

KALINLIK-VETER ORANININ DÜŞÜK OK AÇILI DELTA KANAT ÜZERİNDEKİ AKIŞ YAPISINA ETKİSİ

Burak Gülsağan¹
University of Nevada, Reno,
Nevada, A. B. D.

Gizem Şencan²
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
Ankara

Mehmet Metin Yavuz³
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
Ankara

ÖZET

Bu çalışmada, 35 derece ok açısına sahip bir delta kanadın kalınlık-veter t/C oranının akış yapısı üzerindeki etkisi, lazer aydınlatmalı yüzey ve çapraz akış duman görüntüleme, yakın-yüzey ve çapraz akış parçacık görüntülemeli hız ölçüm (PIV) ve yüzey basınç ölçüm teknikleri kullanılarak düşük hızlı bir rüzgar tüneline karakterize edilmiştir. t/C oranı %4.75 ile %19 arasında değişen dört delta kanat modeli, Reynolds sayısı $Re=10.000$ ve 35.000 için 4 ile 10 derece aralığındaki hücum açılarında test edilmiştir. Sonuçlar, kanat kalınlığı arttıkça akış yapısının hücum kenarı girdabından üç boyutlu ayrılmış akış rejimine dönüştüğünü ve buna bağlı olarak da kalınlık-veter oranının akış yapısı üzerindeki etkisinin oldukça önemli olduğunu göstermiştir. Düşük t/C oranlı, %4.75 olan kanat, yüksek t/C oranına sahip kanatlara kıyasla belirgin bir şekilde daha yüksek hücum açısında yüzey akış ayrımıyla karşılaşmıştır. Ancak, bütün kanatların girdap yapısına sahip olduğu düşük atak açıları göz önüne alındığında, t/C oranı arttığında, girdap dayanımının arttığı görülmüştür. Bu sonuç, yüksek t/C oranlı kanatlarda, düşük atak açılarında daha iyi girdap kaynaklı kaldırma performansını öngörebilir.

GİRİŞ

İnsansız hava araçları (İHA), insansız savaş uçakları (İSU) ve mikro hava araçlarının (MHA) basitleştirilmiş planformları olan düşük ok açılı delta kanatlar, son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Bu araçların çalışma parametrelerini karakterize etmek ve geliştirmek için, düşük ok açılı delta kanatlar üzerindeki akış fiziği ve kontrolü iyi anlaşılmalıdır.

Delta kanat üzerindeki akış birbirine zıt yönde dönen kanat ucu girdap çiftinden meydana gelmektedir. Kanat hücum kenarından ayrılan akış, serbest kayma tabakası oluşturup kanat merkezine doğru sarmal yaparak kanat ucu girdaplarını meydana getirir [Gursul, Gordnier, ve Visbal, 2005]. Yüksek ok açılı kanatlarda, yüksek hücum açılarında ulaşıldığında bu girdapların baskın hale geldiği bilinmektedir. Delta kanatlar yeterince yüksek hücum açılarında ulaştıklarında, kanat ucu girdaplarında durmalar oluşarak, girdaplarda oluşan ani genişlemelerle girdap kırınımı olarak tanımlanan bir durum meydana gelmektedir [Werle, 1954]. Hücum açısı yeterince yüksek değerlere ulaştığında kanat yüzeyinden üç boyutlu akış ayrılması olarak adlandırılan akış yapıları elde edilmektedir [Yavuz, 2006]. Bu yapılar kanadın perdövites (stall) durumuna girmesiyle ilişkilidir.

Yüksek ve düşük ok açısına sahip delta kanatlarda, t/C oranının kanadın aerodinamik performansı üzerindeki etkisi farklı çalışmalarda incelenmiştir. Farklı delta kanatlar üzerinde ok açısı ve kanat kalınlığının aerodinamik karakteristiğe olan etkisini inceleyen çalışmada, maksimum kaldırma-sürüklenme oranı için, artan t/C oranına karşılık olarak normal kuvvet, kaldırma ve hücum açısında artış gözlemlenmiştir [Witcofski, Marcum Jr, 1966]. 0.5 ile 2 arasında değişen t/C oranlarına sahip çeşitli delta kanatlar için, artan t/C oranıyla normal kuvvet katsayısında (C_N) azalma meydana geldiğini tespit edilmiştir [Berndt, 1949]. 50 derece ok açısına sahip, t/C oranları 2 ile 10 arasında değişen delta kanatlar üzerindeki çalışmada, maksimum C_L/C_D oranına t/C=2% olan kanatta ulaşıldığı gözlemlenmiştir [Wang, Lu, 2005]. Kalınlığın akış yapısı üzerindeki etkisini inceleyen çalışmalarda, t/C oranındaki azalmanın girdap modellerinin asimetrikliğini azalttığı [Lowson,

¹Doktora Öğrencisi, University of Nevada, Reno Makina Mühendisliği Böl., E-posta: bgulsacan@nevada.unr.edu

²Doktora Öğrencisi, ODTÜ Makina Mühendisliği Böl., E-posta: gsencan@metu.edu.tr

³Doç. Dr., ODTÜ Makina Mühendisliği Böl., E-posta: ymetin@metu.edu.tr

Ponton, 1992] ve girdap kırım noktasını ötelediği ortaya çıkmıştır [Lowson, Riley, 1995]. Farklı aralıkta değişen t/C oranlarında, 45 derece ok açısına sahip kanatlar üzerinde kalınlık oranlarının ve hücum kenarı geometri değişimlerinin basınç dağılımlarına ve aerodinamik performansa etkisini inceleyen çalışmalar bulunmaktadır [Nakajima, Nakao, Nakamura, Yasuhara, 1991; Kawazoe, Nakamura, Ono, Ushimaru, 1994]. Ayrıca, [Verhaagen, 2012], hücum kenarı yarıçapı etkisinin 50- derece hücum kenarlı delta kanatlarda incelendiği çalışmada, girdap kırım noktalarının beklenen noktalarda gerçekleşmediği görülmüştür, bunun üzerine kanat kalınlığı ve pahlama açısının girdap kırım noktası üzerine çalışılması tavsiye edilmiştir. Bir başka çalışmada [Huang, 1996], ince ve yüksek ok açılı delta kanat üzerindeki girdapların küçük çaplı müdahalelerde stabil olmasının artan kanat kalınlığı ile değişebileceğini öngörmüştür.

Bu çalışmada, 35 derece ok açısına sahip delta kanat üzerinde t/C oranının etkisi incelenmiştir. Bu amaçla t/C oranı %4.75 ile %19 arasında değişen dört delta kanat modeli tasarlanıp üretilmiştir. Deneyler düşük hızlı rüzgar tüneline lazer aydınlatmalı yüzey ve çapraz akış duman görüntüleme, yakın-yüzey ve çapraz akış parçacık görüntülemeli hız ölçüm ve yüzey basınç ölçüm teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler, 4 ile 10 derece arasında değişen hücum açıları ve Reynolds Sayısı $Re=10000$ ve 35000 kullanılarak kanat ucu girdaplarının ve 3 boyutlu yüzey ayrılmalarının gözlemlendiği geniş bir akış rejimi aralığında gerçekleştirilmiştir.

YÖNTEM

Deneyler Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında bulunan düşük hızlı rüzgar tüneline lazer aydınlatmalı duman görüntüleme, yakın-yüzey ve çapraz akış parçacık görüntülemeli hız ölçüm ve yüzey basınç ölçüm teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Rüzgar tüneline test bölgesinin ölçüleri $750 \text{ mm} \times 510 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm}$ olup kaydedilen en yüksek çalkantı yoğunluk değeri %1'in altındadır. Deneyler 4, 6, 8 ve 10 derece hücum açıları ve Reynolds Sayısı $Re=10000$ ve 35000 'de gerçekleştirilmiştir. Hızlı prototipleme tekniği ile üretilen dört farklı kanadın ok açıları 35° , kalınlıkları 5, 10, 15 ve 20 mm ve buna bağlı olan kalınlık-veter oranları $t/C=0.0475$, 0.095 , 0.1425 ve 0.19 dur. Kanatlar hücum kenarlarından akış yönünde 45 derece açı ile pahlanmıştır. Kanat modelleri ve ölçümlerin gerçekleştirildiği lazer düzlemlerinin şematik görünümü Şekil-1'de verilmiştir.

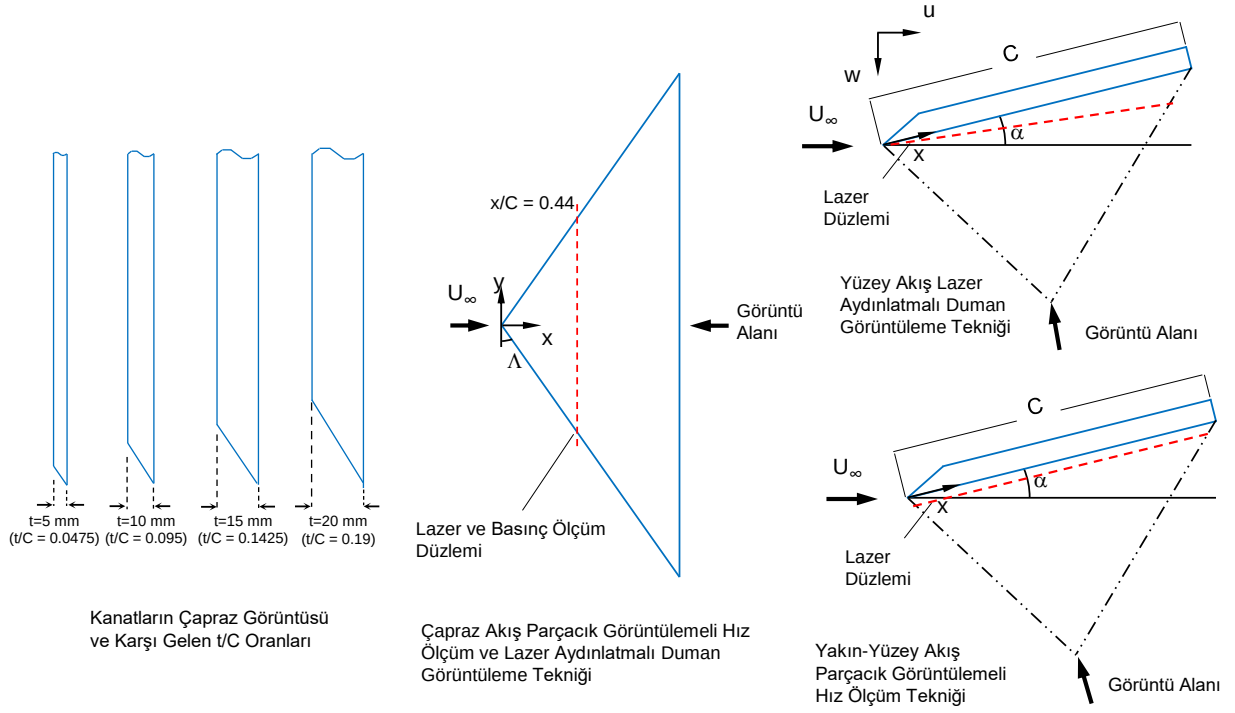
Akış ortamına dair nicel analizler $x/C = 0.44$ 'te yüzey basınç ölçümleri alınarak gerçekleştirilmiştir. Basınç ölçümleri esnasında 16 kanallı basınç tarayıcısı kullanılmıştır. Kanatta gerçekleştirilen öncül basınç ölçümleriyle kanat yüzeyinde simetrik bir akış yapısı elde edildikten sonra, deneyler kanadın bir yarısında gerçekleştirilmiştir. Ölçümler kesitte bulunan 11 delikten 500Hz örnekleme hızıyla 10 saniye süresince yapılmıştır. Basınç ölçüm sonuçları denklem 1 kullanılarak boyutsuz basınç katsayısı C_p değerlerine dönüştürülmüş ve basınç dağılımı olarak bu C_p değerleri ($-C_p$ olarak) kullanılmıştır.

$$C_p = \frac{\bar{p} - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} = \frac{\bar{p} - p_\infty}{p_{dyn}} \quad (1)$$

Lazer aydınlatmalı duman görüntüleme için 400 mW gücünde ve 523 nm dalga boylu katı-hal lazeri kullanılmıştır. 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 $x/C=0.44$ düzleminde gerçekleştirilmiştir. Yüzey görüntülemesinde ise girdap merkezine paralel düzlemde görüntüler alınmıştır. Çapraz akış görüntülemeleri için kanat uzunluğunun 11 katı uzaklığa 45 derece açıyla bir ayna yerleştirilmiştir ve görüntüler tünel dışından DSLR kamera ile alınmıştır. Kanat üzerindeki görüntü düzlemleri Şekil-1'de gösterilmiştir.

Yakın-yüzey ve çapraz akış parçacık görüntülemeli hız ölçüm tekniği (PIV) için, akış glikol bazlı yağ dumanı ile beslenmiş ve çift atımlı 200 mJ Nd:YAG lazer kullanılarak aydınlatılmıştır. Lazer serbest akışa dik bir şekilde $x/C=0.44$ kesitine yerleştirilmiştir. Akış bölgesindeki parçacıkları görüntülemek için, 15 frame/s pozlama hızı olan CMOS kamera kullanılmıştır. Çapraz akış parçacık görüntülemeleri için, kamera tüneline dışına düşey kenarına dik şekilde yerleştirilmiştir. Kanat modelinden 11 veter uzunluğu mesafede test bölgesine yerleştirilen $15 \times 25 \text{ cm}$ ölçülerindeki ayna, serbest akışla 45° açılıya sahiptir. Yakın-yüzey parçacık görüntülemeleri için, kamera tüneline

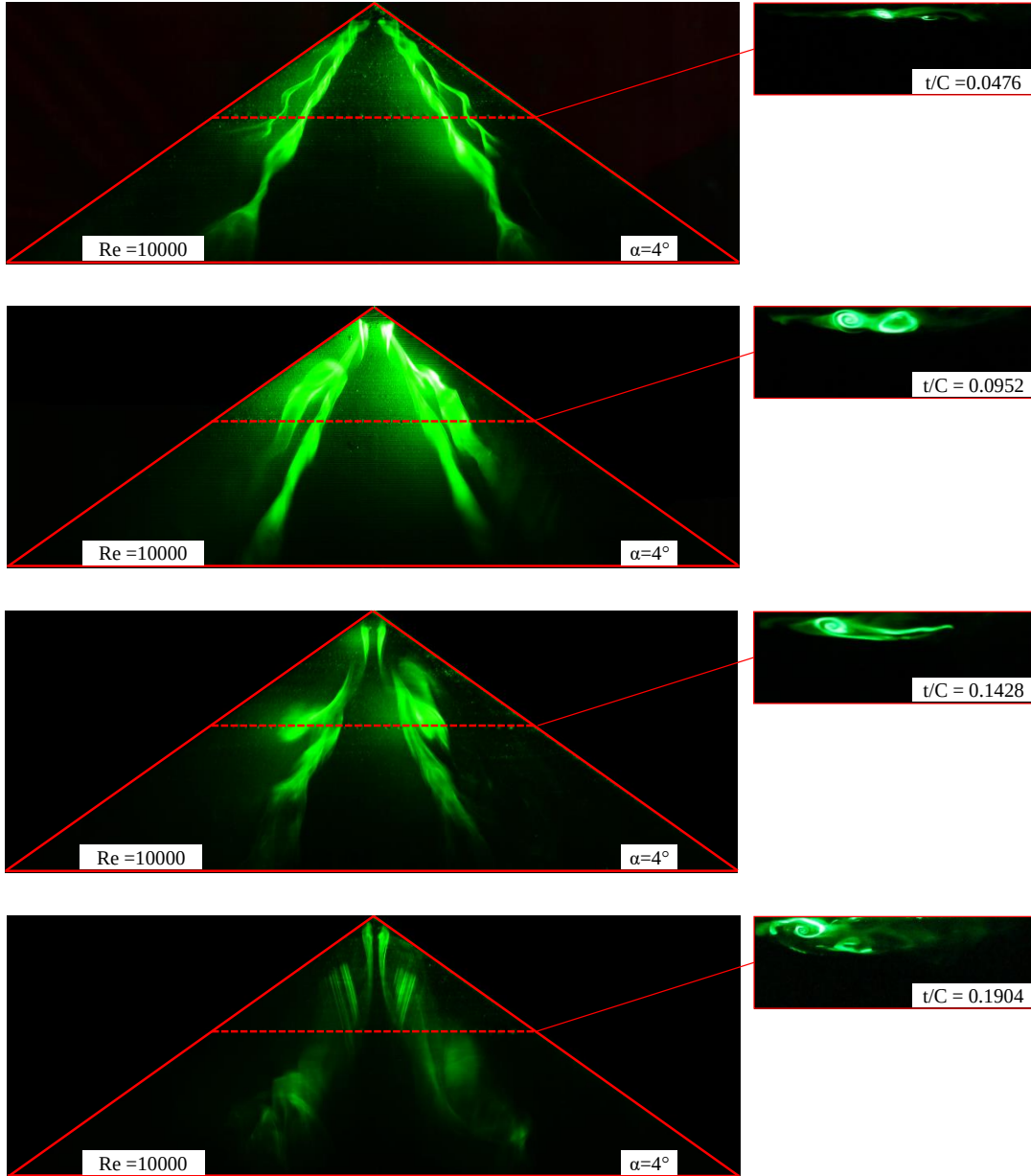
altına, kanatların yüzeyine paralel olacak şekilde yerleştirmiştir. Anlık görüntü çiftlerinin hız dağılımları görüntü çiftlerine uygulanan çapraz-korelasyon ile sağlanmıştır. Ortalama hız alanını elde edebilmek için 200 anlık resim çifti alınmıştır. Hız alanı hesaplandıktan sonra ortalama çevrinti $\langle \omega \rangle$, ve akım iplikçikleri $\langle \Psi \rangle$ düzeni programlar kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 1: Kanat modelleri ve ölçümlerin gerçekleştirildiği lazer düzemlerinin şematik görünümü

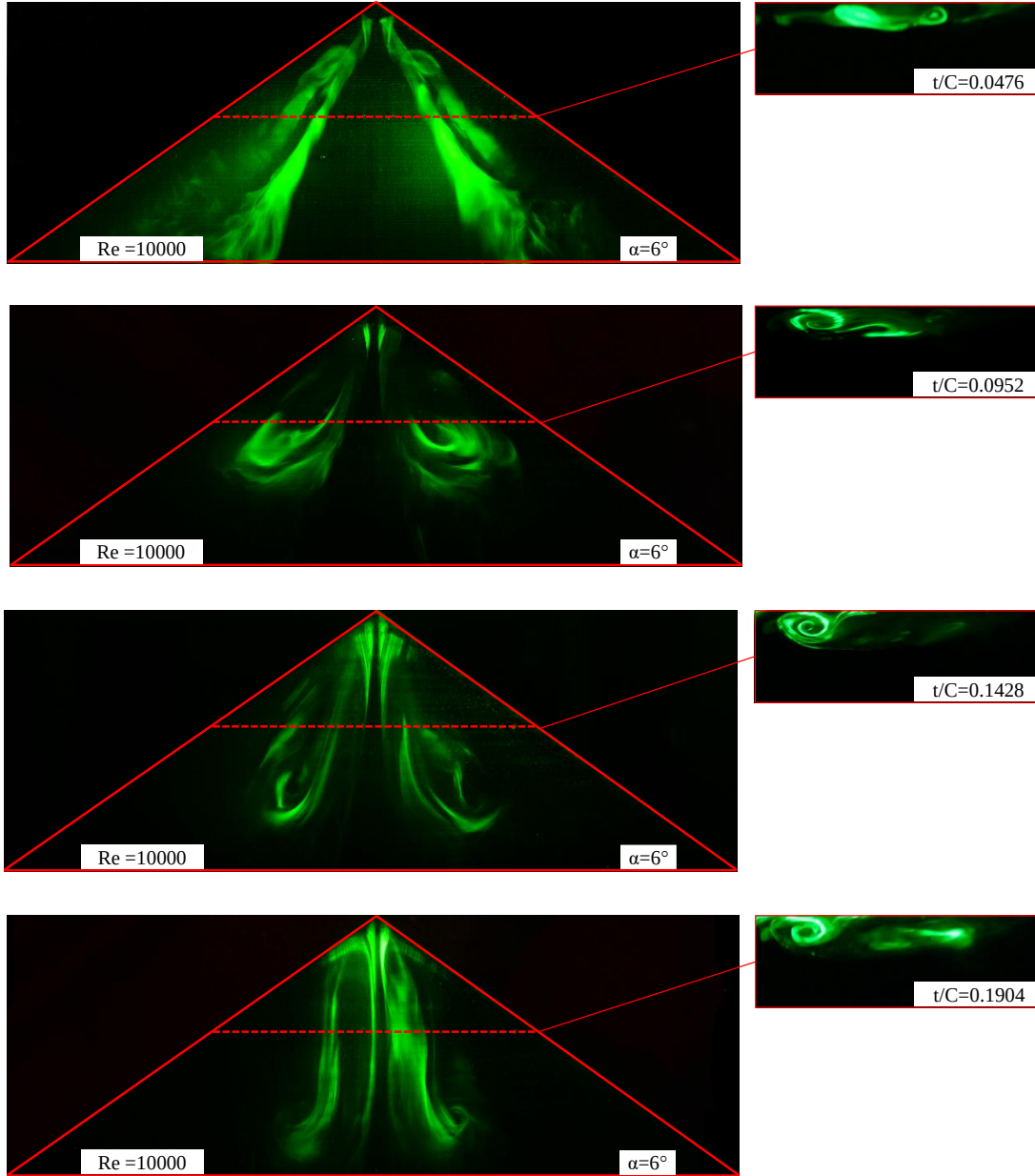
UYGULAMALAR

Şekil 2’de $Re=10000$ ve hücum açısı $\alpha=4$ derece için $t/C = 0.0475, 0.095, 0.1425$ ve 0.19 oranlarına ait lazer aydınlatmalı yüzey ve $x/C = 0.44$ ’teki çapraz akış duman görüntüleme sonuçları gösterilmiştir. $t/C=0.0475$ değerinde çift girdap yapısı gözlemlenirken, girdap kırınımı firar kenarı civarında gerçekleşmiştir. Kalınlık-veter oranının 0.095 ’e ulaşmasıyla birlikte kanadın orta hattına yaklaşan daha yayılmış bir çift girdap yapısı meydana gelmiştir. $t/C=0.1425$ için hem yüzey hem de çapraz akış görüntülerinde girdap yapısındaki bozulma gözlemlenmektedir. Çift girdaplı akış yapısı tamamen ortadan kalkmıştır ve girdaplar standart formlardan uzaklaşmıştır. Kalınlık-veter oranı 0.19 değerine ulaştığında yüzeyde küçük boyutlu ayrılmalar ve kopmalar gözlemlenmekle birlikte kanat ucu girdapları ve girdap kırınımı tamamen ortadan kalkmıştır.



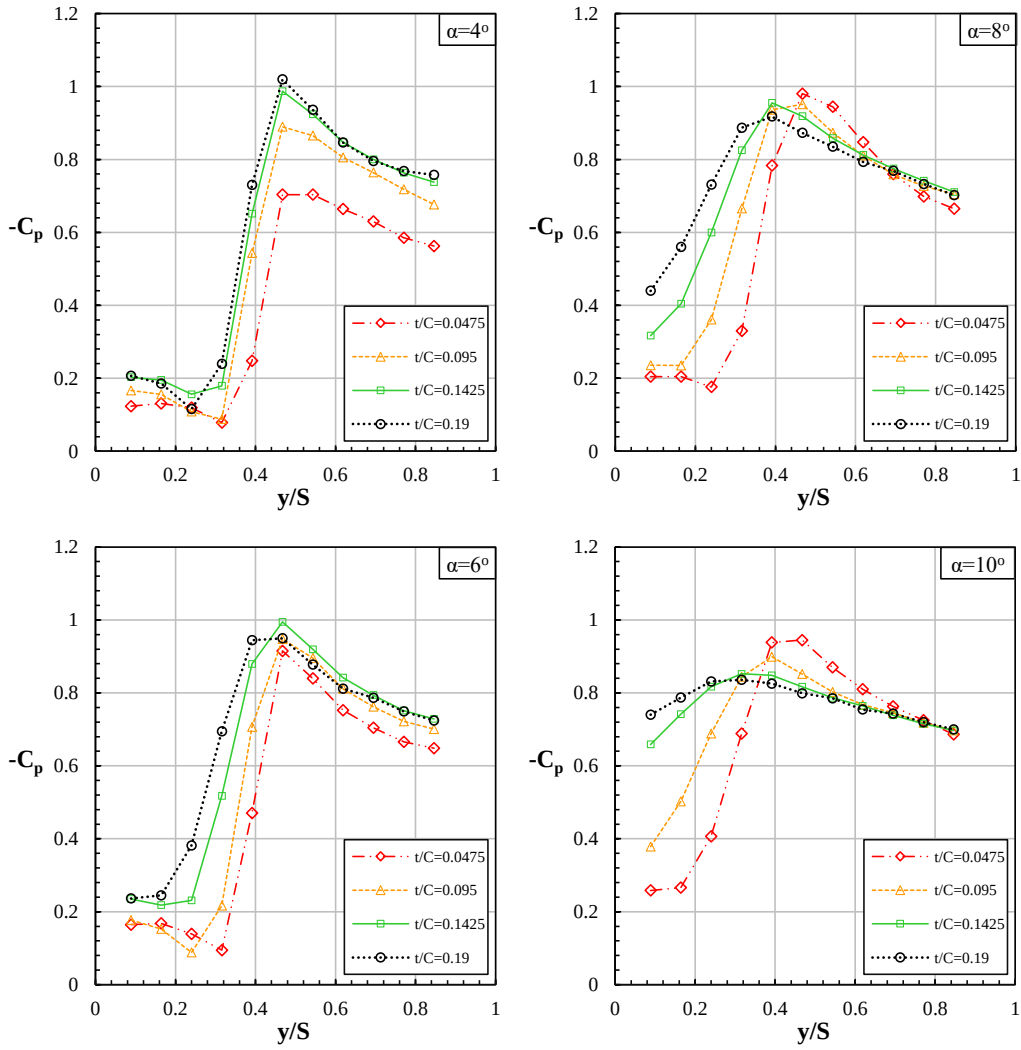
Şekil 2: $Re=10000$ ve hücum açısı $\alpha=4$ derece için $t/C = 0.0475$, 0.095 , 0.1425 ve 0.19 oranlarına ait lazer aydınlatmalı yüzey ve çapraz akış duman görüntüleme sonuçları

Şekil 3'te $Re=10000$ ve hücum açısı $\alpha=6$ derece için $t/C = 0.0475$, 0.095 , 0.1425 ve 0.19 oranlarına ait lazer aydınlatmalı yüzey ve $x/C = 0.44$ 'teki çapraz akış duman görüntüleme sonuçları gösterilmiştir. $t/C=0.0475$ değerinde yaygın bir çift girdap yapısı gözlemlenirken, kalınlık-veter oranının 0.095 ' e ulaşmasıyla birlikte hücum kenarı girdapları tamamen ortadan kalkarak üç boyutlu yüzey ayrılmaları gözlemlenmektedir. t/C oranındaki artışla birlikte akış yapısındaki bozulmalar artmış ve anafor (swirl) yapılarının kanadın veterine ve firar kenarına doğru hareket ettiği tespit edilmiştir.



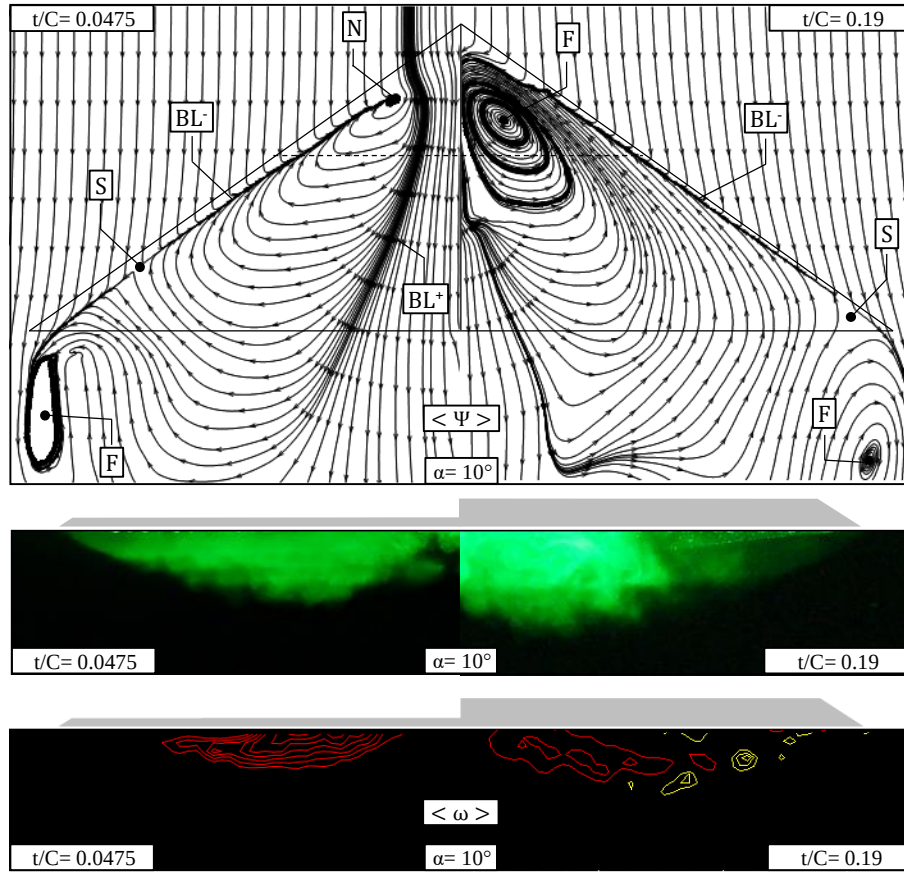
Şekil 3: $Re=10000$ ve hücum açısı $\alpha=6$ derece için $t/C = 0.0475, 0.095, 0.1425$ ve 0.19 oranlarına ait lazer aydınlatmalı yüzey ve çapraz akış duman görüntüleme sonuçları

Şekil-4'te $Re=35000$ ve $x/C=0.44$ için alınan basınç ölçümlerinin boyutsuz basınç katsayısı cinsinden gösterimi yer almaktadır. Yapılan ön çalışmalarda kanat üzerindeki akışın simetrik olduğu gözlemlendiğinden kanadın sadece bir yarısından ölçümler alınmıştır. Şekil-2'nin sol tarafında hücum açısı $\alpha=4$ ve 6 derece, sağ tarafında ise $\alpha=8$ ve 10 derece için olan sonuçlar sunulmuştur. Hücum açısı $\alpha=4$ derece için, kanat üzerinde oluşan girdap merkezinin $-C_p$ değerinin maksimum noktasına tekabül ettiği göz önünde bulundurulduğunda, kalınlık-veter oranı arttıkça girdap dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, $-C_p$ değerinin minimum noktaları göz önüne alındığında akış yapısının kanadın merkez çizgisine kaydığı tespit edilmiştir. Şekil-4'ün sol alt tarafı hücum açısı $\alpha=6$ derece için olan sonuçları göstermektedir. Bu hücum açısında yapılan çalışmada, kalınlık-veter oranı arttıkça mevcut akış yapısının kanadın merkezine kaydığı gözlemlenmiştir. Şekil-4'ün sağ tarafında $\alpha=8$ ve 10 derece için, kalınlık-veter oranı artışının girdap yapısını bozduğu ve $\alpha=10$ derece için, en ince kanadın girdap yapısını koruduğu görünürken, en kalın kanadın girdap yapısını kaybettiği ve akışın kanat yüzeyinden ayrıldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4: Farklı hücum açılarında $t/C = 0.0475, 0.095, 0.1425$ ve 0.19 oranları için boyutsuz kanat genişlik kesitine göre boyutsuz basınç dağılımı $-C_p$

Şekil-5'te $Re=35000$ ve hücum açısı $\alpha=10$ derecede gerçekleştirilen yakın-yüzey ve çapraz akış parçacık görüntülemeli hız ölçüm ve çapraz akış görüntüleme sonuçları yer almaktadır. Şekil-7'nin sol tarafında kalınlık-veter oranı $t/C=0.0475$, sağ tarafında ise kalınlık-veter oranı $t/C=0.19$ olan kanat için olan sonuçlar sunulmuştur. Yukarıdan aşağıya sırasıyla yakın-yüzey akım iplikçikleri, çapraz akış görüntülemeleri ve ortalama çevrintileri yer almaktadır. Yakın-yüzey akım iplikçikleri göz önüne alındığında, kalınlık-veter oranının artmasıyla girdap yapısının kaybolduğu ve akışın kanat yüzeyinden ayrıldığı gözlemlenmiştir. Çapraz akış görüntülemelerinde ise, kalınlık-veter oranı arttırıldığında akışın kanat açıklığı kesitine tamamen yayıldığı gözlemlenmiştir. Ortalama çevrintiler incelendiğinde, kalınlık-veter oranı arttıkça kontur sayılarında büyük bir düşüş gözlemlenmiştir.



Şekil 5: $Re=35000$ ve hücum açısı $\alpha=10$ derece için zamana göre ortalaması alınmış akım iplikçikleri $\langle \Psi \rangle$ ile çapraz duman görüntüleme ve ortalama çevrintilerin $\langle \omega \rangle$ karşılaştırması:
 $[|\langle \omega \rangle|]_{\min}=200 \text{ s}^{-1}$, $\Delta [|\langle \omega \rangle|]=100 \text{ s}^{-1}$

SONUÇ

Bu çalışmada, 35 derece ok açısına sahip bir delta kanadın t/C oranının akış yapısı üzerindeki etkisi, lazer aydınlatmalı duman görüntüleme, yakın-yüzey ve çapraz akış parçacık görüntülemeli hız ölçüm ve yüzey basınç ölçüm teknikleri kullanılarak deneysel olarak karakterize edilmiştir. Sonuçlar, kalınlık-veter oranındaki artışın akış fiziğini önemli derecede etkilediğini göstermiştir. Düşük hücum açılarında, kalınlık-veter oranı artırıldığında hücum kenarı girdabının kuvveti artmıştır. Kalınlık-veter oranı $t/C=0.0475$ olan kanat kalınlık-veter oranı $t/C=0.19$ olan kanada göre daha yüksek hücum açısında üç boyutlu akış ayrılmasına uğramıştır, bu düşük kalınlık-veter oranlı kanatların üç boyutlu yüzey ayrılması durumuna daha dirençli olduğunu göstermektedir. Düşük atak açılarında, bütün kanatların girdap yapısına sahip olduğu durumda, t/C oranı arttığında, girdap dayanımı artmaktadır.

Kaynaklar

- Berndt, S. , 1949. *Three Component Measurements and Flow Investigations of Plane Delta Wings at Low Speed and Zero Yaw*. K.T.H. Aero. TN 4.
- Gursul, I., Gordnier, R., & Visbal, M., 2005. *Unsteady aerodynamics of nonslender delta wings*. Progress in Aerospace Sciences, 41(7), 515–557.
- Huang, M. K.& Chow, C.Y., 1996. *Stability of Leading-Edge Vortex Pair on a Slender Delta Wing*. AIAA Journal, 34(6), 1182–1187.

- Kawazoe, H., Nakamura, Y., Ono, T., & Ushimaru, Y., 1994. *Static and Total Pressure Distributions around a Thick Delta Wing with Rounded Leading Edge*. AIAA 94-2321, 25th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference.
- Lowson, M. V., & Ponton, A. J. C., 1992. *Symmetry Breaking in Vortex Flows on Conical Bodies*. AIAA Journal, 30(6), 797.
- Lowson, M. V., & Riley, A. J., 1995. *Vortex Breakdown Control by Delta-Wing Geometry*. Journal of Aircraft, 32(4), 832–838.
- Nakajima, Y., Nakao, Y., Nakamura, Y., and Yasuhara, M., 1991. *Flow Field Around Thick Delta Wing with Rounded Leading Edge*. SAE Technical Paper 912009.
- Verhaagen, N. G., 2012. *Leading-Edge Radius Effects on Aerodynamic Characteristics of 50-Degree Delta Wings*. Journal of Aircraft, 49(2), 521–531.
- Wang, J., & Lu, S. F., 2005. *Effects of Leading-Edge Bevel Angle on the Aerodynamic Forces of a Non-Slender 50° Delta Wing*. The Aeronautical Journal, 109(1098), 403–407.
- Werlé, H., 1954. *Quelques Résultats Expérimentaux Sur les Ailes en Flèche, aux Faibles Vitesses, Obtenus en Tunnel Hydrodynamique*. La Rech. Aeronaut.
- Witcofski, R. D., & Marcum, Jr., D. C., 1966. *Effect of Thickness and Sweep Angle on the Longitudinal Aerodynamic Characteristics of Slab Delta Planforms at a Mach Number of 20*. TN-D 3459.
- Yavuz, M. M., Elkhoury, M., & Rockwell, D., 2004. *Near-Surface Topology and Flow Structure on a Delta Wing*. AIAA Journal, 42(2), 332–340.