10. ULUSAL HAVACILIK VE UZAY KONFERANSI
18-20 Eylül 2024, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara

UHUK-2024-133

GENİŞLETİLMİŞ BİR AKTİF AKIŞ KONTROL SİSTEM TASARIMI VE KARAKTERİZASYONU

Cenk Çetin[1]
Türk Havacılık ve Uzay Sanayii/
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

Oğuzhan Yılmaz[2] ve Mehmet Metin Yavuz[3]
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Deneysel teknikler kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada, periyodik ve sabit hava üfleme kabiliyetlerine sahip, rüzgâr tünellerinde kullanılabilecek, genişletilmiş bir aktif akış kontrol sisteminin kurulumu ve karakterizasyon yaklaşımı sunulmaktadır. Çeşitli aerodinamik yüzeylere, uygulanabilir olarak basınçlı hava valfleri üzerine kurgulanan sistem, kontrol akışı debi kontrolü uygulayabilmesinin yanı sıra, periyodik üfleme senaryoları için frekans ve görev döngüsü değişkenlerinin de kontrolüne olanak sağlamaktadır. Sistemin kontrol değişkenlerine olan tepkisinin değerlendirilmesi yerinde kalibrasyon yaklaşımı ile kızgın tel anemometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistem kontrol ve ölçüm ara yüzü LabVIEW ortamında geliştirilen yazılımla oluşturulmuştur. Birden fazla basınçlı hava valfinin entegre edilebildiği sistemde her bir eyleyici eşlenik veya tekil olarak kontrol edilebilmektedir. Sunulan bu çalışmada valf besleme karakterizasyonu 0 – 25 l/dk debi için gerçekleştirilmiştir. Sistemin $\Lambda = 45^o$ düşük ok açılı bir delta kanat ile bütünlenmesi ile düzenli kare dalga sinyallerine olan tepkisi f_c = 1 Hz – 32 Hz aralığındaki frekanslar ve 25% – 50% görev döngüsü için incelenmiştir.

GİRİŞ

Akış kontrol teknikleri hava araçlarının aerodinamik, performans, yük ve kararlılık davranışlarının iyileştirilmesine yönelik teknoloji geliştirme çalışmalarında son yıllarda sıklıkla kullanılmaktadır [Batikh, Baldas, ve Colin, 2017; Chen, Zhong, Ozer, ve Weightman, 2022]. Uygulanan tekniklerin temel hedefleri aerodinamik ve kararlılık çalışmalarında, genellikle geçişli akış yapılarının, akış ayrılmalarının ve türbülansın kontrol edilmesidir. Hücum kenarı ve uç girdapları gösteren yapılarda ise direkt olarak girdabın ve yüksek hücum ve yana kayış açılarında görülen üç boyutlu yüzey akış ayrılmalarının kontrolü hedeflenmektedir [Gürsül, 2018]. Akış kontrol teknikleri literatürde temel olarak pasif ve aktif olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir [Gad-el Hak, 2001]. Pasif teknikler için herhangi bir harici enerji girdisine veya kontrol döngüsüne ihtiyaç olmamaktadır. Örnek olarak hücum, firar kenarı modifikasyonları [Çelik, ve Yavuz, 2016; Hu, v.d., 2020], statik kontrol yüzeyleri [Traub, 2019], pasif akıtma [Çelik, Çetin, ve Yavuz, 2017; Kestel, Ramazanlı, ve Yavuz, 2020], bükülgen yüzeyler [Taylor, Wang, Vardaki, ve Gursul, 2007], doğadan esinlenilmiş geometriler [Shahsavari, Nili-Ahmadabadi, Aslani, ve Kim, K. C., 2024] sıklıkla kullanılan pasif akış kontrol yaklaşımlarıdır. Aktif teknikler ise önceden belirlenmiş ya da tepkisel kontrol döngüleri ile gerçekleştirilerek enerji girdisine ihtiyaç duymaktadırlar. Sabit – periyodik üfleme/emme [Çetin, Çelik, ve Yavuz, 2018; Ott, v.d., 2019; Buzica, ve Breitsamter, 2020; Jackson, Wang, ve Gursul, 2020], değişken-periyodik tahrikleme [Taşçı v.d. 2021], plazma eyleyiciler [Chen, Shi, Zhao, Geng, ve Chen, 2021] aktif akış kontrol tekniklerine örnek olarak sıralanabilir.

Pasif teknikler sıfır enerji ihtiyacıyla avantajlı olmasına rağmen kanat üzerinde kalıcı yapısal değişiklikler yarattığından farklı uçuş rejimlerinde istenmeyen etkilere sebep olabilmektedir. Aktif

[1] Havacılık Bilimleri Entegre Ürün Sorumlusu T625 Gökbey, Helikopter G.M.Y., E-posta: cenk.cetin@tai.com.tr
Doktora Adayı, Makina Müh. Böl., E-posta: cenk.cetin@metu.edu.tr
[2] Araştırma Görevlisi, Makina Müh. Böl., E-posta: oguzhany@metu.edu.tr
[3] Prof. Dr., Makina Müh Böl., E-posta: ymetin@metu.edu.tr

tekniklerin ise enerji verimli olması önemli bir noktaya taşınmıştır. Aktif akış kontrol sistemlerinin enerji bütçesinin, aerodinamik yüzey ve / veya hava aracı enerji bütçesine oranı uygulanan kontrolün etkinliğinin ölçeklendirilmesinde önemli bir değişken olmaktadır. Bu yaklaşım için üfleme ve emme tipi aktif akış kontrolü çalışmalarında öncelikle kontrol akışı momentumunun toplam serbest akış momentumuna oranıyla elde edilen momentum katsayısının elde edilmesine ihtiyaç vardır. Daha sonra akış kontrolün temel hedefinde olan; taşıma ve sürükleme katsayıları oranındaki artış miktarı, girdap kırılım veya akış ayrılma noktalarının firar noktası ve ötesine ötelenmesi miktarı, perdövites açısının ötelenmesi miktarı gibi nicel çıktılar ile momentum katsayısı ile ilişkilendirilerek sistematik bir kontrol ilişkisi olarak raporlanabilmektedir. Endüstriyel ve akademik düzeyde gerçekleştirilen deneysel tabanlı akış kontrol çalışmalarının, araştırmacıları kavramsal tasarım ve / veya ürün düzeyinde doğru akış kontrol stratejisine yönlendirebilmesi için, uygulanan tekniğin kalibrasyon ve karakterizasyonu oldukça önem kazanmaktadır.

Sunulan bu çalışmada, küçük ve orta ölçekli rüzgâr tünellerinde kullanılmak üzere tasarlanmış, aktif hava üfleme akış kontrol sisteminin kurulumu ve karakterizasyon yaklaşımı incelenmiştir. Örnek olarak Λ = 45 derece düşük ok açılı bir delta kanat ile entegrasyonu sağlanan sistemin sunulan yaklaşım ile elde edilen kalibrasyon ve sistem performans sonuçları raporlanmıştır.

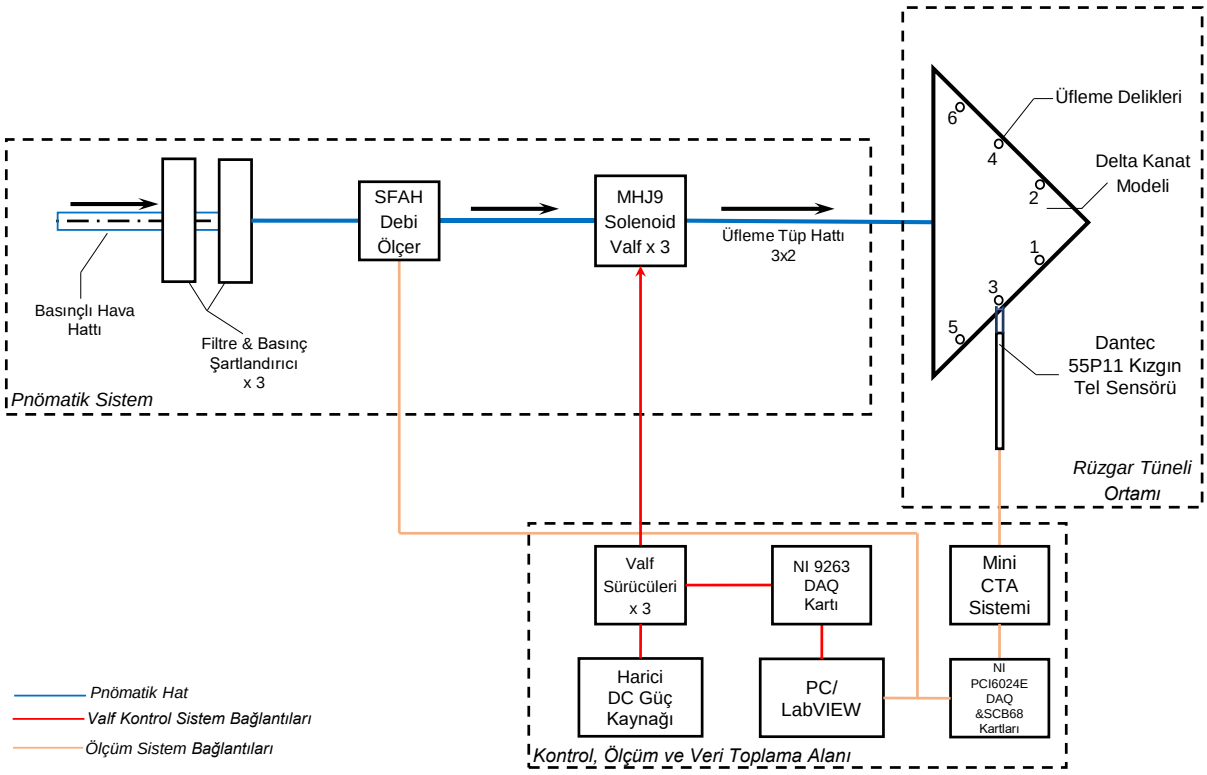
YÖNTEM

Bu çalışma Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr tünelinde gerçekleştirilmesi hedeflenen çeşitli hava üfleme aktif akış kontrol çalışmalarında kullanılmak üzere, kapsamı genişletilmiş bir sistem tasarımı, hem donanım hem de yazılım seviyesinde uygulanmıştır. Şekil 1'de şematik gösterimi verilen sistem toplamda üç bileşenden oluşmaktadır, basınçlı hava ve şartlandırma alanı, kontrol – ölçüm – veri toplama alanı ve rüzgâr tüneli ortamı.

Kompresör hattından gelen basınçlı hava FESTO MS4-LFR serisi filtre şartlandırıcılar kullanılarak, FESTO MHJ9 serisi hızlı anahtarlama valfleri aracılığı ile rüzgâr tüneli ortamında incelenecek aerodinamik yüzeye yönlendirilmektedir. Yerinde (in-situ) kalibrasyon yaklaşımında kullanılmak üzere FESTO SFAH 50U serisi dijital hava debimetresi valf ve aerodinamik yüzey arasında kısa devre bağlantısı ile konumlandırılmıştır. Sunulan bu çalışmada üç istasyonlu bir yüzey için toplam üç tekil hatlı bir yapı oluşturulmuştur ve üçer adet basınç şartlandırıcı ve valfe sahiptir. Kurulan sistem aerodinamik yüzeylerde akış kontrol uygulanmak istenen bölge istasyon sayısı kadar hattın arttırılmasına olanak verecek şekilde kurgulanmıştır ve ihtiyaca göre yenilenebilmektedir. Filtre şartlandırıcılar, 0.5 – 12 bar basınç aralığında çalışabilmekte olup 40 mikron filtreleme derecesine sahiptir. Solenoid valfler 2/2 yol anahtarlama tipinde olup, 0.5 ve 6 bar çalışma aralığına sahiptir. Valf açma ve kapama süreleri 0.9 ve 0.4 mikro saniye mertebelerinde olup kare dalga formundaki sinyallere yüksek tekrar edilebilirlik ile tepki vermektedir. Dijital hava debimetre 0 – 50 l/dk ölçüm aralığına sahip olup,0 – 10 V aralığında çıktı sinyali üretebilmektedir.

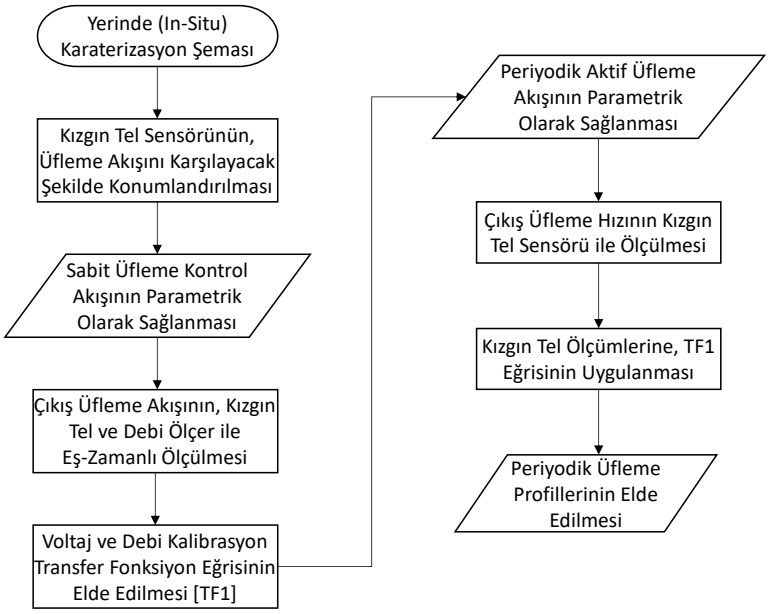
Kontrol – ölçüm – veri toplama alanı temelde iki ana fonksiyona sahiptir: 1) solenoid valflerin sürülmesi için gerekli kontrol sinyalinin üretilmesi. 2) yerinde kalibrasyon ve kontrol akışı ölçümlerinin gerçekleştirilmesi. Akış kontrol valflerinin istenen frekans, dalga tipi ve görev döngüsü ayarlanarak kontrol edilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmada üretilen kontrol sinyali karşısında elde edilen üfleme zamana bağlı hız profili kızgın tel anemometresi kullanılarak elde edilmiştir. Her iki fonksiyonu tek bir kontrol – ölçüm ortamında eşlenik ve sistematik olarak gerçekleştirebilmek için LabVIEW yazılımı kullanılarak görsel bir arayüz tasarımı gerçekleştirilmiştir. Program kullanıcıya detayları takip eden paragraflarda verilen kalibrasyon ve akış kontrol deney aşamalarının seçimine olanak sağlamaktadır. Akış kontrol aşamasında ise sabit, düzenli kare dalga ve eklenebilir modüle kara dalga seçenekleri ile parametrik olarak istenilen senaryonun incelenmesi sağlanmaktadır. Akış kontrol sinyalleri ±10V çalışma aralığına ve 16 bit çözünürlüğe sahip National Instrument NI9263 analog veri kartı kullanılarak, FESTO MHJ-KMH valf sürücüsüne aktartılmaktadır. Sürücü için gerekli olan çalışma voltajı, harici bir doğrusal akım güç kaynağı kullanılarak sağlanmıştır. Kalibrasyon ve üfleme karakterizasyon ölçümleri DANTEC 54T42 Mini CTA anemometresi ve 55P11 kızgın tel sensörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistem 0 – 5 V çıktı aralığına sahip olup, veriler 12 bit çözünürlüğe sahip National Instrument PCI 6024E veri kartı ile dijitalleştirilmiştir. Bu çalışmada örnek aerodinamik yüzey olarak Λ = 45 derece süpürme açısına sahip bir delta kanat modeli kullanılmıştır. Kanat, 135 mm veter uzunluğunda ve 8 mm kalınlığında olup, hücum

kenarları 45 derece pah açısına sahiptir. Hızlı prototipleme tekniği kullanılarak PA2200 poliamid malzeme kullanarak üretilen kanat modeli hücum kenarlarında konumlandırılmış 3 istasyonda simetrik olarak toplam 6 adet üfleme deliğine sahiptir. Üfleme delikleri pnömatik bağlantı girişleri firar kenarında konumlandırılmıştır ve 2 mm çıkış çapına sahiptir.



Şekil 1: Akış Kontrol Sistem Şematiği

Kurulan sistem için önerilen kalibrasyon şeması, akış diyagramı olarak aşağıdaki Şekil 2'de gösterilmektedir. Sol kısımdaki adımlar sensörün yerinde (in-situ) sabit hız taraması ile kalibrasyon ve transfer fonksiyonu elde etme sürecini tanımlamaktadır. Sağ kısımdaki adımlar elde edilen eğrinin kullanılarak periyodik akış kontrolü senaryoları için üfleme profillerinin elde edilme sürecini tanımlamaktadır. Kullanılan yaklaşımda Ternoy v.d. (2013) tarafından sunulan kapsamlı aktif akış kontrol çalışmasının periyodik üfleme başlığından esinlenilmiştir.



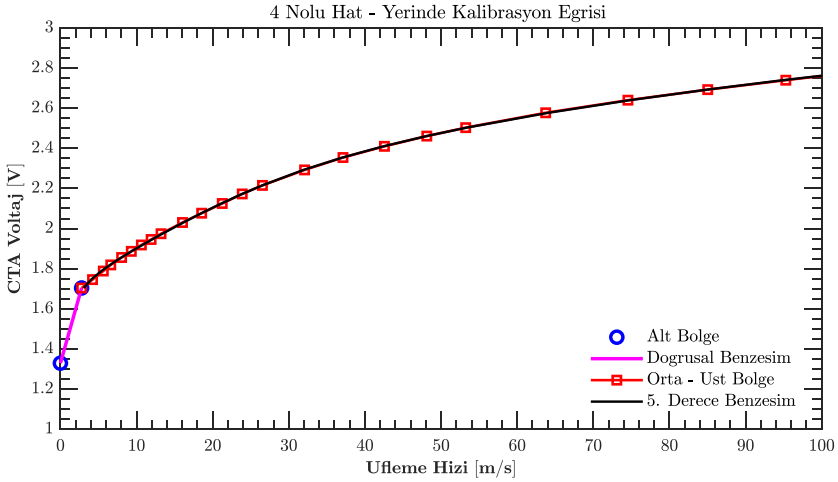
Şekil 2: Yerinde Kalibrasyon Yaklaşımı Akış Diyagramı

Bu çalışmada kullanılan MHJ9 serisi eyleyiciler benzer akış kontrol çalışmalarında sıklıkla tercih edilmektedir [Casper, v.d., 2012; Pipan, ve Herakovič, 2016; Gupta, ve Ansell, 2018; Buzica, ve Breitsamter, 2020; Abdolahipour, Mani, ve Taleghani, 2021; Düssler, Siebert, ve Bauknecht, 2022.; Pan, v.d., 2023]. Ancak bu çalışmaların birçoğu, akış kontrol ile elde edilecek aerodinamik katkının, harcanan enerjiye göre ölçülebilmesi için gerekli olan karakterizasyon adımlarını detaylı olarak sunmamaktadır. Gerçekleştirilen bu çalışmada yukarıda detayı verilen sistem ve süreçler kullanılarak, örnek delta kanat modelindeki tüm üfleme istasyonları f_c = 1 Hz – 32 Hz frekans aralığı ve 25% – 50% DC görev döngülerine sahip periyodik akış kontrol sinyalleri için incelenmiştir ve dördüncü istasyon için sonuçlar sunulmuştur.

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Kızgın Tel Yerinde Kalibrasyon Transfer Fonksiyonu:

Şekil 3'te, 4 numaralı üfleme hattı için elde edilen yerinde kalibrasyon eğrisi sunulmaktadır. Tipik tek boyutlu kızgın tel sensörlerinin düşük hızlardaki tepkisini periyodik akış ölçümüne olabildiğince doğru yansıtabilmek için parçalı fonksiyon şeklinde oluşturulan kalibrasyon eğrisi, alt bölge ve orta-üst bölge olarak ikiye bölünmüştür. Alt bölge doğrusal benzeşimle ile tanımlanırken, orta-üst bölge 5. derece polinom davranışı ile gösterilebilmektedir.



Şekil 3: Delta Kanat 4 Numaralı Üfleme Hattı CTA Yerinde Kalibrasyon Eğrisi

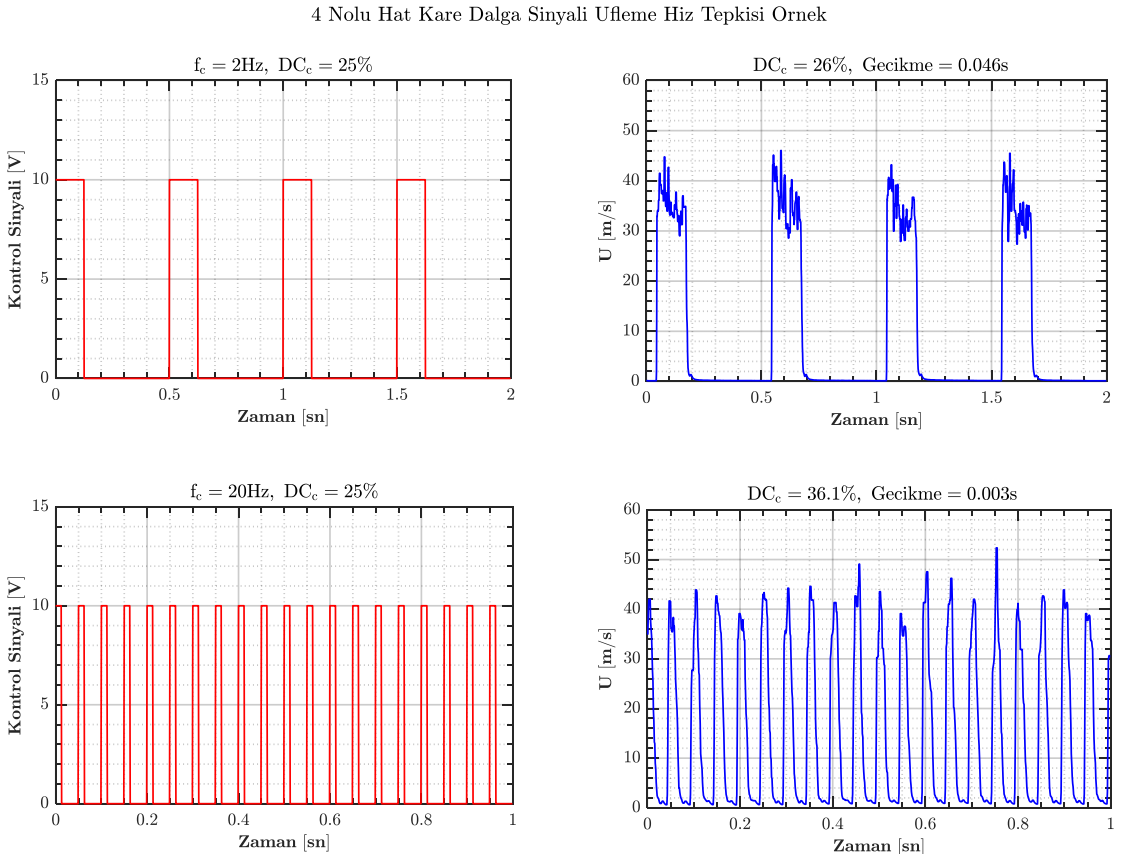
Periyodik Üfleme Karakterizasyon Sonuçları:

Periyodik üfleme ölçümlerine başlamadan önce rüzgâr tüneli deney koşullarında incelenmek istenen momentum katsayısına denk gelecek şekilde, öncelikle sabit debide üfleme ölçümü alınmaktadır. Böylelikle farklı her frekans ve görev döngüsü için sabit üfleme koşulundan hız anlamında ne kadar sapma olacağı da incelenebilmektedir. Bu örnekte istenen momentum katsayısı $C\mu$= 0.01 ve sabit üfleme hızı 34 m/s'dir. Şekil 4'te, 4 numaralı üfleme hattı için DCc=25% görev döngüsünde, f_c = 2 Hz ve 20 Hz ve frekanslarında üretilen kontrol sinyalleri ve kızgın tel sensöründen elde edilen hız tepkileri örnek olarak gösterilmektedir. Her iki koşulda da hız ölçümünün üretilen kontrol sinyaline göre gecik süresi oldukça düşüktür. Her iki durum incelendiğinde hız profilinin kare dalga benzeşimi oldukça iyi gözlemlenebilmektedir.

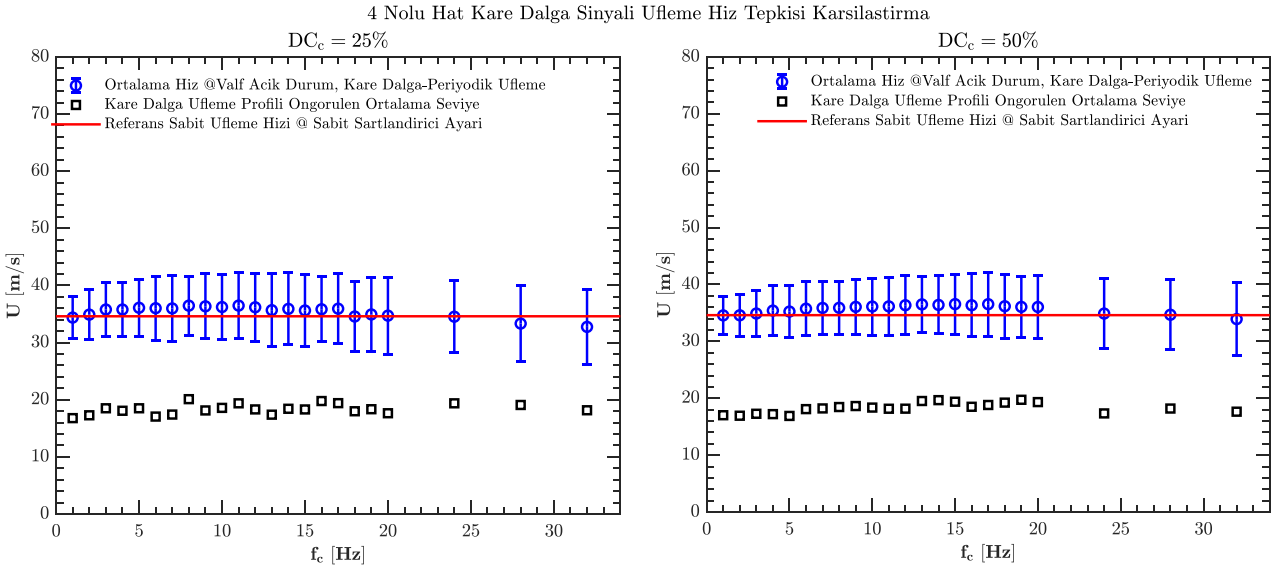
Şekil 5'te periyodik üfleme koşulları valf açık durumdaki ortalama hızların artan frekansla nasıl değiştiği incelenen her iki görev döngüsü için gösterilmektedir. Sonuçlar valf açık – görev döngüsü aktif durumlardaki ortalama hız ve kare dalga ortalama seviye için sunulmaktadır. Ortalama hız değerlerine hızdaki salınım miktarının yansıtılabilmesi için standart sapma miktarı da hata barları olarak eklenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, 4 numaralı üfleme deliği için, belirlenen sabit bir şartlandırıcı ayarında artan frekansla periyodik ortalama aktif üfleme hızının, sabit üfleme hızından en fazla 2 m/s mertebelerinde sapma gösterdiği gözlemlenmektedir. Periyodik üfleme hızı aktif durumda en fazla 6 m/s salınım göstermektedir.

Şekil 6, sunulan bir önceki görsele benzer yaklaşımla görev döngüsünün artan frekansla değişimini her iki hedef görev döngüsü için göstermektedir. İncelenen çalışma aralığında frekans artışı istene görev döngüsünden sapmayı da arttırmaktadır. 32 Hz çalışma frekansında sapma seviyesi her iki

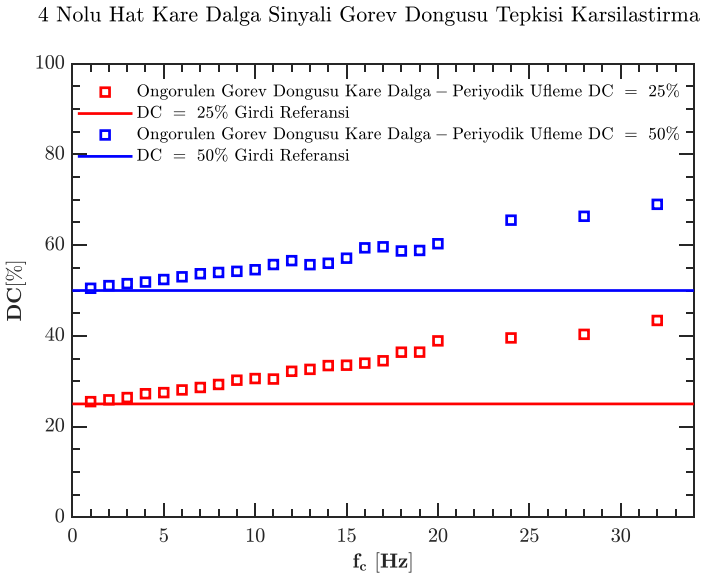
hedef değer için 18% mertebelerindedir. Bu karakterizasyon sistemin çalışma tepkisini ortaya koymakla birlikte etkin momentum katsayındaki sapmanın da hesaplanmasına yardımcı olmaktadır.



Şekil 4: Delta Kanat 4 Numaralı Üfleme Hattı Örnek Kare Dalga Akış Kontrol Sinyali ve Kızgın Tel ile Hız Ölçümü: f_c = 2, 24 Hz ve DC_c = 25%



Şekil 5: Delta Kanat 4 Nolu Üfleme Hattı DC_c = 25% ve 50%, kontrol frekansı ve üfleme hızı (valf açık konum) karakterizasyonu



Şekil 6: Delta Kanat 4 Numaralı Üfleme Hattı DC_c = 25% ve 50%, kontrol frekansı ve görev döngüsü karakterizasyonu.

SONUÇ

Sunulan bu çalışmada aerodinamik yüzey aktif akış kontrol çalışmalarında kullanılmak üzere geliştirilen bir aktif üfleme kontrol sistemine ait tasarım ve süreç detayları paylaşılmaktadır. Sistemin performansını belirlemek adına örnek bir delta kanat modeli için, sinyal parametreleri (frekans, görev döngüsü, hız, kontrol sinyali benzeşim) odaklı bir karakterizasyon kampanyası gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar sistemin hız ve frekans değerlerinin benzeşimi konusunda oldukça yetkin olduğunu göstermektedir. Görev döngüsü sapması istenen değerden artan frekansla sistematik bir artışı göstermekle birlikte, kabiliyet belirleyici unsur olarak ortaya çıkmaktadır. Elde edilen sonuçlar kurulan sistemin aerodinamik yüzey aktif akış kontrol çalışmalarında kullanılabilirliği ve parametre kontrol kabiliyetinin önemini ortaya çıkarmaktadır.

Kaynaklar

Abdolahipour, S., Mani, M., ve Taleghani, A. S., 2021. *Parametric study of a frequency-modulated pulse jet by measurements of flow characteristics*. Physica Scripta, Cilt.96(12), s.125012.

Batikh, A., Baldas, L., ve Colin, S., 2017. *Application of active flow control on aircrafts-State of the art*. In International Workshop on Aircraft System Technologies, Hamburg-Almanya, 21-22 Şubat.

Buzica, A. ve Breitsamter, C., 2020. *Pulsed blowing interacting with a leading-edge vortex*. Aerospace, Cilt.7(1), s.4.

Casper, M., Scholz, P., Colman, J., Di Leo, J. M., Delnero, S., ve Camocardi, M., 2012. *Comparison of Aerodynamic Effects Promoted by Mechanical and Fluidic Miniflaps on an Airfoil NACA 4412*. Applied Aerodynamics. Cilt.IntechOpen.

Çelik, A. ve Yavuz, M. M., 2016. *Effect of edge modifications on flow structure of low swept delta wing*. AIAA Journal, Cilt.54(5), s.1789-1797.

Çelik, A., Çetin, C., ve Yavuz, M. M., 2017. *Effect of passive bleeding on flow structure over a nonslender delta wing*. AIAA Journal, Cilt.55(8), s.2555-2565.

Çetin, C., Çelik, A., ve Yavuz, M. M., 2018. *Control of flow structure over a nonslender delta wing using periodic blowing*. AIAA Journal, Cilt.56(1), s.90-99.

Chen, S., Shi, Z., Zhao, Z., Geng, X., ve Chen, Z., 2021. *Investigation of vertical tail buffeting alleviation controlled by nanosecond plasma actuators*. Physics of Fluids, Cilt.33(8).

Chen, X., Zhong, S., Ozer, O., ve Weightman, A., 2022. *Control of afterbody vortices from a slanted-base cylinder using sweeping jets*. Physics of Fluids, Cilt.34(7).

Düssler, S., Siebert, F., ve Bauknecht, A., 2022. *Coandă-Type Flow Actuation for Load Alleviation*. Journal of Aircraft, Cilt59(5), s.1303-1319.

Gad-El-Hak, M., 2001. *Flow control: The future*. Journal of aircraft, Cilt.38(3), s. 402-418.

Gupta, R., ve Ansell, P. J., 2018. *Closed-Loop Trailing-Edge Separation Control System Using Empirical Mode Decomposition*. AIAA journal, Cilt.56(1), s.121-131.

Gursul, I. ve Wang, Z., 2018. *Flow Control of Tip/Edge Vortices*. AIAA Journal, Cilt.56(5), s.1731-1749.

Hu, T., Cheng, C., Liu, P., Huang, Y., Zhang, Z., Qu, Q., ... ve Akkermans, R. A., 2020. *Control of self-induced roll oscillations using the sinusoidal leading-edge for low-aspect-ratio wings*. Experiments in Fluids, Cilt.61, s.1-20.

Jackson, R., Wang, Z., ve Gursul, I., 2020. *Control of upswept afterbody vortices using continuous and pulsed blowing*. Journal of Aircraft, Cilt.57(1), s.76-92.

Kestel, K., Ramazanlı, B., ve Yavuz, M. M., 2020. *Control of flow structure over a non-slender delta wing using passive bleeding*. Aerospace Science and Technology, Cilt.106, 106136.

Ott, C., Gallas, Q., Delva, J., Lippert, M., ve Keirsbulck, L., 2019. *High frequency characterization of a sweeping jet actuator*. Sensors and Actuators A: Physical, Cilt.291, s.39-47.

Pan, J., Wang, W., Wang, X., Li, C., Zhao, X., ve Tang, K., 2023. *Experimental Investigation on Flow Control over a Circular Cylinder Using Antiphase Pulsed Jets*. Actuators Cilt.(12), s. 432.

Pipan, M., ve Herakovič, N., 2016. *Volume flow characterization of PWM-controlled fast-switching pneumatic valves*. Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering, Cilt.62(9), s.543-550.

Shahsavari, A., Nili-Ahmadabadi, M., Aslani, A., ve Kim, K. C., 2024. *Introduction of a biomimetic device designed to improve the flow over a slender delta wing: visualization study*. Journal of Visualization, Cilt27(2), s.177-195.

Taylor, G., Wang, Z., Vardaki, E., ve Gursul, I., 2007. *Lift Enhancement over Flexible Nonslender Delta Wings*. AIAA Journal, Cilt.45(12), s.2979-2993.

Ternoy, F., Dandois, J., David, F., ve Pruvost, M., 2013. *Overview of Onera actuators for active flow control*. AerospaceLab Journal, Cilt.06(3), s.1-14.

Traub, L. W., 2019. *Effects of plain and Gurney flaps on a nonslender delta win*g. Journal of Aircraft, Cilt.56(2), s.469-480.

Taşcı, M. O., Tümse, S., Şahin, B., Karasu, İ., ve Akıllı, H., 2021. *The influence of perturbation motion over a slender delta wing under sideslip angle*. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt.10(1), s.393-403.