# UÇAĞIN TABAN KİRİŞİNE ROBUST TASARIM UYGULAMASI

Alper ÇELİK, Tamer GÜNEŞ, Mehmet KAYHAN, Uğur TANBAŞI
Gülser KÖKSAL, Nur Evin ÖZDEMİREL

*Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü*

## ÖZET

Uçak sistemlerinin tasarımında dikkat edilmesi gereken çok sayıda değişken vardır. Tasarımcı bunlardan kontrol edebileceklerinin seviyelerini belirlerken, kontrolü dışındaki faktörlerin uçağın performansı üzerindeki etkilerini de hesaba katmalıdır. Bu çalışmada bir uçağın taban kirişinin optimal parametre değerleri robust tasarım metodolojisi kullanılarak elde edilmiştir.

Mevcut sistemin analizi ve tanımlanmış mekanik modeller ışığında, önemli faktörler ve bunlar arası etkileşimler belirlenmiştir. Bu doğrultuda, istatistiksel deney tasarımı yapılmış, buna göre veri toplanmış ve yanıt fonksiyonları ampirik bir modelle geliştirilmiştir. Bu model kullanılarak, tasarım parametrelerinin optimizasyonu doğrusal olmayan programlama yoluyla gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Robust tasarım, tasarım optimizasyonu, uçak taban kirişi, doğrusal olmayan programlama, istatistiksel deney tasarımı, yanıt yüzeyi metodolojisi.

## GİRİŞ

Bu çalışmada bir uçak alt sisteminin tasarımı bir çevrim-dışı kalite kontrol yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, boyutlar, malzeme cinsi, üretim metodu gibi ürün parametrelerinin sahip olduğu istenmeyen varyasyonların, ürünün performansı üzerindeki olumsuz etkilerini en küçüklemeyi sağlayan kontrol faktör seviyelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır.

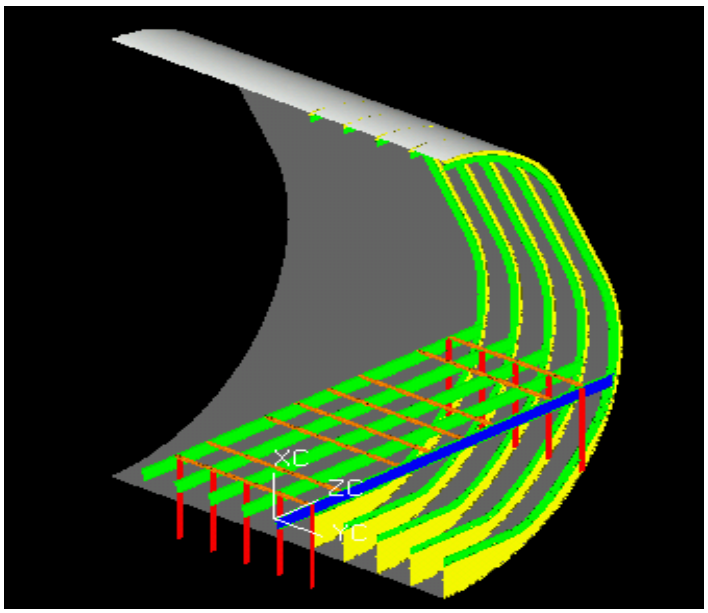
Uçak parça ve sistemlerinin performansını etkileyen ve kontrol edilmesi zor veya imkânsız olan birçok etken vardır. Bu etkenler ürünün performansında varyasyona ve hedef değerden sapmaya neden olmaktadır. Uçağın ömrü boyunca maruz kalacağı bu kontrol dışı etkenlerin, uçak parça ve sistemlerinin performansı üzerinde neden olduğu değişikliklerin en az seviyede olması gerekmektedir. Bu nedenle, havacılık endüstrisinde, gelişmiş ve pahalı kontrol sistemleri ya da oldukça küçük ham madde/ürün kabul toleransları kullanılagelmiştir. Oysa, kontrol edilebilir ürün değişkenlerinin, ürün performansının kontrol dışı etkenlere olan duyarlılığını en aza indirecek şekilde belirlenmesi, daha kaliteli ve ucuz ürün üretmeye imkân tanır. Bu yaklaşım, 'Robust Tasarım Yaklaşımı' olarak bilinmektedir (Phadke, 1989).

Bu çalışmada sözü edilen tasarım ilgili üretici firmaya robust tasarım metodolojisini kazandırmak amacıyla ve ODTÜ Endüstri Mühendisliği programının sistem tasarım projesi olarak gerçekleştirilmiştir. Uçak taban kirişinin tasarımı, uçağın performansını etkileyen faktörlerin belirlenmesi ve tasarımcının bu faktörler üzerindeki kontrol derecesinin tanımlanmasıyla başlamıştır. İzlenen yöntem, ilgili performans ölçüleriyle kontrol edilebilir

ürün tasarım değişkenleri arasındaki ilişkilerin modellenmesi ve bu modellerin tanımladığı yanıt yüzeylerinin (Box ve Draper 1987, Myers, Khuri ve Carter 1989) belirlenmesi esasına dayanır. Bu ampirik modellerin geliştirilmesi için gerekli olan veriler uygun bir istatistiksel deney tasarımı gerektirir. Burada her bir deney satırı farklı bir taban kirişine karşılık gelmektedir. Ampirik modellerin, bir önceki aşamada denenmiş taban kiriş parametre değerlerinden farklı değerlerin de performansa etkilerini tahmin edecek istatistiksel yeterliliğe sahip olmaları beklenmektedir. Bu modeller, daha sonra parametre tasarımı probleminin bir matematiksel programlama problemi olarak formüle edilmesi ve çözümünde kullanılmıştır. Elde edilen model, doğrusal olmayan çok amaçlı bir optimizasyon modelidir. Bu modelin çözümü ve elde edilen sonuçların teyidi makalenin ilgili bölümlerinde tartışılmıştır.

## TABAN KİRİŞİ ÖZELLİKLERİ

Taban kirişi, uçağın ana gövdesini ve koltuklar gibi uçağın içine monte edilen parçaları destekleme fonksiyonuna sahip olan ve uçağın ağırlığının önemli bir bölümünü oluşturan bir parçadır. Uçağın uzunluğu boyunca enlemesine olarak art arda kısa mesafelerle uçağın içerisine monte edilir. Şekil 1'de art arda monte edilmiş birden fazla taban kirişi gösterilmiştir.




**Şekil 1. Taban Kirişi**

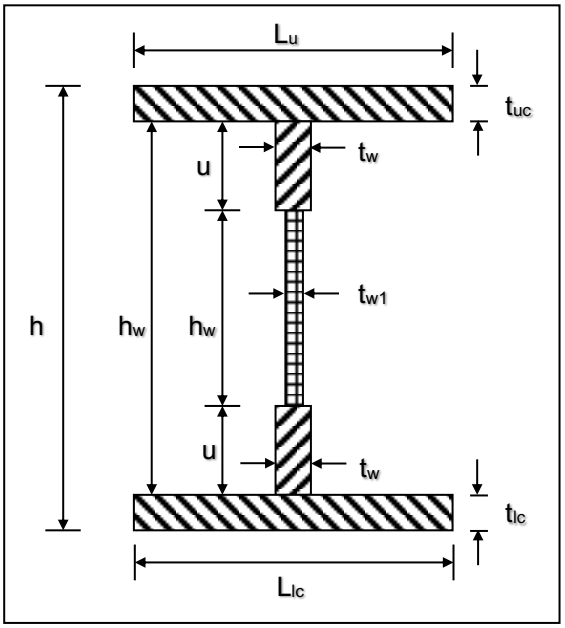
Taban kirişinin tasarımı, uçağın üretimi aşamasındaki en önemli basamaklardan birini oluşturmaktadır. Tasarımı boyunca birçok teste tabi tutulan parçanın, emniyetli sayılabilmesi için, üzerinde gerçekleştirilen ve sağlaması beklenilen yapısal ve mukavemet testleri vardır. Taban kirişi probleminde göz önünde bulundurulması gereken beş farklı mukavemet kriteri mevcuttur: Kesme Burkulması, Eğilme Burkulması, Bileşik Kesme-Eğilme Burkulması, Kayma Gerilmesi, Eğilme Gerilmesi. Bu mukavemet kriterleri, uçağın ömrü boyunca maruz kaldığı farklı yük durumları altında sağlaması gereken 'Hata Mod'larına karşılık gelmektedir. Her bir hata moduna karşılık ilgili hata modunun ne derecede karşılandığını belirleyen marjinler tanımlanmıştır. Bunlar Emniyet Marjinleri (MS) olarak isimlendirilmiştir.

İlgili üretici firma tasarımcıları ve proje elemanlarının yaptığı çalışmalar sonucu, bir taban kirişini tek olarak tanımlayabilmek için altısı geometrik parametre, biri malzeme türü olmak üzere toplam yedi parametre belirlenmiştir. Bunlar:

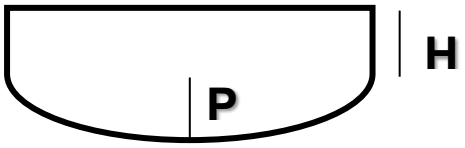
Tc : alt ve üst kirişin kalınlığı
Lc : alt ve üst kirişin uzunluğu
Tw : ağ kalınlığı
Twl : orta-ağ kalınlığı
P : kirişin yandan görünümünde parabolik kısmın derinliği
H : kirişin yandan görünümünde düz kısmın derinliği
M : Malzeme türü

Bu parametreler, kirişin kesit alanı ve yandan görünümü üzerinde Şekil 2 ve Şekil 3'de gösterilmiştir. Kullanılan malzeme türü M için üç farklı malzeme alternatifi belirlenmiştir; bunlar gizlilik nedeniyle M1, M2, M3 olarak kodlanmıştır. İleride gürültü faktörü olarak bahsedilecek olan ve uçağın ömrü boyunca maruz kaldığı kuvvet etkenlerini gösteren Yük Durumları da tanımlanmıştır. Sekiz farklı yük durumunun her birini belirli bir kesit üzerinde tanımlayan üç farklı değişken vardır. Bunlar:

- Uygulanan eksensel kuvvet, Pax
- En büyük eğilme momenti, Mmax
- En büyük kesme kuvveti, Vmax




**Şekil 2. Taban Kirişi Kesit Alanı**




**Şekil 3. Taban Kirişi Yandan Görünüş**

Tanımlanan her bir yük durumu altında, taban kirişi birbirinden eşit uzaklıkta beş farklı kesite bölünmüş ve bu kesitlerin beş farklı hata moduna olan tepkisi emniyet marjinleriyle ifade edilmiştir. Ayrıca, bu kesitlerin uzunluğu boyunca, yük durumlarının etkisiyle meydana gelebilecek olan dikey yer değiştirmeler sapma olarak tanımlanmıştır. Bir kirişin teknik olarak

mümkün olabilmesi için bu emniyet marjini değerlerinin sıfırdan büyük, sapma değerlerinin ise üç inçten küçük olması gerekmektedir.
Taban kirişinin robust tasarımında var olan amaçlar ise:
1. Ağırlığın en küçüklenmesi
2. Maliyetin en küçüklenmesi
3. Emniyet Marjinlerinin standart sapmasının en küçüklenmesi

olarak tanımlanmıştır.

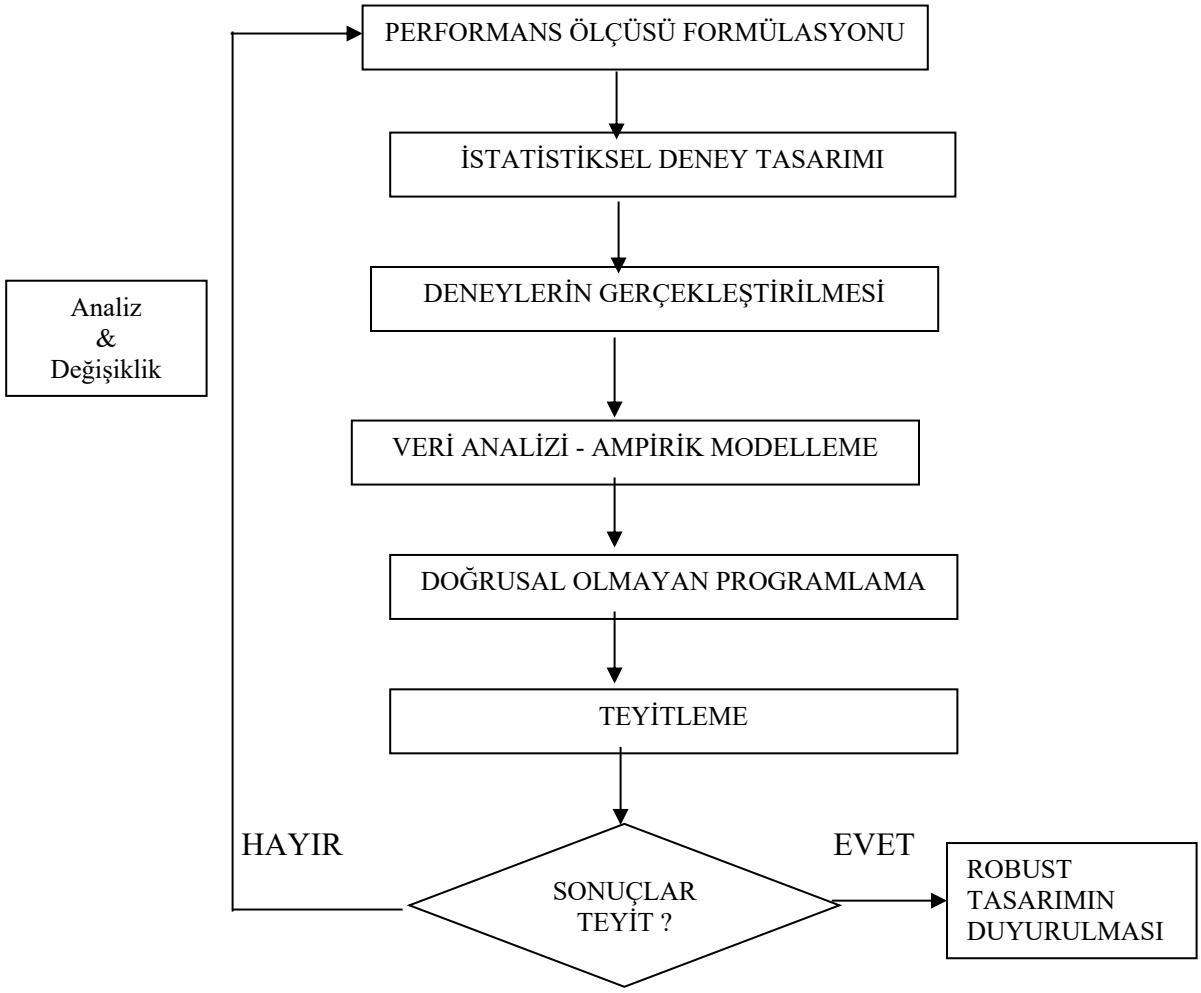
## ÜRÜN PERFORMANSININ TANIMLANMASI

Taban kirişi tasarımının performansı, ürünün şu dört farklı özelliği ile saptanabilir.
1. Bir taban kiriş tasarımında karşılıklı gelen bir ağırlık değeri, $W_r$. Burada r deney numarasını gösterir. Ağırlık fonksiyonu (W), kirişin boyutunu tanımlayan faktörlere ve malzeme türüne bağlı, analitik ve üretim sonrası durumları hesaba katmayan bir yapıya sahiptir. W = W(Tc, Lc, Tw, Twl, P, H, Kirişin Uzunluğu, Malzeme Yoğunluğu)
2. Bir taban kirişine karşılık gelen bir deneyin sonucunda hesaplanan maliyet değeri, $C_r$. Burada r deney numarasını gösterir. Maliyet fonksiyonu (C), bağımsız değişken olarak ağırlığı, malzeme ve üretimle ilgili parametreleri kabul eden bir fonksiyondur.
3. $MS_{r,i,j,k}$ – Bir r deneyinde, her hangi bir k yük durumu altında bir j kesitindeki belirli bir i hata modunun oluşturduğu emniyet marjini değeridir. Toplamda, her bir r deneyi için 8x5x5 = 200 adet $MS_{r,i,j,k}$ değeri hesaplanmaktadır.
4. $Def_{r,j,k}$ – Bir deney sonucunda, herhangi bir j kesitinin belirli bir k yük durumu altındaki sapmasıdır. Her bir r deneyi için, 5x8 = 40 adet $Def_{r,j,k}$ değeri hesaplanmaktadır.

## ROBUST TASARIM METODU

Tasarımı yapılacak olan ürünün performans ölçüleri ve kontrol faktörleri arasındaki ilişkiyi modelleyerek ve bu modellenmiş ilişkiyi inceleyerek, kontrol faktörlerinin optimum değerleri bulunabilir. Bu modeller iki farklı yöntemle geliştirilebilir (Shoemaker ve diğerleri 1989). Bu yöntemlerden ilki olan Çarpım Dizini Yaklaşımı, kontrol faktör seviyelerini baz alarak istatistiksel olarak tasarlanmış deneylerin her birinin kontrol-dışı (gürültü) faktörlerinin etkilerini görebilecek şekilde yinelenmesi esasına dayanır. Elde edilen veriler ile performans ölçülerinin değerleri doğrudan hesaplanabilir. Diğer yöntem, Birleştirilmiş Dizin Yaklaşımı ise, kontrol ve gürültü faktörlerinin değişik kombinasyonlarını içeren tek bir deney tasarımı oluşturur. Buna göre, ilk olarak ürünün yanıtı modellenir ve daha sonra bu yanıt modellerini kullanarak gerekli performans ölçüleri için ikinci bir modelleme yapılır. Performans ölçü değerleri veya bunlardan geliştirilen modeller kullanılarak ürünün optimum parametre değerleri bulunur. Bu amaçla, Taguchi'nin iki adımlı yaklaşımı (Kackar 1985) veya robust tasarım problemine doğrusal olmayan matematiksel programlama yolu (Yanıt Yüzeyi Metodu) (Lucas 1994) kullanılabilir.

Taban kirişinin robust tasarımı için önerilen metot Şekil 4'de şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi, performans ölçüleri ve kontrol faktörleri arasındaki ilişkinin ampirik modellemesinde gerekli verileri elde etmek amacıyla, deneylerin istatistiksel olarak ve çözmede kullanılır.




**Şekil 4. Metodun Şematik Gösterimi**

Taban kirişi probleminde, performans ölçülerinin modellenmesi için Çarpım Dizini Yaklaşımı önerilmiş ve kullanılmıştır. Bir kontrol faktör dizini ve bir gürültü faktör dizininin çarpımı olarak da ifade edilebilecek olan bu yaklaşım, diğerine göre daha fazla sayıda deney içerir. Ancak performans ölçülerini doğrudan modelleyebileceğimiz için ve birden çok performans ölçüsünün modellenmesi gerekli olduğu için, bu yaklaşım tercih edilmiştir. Aslında deneyler bilgisayar ortamında benzetim modelleri kullanılarak gerçekleştirileceğinden, deney sayısının çok olması önemli bir kısıt oluşturmamaktadır. Taban kirişi tasarımında, Çarpım Dizini Yaklaşımı kullanılarak yukarıda tanımlanan performans ölçülerine karşılık, toplam 33 adet ampirik model geliştirilmiştir. Diğer yöntem kullanılmış olsaydı, ilk olarak, istatistiksel olarak tasarlanmış deneylerin gerçekleştirilmesi sonucu ölçülen her bir yanıtın modellenmesi ve daha sonra gürültü faktörlerinin dağılım bilgisi ve bu yanıt modelleri kullanılarak performans ölçülerinin modellenmesi gerekecekti. Başka bir ifadeyle, bu yöntemle çok daha fazla ampirik model geliştirilmesi gerekecekti. Ayrıca, havacılık sanayiinde eldeki gürültü faktörlerinin gerçek dağılımını doğru bir şekilde tahmin edebilmek oldukça zor olmaktadır. Sonuç olarak, taban kirişinin robust tasarımı probleminde Çarpım Dizini Yaklaşımı kullanılması daha uygun bulunmuştur.

Performans ölçülerinin ampirik modellerinin gerekli istatistiksel yeterliliği sağladığından emin olduktan sonra, robust tasarım problemi, bir doğrusal olmayan matematiksel programlama problemi olarak tanımlanabilir. Bu yöntem, birden çok tasarım amacı ve kısıtı olan durumlarda Taguchi metoduna göre daha esnek, uygun bir çözüm yaklaşımı sunar (Köksal ve diğerleri 1995).

## İSTATİSTİKSEL DENEY TASARIMI

Mevcut sistemin analizi ve mevcut mekaniksel modeller ışığında, önemli faktörler ve bunlar arası etkileşimler belirlenmiştir ve bu doğrultuda istatistiksel deney tasarımı yapılmıştır. Deney tasarımı için, kontrol faktörleri, gürültü faktörleri, deney alanı ve bu faktörlerin test seviyelerinin belirlenmesi gereklidir. Taban kirişi tasarımını etkileyen kontrol faktörleri ve deneyde kullanılacak seviyeleri, Havacılık ve Makina Mühendisliği uzmanlarıyla yapılan ortak çalışma sonucu ve daha önce bu alanda yapılan çalışmaları kullanarak Tablo 1'deki gibi belirlenmiştir. Kontrol faktörleri, değeri tasarımcı tarafından belirlenebilen faktörlerdir. Belirlenen yedi kontrol faktörünün altısı taban kirişinin boyutuyla ilgili sürekli değişkenler, diğeri ise üretimde kullanılacak malzeme türünü gösteren niteliksel bir değişkendir. Boyutu tanımlayan kontrol faktörleri, taban kirişinin kesit alanı üzerinde Şekil 2'de gösterilmektedir.

**Tablo 1. Kontrol Faktörleri ve Seviyeleri**

| Kontrol Faktörleri | Seviyeler | | |
|---|---|---|---|
| Tc : Alt ve üst kiriş kalınlığı (inch) | 0.08 | 0.12 | 0.16 |
| Lc : Alt ve üst kiriş uzunluğu (inch) | 0.08 | 0.12 | 0.16 |
| Tw : Ağ kalınlığı (inch) | 0.02 | 0.09 | 0.16 |
| Twl : Orta ağ kalınlığı (inch) | 0.02 | 0.09 | 0.16 |
| H : Kirişin düz kesitinin yüksekliği (inch) | 2 | 5 | 10 |
| P : Parabolün derinliği (inch) | 2 | 5 | 10 |
| M : Malzeme türü | M1 | M2 | M3 |

Kontrol edilebilen faktörlerin yanı sıra, sistemin performansını etkilediği bilinen ama değerlerinin herhangi bir zaman aralığında, teknik olarak kontrol veya tahmin edilmesi zor, maliyet açısından uygun olmayan veya imkânsız olan faktörler de mevcuttur. Bunlar, robust tasarım terminolojisinde, gürültü faktörleri olarak tanımlanmaktadır. Taban kirişi probleminde, yük durumu, gürültü faktörü olarak belirlenmiştir. Yük durumu, üretici firma tarafından belirlenmiş Federal Havacılık Yönetimi'nce onaylanmış olan uçağın ömrü boyunca maruz kaldığı yük durumlarını tanımlayan faktördür. Bu gürültü faktörünün sekiz ayrı test seviyesi mevcuttur. Bu seviyeler uçağın kalkış, iniş, yan manevra gibi durumlarındaki, taban kirişinin maruz kaldığı yük dağılımlarını örneklemektedir.

Deney alanı, kontrol faktörlerinin test seviyeleri aracılığıyla belirlenmiştir. Kontrol faktörleri ve performans ölçüleri arasındaki ilişkinin doğrusal olmamasından dolayı, Tablo 1'de görüldüğü gibi bütün kontrol faktörleri 3 seviyeli olarak belirlenmiştir. Bu seviye değerleri ise yapısal kısıtlar ve uzman bilgisi göz önüne alınarak olası tasarımları kapsayacak şekilde belirlenmiştir.

Gürültü faktörü, 8 seviyeye sahiptir ve yük durumunun özelliğinden dolayı herhangi bir olasılık dağılımı yoktur. Bu durumdan 'Taban Kirişi Özellikleri' bölümünde bahsedilmektedir.

Daha önce de açıklandığı gibi istatistiksel deney tasarımı iki kısımlı olarak yapılmıştır. İlk kısımda, bir kontrol dizini oluşturulmuş, ikinci kısımda ise kontrol dizininin her bir satırına karşılık gelen bir gürültü dizini oluşturulmuştur. Başka bir ifadeyle, her bir deney satırı için sekiz farklı yük durumu altında ayrı deneyler yapılmıştır. Deneylerin gerçekleştirilmesi kısa zamanda yapılabilmesine rağmen, deney çıktısı olarak çok fazla veri elde edildiğinden dolayı tam faktöriyel deney tasarımı uygun görülmemiştir. (Tam faktöriyel deney tasarımında 2187 ($3^7$) deney satırı gerekmektedir.) Bu yüzden, kontrol faktör dizini için kesirli faktöriyel deney tasarımı yapılmıştır. Burada kesir sayısı olarak 2 alınmış ve 243 ($3^{7-2}$) deney satırı elde edilmiştir. Bu deney tasarımı aracılığıyla, bütün kontrol faktörlerinin ana etkileri ve bütün ikili kontrol faktör-kontrol faktör etkileşimlerinin performans ölçüleri üzerindeki etkileri belirlenebilmektedir. SAS/QC yazılımının FACTEX prosedürü (SAS/QC Yazılımı: Kullanıcı Kılavuzu 1989) kullanılarak oluşturulan kontrol dizini tasarımı kısmen Tablo 2'de verilmektedir. Çarpım Dizini Yaklaşımı kullanıldığından dolayı gürültü dizini kontrol dizininden bağımsızdır. Gürültü dizini 8 seviyeli tek bir gürültü faktöründen oluşan tek sütundan ibarettir.

**Tablo 2. Kısmi Kontrol Dizini**

| Deney | Kontrol Faktör | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Tc | Lc | Tw | Twl | P | H | M |
| 1 | 0.08 | 1 | 0.08 | 0.02 | 0 | 0 | 1 |
| 2 | 0.08 | 1 | 0.08 | 0.02 | 5 | 10 | 1 |
| 3 | 0.08 | 1 | 0.08 | 0.02 | 10 | 5 | 3 |
| 4 | 0.08 | 1 | 0.08 | 0.09 | 0 | 10 | 3 |
| 5 | 0.08 | 1 | 0.08 | 0.09 | 5 | 5 | 2 |
| 6 | 0.08 | 1 | 0.08 | 0.09 | 10 | 0 | 3 |
| 7 | 0.08 | 1 | 0.08 | 0.16 | 0 | 5 | 2 |
| 8 | 0.08 | 1 | 0.08 | 0.16 | 5 | 0 | 1 |
| 9 | 0.08 | 1 | 0.08 | 0.16 | 10 | 10 | 2 |
| 10 | 0.08 | 1 | 0.12 | 0.02 | 0 | 10 | 2 |
| 11 | 0.08 | 1 | 0.12 | 0.02 | 5 | 5 | 1 |
| 12 | 0.08 | 1 | 0.12 | 0.02 | 10 | 0 | 3 |
| . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . | . |
| 233 | 0.16 | 3 | 0.12 | 0.16 | 5 | 5 | 3 |
| 234 | 0.16 | 3 | 0.12 | 0.16 | 10 | 0 | 2 |
| 235 | 0.16 | 3 | 0.16 | 0.02 | 0 | 0 | 1 |
| 236 | 0.16 | 3 | 0.16 | 0.02 | 5 | 10 | 3 |
| 237 | 0.16 | 3 | 0.16 | 0.02 | 10 | 5 | 3 |
| 238 | 0.16 | 3 | 0.16 | 0.09 | 0 | 10 | 2 |
| 239 | 0.16 | 3 | 0.16 | 0.09 | 5 | 5 | 2 |
| 240 | 0.16 | 3 | 0.16 | 0.09 | 10 | 0 | 3 |
| 241 | 0.16 | 3 | 0.16 | 0.16 | 0 | 5 | 1 |
| 242 | 0.16 | 3 | 0.16 | 0.16 | 5 | 0 | 2 |
| 243 | 0.16 | 3 | 0.16 | 0.16 | 10 | 10 | 1 |

| Gürültü Faktörü | |
|---|---|
| Seviye | |
| 1 | Yük Durumu 1 |
| 2 | Yük Durumu 2 |
| 3 | Yük Durumu 3 |
| 4 | Yük Durumu 4 |
| 5 | Yük Durumu 5 |
| 6 | Yük Durumu 6 |
| 7 | Yük Durumu 7 |
| 8 | Yük Durumu 8 |

| Gürültü Faktörü | |
|---|---|
| Seviye | |
| 1 | Yük Durumu 1 |
| 2 | Yük Durumu 2 |
| 3 | Yük Durumu 3 |
| 4 | Yük Durumu 4 |
| 5 | Yük Durumu 5 |
| 6 | Yük Durumu 6 |
| 7 | Yük Durumu 7 |
| 8 | Yük Durumu 8 |

## DENEYLERİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

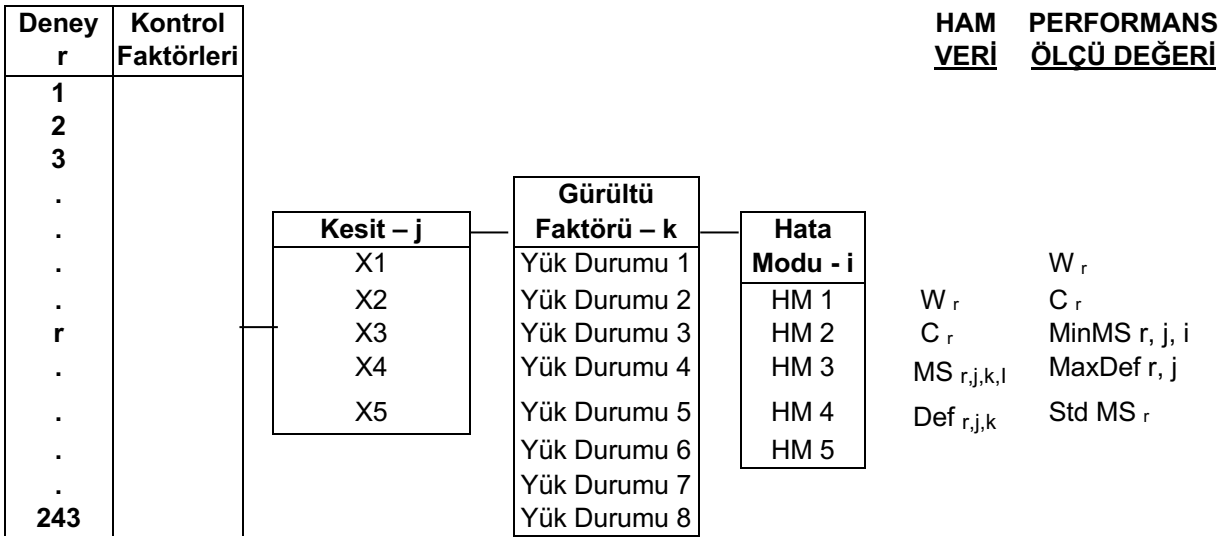
İdeal durumda istatistiksel deneylerin gerçekleştirilebilmesi için, hava araçlarının ve parçalarının tam ve doğru yapısal analizi için gerekli olan bütün analitik modelleri içeren,

özellikle de farklı yük durumları altındaki gerilim değişikliklerini gözlemeye imkân veren, 'Sonlu Eleman' analiz sistemleri gerekmektedir. Ancak, mevcut ortamda bu imkanın bulunmamasından dolayı, deneyleri gerçekleştirmek amacıyla elde var olan mukavemet ve yapısal analiz modellerini kullanarak C programlama dilinde bir benzetim kodu yazılmıştır. Bu benzetim kodu deney girdisi olarak aldığı kontrol ve gürültü faktörü değerlerine karşılık, gerekli mukavemet ve yapısal analizler sonucunda, istenilen yanıtları çıktı olarak vermektedir.

Her bir deney satırında kontrol ve gürültü faktörü değerleri tek bir kirişe ve o kirişin maruz kaldığı yük durumuna karşılık gelmektedir. Bu deney çıktılarını kullanan 33 adet performans ölçüsü tanımlanmıştır. Bunlar;

- Kirişin ağırlığı
- Kirişin maliyeti
- Kirişin 5 farklı analiz kesitinin her birindeki 5 farklı mukavemet kriterine (hata modu) karşılık 8 farklı yük durumu altındaki Emniyet Marjinlerinin en küçüğü (25 adet)
- Yine bu şartlardaki 25 adet Emniyet Marjininin standart sapma değerlerinin toplamı
- Kirişin 5 farklı analiz kesitinin her birindeki 8 farklı yük durumu altındaki dikey sapmaların en büyükleri (5 adet)

olarak alınmıştır. Toplam 243 deneyin gerçekleştirilmesi sonucu elde edilen ham verilerden, performans ölçülerinin tanımlanması şematik olarak Şekil 5'de gösterilmiştir.




**Şekil 5. Performans Ölçüsü Tanımlanması Şematik Gösterimi**

## AMPİRİK MODELLEME

Deneylerin gerçekleştirilmesinden sonra veri analizi ve ampirik modelleme yapılabilir. Bu amaçla optimizasyon modelinde kullanılacak performans ölçüleri kesinleştirilmiştir. İki çeşit performans ölçüsü sınıfı tanımlanmıştır: Amaçların performans ölçüleri ve kısıtların performans ölçüleri.
r: Deney numarası, r = 1,..,243;
i: MS (hata modu) numarası, i = 1,..,5;
j: Kiriş kısım numarası, j = 1,..,5;
k: Yük durumu numarası, k = 1,..,8
olsun.

Amaçların Performans Ölçüleri

W(Ağırlık): r = 1,..,243 için hesaplanan ağırlık değerleri.
C(Maliyet): r = 1,..,243 için hesaplanan maliyet değerleri.
StdMS : r = 1,..,243 için kirişin kesitlerinin farklı yük durumları altındaki MS değerlerinin standart sapma değerleri toplamı;

$$StdMS = \sum_{i=1}^{5}\sum_{j=1}^{5} STD(\mathrm{MSi, j, k}) \text{ , k = 1,..,8 için}$$

şeklinde tanımlanabilir.

Kısıtların Performans Ölçütleri

MinMS : r = 1,..,243 için farklı yük durumları altındaki kirişin 5 kesitinin her bir MS türünün en küçüğü,
Min ($MS_{i,j,k}$): i = 1,..,5, j = 1,..,5 için k = 1,..,8 üzerinden (her bir deney için 25 Min($MS_{i,j}$) değeri) şeklinde tanımlanabilir.

MaxDef : r = 1,..,243 için farklı yük durumları altındaki kirişin her kesitinin sapma değerlerinin en büyüğü;
Max ($Def_{j,k}$): = i = 1,..,5, j = 1,..,5 için k = 1,..,8 üzerinden (her bir deney için 5 Max($Def_{j,k}$) değeri) şeklinde tanımlanabilir.
Sonuç olarak toplam 33 performans ölçüsünün değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler SAS / STAT modülünün REG prosedürü kullanılarak ampirik modelleme gerçekleştirilmiştir. Bütün modeller başlangıçta kontrol faktörlerin en fazla ikinci dereceden polinomu olarak kabul edilmiştir. Modellemede aşamalı (stepwise) regresyon kullanılması modele sadece önemli görülen doğrusal ve etkileşim terimlerinin girebilmesini sağlamıştır. Bütün performans ölçülerinin ampirik modelleri için normal dağılım, artık değer – tahmini değer grafikleri ve modellemenin yeterliliğini ölçen $R^2$, Ayarlanmış (Adjusted) $R^2$, Ortalama Hata Kareleri (MSE), istatistikleri elde edilmiştir.

Performans ölçülerinin ampirik modellerinin yeterliliğinden söz edebilmek için modellerin özellikle aşağıdaki kriterleri karşılayabilmesi aranmıştır.

Artık değer – Tahmini değer grafiğiyle ilgili kriterler

- Grafik, standart artık değerlerin ±3 bandında gelişigüzel bir serpme yapısına sahip olmalıdır.
- Artık değer olarak, sıfır çizgisinin ±2 bandının dışında, toplam nokta sayısının %5'inden fazla nokta olmamalıdır.

Modelin yeterlilik analiz istatistikleriyle ilgili kısıtlar

- $R^2$ ve Ayarlanmış $R^2$ değerleri 1'e yakın olmalıdır.
- Ortalama Hata Karesi değerleri göreceli olarak küçük olmalıdır.

Bunlar, regresyon modelindeki hata terimini 0 ortalama ve standart sapma ile normal dağıldığı ve korelasyon sabit içermediği varsayımları ile ilgili bazı önemli testlerdir.

Ampirik modellerin yukarıdaki kriterleri sağlamadığı durumlarda veri veya bağımsız değişken transformasyonu ve modele daha yüksek dereceli terim ekleme gibi yaklaşımlar izlenmiştir. Böylece geliştirilen modellerin regresyon analizi varsayımlarını sağladığından emin olunmuştur.( Çelik, vd. (2001))

Amaçların performans ölçüleriyle (W, C, StdMS) kısıtların performans ölçülerinden $MinMS_{21}$ ve $MaxDef_1$'in ampirik modelleme sonucu elde edilen denklemleri ile bunlara karşılık gelen denklemlerin Varyans Analizi (ANOVA) tabloları aşağıda verilmiştir.

**C** = 46958 - lc*5801.80433 - tw*285321 - twl*62448 - p*2838.24421 - h*4779.27202 - m1*115856 - m2*115856 + tc*lc*2129710 - tc*tw*1630398 - tw*twl*948332 - tc*p*10510 - lc*twl*19574 + tw*p*723067 + tw*h*644450 + twl*h*433837 + tc*m1*282444 + tc*m2*282448 + lc*m1*18467 + lc*m2*18467 + tw*m1*541216 + tw*m2*541218 + twl*m1*167015 + twl*m2*167013 + p*m1*6155.57245 + p*m2*6155.59716 + h*m1*8309.89132 + h*m2*8309.94607

**C (Maliyet) için ANOVA***

| Source | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Value | Pr > F |
|---|---|---|---|---|---|
| Model | 27 | 9.70E+13 | 3.59E+12 | 137422 | <.0001 |
| Error | 215 | 5.62E+09 | 26133986 | | |
| Corrected Total | 242 | 9.70E+13 | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Root MSE | | 5112.141 | R-Square | 0.9999 |
| | Dependent | Mean | 1648185 | Adj R-Sq | 0.9999 |
| | Coeff Var | | 0.31017 | | |

*Source: Kaynak
Sum of Squares: Kareler Toplamı
Mean Square: Ortalama Kareler Toplamı
F Value: F Değeri
Error: Hata
Corrected Total: Düzeltilmiş Toplam
Root MSE: Kök MSE
Dependent Mean: Bağımlı Ortalama
Coeff Var: Varyans Katsayısı
R-Square: R Kare
Adj. R-Sq: Ayarlanmış R Kare

**W** = 0.47124 - lc*0.05837 - tw*2.87356 - twl*0.62952 - p*0.0286 - h*0.04813 - m1*1.16503 - m2*1.16507 + tc*lc*21.41388 - tc*tw*16.3957 - tc*twl*9.53441 - tc*p*0.10557 - lc*twl*0.19653 + tw*p*7.27071 + tw*h*6.48035 + twl*h*4.36234 + tc*m1*2.83942 + tc*m2*2.83965 + lc*m1*0.1857 + lc*m2*0.18569 + tw*m1*5.44241 + tw*m2*5.44259 + twl*m1*1.6795 + twl*m2*1.67942 + p*m1*0.0619 + p*m2*0.0619 + h*m1*0.08356 + h*m2*0.08356

**W (Ağırlık) için ANOVA**

| Source | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Value | Pr > F |
|---|---|---|---|---|---|
| Model | 27 | 9803.481 | 363.0919 | 137371 | <.0001 |
| Error | 215 | 0.56828 | 0.00264 | | |
| Corrected Total | 242 | 9804.05 | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Root MSE | | 0.05141 | R-Square | 0.9999 |
| | Dependent | Mean | 16.57055 | Adj R-Sq | 0.9999 |
| | Coeff Var | | 0.31026 | | |

**StdMS** = 1/power(0.23004 - tw*1.07145 - twl*1.46621 + twl*twl*2.02949 - h*h*0.00011487 - twl*0.01801 + tw*twl*5.7756 + tw*p*0.01342 + tw*h*0.02043 + twl*h*0.00746 - p*h*0.00017332,3)

**StdMS için ANOVA**

| Source | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Value | Pr > F |
|---|---|---|---|---|---|
| Model | 10 | 0.17999 | 0.018 | 248.44 | <.0001 |
| Error | 232 | 0.01681 | 7.25E-05 | | |
| Corrected Total | 242 | 0.1968 | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Root MSE | | 0.00851 | R-Square | 0.9146 |
| | Dependent | Mean | 0.06695 | Adj R-Sq | 0.9109 |
| | Coeff Var | | 12.71306 | | |

**MinMS$_{21}$** = 0.96491 - tc*9.13014 - lc*0.54234 - tw*6.2878 - twl*0.63262 - p*0.18618 - h*0.29739 - m1*0.72266 + p*p*0.00351 + h*h*0.00906 + tc*lc*4.30664 + tc*p*0.55419 + tc*h*0.89093 + lc*p*0.03558 + lc*h*0.05704 + tw*p*0.89074 + tw*h*1.46311 + twl*p*0.09118 + twl*h*0.1563 + p*h*0.01118 + tc*m1*1.64183 + lc*m1*0.11457 + tw*m1*1.16438 + p*m1*0.03958 + h*m1*0.05805 - h*m2*0.01262

**$MinMS_{21}$ için ANOVA**

| Source | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Value | Pr > F |
|---|---|---|---|---|---|
| Model | 25 | 456.2838 | 18.25135 | 2961.38 | <.0001 |
| Error | 217 | 1.3374 | 0.00616 | | |
| Corrected Total | 242 | 457.6212 | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Root MSE | | 0.07851 | R-Square | 0.9971 |
| | Dependent | Mean | 1.03359 | Adj R-Sq | 0.9967 |
| | Coeff Var | | 7.5954 | | |

**$MaxDef_1$** = -0.0003-3.5867*tc*tc - 0.0121*lc*lc + 0.001*p*p + 0.0026*h*h + 0.9853*tc*lc - 5.9002*tc*tw + 0.137*tc*p + 0.2163*tc*h - 0.3028*lc*tw - 0.0321*lc*twl + 0.0089*lc*p + 0.0141*lc*h + 0.2339*tw*p + 0.3841*tw*h + 0.0144*twl*p + 0.0239*twl*h + 0.0032*p*h - 0.0522*tw*m2 + 0.0009*h*m1

**$MaxDef_1$ için ANOVA**

| Source | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Value | Pr > F |
|---|---|---|---|---|---|
| Model | 19 | 94.14095 | 4.95479 | 18422 | <.0001 |
| Error | 223 | 0.05998 | 0.000269 | | |
| Corrected Total | 242 | 94.20093 | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Root MSE | | 0.0164 | R-Square | 0.9994 |
| | Dependent | Mean | 1.15964 | Adj R-Sq | 0.9993 |
| | Coeff Var | | 1.41423 | | |

## OPTİMİZASYON MODELLEME

Yukarıda bahsedilen performans ölçü modelleri, optimizasyon modelinin amaç ve kısıt fonksiyonlarını oluşturmaktadır. Optimizasyon modeli kontrol parametrelerin optimum değerlerini vermektedir. Daha önce belirtildiği gibi üç amaç fonksiyonu mevcuttur. Bunlar:

1. Ağırlığın en küçüklenmesi.
2. Maliyetin en küçüklenmesi.
3. Beş farklı kesitin her birinde, farklı yük durumları altında, beş farklı hata türüne karşılık gelen MS değerlerinin standart sapmalarının toplamının en küçüklenmesi.

Birden çok amaç fonksiyonlu optimizasyon problemlerinin modellenmesinde kullanılan çeşitli yöntemler vardır. Bunlar arasında ‘hedef programlama’, ‘öncelikli sıralama’ ve ‘ağırlık katsayılı yaklaşım’ en yaygın olanlarıdır. Optimizasyon modellemede hangi yaklaşımın izleneceği mevcut problemin gereksinimlerine göre belirlenmektedir. Taban kirişi probleminin optimizasyon modellemesinde ‘ağırlık katsayılı yaklaşım’ kullanılmıştır.

Kısıt fonksiyonları ise diğer 30 adet performans ölçü modeli ve kirişin boyutlarının teknik alt ve üst limitleridir. Modeldeki optimizasyon değişkenleri ise önceden belirtilen, kontrol faktörleridir.

Belirtilen amaç ve kısıt fonksiyonlarıyla optimizasyon modeli aşağıdaki gibi formüle edilmiştir:

$$\text{Min} \quad Z = k_1 * W + k_2 * C + k_3 * \text{StdMS}$$

s.t.

$\text{Min}(MS_{i,j}) > 0 \qquad i, j = 1,\ldots,5$

$\text{Max}(Def_j) < 3 \qquad j = 1,\ldots,5$

Taban kirişi boyutlarının alt ve üst sınırları.

Modelin çözümü için, doğrusal olmayan programlama yetisine sahip GAMS yazılımı, çözüm aracı olarak ise 'Sequential Quadratic Programming' çözüm algoritmasını kullanan SNOPT (Sparse Nonlinear OPTimizer) kullanılmıştır. Modeldeki amaç ve kısıt fonksiyonları düşük dereceli, doğrusal olmayan fonksiyonlardır. SNOPT çözüm aracı da bu tip amaç ve kısıt fonksiyonlarından oluşan modellerin çözümün için oldukça uygun ve başarılıdır.

Yukarıda tanımlanan optimizasyon modeli, $k_1$, $k_2$, $k_3$ ağırlık katsayılarının farklı kombinasyonları için analiz edilmiştir. Teknik kriterlere, taban kirişi probleminin çerçevesine ve bu analizlerin sonuçlarına bağlı kalarak, amaç fonksiyonunda ağırlık katsayıları $k_1 = 0.5$, $k_2 = 0.25$ $k_3 = 0.25$ olarak belirlenmiştir. Önerilen ağırlık katsayılarının belirlenmesindeki teknik kriterler ise;

Havacılık alanında ağırlığın hava aracının ömrünü ve ömrü boyunca oluşabilecek maliyetleri belirleyen en önemli etmen olması. Bu yüzden ağırlığın en küçüklenmesi diğer amaçlar arasında en fazla ağırlığa ve önceliğe sahip olandır.

Önerilen katsayı kombinasyonuna karşılık gelen optimum çözüm değerleri ise Tablo 3'de verilmiştir.

**Tablo 3. Optimum Çözüm Değerleri**

| **K1 = 0.5 k2 = 0.25 k3 = 0.25** |
|---|

| **Kontrol Faktör** | **Optimum Değer** |
|---|---|
| Tc | 0.096 |
| Lc | 2.730 |
| Tw | 0.080 |
| Twl | 0.080 |
| P | 2.356 |
| H | 6.369 |
| M | 1 |

| **Amaç** | **Optimum Değer** |
|---|---|
| Ağırlık | 11.921 |
| Maliyet | 137218.0 |
| StdMS | 1833.723414 |

## SONUÇLARIN TEYİDİ

Optimizasyon sonucu elde edilen parametre değerlerinin doğrulanabilmesi için ilk olarak bu değerlerdeki gerçek sonuçlar (benzetim modelini kullanarak yapılan teyit deneyi sonuçları) ile tahmini sonuçların uyumu araştırılmıştır. Bu çalışma için sözü edilen 33 performans ölçüsü için

tahmini değerlerden 95%'lik güven aralıkları oluşturulmuştur ve teyit deneyi sonuçlarının her birinin bu aralıklar içine düşme koşulu aranmıştır. Buradaki güven aralıkları SAS programının REG prosedürü kullanılarak elde edilmiştir. Tablo 4 optimal parametre değerlerindeki 33 performans ölçüsünün gerçek ve tahmini değerlerini, tahmini değerler çevresindeki güven aralıklarını ve bu doğrultuda sonuçların teyit durumlarını göstermektedir.

**Tablo 4. Teyit Tablosu**

| Perf. Ölçütü | Tahmini Sonuç | Güven A.-Alt Sınır | Güven A.-Üst Sınır | Gerçek Sonuç | Teyit? |
|---|---|---|---|---|---|
| **W** | 11.9009 | 11.796 | 12.0057 | 11.887914 | Evet |
| **C** | 136988.1 | 135788 | 138186.9 | 136839.5 | Evet |
| **StdMs** | 1833.723414 | 1040.036406 | 3675.149264 | 3244.367 | Evet |
| **$MinMS_{11}$** | 6.03010 | -4.37030 | 16.43040 | 6.49439 | Evet |
| **$MinMS_{12}$** | 8.91430 | -2.21990 | 20.04860 | 8.65478 | Evet |
| **$MinMS_{13}$** | 6.18420 | -1.88400 | 14.25240 | 5.99615 | Evet |
| **$MinMS_{14}$** | 8.58440 | -5.59490 | 22.76360 | 9.21744 | Evet |
| **$MinMS_{15}$** | -0.04600 | -25.75960 | 25.66750 | 8.11725 | Evet |
| **$MinMS_{21}$** | 0.31550 | 0.15710 | 0.47390 | 0.35159 | Evet |
| **$MinMS_{22}$** | 0.99240 | 0.73570 | 1.24910 | 1.03677 | Evet |
| **$MinMS_{23}$** | 0.46850 | 0.27360 | 0.66340 | 0.50182 | Evet |
| **$MinMS_{24}$** | 0.71980 | 0.51590 | 0.92380 | 0.81392 | Evet |
| **$MinMS_{25}$** | 18.23070 | -52.82060 | 89.28190 | 0.08738 | Evet |
| **$MinMS_{31}$** | 9.21973 | 2.02720 | 108.59908 | 2.11338 | Evet |
| **$MinMS_{32}$** | 29.70733 | 1.85926 | 990.42307 | 2.55062 | Evet |
| **$MinMS_{33}$** | 159.91821 | 6.91505 | 23136.97798 | 7.25163 | Evet |
| **$MinMS_{34}$** | 50.25893 | 2.71945 | 1537.27360 | 3.49070 | Evet |
| **$MinMS_{35}$** | 34.12553 | 2.54440 | 7278.65098 | 3.01266 | Evet |
| **$MinMS_{41}$** | 9.50382 | 1.52775 | 107.97970 | 2.14147 | Evet |
| **$MinMS_{42}$** | 30.04661 | 1.90026 | 999.53453 | 2.56149 | Evet |
| **$MinMS_{43}$** | 158.90607 | 6.10649 | 20892.44808 | 7.29726 | Evet |
| **$MinMS_{44}$** | 51.15501 | 2.81078 | 1576.24915 | 3.51237 | Evet |
| **$MinMS_{45}$** | 34.29211 | 2.52971 | 7952.19136 | 3.03701 | Evet |
| **$MinMS_{51}$** | 2.68570 | 2.28500 | 3.08640 | 2.68164 | Evet |
| **$MinMS_{52}$** | 3.89850 | 3.30570 | 4.49130 | 3.96903 | Evet |
| **$MinMS_{53}$** | 10.41220 | 9.03110 | 11.79320 | 10.57643 | Evet |
| **$MinMS_{54}$** | 4.29410 | 3.71860 | 4.86960 | 4.28826 | Evet |
| **$MinMS_{55}$** | 2.09690 | 1.73410 | 2.45970 | 2.13491 | Evet |
| **$MaxDef_1$** | 1.23445 | 1.17152 | 1.30196 | 1.20880 | Evet |
| **$MaxDef_2$** | 2.84175 | 2.69825 | 2.99561 | 2.78030 | Evet |
| **$MaxDef_3$** | 3.00209 | 2.85143 | 3.16356 | 2.93630 | Evet |
| **$MaxDef_4$** | 1.46043 | 1.38648 | 1.54027 | 1.43450 | Evet |
| **$MaxDef_5$** | 0.06147 | 0.05801 | 0.06520 | 0.06120 | Evet |

Daha ileri ve güvenilir bir doğrulama için ikinci olarak optimal parametre değerlerindeki mukavemet değerlerine karşılık gelen emniyet marjinleri ve sapma değerleri incelenmiş ve bunların gerekli değerleri karşılayıp karşılamadığına bakılmıştır. Sonuç olarak 25 MinMS değerinin sıfırdan büyük, beş MaxDef değerinin üçten küçük olduğu gözlenmiştir. Böylece elde edilen tasarımın (bkz. Tablo 3) optimal olduğu gösterilmiştir.

## YORUMLAR

Görüldüğü üzere, teyit deneyi sonuçları tavsiye edilen parametre değerlerindeki 33 tahmini değeri doğrulamaktadır. Ancak tasarımcı bazen doğrulanmayan sonuçlarla karşılaşabilir. Böyle bir durumda önerilen tasarım stratejisi (Şekil 4), uyumsuzlukların nedenlerini araştırmayı ve alınan geri besleme ışığında robust tasarım aşamalarını uyumlu bir tasarım elde edene kadar tekrarlamayı öngörmektedir.

Yukarıda sözü edilen uyumsuzlukların nedenleri yüksek olasılıkla deney tasarım, veri toplama, ampirik modelleme ya da optimizasyon modelleme aşamalarından kaynaklanabilir.

Olası hatalar ya da eksiklikler aşağıdakiler gibi olabilirdi:

- Bütün etkileşimleri yansıtamayan yetersiz deney tasarımı.
- Veri toplama aşamasında deney / ölçüm hataları ya da kullanılan benzetim modelinin gerçek durumu yeterli yansıtamaması.
- Regresyon sonucu elde edilen ampirik modellerin performans ölçülerini yeterli derecede temsil edememesi.
- Optimizasyon aşamasındaki olası sorunları bulmak içinse oluşturulan optimizasyon modeli incelenmeli ve olası farklı modeller denenmelidir. Her bir model farklı yerel sonuç verebilir. Elde edilen sonuçlar birbirine göre çok az farkla daha iyi sonuçlar verse de, bu sonuçlardan söz etme ve inceleme üretici firma için çok değerli olabilir.

Sonuç olarak tasarımcıya, uygulanan metot sonucunda olası bir çelişki ile karşılaşıldığında, önerilen parametre değerleri çevresinde daha çok veri toplayabilmek için ikinci bir deney tasarımını ve sonucunda ampirik ve optimizasyon modelleme aşamalarını güncelleştirmeyi önermekteyiz.

## SONUÇ

Uçak parçalarının tasarımında en önemli amaç parçayı en az ağırlık ve en az maliyetle üretebilmeyi sağlayan parametre değerlerini belirlemektir. Bu çalışmada, bu amaçları sağlayan parça parametre değerleri yanıt yüzeyi yaklaşımı ile bulunmuştur.

Çalışmada,

- Sözü edilen taban kirişinin işlevi ve hata modları tanımlanmış, kirişi tanımlayacak kontrol ve gürültü faktörleri ile bu faktörlerin seviyeleri tespit edilmiştir.
- Optimize edilecek amaçlar doğrultusunda ham veriler formüle edilmiştir.
- Projenin kapsamı ve eldeki olanaklar altında olası deney tasarımları ve bu deneylerin gerçekleştirilmesi tartışılmıştır.
- Elde edilen verilerin analizi ve performans ölçülerinin ampirik modellemesi üzerine çalışmalar gösterilmiştir.
- Robust tasarım probleminin formülasyonu ve çözümünü doğrusal olmayan programlama ile modelleme, projedeki çoklu amaç probleminin daha iyi ele alınabilmesini sağlamıştır.
- Son olarak teyit deneyi sonuçları tavsiye edilen parametre değerlerindeki tahmini değerlerle doğrulanmıştır.

Bu çalışmada elde edilen parametre değerleri ve önerilen metodoloji üretici firmanın ileri çalışmalarına ışık tutacaktır. Kullanılan yanıt yüzeyi metodolojisi uçak endüstrisi dışındaki endüstriler için de önerilmektedir. Metodoloji değişik endüstri sektörlerinde, probleme özel uygun formüle edilmiş performans ölçüleri ile uygulanabilir.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar bu çalışmanın gerçekleştirilmesindeki katkıları ve çalışmada süresince gerek teknik gerekse maddi destekleri nedeniyle TAI A.Ş. Tasarım ve Mühendislik Bölümüne teşekkür eder. Yine çalışma boyunca metodolojinin bütün aşamalarında, sağladıkları teknik bilgi ve kişisel yardımlarından dolayı ODTÜ Endüstri Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerine teşekkür eder.

## KAYNAKÇA

1. Box, G.E.P., and Draper, N.R. (1987), Empirical Model Building and Response Surfaces, John Wiley & Sons, New York.

2. Kackar, R.N. (1985), "Off-Line Quality Control, Parameter Design and the Taguchi Method", Journal of Quality Technology, Vol. 26, No.4, pp.248-260.

3. Köksal, G., Smith, Jr. W.A., Lu, J. ve McGregor, R. (1998), "A Case Study in Off-Line Quality Control: Characterization and Optimization of Batch Dyeing Process Design", International Journal of Technology Management, Vol. 16, Nos. 4/5/6, pp.358-382.

4. Lucas, J.M. (1994), "How to Achieve a Robust Process Using Response Surface Methodology", Journal of Quality Technology, Vol. 17, No.4, pp.176-209.

5. Myers, R.H., Khuri, A.I., and Carter, W.H., Jr. (May 1989), "Response Surface Methodology : 1966-1988", Technometrics, Vol.31, No.2, pp.135-157.

6. Phadke, M.S. (1989), Quality Engineering Using Robust Design, Prentice Hall PTR, New Jersey.

7. SAS/QC Software: User's Guide (1989), SAS Institute Inc., Version 6, Cary, North Carolina.

8. Shoemaker, A.C., Tsui, K.L. ve Wu, C.F.J. (1989), Economical Experimentation Methods for Robust Parameter Design, IIQP Research Report No. RR-89-04, The Inst. For Improvement in Quality and Productivity, University of Waterloo, Waterloo, Canada.