

PAH AÇISININ DELTA KANAT ÜZERİNDE AKIŞ YAPISINA ETKİSİNİN NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

Melik Buğra YEŞİL¹, Mustafa SÖYLER²
Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye

Bülent YANIKTEPE³
Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye

ÖZET

Bu çalışmada, 35 derece süpürme açısına, 5 mm kalınlığa, 105 mm chord uzunluğuna ve $\beta = 45^\circ$ pah açısına sahip bir delta kanadın akış yapısı üzerindeki pah açısının etkisini araştırmak için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizi kullanılmıştır. Reynolds sayısı $Re = 3.5 \times 10^4$ ve hücum açıları $\alpha = 8^\circ$ ve 10° için analizler gerçekleştirilmiştir. HAD analizlerinin kesinliği literatürdeki (Gülsaçan, 2017)'deki deneysel sonuçları $x/C = 0.44$ noktasından kanat açıklığı boyunca elde edilen boyutsuz basınç katsayısı $-C_p$ ile doğrulanmıştır. Analiz ve deneysel sonuçların karşılaştırılmasından sonra delta kanadın pah açısı $\beta = 37.8$ derece yapıp incelenmiş, akışın yüzeye yeniden bağlandığı alanlar ve girdap merkezleri konumunda bir değişiklik olmadığı ancak hücum açısı arttıkça boyutsuz basınç katsayısı kanat açıklığı boyunca düştüğü belirlenmiştir. Pah açısının $\beta = 45^\circ$ 'ten $\beta = 37.8^\circ$ 'ye düşürülmesiyle dar bir alanda yoğunlaşan akış yapısının, daha az girdap oluşumu ve daha düzenli, kontrollü bir akış karakteristiği sergilediği belirlenmiştir.

GİRİŞ

Savunma sanayisinde önemli yeri olan insansız hava araçları (İHA), insansız savaş uçakları (İSU), mikro hava araçları (MHA) ve silahlı insansız hava araçlarının (SİHA) basitleştirilmiş yapılarıyla düşük süpürme açılı olan delta kanatlara olan ilgi günden güne artmaktadır. Delta kanatların manevra kabiliyeti ve performansı uçak aerodinamiğinin önemli parametrelerindedir. Girdapların ve akışın düzenlenmesindeki en önemli faktörler arasında delta kanat geometrilerindeki çeşitli hücum açılarındaki akışın yapısı, girdap çökmesi, ölü akış bölgesi ve aerodinamik özellikler yer alır. Delta kanat akış alanında girdap akış yapıları hakimdir; en dikkate değer örnek, ön uç bileşenlerinden başlayarak (ön kenar girdapları) kanadın yan uçlarında oluşan girdaplardır [Yanıktepe, 2016]. Viskoz bir akış tabakasının yuvarlanmasıyla sınır tabakasının ayrılması bu girdap oluşumlarını üretir. Delta kanadın hücum açısı ve keskin ön kenarları bu akış ayırma mekanizmasına neden olur [Yanıktepe ve Rockwell, 2004]. Kanat ön kenarlarında oluşan güçlü girdaplar, kanat üst yüzeyinde düşük basınç bölgeleri yaratarak kaldırma kuvvetini artırır [Bertin ve Cummings, 2009]. Bu girdaplar, kanat yüzeyine yakın bölgelerde yoğunlaşır ve stabil kaldırma kuvveti oluşturur [Ashley, 1992]. Düşük süpürme açılı kanatlarda girdap merkezlerindeki aksel hızlar, uçuş hızının iki katı kadar olabilirken, yüksek süpürme açılı delta kanatlarda uçuş hızının beş katı kadar olabilmektedir. [Gürsul ve ark., 2005]. Süpürme açısındaki azalma, kanat üzerindeki girdapların aksel hızlarının düşmesine yol açar ve bu nedenle girdap kaynaklı kaldırma kuvveti de azalır. Girdapların oluşumu, kanadın geometrisine ve hücum açısına bağlıdır [Katz ve Plotkin, 2001]. Yüksek hücum açılarındaki delta kanat üzerindeki girdaplar stabilitesini kaybedebilir ve girdap kırınımı (vortex breakdown) meydana gelir. Girdap kırınımı, kanat üzerindeki düşük basınç bölgesinin bozulmasına ve dolayısıyla kaldırma kuvvetinin azalmasına neden olur. Bu durum, uçuş stabilitesini ve kontrol edilebilirliği olumsuz etkilemesiyle birlikte sürüklenme kuvvetini artırarak aerodinamik verimliliği düşürür [Versteeg ve Malalasekera, 2007; Greenwell, 2002]. Delta kanat etrafında oluşan girdaplardan kaynaklı olarak

¹ Öğr. Gör., Raylı Sist. Mak. Tek. Prog., E-posta: melikbugrayesil@osmaniye.edu.tr

² Dr. Öğr. Üyesi, Enerji Sist. Müh. Böl., E-posta: mustafasoyler@osmaniye.edu.tr

³ Prof. Dr., Enerji Sist. Müh. Böl., E-posta: byaniktepe@osmaniye.edu.tr

akustik gürültü, yapısal titreşimler ve rezonans gibi istenmeyen durumlar ortaya çıkar ve aynı zamanda cisme etki eden sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinde düzensizlikler meydana gelir. Bu etkilerin ortadan kaldırılması veya sıklığının azaltılması, akış ayrılma noktasının ötelenmesi veya bastırılması cisimler etrafındaki akışın kontrolü ile sağlanmaktadır [Shams-VI-Islam vd. 2018; Zhang vd. 2019]. Girdapların kontrol edilmesinde, aktif ve pasif yöntemler olmak üzere iki grupta toplanabilecek çok sayıda yöntem geliştirilmiştir. Aktif yöntemlerde sisteme dışarıdan enerji verilerek akışı kontrol edilmeye çalışılırken, pasif yöntemlerde cisimler üzerinde ya da akış ortamında yapısal değişiklikler ile akış kontrolü sağlanmaya çalışılmaktadır [Akar ve Küçük, 2014]. Literatürde son yıllarda yapılan delta kanatta oluşan akış yapısının aktif ve pasif yöntemle kontrolü ile ilgili çalışmalar Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Aktif ve pasif akış kontrol teknikleri

Kontrol Yöntemi	Yöntem Türü	Açıklama	Kaynak
Hava Jetleri	Aktif	Yüzey boyunca emme yoluyla akışı manipüle eder, akış ayrılmalarını engeller.	[Zhang vd., 2020]
Plazma Aktüatörleri	Aktif	Elektrik alanları kullanarak akışkanı iyonize eder ve akışı kontrol eder.	[Singh ve Roy., 2019]
Piezoelektrik Aktüatörler	Aktif	Akışkanlar üzerinde mekanik titreşimler yaratarak akışı kontrol eder.	[Kim vd., 2021]
Girdap Üreticiler (Vortex Generators)	Pasif	Küçük kanatçıklar veya çıkıntılar, kanat yüzeyinde küçük girdaplar oluşturarak akışın yüzeye yapışmasını sağlar.	[Li vd., 2019]
Kanat Çitleri (Wing Fences)	Pasif	Kanat yüzeyine dik yerleştirilen ince plakalardır, akışı yönlendirir ve sürüklemeyi azaltır.	[Jiang vd., 2021]
Riblets (Küçük Çentikler)	Pasif	Kanat yüzeyine yerleştirilen küçük çentikler, sınır tabakasındaki türbülansı azaltarak sürüklemeyi minimize eder.	[Huang vd., 2020]

Düşük süpürme açılı delta kanatların akış mekaniğini araştırmak için, bu araçların performansını iyileştirmek ve çalışma parametrelerini belirlemek amacıyla yapılan çalışmalara ihtiyaç duyulmuştur. [Yanıktepe ve Rockwell, 2005], PIV tekniğini kullanarak, düşük süpürme açısına ($\Lambda \leq 40^\circ$) sahip delta kanatlarda, kanat ucundan çıkan girdap kırılmasının yüksek hücum açılarında önemli ölçüde daha belirgin hale geldiğini keşfetmişlerdir. [Riley ve Lowson, 1995], kanat kalınlığına bağlı olarak farklı hücum açılarında girdap çökme noktasının ötelenmesini deneysel olarak incelemişlerdir. Kalınlık-veter oranının ve eğim açısının, %2 ile %10 arasında değişen oranlarda 50 derece süpürme açılı delta kanatlardaki pah açısının aerodinamik verimliliği üzerindeki etkisi [Wang, Lu, 2005] tarafından araştırılmıştır. [Saha, Majumdar, 2012] tarafından bir delta kanat modelindeki subsonik şartlarda

yüzey sürtünme çizgilerini birincil ve ikincil girdapların izlenimleri olarak temsil etmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizi ve deneysel olarak görselleştirmesini yapmıştır. [Jian vd., 2014] tarafından $80^\circ/65^\circ$ çift delta kanat etrafındaki kararsız girdap kırılmalarını 30 ve 40 derece hücum açılarında DDES-SST k-w türbülans modeli kullanarak HAD analizi ile simüle etmiştir.

Yapılan çalışmada, Gülsaçan (2017)'de yaptığı deney düzeneğindeki olan delta kanatın HAD analiziyle doğrulanmış ve pah açısının delta kanat üzerinde basınç katsayısı ve girdap merkezlerinin üzerine olan etkisi incelenmiştir. $Re = 3.5 \times 10^4$ ve $t/C = 0.0475$ olan kanat için $\alpha=8$ ve 10 derece olmak üzere iki farklı hücum açısı HAD analizi ile incelenmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel verilerle uyumlu bulunmuştur. Akış fiziğini ve karakterini geliştirmek amacıyla bu fiziksel özelliklere sahip delta kanadın pah açısı $\beta=37.8^\circ$ olacak şekilde tasarlanarak hücum açısı, $\alpha=8$ ve 10 , derece olmak üzere HAD analizi ile incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ANALİZİ

Kanatın akış yapısını araştırmak için bu çalışmada HAD analizi yaklaşımı kullanılmıştır. Kanat geometrisi Şekil 1'de verilmiştir. Kontrol hacmi, CAD uygulamasındaki modelin ANSYS Geometry'ye aktarılmasından sonra oluşturulmuştur. Sayısal ağlar oluşturmak için ANSYS Mesher, kullanılmıştır. Daha sonra hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizini çözmek için çözücü program ANSYS FLUENT kullanılarak polyhedra ağ yapısına dönüştürülmüştür.

Seçilen türbülans modeli, DDES-SST k-w'ye ek olarak girdapları yakalayabildiği için Curvature-Correction seçilmiştir [Cesur ve ark., 2018]. Hücum açısı arttıkça güçlü girdaplar kanatta erkenden kırılır. Reynolds sayısına bakıldığında akış laminer gibi görünse de girdap kırılımı oluştuktan sonra kanatta ve akış alanında ortaya çıkan küçük girdaplar türbülanslı akış oluşturur. $Re = 3.5 \times 10^4$ laminer limit değerinin altında olmasına rağmen akış alanında türbülans meydana geldiğinden, HAD analizinde DDES SST k-w türbülans modeli kullanılmıştır. DDES SST k-w türbülans modeli zamana bağlı analizi içermektedir; her bir zaman adımı 0.01 ve ortalama sonuçlar sağlamak için toplam 250 zaman adımı kullanılmıştır.

DDES SST k-w Türbülans Modeli

Delayed Detached Eddy Simulation (DDES) modeli, türbülanslı akışları simüle etmek için kullanılan bir yöntemdir. DDES, RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) ve LES (Large Eddy Simulation) metodolojilerini birleştirir ve DES (Detached Eddy Simulation) modelinin geliştirilmiş bir versiyonudur. DDES modeli, Shear Stress Transport (SST) k-w modeli ile birleştirildiğinde, türbülanslı akışların daha doğru ve etkili bir şekilde simüle edilmesini sağlar.

SST k-w Modeli

SST k- ω modeli, k- ϵ ve k- ω modellerinin avantajlarını birleştirir.

Türbülans Kinetik Enerjisi (k) Denklemi:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{k} = P_k - \beta^* k \omega + \nabla \cdot [(\nu + \sigma_k \nu_t) \nabla \mathbf{k}] \quad (1)$$

Özgül Türbülans Dağılım Hızı (ω) Denklemi

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \omega = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \omega^2 + \nabla \cdot [(\nu + \sigma_\omega \nu_t) \nabla \omega] + 2(1 - F_1) \frac{\sigma_{\omega_2}}{\omega} \nabla \mathbf{k} \cdot \nabla \omega \quad (2)$$

Burada ν : kinematik viskozite, ν_t : türbülans viskozitesi, σ_k, σ_ω : Prandtl sayıları, β, β^*, α : model sabitleri, σ_{ω_2} : Prandtl sayısı için ikinci karışım fonksiyonu F_1 karışım fonksiyonu olup bu değer duvara yakın bölgelerde 1, uzak bölgelerde 0 olarak tanımlanmaktadır. Bu fonksiyon sayesinde SST

türbülans modeli duvara yakın bölgelerde k- ω ve duvardan uzak bölgelerde k- ϵ modeli gibi davranmaktadır [Menter., 1994].

DDES (Delayed Detached Eddy Simulation)

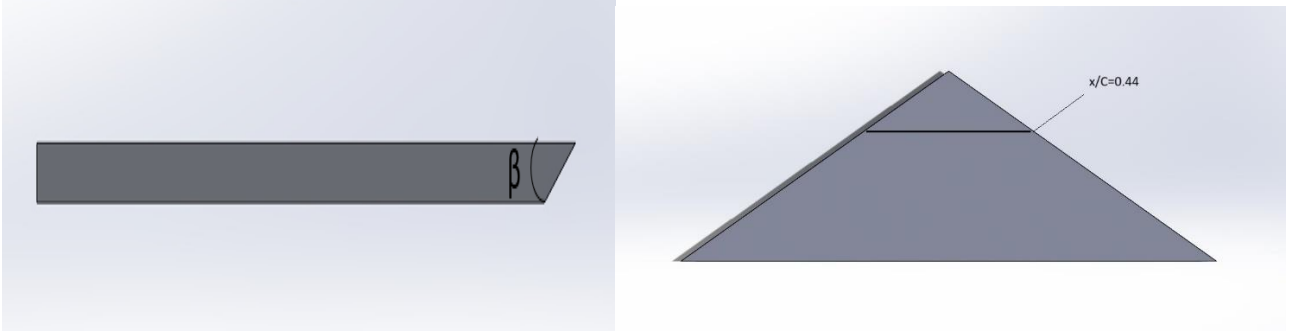
DDES modeli, DES modeline ek olarak bir gecikme fonksiyonu ekleyerek LES ve RANS bölgeleri arasındaki geçişi iyileştirir. Bu gecikme fonksiyonu, LES bölgesinin gereksiz yere küçülmesini önler ve RANS bölgesinin doğru yerde devreye girmesini sağlar.

Gecikme Fonksiyonu:

$$d = d_0 - f_d \Delta \quad (3)$$

$$f_d = 1 - \tanh \left[\left(\frac{C_{d1} \Delta}{d_0} \right)^3 \right] \quad (4)$$

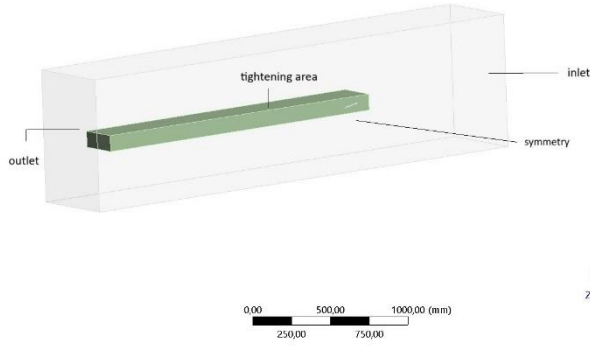
Burada; d_0 : orijinal mesafe fonksiyonu, f_d : gecikme fonksiyonu, C_{d1} : model sabiti, Δ : alt ızgara uzunluk ölçeği, genellikle hücre boyutları ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) arasındaki maksimum değer olarak alınır [Spalart P., vd. 2006].



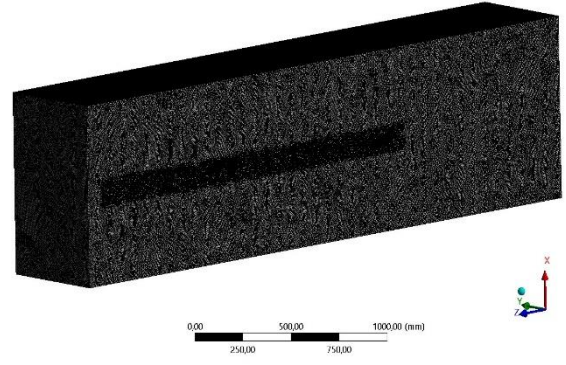
Şekil 1: Kanat Geometrisi

Analiz için yapısal olmayan yüzeylere ve çokyüzlü hacimlere sahip sayısal ağlar oluşturulmuştur. Kanat yüzeylerinde, sıklaştırma alanında ve kontrol hacminde lokal yapısal olmayan sayısal ağlar yapılmıştır. Lokal sayısal ağlar sırasıyla 8 mm, 5 mm ve 0.5 mm olacak şekilde belirlenmiştir. İnceleme sırasında kanat yüzeylerinden oluşan prizma katmanlı sayısal ağ, yaklaşık 1 y+ değerini sağlayacak şekilde hazırlanmıştır. Yüzeyden çıkan ilk prizmanın yüksekliğinin 0,0673 mm olarak ölçülmesinin ardından ortaya çıkan yedi prizma katmanı, büyüme oranı ise 1.14 olarak belirlenmiştir. Sıklaştırma bölgesindeki hücrelerin minimuma indirilmesiyle gerçekleştirilen sayısal ağ bağımsızlığı çalışması sonucunda toplam 12×10^6 polyhedra hücre bileşenine sahip bir sayısal ağ üretilmiştir. Aşağıda mesh yapısının (Şekil 3), kanat yüzey ağı ve prizma tabakaları (Şekil 4), kontrol hacmi ve sıklaştırma alanının (Şekil 2) görüntüleri yer almaktadır.

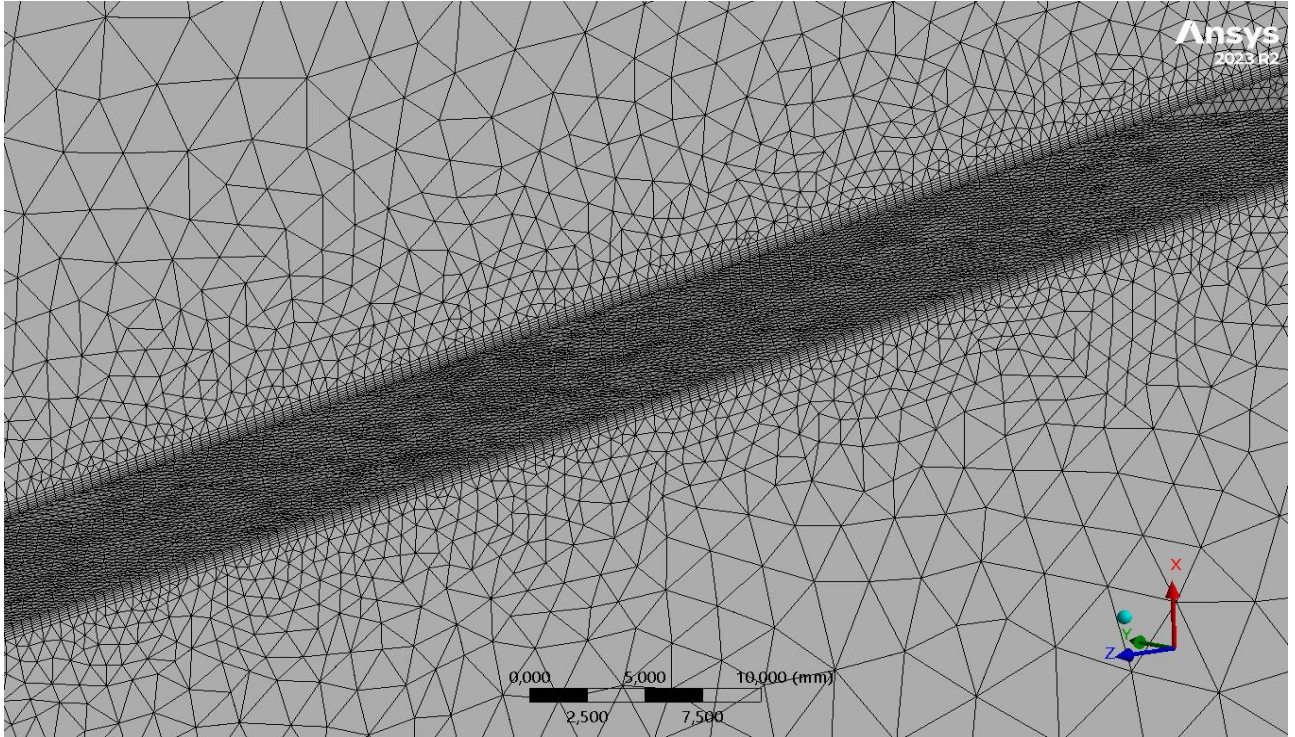
Model
16.03.2024 21:53



Şekil 2: Kontrol Hacmi ve Sıkıştırma Alanı



Şekil 3: Mesh Yapısı



Şekil 4: Kanat Yüzey Ağı ve Prizma Tabakaları

Sınır koşulları

Giriş ve çıkış sınırlamaları için sırasıyla doğrusal bir ekstrapolasyon koşulu ve sürekli bir giriş için gereksinimler vardır. Hesaplama verimliliği ve sayısal sağlamlık için kontrol hacim duvarları kayma duvarları olarak ele alınır, ancak delta kanat bölümü yüzeyi kaymaz duvar olarak ele alınır.

Akış alanının dış akış ve Mach sayısının $Ma < 0.3$ olduğundan dolayı sıkıştırılmaz ideal gaz olduğu dikkate alınarak, yoğunluk ideal gaz kanunu kullanılarak hesaplanır. Bu çalışma sırasında basınç-uzak alan sınır koşulu kullanılmıştır. Bu sınır koşulunun gerçek sonsuz kapsam durumlarına etkili bir şekilde yaklaşmak için uzak alan sınırı, bu araştırmanın ilgi nesnesinden yeterince uzaktır; bu çalışmada, giriş bölgesi delta kanat modeline $12x_C$, çıkış bölgesi $20x_C$ ve kontrol hacim duvarlarına $4.5x_C$ uzaklığındadır. Sınır koşullarının ayrıntıları Tablo 2'de verilmiştir.

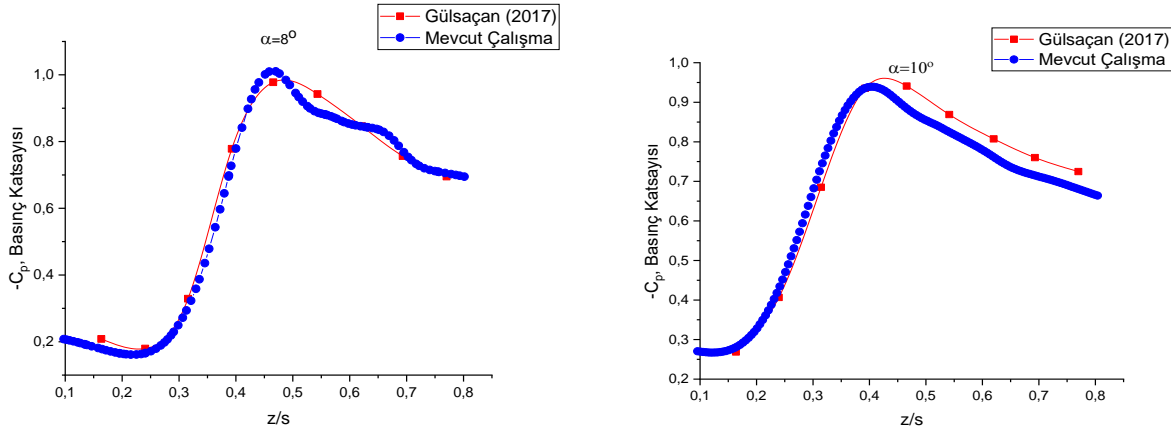
Tablo 2: Sınır koşulları ayrıntıları

Yüzey	Sınır Şartı	Parametre	Değer
Inlet	Velocity Inlet	Velocity (m/s)	4.97
Outlet	Pressure Outlet	Relative Pressure (Pa)	0
Delta Wing	Wall	No-Slip Wall	-
Walls	Wall	Free-Slip Wall	-
Symmetry	Symmetry	Symmetry	-

DDES SST k-w türbülans modeli ve Curvature Correction (CC) uzantısı kullanıldı ve Çözücü Pressure Based seçeneği seçilmiştir. Çözüm şeması SIMPLE'dir. Gradient ayarı Least-Square Cell Based olarak alınmıştır. Analizler sırasında kanat üst yüzeylerindeki maksimum basınç katsayısı değişimleri takip edilmiş ve kalan veriler için en az 10^{-6} 'lık bir yakınsama kriteri oluşturulmuştur.

BULGULAR

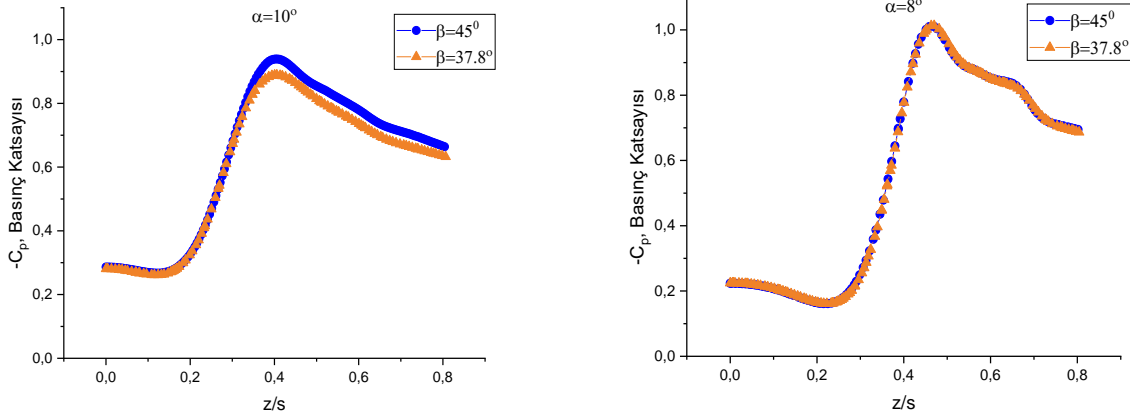
Delta kanatta $x/C=0.44$ 'te (Şekil-1) kanat açıklığı boyunca konumlandırılan yüzey basınç deliklerinden alınan basınç okumaları analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır [Gülsağan (2017)]. Şekil 5, $t/C = 0.0475$ ile 8 ve 10 derecelik hücum açılarındaki delta kanat için HAD analizi ve literatürdeki çalışmadan elde edilen deneysel sonuçların bir karşılaştırmasını göstermektedir.



Şekil 5: $x/C=0.44$ 'te $\alpha=8$ ve 10 derecede Basınç Katsayısı Dağılımları

Kanat açıklığı boyunca oluşturulan boyutsuz basınç katsayısı veya $-C_p$ grafikleri, bu basınç değişimlerini analiz etmek ve girdap merkezlerinin konumunun belirlenmesi için yararlı bir araçtır.

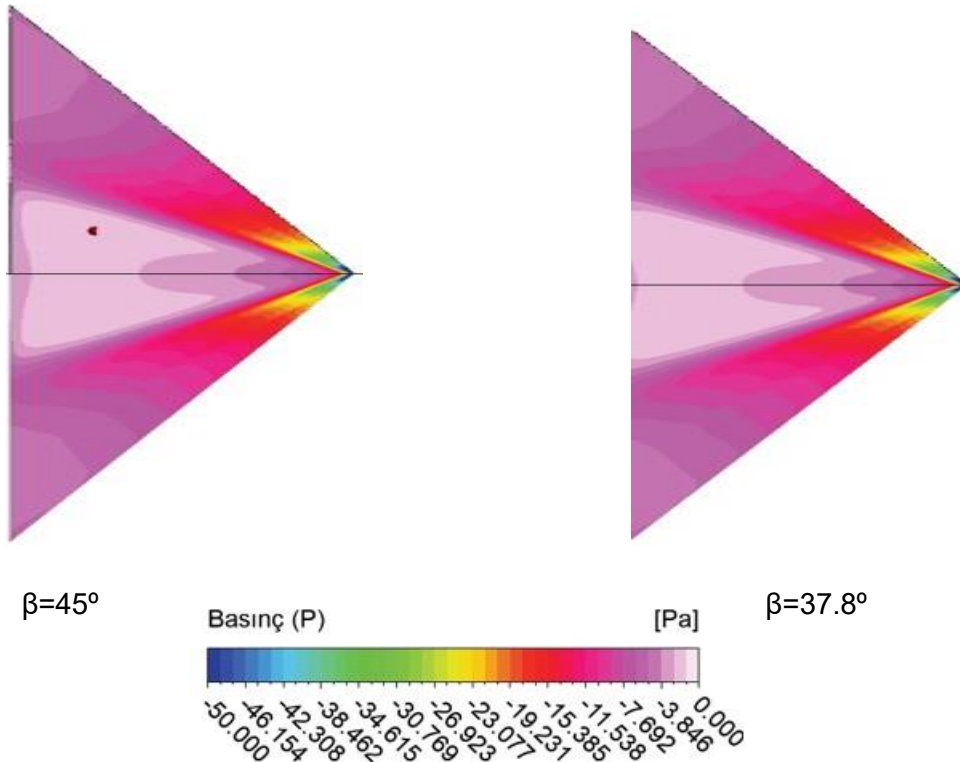
Akışın yüzeye yeniden bağlandığı alanlar ve girdap merkezleri sırasıyla $-C_p$ değerinin en az ve maksimum olduğu bölgelere karşılık gelmektedir. Bu $-C_p$ değerleri arasındaki farkın azalması girdap kuvvetinin azalmasıyla doğrudan ilişkilidir. Akışın yüzeyden üç boyutlu ayrılması ve girdap merkez çizgilerinin kanat simetri eksenine doğru kayması hem hücum açısının hem de akış hızının artmasının sonucudur [Yanıktepe ve ark., 2016]. Analiz bulgularında incelenen ve aynı konumda okunan tüm grafiklerde $-C_p$ değerlerinin deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmüştür. Hücum açısı arttıkça girdap merkezinin kanadın simetri eksenine kaydığı doğrulanmıştır. Bu çalışmada Gülsağan (2017)'de deneysel veriler alınmıştır. $x/C = 0.44$ hattına kanat açıklığı boyunca yerleştirilmiş yüzey basınç deliklerinden toplanmıştır. Had analiz sonuçlarında ise yine aynı konum boyunca $-C_p$ değerleri okunmuş ve tüm grafikler incelendiğinde genel olarak deneysel veriler ile uyumlu olduğu görülmüştür.



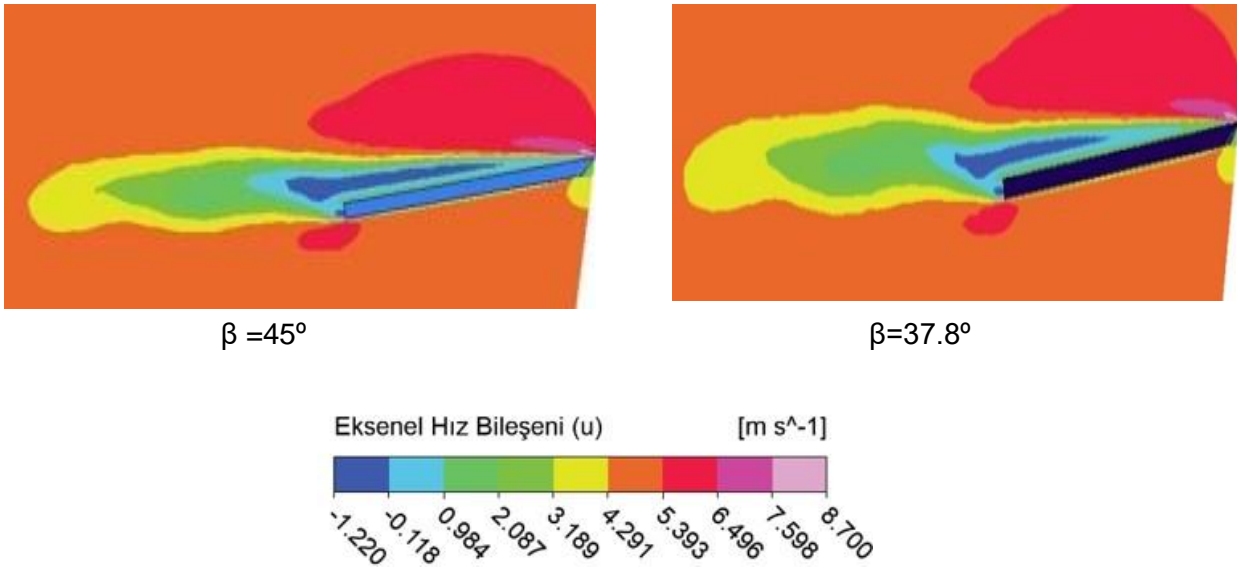
Şekil 6: $x/C=0.44$ 'te $\alpha=8$ ve 10 derecede, $\beta=45$ ve 37.8 derecede Basınç Katsayısı Dağılımları

Şekil 6'da görüldüğü üzere pah açısının basınç $x/C=0.44$ 'te kanat açıklığı boyunca boyutsuz basınç katsayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. $\beta = 37.8$ derecede akışın yüzeye yeniden bağlandığı alanlar ve girdap merkezleri konumunda bir değişiklik olmadığı, güçlü girdap yapılarını bozunuma uğratmadığı ancak hücum açısı arttıkça boyutsuz basınç katsayısı kanat açıklığı boyunca düşüş sonucuna varılmıştır.

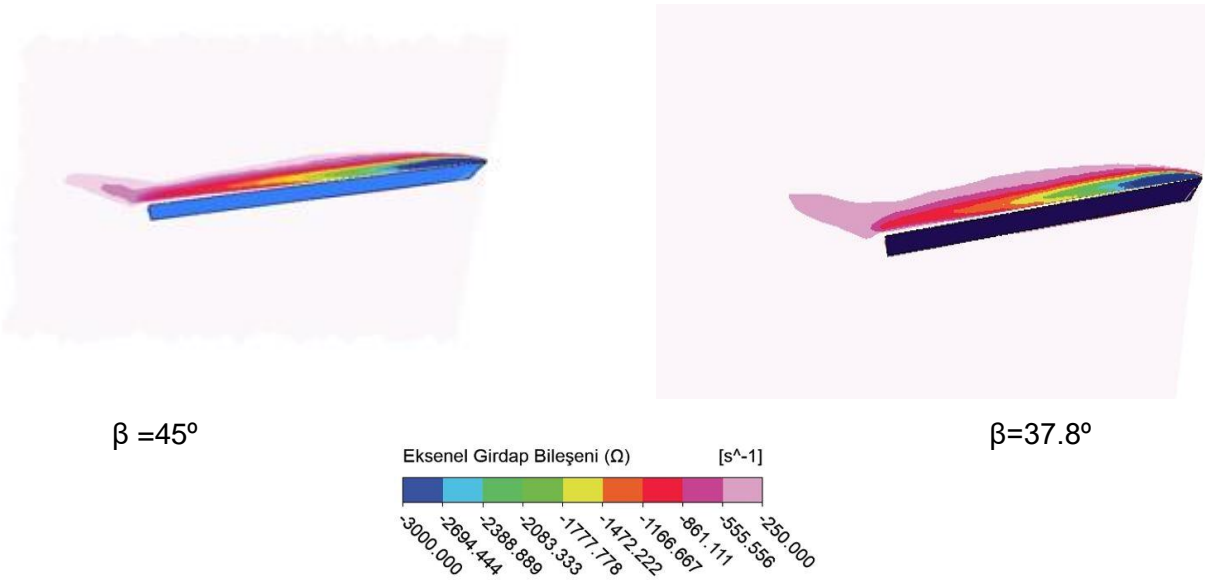
Yapılan HAD analizlerinde, pah açısı değişikliğinin $\alpha=8$ ve 10 derecede kanatların üst yüzelerindeki basınç dağılımları, girdap dağılımı, akım çizgileri, girdap merkezlerini birleştiren düzlemdeki aksenal hız ve girdap değerleri ve $x/C=0.44$ 'te akım çizgileri, hız vektörleri dağılımı incelenmiştir. (Şekil 7-16)



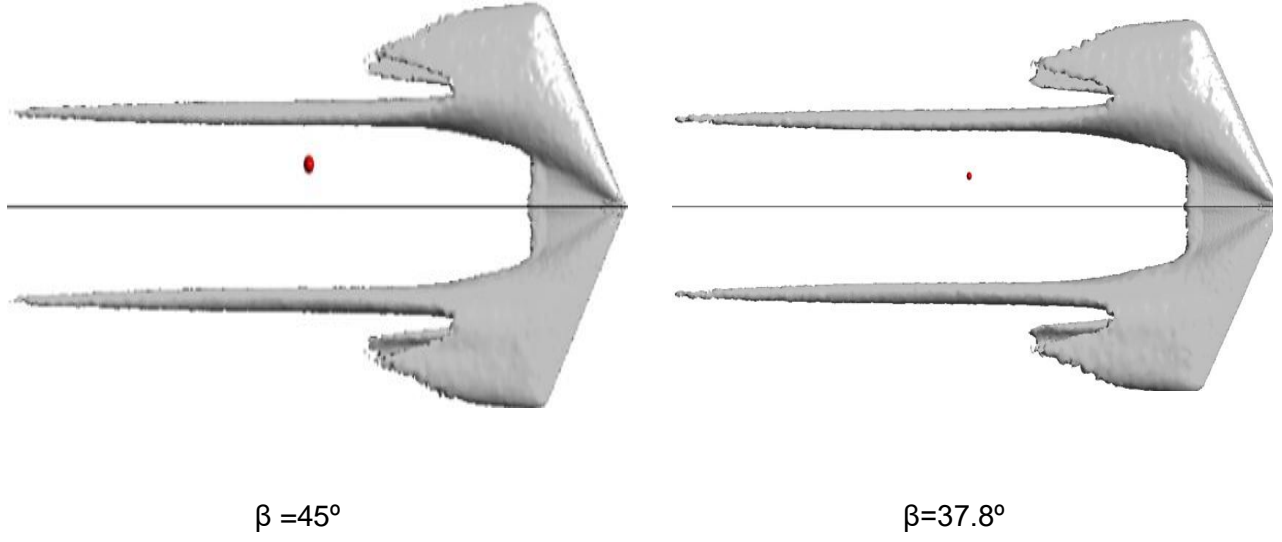
Şekil 7: $\alpha=8$ derecede, $\beta=45$ ve 37.8 derecede Basınç Dağılımları



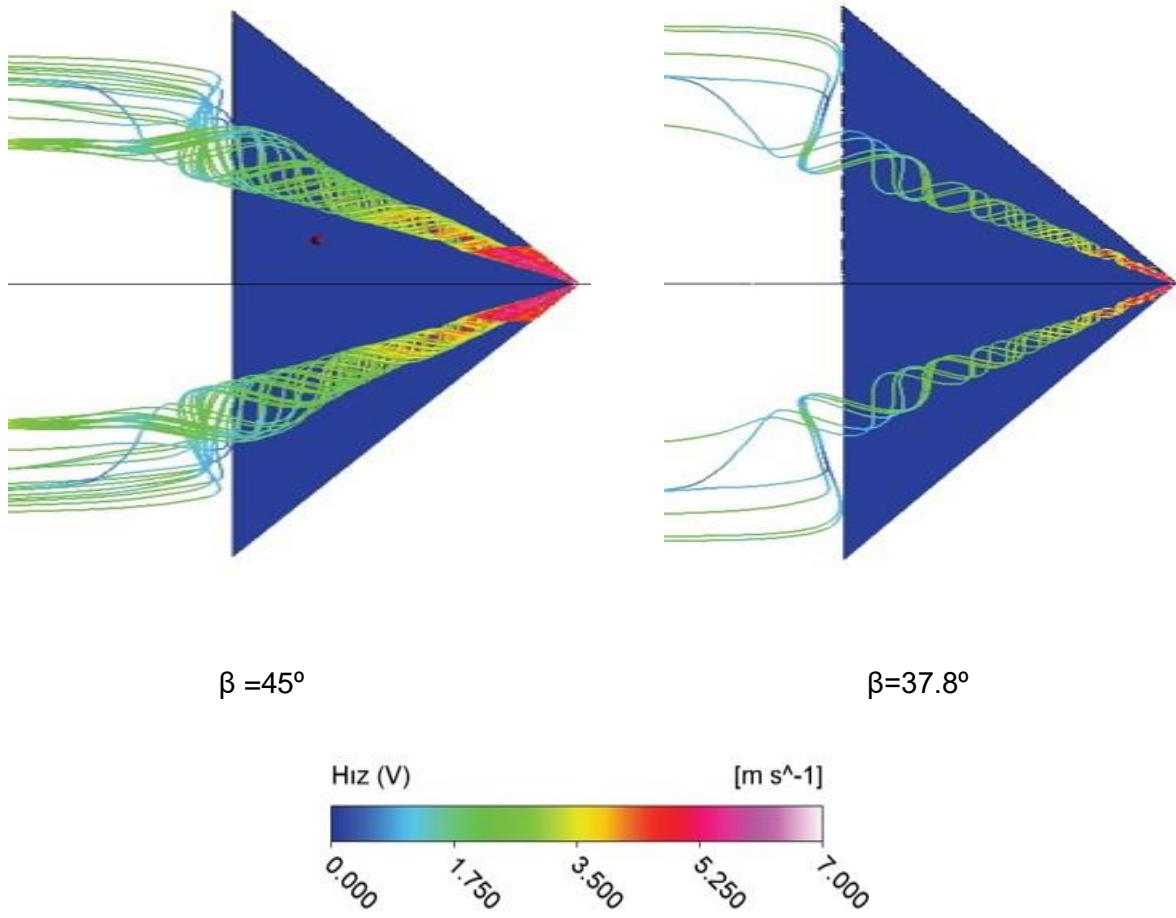
Şekil 8: $\alpha=8$ derecede, $\beta=45$ ve 37.8 derecede Eksenel Hız Dağılımları



Şekil 9: $\alpha=8$ derecede, $\beta=45$ ve 37.8 derecede Eksenel Girdap Dağılımları



Şekil 10: $\alpha=8$ derecede, $\beta=45$ ve 37.8 derecede Girdap Dağılımı



Şekil 11: $\alpha=8$ derecede, $\beta=45$ ve 37.8 derecede Kanat Akım Çizgileri

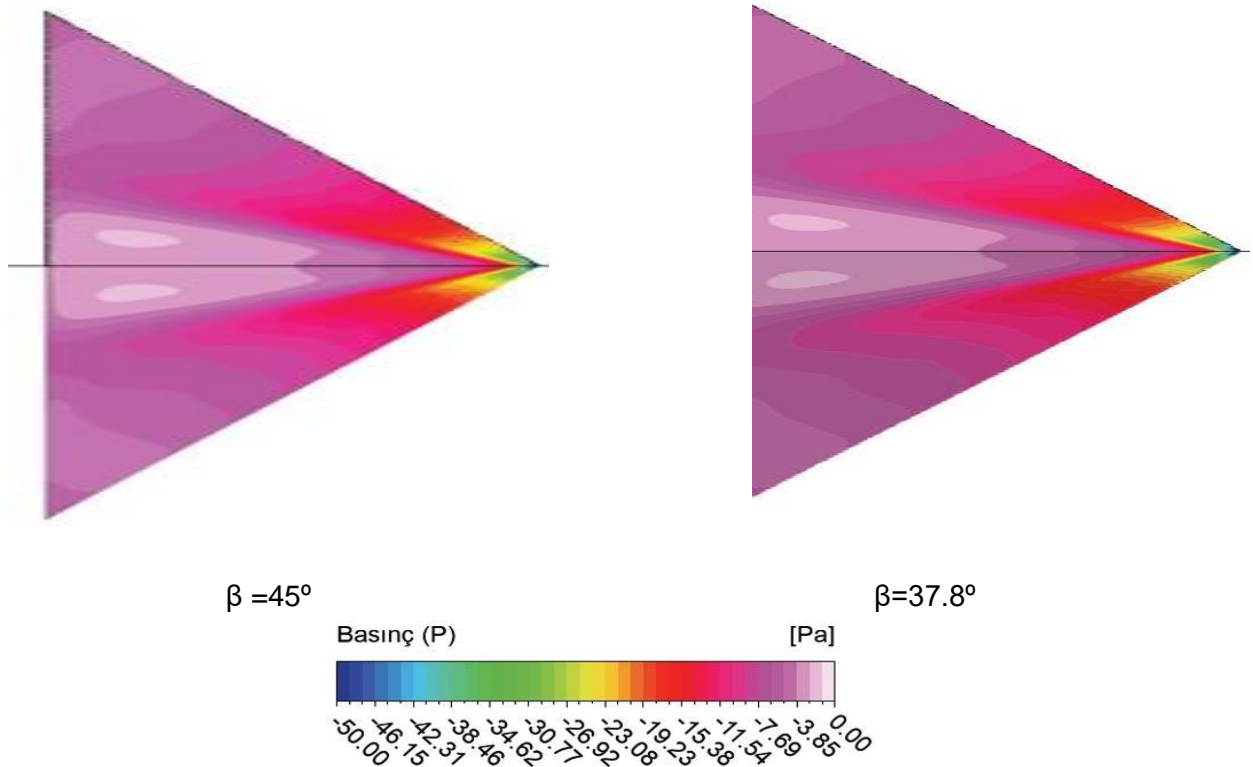
Şekil 7’de $\alpha=8$ derecede, $\beta=45$ ve 37.8 derecede basınç dağılımları gösterilmiştir. Her iki görselde de düşük basınç bölgeleri mor ve mavi renklerdir. Bu bölgeler genellikle yüksek hızın ve düşük basıncın olduğu yerlerdir. Düşük basınç alanları, akışın hızlandığı alanlardır. $\beta=37.8^\circ$ ’de akışın daha dar ve yoğun bir şekilde düşük basınç alanları oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu, daha kontrollü bir akış yapısını gösterir. $\beta=45^\circ$ ’de, akışın daha geniş bir alana yayıldığı ve düşük basınç bölgelerinin daha geniş bir alana yayıldığı belirlenmiştir.

Şekil 8’de $\alpha=8$ derecede, $\beta=45$ ve 37.8 derecede aksel hız dağılımları gösterilmiştir. Yüksek hız bölgeleri (sarı ve kırmızı renkler), düşük hız bölgesi (mavi ve yeşil renkler) olarak gösterilmiştir. Her iki kanatta akışın kanatın arka tarafında hızlandığı ve ardından genişlediği görülmektedir. $\beta=45$ derecede delta kanadın düşük hız bölgeleri daha geniş bir alana yayılmış olduğu görmek mümkündür. Bu da akışın ayrılma noktaları daha erken oluşmuş olabileceğini göstermektedir. $\beta=37.8$ derecede daha dar bir pah açısı, daha kontrollü ve dar bir akış yapısını sağlarken, $\beta=45$ derecede daha geniş bir pah açısı, daha yaygın bir akış yapısını ortaya çıkarmıştır.

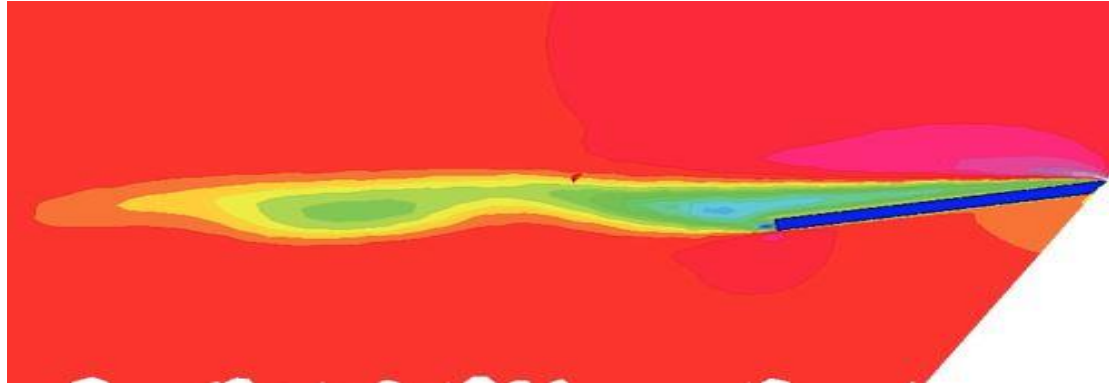
Şekil 9’da $\alpha=8$ derecede, $\beta=45$ ve 37.8 derecede aksel girdap bileşenlerine bakıldığında her iki görselde de girdaplı yapının henüz bozunuma uğramadığı ortaya çıkmaktadır. $\beta=45$ derecede girdap yapısı incelendiğinde, kanat etrafında oluşan girdapların daha büyük ve belirgin olduğu görülmektedir. Büyük girdap yapıları genellikle daha yüksek kaldırma kuvveti üretir ancak aynı zamanda daha fazla sürüklenme kuvvetine de neden olabilir. Ancak $\beta=37.8$ derecede girdap yapısı (incelendiğinde, kanat etrafında oluşan girdapların daha küçük ve daha az belirgin olduğu görülmektedir. Bu durumda, akışın daha dar bir alanda kalması ve girdapların küçük olması, aerodinamik sürüklemeyi azaltabilir ve verimliliği artırabilir.

Aynı durumda Şekil 10’da girdap dağılımı incelendiğinde, $\beta=45$ derecede yüksek girdap bölgelerinin (daha yoğun girdapların) kanat etrafında ve arkasında daha belirgin olduğu görülüyor. Bu durum, pah açısının akış üzerinde girdap dağılımlarının etkisini göstermektedir.

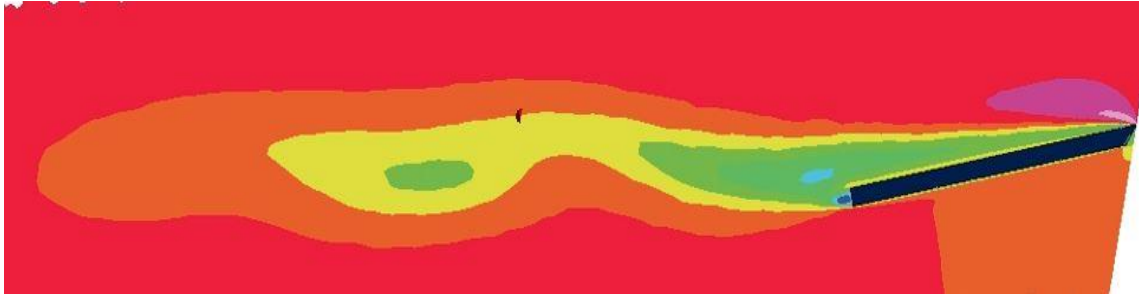
Şekil 11’de kanat üst yüzeyinde akım çizgileri $\alpha=8$ derecede, $\beta=45$ ve 37.8 derecede akım çizgileri ve teğetsel hız vektörleri verilmiştir. Şekil 11’e bakıldığında girdap çekirdeğinde girdap yapılarının bozunumuna uğramadığı $\beta=45$ derecede girdap yapılarının, $\beta=37.8$ dereceye göre girdap yapılarının biraz daha geniş olduğu gözlemlenmiştir. Ancak girdap çekirdeğinin konumunda bir değişiklik olmadığı belirlenmiştir.



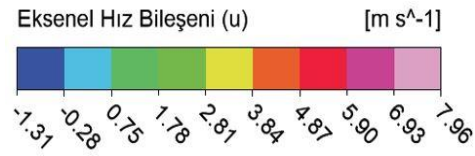
Şekil 12: $\alpha=10$ derecede, $\beta=45$ ve 37.8 derecede Basınç Dağılımları



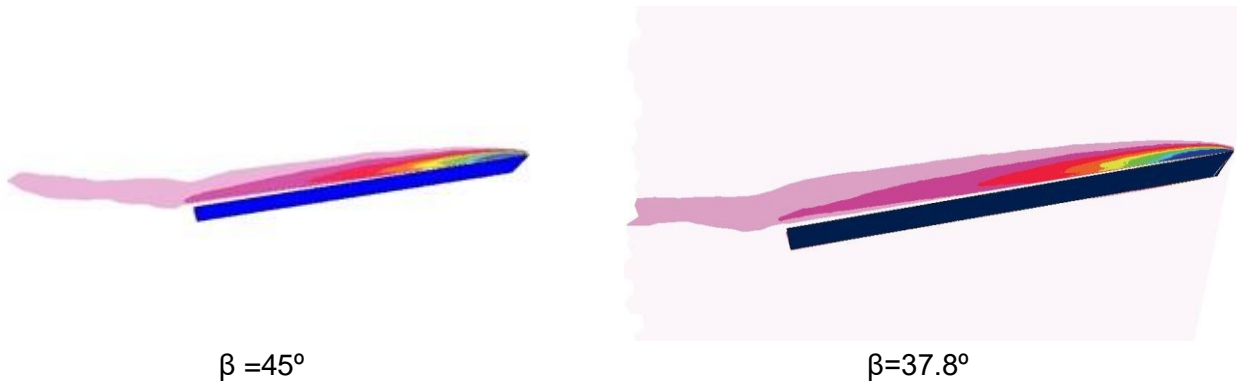
$\beta=45^\circ$



$\beta=37.8^\circ$

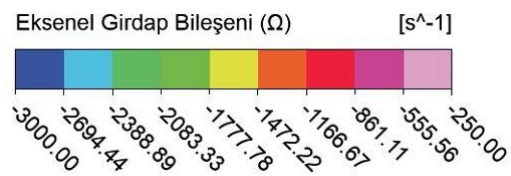


Şekil 13: $\alpha=10$ derecede, $\beta=45$ ve 37.8 derecede Eksenel Hız Dağılımları

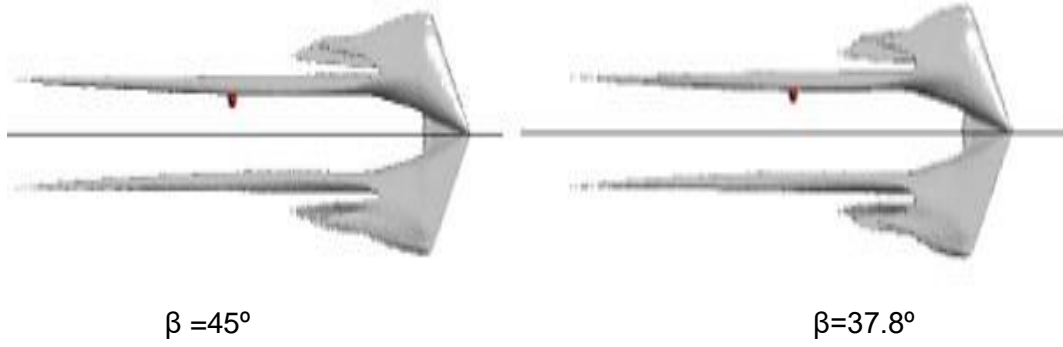


$\beta =45^\circ$

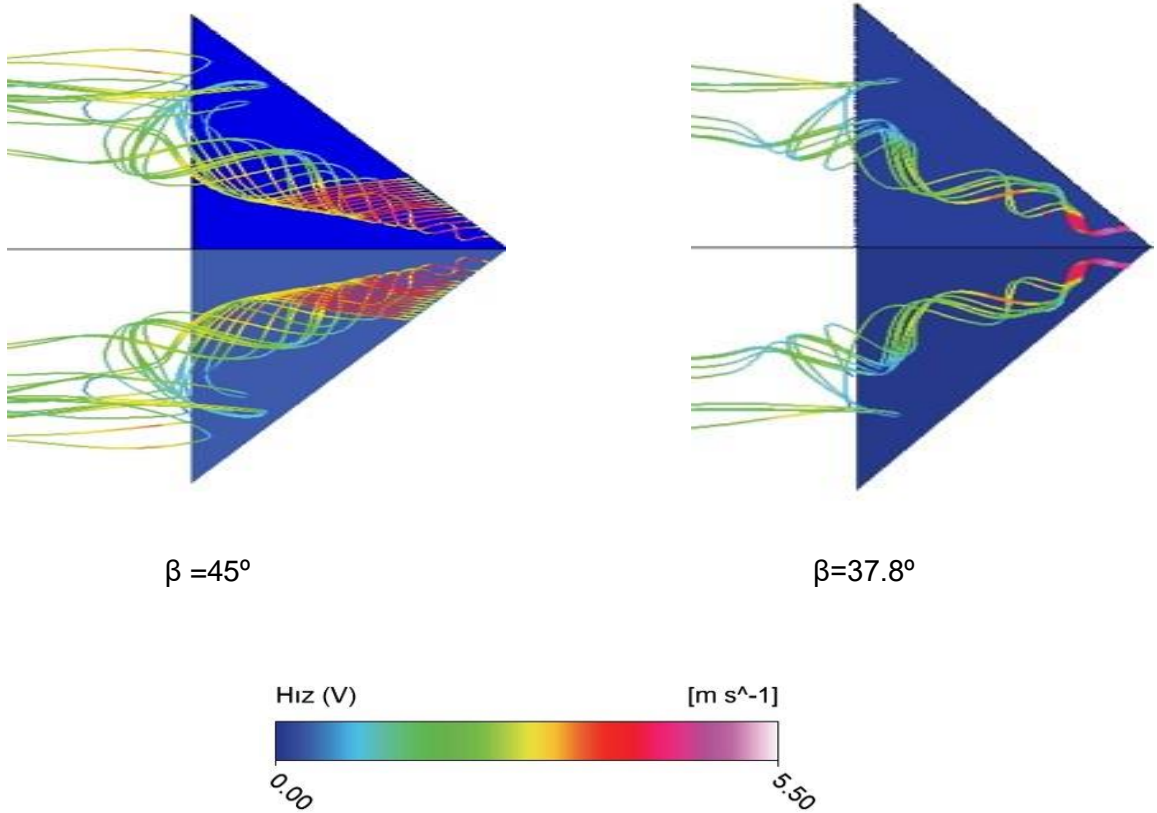
$\beta=37.8^\circ$



Şekil 14: $\alpha=10$ derecede, $\beta=45$ ve 37.8 derecede Eksenel Girdap Bileşenleri



Şekil 15: $\alpha=10$ derecede, $\beta=45$ ve 37.8 derecede Girdap Dağılımı



Şekil 16: $\alpha=10$ derecede, $\beta=45$ ve 37.8 derecede Kanat Akım Çizgileri

Şekil 12'de $\alpha=10$ derecede, $\beta=45$ ve 37.8 derecede basınç dağılımları gösterilmiştir. Pah açısındaki değişiklik $\beta=45$ derecede daha dar bir alanda yoğunlaşan düşük basınç alanları, $\beta=37.8$ derecede

daha geniş bir alana yayılan düşük basınç alanları gözlemlenmiştir. Bu durum daha dengeli kaldırma ve düşük sürüklenme kuvveti oluşturabilir.

Şekil 13'te $\alpha=10$ derecede, $\beta=45$ ve 37.8 derecede aksel hız dağılımları gösterilmiştir. $\beta=45$ derecede hız dağılımı daha geniş bir alanda etkili ve daha fazla hız varyasyonu mevcut olduğunu, akışın daha düzensiz olduğunu göstermektedir. Pah açısının düşürülmesiyle hız dağılımı daha dar bir alanda yoğunlaşmış ve hız varyasyonu daha azdır.

Şekil 14 ve 15'de $\alpha=10$ derecede, $\beta=45$ ve 37.8 derecede aksel girdap bileşenleri ve girdap dağılımı gösterilmiştir. Şekil 16'da aksel girdap bileşenlerine bakıldığında girdaplı yapının henüz bozunuma uğramamış olduğu ortaya çıkmaktadır. $\beta=45$ derecede girdap dağılımı, geniş bir alanı kaplıyor ve girdap çekirdekleri daha büyüktür. $\beta=37.8$ derecede girdap dağılımı, $\beta=45$ dereceye göre daha dar bir alanı kaplıyor ve girdap çekirdekleri daha küçük olduğu belirlenmiştir. Bu durum aerodinamik verimliliği arttırabilir ve daha az enerji kaybına sebep olabilir.

Şekil 16'da $\alpha=10$ derecede, $\beta=45$ ve 37.8 derecede akım çizgileri verilmiştir. $\beta=45$ derecede, $\beta=37.8$ dereceye göre girdap çekirdeğindeki girdap yapısı daha belirgin ve geniş alana yayılmıştır. $\beta=45$ derecede hız dağılımı 6.936 m/s'ye kadar çıkarken, $\beta=37.8$ derecede bu değer 6.386 m/s'dir. Pah açısının $\beta=45^\circ$ olduğu durumda, akış yapısı daha yoğun girdaplar ve yüksek hız bölgeleri ile düzensiz akışı daha belirgin şekilde göstermektedir. Buna karşılık, $\beta=37.8^\circ$ olduğu durumda akış yapısı da girdap ve düzensiz akışı gösterse de, $\beta=45^\circ$ 'e göre daha az yoğun ve daha düşük hız aralığında gerçekleşmektedir.

$\beta=45^\circ$ daha yoğun ve yüksek hızlı girdap yapısı, aerodinamik performansı olumsuz etkileyebilecek yüksek sürüklenme kuvveti oluşturabilir. $\beta=37.8$ derecede daha düşük hızlı ve daha az yoğun girdap yapısı ise aerodinamik performansı iyileştirebilir

SONUÇ

35 derecelik süpürme açısı, $t/C = 0.0475$, hücum açıları $\alpha = 8$ ve 10 derece ve $Re = 3.5 \times 10^4$ koşulları altında delta kanat için HAD analizi bulgularının, Gülsağan'ın 2017 yaptığı deneysel çalışmayla tutarlı olduğuna karar verilmiştir. Kanadın pah açısı $\beta = 37.8^\circ$ olarak tasarlandı ve $x/C = 0.44$ 'te kanat açıklığı boyunca basınç katsayısı değişiminin izlenmesi yapılmıştır. Akışın yüzeye yeniden bağlandığı alanlar ve girdap merkezleri konumunda bir değişiklik olmadığı ancak hücum açısı arttıkça basınç katsayısı kanat açıklığı boyunca düştüğü belirlenmiştir. Hücum açısı arttıkça, pah açısının değişikliklerinin girdap kuvvetini kaybedebileceği belirlenmiştir. HAD analizi sonuçlarında pah açısının $\beta = 45^\circ$ 'den $\beta = 37.8^\circ$ 'ye düşürülmesiyle dar bir alanda yoğunlaşan düzenli ve kontrollü bir akış yapısının, oluştuğu gözlemlenmiştir. Ancak farklı pah açıları, hücum açıları ve kanat geometrisinin değişmesiyle farklılıklar gösterebilir. Bu çalışma, ileride yapılacak olan pah açısının delta kanat üzerindeki etkisi ve HAD çalışmaları için referans niteliğinde olabilir.

Kaynaklar

- Akar, M. A., & Küçük, M. (2014). Silindir arkasındaki daimi olmayan akış yapısının pasif yöntemle kontrolü. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20(4), 123-128.
- Ashley, H. (1992). *Engineering analysis of flight vehicles*. Courier Corporation.
- Bertin, J. J., & Cummings, R. M. (2009). *Aerodynamics for Engineers*. Pearson Education.
- Cesur, İ.D., Yavuz, M.M. ve Albayrak, K., 2018. VII. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, 12-14 Eylül.
- Greenwell, D. I. (2002). "Vortex Breakdown and Its Control." *Progress in Aerospace Sciences*, 38(3), 181-208.
- Gursul I., Gordinier R., and Visbal M. (2005). "Unsteady Aerodynamics of Nonslender Delta Wings" *Progress in Aerospace Sciences Vol.41*, pp.515-557.
- Gülsağan, B., 2017. *Effect of Thickness-to-Chord Ratio on Flow Structure of a Low Swept Delta Wing*, METU Mechanical Engineering Thesis, s.32-49.

- Huang, L., Sun, Q., & Wang, J. (2020). "Drag Reduction with Riblet Surfaces in Turbulent Boundary Layers." *Experiments in Fluids*, 61(9), 217.
- Jiang, H., Wu, X., & Gao, Y. (2021). "Influence of Wing Fences on the Aerodynamic Performance of a Delta Wing." *Aerospace Science and Technology*, 112, 106641.
- Katz, J., & Plotkin, A. (2001). *Low-Speed Aerodynamics*. Cambridge University Press.
- Kim, J., Lee, H., & Park, Y. (2021). "Piezoelectric Actuators for Active Flow Control in Aerodynamic Applications." *Sensors and Actuators A: Physical*, 318, 112475.
- Li, J., Wang, F., & Zhang, Z. (2019). "Effect of Vortex Generators on the Performance of a Low-Speed Airfoil." *Journal of Fluids Engineering*, 141(10), 101108.
- Liu, J., Sun, H., Liu, Z., & Xiao, Z. (2014). Numerical investigation of unsteady vortex breakdown past 80/65 double-delta wing. *Chinese Journal of Aeronautics*, 27(3), 521-530.
- Lowson, M. V., Riley, A. J., 1995. *Vortex Breakdown Control by Delta-Wing Geometry*, *Journal of Aircraft* Cilt 32, No. 4, s.838-838.
- Lu, S. F., Wang, J. J., 2005. *Effects of Leading-Edge Bevel Angle on the Aerodynamic Forces of a Non-slender 50 Degree Delta Wing*, *Aeronaut. J.*, Cilt 109, No. 1098, s.403-407.
- Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598-1605.
- Saha, S., Majumdar, B., 2012. *Flow Visualization and CFD Simulation on 65° Delta Wing at Subsonic Condition*, *Procedia Engineering*, Cilt 38, s.3086-3096.
- Shams-UI-Islam, et al. (2018). Drag reduction on a square cylinder using multiple detached control cylinders. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(5), 2023-34.
- Singh, K. P., & Roy, S. (2019). "Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Active Flow Control." *Journal of Applied Physics*, 126(24), 243302.
- Spalart, P. R., Deck, S., Shur, M. L., Squires, K. D., Strelets, M. K., & Travin, A. (2006). A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities. *Theoretical and computational fluid dynamics*, 20, 181-195.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education.
- Yaniktepe, B., 2016. Düşük Süpürme Açısına Sahip Delta Kanat Modeli Üzerinde Oluşan Aerodinamik Karakteristiklerin İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım Ve Teknoloji* Cilt 4, No.4, s.247-258.
- Yaniktepe, B., Özalp, C., Canpolat, Ç., 2016. Aerodynamics and Flow Characteristics of X-45 Delta Wing Planform, *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 19, No.1 s.5-8.
- Yaniktepe, B., and Rockwell, D. (2004). "Flow Structure on a Delta Wing of Low Sweep Angle" *AIAA Journal*, Vol. 42, No. 3.
- Yaniktepe, B., and Rockwell, D. (2005). "Flow Structure on Diamond and Lambda Planforms: Trailing-Edge Region" *AIAA Journal*, Vol. 43, No. 7
- Zhang, Y., Li, X., & Liu, Y. (2020). "Active Flow Control Using Synthetic Jets on a Delta Wing." *Aerospace Science and Technology*, 104, 105949.