

YENİ BİR PASİF AKITMA TASARIMI İLE DÜŞÜK OK AÇILI DELTA KANAT AKIŞININ KONTROLÜ

Cenk Çetin¹ ve Göktuğ Koçak²
Türk Havacılık ve Uzay Sanayii/
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

Mehmet Metin Yavuz³
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Düşük hızlı rüzgâr tüneline sürdürülen bu deneysel çalışmada, 45 derece ok açısına sahip bir delta kanat üzerinde oluşan akış yapılarının yeni bir pasif akıtma deliği tasarımı ile kontrolü gerçekleştirilmiştir. Kanat yüzeyleri arasındaki basınç farkından yararlanarak girdaplı ve ayrılmalı yapılara müdahale eden pasif akıtma tekniğinde lüle prensibinde bir geometrik daralma ile akışın hızlandırılması ve kontrolü hedeflenmiştir. Tasarımın kanat aerodinamiğine olan etkisi yüzey basınç ve kuvvet ölçümleri ile Reynolds sayısı 35000 – 100000 ve hücum açısı 6 – 30 derece aralığında incelenmiştir. Deney çıktıları, basınç katsayıları, kuvvet ve moment katsayıları olarak sunulmuştur. İncelenen tasarımın temel kanat akış yapısını önemli oranda etkilediği gözlenmiştir. Çapraz akış düzleminde basınç dağılımının düşük açılarda içeri doğru kaydığı, perdövites açılarında ise emme basıncının pasif akıtma ile önemli oranda geliştirilebildiği gözlemlenmiştir. Kuvvet ölçüm sonuçları perdövites açısının 4 dereceye kadar ötelenebildiğini göstermiştir.

GİRİŞ

Son yıllarda özellikle düşük ok açılı delta kanatların akış yapılarını karakterize etmeye odaklanan çalışmaların sayısı önemli bir artış göstermiştir. Delta planformlar insansız hava araçları için temel bir geliştirme altyapısı olmakla birlikte değerli veri tabanları oluşturmaktadır. Yakın tarihte bu planformların ticari hava araçları için de temel oluşturacağına inanılmaktadır.

Delta kanatlar ok (Λ) açılına göre, düşük ($35^\circ < \Lambda < 55^\circ$) ve yüksek ($\Lambda > 55^\circ$) olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Her iki tür için de akış girdap yapıları tarafından domine edilmektedir. Sınır tabakadelta kanat hücum kenarlarının rüzgâr altı kısmından ayrılarak yuvarlanma hareketi ile birincil girdap yapısını oluşturmaktadır. Bu yapı ayrıık girdapçıklarla sürekli olarak beslenerek hücum kenarı doğrultusunda yayılım göstermektedir [Gad-el-Hak ve Blackwelder, 1987]. Birincil girdap yapısının merkezi boylamsal eksenine yüksek hıza sahip olup, güçlü emme özelliği göstererek taşıma kuvvetine katkıda bulunmaktadır [Wentz ve Kohlman, 1971]. Delta kanat akışları doğal olarak değişken ve karmaşık yapılar gösterebilmektedir. Hücum açısının artması ile daha da belirginleşebilen bu yapılar; kesme tabakası kararsızlıkları, girdap kırınımı, kırınım noktası

¹ Uçuş Mekanikliği Tasarım Uzmanı, Helikopter G.M.Y., E-posta: cenk.cetin@tai.com.tr
Doktora Adayı, Makina Müh. Böl., E-posta: cenk.cetin@metu.edu.tr

² Aerodinamik Başmühendisi, Milli Muharip Uçak Geliştirme Projesi, E-posta: goktug.kocak@tai.com.tr
Doktora Adayı, Makina Müh. Böl., E-posta: goktug.kocak@metu.edu.tr

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

çalkantısı, girdap kopması, girdap sapması ve akışkan-yapısal etkileşimleri olarak sıralanabilir [Gürsül, 2005].

Düşük ok açılı delta kanatlar yüksek ok açılı delta kanatlardan farklı olarak birincil girdap yapısının yüzeye daha yakın oluşmasıyla çiftli girdap ve akış yapışması yapılarını da gösterebilmektedir [Gürsül, Taylor ve Wooding, 2002; Taylor, Schnorbus ve Gürsül, 2003]. Çiftli girdap yapısının oluşumu girdap mukavemetini önemli derecede etkileyerek, düşük ok açılı delta kanatların taşıma kuvveti üretme kabiliyetlerini yüksek ok açılı olan kanatlara göre sınırlı kılabilir. Akış yapışması, düşük ok açılı kanatlar için yapışma hattı boyunca oluşan hız çalkantıları nedeniyle gövde titreşimlerinin önemli bir kaynağı olarak gösterilmektedir [Gursul, Gordiner ve Visbal, 2005]. Bu etkileşimler, düşük ok açılı kanatlar üzerindeki akış yapılarının kontrol edilmesini daha kritik bir noktaya taşımaktadır ve çeşitlilik gerektirmektedir. Nihayetinde bu kanatlar yüksek manevra kabiliyeti, çeviklik ve düşük yapısal ağırlık- kalkış ağırlığı oranı avantajlarını tasarım çözümleri olarak sunmaktadır.

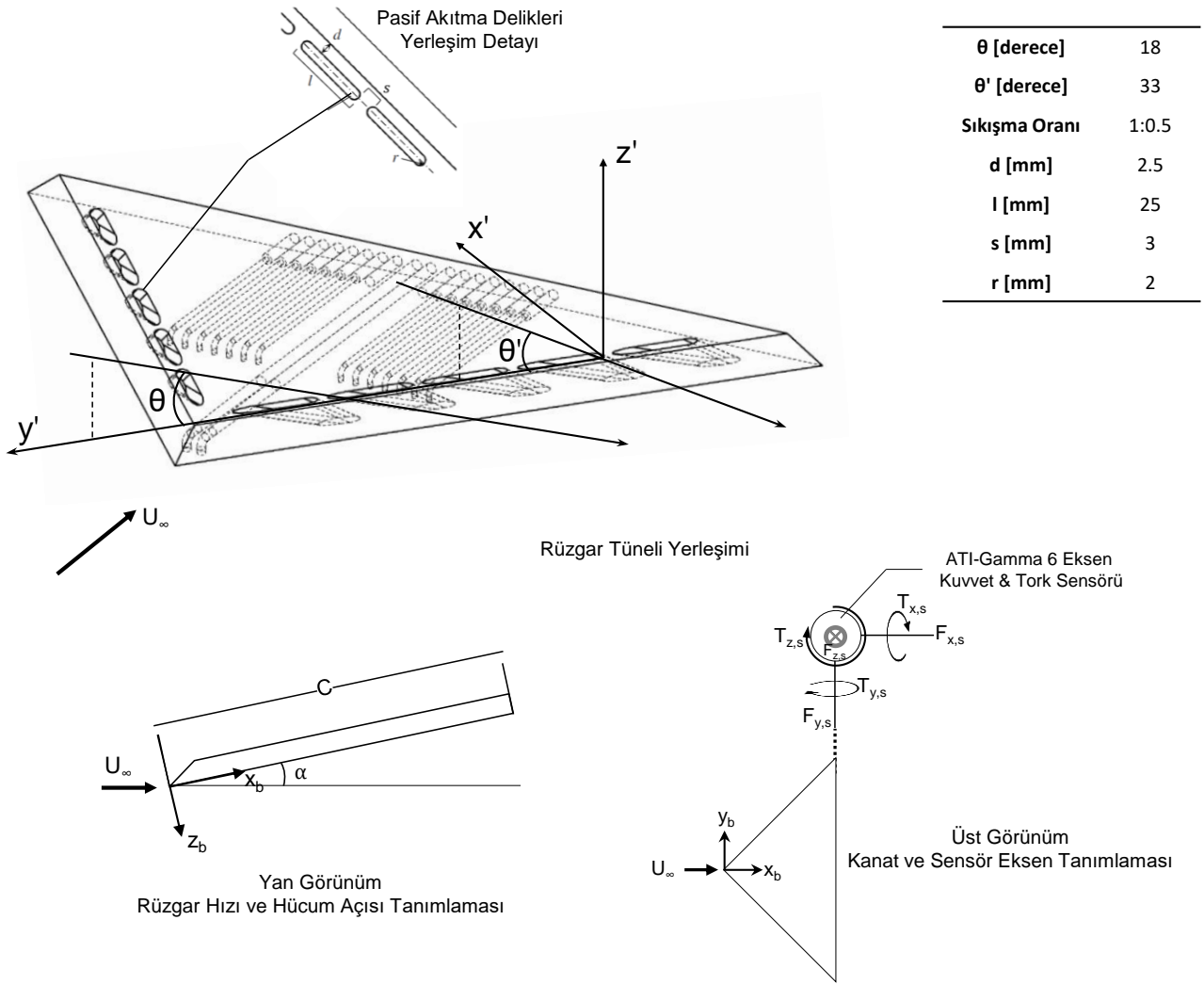
Son yıllarda, yukarıda bahsedilen düşük ok açılı delta kanatlar üzerindeki akış kararsızlıklarını kontrol etmek için harcanan çaba artış göstermektedir. Akış kontrol teknikleri pasif ve aktif olmak üzere iki başlık altında derlenmiştir [Gad-el Hak, 2001]. Pasif teknikler için herhangi bir harici enerji girdisine veya kontrol döngüsüne ihtiyaç olmamaktadır. Aktif teknikler ise önceden belirlenmiş ya da tepkisel kontrol döngüleri ile sürülmekte olup enerji girdisine ihtiyaç duymaktadırlar. Pasif teknikler sıfır enerji ihtiyacıyla avantajlı olmasına rağmen kanat üzerinde kalıcı yapısal değişiklikler yarattığından farklı uçuş rejimlerinde istenmeyen etkilere sebep olabilmektedir. Bu nedenle araştırma düzeyinde gerçekleştirilen pasif akış kontrol çalışmaları, tepkisel aktif akış kontrol eyleyici tasarımları için altyapı oluşturmada önemli bir yöntem olmaktadır. Literatürde farklı pasif kontrol çalışmaları bulunmaktadır. Kanat kenar modifikasyonları, kalınlık – veter oranlı, statik kontrol yüzeyleri gibi teknikler yüksek ve düşük ok açılı delta kanatlarda çalışılmıştır. Pasif akıtma yöntemi delta kanatlarda ilk olarak $\Lambda = 45^\circ$ düşük ok açılı bir modelde hücum kenarına yerleştirilerek farklı yönelim açıları için incelenmiştir [Çelik, Çetin ve Yavuz, 2017]. Bu çalışmada uygun yönelim konfigürasyonlarının akış yapısında büyük değişikliklerle, üç boyutlu yüzey akış ayrılmasını kontrol edebildiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın devamındaki çalışmalarda [Kestel, Karagöz ve Yavuz, 2019], geri yönelim açısının ve delik açıklık oranının etkileri incelenerek akıştaki değişimler gözlemlenmiştir. $\Lambda = 70/50^\circ$ çiftli bir delta kanadın sabit bir veter noktasında kanat açıklığı boyunca yerleştirilen pasif akıtma deliklerinin girdap mukavemetlerini arttırabildiği gözlenmiştir [Zhang, Wang ve Gürsül, 2017].

Sunulan bu çalışmada $\Lambda = 45$ derece düşük ok açılı bir delta kanat üzerindeki akışın hücum kenarına yerleştirilen lüle prensipli daralan geometriye sahip pasif akıtma delikleri ile kontrolü incelenmiştir. Kanat yüzeyleri arasındaki basınç farkı ile yönlendirilen kontrol akışının daralan geometri boyunca hızlandırılması temeline dayanarak lokal ve toplam akış iyileşmeleri hedeflenen bu çalışmada etki ilk olarak basınç ve kuvvet ölçümleri ile incelenmiştir.

YÖNTEM

Bu çalışma Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında bulunan düşük hızlı rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr tüneli test bölgesi 750 mm x 510 mm kesit ve 2000 mm uzunluk ölçülerinde, tünel karakterizasyon çalışmalarında görülen çalkantı yoğunluk değeri %1'in altındadır. Basınç ölçüm deneyleri, 35000, 75000 ve 100000 Reynolds sayılarında hücum açıları $\alpha = 6, 10, 16, 18$ ve 20 derece için $x/C = 0.5$ 'de gerçekleştirilmiştir. Kuvvet ölçüm deneyleri 90000 Reynolds sayısında $\alpha = 0 - 30$ derece aralığında incelenmiştir. Hızlı prototipleme tekniği ile üretilen temel ve pasif akıtma delikli delta kanatların ok açısı 45 derece, kalınlığı 8 mm, veter uzunluğu 130 mm ve kanat açıklığı 270 mm'dir. Kanat, hücum kenarlarından rüzgâr altı tarafında 45 derece açı ile pahlanmıştır. Yapılan deneylerde en yüksek blokaj oranı, hücum açısı 30 derecede ve % 2.4 oranındadır. Tasarlanan ve üretilen pasif akıtma kontrol deliklerine sahip kanadın (Pasif Planform) detayları Şekil 1'de gösterilmiştir. İzometrik görüntü ile verilen kanat detayında $x/C = 0.5$ 'de kanat açıklığı boyunca konumlandırılmış basınç ölçüm delikleri görülebilmektedir. Bu deliklerin sensör bağlantıları firar kenarından pnömatik basınç hortumları ile yapılmaktadır. Hücum kenarına yerleştirilen pasif akıtma delikleri kanadın basınç yüzeyinden taşıma yüzeyine doğru 1:0.5 oranıyla doğrusal olarak yakınsayarak, daralma geometrisi ön θ ve arka θ' yönelim açıları tanımlanmıştır. Her bir hücum kenarında simetrik olarak

beşer adet yerleştirilen deliklerin genişlik (d), uzunluk (l), kenar yarıçap (r) ve aralık (s) değerleri Şekil-1'in sağında bulunan tabloda özetlenmiştir. Şekil 1'in alt tarafında ise yan ve üst düzlemden kanat modellerinin yerleşimleri verilmiştir.



Şekil 1: Lüle Yapılı Akıtma Delikli Pasif Planform Detayı ve Rüzgâr Tüneli Yerleşim Tanımlamaları.

Yüzey basınç ölçümleri NetScanner Scanivalve 16 kanallı basınç tarayıcısı ile yapılmıştır. Temel ve kontrol kanatlarında yapılan öncül basınç deneyleri sıfır yuvarlanma açısında simetrik bir yapının olduğunu göstermiştir ve deneyler esnasında kanadın bir tarafından ölçümler alınmıştır. Basınç dağılımı denklem 1 kullanılarak boyutsuz basınç katsayısı (C_p) olarak ifade edilmiştir. Denklem 1'de \bar{p} yüzey basınç deliklerinden toplanan verilerin ortalamasını, p_∞ test bölgesindeki serbest akışın statik basınç değerini, p_{dyn} ise test bölgesindeki serbest akışın dinamik basınç değerini ifade etmektedir. İncelenen her bir test noktasında 500 Hz örnekleme hızıyla 10 saniye boyunca ölçümler alınmıştır.

$$C_p = \frac{\bar{p} - p_\infty}{0.5\rho U_\infty^2} = \frac{\bar{p} - p_\infty}{p_{dyn}} \tag{1}$$

Kuvvet ölçümleri ATI Gamma Series 6 eksenli bir kuvvet – tork sensörü kullanılarak harici kuvvet balans sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kuvvet ve moment sonuçları serbest akış rüzgâr eksenine dönüştürülerek denklem 2 ve 3'te gösterilen sürüklenme kuvveti katsayısı (C_D), taşıma kuvveti katsayısı (C_L) ve yunuslama momenti katsayısı (C_M) ile sunulmuştur hücum açısına bağlı olarak sunulmuştur. Aşağıdaki denklemlerde F_D sürüklenme kuvvetini, F_L taşıma kuvvetini, M_y yunuslama momentini, A referans aerodinamik yüzey alanını ve L referans aerodinamik moment kolunu ifade etmektedir. Sunulan C_M değerleri kanadın firar kenarında gösterilmiştir. İncelenen her bir test noktasında 10000 Hz örnekleme hızıyla 10 saniye boyunca ölçümler alınmıştır.

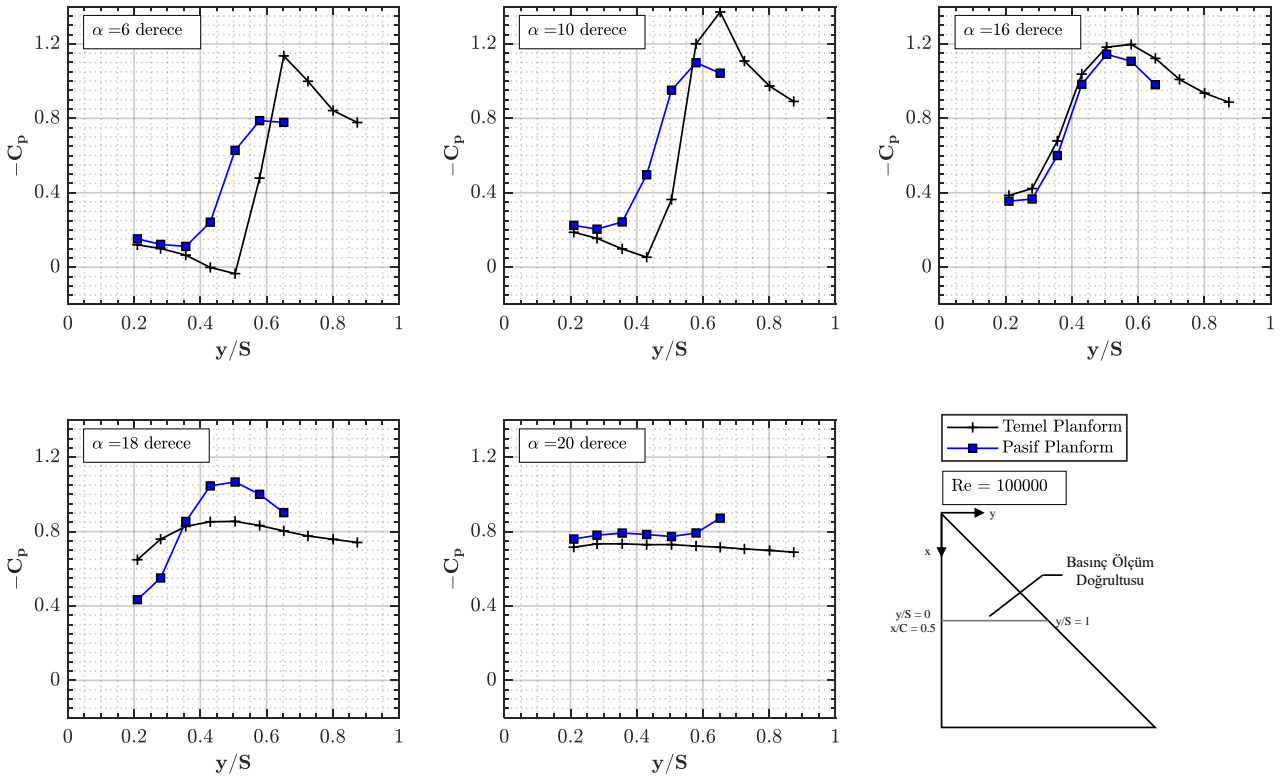
$$C_D, C_L = \frac{F_D, F_L}{0.5 \rho U_\infty^2 A} = \frac{F_D, F_L}{p_{dyn} A} \quad (2)$$

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

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Yüzey Basınç Ölçüm Sonuçları

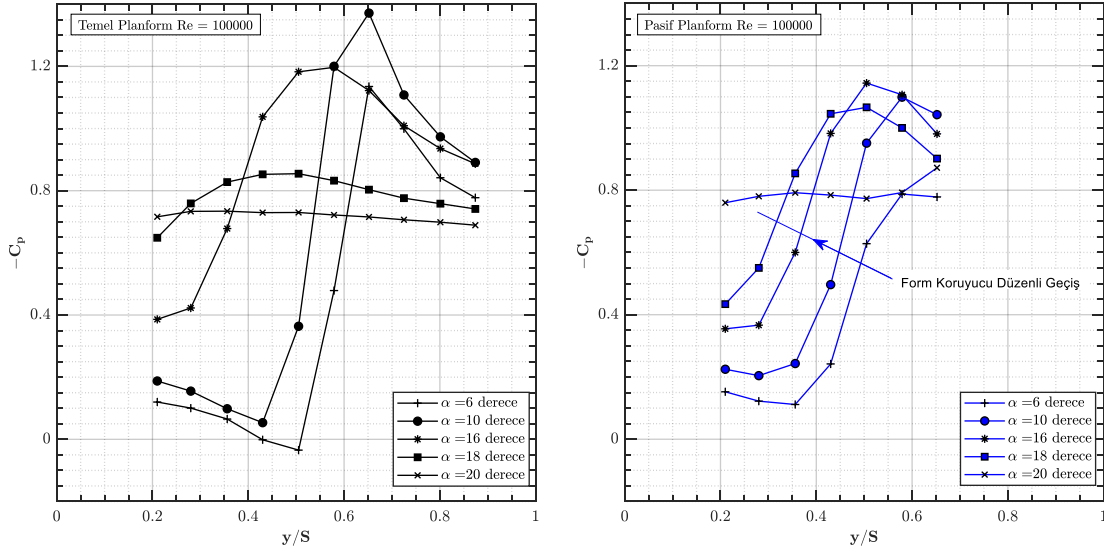
Şekil 2’de $Re = 100000$ ’de temel ve pasif planformlar için taşıma yüzeyi $x/C = 0.5$ ’de toplanan basınç ölçüm sonuçları yarım kanat açıklığında boyutsuz basınç katsayısı ile negatif değer olarak $-C_p$ ile gösterilmiştir. Dağılım yarım kanat açıklığı için yatay ekseninde boyutsuz olarak y/S ile ifade edilmiştir. Bu ifadede y yanal eksen konumu, S lokal yarım kanat açıklığı değeridir. $y/S = 0$ simetri eksenini, $y/S = 1$ hücum kenarı noktasını göstermektedir. Hücum açısı 6 ve 10 derece için verilen sonuçlar incelendiğinde temel kanatta görülen dağılım, üzerinde girdap barındıran bir yüzeyin çapraz akış düzleminde görülebilecek tipik dağılıma benzemektedir. Böylesi bir dağılımda bulunan maksimum $-C_p$ değeri genellikle girdap düzleminde hızın en yüksek olduğu merkez noktasına denk gelmektedir. Minimum değer ise yüzey akış yapışmasının gerçekleştiği noktayı temsil ettiği bilinmektedir. Kontrol uygulanan kanatla en yüksek $-C_p$ değerinin azaldığı görülmüştür, ancak simetri eksenine yaklaştıkça görülen artış girdap yapısındaki hız dağılımına dolayısıyla formuna ilişkin bir değişiklik olarak değerlendirilebilir. Hücum açısı 16 derece sonuçları incelendiğinde temel ve pasif planformlar benzer bir dağılım göstererek tipik yapıyı korumuşlardır. 18 derece hücum açısında ise temel kanat tipik dağılımı kaybederek homojen dağılıma yakın bir davranış göstermiştir. Bu yapının, önceki çalışmalardan da bilindiği üzere üç boyutlu yüzey akış ayrılmalarının bir göstergesi olarak lokal tutunma kaybı durumuna yaklaşıldığı çıkarımı yapılabilir. Önerilen pasif akıtma geometrisi bu hücum açısında tipik çan eğrisini yapısını korumakta ve girdaplı akışın planforma tutunmasını sağlamaktadır. Hücum açısı 20 dereceye artırıldığında ise her iki kanat homojen dağılım göstermektedir.



Şekil 2: $Re = 100000$, $x/C = 0.5$ ’de Temel ve Pasif Planformlar için Yüzey Basınç Dağılım $-C_p$ Karşılaştırması.

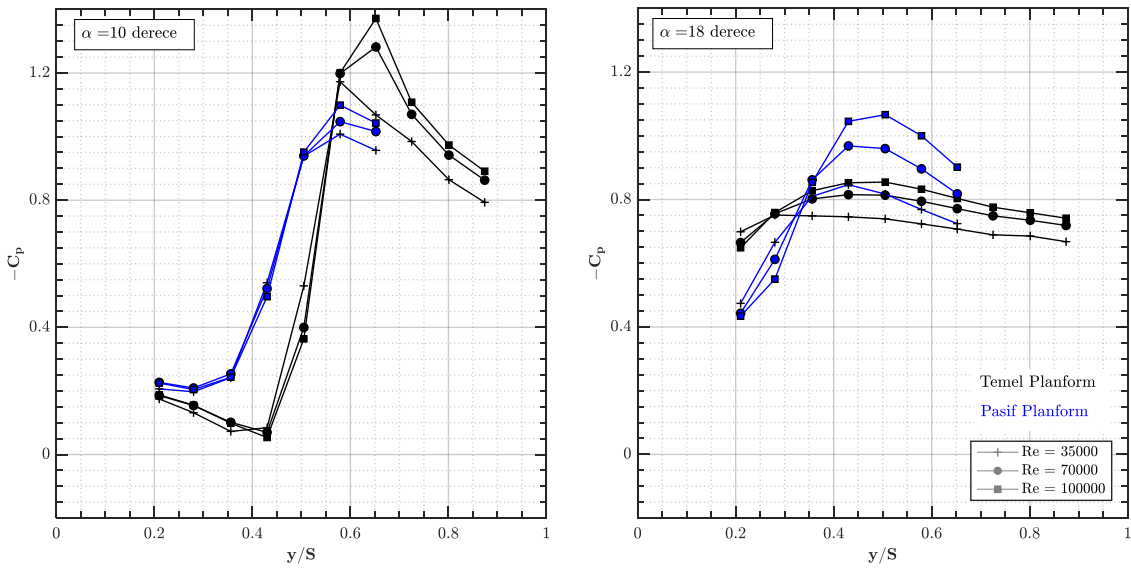
Şekil 3’te Reynolds 100000 için her iki kanadın tekil olarak hücum açısı ile davranışları karşılaştırılmıştır. Bu grafik hücum açısının lokal akış dağılımını tekil planformda nasıl etkilediğini

göstermek için oluşturulmuştur. Pasif kontrol uygulanan planformda hücum açısının artması ile basınç dağılımının formunu koruyarak kanat doğrusal eksenine doğru düzenli bir kayma gösterdiği görülmektedir. Temel planform için hücum açıları arası geçişlerin daha ayırık olduğu çıkarımı yapılabilir. Nihayetinde basınç ölçümlerinin öncül olarak kanatların perdövites karakteristiği hakkında bilgi verebileceği beklenir. Bu beklenti kuvvet ölçümleri ile de karşılanmıştır.



Şekil 3: Re = 100000, x/C = 0.50'de Yüzey Basınç Dağılımının $-C_p$ Temel (Sol) ve Pasif (Sağ) Planformlarda Hücum Açısı İçin Tekil Olarak Karşılaştırması.

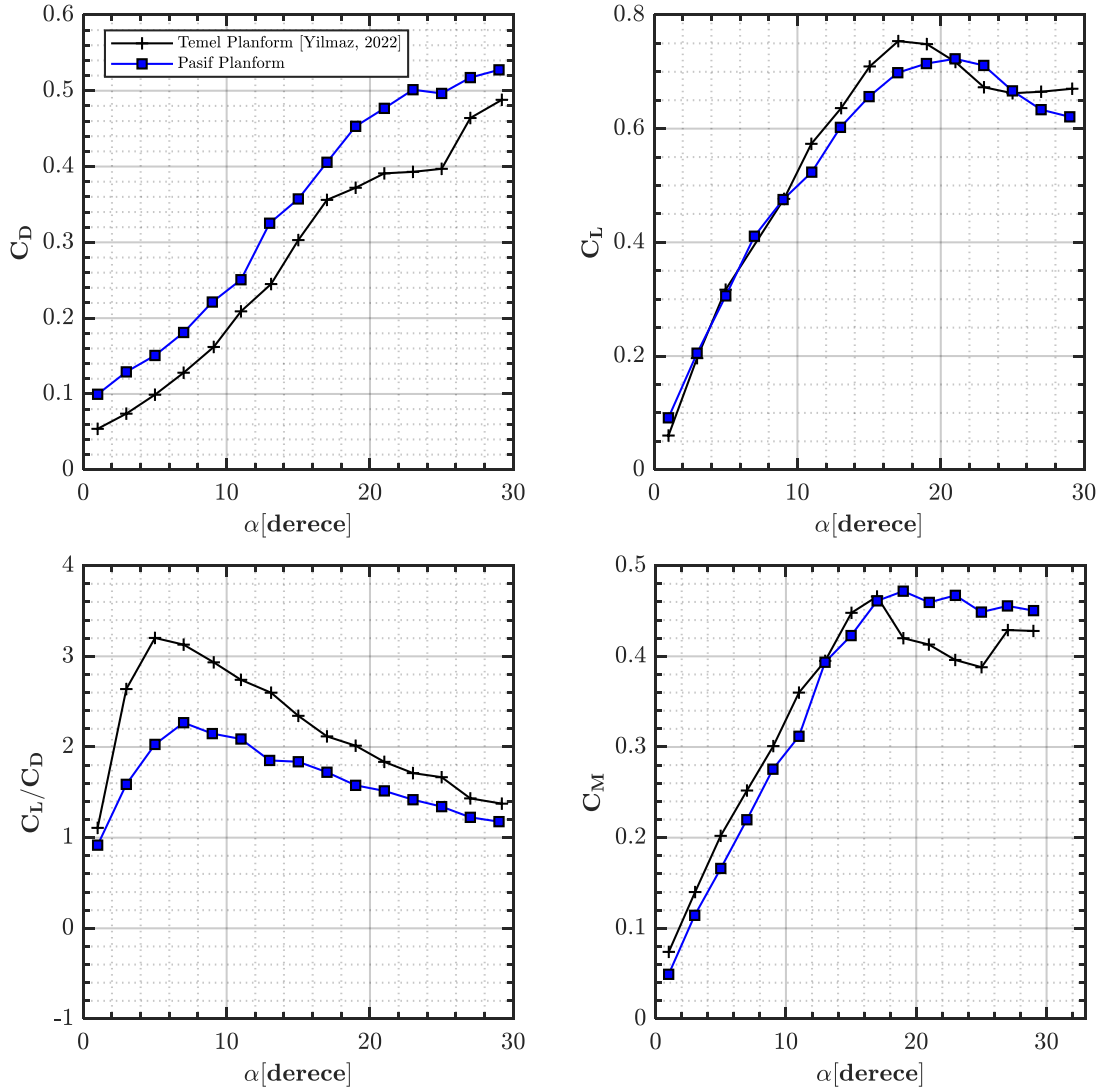
Şekil 4'te hücum açısı 10 ve 18 derece için Reynolds sayısının etkisi incelenmiştir. Orta bir hücum açısında her iki planform da hızın artması ile dağılımlarını korumuş ve lokal olarak enerjisi yüksek girdap yapıları oluşturmuşlardır. Yüksek hücum açısı incelendiğinde hızın artışı düze yakın dağılımın toparlamasında etkili olamamıştır. Pasif planformda ise hızın artması ile daha belirgin bir çan yapısına geçiş açık olarak görülmektedir.



Şekil 4: Yüzey Basınç Dağılımının $-C_p$ Temel ve Pasif Planformlarda Reynolds Sayısı İçin Karşılaştırması $\alpha = 10$ (Sol), $\alpha = 18$ (Sağ).

Aerodinamik Kuvvet Ölçüm Sonuçları

Kuvvet ölçüm sonuçları Şekil 5'te $Re = 90000$ için hücum açısına bağlı olarak boyutsuz kuvvet ve moment katsayıları ile gösterilmiştir. Temel kanat deneyleri laboratuvarında aynı test koşullarında gerçekleştirilen bir diğer çalışmadan [Yılmaz, 2022] tekrar üretilerek karşılaştırılmıştır. Taşıma kuvveti katsayısı dağılımı incelendiğinde 10 derece hücum açısına kadar dağılım temel ve pasif planformlar için doğrusal bölge eğim davranışı benzerdir. Perdövites temel kanatta 17 derece civarında 0.75 katsayısında gözlenmiştir. 10 derece sonrasında pasif planform temel planforma göre taşıma kuvvet katsayısı dağılımında eğim kaybı yaşamaktadır. Pasif kontrol tekniği ile perdövitesin 4 derece ötelenerek taşıma katsayısının 0.72 civarında olduğu gözlenmiştir. Sürükleme katsayısı dağılımı incelendiğinde benzer davranış gözlenmekle birlikte, kontrollü kanat daha yüksek değerler göstermektedir. Çapraz düzlemde hızı artırılarak indüklenen pasif akıtma akışının kanat üstü akışla etkileşiminin buna sebep olduğu düşünülmektedir. Taşıma-sürükleme oranı dikkate alındığında aerodinamik performansın pasif planform için her noktada temel planforma göre düştüğü görülmektedir. Maksimum verim noktasında temel planforma göre pasif planformun 30%'e yakın verim kaybı yaşadığı görülmektedir. Planform firar kenarında verilen yunuslama momenti katsayısı incelendiğinde ise düşük ve orta açılı içeren doğrusal bölgede temel planforma göre bir azalış görülürken perdövites sonrası daha yüksek değerler görülmektedir.



Şekil 5: $Re = 90000$ 'de Temel ve Pasif Planformlar için Aerodinamik Kuvvet Ölçüm Sonuçlarının C_D , C_L , C_M ve C_D Karşılaştırması

SONUÇ

Sunulan bu çalışmada lüle yapılı yeni bir pasif akıtma geometrisi ile 45 derece ok açısına sahip bir delta kanat üzerindeki akışın kontrolü amaçlanmıştır. $Re = 35000 - 100000$ aralığında yüzey basınç taramaları, genel dağılımın temsili için önemli bir düzlem olduğu bilinen $x/C = 0.5$ 'de gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin sonuçlarına göre düşük ve orta hücum açılarında (6 – 16 arası 16 hariç) uygulanan kontrol geometrisinin genel yapısı korumakla birlikte girdap enerjisinde azalmaya sebep olduğu görülmektedir. 16 derece hücum açısı için dağılım benzer olmakla birlikte daha yüksek hücum açılarında pasif kontrolün akış yapısını toparladığı açık olarak görülmektedir ve önemli etkinin perdövites bölgesinde ortaya koyulacağı öngörülmektedir. $Re = 90000$ 'de gerçekleştirilen kuvvet ölçüm sonuçları incelendiğinde taşıma kuvveti dağılımının basınç ölçümleri ile elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülebilir. Orta hücum açılarında kadar dağılım temel ve pasif planformlar için benzerken hücum açısı arttıkça taşıma kuvveti katsayısında kontrol ile bir azalma görülmüş ancak basınç ölçümlerinde görülen düzenli dağılım geçişine benzer şekilde perdövites temel planforma göre 4 derece ötelenmiştir. Sürüklenme katsayısında kontrol akışı ile kanat altı akışın kesişmesi ile bir artış gözlenmiş olup dağılım benzerdir.

Elde edilen sonuçlara göre yeni geometri perdövites ve düzenli akış geçişleri için etkili bir yöntem olarak kullanılabilir. Bu çalışmaların çıktısı doğrultusunda yeni geometri tasarımları ile geniş hücum açıları aralığında etkinlik gösterecek pasif – aktif – melez akış kontrol çalışmaları oluşturulabilecektir.

TEŞEKKÜR

Çalışmanın yazarları, deneylerdeki katkılarından dolayı Arş. Gör. Oğuzhan Yılmaz'a teşekkür etmektedirler. Yazarlar, çalışmayı değerlendiren UHUK 2022 bilim kurulu hakemlerine bildiri özetinin geliştirilmesine yönelik değerli katkılarından ötürü ayrıca teşekkürlerini sunmaktadırlar

Kaynaklar

- 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.
- Gad-El-Hak, M. ve Blackwelder, R.F., 1987. *Control of the discrete vortices from a delta wing*, AIAA Journal, Cilt 25-8, s. 1042 – 1049.
- Gad-El-Hak, M., 2001. *Flow Control: The Future*, Journal of Aircraft, Cilt.38-2, s.402 – 418.
- Gursul, I., Taylor, G., ve Wooding, C., 2002. *Vortex flows over fixed-wing micro air vehicles*, 40th AIAA Aerospace Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 14 – 17 Ocak. s.698.
- 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.
- Taylor, G., Schnorbus, T., ve Gursul, I., 2003. *An Investigation of Vortex Flows over Low Sweep Delta Wings*, 33. AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Orlando, Florida, 23 – 26 Temmuz. s.4021. 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.
- Yılmaz, O., 2022. *Pasif Akıtma Tekniğinin İnce Olmayan Bir Delta Kanadın Aerodinamik Performansına Etkisinin Yer Etkisi Durumunda İncelenmesi*, TOBB ETÜ Yüksek Lisans Tezi (Tez Savunma Tarihi 16.02.2022), Ankara.
- Zhang, X., Wang, Z., ve Gursul, I., 2017. *Control of multiple vortices over a double delta wing*, 47. AIAA Fluid Dynamics Conference, Denver, Colorado, 5 – 9 Temmuz., s.4122.