

## DÜŞÜK OK AÇILI DELTA KANAT ÜZERİNDEKİ AKIŞIN PASİF AKITMA YÖNTEMİYLE KONTROLÜ

Alper Çelik<sup>1</sup>  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara /  
Tübitak Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü,  
Ankara

Cenk Çetin<sup>2</sup> ve Mehmet Metin Yavuz<sup>3</sup>  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

### ÖZET

*Bu çalışmada 45 derece ok açısına sahip delta kanat üzerindeki akış yapısının pasif akıtma tekniği ile kontrolü hedeflenmiştir. Kanadın basınç ve kaldırma yüzeyleri arasında oluşan basınç farkından faydalanılarak, kanadın kaldırma yüzeyindeki akışa enerji harcanmadan müdahale edilmiştir. Deneyler düşük hızlı rüzgar tüneline Reynolds sayısı  $Re=35000$  için atak açıları  $\alpha =6$  ve  $16$  derecede yapılmıştır. Deney sonuçları, boyutsuz basınç katsayıları karşılaştırması ve çapraz akış düzleminde 2D Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme Tekniği (PIV) sonuçları olarak sunulmuştur. Yapılan deneylerde pasif akıtma tekniğinin kanadın kaldırma yüzeyindeki akış alanını bütünsel olarak etkilediği ve kanat üzerindeki girdap yapısının kontrolsüz kanada göre farklılaştığı gözlenmiştir. Uygulanan pasif akıtmanın atak açısı  $\alpha =16$  derecede delta kanat üzerinde oluşan üç boyutlu akış ayrılmasını engellediği ve akışın kanada tekrar bağlanmasını sağladığı görülmüştür.*

### 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.

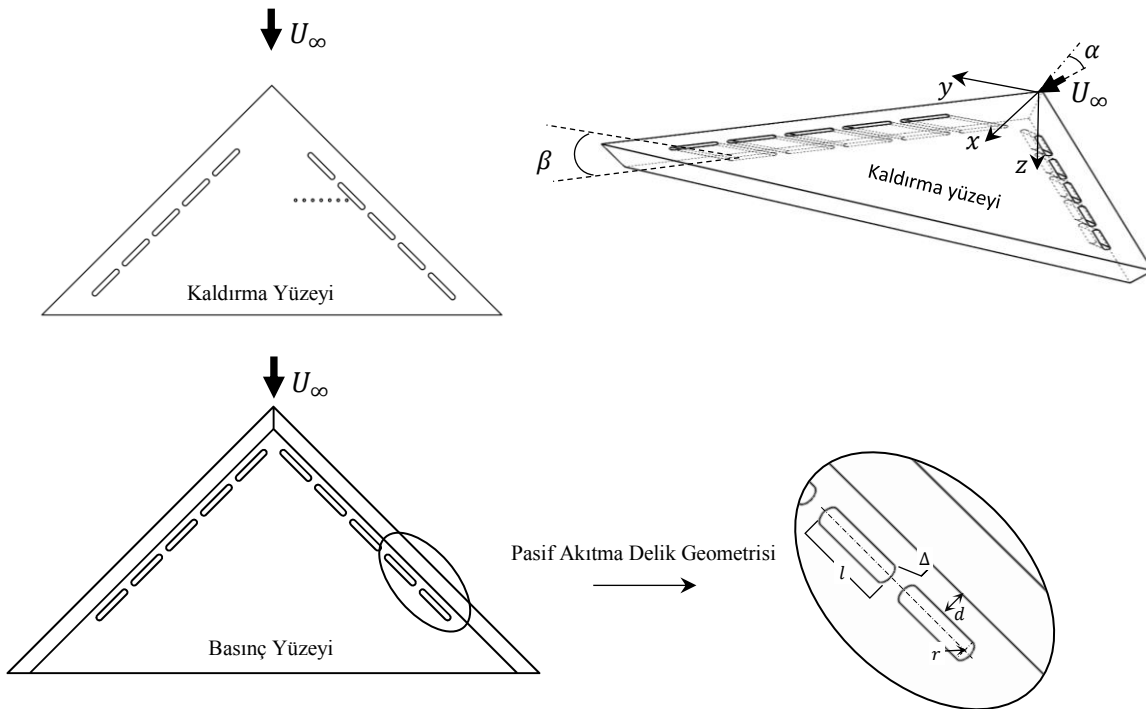
Delta kanat üzerindeki akışların genel yapısı, ok açısı fark etmeksizin girdaplı yapılar tarafından karakterize edilir. Girdaplar, hücum kenarından ayrılan kesme tabakalarının kanada doğru yuvarlanması ile oluşur. Girdapların çekirdeğindeki aksel hız yüksek ok açılı delta kanatlarda uçuş hızının dört 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 bir çok 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].

<sup>1</sup> 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  
<sup>2</sup> Araştırma görevlisi, Makina Müh. Böl., E-posta: ccenk@metu.edu.tr  
<sup>3</sup> Doç. Dr., Makina Müh. Böl. E-posta: ymetin@metu.edu.tr

Delta kanatlar üzerinde oluşan bu girdaplar, yüksek hücum açılarında veya yüksek Reynolds 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 tutunma kaybı ve girdap kırılımının 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 gerektirmeyen, 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], sarkık kanatçık (flap) kullanımı [Greenwell, 2010] gibi yöntemler hem düşük ok açılı hem de yüksek ok açılı delta kanatlarda çalışılmıştır. Akıtma yöntemi, kanadın üst ve alt yüzeyi arasında oluşan basınç farkından faydalanarak uygulanan basit bir yöntemdir. Bu yöntemdeki amaç, kanat yüzeyine çarpan yüksek basınçlı havayı kanadın kaldırma yüzeyinde ihtiyaç duyulan düşük basınçlı alana iletip, akışa müdahale etmektir. Bu basit yöntem uçak kanat profillerinde uzun süredir çalışılmaktadır [Hunter, Viken, Wood, ve Bauer, 2001; Lachmann, 1924]. Pasif akıtma yönteminin kanat açıklık oranı düşük kanatlar üzerindeki akışa etkisini ve akış-yapı etkileşimi üzerindeki etkisini görmek için dikdörtgen kanatlar üzerinde deneyler yapılmıştır [Hu Wang ve Gursul, 2014]. Bu deneylerde yalpa salınımlarının pasif akıtma yöntemiyle azaltılabileceği gösterilmiştir. Delta kanatlar üzerinde ise bu konu ile ilgili literatürde herhangi bir çalışma yer almamaktadır.

## 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 çevrinti yoğunluk değeri %1'in altındadır. Deneyler 6 derece ve 16 derece hücum açılarında ve Reynolds sayısı  $Re=35000$ 'de gerçekleştirilmiştir. Hızlı prototipleme tekniği ile üretilen delta kanadın ok açısı  $45^\circ$ , kalınlığı 8 mm, veter açıklığı 135 mm ve kanat açıklığı 270 mm'dir. Pasif akıtma yöntemi uygulanacak kanadın sonuçlarının karşılaştırılması için bir Referans kanat oluşturulmuştur. Üretilen pasif akıtma kontrollü kanat çizimleri Şekil-1'de verilmiştir.



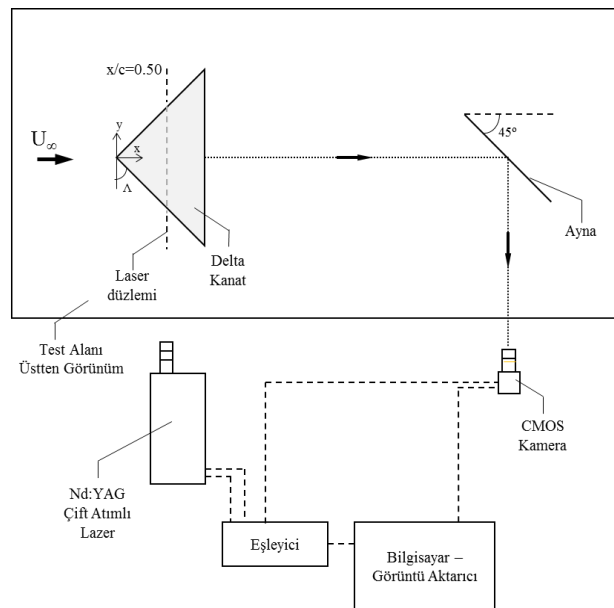
Şekil 1: Akıtma delikli kanat geometrisi

Şekil-1'in sol tarafında altlı üstlü olarak kanadın kaldırma ve basınç yüzeyleri gösterilmiştir. Sol üst köşede verilen kanadın kaldırma yüzeyi görüntüsünde, akıtma deliklerinden çıkan havanın, akış içerisindeki yönü ve basınç deliklerinin yeri gösterilmiştir. Şekil-1'in sağ üst kısmında kanadın akış içerisindeki oryantasyonuna yer verilmiştir. Kanadın basınç yüzeyindeki deliklere atak açısıyla gelen hava, akıtma deliklerinden geçerek, kaldırma yüzeyinden akışa geri katılmaktadır. Şekil-1'in sağ alt köşesinde ise akıtma deliklerinin kanat basınç yüzeyindeki konumları ile ilgili ölçüler sembolik olarak gösterilmiş olup,  $d=4$  mm,  $l=21$  mm,  $\delta=4$  mm ve  $r=1.5$  mm dir. Kanatlar hücum kenarlarından akış yönünde 45 derece açı ile pahlanmıştır. Pasif akıtma delikleri hücum kenarına paralel ve planform yüzeyine  $\beta=20$  derece açıyla delinmiştir. Yapılan deneylerde en yüksek blokaj oranı atak açısı 16 derecededir ve %1.4 oranındadır.

Basınç ölçümleri  $x/C = 0.50$  düzleminde gerçekleştirilmiştir. Basınç ölçümleri 16 kanallı basınç tarayıcısı ile yapılmıştır. Yapılan ön deneylerle kanat üzerindeki basınç dağılımının simetrik olduğu görülmüş ve deneyler sırasında kanadın sadece sol tarafından basınç ölçümleri alınmıştır. 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. Ölçümler Referans planformda 10, B planformda bulunan 7 delikten 500 Hz örnekleme hızıyla 10 saniye süresince yapılmıştır.

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

Deneylerde Yüksek Hızlı Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm Tekniği'nde (PIV) kullanılmıştır. Akış yağ dumanı ile beslenmiştir. Akış çift-atımlı 200mJ Nd:Yag lazer ile aydınlatılmıştır. Lazer düzlem kalınlığı, odak uzaklığı ve konumlama lazeri 15 mm silindirik, 1000 mm küresel lensten geçirek sağlanmıştır. Görüntülerin alınması için 20148x2032 çözünürlükte, 15 frame/s pozlama hızı olan CMOS kamera kullanılmıştır. Kameranın akışla karşılıklı olarak etkileşime girmemesi için tünel dışına yerleştirilmiştir. Görüntü alınması için kullanılan ayna ise modellerden 5 veter uzunluğu kadar mesafede yerleştirilmiştir. Kameranın tünel duvarına mesafesi 0.05 m'dir. Lazer ve kameranın senkronizasyonu için TSI marka senkronize edici kullanılmıştır. Anlık görüntü çiftlerinin hız dağılımları görüntü çiftlerine uygulanan çapraz-korelasyon ile sağlanmıştır. Nyquist kriteri sağlanması için görüntüler arasında %50 lik örtüşme sağlanmıştır. Sorgu alanı olarak 16x16 piksel kullanılmıştır ve bu ağ boyutu olarak  $\Delta = 3mm$  ve  $\Delta/C = 0.022$ 'ye tekabül etmektedir. Resimler TSI 4GInsight ve TechplotPIVFocus ile işlenmiştir. Ortalama hız alanı  $\langle V \rangle$  elde edebilmek için 200 anlık resim çifti alınmıştır. Hız alanı hesaplandıktan sonra ortalama çevrinti  $\langle \omega \rangle$  ve akış ipliği  $\langle \Psi \rangle$  düzeni programlar kullanılarak hesaplanmıştır. PIV sistemi şematik olarak Şekil-2 de gösterilmiştir.

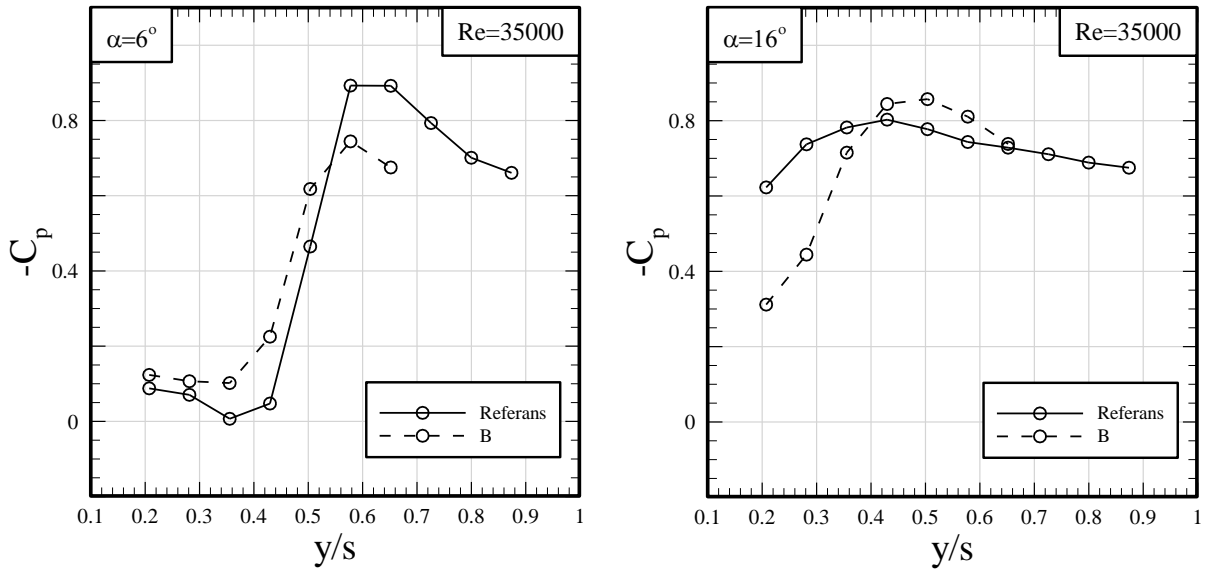


Şekil 2: PIV ölçüm düzeneği şematiği

## UYGULAMALAR

## Basınç Ölçüm Sonuçları

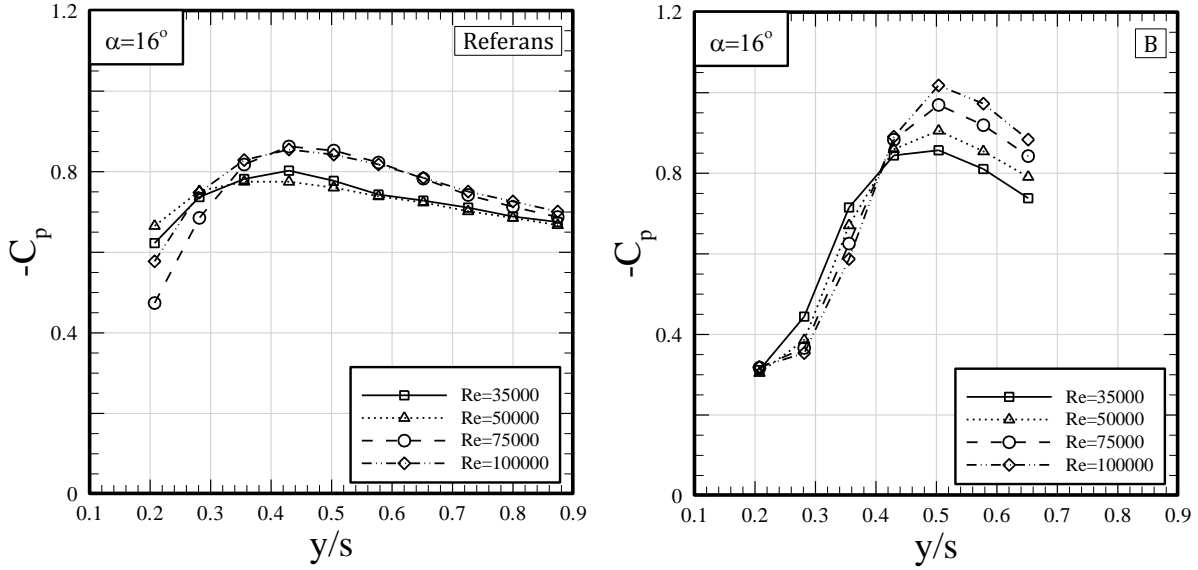
Şekil-3'de  $Re=35000$ 'de ve  $x/C=0.5$ 'de alınan basınç ölçümlerinin boyutsuz basınç katsayısı  $-C_p$  cinsinden gösterimi verilmiştir. Grafiklerde basınç dağılımları yarım kanat genişliği boyunca çizdirilmiştir ve  $y/S=0$  kanat simetri merkezidir. Yapılan ön çalışmalarda kanat üzerindeki akışın simetrik olduğu gözlemlendiğinden kanadın sadece bir yarısından ölçümler alınmıştır. Şekil-3'ün sol tarafında atak açısı  $\alpha =6$  derece, sağ tarafında ise  $\alpha =16$  derece için olan sonuçlar sunulmuştur. Atak açısı  $\alpha =6$  derece için olan sonuçlar incelendiğinde uygulanan pasif kontrolün kanat üzerindeki girdaplı yapıyı değişikliğe uğrattığı görülmektedir. Kanat üzerinde oluşan girdap merkezinin  $-C_p$  değerinin maksimum noktasına tekabül ettiği göz önüne alındığında, uygulanan kontrolün girdap gücünü azalttığı söylenebilir.



Şekil 3:  $Re=35000$ 'de referans kanat ve pasif akıtma kontrollü kanadın (B planform) atak açıları  $\alpha =6$  derece (sol) ve  $\alpha =16$  derecede (sağ)  $-C_p$  karşılaştırması

Yapılan ön çalışmalarda  $\alpha =16$  derecede akışın kanat yüzeyinden ayrıldığı ve tutunma kaybı durumuna geçtiği görülmüştür. Bu atak açısında yapılan çalışmada, pasif akıtma kontrolünün tutunma kaybı üzerine etkisi incelenmiştir. Referans kanat üzerindeki basınç dağılımı  $\alpha =6$  derece ile karşılaştırıldığında düze yakın bir dağılım sergilemektedir. Bu profilin üç boyutlu akış ayrılmasını temsil ettiği düşünülmektedir. Pasif kontrolün uygulandığı B planform ise tamamen farklı bir yapı göstermektedir. Kanat üzerinde gelişmekte olan girdaplı bir yapıyı temsil ettiği düşünülen çan dağılımı görülmektedir. Uygulanan kontrol kanat üzerindeki akışın kanada tekrar tutunmasını sağlamıştır.

Şekil-4  $\alpha =16$  derece atak açısında Referans ve B planform üzerindeki akışa Reynolds sayısının etkisini göstermek için oluşturulmuştur. Şekilde boyutsuz basınç katsayıları,  $-C_p$ , kanat genişliği boyunca verilmiştir.  $y/S=0$  kanat simetri merkezidir. Şeklin sol tarafı Referans kanat, sağ tarafı ise pasif kontrolün uygulandığı B planformunu göstermektedir. Referans kanat sonuçları incelendiğinde bütün Reynolds sayıları için kanat üzerindeki akışın düze yakınsayan bir  $-C_p$  profili oluşturduğu görülmektedir. İncelenen bütün Reynolds sayıları için planform üzerinde üç boyutlu akış ayrılması gerçekleştiği söylenebilir.



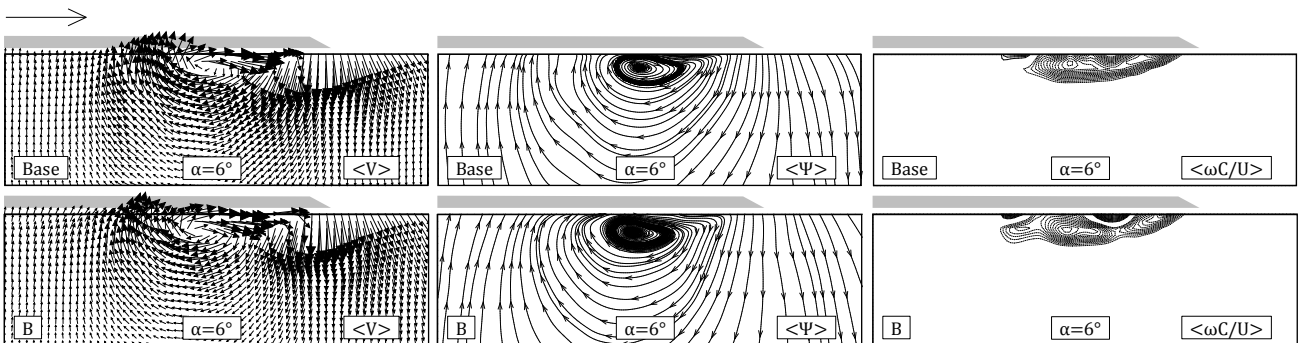
Şekil 4: Referans kanat ve pasif akıtma kontrollü kanadın (B planform)  $Re=35000$ ,  $50000$ ,  $75000$  ve  $Re=100000$ 'de  $-C_p$  dağılımı

B planformu üzerinde ise tüm Reynolds sayıları için akışın kanada tutunduğu ve girdaplı yapıda olduğu çan şeklinde oluşan  $-C_p$  dağılımlarına bakılarak söylenebilir.  $-C_p$  grafiğinde oluşan çan yapısının eğimi ve şekli incelendiğinde, girdap merkezinin artan Reynolds sayısı ile yer değiştirmedeği,  $-C_p$  değerinin artan Reynolds sayısı ile arttığı ve Reynolds sayısı artmasıyla kanada tutunmanın daha keskin/kararlı bir şekilde olduğu sonuçları çıkartılabilir.

### PIV Ölçüm Sonuçları

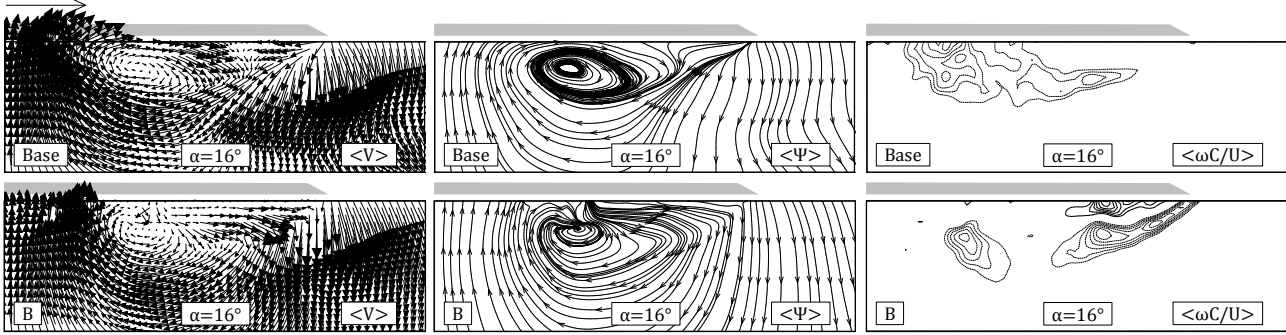
45 derece delta kanat üzerinde uygulanan pasif akıtma kontrol yönteminin akış yapıları üzerindeki etkisini daha detaylı anlayabilmek için  $x/C=0.5$  kesitinde 2D PIV ölçümleri yapılmıştır.

Şekil-5 atak açısı  $\alpha = 6$  derece ve Reynolds sayısı  $Re=35000$ 'de Referans ve B planformlar üzerindeki akış yapılarını yarı planform üzerinde göstermektedir. Şeklin üst sırasında Referans, alt sırasında ise B planform sonuçları gösterilmiştir. Şekilde solda sağa doğru hız vektörü  $\langle V \rangle$ , akım iplikçikleri  $\langle \Psi \rangle$  ve birimsiz aksenal çevrinti  $\langle \omega C/U \rangle$  değerlerini gösterilmiştir. Şeklin sol üst köşesine yerleştirilen ok, tünel hızının vektörel gösterimidir ve  $Re=35000$  için  $U=3.94m/s$ 'dir.



Şekil 5:  $x/C=0.5$  düzleminde atak açısı  $\alpha = 6$  derece için ortalama hız vektörleri  $\langle V \rangle$ , akım iplikçikleri  $\langle \Psi \rangle$ , değerleri  $\langle \omega C/U \rangle$  ( $||\langle \omega C/U \rangle||_{min} = 45s^{-1}, \Delta[|\langle \omega C/U \rangle|] = 2.5s^{-1}$ )

Şekil-5'in en sol tarafında yer alan ortalama hız vektör alanı  $\langle V \rangle$  ve ortalama akım iplikçığı alanı  $\langle \Psi \rangle$  incelendiğinde planform üzerindeki akışın hem Referans hem de B planform için benzer olduğu görülmektedir. Akış kanat açıklığının orta noktasında planforma tutunmuştur. Birimsiz çevrinti düzey çizgileri incelendiğinde yine benzer yapılar görülmektedir. Kontrol uygulanan B planformda organize çevrıntinin planform içine doğru yayıldığı görülmektedir.



Şekil 6:  $x/C=0.5$  düzleminde atak açısı  $\alpha = 16$  derece için ortalama hız vektörleri  $\langle V \rangle$ , akım iplikçikleri  $\langle \Psi \rangle$ , çevrinti değerleri  $\langle \omega C/U \rangle$  ( $[\langle \omega C/U \rangle]_{min} = 45s^{-1}, \Delta[\langle \omega C/U \rangle] = 2.5s^{-1}$ )

Şekil-6, Şekil-5 ile aynı biçimde atak açısı  $\alpha = 16$  derece ve Reynolds sayısı 35000 için oluşturulmuştur. Şeklin en solunda yer alan ortalama hız vektörleri incelendiğinde B planform üzerinde pasif akıtmanın akışa müdahalesi kanat açıklığı orta noktasına yakın bir yerde planform üzerinden çıkan dikine vektörlerle görülmektedir. Yine hem ortalama vektör görselleri hem de ortalama akış çizgilerine bakıldığında akışın yüzeye bağlanma noktasının B planform için Referans kanada göre hücum kenarına yaklaştığı görülmektedir. B planform üzerinde kararlı bir merkez olduğu ve girdaplı yapının kazanıldığı görülmektedir. Şeklin en sağ tarafında planform veter uzunluğu ve serbest akış hızı ile birimsiz hale getirilmiş ortalama çevrinti düzey çizgileri gösterilmiştir. Referans planform üzerindeki düzey çizgileri incelendiğinde fiziksel olarak bağdaşık yapılar, organize çevrinti yapıları görülmemektedir. Akışın kanat üzerinde dağılmış olduğu anlaşılmaktadır. B planform incelendiğinde ise uygulanan pasif akıtma kontrolünün organize çevrinti yapıları oluşturduğu görülmektedir. Aynı zamanda hücum kenarından ayrılarak oluşan organize çevrinti yapıları da görülmektedir.

## SONUÇ

Bu çalışmada 45 derece ok açısına sahip delta kanat üzerindeki akış yapılarının pasif akıtma tekniği ile kontrolü hedeflenmiştir.  $Re=35000$ 'de atak açısı  $\alpha = 6$  ve 16 derecede basınç ölçümleri ve 2D PIV ölçümler yapılarak pasif akıtma yönteminin akış yapıları üzerinde oluşturduğu etki incelenmiştir. Akışın kanat üzerinde Atak açısı  $\alpha = 6$  derecede yapılan deneylerde pasif akıtma metodunun akış yapılarını çok fazla değiştirmemekle beraber,  $-C_p$  değerinde azalma ve girdap yapısında kanat simetri merkezine kayma görülmektedir. Pasif akıtma metodunun asıl etkisi Referans planformun üç boyutlu akış ayrılması yaşadığı atak açısı  $\alpha = 16$  derecede görülmektedir.  $-C_p$  ve 2D PIV ölçümleri incelendiğinde Referans planform üzerinde dağılmış olan çevrinti yapıları uygulanan kontrol metodu ile geri kazanılmış ve girdaplı yapı yeniden oluşmuştur. Uygulanan kontrol tekniğinin optimize edilmesi için daha geniş kapsamlı çalışmalar yapılması gerekmektedir. Böylelikle pasif akıtma tekniğinin düşük ok açılı delta kanat akışının performansı üzerindeki etkisi daha iyi açıklanabilecektir.

**Kaynaklar**

- Greenwell, D. I., 2010. *Gurney Flaps on Slender and Nonslender Delta Wings*, Journal of Aircraft, Cilt.47-2, 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
- Hu, T., Wang, Z., Gursul, I., 2014. *Passive control of roll oscillations of low-aspect-ratio wings using bleed*, Experiments in Fluids, Cilt:55-6,
- Hunter, C. A., Viken, S. A., Wood, R. M. ve Bauer, S. X. S., 2001. *Advanced Aerodynamic Design of Passive Porosity Control Effectors*, In 39th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno, Nevada.
- Lachmann, G., 1924. *Results of Experiments with Slotted Wings*, Technical Memorandums National Advisory Committee for Aeronautics
- 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, s.45-12, s.2979–2993
- 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
- Wentz Jr., W. H. ve Kohlman, D. L., 1969. *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