Z., Ou, G., Hang, Y., Chen, G., & Ou, J. (2009). <title>Research and development of plastic optical fiber based smart transparent concrete</title>, *7293*, 72930F–72930F–6. doi:10.1117/12.816638

Beton Çökme Değerinin Kontrol Edilebilen Değişkenler Dikkate Alınarak İstatistiksel Değerlendirmesi

M. Timur CİHAN, Abdurrahman GÜNER, Nabi YÜZER
Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Silahtarağa Mah. Üniversite 1. Sokak No 13, 59860, Çorlu/Tekirdağ
Tel: (0282) 250 2368
E-Posta: mehmetcihan@nku.edu.tr
İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34320, Avcılar/İstanbul
Tel: (0212) 473 7070 / 17937
E-Posta: aguner@istanbul.edu.tr
Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Davutpaşa/İstanbul
Tel: (0212) 383 5240
E-Posta: nyuzer@yildiz.edu.tr

Öz

Uygulamada betonun işlenebilme ölçüsü olarak çökme, dayanım ölçüsü olarak da standard basınç dayanımı en sık kullanılan özeliklerdir. Sınırlı kaynakların belirli amaçları, istenen özelikleri gerçekleştirmek amacıyla verimli kullanımı o amaçla ilgili işlemlerin sürdürülebilirliği için vazgeçilmez şarttır. Hazır beton üretiminde istenen özelikleri sağlayabilmek için, işlenebilirliğe etki eden değişkenlerin belirli düzeylerde olması da önemlidir. Beton özeliklerini etkileyen değişkenlerin ve kontrol edilemeyen değişken sayısının fazla ve etkileşimli olması nedeniyle hedeflenen özeliklere sahip betonun daha düşük maliyet ve yüksek verimlilikle üretilebilmesi için tepki değişkenlerinin ve etki değişkenlerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Günümüzde bu amaçla çeşitli istatistiksel değerlendirme yöntemleri geliştirilmektedir. Taguchi tekniği ve Tepki Yüzeyi Yöntembilgisi (Response Surface Methodology) bu kapsamda sayılabilir.

Bu çalışmada betonda işlenebilmenin bir ölçüsü olan "çökme"yi etkileyen kontrol edilebilen değişkenlerin düzensizlik grafikleri ve istatistik değerleri D-Enuygun tasarımı kullanılarak belirlendi. Kontrol edilebilen değişkenler farklı iki en büyük dane büyüklüğü (11.2 ve 22.4 mm) için su/çimento oranı, bağlayıcı dozajı, bağlayıcı standard dayanımı, karışım agrega incelik modülü, ince agrega ($P_{a \leq 4.00\ mm}$), kimyasal katkı maddesi mikdarları ve agrega türü olarak seçildi. Öncelikle belirlenen kontrol edilebilen değişkenlerin etki düzeyleri 2^{7-3} kısmî etkensel tasarım kullanılarak elde edildi ve anlamlılık düzeyi düşük olan etki değişkenleri elenerek gerçek tepki modellerinin elde edilmesi için D-Enuygun tasarım gerçekleştirilerek istatistiksel sonuçlar ve düzensizlik grafikleri oluşturuldu. Elde edilen sonuçlar, kontrol edilemeyen etki değişkeninin oldukça fazla olduğu çökme tepki değişkeni dikkate alındığında kontrol edilebilen etki değişkenlerinin değişim aralığının ve türünün (sayısal veya türsel) elde edilen modelin fiziksel olarak anlamlılığının ve arzuedilen beton basınç dayanımının elde edilebilmesi için bütünsel bir değerlendirme yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Beton, Çökme değeri, Kontrol edilebilen değişkenler, D-Enuygun tasarım

Giriş

Beton üretiminde sürdürülebilirlik için çoklu eniyileme uygulamasında betonun işlenebilme ölçüsü olarak çökme, dayanım ölçüsü olarak standard basınç dayanımı ve dayanıklılık özelikleri ile ilgili başka birçok tanımlamalar da gerekebilmektedir (pompalanabilirlik, eğilme dayanımı, ıslanma-kuruma da yanıklılığı vb.) (Day, 1991; Neville, 1995; Newman and Choo, 2003). Hazır beton üretiminde en düşük bütüncül toplam maliyetle istenen beton özeliklerini sağlayabilmek için, öncelikle dayanım, dayanıklılık veya geçirimlilik ve işlenebilirliğe etki eden değişkenlerin belirli bir düzeyde olması istenir. Beton üretiminde bu değişkenlerin ve etki düzeylerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada değişkenler betonu oluşturan bağlayıcı madde (TS EN 197-1), agrega (TS 706 EN 12620), su (TS EN 1008) ve katkı özeliklerinin yanı sıra su/bağlayıcı oranı, bağlayıcı dozajı, en büyük dane büyüklüğü ve ince agrega mikdarı (TS 206-1) olarak düşünüldü (Türk Standardları Enstitüsü, 2002a, 2002b, 2003a, 2003b).

Hazır beton uygulamasında beton özeliklerini etkileyen bazı etki değişkenlerinin kontrol edilebilirliğinin imkânsız olması, eşzamanlı veya sürekli olamaması sebebiyle istatistiksel değerlendirme için ihtiyaç duyulan aynı özeliklere sahip farklı sınama noktalarında eşzamanlı deney sonuçları elde edilmesi mümkün olmamaktadır. Bu nedenle uygulamada kullanılan $D_{\text{en büyük}} = 11.2$ mm ve $D_{\text{en büyük}} = 22.4$ mm ayrı ayrı dikkate alındı (Türk Standardları Enstitüsü, 2009). Kontrol edilebilen değişkenler 7 adet belirlenerek Çizelge 1'de verildi (Cihan ve Güner, 2011; Cihan, 2012; Cihan ve diğ., 2013).

Çizelge 1 Kontrol edilebilen etki değişkenleri ve değişim aralıkları.

Sıra no	Etken	Adı	Birim	Değişim türü	Değişim aralıkları	
					$D_{\text{en büyük}} = 11.2$ mm	$D_{\text{en büyük}} = 22.4$ mm
1	A	Su/Çimento (S/Ç)	kütlece %	Sayısal	55-60	50-55
2	B	Dozaj	kg/m^3	Sayısal	330-345	330-345
3	C	Çimento standard dayanımı (f_{cc})	MPa	Sayısal	34.4-55.1	34.4-55.1
4	D	Karışım agrega incelik modülü (k_k)	-	Sayısal	-	6.6-6.8
5	E	İnce agrega (İA) ($P_{a \le 4.00\ mm}$)	hacimce %	Sayısal	65-68	-
6	F	Kimyasal katkı maddesi (KM)	kütlece %	Sayısal	1.2-1.4	1.2-1.4
7	G	Agrega Türü (AT)	Tür	Kategorik	Kalker -Bazalt	Kalker -Bazalt

Betonun alışılagelmiş özelikleri (çökme ve basınç dayanımı) üzerinde kontrol edilebilen değişkenlerin etki düzeylerinin istatistiksel olarak belirlenmesi amacıyla "Tepki Yüzeyi Yöntembilgisi (TYY) (Box and Draper, 2007; Carley ve diğ., 2004; Montgomery, 2011; Myers and Montgomery, 2002; Stat-Ease, 2009)"nin kullanılabilirliğinin geliştirilebilmesi amacıyla kontrol edilebilen değişkenlerin işlevsel bölgeleri doğru (göçme şeklinde olmayan) çökme değeri için belirlendi (Cihan ve Güner, 2011; Cihan, 2012). Bu amaçla pompalanabilir bir beton için gerekli doğru (göçme şeklinde olmayan) çökme değeri (uygulamada Çökme = 100 mm – 210 mm (TS EN 206-1, S3, S4) dikkate alınarak kontrol edilebilen değişkenlerin işlevsel bölgeye düşecek değişim aralıkları öncelikle en az deneme sayısı oluşturacak 2^{7-3} kısmî etkensel tasarım kullanılarak, daha sonra buradan elde edilen sonuçlar dikkate alınıp 2^{6-2} ve 2^{6-1} kısmî etkensel tasarımlar kullanılarak belirlendi (Cihan ve Güner, 2011; Cihan, 2012). Belirlenen değişim aralıkları dikkate alınarak kontrol edilebilen 7 etki değişkeni üzerinde etken eleme tasarımı 2^{7-3} kısmî etkensel tasarım gerçekleştirildi. Buradan elde edilen sonuçlar dikkate alınarak kısmî etkensel tasarım yükseltgenerek D-Enuygun tasarım için gerekli sınama noktaları belirlendi. D-Enuygun tasarımda dikkate alınan kontrol edilebilen en etki değişkenleri ve değişim aralıkları Çizelge 1'de verildi.

Deneysel Çalışma

Dikkate alınan kontrol edilebilen değişkenlerin D-Enuygun tasarımlardan elde edilen sınama noktalarına ait özelikleri sağlayabilmek için kullanılan malzemeler ve üretim için gerekli özelikleri Çizelge 2'de verildi. Agrega incelik modülleri 13 elekli (0.063 - 0.125 - 0.250 - 0.500 - 1.00 - 2.00 - 4.00 - 5.60 - 8.00 - 11.2 - 16.0 - 22.4 - 31.5 mm) bir takımda belirlendi.

Çizelge 2 Kullanılan malzemeler ve özelikleri.

Özelikler			İncelik modülü, k	Dane yoğunluğu, ρ	Su emme, μ	Standard basınç dayanımı, f_c	Blaine özgül yüzey, σ
			-	kg/m^3	kg/kg	MPa	m^2/kg
Agrega	Bazalt	Mıcır II	10.456	2872	0.010	-	-
		Mıcır I	9.129	2878	0.013	-	-
		Kırma taş tozu	5.198	2845	0.022	-	-
	Kalker	Mıcır II	10.181	2600	0.012	-	-
		Mıcır I	7.107	2590	0.017	-	
		Kırma taş tozu	4.791	2550	0.026	-	-
	Kum		3.770	2600	0.014	-	-
Bağlayıcı madde	Çimento	ÇEMV/A(S-P)32.5N	-	2990	0.000	34.4	416.
		SDÇ 32.5 R	-	3160	0.000	44.75	339.
		CEM I 42.5 R	-	3140	0.000	55.1	379.
Kimyasal katkı maddesi	Süper akışkanlaştırıcı	-	-	1100	0.000	-	-

Sınama noktalarına ait Çökme değerleri "TS EN 12350-2 (Türk Standardları Enstitüsü, 2010)" standardına uygun olarak ölçüldü. D-Enuygun tasarım Design Expert (Stat-Ease, 2009) bilgisayar programı ile gerçekleştirildi. Toplam 114 laboratuar denemesi ($D_{en\ büyük}$ = 11.2 mm için 58 ve $D_{en\ büyük}$ = 22.4 mm için 56) gerçekleştirildi. Düzensizlik grafikleri ve istatistik sel değerler D-Enuygun tasarıma ait deneme noktaları kullanılarak (A, B, C, D, E, F, AB, AC, AD, AE, AF, BC, BD, A^2, B^2, D^2, E^2, ABC ve A^{2}C terimleri dikkate alınarak, etki düzeyi 0.10 anlamlılık düzeyini sağlayan terimlerden elde edilen), farklı terimlerin (eşdeş oluşturmayacak, sadece doğrudan tepki değişkenlerini etkileyeceği bilinen terimlerin vb.) ve farklı etki değişkenlerinin kullanılması ile oluşturulan farklı tepki fonksiyonlarından elde edildi. Farklı tepki fonksiyonlarının oluşturulmasında dikkate alınan terimler ve bu tasarımlara ait kodlamalar Çizelge 3'te verildi.

Çizelge 3 Farklı tepki fonksiyonlarına ait tasarım kodlamaları.

$D_{en\ büyük}$	Dikkate alınan terimler	Tasarım kodları
11.2 22.4	A, B, C, D, E, F, AB, AC, AD, AE, AF, BC, BD, A^2, B^2, D^2, E^2, ABC, A^{2}C	Tasarım 1
11.2 22.4	A, B, C, D, E, F, AC, BE, A^2, B^2, D^2, E^2	Tasarım 2
11.2	A, B, C, D, E, F, AB, AC, AD, AE, AF, BC, BD, BE, BF, CD, CE, CF, DE, DF, EF, A^2, B^2, C^2, ABC, ABE, ACE, ACF	Tasarım 3
22.4	A, B, C, D, E, F, AB, AC, AD, AE, AF, BC, BD, BE, BF, CD, CE, CF, DE, DF, EF, A^2, B^2, ABC, ABD, ABE	
11.2 22.4	A, B, C, D, E, F, AB, AC, AD, AE, AF, BC, BD, A^2, B^2, D^2, E^2, ABC, A^{2}C	Tasarım 4*
*Farklı etki değişkeni kullanımı, A = ç/(ç+s+h).		

Deneysel Çalışmaların Sonuçları ve İrdelenmesi

D-Enuygun tasarım deneme noktalarından elde edilen çökme tepki değişkenine ait sonuçlar kullanılıp 4 farklı tasarım için varyans çözümlemesi gerçekleştirilerek gerçek tepki fonksiyonları ve istatistiksel sonuçlar elde edildi ve düzensizlik çizgeleri oluşturuldu. Referans noktasına göre değişimleri gösteren düzensizlik çizgeleri, özellikle kendi dışında tüm etki değişkenleri sabit (merkez nokta değeri) tutulduğunda seçilen değişim aralığında, etki değişkenlerinin tepki değişkenlerinde oluşturduğu değişimi göstermektedir.

D-Enuygun tasarım sonucu elde edilen deneme noktalarındaki çökme tepki değişkenlerine ait Tasarım 1, 2, 3 ve 4 istatistik sel sonuçları $D_{en\ büyük}$ = 11.2 mm ve 22.4 mm için Çizelge 4'te görülmektedir.

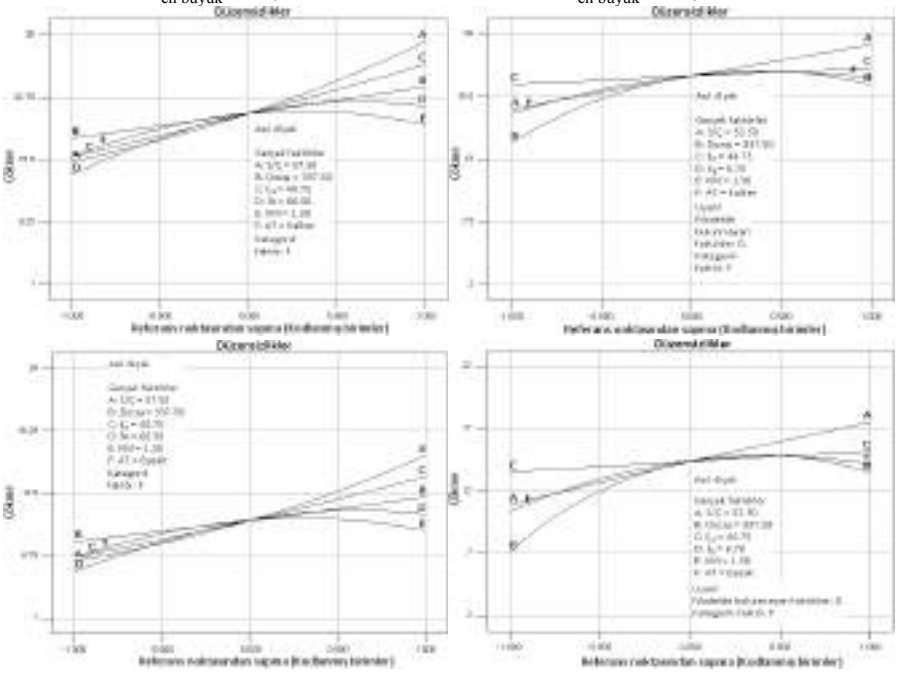
Çizelge 4 Tasarımlara ait istatistik sonuçlar.

$D_{en\ büyük}$, mm	İstatistiksel Büyüklükler	Değerler			
		Tasarım1	Tasarım 2	Tasarım 3	Tasarım 4
11.2	Artıkların Standard sapması, cm	0.3628	0.4411	0.3366	3.396
	Ortalama, cm	3.3492	3.3492	3.3492	12.8426
	Değişim katsayısı, %	10.8333	13.1708	10.0512	26.4435
	Tahmini artık kareler toplamı. cm^2	12.8132	13.7236	8.71	807.9988
	R^2	0.9173	0.8569	0.9305	0.8154
	Ayarlanmış R^2	0.8891	0.8360	0.9045	0.7758
	Tahmini R^2	0.8037	0.7897	0.8665	0.692
	Uygun kesinlik	19.0952	18.9457	19.0838	14.6893
22.4	Artıkların Standard sapması, cm	8.2556	8.2556	1.4946	15.3704
	Ortalama, cm	46.2495	46.2495	13.325	65.4198
	Değişim katsayısı, %	17.8502	17.8502	11.2166	23.495
	Tahmini artık kareler toplamı. cm^2	4682.1167	4682.1167	Tanımsız	16116.9633
	R^2	0.9291	0.9291	0.9713	0.8794
	Ayarlanmış R^2	0.9183	0.9183	0.9475	0.8552
	Tahmini R^2	0.8941	0.8941	Tanımsız	0.7942
	Uygun kesinlik	24.7253	24.7253	18.0368	18.1559
Açıklama: İstatistiksel değerler uygulanan tepki dönüştürücülerine göre belirlendi.					

Tasarım 1 çökme tepki değişkenlerine ait düzensizlik grafikleri kalker ve bazalt agrega türleri dikkate alınarak $D_{en\ büyük}$ = 11.2 mm 22.4 mm için Şekil 6'da verildi.

Tasarım 1 $D_{en\ büyük}$ = 11.2 mm (Şekil 6) için kalker agregası kullanıldığında, S/Ç oranı ve f_{cc}'deki değişimin çökme değerlerinde oluşturduğu değişimin, deneme noktalarındaki çökme değerlerinde elde edilen sınır değerlere (1 cm - 23 cm) yakın olduğu (~28 cm, ~ 25 cm), diğer etki değişkenlerindeki (Dozaj, İA, KM) değişimlerin çökme değerinde oluşturdukları değişimin elde edilen sınır değerleri sağladığı görülmektedir. Bazalt agregası kullanıldığında ise tüm etki değişkenlerindeki değişimler deneme noktalarında elde edilen çökme değeri sınır değerlerini sağlamaktadır.

$D_{en\ büyük}$ = 11.2 mm $D_{en\ büyük}$ = 22.4 mm

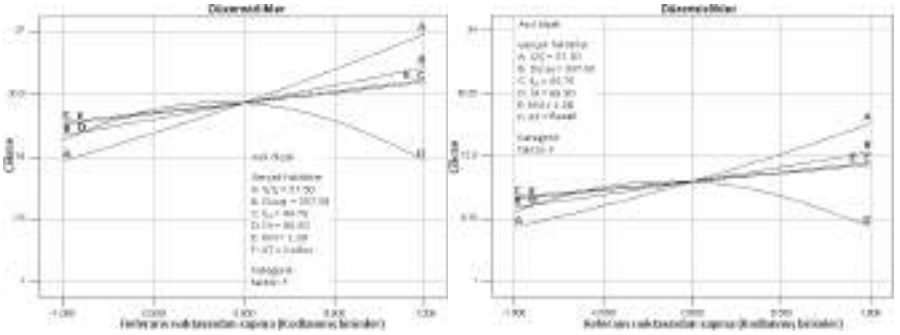


Şekil 6 Tasarım 1 düzensizlik çizgeleri.

Tasarım 1 $D_{en\ büyük}$ = 22.4 mm (Şekil 6) için her iki agrega türü kullanıldığında, tüm etki değişkenlerindeki değişimin çökme değerlerinde oluşturduğu değişim, sınama noktalarında elde edilen çökme sınır değerlerini (3 cm - 22 cm) sağlamaktadır (~7 cm, ~ 23 cm).

D-Enuygun Tasarım 2 istatistik sel sonuçları, $D_{en\ büyük}$ = 22.4 mm için, tepki değişkenleri üzerinde aynı terimler etkin ol duğundan, Tasarım 1 sonuçlarıyla aynıdır.

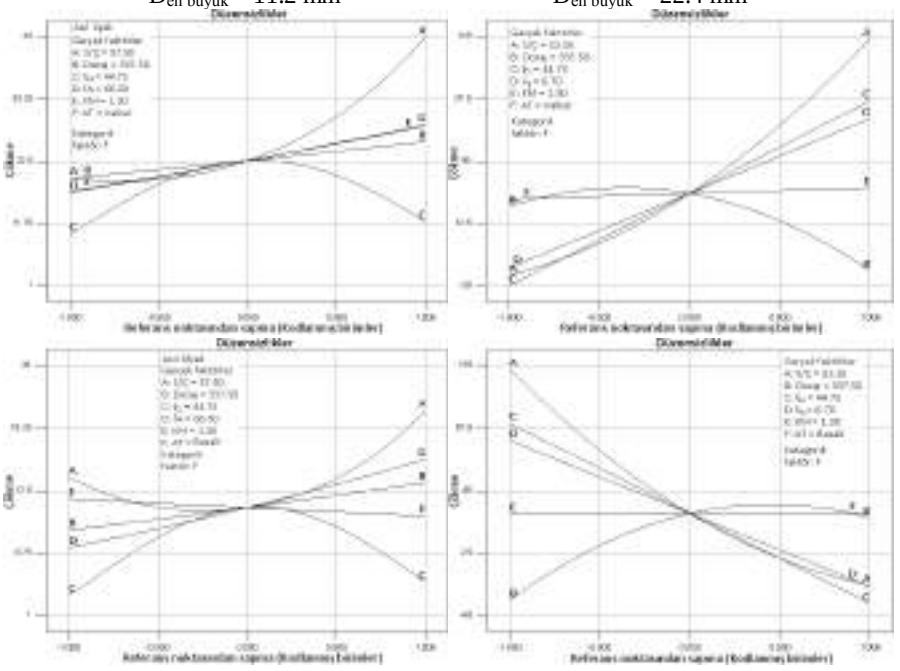
Tasarım 2 çökme tepki değişkenlerine ait düzensizlik çizgeleri kalker ve bazalt agrega türleri dikkate alınarak $D_{en\ büyük}$ = 11.2 mm için Şekil 7'de verildi. Tasarım 2 $D_{en\ büyük}$ = 11.2 mm (Şekil 7) için kalker agregalı betonlarda, S/Ç oranındaki değişimin çökme değerlerinde oluşturduğu değişim, sınama noktalarındaki çökme değerlerinde elde edilen sınır değerlere (1 cm - 23 cm) yakın olmakta (~14 cm, ~27 cm), diğer etki değişkenlerindeki (f_{cc}, Dozaj, İA, KM) değişimlerin çökme değerinde oluşturdukları değişim elde edilen sınır değerleri (1 cm - 23 cm) sağlamaktadır (~14 cm, ~23 cm). Bazalt agregalı betonlarda ise tüm etki değişkenlerindeki değişim deneme noktalarında elde edilen çökme değeri sınır değerlerini (1 cm - 23 cm) sağlamaktadır (~6 cm, ~15 cm).



Şekil 7 Tasarım 2 düzensizlik çizgeleri ($D_{en\ büyük}$ = 11.2 mm).

D-Enuygun Tasarım 3 istatistik sel sonuçları, $D_{en\ büyük}$ = 11.2 mm ve $D_{en\ büyük}$ = 22.4 mm için Çizelge 4'de görülmektedir. Tasarım 3 çökme tepki değişkenlerine ait düzensizlik çizgeleri kalker ve bazalt agrega türleri dikkate alınarak $D_{en\ büyük}$ = 11.2 mm ve 22.4 mm için Şekil 8'de verildi.

$D_{en\ büyük}$ = 11.2 mm $D_{en\ büyük}$ = 22.4 mm



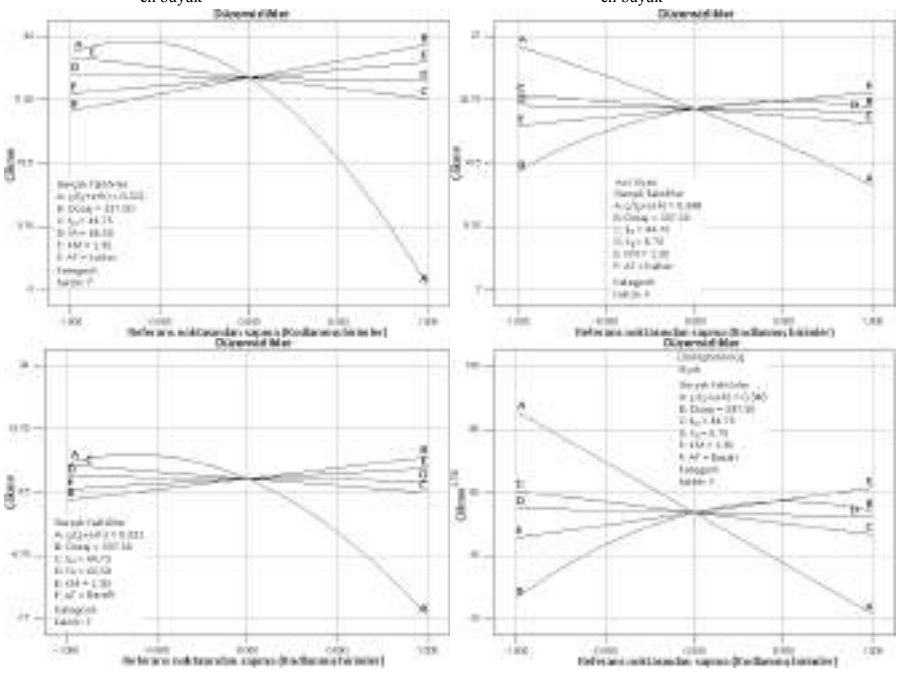
Şekil 8 Tasarım 3 düzensizlik çizgeleri.

Tasarım 3 $D_{en\ büyük}$ = 11.2 mm (Şekil 8) için kalker agregalı betonlarda, S/Ç oranındaki değişimin çökme değerlerinde oluşturduğu değişim, sınama noktalarındaki çökme değerlerinde elde edi len sınır değerleri (1 cm - 23 cm) yaklaşık 21 cm aşmakta (~10 cm, ~44 cm), f_{cc}, Dozaj, İA ve KM'deki değişimin çökme değerlerinde oluşturduğu değişim

ise sınama noktalarındaki çökme değerlerinde elde edilen sınır değerlere (1 cm - 23 cm) yakın (~12 cm, ~26 cm) olmaktadır. Sadece f_{cc} etki değişkenindeki değişimlerin çökme değerinde oluşturduğu değişim deneysel sınır değerleri sağlamaktadır. Bazalt agregalı betonlarda ise tüm etki değişkenlerindeki değişim deneme noktalarında elde edilen çökme değeri sınır değerlerini sağlamaktadır. Tasarım 3 $D_{en\ büyük}$ = 22.4 mm için her iki agrega türü kullanıldığında, tüm etki değişkenlerindeki değişimin çökme değerlerinde oluşturduğu tahmini değişim, laboratuar sınama noktalarındaki çökme değerlerinde elde edilen sınır değerleri (3 cm - 22 cm) fiziksel olarak anlamsız düzeyde fazlaca aşmaktadır (~-35 cm - ~140 cm).

D-Enuygun Tasarım 4 istatistiksel sonuçları, $D_{en\ büyük}$ = 11.2 mm ve $D_{en\ büyük}$ = 22.4 mm için Çizelge 4'te görülmektedir. Tasarım 4 çökme tepki değişkenlerine ait düzensizlik çizgeleri kalker ve bazalt agrega türleri dikkate alınarak $D_{en\ büyük}$ = 11.2 mm ve 22.4 mm için Şekil 9'da görülmektedir.

$D_{en\ büyük}$ = 11.2 mm $D_{en\ büyük}$ = 22.4 mm



Şekil 9 Tasarım 4 düzensizlik çizgeleri.

Tasarım 4 $D_{en\ büyük}$ = 11.2 mm (Şekil 9) için kalker/bazalt agregası kullanıldığında, ç/(ç+s+h) oranındaki değişimin çökme değerlerinde oluşturduğu değişimin, sınama noktalarındaki çökme değerlerinde elde edilen sınır değerleri (1 cm - 23 cm) sağlamadığı (~-3 cm, ~-17 cm), diğer etki değişkenlerindeki (Dozaj, f_{cc}, İA, KM) değişimlerin çökme değerinde oluşturdukları değişimin ise elde edilen sınır değerleri sağladığı görülmektedir.

Tasarım 4 $D_{en\ büyük}$ = 22.4 mm (Şekil 9) için kalker agregası kullanıldığında, tüm etki değişkenlerindeki değişimlerin çökme değerlerinde oluşturduğu değişimin sınama noktalarındaki çökme değerlerinde elde edilen sınır değerleri (3 cm - 22 cm) sağladığı görülmektedir. Bazalt agregası kullanıldığında ise elde edilen çökme tepki değişkenine ait model ile anlamlı çökme değerleri elde edilemediği için düzensizlik grafiği dönüştürülmüş değerlere göre verildi. Bu nedenle özellikle ç/(ç+s+h) oranındaki değişimin çökme değerlerinde oluşturduğu değişimin, sınama noktalarındaki çökme değerlerinde elde edilen sınır değerleri (1 cm - 23 cm) sağlamadığı (~-10 cm, bütünüyle anlamsız) görülmektedir.

Sonuç ve Öneriler

Belirlenen etki değişkeni değişim aralıklarında oluşturulan tasarımlardan elde edilen çökme değerlerine ait istatistiksel sonuçlar incelendiğinde;

- Çökme için oluşturulan modellerde; $D_{en\ büyük}$ = 11.2 mm / $D_{en\ büyük}$ = 22.4 mm için R^2, ayarlı R^2 ve tahmini R^2'nin en düşük değerleri Tasarım 4'de (sırasıyla, 0.8154/0.8794, 0.7758/0.8552 ve 0.6920/0.7942), en yüksek değerleri Tasarım 3'te (sırasıyla, 0.9305/0.9713, 0.9045/0.9475 ve 0.8665/Tanımsız) elde edildi. Ayarlı R^2 değeri, elde edilen modelin hem yeterli hem de modele eklenen terimlerin tepki değişkeni üzerinde anlamlı düzeyde etkilere sahip olduğunu gösterir. Bu nedenle ayarlı R^2 dikkate alındığında, her iki en büyük agrega dane büyüklüğünde çökme için en uygun modelin Tasarım 3 ile oluşturulan model olduğu söylenebilir. Her iki en büyük agrega dane büyüklüğünde çökme tepki değişkeni için tüm tasarımlarda ayarlı R^2 ve tahmin i R^2 değerlerinin makul düzeyde uyuştuğu görülmektedir (ayarlı R^2 - tahmini R^2 $\leq$ 0.20 (Stat-Ease, 2009)). Bu durum model lerden elde edilen yeni verilerdeki değişkenlik (tahmin hatâsı) mikdarının uygun (kabul edilebilir) olduğunu göstermektedir.
- Uygun kesin lik (UK) değerinin her iki en büyük agrega dane büyüklüğünde çökme tepki değişkeni için tüm tasarımlarda arzu edilen 4 değerinin üzerinde olması modelin uygun (yeterli) işaret (signal) oluşturduğunu göstermektedir.

Tasarımlara ait düzensizlik grafikleri incelendiğinde;

- Kalker agregası kullanılarak elde edilen çökme değerlerinin $D_{en\ büyük}$ = 11.2 mm ve $D_{en\ büyük}$ = 22.4 mm için tüm tasarımlarda bazalt agregası kullanıldığında elde edilen çökme değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir.
- $D_{en\ büyük}$ = 22.4 mm için kalker ve bazalt agregasının kontrol edilemeyen biçim özeliklerinin, kontrol edilebilen etki değişkenlerinin belirlenen değişim aralıklarında çökme değeri üzerindeki oluşturduğu değişimin $D_{en\ büyük}$ = 11.2 mm'ye göre yüksek olduğu görülmektedir.
- Tasarım 3 $D_{en\ büyük}$ = 11.2 mm kalker agregası için S/Ç oranının çökme değerinde oluşturduğu yüksek değişimin belirlenen değişim aralıklarında (%55-60) gerçekte bu düzeyde anlamlı (20 cm - 44 cm) etkiye sahip olamayacağı aşikârdır. Bu nedenle oluşturulan modelin varyans çözümlemesinde "anlamlı" (p(Model) < 0.0001) çıkmasının ve R^2 değerlerinin (0.9305) diğer tasarımlara göre yüksek olmasının tek başına modellerin gerçek fiziksel durumu temsil ettiğini söylemek için yeterli olmadığını göstermektedir.

- Tasarım 3 $D_{en\ büyük} = 22.4$ mm için S/Ç oranındaki artış bazalt agrega kullanıldığında çökme etki değişkenini azaltıcı etki oluşturmaktadır. Bu beklenen bir durum değildir. Fakat yüksek $D_{en\ büyük}$ değerinde hamur hacminin az olması ve S/Ç oranının artması ile karışım suyundaki artış ile belirlenen (veya seçilen) değişim aralıklarında bazalt agregasının dane şekli ve biçiminin etkisi ile özellikle iri agrega danelerinin birbirleri ile kenetlenerek çökmeyi azaltabileceği söylenebilir.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde;

- Modelin anlamlılığı ($p(Model) < 0.0001$) ve R^2 değerinin yüksek olması fiziksel olarak modelin anlamlı olduğunu belirtmek için yeterli değildir. Her bir sınama noktasına ait tanılamalar durum istatistiklerinin (dengeleme, Cook's mesafesi vb.) değerlendirilip tepki yüzeyleri oluşturularak tepki değişkenlerinin işlevsel bölge içerisinde kalıp kalmadığının da göz önüne alınması gerekir.
- Kontrol edilebil en değişkenlerin değişim aralıklarının türsel (kategorik) etkenler (agreganın kalker ve bazalt olması) için ayrı ayrı belirlenmesi, kontrol edilebil en etki değişkenlerinin etki düzeylerinin anlamlı olarak belirlenebilmesi bakımından uygun olmaktadır. Agrega kayaç kökeni, dane biçim ve yüzey özelikleri gibi türsel özelikler sayısallaştırılabilir ve kontrol edilebilen duruma getirilebilirlerse birlikte değerlendirilebilirler.
- En büyük agrega dane büyüklüğü arttıkça agrega biçim özeliklerinin tasarımlarda dikkate alınması istenilen çökme değerinin elde edilmesi açısından önem kazanmaktadır.
- "Çimento standard dayanımı"nın çökme tepki değişkeni üzerinde anlamlı etkisi olması beklenen bir durum değildir. Bu durum çökme tasarımlarında çimento özeliklerinin sadece "çimento standard dayanımı" ile temsil edilmesinin yetersiz olduğunu göstermektedir. Bu nedenle kontrol edilebilen çimento özelikleri ile birlikte farklı çimento türlerinin "türsel etken" olarak dikkate alınması kontrol edilemeyen çimento özeliklerinin etkisini en aza indirecektir.
- Tasarım 1, 2 ve 3 deneme noktaları her bir etki değişkeninin köşe (alt ve üst sınır) ve merkez noktalarında olacak şekilde belirlendi. Su/Çimento etki değişkeni yerine ç/(ç+s+h) alınması ile oluşturulan Tasarım 4 deneme noktaları her bir etki değişkeninin (özellikle türsel (kategorik) etki değişkeninin) köşe ve merkez noktalarına tekabül etmemektedir. Bu nedenle tasarımların karşılaştırılması yapılırken özellikle etki değişkenleri farklı olan tasarımların ayrı düşünülmesi gerekir.
- Kontrol edilebil en ve kontrol edilemeyen etki değişkenlerinin fazla olması, etki değişkenlerinin farklı değişim aralıklarında farklı etki düzeylerine sahip olması arzu edilen çökme ve basınç dayanımının elde edilebilmesi için bütünsel bir değerlendirme yapılmasını gerektirmektedir. Gerçekleştirilecek bütünsel bir değerlendirme beton uygulamalarında en uygun standard sapma aralığında istenen işlenebilme ve dayanımda beton üretimi için en uygun karışım oranlarının tahminine imkân sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 109M748 Nolu Proje kapsamında gerçekleştirildi.

Kaynaklar

Box, G. E. P. and Draper, N. R. (2007) Response Surface s, Mixtures, and Ridge Analyses , Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Carley, K. M. and Kamneva, N. Y. and Reminga, J. (2004) Response Surface Meth odology, CASOS Technical Report , CMU -ISRI -04-136

Cihan, M. T. ve Güner A. (2011) Beton Çökme Değerini Etkileyen Kontrol Edilebilir Değişkenlerin Etki Düzeylerinin Kısmi Faktöriyel Tasarım Kullanılarak Belirlenmesi, 8. Ulusal Beton Kongresi, İzmir, Türkiye.

Cihan, M. T. (2012) Tepki Yüzeyi Yöntembilgisinin Beton Uygulamasında Kullanılabilirliğinin Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Cihan , M. T., Güner, A., Yüzer, N. (2013) Response surfaces for compressive strength of concrete. Construction and Building Materials, Vol. 40, pp. 763 -777.

Day, K. W. (1999) Concrete Mix Design, Quality Control and Specification, Second Edition, Taylor & Francis, London, England.

Montgomery , D. C. (2001) Design and Analysis of Experiments , Fifth Edition, John Wiley & Sons, New York.

Myers, R. H. and Montgomery, D. C. (2002) Response Surface Methodology, Process and Product Optimization Using Designed Experiments, Second Edition, John Wiley & Sons, Canada.

Neville, A. M. (1995) Properties of Concrete, Fourth Edition, Longman Scientific & Technical, Burnt Mill, England.

Newman, J. and Choo, B. S. (2003) Advanced Concrete Technology 3. Processes, First Edition, Elsevier, Oxford, England.

Stat -Ease, Inc. (2009) Design -Expert Software Version 8, Minneapolis.

Türk Standardları Enstitüsü (2002a) TS EN 19 7-1 Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Ankara, Türkiye.

Türk Standardları Enstitüsü (2002b) TS EN 206 -1 Beton - Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, Ankara , Türkiye.

Türk Standardları Enstitüsü (2003a) TS 706 EN 12620 Beton Agregaları, Ankara , Türkiye.

Türk Standardları Enstitüsü (2003b) TS EN 1008 Beton -Karma Suyu - Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olara k Uygunluğunun Tayini Kuralları, Ankara , Türkiye.

Türk Standardları Enstitüsü (2009) TS 802 Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları, Ankara , Türkiye.

Türk Standardları Enstitüsü (2010) TS EN 12350 -2 Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi, Ankara , Türkiye.

FARKLI VİSKOZİTE DEĞERLERİNE SAHİP PÜSKÜRTME BETON KARIŞIMLARININ GERİ SIÇRAMA OPTİMİZASYONUNUN ABAQUS CAE PROGRAMIYLA İNCELENMESİ

Sadık Alper YILDIZEL, Muhammed Ensar YİĞİT, Ali Uğur ÖZTÜRK,

Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Manisa

Gökhan KAPLAN

Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu MYO, Kastamonu

Özet

Bu çalışmada püskürtme beton karışımlarında optimum geri sıçrama değerlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Sayısal modelleme için Abaqus CAE sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. 0,44, 0,41 ve 0,39 Pa. s (American Shotcrete Association tarafından önerilen) plastik viskozite değerlerine sahip olan püskürtme betonlar, kalıp normali ile üç farklı açı (90°, 75° ve 45°) yapacak ve kalıptan üç farklı yükseklikten (50cm, 40cm ve 30 cm) püskürtülecek şekilde programda modellenmiştir. Sonuçlar, aynı değerlere sahip uygulama verileri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre kalıp normali ile 90°'lik açı yapan ve kalıp yüzeyinden 30 cm yükseklikten püskürtülen 0,44 Pa.s plastik viskozite değerine sahip betonun en az sıçramayı yaptığı tespit edilmiştir. Ayrıca, analiz sonuçları püskürtme yüksekliği, püskürtme açısı ve betonun viskozitesi arasında kararlı bir korelasyonun olduğu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Püskürtme Beton, Abacus CAE, püskürtme yüksekliği, püskürtme açısı

Abstract

Optimum splash value for shotcrete mixes is aimed within this study, Abaqus CAE, finite element method based software was used for numerical modelling. Through the agency of the software, Spray Concrete mixes having 0,44, 0,41 and 0,39 Pa s **(American Shotcrete Association tarafından önerilen)** plastic viscosity values were sprayed from three different heights (50cm, 40cm and 30cm) as per the angles 90 °, 75° and 45 ° with mold normal axis. The results are compared with the identical application data. Optimum rebound amount was obtained at the values of 0,44 Pa s, 30cm and 90 ° in line with the results. Furthermore,

analysis results show that there is a strong correlation between the spay height, angle and concrete viscosity values.

1. GİRİŞ

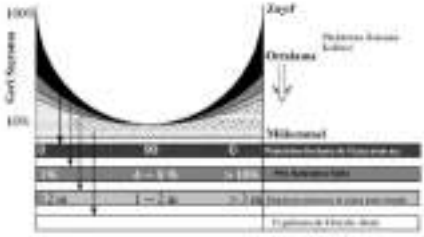
Püskürtme beton tanımı, basınçlı hava ile uygulanması istenilen yüzeye püskürtülen ve yapışan beton ve harçları kapsamına alır. 1920 yılında dinazor iskeletlerini korumak amacıyla üretilmiştir. Daha sonraları şev stabilizasyonu, tünel kazıları ve cam elyaf takviyeli beton cephe panelleri üretimi gibi inşaat mühendisliği disiplini içerisinde birçok uygulama alanında kullanılmış ve kullanılmaktadır[1].

Püskürtme betonlarda, betonun uygulama alanına yerleşmesi püskürtme basıncının sıkıştırma etkisiyle gerçekleşmektedir. Püskürtme işleminde yüksek hız tercih edilirse, döküm yüzeyine betonun yapışması ve bu yüzeyde sıkışması daha kolay olmaktadır. Püskürtme betonlarda çimento muhtevası normal betona oranla daha fazladır. Kum içeriği ise toplam agregaların ağırlıkça % 52 ile % 65' i arasında değişmektedir [2].

Püskürtme betonun uygulaması; bakım koşulları, finansal koşullar (personel, malzeme ve işletme koşulları) ve uygulanma pratikliği unsurlarına bağlı olarak günümüzde yapılmaktadır. Püskürtme beton ürünleri, diğer dökme beton türleriyle karşılaştırıldığında daha dayanaklı ve yangın dayanımı daha yüksektir [3]. Günümüzde, zarar görmüş beton yüzeylerin tamirinden, köprülerin deprem sonrası onarım işleri ve yüzme havuzu yapımına kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır[18].

Yaş ve Kuru döküm olmak üzere iki tip uygulaması vardır [1,4,18]. Yaş sistemin kuru sisteme nazaran en önemli üstünlüğü düşük Su/Çimento oranıyla daha homojen olarak dökülmesine bağlı olarak daha yüksek mekanik özelliklere sahip olmasıdır. Günümüzde püskürtme beton uygulama sahasında karşılaşılan en büyük problemlerden birisi geri sıçrama oranının en düşük seviyeye indirilmesidir [2]. Kuru sistemde geri sıçrama oranı %20-60 oranında değişirken, yaş sistemde geri sıçrama oranı %10-15 oranında değişmektedir [5,6]. Püskürtme betonda iri agrega miktarı püskürtme performansı ve geri sıçrama açısından çok önemlidir. Kullanılacak agreganın kırma taş olması tercih edilmelidir. Ancak kırmataşın sakıncası ekipmanlardaki aşınmayı %25-45 arasında arttırmasıdır [7]. Püskürtme beton karışımında iri tane boyutuna sahip agreganın daha iyi sıkışma gösterdiği bu sayede yoğunluğunun düştüğü, daha az çimento ve su ihtiyacına gereksinim duyulduğu, daha az büzülme gösterdiği ve yüksek yapışma kuvveti gösterdiği görülmüştür ancak büyük taneli agregaların varlığı geri sıçrama oranını oldukça arttırmış ve işlenebilirliği düşürmüştür. Ayrıca çok düşük su/çimento oranları zayıf sıkışma yüzünden geri sıçramayı arttırıken, çok yüksek su / çimento oranları da betonun yüzeye yapışmasını zorlaştıracağı için geri sıçramayı arttıracaktır [8].

Püskürtme hortumu en iyi sıkışma için daima doğru açı ile tutulmalı(90^0), püskürtme hortumu ile uygulanacak yüzey arasındaki mesafe 1 ile 2 metre arasında olmalıdır. Geri sıçrama miktarını etki eden faktörler Şekil 1.1.'de gösterilmiştir [9].



Şekil 1.1. Geri sıçrama miktarını etkileyen faktörler [6,10]

Ayış [11], yapmış olduğu deneysel çalışmada nozulu yüzeye dik olarak ve optimum olarak belirlenen 1.0 -1.1 m mesafede tutmuştur. Geri sıçrama miktarının ve beton basınç dayanımı açısından en iyi sonucun 4.5 barlık hava basıncı olduğunu belirlemiştir.

Geri sıçrama yüzdesine etki eden faktörlerden olan püskürtme başlığının yüzeyle yaptığı açı, püskürtme başlığı ile uygulama alanı arasındaki mesafe ve viskosite değerleri için optimizasyon çalışmaları dünya genelinde devam etmektedir [12].

Çalışma kapsamında, farklı viskosite değerleri (American Shotcrete Association tarafından önerilen), püskürtme yükseklikleri ve püskürtme açısına sahip uygulamalar için Abaqus CAE ile modelleme yapılmış ve sonuçlar aynı değerlere sahip uygulama verileri ile karşılaştırılarak en uygun optimizasyon değerleri araştırılmıştır. Ayrıca literatür taraması sırasında yapılan çalışmaların püskürtme işleminin daha çok aşağıdan yukarıya doğru (tünel uygulamaları) uygulandığı görülmüştür. Bu çalışmada ise püskürtme Şekil 1.2'de görüldüğü gibi yukarıdan aşağıya doğru (Su tutma yapıları) uygulanmış ve model tasarımı bu kritere göre yapılmıştır.

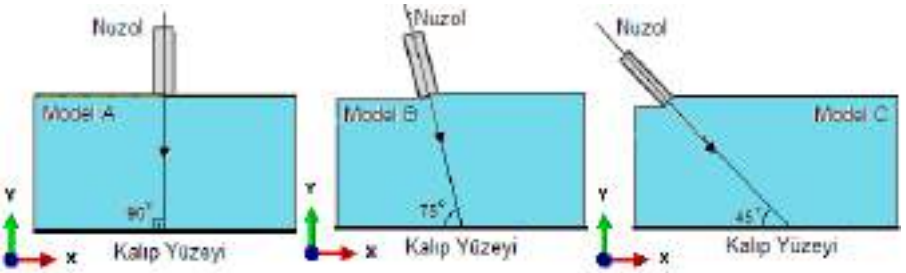


Şekil 1.2. Yatay yüzeylere uygulanan püskürtme beton

2. MODELLEME

2.1. Problemin Tanımı

Bu bölümde püskürtme betonun akışkan gibi davranıp akışa geçmesi durumu incelenmiştir. Akıcı betonun sabit kalıp yüzeyinde oluşturacağı akış hızı ve basınç dağılımının tespiti için bir model ler belirlenmiştir (Şekil 2.1). Püskürtülen beton model leri aşağıda tabloda verilen farklı açı, mesafe ve viskozite değerleri için analizler yapılmıştır (Tablo 2 .1).

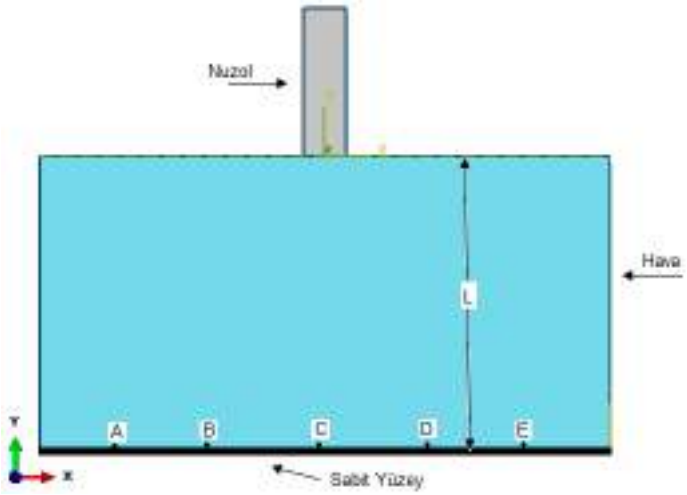


Şekil 2.1. Modeller ve püskürtme ucunun (Nuzol) kalıp yüzeyi ile açıları.

Tablo 2 .1. Sayısal modelleme parametreleri

Model	Püskürtme Beton Viskozite Değerleri (Pa.s)	Kalıp yüzeyi-Nuzol ucu Mesafesi L (cm)	Nuzol Çapı (cm)	Nuzol Çıkış Hızı (cm/sn)	Kalıp yüzeyi ile yaptığı açı (°)
Model A11	0,39	50	6,0	3500	90
Model A1 2	0,41				
Model A13	0,44				
Model A21	0,39	40			
Model A22	0,41				
Model A23	0,44				
Model A31	0,39	30			
Model A32	0,41				
Model A33	0,44				
Model B11	0,39	50	6,0	3500	75
Model B12	0,41				
Model B13	0,44				
Model B21	0,39	40			
Model B22	0,41				
Model B23	0,44				
Model B31	0,39	30			
Model B32	0,41				
Model B33	0,44				
Model C11	0,39	50	6,0	3500	45
Model C12	0,41				
Model C13	0,44				
Model C21	0,39	40			
Model C22	0,41				
Model C23	0,44				
Model C31	0,39	30			
Model C32	0,41				
Model C33	0,44				
***NOT:* 0,44, 0,41 ve 0,39 Pa.s'lık viskosite değerleri American Shotcrete Association üyelerinin genel amaçlı dökümlerinde kullandığı karışımların değerlerinden alınmıştır.**					

Betonun püskürtüleceği sabit kalıp yüzeyi üzerinde inceleme noktaları belirlenerek bu noktalardaki basınç ve hız değerleri belirlenecektir (Şekil 2.2.). Bu basınç ve hız değerlerinin elde edilmesiyle püskürtülen betonun yüzeydeki etkileri belirlenebilecektir.

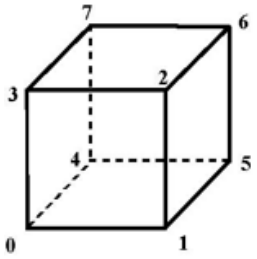


Şekil 2.2. Sabit yüzey, nuzol ucu ve inceleme noktaları (A,B,C,D,E).

2.2. Nümerik Analiz

2.2.1. Çözüm Ağı Dizaynı

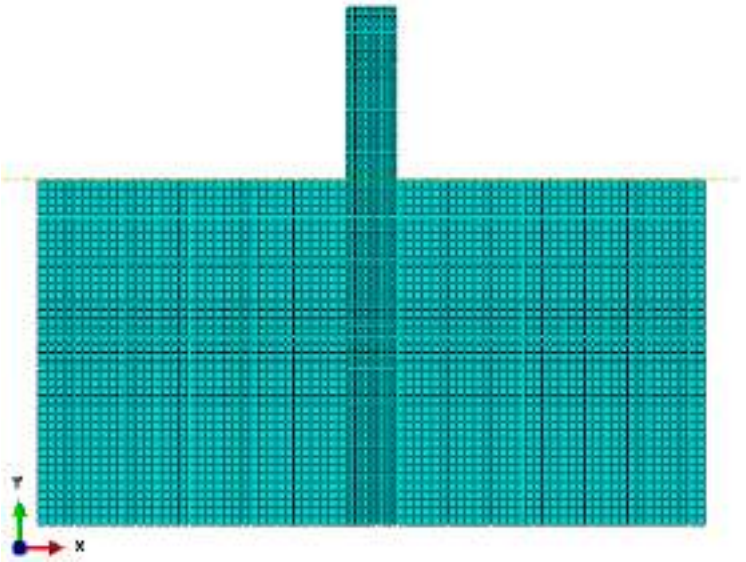
Akışkanın sonlu elemanlara ayrılmasında kullanılan eleman geometrisi hexahedron (6 yüzlü) dür. Akışkan modellerinde kullanılan eleman tipi değişmektedir. Aşağıda görülen şekil akışkan modellerinde kullanılan eleman tipi EC3D8R 'dir.



Şekil 2.3. EC3D8R eleman geometrisi .

Akışkan-yapı etkileşimine uygun olan bu eleman adının açılımı; Eulerian (E), sürekli (C, continium) üç boyutlu (3D), 8 düğüm noktalı (8), Azaltılmış integrasyon (R) şeklindedir. Temas problemleri için geliştirilmiş (modified hexahedron) şeklindedir. Bu model de 7940 adet nokta ve 3600 eleman, kullanılmıştır. Şekil 2.3.' de görülen bu nokta ve elemanların oluşturulmasında genel çözüm ağı aralığı 1,0 cm, nuzol yüzeyine yakın bölgelerde daha

hassas sonuçlar alınması için çözüm ağı aralığı 0,5 cm'dir. Bu aralıklar Analiz Sonuçları kısmında ayrıntılı gösterileceği şekilde yapılan "*Yakınsama Analizi*" ile belirlenmiştir.



Şekil 2.4. Modelin çözüm ağı yapısı.

2.2.2. Malzeme Özellikleri

Modelin geometrisi oluşturulduktan sonra modele malzeme ataması yapılmıştır. Literatür taraması sonucu püskürtme beton için en uygun modelin **Newtonyen akış şartına uygun EOS (equation of state, denge durumunda)** malzeme olduğu belirlenmiştir [13-17]. EOS malzeme ile ilgili özellikleri detaylı olarak Tablo 2.2.' de belirtilmiştir.

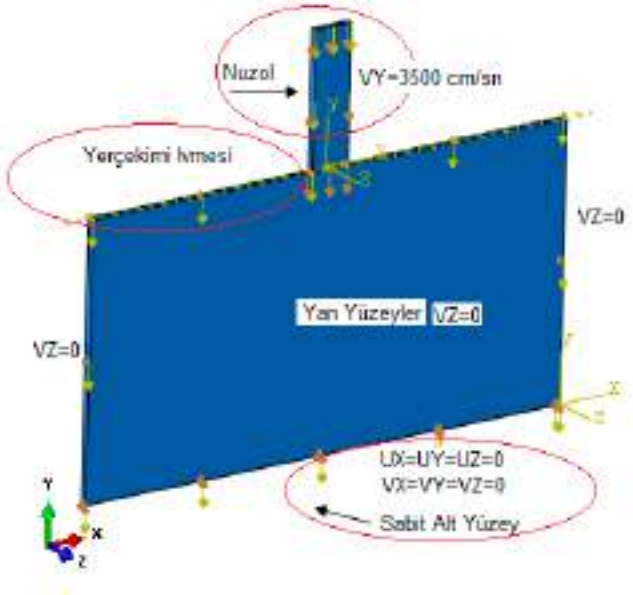
Tablo 2.2. EOS malzeme p arametreleri.

Sesin Betondaki Hızı c_0 (m/s)	Sabitler		Birim Hacim Yoğunluğu ρ_d (t/m^3)	Birim hacim Ağırlığı γ_d (kN/m^3)	Dinamik Viskozite μ (Pa.s)
	k	Γ0			
1450	0	0	1.850*	18.148	0,44
					0,41
					0,39
*Beton yoğunluğu; çimento dozajının az olması ve karışımda puzolan ve eser miktarda hafif agrega ile hava sürükleyici katkı kullanılmasından dolayı geleneksel püskürtme beton yoğunluğundan daha düşük bir değer seçilmiştir.					

2.2.3. Sınır Şartları

Dikdörtgen modelde x,y doğrultusunda akış hareketine izin verilecek şekilde aşağıdaki sınır şartları verilmiştir (Şekil 2.5.).

- y doğrultusunda nuzol çıkış hızı sabit olarak VY=3500 cm/sn kullanılmıştır.
- z doğrultusunda yanal yüzeyler sınır şartı için akışa izin verilmemiştir (VZ=0 Sınır Şartı).
- Düşey Y doğrultusunda modele yerçekimi ivmesi etkitilmiştir (Y-Yönünde -981 cm/sn^2).
- Kalıp yüzeyinde x, y ve z doğrultusunda yer değiştirmeye izin verilmemiştir. (UX=UY=UZ=0 Sınır şartı).
- Kalıp yüzeyinde x, y ve z doğrultusunda akışkan hızlanmasına izin verilmemiştir (VX=VY=VZ=0 Sınır şartı).



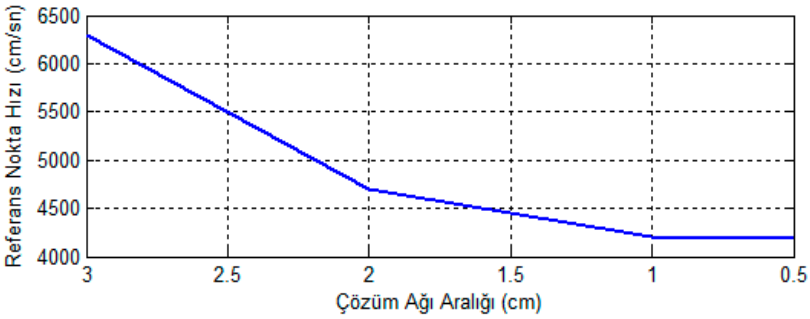
Şekil 2.5. Sonlu eleman analizinde kullanılan sınır şartları.

2.3. Analiz Sonuçları

2.3.1. Yakınsama Analizi

ABAQUS programı ile modellenecek Sonlu Eleman Modelinin oluşturulmasında konum (Δx) ve zaman (Δt) artım değerleri gerekmektedir. Bu değerler yakınsama analizi ile değişik Çözüm ağı (mesh) mesafelerinde çözülerek elde edilmiştir. Referans değer (aynı noktadaki hız veya basınç vs.) çözüm ağı aralığı küçültülmesine rağmen değişim gözlenmiyor veya ihmal edilecek oranda değişiyorsa sistemin çözüm ağı aralığı belirlenmiş olur. Bu değerlerin

çok daha küçük kabul edilerek daha net sonuçlara ulaşılacağı bilinmektedir ancak bu kabulün analiz süresini uzatması kaçınılmazdır. Aşağıdaki şekilde model için yapılan yakınsama analizi gösterilmiştir.

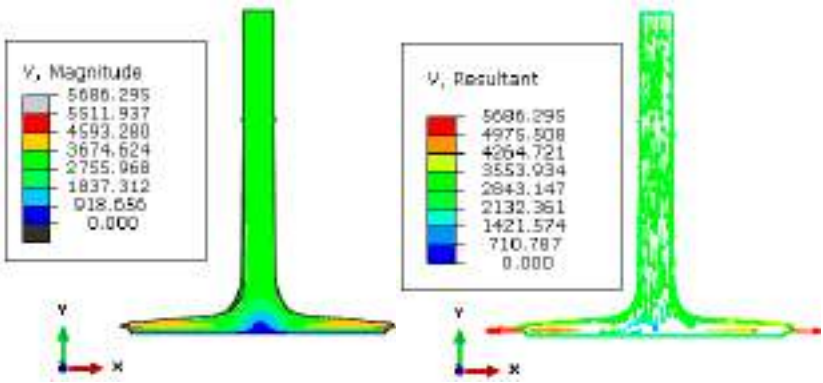


Şekil 2.6. Yakınsama analizi grafiği

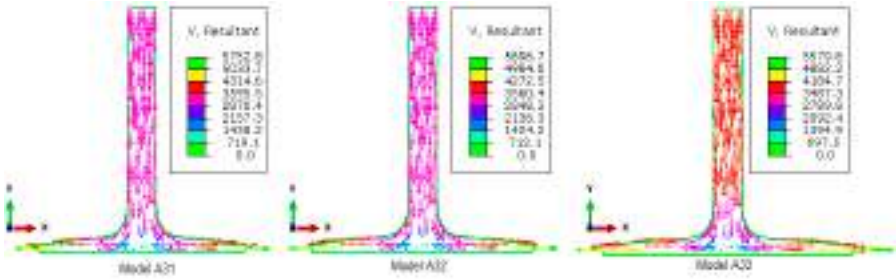
Şekil 2.6'da görüldüğü gibi çözüm ağı aralığı 1,0 cm' den daha küçük alınsa dahi referans nokta hızı ihmal edilecek düzeyde (%2) değişmiştir. Tez çalışmasında ayrıntılı incelenmesi gereken bölgelerde daha küçük çözüm ağı aralığı kullanılacağı gibi ayrıntılı inceleme gerekmeyen bölgelerde çözümü hızlandırmak için daha büyük çözüm ağı aralıkları kullanılması uygun görülmektedir.

2.3.2. Model A İçin Analiz Sonuçları

Model A için yapılan değişik analizlerde nuzol-kalıp arasındaki mesafe arttıkça sıçrama hızının arttığı görülmüştür. Model A33 de V_S=5579,6 cm/sn olarak ölçülürken Model A23'te V_S=5686,3 cm/sn olarak ölçülmüştür (Şekil 2.7).



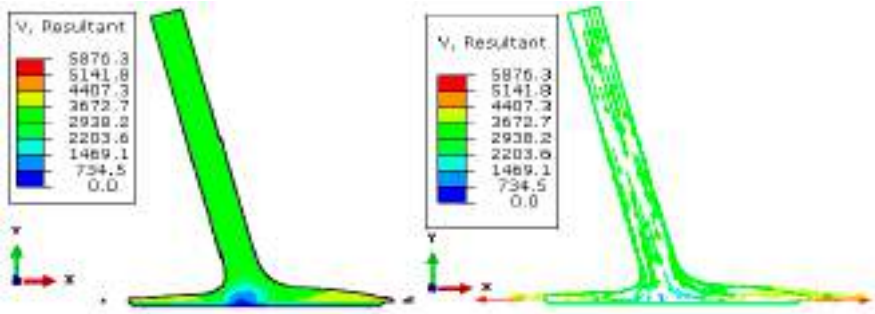
Şekil 2.7. Model A23, Püskürtme betonun 90 ° açı ile yüzey teması hız dağılımları (L=40 cm, V=3500 cm/sn, μ =0.44 Pa.s) .



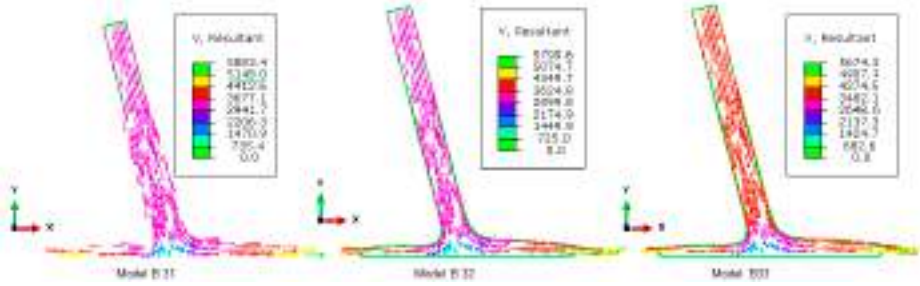
Şekil 2.8. Model A için değişik viskozite değerine sahip betonların sıçrama hız dağılımları (Açı; 90°, L=30 cm, V=3500 cm/sn) .

Model A için aynı hız, yoğunluk ve sıçratma mesafesi alınarak değişik vizkosite değerleri için yapılan analizlerde en az sıçrama hızının Model A33'de V_S=5579,6 cm/sn olarak gerçekleştiği görülmüştür. Diğer modeller için aşağıdaki Şekil 2.8'de görüldüğü gibi Model A32'de V_S=5696,7 cm/sn, Model A31'de V_S=5752,8 cm/sn olarak gerçekleşmiştir.

2.3.3. Model B İçin Analiz Sonuçları



Şekil 2.9. Model B23, Püskürtme betonun 75° açı ile yüzey teması hız dağılımları (L=40 cm, V=3500 cm/sn, μ=0.44 Pa.s) .



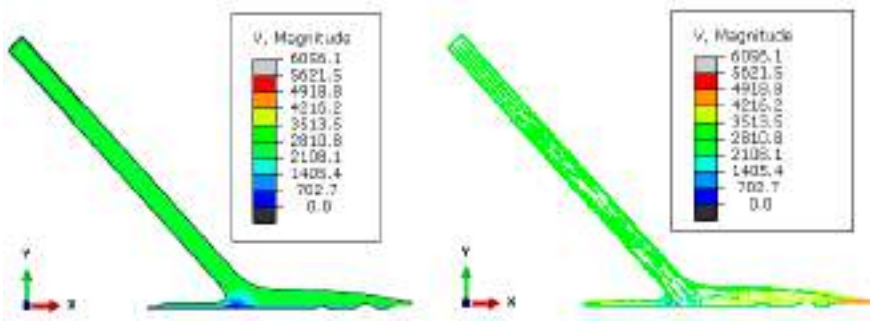
Şekil 2.10. Model B için değişik viskozite değerine sahip betonların sıçrama hız dağılımları

(Açı; 75°, L=30 cm, V=3500 cm/sn)

Model B33 de sıçrama hızı V_S=5674,3 cm/sn olarak ölçülürken daha uzak mesafeden püskürtülen Model B23'te V_S=5876,3 cm/sn olarak ölçülmüştür (Şekil 2.9-2.10).

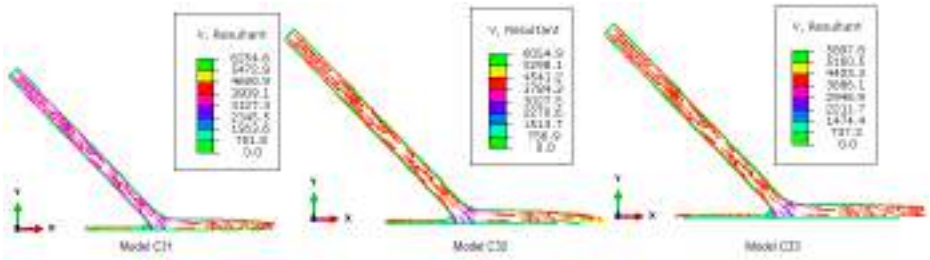
Model B için aynı hız, yoğunluk ve sıçratma mesafesi alınarak değişik vizkosite değerleri için yapılan analizlerde en az sıçrama hızının Model B33'de V_S=5674,3 cm/sn olarak gerçekleştiği görülmüştür. Diğer modeller için aşağıdaki Şekil 2.10'de görüldüğü gibi Model B32'de V_S=5799,6 cm/sn, Model B31'de V_S=5883,4 cm/sn olarak gerçekleşmiştir.

2.3.4. Model C İçin Analiz Sonuçları



Şekil 2.11. Püskürtme betonun 45° açı ile yüzey teması hız dağılımları

(L=40 cm, V=3500 cm/sn, μ=0.44 Pa.s) .



Şekil 2.12. Model C için değişik viskozite değerine sahip betonların sıçrama hız dağılımları

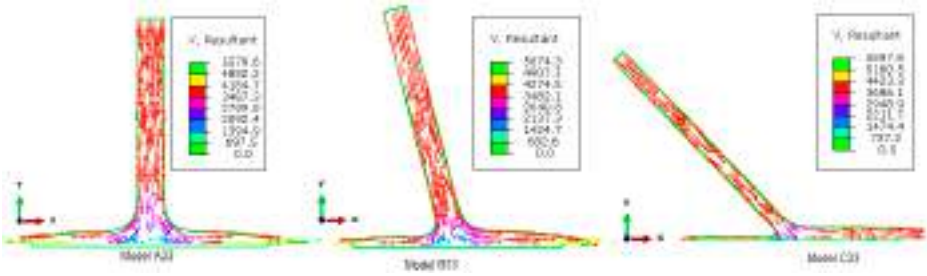
(Açı; 45°, L=30 cm, V=3500 cm/sn) .

Model C33 de sıçrama hızı V_S=5897,8 cm/sn olarak ölçülürken daha uzak mesafeden püskürtülen Model B23'te V_S=6056,1 cm/sn olarak ölçülmüştür (Şekil 2.11-2.12).

Model C için aynı hız, yoğunluk ve sıçratma mesafesi alınarak değişik vizkosite değerleri için yapılan analizlerde en az sıçrama hızının Model C33'de V_S=5897,8 cm/sn olarak gerçekleştiği görülmüştür. Diğer modeller için aşağıdaki Şekil 2.12'de görüldüğü gibi Model C32'de V_S=6054,9 cm/sn, Model B31'de V_S=6254,6 cm/sn olarak gerçekleşmiştir.

2.3.5. Değişik Sıçratma Açıları İçin Karşılaştırma Sonuçları

Model A -B-C için aynı viskozite, hız, yoğunluk ve sıçratma mesafesi alınarak yapılan analizlerde en az sıçramanın Model A'da V_S=5579,6 cm/sn olarak gerçekleştiği görülmüştür. Diğer modeller için aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi Model B'de V_S=5674,3 cm/sn, Model C'de V_S=5897,8 cm/sn olarak g erçekleşmiştir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Model A -B-C için değişik püskürtme açısına sahip betonların sıçrama hız dağılımları (μ =0.44 Pa.s, L=30cm, V=3500 cm/sn).

3. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Yapılan analizler sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

- Püskürtme uygulaması için en uygun açı yüzeye dik (90°) olması durumunda en az sıçrama görülmüştür.
- Püskürtme mesafesi için en uygun değerin L=30 cm olduğu, mesafe arttıkça sıçrama hızının arttığı görülmüştür.
- Kalıp yüzeyi ile Nuzol sıçratma doğrusu arasındaki açı azaldıkça, sıçrama hızı artmıştır. Dolayısı ile sıçrayan beton miktarı da bu hıza bağlı olarak artmıştır.
- Betonun akmaya karşı direnci olan viskozite değeri artan şekilde yapılan analizler sonucunda sıçrayan beton miktarı azaldığı tespit edilmiştir. Değişik Püskürtme açılarında da yapılan analizlerde benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Sonuç olarak bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde Şekil 2.7-2.13'de görüldüğü gibi sıçrama hızı en düşük olan modelin, viskozitesi μ=0,44 Pa.s olan betonun L=30 cm mesafeden yüzeye dik (90 °) açı ile püskürtülmesi durumundaki MODEL A33 vermiştir. Sıçrama hızının düşürülmesi ile püskürtme beton uygulamasında malzeme kaybının en aza indirgenebileceği bilinmektedir. Bu nedenle MODEL A33'ün V_S=5579,6 cm/sn sıçrama hızı ile tüm modeller arasında en düşük sıçrama hızına sahip olduğu tespit edilmiş ve en az malzeme kaybına neden olabilecek uygulama modeli olduğu belirlenmiştir.

4. KAYNAKLAR

[1] Shotcrete In Tunnel C onstruction: introduction to the basic technology of sprayed Concrete, Hofler J., Schlumpf J., 3rd Edition, 2006.

[2] Beton ve Beton Teknolojisi, Simsek O., 2012.

[3] PCA: America's Cement Manufacturers, Shotcrete manuals: Shotcrete Insulation Options

[4] American Shotcrete Association Shotcrete B rochure .

[5] Arıoğlu, E. Ve Yüksel, A. (2002). *Yeraltı Yapılarında Pükürtme Beton*. İstanbul: TMMOB Maden Müh. Odası Çalışma Raporu

[6] Özdoğan M. Y, "Yeraltı Yapılarında Püskürtme Beton Ve Dolgu Dġzaynı", Yüksek Lisans Tezi, Dozuk Eylül Üniversitesi, 2009.

[7] Yurdakul, Ş. Püskürtme Beton Teknolojisinin TTK Ocakları Ana Galerilerinde Uygulanabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Müh. Tezi, ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Müh. Anabilim Dalı, Zonguldak, 221 s. (2001).

[8] Bourchier, F. B. (1990). *Practical Considerations of shotcrete in an underground mining enviroment*. Doktora tezi, Toronto Üniversitesi.

[9] Malmgren, l. Nordlund, E. Ve Rolund ,S. (2004). Adhesion strength and shrinkage of shotcrete . *Tunneling and underground space technology* 20 (2005) 33-48. Ağustos 2008. Sciencedirect database

[10] Melbye, T. Ve Garshol, K.F. (2000). *Sprayed Concrete for rock support (8.baskı)*. İsviçre

[11] Ayış H.İ., "Tünel Açma Sistemlerinde Çelik Lifli Püskürtme Betonun Uygulanabilirliği", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2010.

[12] Standard practice for shotcrete: ANON (United States Army Corps of Engineers), (American Society of Civil Engineers), ISBN 0 7844 0068 7, 1995, 70 pp

[13] Nöldgen M., Riedel W., Thoma K., Fehling E. " Propertıes Of Ultra Hıgh Performance Concrete (Uhpc) In Tensıon At Hıgh Straın Rates" VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, pp. 1 -13.

[14] Tan H.S., Chan R., Po on K.J., Chng D., " VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures", VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures pp:1-15.

[15] Gebbeken N., Greulich S., " Effects of Str essWave Propagation in Reinforced Concrete Bond considering Crack Opening", Numerical Modelling of Concrete Cracking Innsbruck, Austria, 2005

[16] Tai Y.S., Chu T.L., Hu H.T., Wu J.Y., " Dynamic response of a reinforced concrete slab subjected to air b last load", Theoretical and Applied Fracture Mechanics 56 (2011) 140–147.

[17] Abaqus 6.11 Documentation User's Manual

[18] Standard Practice For Shotcrete, EM1110 -2-2005, US Army Corps of Engineers

Porta Batumi Tower Projesi Betonlarının Sıcaklık Kontrollü Dökümü, Dayanım Gelişimi, Kalıp Alma Süreleri ve Yüzey Özelikleri

Savaşer Yetiş **Ali Kaya**
SYSTEM İnşaat Ltd. Şti.
Shota Rustaveli Str. No:14/3
Batumi – Georgia
+995 577902218
syetis@system.com.tr
akaya@system.com.tr

Mehmet Ali Taşdemir
İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi,
Ayazağa Kampüsü
Maslak, Sarıyer - İstanbul
+90 212 2853771
matasdemir@gmail.com
tasdemirme@itu.edu.tr

Öz

Gürcistan-Batum'da inşa edilmekte olan Porta Batumi Tower Projesi'nin 3m'lik derin temellerinde; C40 betonunun sıcaklık kontrollü kademeli dökümü sırasında her tabakada maksimum sıcaklığın 60°C'nin, ortalama sıcaklığın ise 55°C'nin altında kalması sağlanmıştır. Ayrıca, her tabakada ortalama sıcaklık ile yüzey sıcaklığı farkı ve tabakalar arası sıcaklık farkı 20°C'yi aşmamıştır. Üstyapıdaki tüm elemanların dökümünde öngörülen slump toleranslarına uygun C50 sınıfındaki beton üretimleri yapılmış, dayanım gelişimlerine göre kalıp alma süreleri belirlenmiştir. Betonda ASR riskine karşı CEM II/ B – M 42,5 N ve CEM III/A 42,5 N çimentoları kullanılmıştır. Proje boyunca kalıp işçiliğinde ve özellikle de betonun yüzey özeliklerinin iyileştirilmesinde özgün teknikler uygulanmıştır. Temeller, yatay ve düşey elemanlar için özel olarak geliştirilen beton pas payları kullanılmış olup bunların üretiminde proje betonunun harç fazı seçilmiştir. Erken yaş çatlaklarının oluşumuna karşı kalıp alma sürelerine ayrıca önem verilmiştir.

Giriş

Bir betonarme betonu dış yüklere karşı yeterli dirence sahip olacak biçimde tasarlanmışsa, uzun süreli servis ömrü için dayanım dışındaki diğer önemli parametreler şöyle sıralanabilir: i) yapının maruz kaldığı çevresel etkiler, ii) su/etkin bağlayıcı oranı, iii) ayrışmanın olup olmaması ve beton bileşenlerinin homojen dağılımı, iv) etkin bağlayıcı içeriği, v) bağlayıcı türü, vi) ASR, vii) dış veya iç sülfat etkisinden kaynaklanan gecikmiş etrenjit oluşumu, viii) erken yaş çatlaklarının oluşumuna karşı gerekli koruma önlemleri, ix) erken yaşta betonun olgunlaşması için zorunlu olan kür [1-4]. Beton içindeki sıcaklığın 65°C'yi aşması halinde gecikmiş etrenjit oluşumu riski artmaktadır. Bundan dolayı, hem gecikmiş etrenjit oluşumuna hem de erken yaşta termal çatlamalara karşı alınabilecek önlemler şöyle özetlenebilir: a) Kütle betonunun hiçbir bölümünde sıcaklık 65°C'yi aşmamalıdır, 2) Kütle beton dökümünde iç sıcaklık kontrol edilmeli, 3) Çimentonun tipi ve miktarı özenli biçimde seçilmeli, 4) Gerektiği ölçüde puzolan kullanılmalı, 5) Değişken rutubet koşulları önlenmeli, 6) Betonun geçirgenliği düşük düzeyde tutulmalıdır [1, 5-12]. Eğer derin temelin yüksekliği 1 m'den fazla ise sıcaklık artışına özel önem verilmeli ve döküm öncesi gerekli önlemler alınmalıdır [1, 11, 13-15]. Kütle betonu denilince genelde barajlar anlaşılsa da herhangi büyük beton dökümleri de kütle betonu olarak göz önüne alınmalıdır. Bunlar; derin temeller, büyük boyutlu köprü ayakları, kalın döşemeler, nükleer santraller, büyük kesitli kolonlar ve benzeri betonarme yapılardır [1].

Sıcaklığa bağlı çatlamalar kısaca şöyle açıklanabilir; i) çimento hidratasyonu ile iç sıcaklıkta artış olur, ii) kütle betonunun dış yüzeyi kesitin çekirdeğinden daha hızlı soğur, iii) ısıl genleşme/büzülme ile aşırı sıcaklık farkları yüzeyde çekme gerilmeleri oluşturur, iv) yüzeyde oluşan çekme gerilmeleri betonun çekme gerilmesini aşarsa sıcaklığa bağlı çatlamalar oluşur. Betondaki iç sıcaklığın artışında en önemli parametreler şöyle özetlenebilir: a) çimentonun bileşimi, inceliği ve miktaru, b) agreganın miktarı ile ısıl genleşme katsayısı, c) kütle betonunun geometrisi, d) yerleştirme sırasında beton sıcaklığı ile çevre sıcaklığı. Kütle betonu yerine yerleştirildikten sonra kalınlığına bağlı olmak üzere sıcaklık artışının önemli bir kısmı ilk 1-4 gün arasında oluşur [16-20].

Betonda sıcaklık ve gerilme tahmini için son yıllarda çok sayıda çalışma yapılmıştır. Betondaki sıcaklık artışını ve gelişen ısıl gerilmeleri tahmin etmek için bazı genel yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bunlar, deneyimlere dayanarak ileri sürülen grafik yöntemler veya diğer tahmin yöntemleridir [19]. Ayrıca, sonlu elemanlar yöntemi de sıcaklık ve gerilme analizlerinde kullanılmaktadır. Bu analiz için, termal genleşmenin zamana bağlı bir fonksiyonu, betonun çekme dayanımının elastisite modülü ve Poisson oranının zamanla değişimi, sünme ve rötre gibi erken yaşlarda betonun zaman bağlı davranışı, hidratasyon ısısı gibi sertleşen beton özelikleri gereklidir [2-4].

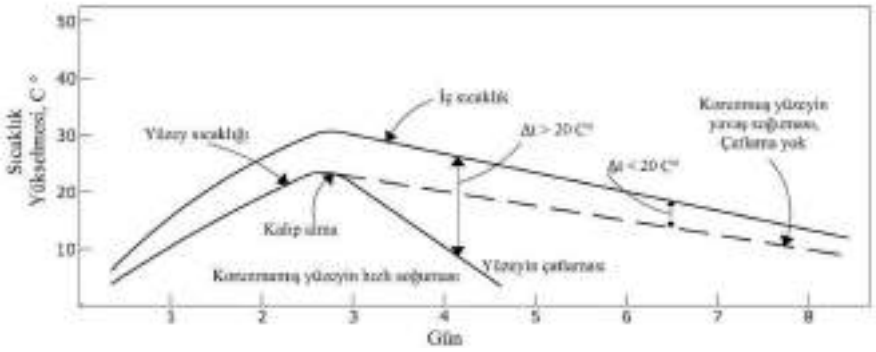
Sıcaklık artışına etkiyen etkenler ve alınacak önlemler aşağıdaki gibi sıralanabilir: 1) Yüksek hacimli beton dökümü ve kütle betonunun geometrisi, derin dökümler yerine sığ ve/veya tabakalı dökümler tercih edilmelidir. 2) Hidratasyon ısısındaki aşırı artışa karşı çimento bileşiminde C_3S ve C_3A ana bileşenlerinin azaltılması, 3) Kütle betonu için erken dayanım kazanma hedefi yerine yavaş hidratasyon dolayısıyla yavaş dayanım kazanma tercih edilmelidir, 4) Düşük inceliğe ve yavaş hidratasyona sahip çimento seçilmeli, 5) İstenen dayanımı sağlayacak kadar çimento kullanılmalıdır. Böylece, hidratasyon ısısı düşürülür ve sonuçta sıcaklık artış hızı azaltılır, 6) Mümkün olduğu kadar agrega boyutu arttırılmalı, daha fazla iri agrega içeriğine sahip bir beton üretilmeli ve agreganın daha sıkı biçimde dizilişi sağlanmalıdır. Diğer bir deyişle, agrega hacim oranı maksimize edilmelidir. Kütle betonunda betonun ısıl genleşme katsayısını etkileyen en önemli parametrelerden biri iri agreganın ısıl genleşme katsayısıdır. Bu nedenle, düşük ısıl genleşme katsayısına sahip bir agrega seçilmelidir. Böylece, ısıl çatlamaya karşı daha iyi bir direnç sağlanmış olur [16-18].

Uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu çimentonun hidratasyon ısısını büyük ölçüde azaltmaktadır [18]. Buna karşı, silis dumanı ve metakaolin gibi ultra incelikteki mineral reaktif katkılar CEM I çimentosuyla yapılan betonun hidratasyon ısısını belirgin biçimde düşüremezler. Çünkü, silis dumanı ve metakaolin gibi etkin mineral katkılar betonda sınırlı miktarlarda kullanılmakta olup çimento miktarında önemli bir azaltma söz konusu olmaz.

Erken yaşta derin radye temel betonunda iç-dış ve tabakalar arası aşırı sıcaklık farklılıkları nedeniyle çatlaklara neden olmamak için hidratasyon ısısı düşük, ancak dayanımı yüksek bağlayıcı seçilmelidir. Ayrıca, beton içinde uzun yıllar sonra ortaya çıkabilecek istenmeyen alkali-agrega tepkimelerine neden olmamak için alkali ve reaktif silis miktarları düşük olan bağlayıcılar ve agregalar kullanılmalıdır. Kullanılan agregaların temizliği, şekli ve beton içindeki tane boyut dağılımının uygunluğu için agregalar partiler halinde sürekli biçimde deneye tabi tutulmalıdır. Kullanılan kimyasal katkıların seçiminde çimento ve agrega arasındaki uyum ve zaman içinde taze betonun kararlılığının sağlanması da amaçlanmalıdır. Diğer taraftan, inşaat süresince sürekli kalite kontrolleri yapılarak uygulamanın şartnamelere uygunluğunun da izlenmesi önemli bir hedeftir[1].

Sıcaklık Kontrollü Kütle Beton Döküm İlkeleri

Dökülecek radye temel kütle beton tabakasının yüzeyinde ve kütlenin içinde sıcaklık ölçülmeli ve sonuçta "dökülen tabakanın içindeki ortalama sıcaklık ile beton yüzeyindeki sıcaklık farkı" bilinmelidir. Bu bilgiye göre, örnek olarak betonun çekirdeğinde ölçülen sıcaklık ile yüzeyindeki (1,5-2 cm derinlikte) sıcaklık farkı 20ºC'yı aşmamalıdır. Böylece, betonun içindeki sıcaklığın yavaş düşmesine karşılık beton yüzeyinde ani düşüşlerin yaşanmaması gerekir. İç-dış ve tabakalar arası sıcaklık farkı aşırı yükseldiğinde çatlak riski artar. Bu nedenle; 1º) Şekil 1'de görüldüğü gibi bir betonarme elemanın ortalama sıcaklığı ile yüzeyde ölçülen sıcaklık farkının ($F_{iç}$, Δt), 20ºC gibi kritik bir değeri aşması ($\Delta t > 20^oC$) halinde beton yüzeyi korunamamış olursa yüzeyde çatlak başlayabilir. 2º) Yeni dökülen tabakanın ortalama sıcaklığı ile önceden dökülmüş tabakanın ortalama sıcaklığı arasındaki "maksimum sıcaklık farkı, $F_{dış}$" kabul edilebilir bir değeri aşmamalıdır, yani $F_{dış}$, $\Delta t < 20^oC$ olmalıdır. Bu fark, kütle betonlarında genelde en fazla 20ºC'dir. Bazı kritik durumlarda bu fark 15ºC gibi daha da düşük düzeye çekilebilir. 3º) Betonun içindeki sıcaklık 65ºC'yi aşmamalıdır. 4º) Önceden dökülmüş alttaki betonun ortalama iç sıcaklığı maksimumu aştıktan sonra ikinci bir beton tabakasının dökümüne uygun bir izlemeyle başlanabilir. 5º) Döküm öncesi taze beton sıcaklığı 32ºC'yi aşmamalıdır.



Şekil 1. 20ºC gibi varsayılan kritik bir sıcaklık farkının aşılması halinde eğer kütlenin soğuması yavaş değilse diğer bir deyişle koruma yapılmamış ise çatlak oluşur. Buna karşın, beton kütlede iç-dış sıcaklık farkını minimize edecek biçimde koruma yapılmış ise çatlak oluşmaz[14].

Proje Hakkında Kısa Bilgi

Porta Batumi Tower, Gürcistan'ın Batum şehri sınırları içerisinde inşa edilmekte olup arsası 4179 m^2 ve kompleksin oturma alanı 2409 m^2'dir. Toplam 70 479 m^2 inşaat alanına sahip olan bu konut projesinde her bir standart katın alanı 1400 m^2'dir. Proje; 2 bodrum + 43 normal kat olmak üzere toplam 45 kat ve 161,25 m yükseklikte tasarlanmıştır. System İnşaat ana yükleniciliğinde gerçekleştirilen projenin 2016 yılı ortasında tamamlanması hedeflenmiştir. Binanın temelinde C40 sınıfı, üst yapısında ise C50 sınıfı beton kullanılmıştır.

Malzeme Deneyleri

Çimentolar

Deneme betonlarında ve derin temelin bir bölümünde TS EN 197-1'e göre üretilen CEM II/B-M 42,5N ve temelin geri kalan bölümünde ve üst yapının inşaasında CEM III/A 42,5N tipi çimento kullanılmıştır. Kullanılan bu çimentolarının fiziksel, mekanik ve kimyasal özelikleri TS EN 197-1'deki koşulları sağlamaktadır. CEM III/A 42,5N ve CEM II/B-M 42,5N çimentolarının ve CEM III/A 42,5N'ın üretiminde kullanılan ÖYFC'nun kimyasal özelikleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo.1 CEM III/A 42,5N ve CEM II/B-M 42,5N çimentoları ile ÖYFC' nun kimyasal bileşenleri (%)

Numune	Ç. SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Cl^-	KK	ÇK	Na_2O	K_2O	S. CaO
CEM III/A 42,5N	22,23	6,55	2,48	57,58	3,13	3,87	0,04	2,62	0,79	0,24	0,51	2,50
ÖYFC	38,73	8,27	0,66	40,20	6,72	1,50	-	1,91	-	0,06	0,56	-
CEM II/B-M 42,5N	24,97	6,83	3,41	56,77	3,00	2,82	-	-	-	0,31	0,60	-

CEM III/A 42,5N çimentosına ait harcın 7 ve 28 günlük standart basınç dayanımları sırasıyla, 29,7 ve 49,4 MPa'dır. CEM II/B 42,5N çimentosunda ise 2 ve 28 günlük standart basınç dayanımları sırasıyla, 16,0 ve 47,5 MPa'dır. Tayin edilemeyen kalıntı %1,14 dür. Sodyum oksit eşdeğeri olarak alkali oranı, $(Na_2O)_{eş}$ %0,570 dir. Çimentonun klinkerindeki $(Na_2O)_{eş}$ ise çok daha düşük olup % 0,20 dir. Çimentonun Blaine yüzey alanı ise 4680 cm^2/g dır. Burada; ÖYFC: öğütülmüş yüksek fırın cürufu, Ç: çözünen, S: serbest, ÇK: çözünmeyen kalıntı ve KK: kızdırma kaybı anlamına gelmektedir.

Agregalar

Bölgede doğal kumun temin sorunu nedeni ile düşey milli kırıcı ile elde edilen iki farklı tip kırma kum kullanılmıştır. Kullanılan kırma kum 1' in tane boyut aralığı 0-2 mm olup birim hacim kütlesi 2,649 g/cm^3, su emmesi %2,3' dür. Kırma kum 2 nin tane boyut aralığı 0-4 mm olup birim hacim kütlesi 2,65 g/cm^3 ve su emme değeri %2,48'dir. Kırmataş I (5-10 mm) ve Kırmataş II (10-19 mm) agregalarının birim hacim kütleleri sırasıyla 2,673 g/cm^3 ve 2,670 g/cm^3, su emme değerleri ise sırasıyla %1,27 ve %1,05'dır. Bu iki agreganın 10-14 mm aralığından alınan ve TS EN 1097-2'ye göre yapılan 500 devir sonunda bulunan Los Angeles Aşınma Kaybı %16 olup TS EN 12620'deki LA_{20} kategorisine girmektedir.

Sıcaklık Kontrollü Deneme Betonları ve Kullanılan Beton Bileşimleri

Derin temellerdeki sıcaklık kontrolünün sağlanabilmesi amacına yönelik önceden iki adet küp numunenin üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu deneme küp betonlarında her bir kenar 1m'dir. Beton dökümünden önce dört adet termokupl yerleştirilmiştir. Bu termokupllardan birincisi küpün merkezine, ikincisi küp üst yüzeyinin ortasından yaklaşık 1,5 cm derinliğe, üçüncüsü kenar ortasının yüzeyinden aynı mesafedeki derinliğe, dördüncüsü küpün alt yüzeyinin ortasından yukarı doğru yine yaklaşık 2 cm'lik bir uzaklığa yerleştirilmiştir. Ayrıca, dış ortam sıcaklıkları da kaydedilmiştir. Deneme amaçlı olmak üzere iki farklı çimento tipi için 2 ayrı beton karışımı kullanılarak bu deneme betonları yapılmıştır. Böylece, her bir temel betonu deneme numunesinde dört noktaya termokupl yerleştirilerek

sıcaklık-zaman eğrileri elde edilmiştir. Sıcaklık ölçümü yapılan noktalar; küpün merkezi (T_{mer}), küpün kenar ortası (T_{ken}), küpün alt ortası (T_{alt}) ve 1,5-2 cm derinlikte küp yüzeyinin ortasıdır. Ortalama sıcaklık hesabı aşağıdaki gibi yapılmıştır: Tort = (2/3)T_{mer} + (1/3)T_{ken} + T_{alt}.

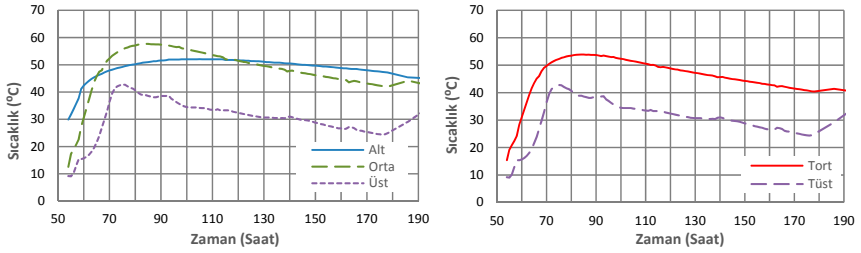
C40 sınıfındaki temel beton bileşiminde iki tip çimento kullanılmıştır. CEM III/ 42,5 N veya CEM/II-B 42,5 N'in her biri için nominal dozaj 390 kg/m^3'tür. Söz konusu bileşimde ağırlıkça karışım oranları aşağıdaki gibidir: Çimento : Kırma kum 1 : Kırma kum 2: Kırmataş No.I : Kırmataş No.II : Kimyasal Katkı : Su = 1 : 1,467 : 1,128 : 0,902 : 1,152 : 0,010 : 0, 420.

C50 sınıfındaki üst yapıya ait beton bileşiminde CEM III/ 42,5 N: 450 kg/m^3'tür. Söz konusu bileşimde ağırlıkça karışım oranları şöyledir: Çimento : Kırma kum-1 : Kırma kum 2 : Kırmataş No.I : Kırmataş No.II : Kimyasal Katkı: Su = 1 : 0,786 : 1,258 : 1,111 : 0,793 : 0,015 : 0,360.

Temel betonunda ortalama hava miktarı: %1,5-%1,8 arası, beton kıvamı: S3-S4 arası, çevresel etki sınıfı: XS ve beton agrega karışımında en büyük agrega boyutu 20 mm'dir. C50 sınıfındaki karışımda ise ortalama hava miktarı: %1,5 civarında, beton kıvamı: S3'ün üst sınırı, çevresel etki sınıfı: XS ve beton agrega karışımında en büyük agrega boyutu 20 mm olup kırmataş 2'nin yarısı kırnmataş I ile yer değiştirilmiştir. Bu betonların taze haldeki birim hacim ağırlıkları sırasıyla 2 371 kg/m^3 ve 2 396 kg/m^3'tür.

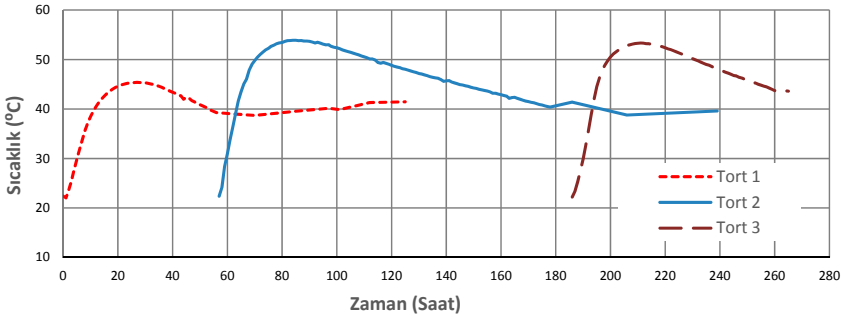
Derin Temelde Yapılan Sıcaklık Ölçümleri

Kuledeki toplam radye temel kalınlığı 3m'dir. Beton dökümü, her biri 1m olmak üzere üç kademede gerçekleştirilmiştir. Birinci kademenin dökümünden 26 saat sonra maksimum sıcaklık 50°C olarak gerçekleşmiş, 52 saat sonra ortalama sıcaklık 45°C'ye düşmüştür. Dökümü izleyen 57 saat sonunda ortalama sıcaklık ile üst yüzey sıcaklığı arasındaki fark en fazla 16°C olmuştur. Şekil 2a'da görüldüğü gibi ikinci tabakanın dökümünden 28 saat sonra maksimum sıcaklık 57,5°C olarak kaydedilmiştir. Şekil 3b'de görüldüğü gibi ortalama sıcaklık 28 saat sonunda 54°C olmuştur. Aynı şeklin incelenmesinden görüldüğü gibi ikinci kademenin dökümünden 11 saat sonra ortalama sıcaklık ile dış yüzey sıcaklığı arasındaki fark en fazla olmuş ve bu değer 20°C olarak kaydedilmiştir. Üçüncü kademe betonunda, dökümü izleyen 25 saat sonunda maksimum sıcaklık 57°C olmuştur. Bu kademenin dökümünden 26 saat sonra ortalama sıcaklık 53°C'lik bir maksimumdan geçmiştir. Bu son kademede ortalama sıcaklık- betonun üst yüzey sıcaklığı farkı 38 saat sonunda 20°C olmuş ve soğuma süresince bu fark aşılmamıştır.



(a) (b)

Şekil 2. Derin temelde 2. kademede sıcaklık ölçümleri (a), 2. kademede ortalama sıcaklık ile üst yüzey sıcaklığının zamanla değişimi (b).



Şekil 3. Derin temellerde ortalama sıcaklıklar; T_{ort1}, T_{ort2} ve T_{ort3} sırasıyla 1., 2. ve 3. kademeye ait ortalama sıcaklık-zaman eğrileridir.

Şekil 3'te 1., 2. ve 3. kademelere ait ortalama sıcaklık-zaman eğrileri birlikte çizilmiştir. Bu şeklin incelenmesinden görüldüğü üzere ortalama sıcaklık en fazla 54°C olmuş ve bu da 2. kademede gerçekleşmiştir. Ortalama sıcaklıklar arasındaki en fazla fark ilk dökümü izleyen 82. saatte oluşmuş, bu da 15 °C olup 20°C'yi geçmemiştir. Böylece, hedeflenen maksimum $F_{iç}$ ve $F_{dış}$ sıcaklık farkları aşılmamıştır.

Temel Betonu Dökümünde Alınan Diğer Önlemler

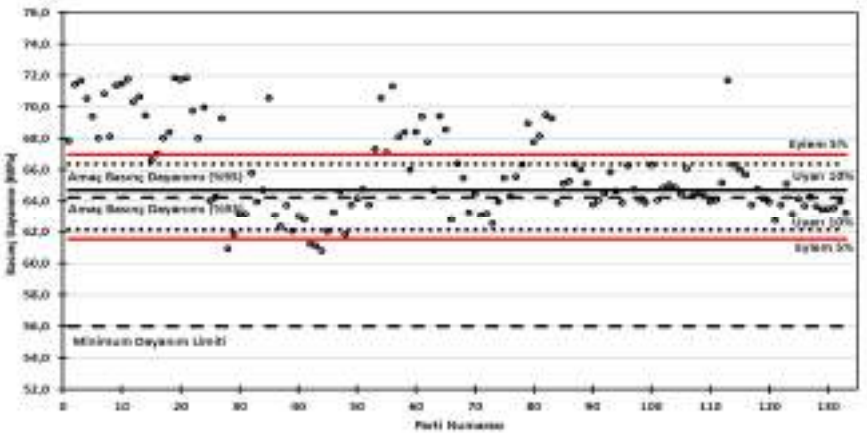
Döküm ile ilgili alınan önlemler şöyle özetlenebilir: i) Betonun dökme ve sıkıştırma hızı, soğuk derzler ile aşırı oturmalar önlenecek biçimde yapılmıştır. Her bir kademede kalınlık 50 cm'yi aşmayacak biçimde beton serilmiş ve her tabakada kalınlığın dalıcı vibratör boyutunun %80'ni aşmaması sağlanmıştır. Dökme ve sıkıştırma işlemleri sırasında, güneşin doğrudan etkisinden, kuvvetli rüzgardan ve yağmurdan betonun korunması amaçlanmış, döküm programı hava durumuna göre düzenlenmiştir. Ayrıca, a) döküm ve vibrasyon sırasında taze betonun işlenebilirliği öngörülen sınırlar içinde kalmış, b) vibrasyon işlemi sistematik biçimde uygulanmış ve tüm tabakaların dökümünde eşit ve yeterli sıkıştırma sağlanmıştır. Böylece, tüm tabakalar üniform biçimde yerleştirilmiş ve her bir tabakada olası oturmalar önlenmiştir.

Yeni dökülen temel betonlarının yüzeyleri buharlaşmaya karşı korunmuştur. Bu koruma erken rötreden dolayı oluşabilecek çatlakların önlenmesi için sıkıştırma-yüzey düzeltme işlemlerinin tamamlanmasından hemen sonra uygulanmıştır. Özellikle, priz öncesinde ve priz sonuna kadar beton yüzeyinin ortamına bir nozulun ucundan beslenen su buharı (sis) püskürtülmüş, böylece rutubet yükseltilmiştir. En son beton tabakası üzerinde gezinebilir hale geldikten sonra ıslak telislerle sürekli rutubetli tutarak iç-dış sıcaklık farkının belirgin biçimde azaltılması yoluna gidilmiştir. Beton yüzeyleri sürekli suyla ıslatılmış ve ıslak çuvalla örtülü tutulmuştur. Yüzeylerde ani sıcaklık düşüşleri veya artışları önlenmiştir.

Küp Basınç Dayanımlarının İstatistiksel Analizi

Her biri 3 numuneden oluşan C40/50 sınıfına ait 33 grup temel betonunun 28 günlük küp basınç dayanımlarının ortalaması (f_{ort}) 57,4 MPa, standart sapması (σ) 2,75 MPa'dır. Varyasyon katsayısı $V = (\sigma / f_{ort})x100 = \%\ 5{,}0$'dir, bu da basınç dayanımlarındaki dağılmaların fazla olmadığını gösterir. Ortalama dayanım, hem %93 hem de %95 güvenlikle hesaplanan hedef dayanımından daha büyüktür, yani 57,4 MPa > 54,1 MPa ve 57,4 MPa > 54,5 MPa'dır. Bu sınıfa ait beton basınç dayanımları 52,6 – 64,6 MPa gibi

makul sayılabilecek bir aralıkta değiştiğinden ve en büyük beton basınç dayanımının hedef dayanımına oranı (64,6/ 54,1) da düşük çıktığından hem ekonomik olma hem de betonarmenin mekanik davranışı bakımından bir sorunun olmayacağı düşünülmektedir.



Şekil 4. C50/60 sınıfına ait betonların istatistiksel değerlendirilmesi

Benzer biçimde, her biri 3 numuneden oluşan C50/60 sınıfındaki üst yapıya ait 133 gruptan oluşan 28 günlük küp basınç dayanımlarının ortalaması 65,9 MPa, standart sapması 2,87 MPa'dır. Böylece, varyasyon katsayısı %4,4 olup üretimin üniform biçimde yapıldığı görülmektedir. Başlangıçta emniyetli davranılarak dayanımların hedef dayanımının biraz üstünde olacak biçimde beton karışım tasarımı yapılmış, daha sonra Şekil 4'de de görüldüğü gibi kararlı bir dayanım seyri elde edilmiştir. Küp basınç dayanımları 60,8 – 71,9 MPa gibi dar sayılabilecek bir aralıkta değiştiğinden ve en büyük basınç dayanımının hedef dayanımına oranı (71,9/64,3) da 1,2'nin çok altında kaldığından betonarmenin kırılma davranışında gevreklik ve betonun ekonomik özeliği bakımından bir sorun söz konusu değildir.

Kalıp Alma Süreleri

Hava koşullarının normal olmadığı durumlarda yani sıcak ve soğuk havada beton dökümü için önlem alma almak gereklidir. Günümüzde beton dökümünde soğuk hava koşulları şöyle tanımlanır; i) Üç gün boyunca günlük ortalama hava sıcaklığı < 5 ^{0}C ve ii) 24 saatlik bir periyodun yarısından fazlasında hava sıcaklığı < 10 ^{0}C ise soğuk hava koşulları mevcut demektir. Hava sıcaklığının her 5 ^{0}C düşüşünde betonun priz süresi yaklaşık 1/3 oranında artmaktadır. Beton prizinin başlayacağı zaman don olursa tehlikelidir. Çünkü, çimentonun hidratasyonu için ortamda su kalmaz. Buz çözüldükten sonra hidratasyon yeniden başlayabilir, ancak beklenen dayanıma erişilemez. Bundan dolayı, özellikle soğuk hava koşullarında kalıp alma sürelerine özen göstermek gerekmektedir. Kolon ve perde gibi düşey elemanlara gelen basıncın sıfıra yaklaşması, diğer bir deyişle betonun kendini taşıyabilir hale gelmesi kalıp alma süresinin belirlenmesinde önemli bir işleve sahiptir.

Düşey betonarme elemanlarda, taze beton kalıbına gelen yükün sıfırlanması aşağıdaki etkenlere bağlıdır: 1°) Çimentonun tipi ve içeriği, 2°) Priz hızlandırıcı katkı kullanılıp kullanılmaması, 3°) Kullanılan kimyasal katkılar ile mineral katkıların tür ve miktarı, 4°) Hava sıcaklığı, 5°) Betonun dayanım kazanma hızı, 6°) Yerleştirme yöntemi ve betonun döküm hızı, 7°) Kalıp malzemesinin türü, 8°) Beton karışımının başlangıçtaki sıcaklığı,

9°) Betonun yerleştirilmesinden sonraki koruma sıcaklığı, 10°) Yapı elemanının boyutları ve etkiyen yükler, 11°) Betonun "su/ etkin bağlayıcı" oranı, 12°) Betonun kıvamı ve kendiliğinden yerleşen betonun kullanılıp kullanılmaması, 13°) Agrega karışımının granülometrisi, 14°) Agrega konsantrasyonu, 15°) Betonun maksimum agrega boyutu, 16°) Kalıp malzemesinin geçirimsizliği, parlaklığı ve türü, ve 17°) Taze betondaki boşluk suyu basıncı. Bu etkenlere bağlı olmakla birlikte düşey beton elemana gelen basınç 8-10 saatleri arasında sıfıra yaklaşır. Ancak, düşey elemanlarda kalıp alma süreleri şantiyedeki ortam sıcaklığına bağlı olarak 12-16 saat arasında değişebilir. Belirtilen tüm etkenlere ve bilinen hususlara karşın betonda kalıp alma süresi şatiye şefinin sorumluluğundadır.

Kalıp alma konusundaki şantiye sorumlusunun göz önünde bulundurması gerekli hususlar aşağıdaki gibi özetlenebilir: 1) Kullanılan betonun priz süreleri, 2) Bekletilmeden, doğru vibrasyon ve söküm yönüne göre dökülmeye başlanması, 3) Doğru ve zamanında kür uygulanması, taze betonun darbelere maruz kalmaması, 4) Numunelerin döküm sırasına göre ve pompanın ucundan alınması, mümkün olduğunca tabliye betonu ile aynı koşullarada muhafaza edilmesi, 5) Karakteristik dayanımın en az %75'ine erişildikten sonra erken söküm bantlarına veya masaların en az %30'una hiç dokunmadan döküm yönünde söküme başlanması, 6) Seyreltme yapıldıktan sonra yerinde bırakılan kalıplar ve erken söküm dikmelerinin üstteki betonun dayanımının %75'ine ulaşmadan sökülmemesi.

Şantiyede kapalı bir ortamda kuytu bir bölgede tutulan numunelerde C50/60 sınıfındaki beton için; küp basınç dayanımı 45 MPa'ı, silindir basınç dayanımı 38 MPa'ı aştığında kirişlerin yan kalıplarından başlanarak zorlamadan, yani eğilmeye ve şekil bozukluğuna maruz bırakmadan ve erken yaş çatlağı oluşturmadan kalıplar alınabilir. Bu ilkeye bağlı kalınmak koşuluyla, yukarıda açıklandığı gibi kirişlerin altındaki dikmeleri tutarak ve döşemedeki mevcut yükü masa kalıplarla taşıtılıp dikmeler yardımıyla üniform yayarak kalıplar dikkatli bir biçimde alınmıştır. Böylece, yeni dökülen döşemenin yükü, 7gün veya fazla bir süre geçse bile bir önceki dökülmüş döşemeye doğrudan yüklenmemiştir. Sonuçta, döşemenin döküldüğü son tabliyeden aşağıya doğru seyreltme yaparak en az üç tabliyede kuvvetli dikmelerle destekleme sürdürülmüştür. Böylece üstten üç tabliyenin yeterli dayanım gelişimine erişmesi sağlanmıştır.

Benzer biçimde, şantiye ortamında kuytu ve kapalı bir ortamda tutulan beton küp numunelerde basınç dayanımı 10 MPa civarında bir değere eriştiğinde gerekli muayeneleri de yaparak kontrollü biçimde kolon ve perde gibi düşey elemanların kalıpları alınmıştır. Yeterli dayanıma erişmeden kalıp alma işçinin can güvenliğini tehlikeye sokabileceği için bu konuya gereken önem verilmiştir. HBT(Hazır Beton Tesisi)'nın onaylanmış olan kıvam sınıflarına ve toleranslarına uyması için etkin bir biçimde denetlenmiştir. Havaların soğuk olduğu durumlarda redozlama gereksinimi de esasen azalmıştır. Bu nedenle, sık sık redozlamaya başvurulmamıştır. Sıcak havalarda, redozlamanın zorunlu olması durumunda ise bu işlem HBT'nin sahadaki yetkili elemanı tarafından uygulanmıştır. Redozlama sonrasında betonarme elemanlarda yerel priz gecikmesi nedeniyle kalıp almada sorun yaşamamak ve istenmeyen kazalara da neden olmamak için transmikser hızlı devirde en az 8 dakika karıştırılması sağlanmıştır.

Betonun sertleşmesi sonrasında döşemenin üzerinde gezilebilir durum elde edildikten hemen sonra soğuk hava koşullarında geceleri yalıtım battaniyeleri sermek üzere düşük sıcaklığa karşı korunma önlemleri alınmıştır. Aşırı iç-dış sıcaklık farkına karşı özellikle Kasım'ın yarısı, Aralık, Ocak, Şubat, Mart ve Nisan'ın ilk iki haftası boyunca olası soğuk hava koşullarında kolon ve perde gibi düşey elemanlar sarılarak korunması için yalıtım battaniyeleri hazır tutulmuştur.

Betonun Yüzey Özelikleri ve Beton Pas Payları

Kolon ve perde gibi düşey betonarme elemanların yüzeylerinde "kuş gözü" biçimindeki boşlukların oluşmaması için şu hedefler seçilmiştir: i) boşlukların yerel biçimde bazı bölgelerde kalmasının önlenmesi, hava ve aşırı su zerrelerinin uygun vibrasyonla dışarı atılması, ii) dökülen tabakaların vibratörle kaynaştırılması, iii) genel olarak betondaki boşlukların azaltılması için beton agrega granülometrisindeki en ince fraksiyonun yeterli olması, iv) kolon ve perdelerin üst bölgelerinde yaygın biçimde gözlemlenen yetersiz vibrasyondan kaynaklanan büyük boşlukların en düşük düzeye indirilmesi.
Betonarme kolon ve perdelerin yüzeylerinde gözlemlenen boşluklar aşağıdaki etkenlere bağlıdır: 1°) Kalıp yağı, 2°) Su, 3°) Hava, 4°) Kalıpların temizliği, 5°) Vibrasyon, 6°) Maksimum agrega boyutu, agreganın granülometrisi, biçimi ve içeriği, 7°) Betonun kıvamı.

Söz konusu bu boşlukları azaltıp betonun kalitesini arttırmak için aşağıda sıralanan yötemler uygulanmıştır: i) Kalıp yüzeyindeki boşluklar ile kusurlar onarılmış ve daima temiz tutulmuştur. Özellikle, plywood üzerindeki tayrot delikleri daima tıkaçla kapatılıp etrafı beton rengindeki çelik macun kullanılarak yalıtılmıştır. Benzer biçimde, tüm çizilen ve vidaların aşırı sıkılmasından kaynaklanan yüzey hasarları onarılmış, böylece bu panellerin su emerek soyulmaları önlenmiş, kısaca kalıp servis ömrünün uzatılması için gereken özen gösterilmiştir. Ayrıca, plywood panellerinin kenarlarından su emilmesinin önlenmesine yönelik tecrit malzeme de sürülmüştür. ii) Yüksek kaliteye sahip bir sentetik kalıp ayırıcı yağ kullanılmıştır. Sonuçta, plywood panellerde başarısı kanıtlanmış yağın kalın değil ince bir film halinde uygulaması yapılmıştır. iii) Betonda aşırı su kullanılması önlenmiş, diğer bir deyişle yukarıda da söz edilen "serbest su" olabildiğince azaltılmıştır. Bunun için, pompanın ucunda toleransı da eklenmiş S3 kıvamının üst sınırında bir beton daha uygun sonuç vermiştir. iv) Taze betondaki hava boşluklarını ve su küreciklerini betonun dışına atabilmek için vibrasyon süresi yeterli düzeyde tutulmuştur. Beton yüzeyindeki boşlukları azaltmak için birçok etken olmasına karşın özenli bir işçilikle bu yüzey kusurlarının azaltılabileceği anlaşılmıştır. Vibrasyonun uygulama biçimi ve süresinin yüzey boşluklarının azaltılmasında etkili olduğu görülmüştür. v) Bilindiği gibi, ince ve standartlara uygun olan bir kum ile ultra incelikte bir mineral katkının eklenmesi taze betonun vizkozitesini düşürmektedir. Böylece, C50 betonunda düşey milli bir kırıcıda inceltilen çok ince kum iri agregaların beton içinde daha serbest hareket etmesini sağlamıştır. vi) İnce uzun ve yassı olan dolayısıyla biçimi düzgün olmayan agregalar taze betonda iç sürtünmeleri arttırdığından ve işlenebilirliği olumsuz biçimde etkilediğinden, kullanılan iri agregalar düzgün biçime getirilmiş ve küp veya küreye yakın geometride olmaları sağlanmıştır. vii) Bu projedeki temel betonunda pas payı 50mm, C50 betonunun döküldüğü döşemelerde ve kirişlerde pas payı 30mm, kolon ve perde gibi düşey elemanlarda ise bu değer 40 mm'dir. Maksimum agrega boyutu en dar kesitin 1/2'si ila 2/3'ü arasında olabilir. Çünkü pas payı veya iki donatı çubuğu arasındaki mesafe yaklaşık 30 mm olduğunda en büyük agrega boyutu 12,2 mm veya 22,4 mm civarında olabilecek demektir. Böylece, donatının çok sık olduğu yerlerde iri agreganın sadece Kırmataş 1'den ibaret olacağı anlaşılır. Bu da genele şartnamelerde yaygın uygulama bulan bir koşuldur. Bundan dolayı, C50 betonunda gerektiğinde, iri agrega konsantrasyonu aynı kalmak koşuluyla kırma taş I arttırılmış, kırma taş II ise aynı oranda azaltılmıştır. Sonuçta, beton agrega karışımının granülometrisi Fuller Parabolü olarak kullanılan referans eğrisini başlangıçta üstten izlemesini sağlamak amacıyla yeteri kadar ince malzeme sağlanmış ve sonuçta agrega taneleri arasında minimum boşluk kalacak şekilde sıkı diziliş sağlanmış ve böylece betondaki boşluk miktarı azaltılmıştır.

Betonda hapsolmuş hava; taze betonun uygun biçimde yerleştirilemesinden kaynaklanan beton boşluk sisteminin bir bölümüdür. Bununla birlikte diğer önemli bir faktör de "serbest

su”dur. Betondaki su üç farklı gruba ayrılabilir: 1) Hidratasyon için gerekli olan su: Çimentonun hidratasyonu süresince kimyasal reaksiyona giren sudur. Böylece, bu su sertleşmiş çimento hamurunun bir bölümünü oluşturur. 2) Agregaların emdiği su: Normal beton agregalarının emdiği su sınırlıdır. Birçok şartnamede agreganın su emmesi en fazla %2 olarak öngörülmektedir. Hafif agrega ile yapılan betonlarda bu emilen su çok fazla olup taze betonun işlenebilirliğini değiştirecek mertebededir. Bundan dolayı hafif beton üretiminden önce hafif agregalara ön emdirme yapılır. Ancak, bu proje betonunda kullanılan agregaların emdiği su %2 civarındadır, dolaysıyla bu suyun taze veya sertleşmiş betondaki hava boşluklarına olumsuz bir etkisi söz konusu değildir. 3) Serbest su: Hidratasyon için kullanılmayan veya agrega tarafından emilmeyen su “serbest su” olarak adlandırılmaktadır. Serbest su, betonun içinde veya özellikle düşey elemanların yüzeylerinde hava boşluklarına neden olmaktadır. Bu, taze betonun kalıbına yerleşmesini kolaylaştırmak için fazladan konulan sudur. Serbest su, çimento hamuruna kimyasal olarak bağlanmadığından ve agreganın içinde hapsolmadığından plastik haldeki beton içinde hareket eder ve sonunda hapsolmuş hava boşluklarını oluşturur. Eğer, taze beton uygun bir biçimde işlenmiş ise serbest su “terleme suyu” olarak betonun üst yüzeyine çıkar.



(a) (b)

Fotoğraf 1. iki kademede dökülen 6,60 m yüksekliğindeki kolon (a), dört kademede dökülen 13,20 m yüksekliğindeki kolon (b).

Fotoğraf 1a'da iki kademede dökülen 6,60 m yüksekliğindeki kolon, 1b'de dört kademede dökülen 13,20 m yüksekliğindeki kolon, Fotoğraf 2a' da dört kademede dökülen 13,20 m yüksekliğindeki perde ve Fotoğraf 2b'de 6,80 m yüksekliğinde üç kademede dökülen kolon görülmektedir. Bu düşey elemanların dökümünde tüm proje boyunca kalıp işçiliğinde ve özellikle de betonun yüzey özeliklerinin iyileştirilmesinde özgün yöntemler kullanılmıştır. Bu şekillerden izlendiği üzere kolon veya perdelerin kademeleri arasında veya tabliyeden bu düşey elemanların yüzeylerine çimento şerbetinin akması özel olarak geliştirilen teknikle ve polimer bantlar yardımı ile şerbetin akıntıları önlenmiş, sonuçda yüzeyleri temizlemek için gerekli olan işçilik minimuma indirilmiştir. Fotoğraf 1b' nin yüzeyinde görülen açık renkli izler ise dışta bulunan bu kolonun üzerine üstten akan yağmur suyu izleridir. Bu düşey elemanların hiçbirinde henüz temizlik işlemi yapılmamıştır.

Fotoğraf 3'de merdiven boşluğundaki tabliyenin üstünde ve altında kullanılan polimer bant yardımı ile çimento şerbeti akıntıları tamamen önlenmiştir. Fotoğraf 3'te alttaki bantın kaldırılmasıyla sadece yatay bir iz elde edilmiştir. Böylece, uygulamada büyük sorun oluşturan ve zahmetli onarımlar ile giderilen bu bölgedeki kusurların azaltılması ile sonuçlanan başarılı bir uygulama örneği gerçekleştirilmiştir.



(a) (b)

Fotoğraf 2. Dört kademede dökülen 13,20 m yüksekliğindeki perde (a), üç kademede dökülen 6,80 m yüksekliğindeki kolon (b).



Fotoğraf 3. Merdiven boşluğunda tabliyenin üstünde kullanılan polimer bant, altında ise polimer bant çıkarıldıktan sonraki boşluğun izi görülmektedir.

Bir betonarme elemanın servis ömrünü belirleyen üzerindeki beton örtüsünün kalınlığı ve kalitesidir. Pas payının en önemli işlevlerinden biri çelik donatıyı korozyona karşı pasivasyon sağlayarak korumak ise diğeri, makul bir süreyle yangına karşı direnç göstererek donatıya sirayet etmesini geciktirmektir. Çünkü, döşeme ve kiriş altındaki yanıcı plastik pas payları doğrudan, düşey elemanlarda ise kısmen yangın etkisinde kalmaktadır. Bilindiği üzere betonla beton arasında iyi bir aderans vardır, ancak betonla plastik arasında aderans çok zayıftır. Sadece korozyon bakımından düşünmenin ötesinde özellikle döşemelerde plastik pas payı yangın bakımından çok tehlikelidir. Maalesef İstanbul'daki birçok kulede plastik pas payı kullanılmaktadır. Beton pas payı içindeki bağlama teli konusunda da önemli bir noktayı vurgulamak gerekir. Uzun süreli servis ömrü iddiası taşıyan bazı mega projelerde beton pas paylarına gömülü olan teller galvanizlidir. Birlikte çalışmada üniform şekil değiştirmelerin elde edilmesi bakımından beton pas payının kalitesi onaylanan betonla aynı bileşimde olmasında yarar vardır. Böylece, her bir onaylı betonda

su/bağlayıcı oranı harç fazınınki ile özdeş olmalıdır. Onaylı ve yürürlükte olan beton 4mm'den elenerek de paspayı yapılabilir. Pas payı elemanlarından kesik koni türünde olanı kolon ve perdelerde betonun yerleşmesinde katkı sağlar. Benzer biçimde, döşemelerde kesik piramit biçimli pas payı kullanıldığında harç sarfiyatı da önlenmiş olur. Bu projenin uygulamasındaki en önemli hususlardan biri de beton pas payının kullanılmasıdır. Sonuçta, döşemelerde ve tüm düşey elemanlarda beton pas payı kullanılması hem korozyona hem de yangına karşı direnç bakımından alınmış başlıca önlemlerden biridir.

Genel Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir: Porta Batumi Tower Projesi'nin 3 m'lik derin temel betonunun dökümü öncesinde her biri 1 m^3'lük olan iki deneme betonu üretilmiş, bu betonlarda sıcaklık-zaman eğrileri incelenmiş ve dayanım gelişimleri değerlendirilmiştir. Deneme betonları ve yukarda belirtilen sıcaklık kontrol ilkeleri esas alınarak derin temel beton üretimine geçilmiştir. Birinci, ikinci ve üçüncü kademelerde erişilen maksimum sıcaklıklar sırasıyla 50°C, 57,5^{o}C ve 57°C olmuş, maksimum ortalama sıcaklıklar ise yine sırasıyla 45°C, 54°C ve 53°C olarak kaydedilmiştir. Ortalama sıcaklıklar ile beton yüzeyi sıcaklıkları farkı 1., 2. ve 3. kademeler için sırasıyla 14°C, 17°C ve 18°C olmuştur. Ayrıca, üç kademede tabakalar arası ortalama sıcaklıklar farkı da 20°C'yi aşmamıştır. Sonuçta, sıcaklıklar bakımından öngörülen hedefler tutmuştur.

Beton agregasının karışım granülometrisi düzenlenirken maksimum doluluk esas alınmış, özellikle ince fraksiyonun önemi ön planda tutulmuştur. Bundan dolayı mevcut kum ile birlikte ikinci bir kum da kullanılmıştır. Bu ince kum ilk iri kumun düşey milli kırıcıda kırılması ile beton agrega granülometrisinin ince fraksiyonu yeterli düzeye getirilmiştir. Böylece, betonun boşluklarını doldurmak için gereğinden fazla çimento kullanılması önlenmiştir. Sonuçta, betonun yüzey özellikleri iyileştirildiği gibi erken yaş çatlakları da engellenmiştir.

Bütün yatay ve düşey elemanlarda kimyasal kür maddesi uygulanmış ve böylece betonun olgunlaşmasını sağlamak için gerekli koruma önlemleri alınmıştır.

Hem C40 hem de C50 betonlarında % 93 güvenlik ve % 7 risk esasına göre karışımlar tasarlanmış, istatistiksel değerlendirmeleri proje boyunca sürdürülmüş ve elde edilen ortalamaların hedef dayanımdan büyük olmaları sağlanmıştır. Bunun için; su/bağlayıcı oranı, agreganın temizliği, slump toleransları, betonun granülometrisi, maksimum agrega boyutu, CEM III/A 42,5N çimentosunun üretiminde kullanılan öğütülmüş yüksek fırın

curufunun kalitesi, agreganın kökeni ve yassılık indisi, kimyasal katkı maddesinin cinsi ve optimum kullanım miktarı, numune alma ve saklama koşulları gibi parametrelere odaklanarak üretim boyunca standart sapma ve varyasyon katsayısı gibi istatistiksel parametrelerin düşük düzeyde seyretmesine çalışılmıştır.

Kalite kontrol amacıyla alınan standart numunelere ilave olmak üzere kapalı bir ortamda kuytu bir bölgede tutulan numunelerde karakteristik basınç dayanımının %75'ine erişildiğinde kirişlerin yan kalıplarından başlanarak zorlamadan, eğilmeye ve şekil bozukluğuna maruz bırakmadan ve erken yaş çatlağı oluşturmadan kalıplar alınabilir. Böylece, kirişlerin altındaki dikmeleri tutarak ve döşemedeki mevcut yükü masa kalıplarla taşıtılıp dikmeler yardımıyla üniform yayarak kalıplar dikkatli bir biçimde alınabilir. Sonuçta, döşemenin döküldüğü son tabliyeden aşağıya doğru seyreltme yaparak en az üç tabliyede kuvvetli dikmelerle destekleme sürdürülür. Böylece üstten üç tabliyenin yeterli dayanım gelişimine erişmesi sağlanmış olur. Benzer biçimde, şantiye ortamında kuytu ve kapalı bir ortamda tutulan beton küp numunelerde basınç dayanımı 10 MPa civarında bir değere eriştiğinde gerekli muayeneleri de yaparak kontrollü biçimde kolon ve perde gibi düşey elemanların kalıpları alınabilir. Yeterli dayanıma erişmeden kalıp alma işçinin can güvenliğini tehlikeye sokabileceği için bu konuya gereken önem verilmelidir. Belirtilen bu hususlar öneri niteliğinde olup kalıp alma süresi şantiye şefinin sorumluluğundadır.

Kule inşaatı boyunca erken yaş çatlaklarının oluşması önlenmiş, pas payı ezilmesine engel olmak ve korozyon ile yangına karşı direnç için beton pas payları kullanılmıştır. Özellikle betonun yüzey özelliklerine önem verilmiş, yüzeylerdeki boşlukların azaltılması önlenmiş, döşeme-perde ve kiriş- kolon birleşim bölgelerindeki çimento şerbeti akıntıları minimuma indirilmiştir. Bu amaçla özel olarak geliştirilmiş bir yöntemle polimer esaslı bantlar kullanılarak akıntılardan ileri gelen temizlik için zaman kazanılmış ve daha önemlisi bu yöndeki işçi sağlığı ön planda tutulmuştur.

Kısaca, i) Uygun kalıp yağının yeterli miktarda kullanılması, ii) Söküm sırasında kalıbın hırpalanmaması, iii) Özellikle düğüm noktalarında ve kirişlerde gereken temizlik işlemlerinin özenli biçimde yapılması, iv) Beton pas payının yeterli miktarda kullanılması, v) Yeni dökülmüş döşemenin üzerinde çalışılırken özellikle kolon ve perde demirlerinin dağıtılarak konulması, böylece donatıların tek noktaya yüklenmemesi de şantiye sorumlularına önerilir.

Teşekkür

Yazarlar, ilgi ve desteği dolayısıyla Porta Batumi Tower Projesi'nin Statik Proje Müellifi Mustafa Adnan Öğüt'e teşekkür eder. Ayrıca, projenin kalıp ve donatı işçiliğindeki özgün çabası dolayısıyla Cevdet Sarışık'ın ismi teşekkürle anılır.

Kaynaklar

1. Elmaskaya, A. ve Taşdemir, M.A., "Palladium Tower Projesinin Derin Temel Betonunun Sıcaklık Kontrollü Dökümü ve Dayanım Gelişimi", 21-23 Şubat 2013, THBB Beton 2013 Bidirileri, s. 366 - 381.

2. Taşdemir, M.A., Akkaya, Y., Erdoğdu, S., and Ozturk, M., "Quality Assurance for the Deepest Immersed Tube Tunnel: Marmaray Project", Advances in Concrete : An Asian Perspective, ACECON 2010, Eds. R. Gettu et al., 2010, pp. 252-267.

3. Taşdemir M.A. and Akkaya, Y., "Turkey - Concrete Construction Industry - Cement Based Materials and Civil Infrasturucture - (CBM-CI)", CBM-CI International Workshop, Ed. S. Ahmad, Karachi, 2007, pp. 185-200.

4. Akkaya, Y. and Taşdemir, M.A., "Turkish Experience in Concrete Construction Industry and Infrasturucture", UNESCO-IPRED-ITU Workshop, 6-7 July 2009, pp. 159-164.

5. Stark, J., Bollmann, K., "Delayed Ettringite Formation in Concrete", Nordic Concrete Research, (23)2, pp. 1-25, 1999.

6. Collepardi, M., "A State-of-the-Art Review on Delayed Ettringite Attack on Concrete", Cement and Concrete Composites, 25, pp. 401-407, 2003.

7. Akman, M. S., "Gecikmiş Etrenjit Oluşumu (DEF)", 5. Ulusal Beton Kongresi, 1-3 Ekim, İstanbul, s.9-15, 2003.

8. Divet, J., and Randriambololona, "Delayed Ettringite Formation: the Effect of Temperature and Basicity on the Interaction of Sulphate and C-S-H Phase", Cement and Concrete Research, 25, No. 3, pp. 357-363, 1998.

9. Heinz, D., and Ludwig, U., "Mechanisms of Secondary Ettringite Formation in Mortars and Concretes Subjected to Heat Treatment", Katharine and Bryant Mather International Conference, J.M. Scanlons, ed., ACI, Detroit, 1987.

10. Lawrence, C.D., "Mortar Expansions Due to Delayed Ettringite Formation: Effects of Curing Period and Temperature", Cement and Concrete Research, 25, No. 4, pp. 903-914, 1995.

11. Gajda, J., and Vangeem, M., "Controlling Temperatures in Mass Concrete", Concrete International, 2002.

12. Zhaozhou, Z., Olek, J., and Diamond, S., "Studies on Delayed Ettringite Formation in Heat-Cured Mortars II. Characteristics of Cement that maybe Susceptible to DEF", Cement and Concrete Research, 32, pp. 1737-1742, 2002.

13. Gajda, J., Kaufman, A., and Sumodjo, F., "Precooling Mass Concrete", Concrete Construction, 2005.

14. Kosmatka, S.H., Panarese, W.C., Gissing, K.D., and Mac Leod, N.F., "Design and Control of Concrete Mixtures", Canadian Portland Cement Association, Ottawa, 121p. 1995.

15. Bamforth, P.B., "In-situ Measurement of the Effect of Partial Portland Cement Replacement using either Fly Ash or Ground Granulated Blast Furnace Slag on the Performance of Mass Concrete", Proceedings, Institution of Civil Engineers, 69, pp. 777-800, 1980.

16. "Temperature control of mass concrete", in *EM 1110-2-2200, US Army Corps of Engineers Publications*, 1995.

17. ACI Committee 207, "Mass Concrete – 207. 1R-96" ACI, 1996.

18. Ramlochan, T., Zacarias, P., Thomas, M.D.A., and Hooton, R.D., "The Effect of Pozzolans and Slag on the Expansion of Mortars Cured at Elevated Temperature, Part I. Expansive Behavior", Cement and Concrete Research, 33, pp. 807-814, 2003.

19. Whittier, S., Olyniec, J., and McGlohn, R., "Minimizing Temperature Differentials in Mass Concrete", Concrete International, Dec., 2014, pp. 43-45.

20. Belanger, P.R., and Shirlaw, M.R., "Temperature Control in High-Strength, Massive Concrete Girders", Concrete International, Nov., 1993, pp. 30-32.

21. Yunchuan, Z., Liang, B., Shengyuan, Y., and Guting, C., "Simulation Analysis of Mass Concrete Temperature Field, Procedia Earth and Planetary Science, 5, Jan.,2012, Vol:5:5-12

Çimento Esaslı Kompozitlerde Lif-matris Aderansına Kür Koşullarının Etkisinin İncelenmesi

Ahsanollah Beglarigale, Halit Yazıcı
Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye
Tel: (+90 232) 3017044
E-Posta: ahsan.beglari@gmail.com, halit.yazici@deu.edu.tr

Öz

Lif-matris aderansı çimento esaslı lifli kompozitlerin performansını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Lif türü ve geometrisi, matris dayanımı, lif-matris arayüzey özellikleri ve kür koşulları gibi birçok parametre lif-matris aderansını etkilemektedir. Çalışma kapsamında çeşitli su/bağlayıcı oranına sahip karışımlar tasarlanmış ve farklı kür yöntemleri uygulanarak, lif-matris aderansları çekip-çıkarma deneyi ile incelenmiştir. Otoklav kürü sonrası çarpıcı aderans artışları içyapı analizleri ile açıklanabilmiştir. Ayrıca su/bağlayıcı oranının önemi kapsamlı olarak irdelenmiştir.

Anahtar sözcükler: Çelik lif, Aderans, Kür, Çimento esaslı kompozit

Giriş

Klasik beton oldukça heterojen yapıda, gözenekli bir malzemedir. Bu nedenle böyle bir malzemenin kırılma süreci karmaşık ve süreksiz olur. Betonun zayıf olan mekanik özelliklerini iyileştirmek amacı ile betona bazı özel malzemeler ilave edilebilmektedir. Çelik lif de bu malzemelerden en yaygın olarak kullanılanların birisidir. Çelik lifli betonların üretilmesindeki ana amaç malzemenin tokluğunun, darbe yüklerine karşı direncinin ve eğilme dayanımının arttırılmasına yöneliktir. Mekanik özellikler ve durabilite açısından bakıldığında çok sayıda araştırma yapılmış ve çelik lifin çatlak önleyici ve süneklik arttırıcı özelliği sayesinde iyi sonuçlar elde edilmiştir. Çelik lifli beton kullanımı yaygınlaşmaktadır. Rektif pudra beton, SIFCON, püskürtme beton, kendiliğinden yerleşen beton gibi özel çimento esaslı kompozitlerde çelik lif kullanımı çok yaygındır.

Çelik lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden biri lif-matris aderansıdır. Bu sebepten dolayı aderans özellikleri, lif ve matris arasında yük transferini etkileyebilmektedir. Lif-matris aderansını etkileyen en önemli faktörlerden biri lif-matris arayüzeyi (geçiş bölgesi) özellikleridir. Geneleksel lifli betonların lif-matris arayüzeyi özellikleri, agrega-matris arayüzey geçiş bölgesine benzemektedir (Neville, 1973). Bu bölgenin yoğunluğu mineral katkılarla arttırılabilmektedir (Bentur ve diğ., 1995; Chan ve Li, 1997; Chan ve Chu, 2004). Lif-matris aderans özellikleri birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Genel olarak aderans özellikleri matris ve kullanılan lifin özelliklerine bağlı olduğu birçok araştırmacı tarafından tespit edilmiştir. Matrisin mekanik özellikleri, kür koşulları, mineral katkı kullanımı, çelik lif morfolojisi (kanca ucu, narinlik, çap vb.) ve durabilite sorunlarına maruz kalıp

kalmadığı gibi parametreler aderansı etkileyebilmektedir (Tuyan ve Yazıcı, 2012; Abu-Lebdeh, 2011; Beglarigale ve Yazıcı, 2013; Kim ve diğ., 2012).

Yüksek performanslı çimento esaslı kompozit olarak akışkan reaktif pudra beton u ve geleneksel karışımları temsil etmek için normal harç (NH) çalşma kapsamına alınmıştır. Farklı kür yöntemlerinin yanı sıra, su/çimento (S/Ç) oranının da lif-matris aderansına etkisi araştırılmıştır. Ayrıca içyapı analizleri ile sonuçlar desteklenmiştir.

Gereç ve Yöntem

Malzemeler

Deneysel çalışmada CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Normal harç (NH) için kireç taşı (0-5 mm) ve RP B karışımının tasarımı için dört farklı boyutta (1-3, 0.5-1, 0-0,4 ve 0-0,075 mm) kuvars agregası kullanılmıştır. Hedef işlenebilirliğine ulaşmak için polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Çalışma boyunca, 60 mm uzunluğa ve 0.75 mm çapa sahip olan tek tip kancalı çelik lif kullanılmıştır.

Karışımların Tasarımı

NH ve RPB karışımlarının tasarımı Tablo 1'de sunulmaktadır. Su/bağlayıcı (S/B) oranının çelik lif-matris aderans özelliklerine etkisini araştırmak için NH ve RPB karışımları yeniden tasarlanmış ve yeni karışımlar elde edilmiştir. NH çimento dozajı (500 kg/m3) sabit tutulmuş, ancak su/çimento (S/Ç) oranı 0,5'den 0.6, 0.4 ve 0.3 olacak şekilde yeni karışımlar hazırlanmıştır. Ayrıca, RPB karışımının su/bağlayıcı (S/B) oranı 0,2'den 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6'ya kadar yükseltilerek farklı tasarımlar ortaya konmuştur. Yüksek S/B oranına sahip karışımlar RPB olarak kabul edilemez. Bu karışmlar sadece S/B oranının farklı kür koşullarında, lif-matris aderansı üzerinde önemini ortaya koymak için tasarlanmıştır. Silis dumanı ve 0-0.4 ve 0-,075 mm boyutlu kuvars agrega dozajları sabit tutulmuş ancak S/B oranı arttıkça çimento dozajı 100 kg/m^3 düşürülmüştür. Lif gömme boyu 3 cm olacak şekilde matrislere sabit derinlikte gömülmüştür.

Tablo 1. Karışım oranları (kg/m^3).

Karışımlar	Su	Çimento	Silis dumanı	Agrega					* SA/Ç (%)
				Kireç taşı 0-05 mm	Kuvars(mm)				
					1-3	0.5-1	0-0.4	0-0.075	
0.3Y-NH	150	500	-	1687	-	-	-	-	4.2
0.4Y-NH	202	500	-	1588	-	-	-	-	1.4
0.5NH	250	500	-	1473	-	-	-	-	0.8
0.6Y-NH	300	500	-	1352	-	-	-	-	0
0.2RPB	184	824	107	-	609	348	174	87	2.2
0.3Y-RPB	249	724	107	-	570	310	174	87	1.1
0.4Y-RPB	294	624	107	-	556	296	174	87	0.55
0.5Y-RPB	315	524	107	-	575	314	174	87	0.01
0.6Y-RPB	318	424	107	-	609	348	174	87	-

* Süper akışkanlaştırıcı/çimento

Örneklerin Hazırlanması

Karıştırma, Hobart mikser ile yapılmıştır. Öncelikle bağlayıcı tozlar ve agrega kuru karışım olarak düşük hızda NH 2 dk ve RPB 5 dk karıştırılmıştır. Daha sonra karışım suyunun yarısı kuru karışım içine ilave edilerek NH karışımı için 2dk ve RPB karışımı için 5 dk düşük hızda karıştırma işlemi devam edilmiştir. Ardından karışım suyunun 1/2'si ve akışkanlaştırıcı içeren solüsyon karışıma eklenerek NH karışımı 3 dk ve RPB karışımı 10 dakika yüksek hızda karıştırılmıştır. Ardından 10 cm alt tabanlı mini çökme konisi ile yayılma çapları belirlenmiştir. Akışkanlaşırcı miktarı hedeflenen mini çökme konisi yayılma çapına göre ayarlanmıştır. NH için 150 ± 10 mm ve RBP için 220 ± 10 mm yayılma çapı olarak hedeflenmiştir.

Taze hal deneylerinden hemen sonra karışımlar iki kademeli olarak 50×50×50 mm boyutunda küp kalıplara yerleştirilmiştir. İlk tabaka için 30 saniye vibrasyon uygulanmıştır. Her küp için bir adet çelik lif, özel aparat kullanılarak merkezden matris içine istenilen boyda gömülmüştür. Aparat yerleştikten sonra 30 saniye vibrasyon uygulanmıştır. Basınç ve eğilme dayanımı tespiti için karışımlar işlenebilirlik deneyinin ardından 40×40×160 mm prizmatik kalıplara doldurulmuştur.

Kür Koşulları

Kür tipleri; 7 ve 28 gün su kürü, buhar kürü ve otoklav kürüdür. 7 ve 28 gün su küründe, 24 saat sonra kalıptan sökülen numunelere 7 ve 28 gün standart su kürü uygulanmıştır. Buhar küründe ise numuneler dökümden sonra 6 saat boyunca nem odasında bekletilmiştir. Isınma süreci olan 6 saat sonunda buhar sıcaklığı 100 °C'ye ulaşmış ve 12 saat bu sıcaklıkta kür uygulanmıştır. Süre sonunda kabin kapakları açılmış ve örnekler soğumaya bırakılmıştır. Otoklav kürü için bağıl nemi %97, sıcaklığı 20±2 °C olan kabinde 2 4 saat süreyle tutulan numuneler ardından kalıptan çıkartılarak otoklava yerleştirilmiştir. Otoklavda 8 saat boyunca 2 MPa basınç altında (210°C) kür uygulanmıştır.

Çekip-çıkarma Deneyi

Deney düzeneği ve deneyin yapılışı şematik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir. Çekip-çıkarma deneyi aleti deformasyon kontrollüdür. Numune alt başlık ile sabitlendikten sonra lifin matris dışında kalan kısmı üst başlık tarafından tutulmuştur. Matris sabit kalacak şekilde, lifi tutan üst başlığın 1 mm/dakika hızla yukarı doğru hareket etmesi sağlanmıştır. Böylece lif matris içinden sıyrılırken bilgisayar bağlı 6 kN kapasiteli yük hücresi vasıtasıyla yük değerleri bilgisayar tarafından kaydedilmiştir. Yük ve lifin matris içinden sıyrılma değerleri eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Böylece yük-sıyrılma eğrileri elde edilmiştir.



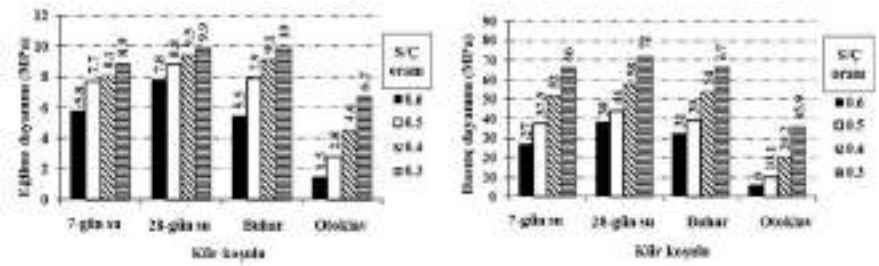
Şekil 1 Çekip-çıkarma deneyi.

Bulgular ve Tartışma

Karışımların Mekanik Özellikleri

NH (S/Ç = 0.5) ve yeniden tasarlanmış NH karışımların (Y-NH) eğilme ve basınç dayanımı değerleri çeşitli kür koşullarında Şekil 2'de sunulmaktadır. Karışımların S/Ç oranı düştükçe eğilme dayanımları artmaktadır (Şekil 2). Bu davranış tüm kür koşullarında geçerlidir. 28 gün su kürü yapılmış tüm karışımların eğilme dayanımları 7 gün su geçirmiş karışımlardan daha yüksektir. Bu davranış, çimento hidratasyonunun 28 güne kadar devam ettiğini göstermektedir. Şekil 2'de görüldüğü gibi buhar kürü geçirmiş numuneler (0,3Y-NH karışımı hariç), 28 günlük su kürü geçirmiş numunelere kıyasla daha düşük eğilme dayanımlarına ulaşabilmiştir. Yüksek S/Ç oranına sahip olan ve herhangi bir mineral katkı içermeyen çimento esaslı kompozitlerin buhar kürüne daha hassas olduğu bilinen bir gerçektir. Erken yaşlarda termal şok nedeni ile oluşan mikro çatlaklar mekanik özellikleri etkilemektedir . Buhar kürü örneklerinin eğilme dayanımları 28 günlük su kürü geçirmiş örneklere kıyasla % 1-30 oranında geride kalmıştır.

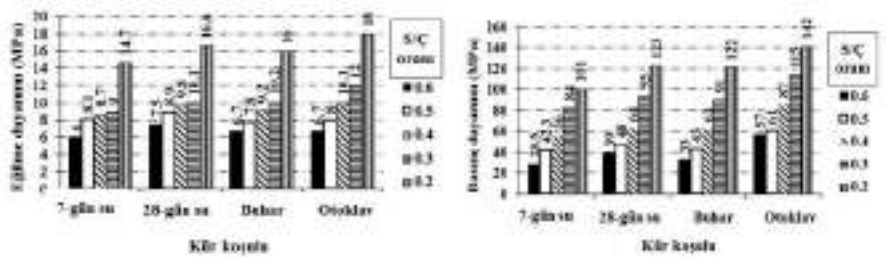
Beklendiği gibi tüm karışımların eğilme dayanımları otoklav küründen sonra düşmüştür. Silis (SiO_2) kaynağının bu karışımlarda olmaması otoklav küründe dayanım kayıplarına yol açmaktadır (Odler, 2004). Bu önemli dayanım kaybının yüksek S/Ç oranına sahip karışımlarda daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu durum içyapının gözenekli hale gelmesi ile açıklanabilir. Otoklav kürü örneklerinin eğilme dayanımları su kürüne kıyasla %32-81 daha düşüktür.Ayrıca, eğilme dayanımlarında karşılaşılan davranışlar basınç dayanımında da geçerlidir.



Şekil 2 Farklı S/Ç oranlarına sahip Y-NH karışımların eğilme ve basınç dayanımları.

Yüksek dayanımlı reaktif pudra betonu RPB (S/B = 0.2) ve yeniden tasarlanmış RPB karışımların (Y-RPB) eğilme ve basınç dayanımı değerleri çeşitli kür koşullarda Şekil 3'de sunulmaktadır. Karışımların S/Ç oranı düştükçe eğilme dayanımları artmaktadır. RPB (S/B=0,2) karışımının dayanımı yüksek çimento dozajı, düşük S/B oranı ve silis dumanı içermesinden (düşük Ca/Si oranı) dolayı tüm karışımlardan daha yüksektir (Chan ve Chu, 2004; Lehmann vd., 2009). Buhar kürü geçirmiş RPB karışımlarında buhar kürü ile 28 günlük su kürü dayanımlarına yaklaşılmaktadır. 0.2, 0.3 ve 0,4 S/B sahip RPB ve Y-RPB karışımların eğilme dayanımları otoklav kürü sonucu %3-19 oranında artmıştır (28 gün su kürüne kıyasla). Karışımın SiO_2 bileşeninin (silis dumanı ve ince kuvars tozu) içermesi, düşük S/B oranı ve yüksek çimento dozajı tobermorite ($C_5S_6H_5$) ürünleri oluşmasına sebep olmaktadırlar (içyapı incelemesinde daha ayrıntılı bilgiler yer almaktadır). 0.5 ve 0.6 S/B

sahip Y -RPB karışımlarının eğilme dayanımları otoklav kürü sonucu %10-11 oranında geri kalmıştır (su kürüne göre). SiO_2 bileşenleri içermelerine rağmen yüksek S/B oranı ve daha düşük çimento dozajı dayanımları olumsuz etkilemiştir. Eğilme dayanımı ısıl işlemlere karşı mikro-çatlak açısından daha hassastır. Eğilme dayanımlarında karşılaşılan davranışlar su ve buhar kürü geçirmiş numunelerin basınç dayanımında da geçerlidir. Otoklav kürü geçirmiş tüm karışımların basınç dayanımları 28 gün su kürüne kıyasla % 15-46 oranında artmıştır.



Şekil 3 Farklı S/B oranlarına sahip Y-RPB karışımların eğilme ve basınç dayanımları.

Kür koşullarının Lif-matris Aderansına Etkisi

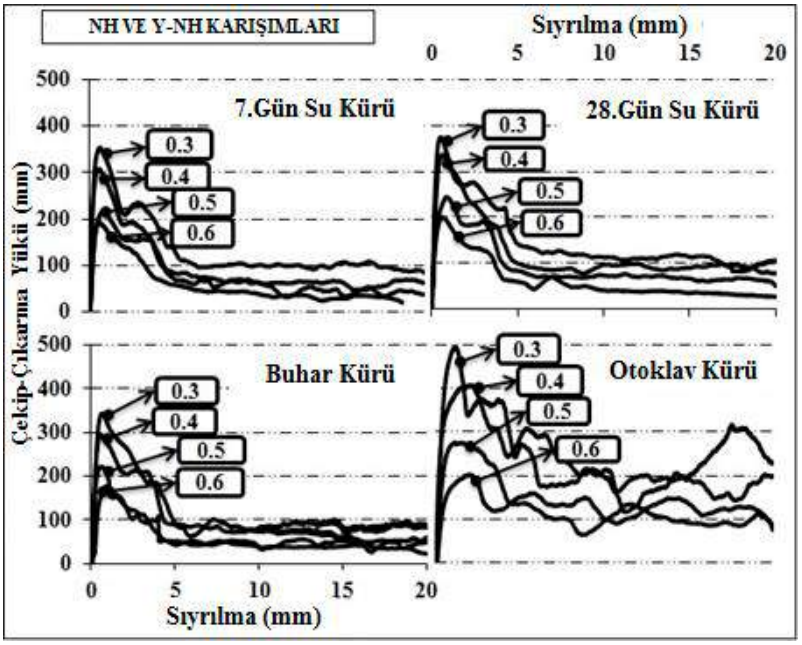
7 ve 28 gün su kürü, otoklav ve buhar kürleri geçirmiş NH ve Y-NH karışımlarına gömülü çelik lifin yük-sıyrılma eğrileri Şekil 4'da sunulmaktadır. Kancalı çelik lifin çekip-çıkarma deneyinden elde edilen yük-sıyrılma eğrisi üç ana kısımdan oluşmaktadır. İlk önce kısmen lineer bir artış ile yük maksimum seviyeye ulaşmaktadır. Bu bölgede sıyrılmadan ziyade lifte uzama gerçekleşebilmektedir (Cunha vd., 2010). Maksimum yük aşılınca yük değerlerinde düşüş gözlenmektedir. Bu bölgede aderans bağları azalmakta ve çelik lif matristen sıyrılmaktadır. Tepe yükünden düşüşe geçildiği bölgede, 3-4 mm sıyrılma aralığında, ikinci tepe noktası gözlenebilmektedir. İkinci tepe noktasının nedeni, matris tarafından zorlanan kanca ucunun düzelmesidir (Cunha vd., 2010). Üçüncü bölge ise yükün bir miktar daha azaldığı ve ardından eğrinin yataylaştığı bölgedir. Bu bölgede aderans bağlarının tamamen bozulduğu ifade edilebilir. Sıyrılmanın bu aşamasında yük, lif ile matris arasında meydana gelen ve lif dışarıya çıkana kadar devam eden sürtünme kuvveti ile oluşmaktadır.

Şekilde görüldüğü gibi S/Ç oranı düştükçe çekip-çıkarma yükü artmaktadır. Düşük S/Ç oranı daha rijit lif-matris arayüzeyine sebep olmaktadır. 0.5NH ve 0.6Y -NH karışımların davranışları birbirine oldukça yakındır. S/Ç oranın 0.5'den 0.4'e düşürülmesi aderans özelliklerini büyük oranda geliştirmiştir. Eğrilerden görüldüğü gibi buhar kürü geçirmiş örneklerin çekip-çıkarma davranışı su kürüne benzemektedir. Mekanik özelliklerde gözlemlenen dayanım düşüşü (su kürüne kıyasla), aderans sonuçlarında da görülebilmektedir.

Otoklav kürü sonrası mekanik özelliklerde şiddetli düşüş (28-gün su kürüne kıyasla beklenen bir sonuç olarak) olmasına rağmen, S/Ç oranı 0.5, 0.4 ve 0.3 olan karışımların aderans özellikleri gelişmiştir. S/Ç oranı düştükçe artışlar belirginleşmiştir. Otoklav küründe gözlemlenen aderans gelişmesinin nedeni, lif-matris ara -yüzeyinde oluşan hidratasyon ürünleri ile açıklanabilmektedir (iç yapı incelemesinde daha ayrıntılı bilgi

sunulmuştur). S/Ç oranı 0.5, 0.4 ve 0.3 olan otoklav kürü geçirmiş NH ve Y-NH karışımlarına gömülü çelik liflerin maksimum aderans yüklerinde (28 su kürü sonuçlarına kıyasla) sırayla %14, %20 ve %20 oranlarında artış gözlemlenmiştir. Sıyrılma tokluğu için bu oranlar %39, %84 ve %124 olarak hesaplanmıştır. S/Ç oranı 0.6 olan karışımın otoklav kürü sonucunda rijitliğinin azalması nedeni ile gömülü çelik lifin kanca ucu açılması tam olarak gerçekleşmemiştir. Kür etkisinin önemi şekilde açıkça görülebilmektedir.

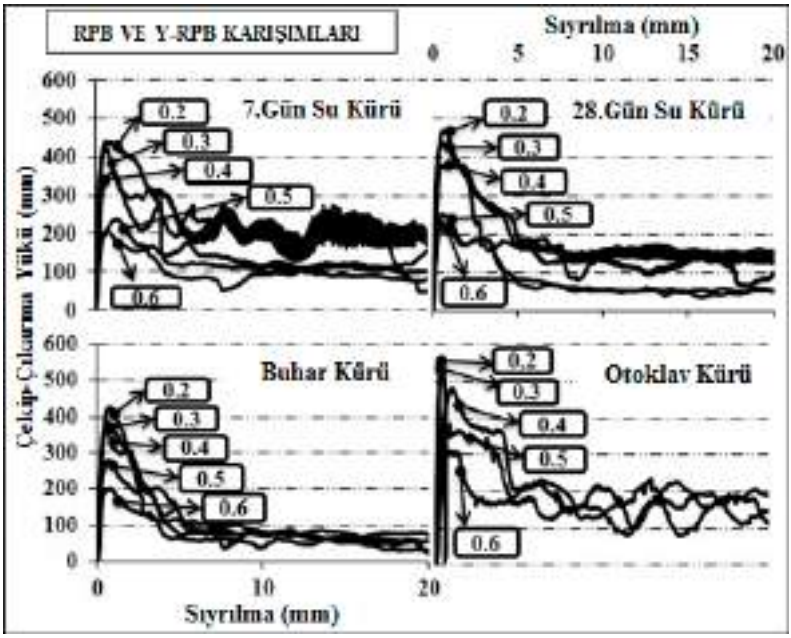
7 ve 28 gün su kürü, otoklav ve buhar kürleri geçirmiş RPB ve Y-RPB karışımlarına gömülü çelik lifin yük-sıyrılma eğrileri Şekil 5'de sunulmaktadır. S/B oranı düştükçe aderans yükü artmaktadır. Düşük S/B oranı daha rijit lif-matris ara -yüzeyine sebep olmaktadır. 7 ve 28 günlük su kürü sonuçlarına bakıldığında, 0.5Y-RPB ve 0.6Y -RBP karışımların davranışları birbirine oldukça yakındır. Diğer taraftan 0.2RPB ve 0.3RPB karışımların davranışları birbirine benzemektedir. S/B oranın 0.5'den 0.4'e düşürülmesi aderans özelliklerini büyük oranda geliştirmiştir. Buhar kürü geçirmiş numunelerin ortalama maksimum çekip-çıkarma yükü ve sıyrılma tokluğu değerleri 28 gün su kürü değerlerine kıyasla daha düşük mertebelerdedir.



Şekil 4 NH ve Y -NH karışımlarına gömülü çelik lifin yük-sıyrılma eğrileri.

Otoklav kürü sonrası tüm karışımların (28 su kürüne kıyasla) aderans özelliklerinde büyük oranda artışlar gözlemlenmektedir. S/Ç oranı düştükçe artışlar belirginleşmiştir. 0.2 ve 0.3 S/B oranına sahip karışımlara gömülü çelik liflerde kopma meydana gelmiştir. Otoklav kürü maksimum sıyrılma yükünde büyük bir artış sağlamakta ve lifin deney sırasında sıyrılmadan kopmasına neden olmaktadır bu sonuç aderans dayanımın lifin çekme dayanımından daha yüksek olduğunu göstermektedir. 0.2RPB ve 0.3Y-RPB karışımlarında düşük S/B oranı ve ara-yüzeyde oluşan hidratasyon ürünleri sonucunda lifin çekme dayanımının aşılması sonucu ani kopma oluşmuştur (iç yapı incelemesinde daha ayrıntılı

bilgi sunulmuştur).Otoklav kürü geçirmiş Y-RPB karışımlarına gömülü çelik liflerin maksimum aderans yüklerinde (28 su kürü sonuçlarına kıyasla) %19-43 oranlarında artış gözlemlenmiştir. Sıyrılma tokluğu değerleri kopan lifler için oldukça düşüktür.

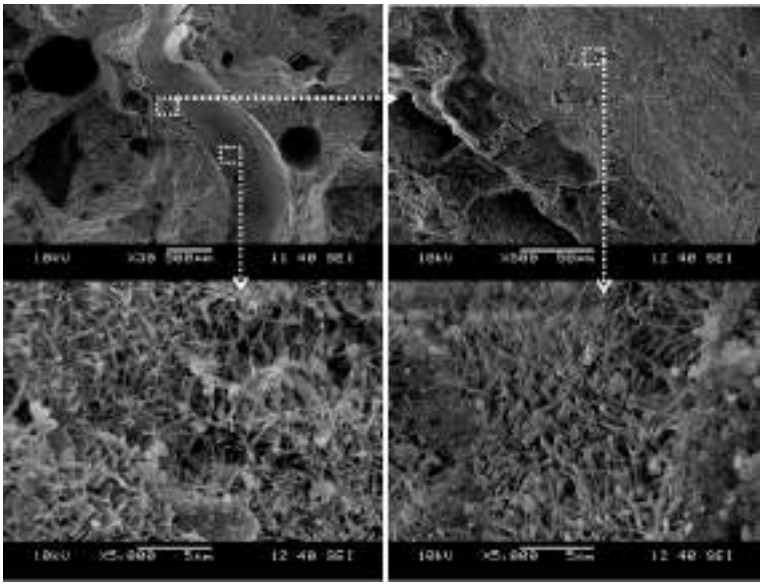


Şekil 5 RPB ve Y -RPB karışımlarına gömülü çelik lifin yük-sıyrılma eğrileri.

İç Yapı İncelemeleri

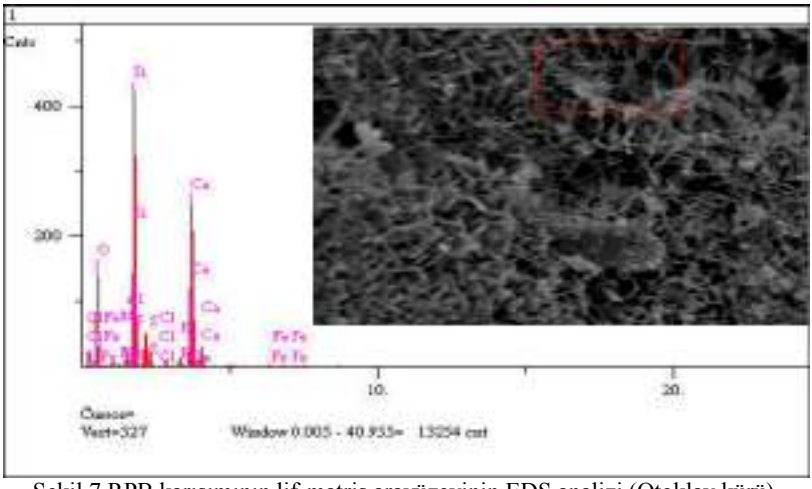
JEOL JSM 6060 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak seçilen bazı karışımlarda iç yapı incelemesi yapılmıştır. Otoklav k ürü uygulaması ile 28 günlük dayanıma kısa bir sürede ulaşmak mümkündür. Otoklav kürü hidratasyon reaksiyonlarını hızlandırmakta ve kimyasal özellikleri değiştirmektedir (Neville, 1995). SiO_2 takviyesi (silika dumanı, ince kuvars tozu vb.) olmaması durumunda, amorf C-S-H fazlarının yerine kristal α-dikalsiyum silikat hidrat oluşmaktadır (Odler, 2004). Bu ürünlerin oluşması dayanımda olumsuz etki yaratabilmektedir. Bu davranış mekanik özellikleri otoklav kürü sonrası önemli bir şekilde düşen NH ve Y-NH karışımlarında görülmüştür. Otoklav kürü uygulanması durumunda, silis dumanı, uçucu kül ve kuvars tozu gibi SiO_2 takviyesi içeren karışımlarda ise puzolanik reaksiyon sonucu tobermorite ($C_5S_6H_5$) ürünleri oluşmaktadır. Bu ürünlerin oldukça düşük Ca/Si oranı (0,8-1) mekanik özellikleri geliştirmektedir (Odler, 2004). Bu davranışa ise RBP karışımlarında rastlanmıştır.

Şekil 6'da otoklav kürü geçirmiş RPB karışımın (S/B oranı = 0.2) lif-matris arayüzeyinin SEM görüntüsü sunulmaktadır. Tüm arayüzeyde yoğun tobermorit jeli oluşumuna rastlanmaktadır. RPB karışımında aderans artışı, arayüzeydeki hidratasyon ürünü birikmesi ile açıklanabilmektedir.



Şekil 6 RPB karışımının lif-matris arayüzeyinin SEM görüntüsü (Otoklav kürü).

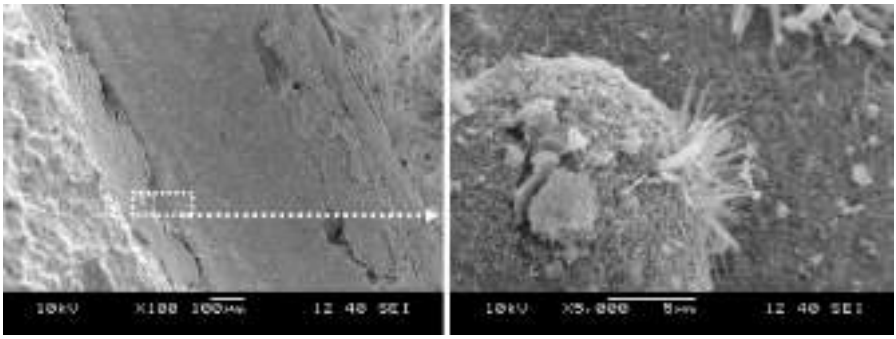
EDS analiz leri, bu ürünlerin düşük Ca/Si oranına (0,88) sahip olduklarını ortaya koymaktadır (Şekil 7). İç yapı analizleri lif-matri s arayüzeyinde hidratasyon ürünü birikmesi olayının tüm karışımlarda geçerli olduğunu ortaya koymaktadır.



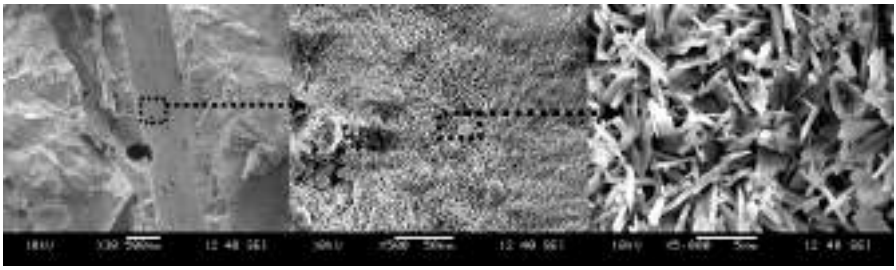
Şekil 7 RPB karışımının lif-matris arayüzeyinin EDS analizi (Otoklav kürü).

S/B oranı 0.3 olan otoklav kürü geçirmiş Y-RPB karışımın lif-matris aray üzeyinin SEM görüntüsünü Şekil 8'de sunulmaktadır. Tüm arayüzeyde lifsi yapıda tobermorit jeli oluşumuna rastlanmaktadır. Lif-matris aderansında büyük artışın nedeni iç yapı analizleri

ile açıklanabilmektedir. Benzer durum, S/B oranı 0.4 olan otoklav kürü geçirmiş Y-RPB karışımı için de söz konusudur (Şekil 9).



Şekil 8 0.3Y-RPB karışımının lif-matris arayüzeyinin SEM görüntüsü (Otoklav kürü).



Şekil 9 0.4Y-RPB karışımının lif-matris arayüzeyinin SEM görüntüsü (Otoklav kürü).

Sonuçlar

Çelik liflerin aderans özellikleri daha uzun su kürü ile gelişmektedir. Buhar kürü geçirmiş örneklerin çekip-çıkarma davranışı su kürüne benzer elde edilmiştir. Mekanik özelliklerde gözlemlenen dayanım düşüşü (su kürüne kıyasla), aderans sonuçlarında da görülebilmektedir. Otoklav kürü sonrası, normal harçların dayanımlarında beklenen düşüşe rağmen (28 su kürüne kıyasla), S/Ç oranı 0.5, 0.4 ve 0.3 olan karışımların aderans özellikleri gelişmiştir. S/Ç oranı düştükçe artışlar belirginleşmiştir. İç yapı incelemeleri otoklav küründe gözlemlenen aderans gelişmesinin, lif-matris ara-yüzeyinde oluşan hidratasyon ürünlerinin bir sonucu olduğunu göstermektedir. Artışlar RPB karışımlarında daha belirgindir. Tüm arayüzeyde yoğun tobermorit jeli oluşumuna rastlanmaktadır. RPB karışımında aderans artışı, arayüzeydeki hidratasyon ürünü birikmesi ile açıklanabilmektedir.

Teşekkür Bu çalışma TÜBİTAK'ın desteklediği 112M598 nolu araştırma projesinin bir bölümüdür. Yazarlar öncelikle, çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'na teşekkür eder. Ayrıca yazarlar Sn. Okan Duyar, Sn. Osman Tezel ve BASF firmasına; Sn. Mehmet Yerlikaya ve Bekaert Tic. firmasına; Sn. Ümit Ürün ve Pomza Export firmasına; Modern Beton A.S.'ye teşekkür eder.

Kaynaklar

Abu-Lebdeh, T., Hamoush, S., Heard, W., Zornig, B. (2011) Effect of matrix strength on pullout behavior of steel fiber reinforced very -high strength concrete composites. Construction and Building Materials . Vol. 25, No. 1, pp. 39 -46.

Beglarigale, A. and Yazıcı, H. (2013) The effect of alkali–silica reaction on steel fiber – matrix bond characteristics of cement based mortars. Construction and Building Materials . Vol. 47, pp. 845- 860.

Bentur, A., Wu, S.T, Banthia, N., Baggott, R., Hansen, W., Katz, A., et a l. (1995) Fibrematrix interfaces, High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites . Chapman and Hall, London, UK.

Chan, Y.W., Li, V.C. (1997) Effects of transition zone densification on fiber/cement paste bond strength improvement. Advanced Cemen t Based Materials . Vol. 5, No. 1, pp. 8 -17.

Cunha, V., Barros, J., Sena- Cruz, J.M. (2010) Pullout behavior of steel fibers in self compacting concrete. Journal of Materials in Civil Engineering . Vol. 22, No 1, pp. 1 -9.

Kim, J J., Kim, D J., Kang, S T., Lee, J H. (2012) Influence of sand to coarse aggregate ratio on the interfacial bond strength of steel fibers in concrete for nuclear power plant. Nuclear Engineering and Design . Vol. 252, pp. 1 -10.

Lehmann, C., Fontana, P., Muller, U. (2009) Evolution of phases and microstructure in hydrothermally cured Ultra -High Performance Concrete (UHPC). Nanotechnology in construction . Vol. 3, pp. 287 -93.

Neville, AM. (1973) Properties of concrete . John Wiley & Sons, New York , USA.

Odler I. (2004) Hydration settin g and hardening of Portland cement. Lea's chemistry of cement and concrete . 4th Edition, Elsevier Science & Technology Books, UK.

Tuyan, M. and Yazıcı H. (2012) Pull-out behavior of single steel fiber from SIFCON Matrix. Construction and Building Material s. Vol. 35, pp. 571 -577.

Çelik Lifli Betonun Basınç Birim Şekil Değiştirme-Elektriksel Direnç İlişkisi

Özkan Ayberk Kolatar[1], Egemen Teomete[2*], Serap Kahraman[2]
[1]Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Buca İzmir
[2]Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Buca İzmir
*Tel: (232) 301 70 60
*E-Posta: egemen.teomete @deu.edu.tr

Öz

Depremler, malzeme bozulmaları ve diğer çevresel etkiler yapıların performansını tehdit eder. Yapı sağlığının izlenmesi, can ve mal güvenliği açısından önemlidir. Yapı sağlığının izlenmesi için kullanılan gerinim pulları, düşük dayanıklılığa, düşük duyarlılığa ve yüksek maliyete sahipler. Gerinim pulları yüzeyden noktasal ölçüm alırlar. Bu çalışmada, farklı hacimsel oranlarda çelik lif içeren betonların birim uzama – elektriksel direnç ilişkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çelik lifli betonun birim uzama – elektriksel direnci arasında çok güçlü doğrusal ilişki tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kendi hasarını ve birim uzamasını ölçen "Akıllı Betonun" geliştirilmesi için önemlidir.

Anahtar sözcükler: Akıllı beton, birim uzama, elektriksel direnç, basınç testi, çelik lif

Giriş

Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan köprülerin %30'u yapısal olarak güvensizken, malzeme bozulmaları nedeniyle betondan yapılmış alt yapılar, tasarım ömürleri dolmadan yıpranmıştır (Reza ve diğ., 2003). Yapıların performansı, depremler, malzeme bozulmaları ve diğer çevresel etkiler nedeniyle olumsuz etkil enir. Yapı sağlığının izlenmesi, can ve mal güvenliğinin sağlanması için çok önemlidir. Alt yapının bakım ve onarımında kullanılacak bütçenin planlanması için de, yapı sağlığının izlenmesi önemlidir. Yapı sağlığının izlenmesinde kullanılan metal gerinim pulları, düşük dayanıklılığa, düşük hassasiyete ve yüksek maliyete sahipler. Bu nedenlerle, metal gerinim pulları kısa süreler için, yüksek maliyetlerle kullanılabilinirler (Chung, 2001).

Çimento harcının elektriksel direnci, karbon lif eklenmesi ile düşer. Çimento harcına karbon lif eklenmesi elek triksel direnci düşürür. Karbon lifli çimento harcına yük uygulanması ile elektriksel diren ci değişir, buna piezo -resistiv etki denir (Chung, 1998; Fu and Chung , 1997; Fu ve diğ. 1997).

Çimentolu malzemelerin elektriksel dirençleri 2 ve 4 elektrot metoduyla ölçülmüştür. İki elektrot metodunda, akım verilmesi ve voltaj okuması aynı elektrotlardan yapılırken, dört elektrot metodunda akım verilmesi ve voltaj okuması farklı elektrot çiftleri ile yapılır (Han ve diğ. 2007; Chiarello ve Zinno, 2005). Çevresel ve batırılmış elektrot metotları kullanılmıştır. Çevresel elektrot metodunda, iletken bant veya boya, malzemenin etrafına sarılır. Batırılmış elektrot metodunda, iletken ağ, tel veya çubuk, malzemeye batırılır (Chen ve Liu, 2008; Teomete ve Erdem, 2011; Li ve diğ., 2008; Li ve diğ., 2006). Teomete ve Koc yigit (2013), yarmada çekme testi ile çelik lifli çimentolu malzemelerin çekme birim uzamasına duyarlılığını test etmişlerdir; yüksek duyarlılık tespit etmişlerdir. Teomete (2013), çimentolu kompozitlerin çatlak boyu-elektriksel direnç ilişkisinin güçlü doğrusal ilişki olduğunu sunmuştur. Teomete (2014), çelik lifli çimentolu kompozite birim uzamanın elektrik akımına dik yönde uygulanması durumunda elektriksel dirence etkisini basınç ve yarmada çekme testleri ile test etmiştir ve "çapraz etki mekanizmasını" sunmuştur.

Literatürde, çimentolu kompozitlerin birim uzama - elektriksel direnç etkisi çimento harcı ve hamuru üzerinde çalışılmış, beton üzerinde ilk defa bu projede çalışılmaktadır. Bu çalışmada, farklı çelik lif oranları içeren betonun, basınç birim uzama - elektriksel direnç ilişkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çelik lifli betonun basınç birim uzama-elektriksel direnç ilişkisi güçlü doğrusal ilişki göstermektedir. Sunulan sonuçlar, kendi birim uzamasını ve hasarını ölçen "Akıllı Betonun" geliştirilmesi için ümit vericidir.

Malzeme ve Metot

Bu çalışmada 6 farklı karışım tasarlandı ve deneysel olarak incelendi. Karışımlarda CEM II B-M (L-W) 42,5R çimento kullanıldı. TS 802 "Beton Karışım Tasarımı Hesapları" kullanılarak, su /bağlayıcı oranı 0.37; silika dumanı / çimento oranı %10; akışkanlaştırıcı/bağlayıcı oranı %1; 0-5 mm ve 5-15 mm Batı betondan alınan agrega kullanıldı. Akışkanlaştırıcı olarak ViscoCrete HighTech 30 kullanıldı. Karışımlardan biri (M0) lifsiz, diğerlerinde 6 mm uzunluğunda, çapı 290 µm olan çelik lif kullanıldı. Çelik lifler pirinç kaplıdır. Karışımlar M0, S0.2-S0.35-S0.5-S0.8-S1 de çelik lifin toplam hacime oranı sırasıyla %0, %0.2, %0.35, %0.5, %0.8, %1 dir.

Örgü açıklığı 5 mm, çapı 0.6 mm olan saf bakır telden yapılmış bakır ağ, elektrot olarak kullanıldı. Boyutları 7.5 cm olan küp örnek kalıplarına elektrot geçirebilmek için, kalıp yan duvarlarında 2 mm genişliğinde kanallar açıldı (Şekil 1a). Bakır ağ elektrotlar, kanallardan geçirilip, kalıp içine Şekil 1a da görüldüğü gibi yerleştirildi. Standardlara uygun olarak hazırlanan karışım, kalıba 2 kademede döküldü, her kademede 15 er kere tokmaklandı ve sarsma tablasında sarsıldı (Şekil 1b). Örnekler dökümden 24 saat sonra kalıptan çıkartıldı ve 28 gün su içinde kür edildi.

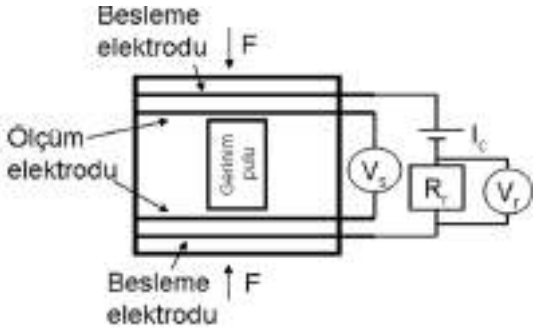
300kN kapasiteli Shimadzu mekanik test cihazı basınç testinde kullanıldı. Yükleme hızı 0.5 mm/dak alındı. Deney sırasında, örneği elektriksel olarak çelik yükleme plakalarından izole etmek için cam lif epoksi kompozit plakalar, örnek ile çelik plakalar arasına Şekil 2a da görüldüğü gibi yerleştirildi. Basınç deneyinde eş zamanlı olarak örnek elektriksel direncini ölçmek için örneğe dış iki elektrottan doğru akım verilip, iç iki elektrottan örnek potansiyel farkı (Vs) ölçüldü (Şekil 2b). Örneğe seri bağlı referans direncin (Rr=1000 Ohm) potansiyel farkı (Vr) ölçülmüştür. Örneğe gerinim pulu bağlanmış ve örnek birim uzaması ölçülmüştür. Deney süresince, uygulanan mekanik

yük, başlık yer değiştirmesi, birim şekil değiştirme, potansiyel farklar (Vs, Vr) saniyede 10 defa bilgisayara kaydedilmiştir.



Şekil 1 a) Saf bakır elektrotlar 75 mm küp kalıplar içinde b) Kalıba karışım döküldükten sonra.





Şekil 2 a) Küp örnek basınç testinde. b) Testte kullanılan devre şeması.

Devreden herhangi bir anda g eçen akım (Ic), Ohm kanunu kullanılarak Eşitlik 1'den hesaplandı. Örneğin elektriksel direnci, akım ve örnek gerilimi kullanılarak Eşitlik 2 den hesaplandı. Örneğin direncindeki % değişim, Eşitlik 3'den bulunur. R_{so}, örneğin yük uygulanmadan önceki direncidir.

$$I_c = \frac{V_r}{R_r} \tag{1}$$

$$R_s = \frac{V_s}{I_c} \tag{2}$$

$$\%R = \left(\frac{R_s}{R_{s0}} - 1 \right) \times 100 \tag{3}$$

Birim şekil değiştirme ölçerlerin (gerinim pullarının) performansı duyarlılık (K) ve doğrusallık (LE) ile ölçülür. Elektriksel direncin bir birim şekil değiştirme ile değişimi

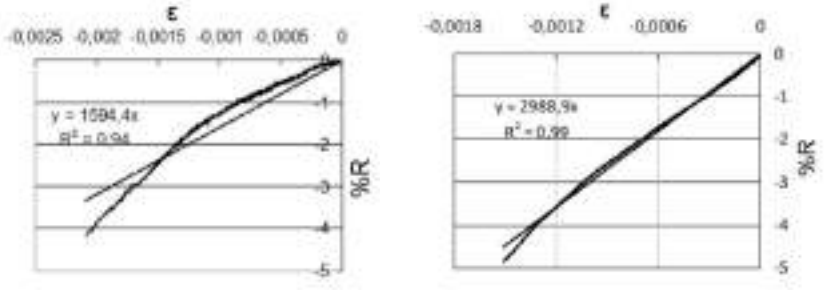
duyarlılıktır (K) ve Eşitlik 4 ile hesaplanır. Metal gerinim pullarının duyarlılığı genelde 2 dir. Duyarlılığın yüksek olması, algılayıcının duyarlı olduğunu gösterir. Doğrusallık (LE), %R - birim şekil değiştirme grafiğinin, kendisine en uygun doğrudan maksimum sapma miktarını gösterir. Doğrusallık azaldıkça, algılayıcı ile belirlenen birim şekil değiştirme hatası azalır. Limit değer (SL), algılayıcının düşük hata ile yapabileceği en büyük birim deformasyon değerine denir. Tipik metal gerinim pullarının limit değerleri %0.5-%3 arasındadır.

$$K = \frac{\left(R_s - R_{so}\right) / R_{so}}{\Delta\varepsilon} \tag{4}$$

Sonuçlar ve Tartışma

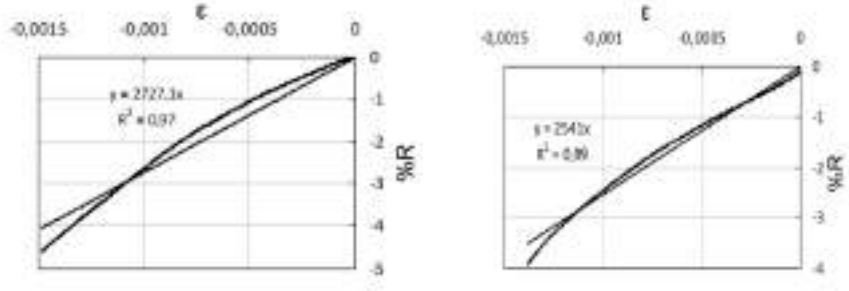
Basınç testlerinden, %R-birim uzama ilişkisini gösteren grafikler, duyarlılık, doğrusallık gibi sensör performans parametreleri bu bölümde lif oranı değişken alınarak sunulmuştur.

Lifsiz karışım ile hazırlanan örneğin %R- birim uzama grafiği Şekil 3a da sunulmuştur. Lifsiz örneğin duyarlılığı 20, doğrusallğı %21, korelasyon katsayısı 0.94 dür. 6 mm çelik lifden %0.2 içeren S0.2 karışımının duyarlılığı 32, doğrusallığı %7, korelasyon katsayısı 0.99, limit değeri 0.0015 dir. Şekil 3b de görüldüğü gibi, birim uzama ile %R arasında güçlü doğrusal bir ilişki vardır.



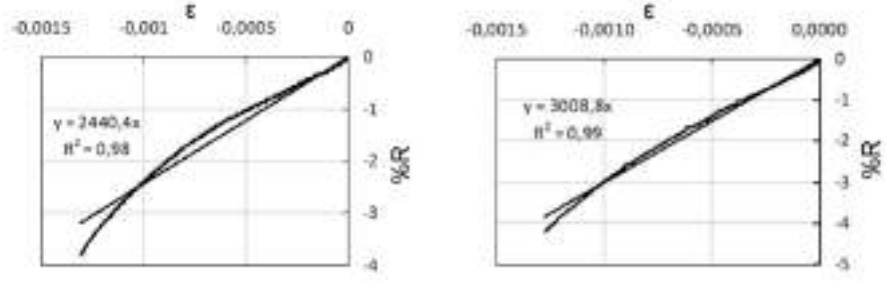
Şekil 3. %R- birim şekil değiştirme grafiği a) Lifsiz karışım K=20, LE=%21 , SL=0.0021 b) S0.2, 6 mm çelik lif %0.2 hacimsel oranda , K=32; LE=%7, SL=0.0015.

S0.35 karışımı, 6 mm çelik liften %0.35 hacimsel oranda içerir. Duyarlılığı 31, doğrusallığı %12, limit değeri 0.0014 dür (Şekil 4a). %0.5 hacimsel oranda 6 mm çelik lif içeren karışımın duyarlılığı 28, doğrusallığı %11, limit değeri 0.0013 dür (Şekil 4b). Şekil 4b de görüldüğü gibi korelasyon katsayısı 0.99 dur ve %R – birim şekil değiştirme arasında çok güçlü doğrusal korelasyona işaret eder.



Şekil 4. %R- birim şekil değiştirme grafiği a) S0.35, 6 mm çelik lif %0.35 hacimsel oranda, K=31; LE=%12, SL=0.0014. b) S0.5, 6 mm çelik lif %0.5 hacimsel oranda, K= 28; LE=%1 1, SL=0.001 3.

Çelik lif hacimsel oranı %0.8 olan S0.8 karışımının duyarlılığı 29, doğrusallığı %16, limit değeri 0.0013 dür. Korelasyon katsayısı 0.98 dir (Şekil 5a). S1 karışımı, %1 hacimsel oranda çelik lif içerip, duyarlılığı 33, doğrusallığı %9, limit değeri 0.00127 dir (Şekil 5b). Birim uzama- %R arasında korelasyon katsayısı 0.99 olan çok güçlü bir doğrusal ilişki vardır.



Şekil 5. %R- birim şekil değiştirme grafiği a) S0.8, 6 mm çelik lif %0.8 hacimsel oranda, K=29; LE=%16, SL=0.0013. b) S1, 6 mm çelik lif %1 hacimsel oranda , K= 33; LE=% 9, SL=0.00 127.

6 mm çelik lif içeren betonun %R - birim uzama grafiği güçlü doğrusal ilişki gösterir. Birim uzama duyarlılığı, metal gerinim pullarına göre16 kat daha fazladır. Limit değerleri metal gerinim pullarına yakındır. Çelik lifli beton, gösterdiği birim uzama hassasiyeti ile kendi birim uzamasını ölçen Akıllı Beton olmaya adaydır.

Sonuçlar

Bu çalışmada, lifsiz bir beton karışımı, 6 mm uzunluğunda çelik lifli 5 beton karışımı, toplamda 6 karışım tasarlanmıştır. Karışımların her birinden 3 er adet 75 mm boyutlarında küp beton numune dökülmüş ve kür edilmiştir. Örneklere basınç testi uygulanırken, elektriksel direnç ve birim uzama ölçümleri eş zamanlı alınmıştır. Basınç testi sırasında, beton içindeki mikro çatlakların ve boşlukların kapanması, liflerin kısalması ile betonun elektriksel direnci azalır. Bu etkiye piezoresistiv etki denir.

6 mm uzunluğunda çelik lifli beton örneklerin elektriksel direnç değişimi- birim uzama ilişkilerinin çok güçlü doğrusal ilişkiler olduğu tespit edilmiştir. Metal gerinim pullarının duyarlılıkları 2 iken, çelik lifli beton örneklerde duyarlılık minimum 20, maksimum 33 elde edilmiştir. Çelik lifli beton, metal gerinim pullarına göre çok daha duyarlıdır. Bu çalışma, kendi hasarını ve birim uzamasını ölçen akıllı betonun geliştirilmesi yönünde atılan bir adımdır. Beton sınıfına giren, içinde 5-15 mm arası agrega içeren çimentolu kompozitlerde sunulan basınç testleri ilk defa bu çalışmada yapılmıştır.

Teşekkürler

Bu çalışmaya verdikleri destekten ötürü TÜBİTAK (proje no: 213M452), Batıçim Batı Anadolu Çimento Sanayii A.Ş., Sika Yapı Kimyasalları A.Ş., Bekaert İzmit Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş., BASF Türk Kimya Sanayi ve Ticaret Ltd. Sti. ye teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Chen, B. ve Liu, J. (2008) Damage in carbon fiber –reinforced concrete, monitored by both electrical resistance measurement and acoustic emission analysis , Constr. and Build. Mater. , No. 22, pp. 2196-2201.

Chiarello, M., Zinno, R. (2005) Electrical conductivity of self -monitoring C FRC . Cem. and Concr. Comp. , No.27, pp. 463 -469.

Chung, D.D.L. (1998) Self-monitoring structural materials . Mater. Sci. Eng. pp. 57 -78.
Chung, D.D.L. (2001) Review functional properties of cement –matrix composites . J. Mater. Sci. , No. 36, pp.1315 -1324.

Fu, X., Chung, D.D.L. (1997) Effect of curing age on the self -monitoring behavior of carbon fiber reinforced mortar . Cem. and Concr. Res. , No. 27, (9), pp.1313 -1318.

Fu, X., Ma, E., Chung, D.D.L. , Anderson, W.A. (1997) Self-monitoring in carbon fiber reinforced mortar by reactance measurement. Cem. and Concr. Res. , No. 27, (6), pp. 845-852.

Han, B., Guan, X. , Ou, J. (2007) Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors . Sens. and Actuators A 135, pp. 360-369.

Li, H. , Xiao, H. , Ou, J. (2006) Effect of compressive strain on electrical resistivity of carbon blackfilled cement –based composites, Cem. and Concr. Comp. No. 28, s. 824 - 828.

Li, H. , Xiao, H. , Ou, J. (2008) Electrical property of ce ment-based composites filled with carbon black under long -term wet and loading condition . Comp. Sci. and Tech., No. 68, pp. 2114- 2119.

Reza, F., Batson, G.B., Yamamuro, J.A., Lee, J.S. (2003) Resistance changes during compression of carbon fiber cement c omposites . J. Mater. Civil. Eng. , No.15, (5), pp. 476-483.

Teomete, E. (2013) Relations of Crack Length and Electrical Resistance for Smart Cement Based Composites. Cement Wapno Beton , Vol. 6, pp. 329 -334.

Teomete, E. (2014) Transverse Strain Sensitivit y of Steel Fiber Reinforced Cement Composites Tested by Compression and Split Tensile Tests . Construction and Building Materials, Vol . 55, 31 pp. 136–145.

Teomete, E. ve Erdem, T.K. (2011) Cement Based Strain Sensor: A Step to Smart Concrete , Cement Wapno Beton , No. 2, pp. 78 -92.

Teomete, E., Kocyigit, O.I. (2013) Tensile strain sensitivity of steel fiber reinforced cement m atrix composites tested by split tensile test. Construction and Building Materials, Vol. 47, pp. 962 –968.

Yüksek Fırın Cürufu Üretimindeki Standart Sapmanın Beton Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi ve Girdilere Göre 90-Günlük Dayanımın Modellenmesi

Fulya GÜLEN[1] Erman DERİN[1] Önder KIRCA[1]
[1] ÇİMSA Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş., Mersin.
Tel: (0324) 454 00 60
E-Posta: cimsa@cimsa.com.tr

Öz

Bu çalışmada, çimento yerine farklı aktivite indeksi ve blaine değerlerine sahip yüksek fırın cürufu yerleştirerek çeşitli karışımlar elde edilmiş ve 28, 56 ve 90-Günlük beton basınç dayanımı değerleri ölçülmüştür. Çalışmanın amacı, yüksek fırın cürufunun değişkenlik gösteren aktivite indeksi ve blaine değerleri ile beton basınç dayanımı arasında bağıntılar bulunması ve bu bağıntıların formülize edilmesidir. Aktivite indeksi ve blaine değeri parametrelerine bağlı olarak basınç dayanımı matematiksel olarak modellenmiştir. Seçilen beton basınç dayanımı özelliği üzerinde etkin olan değişken yüksek fırın cürufu parametrelerinin bulunmasında regresyon analizi yaklaşımı kullanılmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarına göre yüksek fırın cürufu özelliklerinin, 28, 56 ve 90-Günlük ileriki yaş beton mukavemetlerine olan etkisi yorumlanmıştır.

Anahtar sözcükler: Yüksek fırın cürufu, aktivite indeksi, blaine değeri, beton basınç dayanımı

Abstract

In this study, various mixtures were obtained by blast furnace slag has different activity index and blaine values replacement of cement and 28, 56 and 90 -day compressive strength of the concrete were measured. The purpose of the study is to obtain the correlation between varying activity index and blaine values of blast furna ce slag and the compressive strength of the concrete and to formulate these correlations. The compressive strength of the concrete is mathematically modeled depending on the parameters of activity index and blaine values. Regression approach was used to ob tain the parameters of blast funace strength have an i mpact on the selected concrete compressive strength property . According to the results obtained from the analysis , the effect of the properties of blast furnace slag has been interpreted on the concrete 28, 56 and 90 -Day ultimate age strength.

Key Words : Blast furnace slag, activity index, the blaine value, concrete compressive strength

Giriş

YFC'lerin kimyasal kompozisyonu yüksek fırının şartlarına ve ham maddelerin kaynağına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Newman ve Choo, 2003). Değişik

ülkelerde üretilen bazı cüruflara ait kimyasal kompozisyonlar, Portland çimentosununki ile birlikte karşılaştırmalı olarak Tablo 1'de verilmiştir. GYFC'de en fazla yer alan oksitler, CaO, SiO_2 ve Al_2O_3'dir. %30- %40 oranlarında yer alan CaO, ince öğütülmüş durumundaki GYFC'nin kendiliğinden de bir miktar bağlayıcılık göstermesine yol açmaktadır. GYFC'nin bağlayıcılık özelliğini etkileyen faktörler; cürufun kimyasal kompozisyonu, reaksiyon sistemindeki alkali konsantrasyonu, cüruf yapısının ne kadar amorf olduğu, cürufun öğütüldüğü incelik, hidratasyonun ilk safhası esnasındaki sıcaklıktır. Bu faktörlerin birbirleriyle gösterdiği ilişki çok komplekstir. Bu nedenle GYFC'nin betonda kullanılmaya uygunluğunu araştırmanın en iyi yolu, dayanım ve dayanıklılık kriterlerine uygun deneyler yürütmektir.

Tablo 1. YFC'lerin kimyasal kompozisyonu (Onat, 1998).

Bileşen	ABD ve Kanada	Güney Afrika	Avustralya	Türkiye	Portland Çimentosu
CaO	29-50	30-40	39-44	34-41	60-67
SiO_2	30-40	30-36	33-37	34-36	17-25
Al_2O_3	7-18	9-16	15-18	13-19	3-8
Fe_2O_3	0.1-1.5	-	0-0.7	0.3-2.5	0.5-6.0
MgO	0-19	8-21	1-3	3.5-7	0.1-4.0
MnO	0.2-1.5	-	0.3-1.5	1.0-2.5	-
S	0-2.0	1.0-1.6	0.6-0.8	1-2	-
SO_3	-	-	-	-	1-3

Geçmiş yıllarda, öğütülmüş GYFC'nin yeterli bağlayıcılık gösterebilip gösteremeyeceğini araştırmak için, kimyasal kompozisyonunun;
$(CaO+MgO+Al_2O_3)/(SiO_2)\geq 1$ koşulunu sağlaması istenmekteydi. Son yıllarda uygun kimyasal kompozisyona sahip olabilmenin yeterli olmadığı görüşü ağırlık kazanarak, GYFC'nin beton katkı maddesi olarak uygunluğunu belirlemek üzere "cüruf aktivite indeksini"nin araştırılmasının daha gerçekçi bir yaklaşım olduğuna karar verilmiştir (Erdoğan, 2003).

Araştırmalar, çok ince öğütülmüş YFC ile yapılan harçların basınç dayanımlarının, normal incelikteki YFC ile yapılanlara göre daha yüksek olduğunu ve çok ince öğütmenin erken yaşlardaki dayanım üzerinde olumlu etkiler yaptığını göstermektedir. Doğulu (1998), granüle YFC'lerin bağlayıcı özellikleri üzerine cüruf inceliğinin etkisi ile ilgili olarak yaptığı çalışmasında, granüle YFC'lerin inceliğinin artması durumunda, hem harçların basınç mukavemetinde hem de cüruf aktive indeksinde bir artış olduğunu bildirmiştir.

Nawy (2001), GYFC'nin inceliği arttıkça daha yüksek basınç dayanımların elde edilebileceğini söylemektedir. 300, 400, 500 ve 600 m^2/kg gibi farklı incelik değerlerine sahip YFC'leri, %50'den %80'e kadar değişen ikame oranlarında 300 m^2/kg incelikli çimento içerisinde kullanmak suretiyle ürettikleri cüruf katkılı betonların özellikleri üzerinde bir çalışma yapan Sakai ve ark. (1992), elde ettikleri deney sonuçlarına göre, artan cüruf inceliği ile birlikte basınç mukavemetinin de artışını bildirmişlerdir.

Yeau ve Kim (2005), 28.günde granüle YFC içeren betonların performanslarının, kontrol betonunun performansına benzer olduğunu, fakat 56. günde cüruf katkılı betonların, normal Portland çimentolu betona göre oldukça üstün performansa sahip olduğunu bildirmiştir. Araştırmacılara göre, %55 ikame oranına kadar tüm cüruf katkılı betonlar, 7 günden önce kontrol betonundan daha düşük basınç mukavemeti

sergilemiştir. Test sonuçları, granüle YFC'lerin gizli bağlayıcılık özelliğinin, artan cüruf ikame oranıyla birlikte erken yaşlardaki basınç mukavemeti gelişimini yavaşlattığı, ancak 28, 56 ve 91 gün gibi sonraki yaşlarda granüle YFC'li betonların basınç mukavemetlerinin, hiç cüruf katkısı içermeyen normal Portland çimentolu kontrol betonlarınınkine benzer ya da daha fazla olduğunu göstermiştir.

Deneysel Çalışma

Beton Bileşenleri

Çimento

Çalışmada, Çimsa Mersin Çimento Fabrikası tarafından üretilen, TS EN 197 -1'e uygun, CEM I 42.5 R portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 2. Çimentonun Kimyasal Özellikleri

Oksitler	%
CaO	61,91
SiO_2	19,31
Al_2O_3	5,23
Fe_2O_3	2,70
MgO	2,57
SO_3	3,31
K_2O	0,95
Na_2O	0,33
Kızdırma Kaybı	3,06
Çözünmeyen Kalıntı	0,68

Tablo 3. Çimentonun Fiziksel Özellikleri

Özellik	
Özgül Ağırlığı	3,11
Blaine Değeri (cm^2/gr)	3160
Priz Alma Süresi (dk)	
Başlangıç	210
Son	240
Su (%)	29,7
90 mikron (%)	0,5
45 mikron (%)	6,6
Basınç Dayanımı (MPa)	
2 günlük	25,9
7 günlük	38,5
28 günlük	50,4

Agregalar

Üç farklı boyutta (0-5, 5-15, 15-25 mm), TS 706 EN 12620'e uygun, kırma kireçtaşı agregası kullanılmıştır. Agregaların özgül ağırlık ve su emme kapasitesi TS EN 1097-6 standardına uygun olarak belirlenmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Özellik	0-5 mm	5-15 mm	15-25 mm
Doygun yüzey kuru özgül ağırlığı	2,70	2,70	2,71
Su emme kapasitesi (%)	1,73	0,67	0,50

Karışım Suyu ve Katkılar

Karışım suyu olarak, yağ, organik madde ve alkali içermeyen içme suyu kullanılmıştır. Beton karışımlarının hazırlanmasında, sodyum naftalin sülfonat bazlı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır.

Beton karışımlarının hazırlanmasında, İsdemir'den alınıp Çimsa Mersin Çimento Fabrikası'nda öğütülen, TS EN 15167-1'e uygun yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan YFC'lerin kimyasal özellikleri Tablo 5'te verilmiştir. YFC'nin ana bileşeni SiO_2'tir ve ağırlıkça SiO_2/Al_2O_3 oranı 3,88'dir. YFC'nin, kimyasal analizi sonucunda $(CaO+MgO)/SiO_2>1,00$ olduğundan puzolanik özelliğinin olumlu olduğu tespit edilmiştir (Erdoğan, 2003).

Tablo 5. YFC'lerin Kimyasal Özellikleri

Oksitler									
CaO (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	K_2O (%)	Na_2O (%)	TiO_2 (%)	Mn_2O_3 (%)	Kızdırma Kaybı (%)
35,57	41,90	10,79	6,36	1,70	0,70	0,32	0,66	2,16	0,51

28 farklı üretim gününe ait YFC özgül ağırlık değerleri 2,85-2,87 aralığında olup, ortalama değeri 2,85'tir.

Beton Karışımları

Deneysel çalışmada, TS 802'e uygun olarak hazırlanan beton karışım oranları Tablo 6'da verilmiştir. Kontrol karışımında bağlayıcı olarak, 320 kg/m^3 CEM I 42.5 R kullanılmıştır. S1 kodlu karışım, çimento yerine %25 oranında YFC ve S2 kodlu karışım, çimento yerine %50 oranında YFC içeren 320 kg/m^3 toplam bağlayıcı ile hazırlanmıştır. S1 ve S2 kodlu karışımlardan, 28 farklı üretim gününe ait YFC kullanılarak, 28 adet hazırlanmıştır.

Tablo 6. Beton Karışım Oranları (1m^3)

Karışım Kodu	Cimento (kg/m^3)	GYFC (kg/m^3)	Toplam Bağlayıcı (kg/m^3)	Eşdeğer Su/Bağlayıcı Oranı (*)	Su (kg/m^3)	Akış. Katkı	0-5^{mm} K.Kum (kg/m^3)	5-15^{mm} K.Taş (kg/m^3)	15-25^{mm} K.Taş (kg/m^3)
Kontrol	320	-	320	0,51	163	%1,6-%1,8	1076	250	596
S1	240	80	320	0,51	155		1087	252	601
S2	160	160	320	0,51	147		1097	255	607

(*)"Su/çimento oranı" yerine "su/(çimento + k x mineral katkı)" oranının kullanılması yoluyla "eşdeğer su/bağlayıcı oranı" hesaplanmıştır (TS EN 206). Eşdeğer su/bağlayıcı hesaplamasında, YFC için k-değeri 0,80 alınmıştır.

Deney Sonuçları, Bulgular ve Tartışmalar

Mineral katkı içermeyen kontrol karışımının 7, 28, 56, 90-Günlük basınç dayanım sonuçları Tablo 7 'de verilmektedir. Bu sonuçlara göre, 7/28, 7/56, 7/90 günlük dayanım oranları, sırasıyla 0,86, 0,84 ve 0,82 olarak hesaplanmıştır.

Deneylerde kullanılan 28 farklı üretim gününe ait YFC'lerin aktivite indeksi ve incelik (Blaine) değerleri, Tablo 8 ve Tablo 9'da verilmektedir.

Tablo 7. Kontrol Karışımı Basınç Dayanımı ve Dayanım Oranları

Deney No	7 Günlük	28 Günlük	56 Günlük	90 Günlük	7/28 Günlük	7/56 Günlük	7/90 Günlük
	Beton Basınç Dayanımı (MPa)				Dayanım Oranı		
Kontrol	36,7	42,9	43,7	44,8	0,86	0,84	0,82

YFC içeren beton karışımları tasarımında, YFC üretiminde oluşan standart sapma değerleri dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada, YFC incelik ve aktivite indeksi standart sapma değerleri sırasıyla 288,2 cm^2/gr ve % 2,40 olarak ölçülmüştür.

Tablo 8. YFC'lerin Fiziksel Özellikleri ve %25 YFC İçeren Karışımların Basınç Dayanımı

Deney No	YFC Blaine Değeri (cm^2/gr)	YFC 28 Günlük Aktivite İndeksi (%)	7-G	28-G	56-G	90-G	7/28 Günlük	7/56 Günlük	7/90 Günlük
			Beton Basınç Dayanımı (MPa)				Dayanım Oranı		
S1-1	4400	78	35,5	45,8	46,3	49,8	0,78	0,77	0,71
S1-2	4560	81	36,5	47,4	49,3	51,3	0,77	0,74	0,71
S1-3	4500	75	37,4	42,9	48,3	49,7	0,87	0,77	0,75
S1-4	4650	78	37,2	43,7	48,0	50,0	0,85	0,78	0,74
S1-5	4020	76	37,9	43,0	46,1	47,9	0,88	0,82	0,79
S1-6	4700	80	36,5	46,1	51,2	53,4	0,79	0,71	0,68
S1-7	3990	74	37,3	41,5	46,0	47,5	0,90	0,81	0,79
S1-8	4610	80	37,8	48,0	49,1	50,4	0,79	0,77	0,75
S1-9	4150	76	32,2	42,2	45,4	48,0	0,76	0,71	0,67
S1-10	4660	79	36,1	48,1	48,3	50,4	0,75	0,75	0,72
S1-11	3890	72	37,6	43,0	45,3	46,9	0,87	0,83	0,80
S1-12	3760	74	31,7	45,8	45,6	47,1	0,69	0,70	0,67
S1-13	4030	75	30,6	46,5	48,0	48,1	0,66	0,64	0,64
S1-14	4010	76	30,9	42,1	45,4	49,1	0,73	0,68	0,63
S1-15	4400	78	31,8	46,9	48,5	49,8	0,68	0,66	0,64
S1-16	4020	74	31,3	43,4	45,3	47,9	0,72	0,69	0,65
S1-17	3960	77	32,0	46,8	48,0	49,5	0,68	0,67	0,65
S1-18	4210	76	36,1	47,5	48,8	49,6	0,76	0,74	0,73
S1-19	4170	77	31,4	42,1	45,8	49,4	0,75	0,69	0,64
S1-20	4140	74	30,4	43,1	45,5	47,8	0,71	0,67	0,64
S1-21	4530	77	31,5	44,8	49,4	50,3	0,70	0,64	0,63
S1-22	4360	77	30,7	43,5	48,5	49,6	0,71	0,63	0,62
S1-23	4120	77	31,4	46,4	49,2	49,3	0,68	0,64	0,64
S1-24	3950	74	35,8	45,9	48,3	47,7	0,78	0,74	0,75
S1-25	3870	75	31,1	45,8	48,9	48,4	0,68	0,64	0,64
S1-26	4100	74	30,7	43,2	45,2	47,4	0,71	0,68	0,65
S1-27	3910	74	30,7	43,1	48,2	47,6	0,71	0,64	0,64
S1-28	3780	71	31,1	42,2	43,6	47,1	0,74	0,71	0,66
Ortalama	4195	76	33,6	44,7	47,3	49,0	0,75	0,71	0,69
Min	3760	71	30	42	44	47	0,66	0,63	0,62
Max	4700	81	38	48	51	53	0,90	0,83	0,80
Standart Sapma	288,2	2,40	2,89	2,09	1,82	1,49			

28 farklı üretim gününe ait YFC ile hazırlanan %25 YFC içeren S1 kodlu karışımların 7, 28, 56, 90-Günlük basınç dayanım sonuçları Tablo 8 'de verilmektedir. Bu sonuçlara göre, 7/28, 7/56, 7/90 günlük dayanım oranları sırasıyla 0,75, 0,71 ve 0,69 olarak hesaplanmıştır.

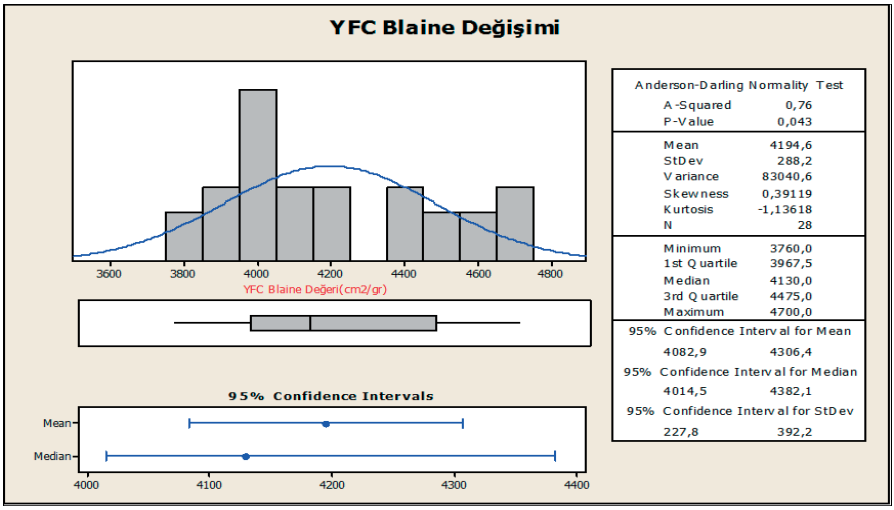
Tablo 9. YFC'lerin Fiziksel Özellikleri ve %50 YFC İçeren Karışımların Basınç Dayanımı

Deney No	YFC Blaine Değeri (cm^2/gr)	YFC 28 Günlük Aktivite İndeksi (%)	7-G	28-G	56-G	90-G	7/28 Günlük	7/56 Günlük	7/90 Günlük
			Beton Basınç Dayanımı (MPa)				Dayanım Oranı		
S2-1	4400	78	28,6	44,4	44,7	49,8	0,64	0,64	0,57
S2-2	4560	81	27,7	47,5	48,4	50,9	0,58	0,57	0,54
S2-3	4500	75	29,3	44,1	48,1	50,4	0,66	0,61	0,58
S2-4	4650	78	29,1	44,3	47,4	49,0	0,66	0,61	0,59
S2-5	4020	76	30,9	44,9	47,0	48,1	0,69	0,66	0,64
S2-6	4700	80	28,9	44,8	48,3	50,6	0,64	0,60	0,57
S2-7	3990	74	31,3	40,9	46,9	48,9	0,77	0,67	0,64
S2-8	4610	80	30,4	45,8	46,5	48,9	0,66	0,65	0,62
S2-9	4150	76	29,7	41,7	43,8	48,2	0,71	0,68	0,62
S2-10	4660	79	29,0	45,7	44,5	48,6	0,63	0,65	0,60
S2-11	3890	72	28,1	40,0	43,5	46,4	0,70	0,65	0,60
S2-12	3760	74	28,1	41,1	44,2	45,7	0,68	0,63	0,61
S2-13	4030	75	24,4	41,4	45,8	47,0	0,59	0,53	0,52
S2-14	4010	76	23,2	38,4	44,1	46,2	0,60	0,52	0,50
S2-15	4400	78	23,4	40,7	44,1	46,8	0,58	0,53	0,50
S2-16	4020	74	23,6	38,7	43,6	45,1	0,61	0,54	0,52
S2-17	3960	77	23,7	40,4	47,2	48,6	0,59	0,50	0,49
S2-18	4210	76	28,5	44,2	46,9	49,2	0,64	0,61	0,58
S2-19	4170	77	22,7	41,4	46,4	48,5	0,55	0,49	0,47
S2-20	4140	74	22,6	41,6	45,6	47,8	0,54	0,50	0,47
S2-21	4530	77	23,0	45,1	48,7	49,9	0,51	0,47	0,46
S2-22	4360	77	23,7	43,1	47,4	48,8	0,55	0,50	0,48
S2-23	4120	77	23,8	45,9	47,1	49,1	0,52	0,51	0,48
S2-24	3950	74	26,0	43,7	46,6	46,1	0,59	0,56	0,56
S2-25	3870	75	23,4	43,5	46,8	46,6	0,54	0,50	0,50
S2-26	4100	74	22,9	42,9	44,9	46,7	0,53	0,51	0,49
S2-27	3910	74	22,3	41,2	44,6	46,3	0,54	0,50	0,48
S2-28	3780	71	24,0	40,6	43,0	44,3	0,59	0,56	0,54
Ortalama	4195	76	26,1	42,8	45,9	48,0	0,61	0,57	0,54
Min	3760	71	22	38	43	44	0,51	0,47	0,46
Max	4700	81	31	48	49	51	0,77	0,68	0,64
Standart Sapma	288,2	2,40	3,04	2,34	1,69	1,73			

28 farklı üretim gününe ait YFC ile hazırlanan %50 YFC içeren S2 kodlu karışımların 7, 28, 56, 90-Günlük basınç dayanım sonuçları Tablo 9 'da verilmektedir. Bu sonuçlara göre, 7/28, 7/56, 7/90 günlük dayanım oranları sırasıyla 0,61, 0,57 ve 0,54 olarak hesaplanmıştır. YFC, Portland çimentosuna göre daha yavaş hidrate olduğundan, cüruflu betonların erken yaşlardaki dayanım gelişim oranları daha düşük ölçülmüştür.

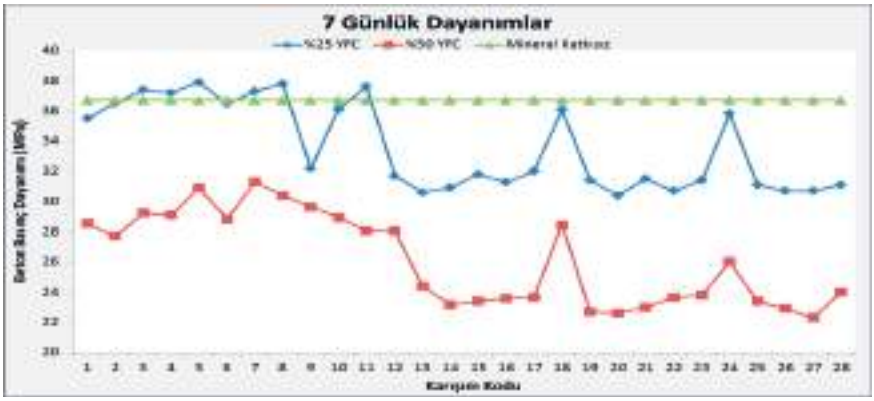
YFC dışında diğer beton bileşenleri sabit iken, %25 YFC katkılı karışımlarda 7-Günlük, 28-Günlük, 56-Günlük ve 90-Günlük dayanımlarda ölçülen standart sapma değerleri sırasıyla, 2,89, 2,09, 1,82 ve 1,49 olarak hesaplanmıştır (Tablo 8). %50 YFC katkılı karışımlarda 7-Günlük, 28-Günlük, 56-Günlük ve 90-Günlük dayanımlarda ölçülen standart sapma değerleri sırasıyla, 3,04, 2,34, 1,69 ve 1,73 olarak hesaplanmıştır (Tablo 9). YFC kullanımından ötürü oluşan bu standart sapma değerlerinin ileriki beton dayanımlarında giderek azaldığı görülmektedir.

YFC incelik değerinin endüstriyel üretimdeki değişimi Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1. YFC Blaine Değerinin Endüstriyel Üretimdeki Değişimi.

YFC kullanımının erken dayanımı düşürdüğü (Şekil 2) ancak, 28, 56 ve 90 -Günlük dayanımlar incelendiğinde mineral katkısız kontrol karışımına göre YFC içeren karışımların daha yüksek dayanım verdiği görülmüştür (Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5).



Şekil 2. Beton Karışımlarının 7-Günlük Basınç Dayanımları.



Şekil 3. Beton Karışımlarının 28-Günlük Basınç Dayanımları.

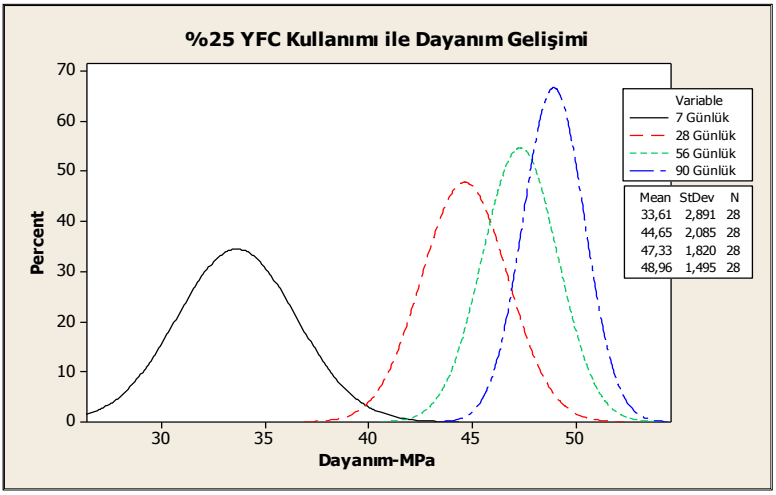


Şekil 4. Beton Karışımlarının 56-Günlük Basınç Dayanımları.

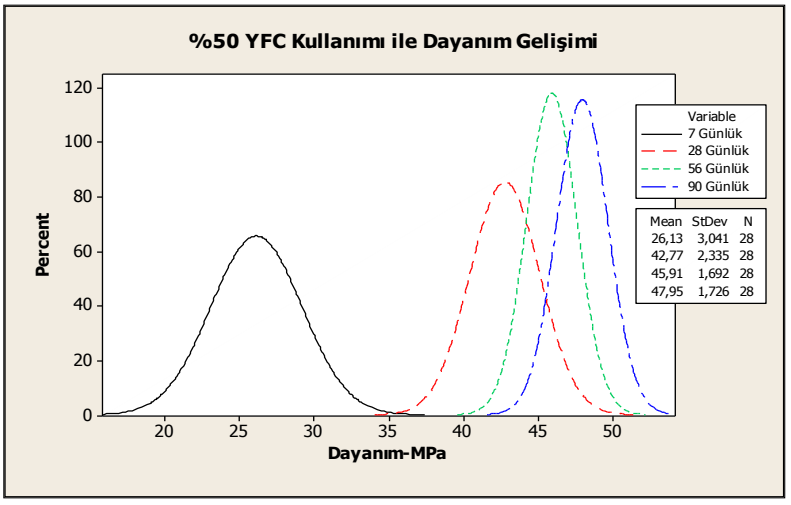


Şekil 5. Beton Karışımlarının 90-Günlük Basınç Dayanımları.

Şekil 6 ve Şekil 7'de Minitap programı ile hazırlanan YFC içeren karışımlardaki dayanım gelişimi incelenmiştir. YFC içeren betonlardaki daha yüksek ileriki yaş beton dayanımı, cürufun daha yavaş hidratasyon reaksiyonunun bir sonucu olarak meydana gelen daha yoğun hidrate olmuş mikro yapıdan ileri gelmektedir.

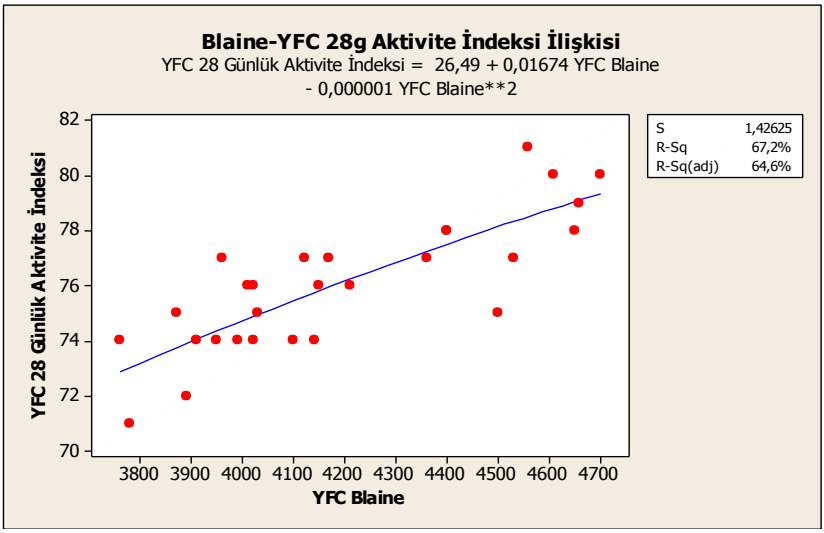


Şekil 6. Çimento Yerine %25 YFC Yerleştirilen Karışımların Basınç Dayanımı Gelişimi.



Şekil 7. Çimento Yerine %50 YFC Yerleştirilen Karışımların Basınç Dayanımı Gelişimi.

YFC'ye ait blaine değerlerinin, YFC'nin 28-Günlük aktivite indeksi değerlerine etkisi olduğu ve bu etkinin değerinin R^2=%67,2 ol duğu tespit edilmiştir. YFC'lerin inceliğinin artması ile cürufun aktive indeksinde artış olduğu görülmüştür (Şekil 8).



Şekil 8. YFC Blaine Değeri ile YFC Aktivite İndeksi Arasındaki İlişki

YFC 28 günlük aktivite indeksi, Blaine değerleri, 7 günlük ve 28 günlük dayanım sonuçlarına göre;

- YFC kullanımı %25 olan karışımlarda R^2 = %84,1
- YFC kullanımı %50 olan karışımlarda R^2 = %69,1

olan 90 günlük dayanım değerini hesaplayabileceğimiz modelleme yapılmıştır.

%25 YFC içeren karışımların regresyon denklemi:

90 Günlük Dayanım = 13,9 + 0,00219 × YFC Blaine + 0 ,331 × YFC 28 Akt. İndk. – 0,0238 × 7 Günlük + 0,0333 × 28 Günlük (1)

R^2 = % 84,1 R^2 (adj) = % 81,3

%50 YFC içeren karışımların regresyon denklemi:

90 Günlük Dayanım = 15,0 + 0,00197 × YFC Blaine + 0,184 × YFC 28 Akt. İndk. + 0,0790 × 7 Günlük + 0,203 × 28 Günlük (2)

R^2 = % 69,1 R^2 (adj) = % 63,8

Regresyon denklemle rinden görüldüğü üzere, YFC'lerin inceliğinin ve aktivite indeksinin artması durumunda, ileriki yaş beton basınç dayanımı artmaktadır.

Sonuçlar ve Öneriler

YFC kullanımı ile hazırlanan betonlarda YFC kullanım oranı, beton performansı açısından önemlidir. Mineral katkı içermeyen kontrol karışımında 7/28 günlük dayanım oranı 0,86 iken, çimento yerine %25 YFC kullanılan S1 karışımlarında ortalama 0,75, çimento yerine %50 YFC kullanılan S2 karışımlarında ise ortalama 0,61 olarak gerçekleşmiştir.

Mineral katkı içermeyen kontrol karışımının 7-Günlük basınç dayanımı 36,7 MPa olup, %25 YFC katkılı karışıma göre 3,09 MPa, %50 YFC katkılı karışıma göre 10,57 MPa yüksek çıkmıştır. Bununla birlikte, kontrol karışımının 90-Günlük dayanımı 44,8 MPa olup, %25 YFC katkılı karışıma göre 4,16 MPa, %50 YFC katkılı karışıma göre 3,15 MPa düşük çıkmıştır. YFC kullanımının erken dayanımı düşürdüğü ancak, 28, 56 ve 90-Günlük dayanımlar incelendiğinde mineral katkısız kontrol karışımına göre YFC içeren karışımların daha yüksek dayanım verdiği görülmüştür.

YFC'ye ait blaine değerlerinin, YFC'nin 28-Günlük aktivite indeksi değerlerine etkisi olduğu, ve bu etkinin değerinin R^2=%67,2 olduğu tespit edilmiştir. YFC'lerin inceliğinin artması ile, YFC'nin aktive indeksinde artış olduğu görülmüştür.

YFC kullanımında, YFC üretiminde oluşan standart sapma mutlaka dikkate alınarak beton tasarımları belirlenmelidir. %25 YFC katkılı karışımlarda YFC dışında diğer beton bileşenleri sabit iken 28-Günlük dayanımlarda standart sapma 2,09, %50 YFC katkılı karışımda ise 2,34 olarak hesaplanmıştır. YFC kullanımından ötürü oluşan bu standart sapma değerinin ileriki dayanımlarda giderek azaldığı tespit edilmiştir.

YFC'nin 28 günlük aktivite indeksi, blaine değerleri ve 7 günlük ve 28 günlük beton dayanım sonuçlarına göre, 90 günlük beton dayanım değerini hesaplayabileceğimiz modelleme yapılmıştır. YFC kullanımının %25 olduğu beton karışımlarında R^2=%84,1, YFC kullanımının %50 olduğu beton karışımlarında R^2=%69,1 olarak tespit edilmiştir.

Kaynaklar

Doğulu, S., (1998) Effect of Fineness of Ground Granulated Blast -Furnace Slags on Their Cementitious Properties. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

Erdoğan, T.Y., (2003) Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş., Ankara, 741s.

Onat, O. B., (1998) Türkiye'de Üretilen Yüksek Fırın Cüruflarının Çimento Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Nawy, E. G., (2001) Fundamentals of High -Performance Concrete. John Wiley&Sons Inc, USA.

Nevılle A.M., (1997) Properties of Concrete. Final Edition. Longman Ltd., England.

Newman, J., Choo, B. S., (2003) Advanced Concrete Technology. Constituent Materials, Butterworth -Heinemann, Oxford.

Tokyay ve Erdoğdu, (2003) Cüruflar ve Cüruflu Çimentolar. TÇMB/AR-GE, Ankara.

Tokyay, M., (2003) Cüruflar ve Cüruflu Çimentolar. Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirmesi Raporu, TÇMB, Ankara, 47s.

Yeau, K. Y., Kim, E. K., (2005) An Experimental Study on Corrosion Resistance of Concrete with Ground Granulated Blast -Furnace Slag. Cement and Concrete Research, Vol. 35, pp. 1391– 1399.