

KENAR DEĞİŞİKLİKLERİNİN DÜŞÜK OK AÇILI DELTA KANAT ÜZERİNDEKİ AKIŞ YAPILARINA ETKİLERİ

Alper Çelik¹
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara/
Tübitak Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü,
Ankara

Cenk Çetin² ve Mehmet Metin Yavuz³
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Bu çalışmada 45 derece ok açısına sahip delta kanat üzerindeki akış yapılarının pasif yöntemlerle kontrolü lazer aydınlatmalı akış görüntüleme kullanılarak düşük hızlı rüzgâr tüneline deneyel olarak incelenmiştir. Çalışmada kanat geometrisi biyo-ilhamlı hücum kenarı ve firar kenarı değişikliği şeklinde yapılmıştır. Geometri değişikliği için beyaz yanlı yunus kuyruğu şekli ele alınmıştır. Deneyler atak açıları $\alpha = 4, 10$ ve 12 derecede, Reynolds sayıları $Re=10000, 15000, 20000$ ve 25000 'de yapılmıştır. Yüzey akış görüntüleme deneyleri kanat ucu girdabının merkezine paralel düzlemde, çapraz akış görüntüleri ise kanat üzerinde akışa dik üç farklı kesitte alınmıştır. Yapılan deneyler kenar değişikliklerinin kanat üzerindeki akışı bütünsel olarak değiştirdiği gözlenmiştir. Uygulanan kontrol metodu, beklenenin aksine kanat üzerindeki akış yapılarını bozmuş ve girdap kırınımını kanat ucuna doğru ilerletmiştir.

GİRİŞ

Düşük ok açılı delta kanat aerodinamiği, artan insansız hava araçları (İHA) ve mikro hava araçları araştırmaları (MHA) sebebiyle son dönemde temel bir araştırma alanına dönüşmüştür. İHA ve MHA'larda ihtiyaç duyulan yüksek performans, araştırmacıları delta kanatlar üzerindeki akışın fiziği ve bu akışın kontrolü alanındaki bilgilerini genişletmeye zorlamaktadır.

Delta kanat üzerindeki akışların genel yapısı, ok açısı fark etmeksizin girdaplı yapılar tarafından karakterize edilir. Girdaplar, hücum kenarından ayrılan kesme tabakalarının kanada doğru yuvarlanması ile oluşur. Girdapların çekirdekindeki aksel hız yüksek ok açılı delta kanatlarda uçuş hızının dört beş katına, düşük ok açılı kanatlarda ise 1-2 katına kadar çıkabilmektedir [Gursul, Gordnier ve Visbal, 2005]. Girdap merkezinde oluşan yüksek hızlı alan, aynı noktada düşük basınç alanı oluşturmaktadır. Bu düşük basınç alanının yarattığı kaldırma kuvveti, yüksek ok açılı delta kanatlar üzerinde yaratılan kaldırma kuvvetinin %50'sine yakınına oluşturabilir [Wentz Jr. ve Kohlman, 1969]. Ok açısı azaldıkça, girdaptan kaynaklanan kaldırma kuvveti katkısı, daha düşük girdap merkezi hızları sebebiyle azalmaktadır. Yüksek ok açısına ($\Lambda \geq 55$ derece) sahip delta kanatların temel akış yapısı ve kontrolü üzerine literatürde birçok çalışma vardır Gursul vd.'nin 2003 yılında yayınladığı makalesinde bu konuyla ilgili çok geniş kapsamlı bir inceleme yapmıştır [Gursul, 2003]. Orta ve düşük süpürme açılı kanatlar ($\Lambda \leq 55$ derece) için ise çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Yapılan çalışmalar Gursul'ün 2005 yılında yayınlanan değerlendirme makalesinde geniş bir şekilde incelenmiştir [Gursul, Gordnier ve Visbal, 2005].

¹ Doktora Öğrencisi, Makina Müh. Böl., E-posta: e139230@metu.edu.tr,
Uzman Araştırmacı, Aerodinamik ve Isıl Tasarım Grubu, E-posta: alper.celik@tubitak.gov.tr
² Araştırma görevlisi, Makina Müh. Böl., E-posta: ccenk@metu.edu.tr
³ Doç. Dr., Makina Müh. Böl. E-posta: ymetin@metu.edu.tr

Delta kanatlar üzerinde oluşan bu girdaplar, yüksek hücum açılarında veya yüksek Re sayılarında kırıma uğrarlar. Ortaya çıkan yapı, kanattaki kaldırma kuvvetini azalttığı gibi oluşturduğu yüzey titreşimleri ile kanadın yapısal özelliğine de zarar verebilmektedir [Taylor ve Gursul, 2004]. Kanat üzerindeki 3 boyutlu ayrılma ile oluşan perdövites (stol) ve girdap kırınının olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak veya geciktirmek için kanat üzerindeki akış aktif ve pasif yöntemlerle kontrol edilebilir. Akış kontrol teknikleri sabit ve değişken yapıları olarak uygulanabilmektedir. Kanatta geometri değişiklikleri veya malzeme değişiklikleri ile gerçekleştirilen pasif akış kontrolü herhangi bir harici enerji girişi gerektirmezken, aktif akış kontrolünde akış ortamına enerji girişi sağlayacak sistemler kullanılmaktadır. Bu çalışmanın da konusu olan pasif kontrol teknikleri konusunda literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur. Hücum kenarı geometri değişikliği (Verhaagen, 2012), firar kenarı geometri değişikliği [Yaniktepe ve Rockwell, 2005], elastik malzeme kullanımı [Taylor, Wang, Vardaki ve Gursul, 2007], flap kullanımı [Greenwell, 2010] gibi yöntemler hem düşük ok açılı hem de yüksek ok açılı delta kanatlarda çalışılmıştır.

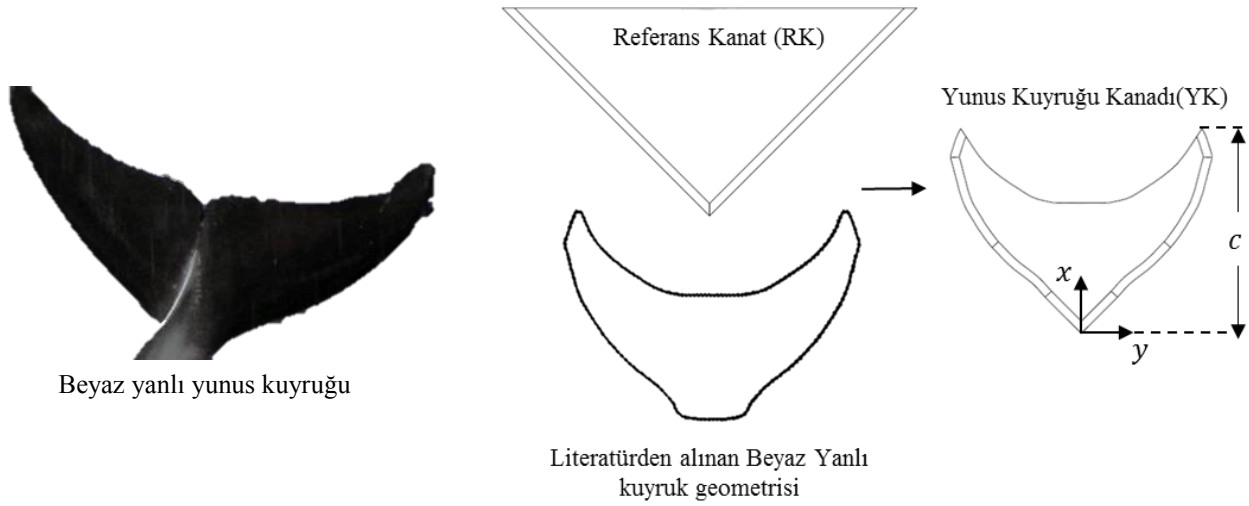
Uçan ve yüzen hayvanların hidrodinamiği ve aerodinamiği üzerine literatürde birçok çalışma vardır [Fish ve Roht, 1999; Fish, 1998; Triantafyllou ve Triantafyllou, 1995; Vogel, 1994]. Fakat bu çalışmalardan elde edilen bilgilerin mühendislik uygulamaları sınırlı sayıdadır. Delta kanat üzerindeki akışın doğadan esinli pasif şekilde kontrolü üzerine çalışma sayısı bir hayli azdır. Yapılan bazı çalışmalarda balina yüzgeci üzerindeki yapıların perdövitesini geciktirdiğini ortaya koymuştur [Miklosovic, Murray, Howle ve Fish, 2004]. Bu yapıların 50 derece ok açısına sahip delta kanat hücum kenarına uygulanmasının perdövitesini geciktirdiği gözlenmiştir [Goruney ve Rockwell, 2009]. Yine bir başka çalışmada aynı balina yüzgeci geometrisinin 52 derece ok açısına sahip delta kanat üzerine etkisi incelenmiştir [Chen ve Wang, 2014].

Bu çalışma 45 derece delta kanat üzerindeki akışın doğadan esinli kenar modifikasyonu ile pasif kontrolü ve bu kontrolün perdövites ve girdap kırımı üzerine etkilerinin incelenmesi üzerinedir. İncelemeler lazer aydınlatmalı duman görüntülemeyle yapılmıştır. Biyo-ilhamda kullanılan kuyruk, fiziki olarak delta kanatlara olan açık benzerlikler üzerine seçilmiştir. Kuyruğun ön tarafı 45 derecelik delta kanada çevrilmiş ve bu işlem yapılırken kuyruğun akışı etkileyebileceği düşünülen tüm hatları korunmaya çalışılmıştır. Deneyler veter uzunluğuna bağlı Reynolds sayıları $10000 < Re < 25000$ aralığında ve atak açıları $\alpha = 4, 10, 12$ derece için yapılmıştır.

YÖNTEM

Deneyler Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında bulunan düşük hızlı rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr tüneline test bölgesinin ölçüleri 750 mm x 510 mm x 2000 mm olup kaydedilen en yüksek çalkantı yoğunluk değeri %1'in altındadır. Deneyler 4, 10 ve 12 derece hücum açısında ve Reynolds sayıları $Re = 10000, 15000, 20000$ ve 25000 'de gerçekleştirilmiştir. Hızlı prototipleme tekniği ile üretilen delta kanadın ok açısı 45 derece, kalınlığı 5 mm, veter açıklığı 118 mm'dir. Sabit veter açıklığı ile değiştirilen kanatların en uzun kanat açıklığı referans kanatta (RK) olup 236 mm'dir. Seçilen yunus kuyruğunun geometri bilgisi literatürden alınmıştır [Bose, Lien ve Ahia, 1990]. Referans delta kanat, literatürden alınan beyaz yanlı yunus kuyruğu modeli ve üretilen yeni kanat Şekil-1'de verilmiştir.

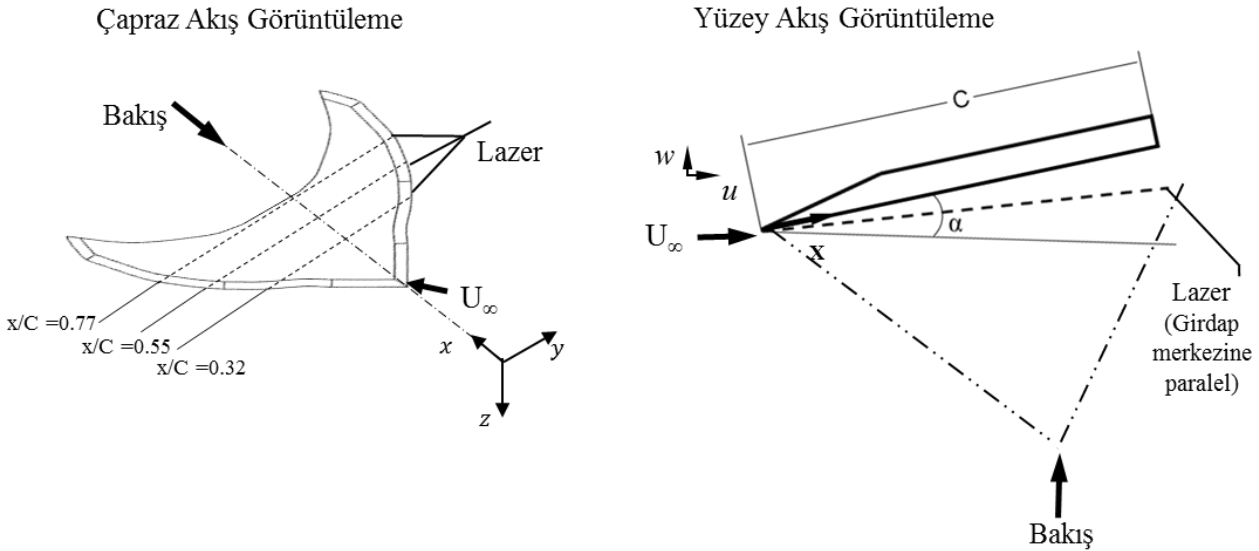
45 derece ok açılı delta kanat geometrisi yunus kuyruğu kanadına çevrilirken, yunus kuyruğu geometri bilgisinin mümkün olduğunca korunmaya çalışılmıştır ve değişiklik kanadın %18 veter uzunluğundan sonra başlamıştır. Bu yeni üretilen kanada Yunus Kuyruğu Kanadı (YK) adı verilmiştir. Veter uzunluğu referans kanatla aynı tutulan YK'nın kanat genişliği 151 mm'dir. Yapılan çalışmalarda en fazla blokaj oranı referans kanadın 12 derece atak açısında oluşmakta ve %0.5'in altındadır.



Şekil 1: Kanat geometrileri

Dumanla lazer görüntüleme için 400 mW gücünde ve 523 nm dalga boylu katı-hal lazeri kullanılmıştır. Lazer silindirik lensten geçirilerek 5 mm kalınlığında lazer düzlemi elde edilmiştir. Görüntülerin elde edilmesi için kullanılan duman, kanat içine açılan duman delikleri sayesinde kanadın ucundan beslenmiştir. Duman sıvı parafin ve basınçlı karbondioksit gazı kullanılarak ticari bir duman üretim cihazı ile üretilmiştir.

Yüzey ve çapraz akış olmak üzere iki farklı akış görüntüleme gerçekleştirilmiştir. Çapraz akış görüntülemeleri kanadın $x/C = 0.32$, 0.55 ve 0.77 düzlemlerinde gerçekleştirilmiştir. Yüzey görüntülemesinde ise girdap merkezine paralel düzlemlerde görüntüler alınmıştır. Çapraz akış görüntülemeleri için kanat uzunluğunun 5 katı uzaklığa 45 derece açıyla bir ayna yerleştirilmiştir ve görüntüler tünel dışından alınmıştır. Görüntüler DSLR kamera ile alınmıştır. Kanat üzerindeki görüntü düzlemleri Şekil-2'de gösterilmiştir.

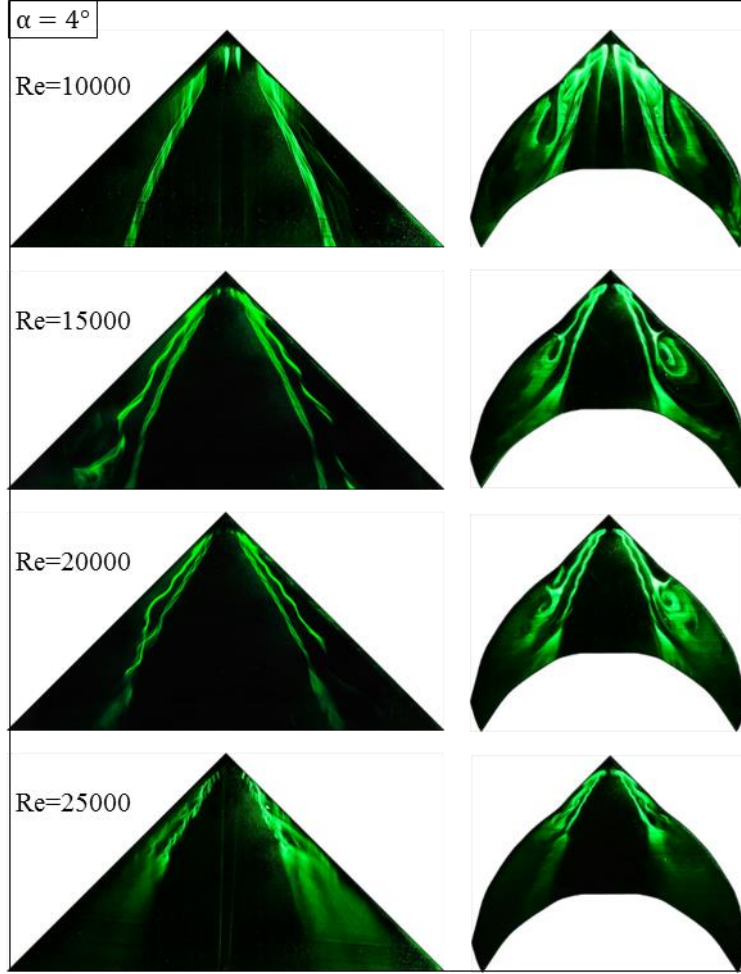


Şekil 2: Ölçüm düzlemlerinin gösterimi.

UYGULAMALAR

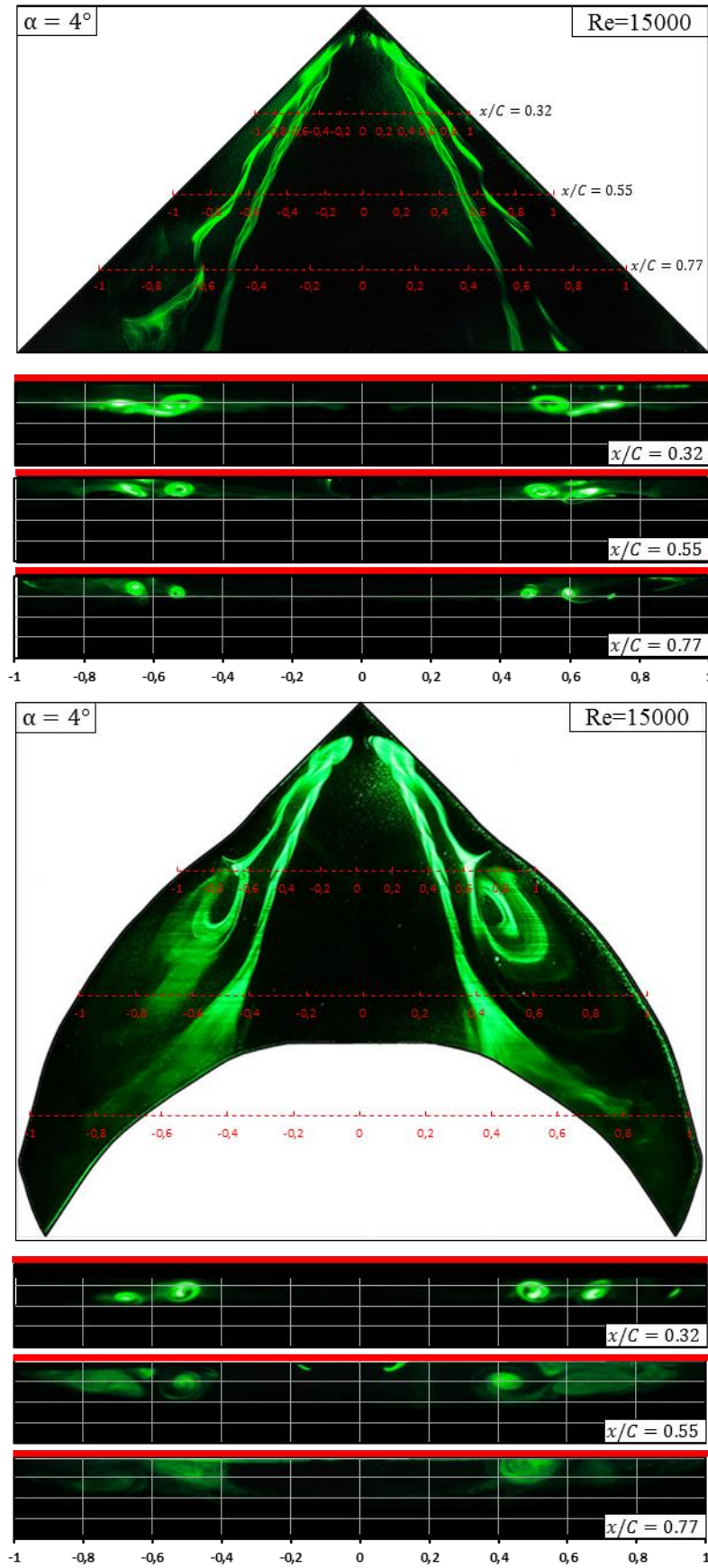
Şekil-3 de atak açısı $\alpha = 4$ derecede Reynolds sayısı $Re=10000, 15000, 20000$ ve $Re=25000$ 'de RK ve YK planformalarına ait yüzey akış görüntüleri verilmiştir. Şekil-3'ün sol tarafında RK, sağ tarafında YK nin görüntüleri, yukarıdan aşağıya artan Reynolds sayıları için verilmiştir. Şeklin sol tarafı incelendiğinde $Re=10000$ için akışı domine eden simetrik, hücum kenarı girdap çifti görülmektedir. Girdapların dışında gözükten iplikçikler ikincil girdabın işaretleri olarak düşünülebilir.

Re=15000 sonuçlarına bakıldığında RK üzerinde simetrik ve düşük ok açısına sahip delta kanatlarda görülebilen, çift-girdap (dual vortex) yapısı görülmektedir. Girdap kırınımı kanat yüzeyinin dışındadır. Kanadın simetri eksenine yakın iç girdabın, kanadın hücum kenarına yakın dış girdaba göre daha kararlı olduğu görülmektedir.



Şekil 3: Atak açısı $\alpha = 4$ derecede Re=10000, 15000, 20000 ve Re=25000 için RK ve YK karşılaştırması.

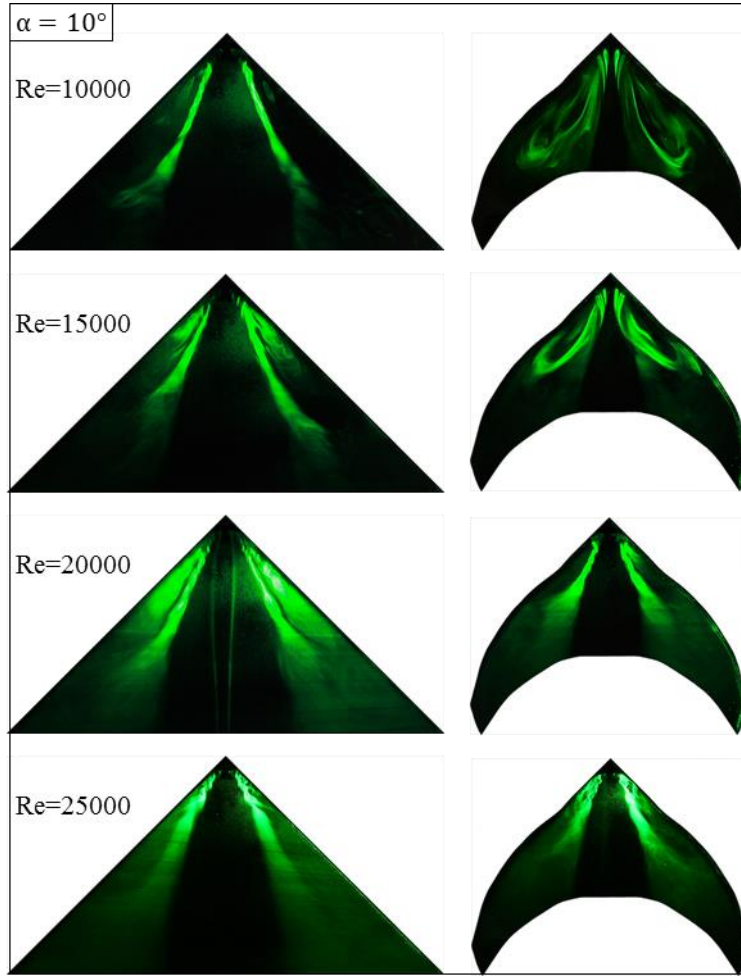
Reynolds sayısı 20000 olduğunda ise çift-girdap yapısının dış girdapları kanat veterinin ortasında dağılmaktadır. İç girdaplar ise kanat veteri boyuna gözükmemektedir. Kanat firar kenarı civarında dumanda dağılmalar görülmektedir. Re=25000 sonuçları incelendiğinde RK üzerinde pek çok duman iplikçığı görülmektedir. Girdaplar kanat veteri orta noktası civarında kırınıma uğramış haldedir. Re=15000'de alınan RK görüntüsü ile karşılaştırıldığında girdapların kanat hücum kenarına doğru açıldığı da görülmektedir. Şeklin sağ tarafında kenarları değiştirilmiş YK incelendiğinde farklı akış yapıları gözükmemektedir. Re=10000'de kanat üzerinde RK'ya benzer hücum kenarı girdabı görülmekle beraber, Reynolds sayısı 15000'de RK'dan tamamen farklı bir yapı görülmektedir. Hücum kenarına yakın girdap, kanat üzerinde bir döngü yaratmıştır. Bu döngü, bu makalede gösterilmemekle beraber son derece kararlıdır. İç girdaplar ise kanat firar kenarına yakın bir düzlemde kırınıma uğramıştır. Re=20000'de hücum kenarına yakın girdap kararlılığını yitirmekle beraber hala mevcuttur, iç girdap ise firar kenarının hemen öncesinde, planform üzerinde kırınıma uğramıştır. Re=25000'de ise girdaplar kanat veteri orta noktasına gelmeden kırınıma uğramaktadır.



Şekil 4: RK ve YK planformlarının atak açısı $\alpha = 4$ derece, $Re = 15000$ için yüzey ve çapraz akış karşılaştırması

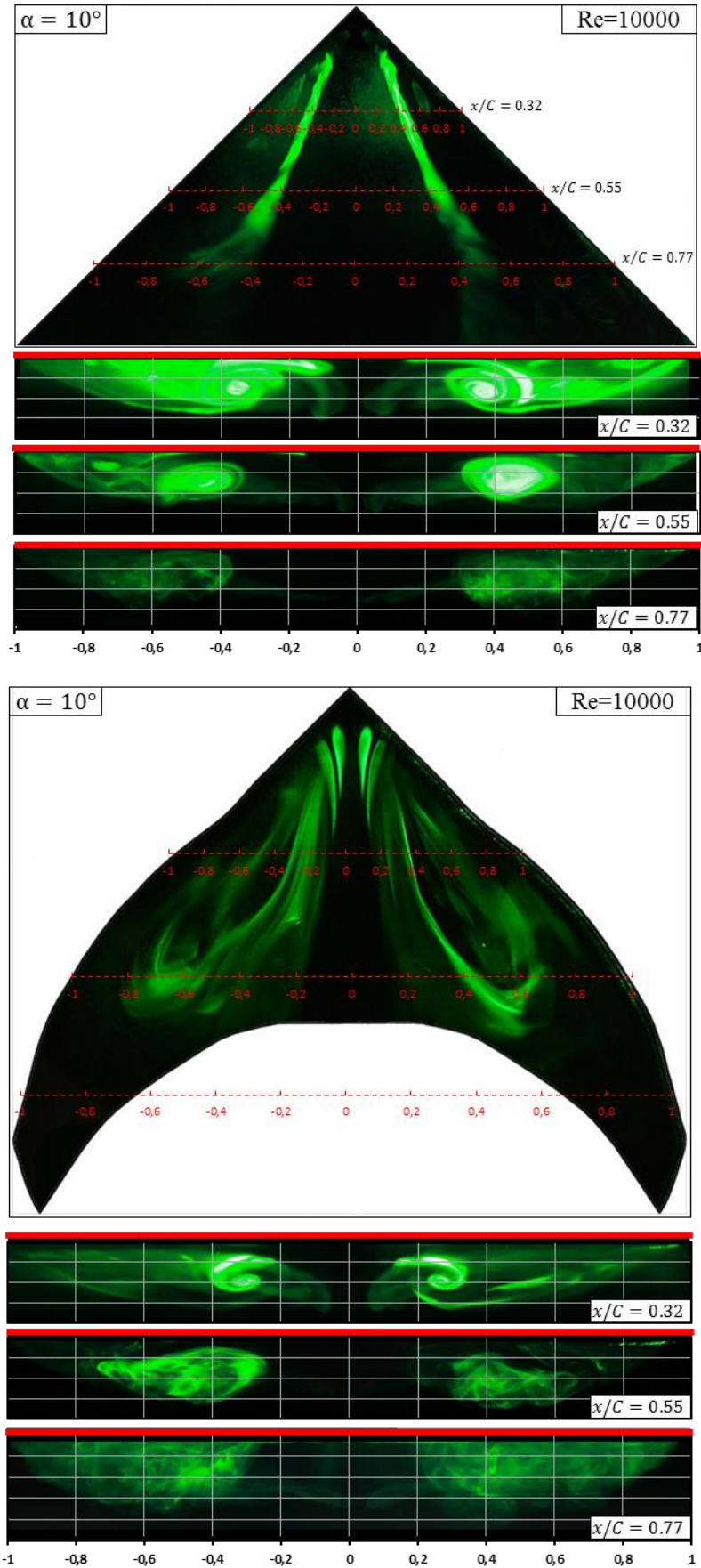
RK ve YK kanat planformları üzerindeki akış yapılarını ve Şekil-3'te bahsedilen, YK üzerinde görülen kararlı döngü yapısını daha iyi inceleyebilmek için atak açısı $\alpha = 4$ derece ve $Re=15000$ için Şekil-4 oluşturulmuştur. Şekilde RK ve YK için yüzey akış görüntüsünün yanı sıra $x/C=0.32$, 0.55 ve $x/C=0.77$ de çapraz akış görüntülerine yer verilmiştir. Birimsiz uzunluk ölçüleri akış yapılarının yerlerinin tam tespiti için şekiller üzerlerine yerleştirilmiştir.

Şekil-4 incelendiğinde her iki planform için de yüzey akış görüntüleri ile çapraz akış görüntülerinin uyum içinde olduğu görülmektedir. RK üzerinde tüm kanat boyunca çift-girdap yapısı dumanda herhangi bir dağılma görülmeden gözlemlenmektedir. YK planformu incelendiğinde ise çift-girdap yapısı $x/C=0.32$ 'de görülmekle beraber, akışın daha aşağısında kalan kesitlerde bu çift-girdap yapısı görülmemektedir ve duman dağılmış haldedir. $x/C=0.77$ düzleminde ise akış girdap kırınımı yaşamaktadır ve yüzey görüntüsü ile desteklenmektedir.



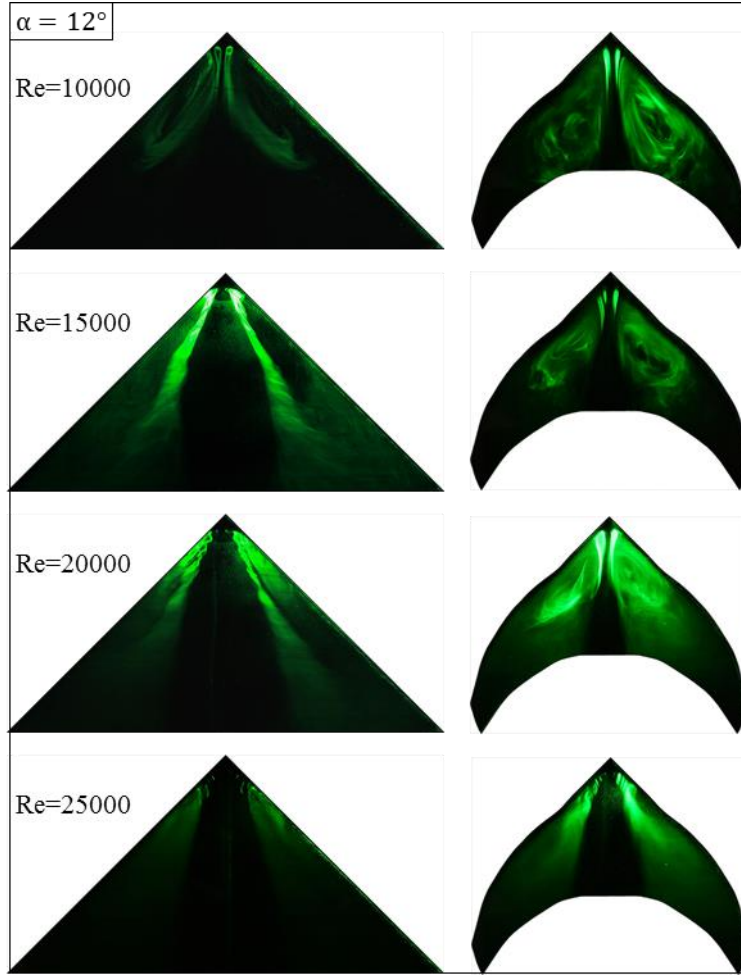
Şekil 5: Atak açısı $\alpha = 10$ derecede $Re=10000$, 15000 , 20000 ve $Re=25000$ için RK ve YK karşılaştırması.

Şekil-5, Şekil-3 ile aynı biçimde atak açısı $\alpha = 10$ derece için oluşturulmuştur. Şeklin sol tarafındaki RK incelendiğinde $Re=10000$ için kanat veter orta noktasının aşağısında kırınıma uğrayan girdaplı bir akışa sahiptir. Reynolds sayısı arttıkça girdap genişlemekte ve kırınım noktası kanat ucuna doğru yaklaşmaktadır. $Re=25000$ 'de ise kırınım noktası kanat ucuna daha da yaklaşmakta ve duman dağılmış halde kanat yüzeyini kaplamaktadır. Şeklin sağ tarafındaki YK incelendiğinde ise tamamen farklı bir akış göze çarpmaktadır. Kanat yüzeyinde akış ayrılmasını temsil ettiği düşünülen büyük anafor (swirl) yapıları görülmektedir. $Re=15000$ 'de bu anafor yapısının kapladığı alan küçülmekte, merkezi ise kanat ucuna yaklaşmaktadır. Reynolds sayısının yükselmesi ile bu yapılar yerlerini kırınımı kanat ucuna yakın yerlerde olan girdaplı yapılara bırakmaktadır.



Şekil 6: RK ve YK planformlarının atak açısı $\alpha = 10$ derecede, $Re = 10000$ için yüzey ve çapraz akış karşılaştırması

Şekil-6, Şekil-5 ile aynı şekilde kurgulanmış olup atak açısı $\alpha = 10$ derece için $Re=10000$ de RK ve YK planformları üzerindeki akışın daha detaylı incelenmesi için oluşturulmuştur. Her iki planformda da yüzey akış görüntüleri ve çapraz akış görüntüleri uyum içindedir. RK incelendiğinde planform üzerinde kırımımı gerçekleşmiş girdaplı bir yapı görülmektedir. $x/C=0.32$ ve $x/C=0.55$ kesitleri incelendiğinde girdap merkezleri yoğun dumanlı bölgeler olarak görülmektedir. $x/C=0.77$ 'de ise kırımım sebebiyle duman dağınık bir haldedir. YK planformu incelendiğinde ise, üç boyutlu akış ayrılması görülmektedir. Her üç kesitte de yüzey akış görüntüsünü destekler şekilde duman dağılmış bir halde kanat açıklığının büyük bir kısmını kaplamaktadır.



Şekil 7: Atak açısı $\alpha = 12$ derecede $Re=10000$, 15000 , 20000 ve $Re=25000$ için RK ve YK karşılaştırması.

Şekil-7, Şekil-3 ile aynı yapıda oluşturulmuştur. Şeklin sol tarafı incelendiğinde atak açısı $\alpha = 12$ derece için RK planformunun akış yapısının artan Re sayısı değerleri için nasıl değiştiği izlenebilir. $Re=10000$ 'de gözlenen üç boyutlu akış ayrılması, artan Re sayısı değerleri ile yerini girdaplı akış yapısına bırakmaktadır. Girdap veter orta noktasına yakın yerde kırımına uğramaktadır. Re sayısının artışı girdap kırımını kanat ucuna yaklaştırmaktadır. Şekil-7'nin sağ tarafı incelendiğinde YK planformu üzerinde $Re=10000$ için üç boyutlu akış ayrılması görülmektedir. Anafor yapısı RK ile karşılaştırıldığında daha geniş bir alanı kapladığı söylenebilir. Reynolds sayısının artması anafor yapısı alanını küçültmekte ve anafor yapısının merkezini kanat ucuna yaklaştırmaktadır. $Re=25000$ 'de ise anafor yapısı yerini kırımını kanat ucunda gerçekleşmiş girdaplı yapıya bırakmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışma düşük ok açılı delta kanatlar üzerinde biyo-ilhamlı yöntemlerle pasif akış kontrolü ve bu kontrolün girdap kırınımı ve perdövites üzerine olası etkilerinin incelemesi üzerinedir. İnceleme 45 derece ok açısına sahip referans bir delta kanat ve hücum kenarı beyaz yanlı yunus kuyruğu geometrisi esinli değiştirilmiş kanadın akış görüntülemelerinin karşılaştırması şeklinde yapılmıştır. Sonuçlar hücum kenarı değişikliğinin akış alanını bütün olarak etkilediğini göstermektedir. Beklenenin aksine akış hücum kenarı değişikliği akış yapısını bozmuş, girdap kırınım noktasını kanat ucuna ilerletmiş ve planform üzerinde görülen akış ayrılmalarını arttırmıştır. Kenar değişikliklerinin yarattığı bu bozulmanın nedeninin tam olarak anlaşılması için ek çalışmalar yapılması planlanmaktadır. Aynı zamanda, gerçek kuyrukların sahip olduğu enine ve yanıl esneklik, kesit yapısı, kalınlık değişimleri, yüzey pürüzlülüğü gibi yapılar da bir yargıya varmadan önce göz önünde bulundurulmalıdır. Her ne kadar tek başına geometri değişikliği akış yapısını ve aerodinamik performansı bozuyor gibi gözükse de, aynı geometrinin yunuslama ve dönme hareketi esnasında performansı da incelenmelidir.

Kaynaklar

- Bose, N., Lien, J. ve Ahia, J., 1990. *Measurements of the Bodies and Flukes of Several Cetacean Species*, Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences, Cilt.242-1305, s.163–173
- Chen, H.ve Wang, J.J., 2014. *Vortex structures for flow over a delta wing with sinusoidal leading edge*, Experiments in Fluids, Cilt.55-1761
- Fish, F. E., 1998. *Biomechanical Perspective on the Origin of Cetacean Flukes*, Advances in Vertebrate Paleobiology, Cilt.1, s.303-324
- Fish, F. E. ve Rohr, J. J., 1999. *Review of Dolphin Hydrodynamics and Swimming Performance*. Space and Naval Warfare Systems Command, San Diego, Ağustos.
- Goruney, T.ve Rockwell, D., 2009. *Flow past a delta wing with a sinusoidal leading edge: near-surface topology and flow structure*, Experiments in Fluids, Cilt.47-2, s.321-331
- Greenwell, D. I., 2010. *Gurney Flaps on Slender and Nonslender Delta Wings*, Journal of Aircraft, Cilt.4-2, s.675–681
- Gursul, I., 2003. *Review of unsteady vortex flows over slender delta wings*. Journal of Aircraft, Cilt.42-2, s.299–319
- Gursul, I., Gordnier, R. ve Visbal, M., 2005. *Unsteady aerodynamics of nonslender delta wings*, Progress in Aerospace Sciences, Cilt.41-7, s.515–557
- 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, Cilt.16-5, s.39-42
- Taylor, G. S. ve Gursul, I., 2004. *Buffeting Flows over a Low-Sweep Delta Wing*, AIAA Journal, Cilt.42-9, s.1737–1745
- 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
- Triantafyllou, M. S. ve Triantafyllou, G. S., 1995. *An Efficient Swimming Machine*, Scientific American, s.64–71
- Verhaagen, N. G., 2012. *Leading-Edge Radius Effects on Aerodynamic Characteristics of 50-Degree Delta Wings*, Journal of Aircraft, Cilt.49-2, s.521–531
- Vogel, S., 1994. *Life in Moving Fluids- The Physical Biology of Flow*, Princeton University Press, Cilt.2
- Wentz Jr., W. H. ve Kohlman, D. L., 1968. *Wind tunnel investigations of vortex breakdown on slender sharp-edged wings*, NASA Contractor Report, Cilt.98737
- Yaniktepe, B. ve Rockwell, D., 2005. *Flow Structure on Diamond and Lambda Planforms : Trailing Edge Region*, AIAA Journal, Cilt.43-7, s.1490-1500