

DOĞADAN ESİNLENİLMİŞ KENAR DEĞİŞİKLİKLERİNİN DÜŞÜK OK AÇILI DELTA KANATLARIN AERODİNAMİK KATSAYILARINA ETKİLERİ

Diren Dikbaş¹
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara
Göktuğ Koçak²
Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, Ankara

Mehmet Metin Yavuz³
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
Ankara

ÖZET

Düşük ok açılı delta kanatların kullanıldığı planformlar, farklı ölçeklerdeki çeşitli hava araçlarında kullanılmakta olup, bu araçların aerodinamik performans katsayıları iyileştirilmeleri oldukça önem teşkil etmektedir. Bu çalışmada beyaz yanlı yunus kuyruğundan ilham alınarak tasarlanmış düşük ok açılı delta kanatların düşük hızlı rüzgâr tüneline kuvvet ve moment ölçümü deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler 75000 Reynolds sayısında ve -4 – +30 derece hücum açısı aralığında ikişer derecelik aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, sürüklenme katsayısı (C_D), taşıma katsayısı (C_L), yunuslama momenti katsayısı (C_M) ve taşıma katsayısının sürüklenme katsayısına oranı (C_L/C_D) olarak sunulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda doğadan ilham alınarak tasarlanmış kanatların perdövitesi erteleyebildiği gözlemlenmiştir.

GİRİŞ

Düşük ok açılı delta kanatlar günümüzde insansız hava araçları ve savaş jetleri gibi birçok hava aracında kullanılmaktadır. Günümüzde bu delta kanatların aerodinamik performansını arttırmak için pasif ve aktif akış kontrol yöntemleri ile ilgili birçok farklı çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmaların bir kısmı doğadan ilham alınarak yapılmaktadır ve buna biyomimikri denilmektedir.

Delta kanatlar genel olarak iki kategori altında değerlendirilmektedir. Bunlar düşük ok açılı ($\Lambda < 50^\circ$) ve yüksek ok açılı ($\Lambda > 50^\circ$) delta kanatlardır [Gursul, Cleaver ve Wang, 2014]. Günümüzde yüksek ok açılı kanatlardaki akış yapıları ile ilgili geniş bir bilgi havuzu bulunmaktadır. Fakat düşük ok açılı kanatlardaki akış yapısı üzerine yapılan araştırmalar, kullanımı gittikçe artan insansız hava araçları (İHA) ve mikro hava araçları (MHA) nedeniyle popülerlik kazanmaktadır. Yapılan araştırmaların sonucu olarak özellikle yüksek hücum açılarında ve Reynolds sayılarında düşük ok açılı kanatların akış yapısının yüksek ok açılı

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Makine Müh. Böl., E-posta: diren.dikbas@metu.edu.tr

² Dr., Makine Müh. Böl., E-posta: goktugkocak@gmail.com

Baş Mühendis, Aerodinamik Tasarım Grubu, E-posta: goktug.kocak@tai.com.tr

³ Prof. Dr., Makine Müh. Böl., E-posta: ymetin@metu.edu.tr

kanatlara kıyasla çok farklı olduğu görünmüştür. Ayrıca düşük ok açılı kanatlarda anafor gezinmesi, sarmal mod kararsızlığı, kesme katmanı kararsızlıkları ve anafor etkileşimleri gibi dengesizlikler hakkında yüksek ok açılı kanatlara kıyasla daha az bilgi mevcuttur [Taylor ve Gursul, 2004]. Düşük ok açılı kanatlarda birincil bağlanma çizgisi, anafor bozulması halinde bile, simetri ekseninden dışarıda kalmaktadır. Ayrıca düşük ok açılı kanatlarda, yüksek ok açılı kanatlara kıyasla azami taşıma katsayısı değeri ve perdövites açısının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir [Gursul, Gordnier ve Visbal, 2005]. Aerodinamik performansı geliştirmek için ve perdövites açısını daha yüksek açı değerlerine ötelemek için birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmaların bir kısmı doğadan esinlenerek yani biyomimikri yöntemi ile yapılmaktadır.

Charles Darwin'in doğal seleksiyon teorisine göre hayvanlar hayatta kalmalarında yardımcı olan genetik özellikleri nesilden nesile aktarır ve uzun zamanlar sonunda ideal özelliklere sahip olacak şekilde evrimleşirler [Rose, Natarajan ve Gopinathan, 2021]. Hayvanlar için yüzyıllar süren bu eniyileme sürecinden yararlanarak uzun tasarım süreçlerini atlayabilir ve daha hızlı bir şekilde yüksek performanslı yapılar tasarlayabiliriz. Delta kanatlar üzerine olan biyomimikri çalışmalarının çoğu memeli deniz hayvanları üzerine yapılmış olup kuşlardan ilham alınarak yapılmış çalışmalar da bulunmaktadır. Delta kanatlar üzerine yapılan biyomimikri çalışmalarından birçoğunda anafor jeneratörü görevi gören bazı yapılar araştırılmıştır. Bu araştırmaların çoğu kambur balinalar üzerinedir [Fish, Weber, Murray ve Howle 2011; Chen, Pan ve Wang 2013; Post, Decker, Sapell ve Hart 2018; Miklosovic, Murray, Howle ve Fish, 2004; Van Nierop, Alben ve Brenner, 2008; Yoon, Hung, Jung ve Kim, 2011]. Yapılan bu çalışmalarda kambur balinalardan ilham alınarak tasarlanmış kanatlarda perdövitesin geciktiği gözlemlenmiştir [Chen, Pan ve Wang, 2013; Post, Decker, Sapell ve Hart 2018; Miklosovic, Murray, Howle ve Fish, 2004; Van Nierop, Alben ve Brenner, 2008; Watts ve Fish, 2001; Zverkov, Zanin ve Kozlov, 2008; Johari, Henoch, Custodio ve Levshin, 2007]. Ayrıca bu kanatlar için perdövites sonrası taşıma katsayısının arttığı gözlemlenmiştir [Chen, Pan ve Wang, 2013; Yoon, Hung, Jung ve Kim, 2011; Johari, Henoch, Custodio ve Levshin, 2007].

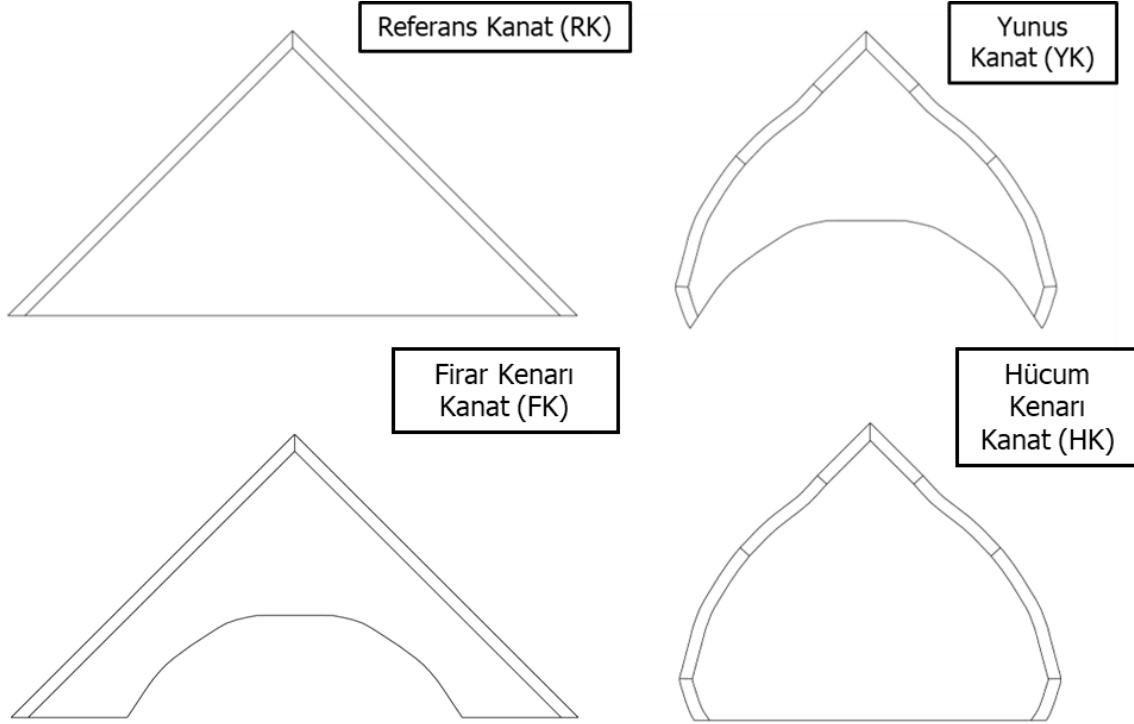
Akış kontrol yöntemleri türbülanslı akıştan laminer akışa geçişi geciktirmek, akış ayrılmalarını geciktirmek, sürüklenme kuvvetini azaltmak, taşıma kuvvetini arttırmak, türbülans kontrolü ve gürültü azaltmak gibi amaçlar ile kullanılır [Jahanmiri, 2010]. Akış kontrol yöntemleri aktif ve pasif olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Aktif akış kontrol yöntemlerinde, harici bir enerji ile akışkanın akış yönü veya hızı gibi özelliklerini değiştirilerek akış kontrol edilmektedir. Pasif kontrol yöntemlerinde ise harici bir enerji gerekmemektedir. Bu yöntemde akış, farklı şekiller ve dokular içeren bazı yapılar tarafından kontrol edilir [Yin, 2023]. Biyomimikri kullanılan kanat modifikasyonlarının çoğu pasif akış kontrolü yöntemi kullanılmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan kanat geometrileri Celik ve Yavuz, (2016) ve Çelik, (2017) çalışmasından uyarlanmıştır. Bahsedilen çalışmada referans kanadın ve yunus kanadın akış görüntülemeleri yapılmış olup yunus kanatta çift-girdap anafor yapıları gözlemlenmiştir. Ayrıca, girdap kırınım noktasının beklenen aksine kanat ucuna ilerlemiş olduğu ve akış ayrılmalarının arttığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, beyaz yanlı yunustan esinlenilerek tasarlanmış üç farklı kanat ile referans delta kanadın (RK) kuvvet ölçümleri -4 – +30 derece hücum açısı aralığında ve 75000 Reynolds sayısında gerçekleştirilmiş olup biyomimikri kullanılarak tasarlanmış kanadın kuvvetlerdeki etkisi incelenmiştir.

YÖNTEM

Bu çalışmada, deneyler Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında bulunan Düşük Hızlı Rüzgâr Tüneli'nde gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr tüneli test bölgesinin ölçüleri 750 mm x 510 mm kesit ve 2000 mm uzunluğunda olup bu rüzgâr tünelinde kaydedilen en büyük türbülans yoğunluğu değeri %1'in altındadır. Kuvvet ölçümü deneyleri 75000 Reynolds sayısında yapılmış olup hücum açıları -4 – +30 derece aralığında ikişer derece değiştirilecek şekilde seçilmiştir. Referans delta

kanadın kalınlığı 5 mm, veter uzunluğu 118 mm ve ok açısı 45 derece olup hücum kenarı 45 derece açı ile tek taraflı bir şekilde pahlanmıştı. Yapılan deneyler için serbest akış hızı 11.5 - 10.5 m/s değer aralığındadır. Beyaz yanlı yunustan esinlenerek tasarlanmış olan kanat ve referans kanat geometrileri Şekil 1'de verilmiştir.



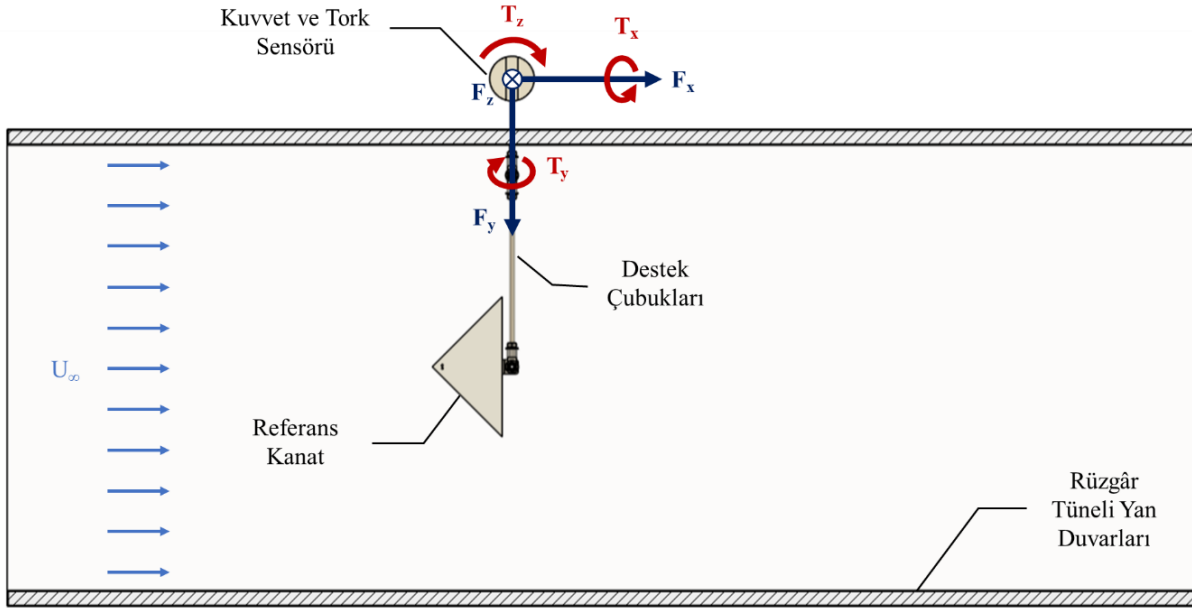
Şekil 1: Celik ve Yavuz, (2016) ve Çelik, (2017) çalışmasından uyarlanmış referans kanat ve beyaz yanlı yunustan esinlenilmiş kanat geometrileri.

Kanatların yüzey alanı yapılan modifikasyonlar nedeniyle fark göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan kanatların yüzey alanı Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Kullanılan kanat modellerin yüzey alanları.

Model İsmi	Model Kısaltması	Alan (mm ²)	Alan Oranı ($A_{\text{model}}/A_{\text{referans}}$)
Referans Kanat	RK	13924	1
Hücum Kenarı Kanat	HK	11899	0.85
Yunus Kanat	YK	7517	0.54
Firar Kenarı Kanat	FK	9585	0.69

Kuvvet ölçümleri için ATI Gamma 6 – eksen kuvvet ve tork sensörü kullanılmıştır. Bu sensörün 6 ekseninde ölçüm yapabilme kabiliyeti vardır. Kanat modellerinin tünele monte edilmesini sağlayan destek çubuklarının yarattığı aerodinamik ve statik kuvvetler tüm sistemin yarattığı kuvvetlerden çıkartılmıştır. Bu kapsamda, kanat modelinin aerodinamik katsayıları, harici yük sensörü ile ölçülen yer çekimsel kuvvetlerin darasının alınması ile elde edilmiştir. Kanat ve çubukların takılı ve takılı olmadığı şekilde farklı konfigürasyonlarda ve de rüzgâr tünelinin farklı rüzgâr durumlarında (rüzgâr var ve rüzgâr yok) deneyler icra edilmiştir. Kuvvet ölçümleri için kullanılan deney düzeneğinin üstten görünüşünün şeması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2: Kuvvet ölçümlerinde kullanılan deney düzeneğinin şematik temsili.

NI-PCIe-6321 model, 16 – bit veri toplama kartı ve LabVIEW programı kullanılarak her hücum açısı için 10 kHz’de yaklaşık 10 saniye veri toplanmıştır. Elde edilen veriler sensörün eksenine göre olup serbest akış rüzgâr eksenine dönüştürülmelidir. Bu işlem yapıldıktan sonra sürükleme katsayısı (C_D), taşıma katsayısı (C_L) ve yunuslama momenti katsayısı (C_M) denklem 1, 2 ve 3’de gösterilen şekilde hesaplanmıştır.

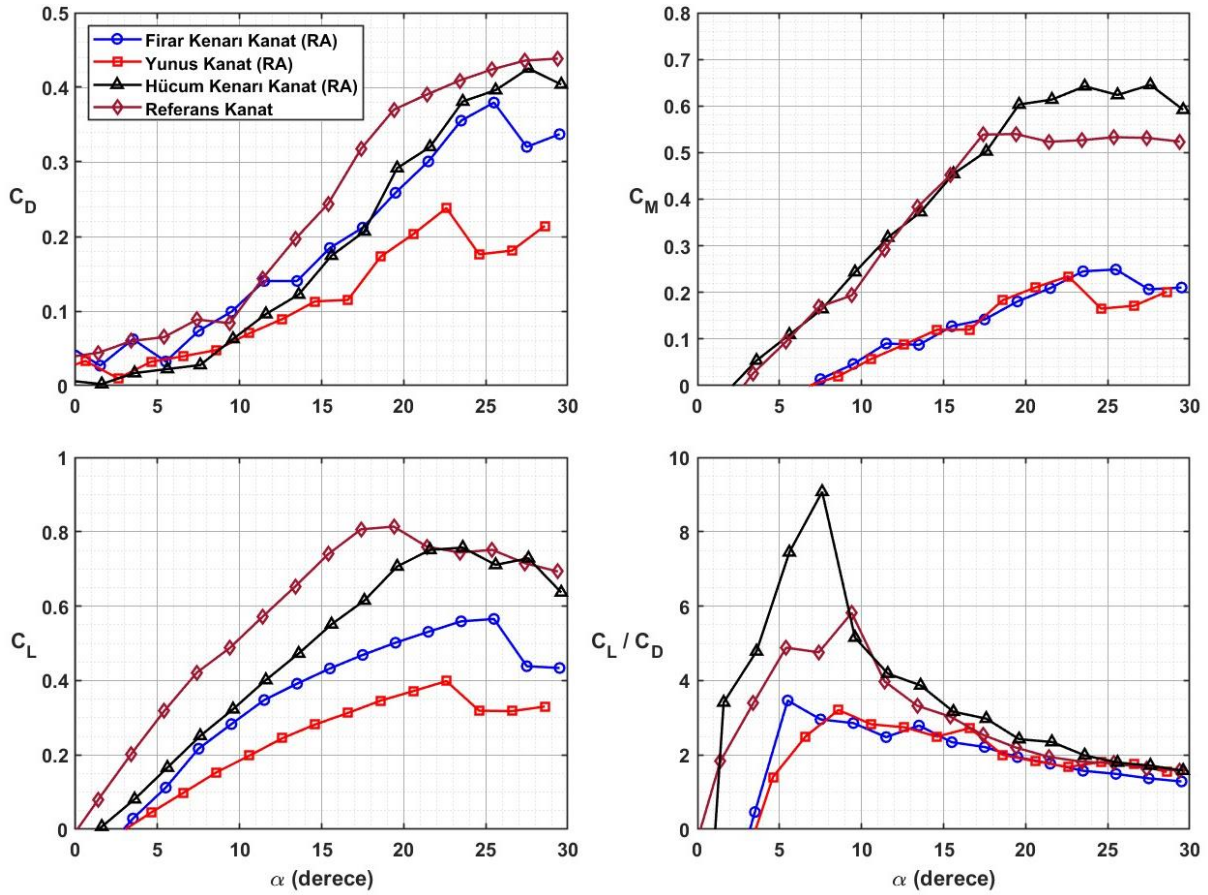
$$C_D = \frac{F_D}{0.5 A \rho U_\infty^2} \quad (1)$$

$$C_L = \frac{F_L}{0.5 A \rho U_\infty^2} \quad (2)$$

$$C_M = \frac{M_y}{0.5 A L \rho U_\infty^2} \quad (3)$$

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Kıyaslamanın yapılabilmesi için kuvvet ölçüm sonuçları iki farklı şekilde rapor edilmiştir. Aerodinamik katsayılarda kullanılan yüzey alanı referans kanat alanı (RA) ve esas kanat alanı (EA) olarak alınmıştır. Kanat modellerinin yüzey alanları Tablo 1’de verilmiştir. Esas alan kullanılarak yapılan deneyler, alan kaybından kaynaklanabilecek taşıma katsayısı düşüşü veya sürükleme katsayısı artışı gibi etkilerin ne kadar etkin olduğunu incelemek için yapılmıştır. Kuvvet ölçüm sonuçları sürükleme katsayısı (C_D), taşıma katsayısı (C_L), yunuslama momenti katsayısı (C_M) ve taşıma katsayısının sürükleme katsayısına oranı (C_L/C_D) olarak ifade edilmiş olup 75000 Reynolds sayısında alınan kuvvet ölçüm sonuçları referans ve esas alan kullanılarak Şekil 3 ve 4’te hücum açısına bağlı olarak verilmiştir. Yunuslama momenti katsayısı (C_M) için yapılan hesaplamalar referans kanadın ağırlık merkezi üzerinden yapılmış olup bütün kanatlar için aynı nokta olarak kabul edilmiştir.

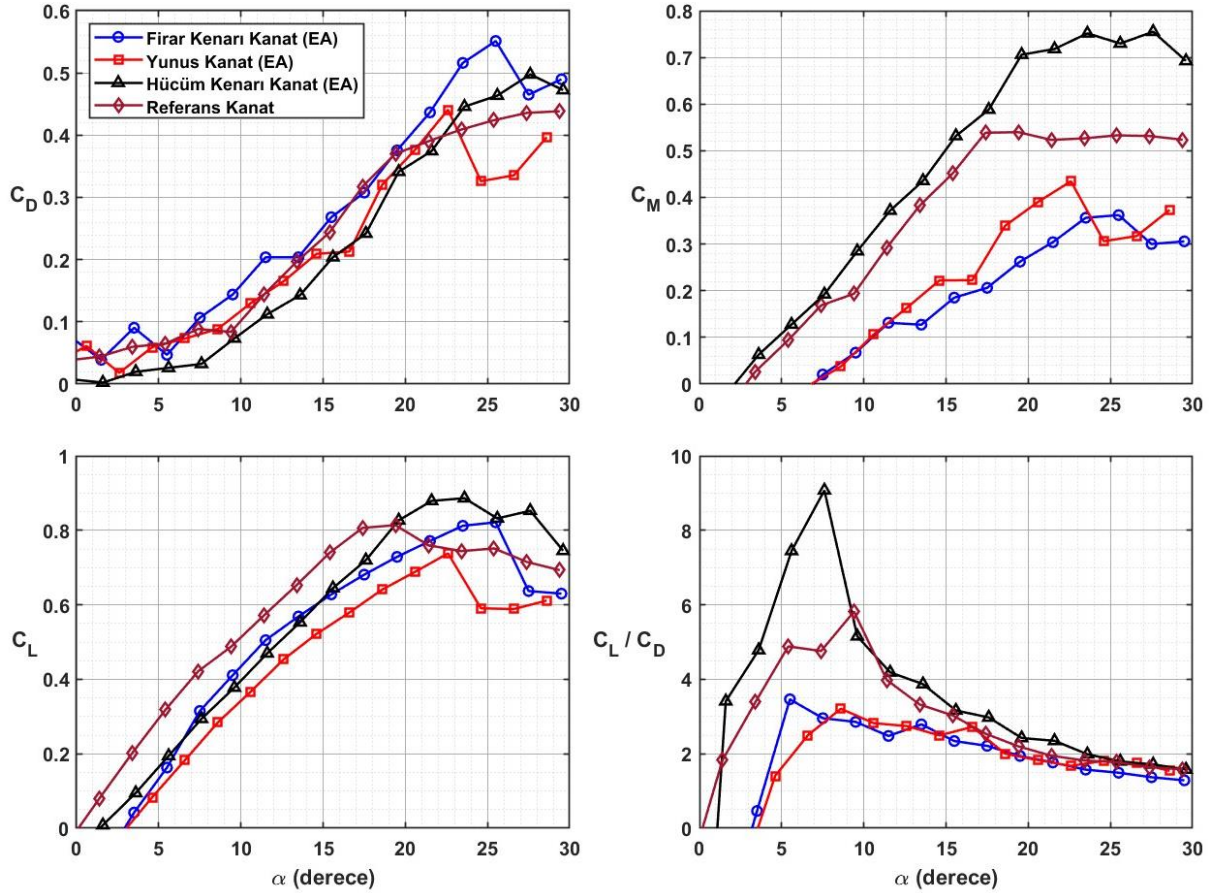


Şekil 3: Doğadan esinlenilmiş kanatların ve referans kanadın sürüklenme katsayısı (C_D), taşıma katsayısı (C_L), yunuslama momenti katsayısı (C_M) ve taşıma katsayısının sürüklenme katsayısına oranı (C_L/C_D) değerleri (referans alan kullanılarak).

Referans alan ve esas alan kullanılan deney sonuçlarında perdövites açıları aynı olup yalnızca katsayıların değerleri değişmektedir. Yapılan kuvvet ölçümleri sonunda, referans kanat için, perdövites yaklaşık 19 derecede gözlemlenmiş olup azami taşıma katsayısı yaklaşık 0.81 olarak gözlemlenmiştir. Beyaz yanlı yunustan ilham alınarak tasarlanmış kanat modellerinden en yüksek perdövites HK kanatta, yaklaşık 27 derece olarak gözlemlenmiştir. FK kanat için perdövites yaklaşık 25 derecede gözlemlenmiş olup YK kanatta yaklaşık 23 derecede gözlemlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda perdövitesin bütün doğadan ilham alınarak tasarlanmış kanatlar için arttığı gözlemlenmiş olup en yüksek yaklaşık %47'lik bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 3'te görüldüğü gibi, referans alan kullanılarak elde edilen deney sonucunda elde edilen grafiklerde doğadan esinlenerek tasarlanan kanatların, RK'ye kıyasla, genel olarak daha düşük sürüklenme ve taşıma katsayısı değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Fakat HK kanat için 0 – 9 derece hücum açısı aralığında, RK'ye kıyasla, taşıma katsayısının sürüklenme katsayısına oranında önemli bir miktar artış gözlemlenmiştir. Yüksek hücum açılarında referans kanat ile HK kanat arasında önemli bir fark gözlemlenmemiştir. Doğadan esinlenerek tasarlanan kanatların yunuslama momenti katsayısı değerleri incelendiğinde HK ve RK modellerinin eğimlerinin benzer olduğu gözlemlenmiştir. YK ve FK kanatların eğimleri de birbirine benzer olup HK'ye ve RK'ye kıyasla daha düşüktür. Pozitif yunuslama momenti katsayısı eğimi, daha yüksek oranda statik boylamsal kararsızlık göstergesi olup, YK ve FK kanat modellerinin diğer modellere kıyasla daha iyi bir kararlılığa sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca eğrilerin $C_M = 0$ değerine uzaklığı düşünüldüğünde YK ve FK kanatlarının boylamsal denge koşulunda aynı büküm açısında daha düşük yatay kuyruk alanına veya aynı alanda

daha düşük açıda büküm gerektireceği olası gözükmemektedir. Bu bağlamda YK ve FK kanatlarının boylamsal kararlılık ve kontrol edilebilirliği daha avatajlı gözükmemektedir.



Şekil 4: Doğadan esinlenilmiş kanatların ve referans kanadın sürüklenme katsayısı (C_D), taşıma katsayısı (C_L), yunuslama momenti katsayısı (C_M) ve taşıma katsayısının sürüklenme katsayısına oranı (C_L/C_D) değerleri (esas alan kullanılarak).

Şekil 4'te görüldüğü gibi, esas alan kullanılarak elde edilen deney sonucunda taşıma ve sürüklenme katsayıları benzer davranışlar göstermeye başlamaktadır. Elde edilen grafiklerde doğadan esinlenerek tasarlanan kanatların, perdövites öncesinde RK'ye kıyasla daha düşük taşıma katsayısı değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Perdövites sonrasında HK ve FK kanat modellerinin daha yüksek taşıma katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Perdövites sonrasında, doğadan esinlenilmiş kanatlar arasında, en yüksek taşıma katsayısı HK kanat modelinde gözlemlenmiş olup bu modeldeki azami taşıma katsayısı 0.89 civarında gözlemlenmiştir. Doğadan esinlenerek tasarlanan kanatlarda HK kanat en yüksek yunuslama momenti katsayısı eğimine sahip olduğu gözlemlenmiştir. YK modelinin yunuslama momenti katsayısının eğimi RK'ye kıyasla daha düşük olup deneyler sonucunda en düşük eğime FK kanatların sahip olduğu gözlemlenmiştir. Esas alan kullanılarak elde edilen sonuçlarda, en yüksek kararsızlığa sahip olan kanat modeli HK olarak gözlemlenmiş olup en düşük boylamsal kararsızlığa sahip olan kanat modeli FK olarak gözlemlenmiştir.

SONUÇ

Bu çalışmada beyaz yanlı yunus ilham alınarak tasarlanmış delta kanatlar ile 45 derece ok açısına sahip referans kanadın kuvvet deneyleri düşük hızlı rüzgâr tüneline, -4 – +30 derece hücum açısı aralığında ikişer derecelik aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Kuvvet ölçümleri 75000 Reynolds sayısında, dört farklı kanat üzerinde yapılmıştır. Bu ölçümler sonucunda RK

için perdövitesin yaklaşık 19 derecede olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda bulunan bulgular şu şekildedir.

- Doğadan esinlenilerek tasarlanan bütün kanat modellerinde perdövites ertelenmiş olup en yüksek artış yaklaşık 8 derece olarak HK kanatta tespit edilmiştir.
- Alan kaybının etkileri ihmal edildiği durumda perdövites sonrası taşıma katsayısının doğadan esinlenerek tasarlanmış kanat modellerinin ikisinde RK'ye kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Taşıma katsayısının sürüklenme katsayısına oranı incelendiğinde HK kanat model 0 – 9 derece hücum açısı aralığında RK'ye kıyasla daha iyi bir aerodinamik performans sergilediği gözlemlenmiş olup diğer hücum açıları için benzer performans gösterdiği gözlemlenmiştir.
- Yunuslama momenti katsayısı incelendiğinde en yüksek kararsızlığın HK modelinde, en düşük kararsızlığın ise FK modelinde olduğu gözlemlenmiştir.

Kaynaklar

Celik, A., ve Yavuz, M.M., 2016. Effect of Edge Modifications on Flow Structure of Low Swept Delta Wing., AIAA Journal, s.1789–1797.

Chen, H., Chong P., ve Jinjun W., 2013. *Effects of Sinusoidal Leading Edge on Delta Wing Performance and Mechanism.*, Science China Technological Sciences, s. 772–779.

Çelik, A., 2017. *Development and Implementation of Novel Flow Control Techniques For Non slender Delta Wings.*, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.

Gursul, I., Cleaver, D. J. ve Wang, Z., 2014. *Control of Low Reynolds Number Flows by Means of Fluid-Structure Interactions.*, Progress in Aerospace Sciences, s.17–55.

Gursul, I., Gordnier, R., ve Visbal, M., 2005. *Unsteady Aerodynamics of Non slender Delta Wings.*, Progress in Aerospace Sciences, s. 515–557.

Jahanmiri, M., 2010. *Active Flow Control: A Review*, Division of Fluid Dynamics, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

Johari, H., Henoçh, C., Custodio, D., ve Levshin, A., 2007. *Effects of Leading-Edge Protuberances on Airfoil Performance.*, AIAA Journal, s. 2634–2642.

Koçak, G. ve Yavuz, M.M., 2022. *Düşük Ok Açılı Delta ve Ters Delta Kanatların Aerodinamiği: Kanat Kalınlığı Etkisi.*, Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, İzmir, 14 – 16 Eylül.

Miklosovic, D. S., Murray, M. M., Howle, L. E., ve Fish, F. E., 2004. *Leading-Edge Tubercles Delay Stall on Humpback Whale (Megaptera Novaeangliae) Flippers.*, Physics of Fluids.

Post, M. L., Decker, R., Sapell, A. R., ve Hart, J. S., 2018. *Effect of Bio-Inspired Sinusoidal Leading-Edges on Wings.*, Aerospace Science and Technology, s. 128–140.

Rose, J. B. R., Natarajan, S.G ve Gopinathan, V. T., 2021. *Biomimetic Flow Control Techniques for Aerospace Applications: A Comprehensive Review.*, Reviews in Environmental Science and Biotechnology, s. 645–677.

Taylor, G.S., Gursul, I., 2004. *Unsteady Vortex Flows and Buffeting of a Low Sweep Delta Wing.*, AIAA Journal.

Van Nierop, E. A., Alben, S. ve Brenner. M.P., 2008. *How Bumps on Whale Flippers Delay Stall: An Aerodynamic Model.*, Physical Review Letters.

Watts, P., ve Fish, F. E., 2001. *The Influence of Passive, Leading Edge Tubercles on Wing Performance.*

Yin, Y., 2023. *Current study on active flow control and passive flow control.*, Theoretical and Natural Science, s. 227–234.

Yoon, H. S., Hung, P. A., Jung, J. H. ve Kim, M. C., 2011. *Effect of the Wavy Leading Edge on Hydrodynamic Characteristics for Flow around Low Aspect Ratio Wing.*, Computers and Fluids, s. 276–89.

Zverkov, I., Boris, Z., ve Viktor, K., 2008. *Disturbances Growth in Boundary Layers on Classical and Wavy Surface Wings.*, AIAA Journal, s. 3149–3158.