

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**YARIKLI BİR E387 KANAT PROFİLİNİN AERODİNAMİK
KARAKTERİSTİKLERİNİN SAYISAL İNCELENMESİ**

Seyfettin KALAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Erhan FIRAT

TUNCELİ – 2022

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YARIKLI BİR E387 KANAT PROFİLİNİN AERODİNAMİK
KARAKTERİSTİKLERİNİN SAYISAL İNCELENMESİ**

Seyfettin KALAY
(18110701104)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Erhan FIRAT

TUNCELİ– 2022

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YARIKLI BİR E387 KANAT PROFİLİNİN AERODİNAMİK
KARAKTERİSTİKLERİNİN SAYISAL İNCELENMESİ**

Seyfettin KALAY
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 09/06/2022 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

İmza

Prof. Dr. Hikmet ESEN
(Fırat Üniversitesi)

BAŞKAN

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Erhan FIRAT
(Munzur Üniversitesi)

DANIŞMAN

İmza

Doç. Dr. Yılmaz KISMET
(Munzur Üniversitesi)

ÜYE

Bu tez, Enstitümüz Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doç. Dr. Murat KORUNUR
Enstitü Müdürü

Bu çalışma, Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmemiştir.

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu”ndaki hükümlere tabidir.

31/05/2022

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

İmza
Seyfettin KALAY

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Erhan FIRAT

TEŞEKKÜR

Bu zorlu süreçte benden yardımlarını esirgemeyen çok değerli Danışmanım Erhan FIRAT’a çok teşekkür ederim. Her türlü konuda olduğu gibi bu süreçte de desteklerini benden hiç esirgemeyen, bana güç ve azim veren değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Seyfettin KALAY
TUNCELİ – 2022



İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	I
TEŞEKKÜR.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	IV
TABLOLAR LİSTESİ.....	VI
RESİMLER LİSTESİ.....	VII
SEMBOLLER LİSTESİ.....	VIII
KISALTMALAR LİSTESİ.....	IX
ÖZET.....	X
ABSTRACT.....	XI
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Kapsamı.....	1
1.2. Tezin Amacı.....	2
1.3. Literatür Taraması.....	3
1.4. Özgün Değer.....	9
2. MATERYAL VE METOT.....	11
2.1. Düz Kanat Modeli.....	11
2.2. Yarıklı Kanat Modeli.....	11
2.3. Hesaplama Bölgesi ve Sınır Şartları.....	12
2.4. Çalışmada Kullanılan Fiziksel Büyüklükler.....	15
2.5. Sayısal Çözücünün Ayarları	17
2.6. Doğrulama ve Geçerleme Çalışmaları.....	18
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	24
3.1. Daimi Akış İçin Benzetim Sonuçları.....	24
3.2. Daimi Olmayan Akış İçin Benzetim Sonuçları.....	29
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	35
KAYNAKLAR.....	38
ÖZGEÇMİŞ.....	40

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. NACA 4414 kanat profiline açılan yarığa ait geometrik parametreler (Chapman ve Manoharan, 2019).....	4
Şekil 1.2. NACA 634-021 kanat profili üzerinde yarık açılması sonucu oluşan 0,1c_0,4c kodlu kanat profilinin görünümü (Ni ve ark., 2019).....	5
Şekil 1.3. S809 kanat profili üzerinde açılan yarığa ait geometrik parametreler (Belamadi ve ark., 2016).....	5
Şekil 1.4. NACA 653-618 kanat profili içerisine açılan yarığın görünümü (Whitman ve ark., 2006).....	5
Şekil 1.5. Sentetik jetli NACA 23012C kanat profilinin sayısal modeli (Aziz ve Elsayed, 2019).....	6
Şekil 1.6. Gunasekaran ve Gerham (2018) tarafından test edilen çoklu dairesel yarığa (delik) sahip NACA 0012 kanatların genel görünümleri.....	7
Şekil 1.7. NACA 4412 kanat a) profilinin genel görünümü b) profili içerisine açılan iki kısımlı yarığa ait geometrik parametreler (Beyhaghi, 2017).....	8
Şekil 1.8. DU12W262 kanat profili içerisine açılan iki kısımlı yarığa ait geometrik parametreler (Beyhaghi, 2017).....	8
Şekil 2.1. E387 kanat profilinin (kırmızı renkli) genel görünümü (URL-1, 2022)	11
Şekil 2.2. Yarıklı E387 kanat profili hücum kenarının genel görünümü. Gri renkli kısım akışkan bulunan bölgeyi temsil etmektedir.....	12
Şekil 2.3. Hesaplama bölgesinin şematığı ve sınır şartları	13
Şekil 2.4. Hesaplama bölgesinin bloklara ayrılmış hali.....	14
Şekil 2.5. Üç-boyutlu düz kanat modeli etrafında yer alan üç-boyutlu yapılandırılmış ağların bazı yüzeyler üzerindeki iki-boyutlu izdüşümleri ve koordinat merkezinin konumu.....	19
Şekil 2.6. Farklı ağ sayıları için düz kanat modeli yüzeyindeki ortalama basınç katsayılarının boyutsuz veter uzunluğuyla (x/c) değişimleri	21
Şekil 2.7. Yarıklı kanada ait üç-boyutlu hesaplama bölgesinin yarık içerisinde ve dışarısında yer alan üç-boyutlu yapılandırılmış ağların yan yüzeyler üzerindeki iki-boyutlu izdüşümleri.....	22
Şekil 3.1. Daimi akış benzetmelerinde her iki kanat için zaman-ortalama ve standart sapma direnç katsayılarının hücum açılarına göre değişimleri.....	24
Şekil 3.2. Düz kanat için $\alpha=10^\circ$ (üstte) ve $\alpha=12^\circ$ 'lik hücum açıları için $z=0$ düzleminden elde edilen ortalama hız konturları Fırar kenarındaki çevri dökülmesi başlangıcı şekilden açıkça görülmektedir.....	25
Şekil 3.3. Daimi akış benzetmelerinde her iki kanat için zaman-ortalama ve standart sapma kaldırma katsayılarının hücum açılarına göre değişimleri.....	25
Şekil 3.4. Farklı hücum açıları için yarıklı kanat etrafındaki $\langle C_p \rangle$ dağılımları.....	26
Şekil 3.5. Yarıklı kanat için $\alpha=10^\circ$ (üstte) ve $\alpha=12^\circ$ 'lik hücum açıları için $z=0$ düzleminden elde edilen ortalama çevrinti konturları. Çıkış jeti tarafından momentum aktarılan hücum kenarı ayrılan kayma tabakaları oldukça geriye kadar uzanabilmektedir.....	26
Şekil 3.6. Daimi akış benzetmelerinde her iki kanat için zaman-ortalama ve standart sapma moment katsayılarının hücum açılarına göre değişimleri.....	27
Şekil 3.7. Daimi akış benzetmelerinde her iki kanat için $\alpha=12^\circ$ (üst iki satır) ve 14° 'lik (alt iki satır) hücum açılarında $z=0$ düzleminden elde edilen m/s cinsinden standart sapma hız konturları. Burada, düz ve yarıklı kanatlar arasındaki fark yarık geometrisinden seçilebilmektedir.....	28

Şekil 3.8. Daimi akış benzetimlerinden her iki kanat için elde edilen aerodinamik performansın, $\langle C_L \rangle / \langle C_D \rangle$, hücum açısına göre değişimleri.....	29
Şekil 3.9. Düz kanat için daimi ve daimi olmayan akış benzetmelerinden elde edilen bazı aerodinamik katsayıların deneysel verilerle kıyaslanması.....	29
Şekil 3.10. Düz kanat için $\alpha=18^\circ$ (üstte) ile 20° 'deki daimi olmayan akış benzetimlerinde elde edilen z-çevrintiye ait keyfi izo-yüzeyler.....	30
Şekil 3.11. Daimi olmayan akış benzetmelerinde her iki kanat için zaman-ortalamalı ve standart sapma direnç katsayılarının hücum açılarına göre değişimleri.....	31
Şekil 3.12. Daimi olmayan akış benzetmelerinde her iki kanat için zaman-ortalamalı ve standart kaldırma katsayılarının hücum açılarına göre değişimleri.....	31
Şekil 3.13. Daimi olmayan akış benzetmelerinde her iki kanat için zaman-ortalamalı ve standart sapma moment katsayılarının hücum açılarına göre değişimleri...	31
Şekil 3.14. Daimi olmayan akış benzetmelerinden $\alpha=16^\circ$ için $z=0$ düzleminden elde edilen anlık hız konturları.....	32
Şekil 3.15. Daimi olmayan akış benzetmelerinden $\alpha=16^\circ$ için $z=0$ düzleminden elde edilen m^2/s^2 cinsinden anlık türbülans kinetik enerji konturları.....	32
Şekil 3.16. Daimi olmayan akış benzetmelerinden $\alpha=16^\circ$ için $z=0$ düzleminden elde edilen anlık z-çevrinti konturları.....	33
Şekil 3.17. Aynı hücum açısında her iki kanat üst yüzeyindeki $\langle C_p \rangle$ dağılımları.....	33
Şekil 3.18. Daimi olmayan akış benzetimlerinden her iki kanat için elde edilen aerodinamik performansın, $\langle C_L \rangle / \langle C_D \rangle$, hücum açısına göre değişimleri.....	34

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. Sayısal çalışmada kullanılan parametreler ve değerleri.....	15
Tablo 2.2. Düz kanat için $\alpha=0^\circ$ durumunda farklı ağ sayıları için elde edilen daimi çözüm sonuçları.....	20
Tablo 2.3. Düz kanat için $\alpha=10^\circ$ durumunda farklı ağ sayıları için elde edilen daimi çözüm sonuçları.....	20
Tablo 2.4. Düz kanat için $\alpha=20^\circ$ durumunda farklı ağ sayıları için elde edilen daimi olmayan çözüm sonuçları.....	20
Tablo 2.5. E387 kanat profili üzerinden daimi şartlarda $Re_c=200000$ için elde edilen sayısal verilerle deneysel verilerin farklı hücum açılarında kıyaslanması	22
Tablo 2.6. E387 kanat profili üzerinden daimi olmayan şartlarda $Re_c=200000$ için elde edilen sayısal verilerle deneysel verilerin farklı hücum açılarında kıyaslanması.....	23

RESİMLER LİSTESİ

- Resim 1.1.** Düşük direnç kuvvetine sahip yarım su damlası şekline benzetilen araba üst kısmının yandan görünümü (URL-1, 2021).....1
- Resim 1.2.** Araca etkiyen direnç kuvvetini düşürmeye yarayan arka üst spoyler (URL-2, 2014).....2



SEMBOLLER LİSTESİ

a	: Hücüm kenarı ile çıkış yarığı arasındaki yatay mesafe
b	: Hücüm kenarı ile giriş yarığı arası yatay mesafe
c	: Veter
C_D	: Direnç katsayısı
C_{D-SS}	: Standart sapma direnç katsayısı
C_L	: Kaldırma katsayısı
C_{L-SS}	: Standart sapma kaldırma katsayısı
C_{Mz}	: Yunuslama momenti katsayısı
C_{Mz-SS}	: Standart sapma yunuslama momenti katsayısı
C_P	: Basınç katsayısı
Re_c	: Reynolds sayısı
U_∞	: Serbest-akım hızı
u	: Hızın akış doğrultusundaki bileşeni
u'	: Hızın akış doğrultusundaki bileşeninin çalkantısı
v	: Hızın akışa dik doğrultudaki bileşeni
v'	: Hızın akışa dik doğrultudaki bileşeninin çalkantısı
y⁺	: İlk ağın duvardan olan boyutsuz yüksekliği
w	: Hızın z-ekseni doğrultusundaki bileşeni
w'	: Hızın z-ekseni doğrultusundaki bileşeninin çalkantısı
x	: Serbest akım yönündeki eksen
y	: Serbest akıma dik yöndeki eksen
z	: Kanat genişliği yönündeki eksen
α	: Hücüm açısı
ΔP	: Serbest akım statik basıncından olan fark
Δt	: Zaman adımı
ε_p	: Yüzde sapma faktörü
ζ	: Çevrinti
μ	: Havanın dinamik viskozitesi
ρ	: Havanın yoğunluğu
φ	: Herhangi bir fiziksel büyüklük

KISALTMALAR LİSTESİ

CFD	: Computational Fluid Dynamics
CFL	: Courant-Friedrichs-Lewy sayısı
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
İHA	: İnsansız Hava Aracı
mİHA	: Mini İnsansız Hava Aracı
NACA	: National Advisory Committee for Aeronautics
SIMPLEC	: Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
SS	: Standart Sapma
SUV	: Sport Utility Vehicle
SST	: Shear Stress Transport
TKE	: Türbülans Kinetik Enerji
2-D	: İki-Boyutlu
3-D	: Üç-Boyutlu

ÖZET

Çalışmada, yarıklı ve yarıksız (düz) E387 kanat profili etrafındaki üç-boyutlu akış sayısal olarak çalışılmıştır. Bu amaçla, tiraci bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) paket programının, Ansys Fluent (Ansys 2021 R1 Academic), öğrenci sürümü kullanılmıştır. Hem daimi hem daimi olmayan benzetimler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı, bir pasif akış kontrol yöntemi (yarık) kullanmanın bir düşük Reynolds sayılı kanat profilinin aerodinamik karakteristikleri (direnç katsayısı, kaldırma katsayısı, yunuslama momenti) üzerindeki etkilerini ortaya çıkarmaktır. Sayısal çalışma, vetere (c) dayalı Reynolds sayısının 200000 değerinde gerçekleştirilmiştir.

Tasarlanan yalnızca bir yarık geometrisi kullanılmıştır. Bu, Munzur Üniversitesi'ndeki hesaplama kaynaklarının ve gerekli yazılımın yoksunluğundan kaynaklanmaktadır. Çıkış yarığı ile hücum kenarı arasındaki boyutsuz mesafe $a/c=0,005$, giriş yarığı ile hücum kenarı arasındaki boyutsuz mesafe $b/c=0,014$, giriş yarığının veter çizgisine göre açısı 15° , çıkış yarığının veter çizgisine göre açısı 90° ve giriş yarığı genişliğinin çıkış yarığı genişliğine oranı 1,56'dır.

Düz kanat profiline kıyasla, mevcut yarıklı kanat yalnızca $\alpha=16^\circ$ hücum açısında zaman-ortalama kaldırma katsayısını, $\langle C_L \rangle$, arttırmada kabiliyetlidir. Çıkış yarığında oluşturulan jet üst yüzeyde gelişen sınır tabaka ile etkileşime girmiştir. Bu da üst yüzeyden ayrılan kayma tabakalarının yeniden yarıklı kanat yüzeyine tutunmasına sebep olmuştur. Bu, kanat üst yüzeyindeki basınçta azalmaya ve $\langle C_L \rangle$ artışa sebep olmuştur. Genel olarak, mevcut tasarımı yarığa sahip kanat profili düz kanat profiline kıyasla kanat aerodinamik performansını, $\langle C_L \rangle / \langle C_D \rangle$, arttırmada daha az etkilidir.

Anahtar kelimeler: Pasif akış kontrolü, yarık, aerodinamik performans, E387 kanat profili, HAD

ABSTRACT

Numerical Investigation of Aerodynamic Characteristics of a Slotted E387 Airfoil

In the study, the three-dimensional flow past E387 airfoil with and without slot (plain) was studied numerically. To this end, student version of a commercial computational fluid dynamics (CFD) package program, Ansys Fluent (Ansys 2021 R1 Academic), was used. Both steady and unsteady simulations were performed. The aim of the study is to reveal the effect of using a passive flow control method (i.e. slot) on the aerodynamic characteristics (drag coefficient, lift coefficient, pitching moment) of a low Reynolds number airfoil. The numerical study was performed at a Reynolds number of 200000 based on the chord of the airfoil.

Only one slot geometry designed was used. This results from a deficiency of computational sources and required software at Munzur University. The nondimensional distance between leading edge and the exit slot is $a/c=0,005$, the nondimensional distance between leading edge and the inlet slot is $b/c=0,014$, the angle of the inlet slot relative to the chordline is 15° , the angle of the outlet slot relative to the chordline is 90° , and the ratio of inlet slot width to outlet slot width is 1,56.

Compared to the plain airfoil, airfoil with present slot is only capable of increasing time-averaged lift coefficient, $\langle C_L \rangle$, at angle of incidence of $\alpha=16^\circ$. The jet flow generated at the exit slot interacted with boundary layer developed on the upper surface. This caused that separated shear layers from the upper surface reattached to upper surface of the slotted airfoil. This results in a decrease in the static pressure on the upper surface and an increase in the $\langle C_L \rangle$. Overall, the airfoil with the current design slot is less effective in increasing the airfoil performance, $\langle C_L \rangle / \langle C_D \rangle$, compared to the plain airfoil.

Keywords: Passive flow control, slot, aerodynamic performance, E387 airfoil, CFD

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Kapsamı

Bu tez çalışması, temel olarak, geçmişten bugüne popüler bir kanat profili olan E387'nin aerodinamik performansını iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Aerodinamik performans, bu tez çalışması kapsamında, kanat profiline etkiyen kaldırma kuvvetinin direnç kuvvetine oranı olarak tanımlanmıştır. Bu amaca, bir pasif akış kontrol yöntemi olan yarık açma sayesinde ulaşılmaya çalışılmıştır. Yarık, kanat hücum kenarı civarında açılmıştır ve durma noktasının yaklaşık konumu ile emme yüzeyini bağlantılı hale getirmektedir. Bu sayede, basıncın daha yüksek olduğu durma noktası civarından basıncın daha düşük olduğu emme yüzeyine doğru bir akış oluşturulmuştur. Bu akıştan, emme yüzeyindeki yarıktan jet şeklinde çıkarak burada gelişen laminar sınır tabakayı, herhangi bir enerji kaynağına gereksinim duymadan, erkenden türbülanslı sınır tabakaya dönüştürmesi beklenmiştir. Bu dönüşümün, stol civarı ve stol sonrası hücum açılarında ayrılan kayma tabakalarını belirli bir hücum açısına kadar emme yüzeyine tekrar tutundurması arzu edilmiştir. Yapılması planlanan tüm bu süreç aerodinamik akış kontrolü konusunun kapsamına girmektedir.



Resim 1.1. Düşük direnç kuvvetine sahip yarım su damlası şekline benzetilen araba üst kısmının yandan görünümü (URL-1, 2021)

Günlük hayatta birçok akış sistemi ile karşılaşmaktayız. Bunların en başında bir akışkan ortam içerisinde sürekli olarak hareket halinde olan kara, deniz ve hava taşıtları gelmektedir. Bu taşıtlardan, bu akışkan içerisindeki hareketlerini olabildiğince düşük enerji

sarfiyatıyla gerçekleştirilmeleri beklenir. Bunu sağlamak adına mühendisler bu taşıtların dış tasarımlarında, çoğu gözle görülür değişikliklere imza atmışlardır. Mesela, arabalara, özellikle de spor olanlara, yandan bakıldığında üst kısımlarının bir uçak kanadı profilinde de gözlemlenen su damlası şeklinde tasarlandığı açıktır (Resim 1.1).Yine çoğu spor amaçlı taşıt (sport utility vehicle; SUV) arka üst kısmında yer alan spoyler buna örnektir (Resim 1.2). Buna benzer farklı parçalar veya tasarımlar da bulunmaktadır. Bu parçalar ve tasarımlar, genellikle, taşıt üzerinde yakıt tasarrufu sağlarlarken fazladan bir enerjiye ihtiyaç duymazlar. Bu tarz parçalar ve tasarımlar pasif akış kontrol yöntemlerine birer örnektirler. Bu tez kapsamında E387 kanat profili içerisine açılan yarık da bir pasif akış kontrol yöntemidir.



Resim 1.2. Araca etkiyen direnç kuvvetini düşürmeye yarayan arka üst spoyler (URL-2, 2014)

Sayısal yöntemlere, analitik veya analitik yaklaşık çözümleri bulunmayan ya da çok fazla zaman gerektiren mühendislik problemlerini çözmek için sıklıkla başvurulur. Örneğin, akışkan akışını yöneten kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde yoğun bir şekilde kullanılmaktadırlar. Bu tez kapsamında da, yarıklı ve yarıksız E387 kanat profili etrafındaki akışkan akışının benzetimi, çeşitli sayısal yöntemleri içerisinde barındıran ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) paket programı olan Ansys Fluent ile yapılmıştır.

1.2. Tezin Amacı

Tezin amacı, bir uçak kanadı profili olan E387'nin aerodinamik performansını bir pasif akış kontrol yöntemi olan yarık ile iyileştirmeye çalışmaktır. Yarık, belirli bir hücum açısı sonrasında oluşan, kanat üst yüzeyinden akış ayrılması şeklinde kendini gösteren ve

kanada etkiyen kaldırmada ani düşüş dirençte ise ani artış yaratarak kanat performansını olumsuz olarak etkileyen stol olayını daha sonraki bir hücum açısına kaydırabilmek maksadıyla tasarlanmıştır. Yarıktan, durma çizgisinin bulunduğu yaklaşık konumdaki akışı, hiçbir enerjiye gereksinim duymadan, kanat üst (emme) yüzeyindeki yarıktan dışarıya doğru taşınması ve üst sınır tabakayı türbülanslıya geçirmesi beklenmektedir. Yarık bir pasif akış kontrol yöntemidir ve kanat profili üzerinde bir kere açıldığında hep orada kalır. Bundan dolayı amaca ulaşmak için ilk parametremiz yarık geometrisi iken ikinci parametremiz de veter çizgisi ile uçuş hattı arasındaki açığı temsil eden hücum açısıdır (α). Çünkü stol açısı civarındaki hücum açılarında aerodinamik performansı iyileştirmesi beklenen yarığın diğer hücum açılarında ne tarz etki sergileyeceğinin bilinmesi de önem arz etmektedir. Tezin sağlıklı bir şekilde tamamlanması sonrasında Danışman tarafından öngörülen kazanılacak öğrenim çıktıları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

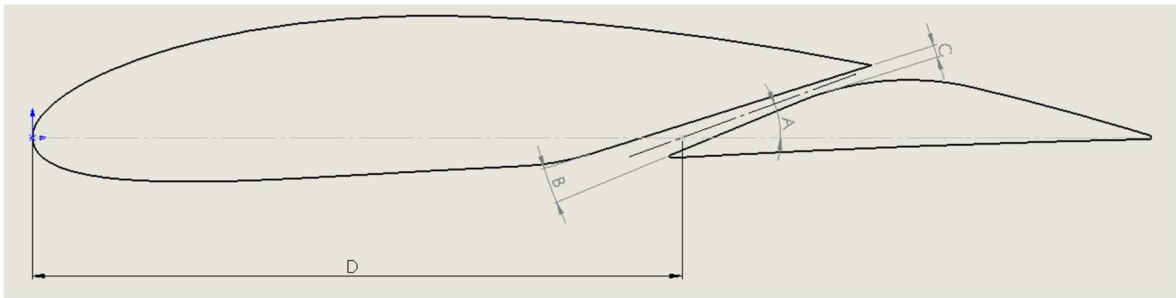
- Zaman-ortalama ve anlık aerodinamik kuvvetleri değiştirmek adına mühendislik uygulamalarında ne tarz akış kontrol tekniklerinin kullanıldığını kavramak.
- Lisansüstü derslerde öğretilen hesaplamalı akışkanlar dinamiği paket programını (ANSYS Fluent) parametrik çalışmalar için kullanabilmek.
- Sayısal akış benzetiminden elde edilen zamana bağlı sayısal verileri istatistiksel açıdan düzenlemek, birbirleriyle ve deneysel verilerle karşılaştırıp yorumlamak.

1.3. Literatür Taraması

Akış kontrolü, bir akış sistemi üzerinde herhangi bir parametre için değişiklik yaratabilmek adına ilgili sistem etrafından akan akışın yapısını değiştirmeye yönelik her türlü girişim olarak isimlendirilir. Akış kontrolü, kontrolü sağlayan elemanın enerjiye gereksinim duyup duymamasına göre sınıflandırılabilir. Akış kontrol elemanı enerjiye gereksinim duyuyorsa süreç aktif akış kontrolü olarak duymuyorsa süreç pasif akış kontrolü olarak isimlendirilir (Gad-El-Hak, 2000).

Aerodinamikte cisimler küt ve akım çizgili olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Küt cisimlerin akışkan bulunan bir ortam içerisinde belirli bir noktadan diğer belirli bir noktaya hareketleri akım çizgili cisimlerininkine göre her zaman daha fazla enerji gerektirir. Bunun sebebi geometrik şekillerinin daha yüksek direnç (sürüklenme) kuvveti oluşturmalarındandır. Akım çizgili cisimler ise, belirli bir hücum açısına kadar daha düşük direnç kuvvetine ve daha yüksek kaldırma kuvvetine sahiptirler. Pratikte, akım çizgili

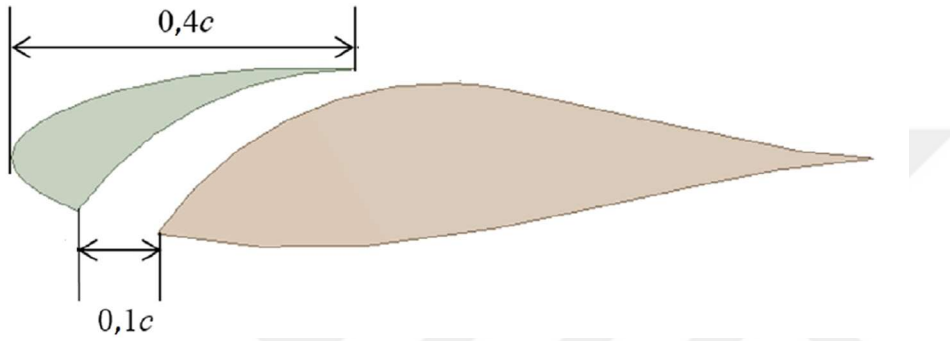
cisimlerin bu avantajlı yönleri hücum açısının belirli bir kritik değer üzerine çıkmasıyla birlikte avantajını yitirir. Diğer bir deyişle, kritik bir hücum açısı değerinden sonra akım çizgili cisim yüzeyinden akış ayrılmaları başladığı için akım çizgili cisim küt cisimmiş gibi davranmaya başlar. Mesela, uçakların ve insansız hava araçlarının kanatlarında bu tarz durumlarla karşılaşılır. Akım çizgili cisimlerin bu avantajlı durumlarını daha geniş bir hücum açısı aralığında sürdürebilmeleri, yani kritik hücum açısı değerine daha yukarıya taşıyabilmeleri için üzerlerine bir takım akış kontrol elemanları yerleştirilmiştir. Bu elemanlardan en bilindik olanı uçağın kalkışı ve inişi esnasında kanadın arka kısmından dışarıya doğru çıkan flaplardır. Her ne kadar flaplar ticari bir ürüne dönüşmüş olsa da belirli aerodinamik testler sonucunda ticarileşme potansiyeli bulunan farklı akış kontrol elemanları da bulunmaktadır. Kanat profili içerisine açılan yarıklar bunlardan bir tanesidir ve çeşitli araştırmacılar tarafından farklı parametreler için hala test edilmektedir. Mesela, Chapman ve Manoharan (2019) NACA 4414 kanat profiline etkiyen kaldırma kuvvetini daha da artırabilmek adına kanat içerisine belirli geometrik parametrelere dayalı olarak yarıklar yerleştirilmiştir (Şekil 1.1). Sayısal çalışmalarını iki-boyutlu (2-B) model üzerinden Spalart-Allmaras türbülans modelini kullanarak daimi şartlar altında ve vetere dayalı Reynolds sayısının (Re_c) 200000 değerinde gerçekleştirmişlerdir. Yarık parametrelerinden A, B, C ve D'nin değerlerinin sırasıyla 20, 5, 0,5 ve 58 olduğu yarıklı kanadın kaldırma katsayısının yarıksıza göre %27 artış gösterdiği ve stol açısının da yarıksızındakinden 2° daha ileriye kaydığı gösterilmiştir.



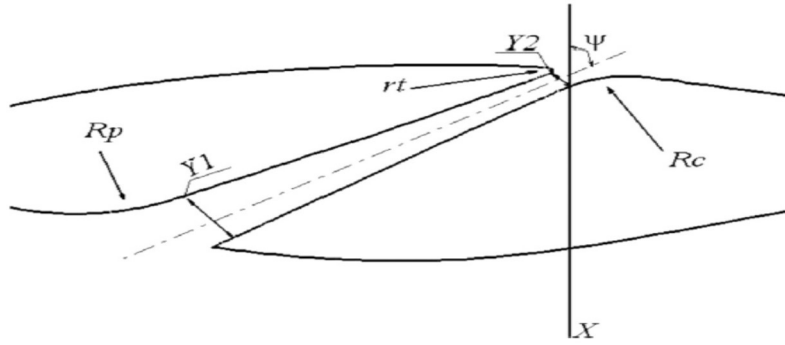
Şekil 1.1. NACA 4414 kanat profiline açılan yarığa ait geometrik parametreler (Chapman ve Manoharan, 2019)

Ni ve ark., (2019) ise NACA 634-021 kanat profili üzerine kendi özgün tasarımlarıyla açmış oldukları yarığın kanat aerodinamik karakteristikleri üzerindeki etkilerini $0-30^\circ$ hücum açısı aralığı ve $Re_c=100000$ için hem sayısal hem de deneysel olarak incelemişlerdir (Şekil 1.2). Sayısal çalışmalarını iki-boyutlu (2-B) model üzerinden

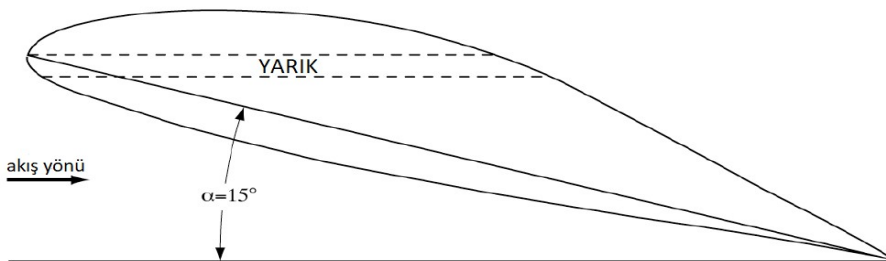
SST k- ω türbülans modelini kullanarak ve daimi şartlar altında gerçekleştirmişlerdir. Sayısal çalışmaların deneysel çalışmalarıyla iyi bir uyum içerisinde olduğunu göstermişlerdir. Tasarlamış oldukları 0,1c_0,4c kodlu kanat profilinin yarıksıza kıyasla maksimum kaldırma katsayısında %58 artış sağladığı ve maksimum kaldırma/direnç oranını %14 artırdığı belirtilmiştir. Araştırmacılar, 0-11° hücum açısı aralığında yarığın kaldırma/direnç oranı üzerinde yarıksıza kıyasla daha düşük performans sergilediğini de belirtmişlerdir.



Şekil 1.2. NACA 634-021 kanat profili üzerinde yarık açılması sonucu oluşan 0,1c_0,4c kodlu kanat profilinin görünümü (Ni ve ark., 2019)



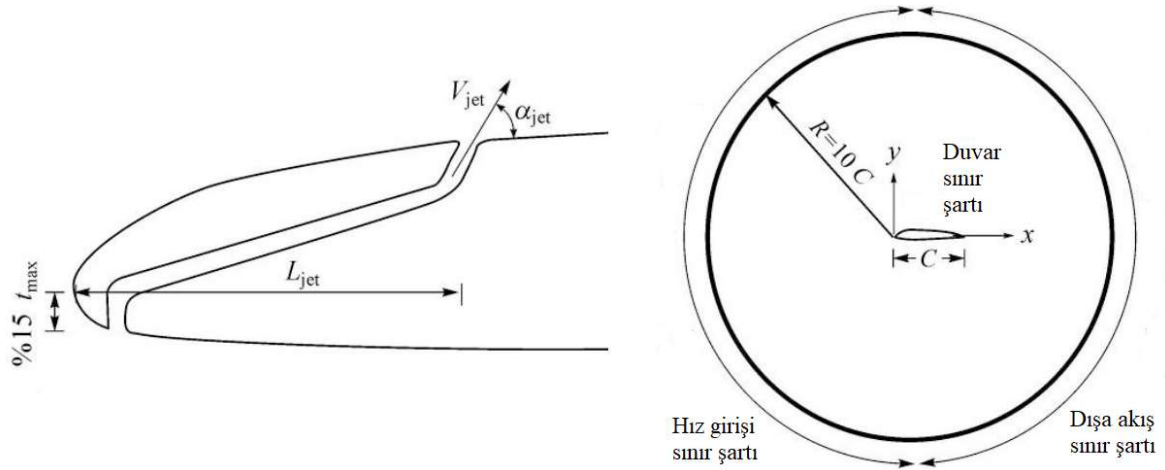
Şekil 1.3. S809 kanat profili üzerinde açılan yarığa ait geometrik parametreler (Belamadi ve ark., 2016)



Şekil 1.4. NACA 653-618 kanat profili içerisine açılan yarığın görünümü (Whitman ve ark., 2006)

Belamadi ve ark., (2016) rüzgar türbinlerinde kullanılan S809 kanat profilinin stol koşulları altında aerodinamik karakteristiklerini iyileştirmek adına konuma, genişliğe ve eğime dayalı olarak yarıklar tasarlamışlar ve en iyi performans gösteren yarıklı kanat profilini 2-B sayısal çalışmalar üzerinden araştırmışlardır (Şekil 1.3). Daimi şartlar altında gerçekleştirdikleri sayısal çalışmalarında $Re_c=1000000$ 'dur, hücum açısı aralığı $10-20^\circ$ 'dir ve kullandıkları türbülans modeli ise standart k- ϵ 'dir. Belirlenen en uygun yarıklı kanat konfigürasyonunun kaldırma/direnç oranında 8° hücum açısına kadar yarıksıza göre daha düşük performans sergilerken bu değerden 20° 'ye kadar çok daha iyi bir performans sergilediği gösterilmiştir.

Whitman ve ark., (2006) çeşitli yarık konfigürasyonlarının stol açısı ve aerodinamik performans üzerindeki etkilerini NACA 653-618 kanat profili üzerinde test etmişlerdir (Şekil 1.4). Deneysel olarak $Re_c=1000000$ 'da gerçekleştirdikleri çalışmalarında 0,25 ve 0,375 inçlik genişliğe sahip yarıklar $-2,5$ ila 30° hücum açısı aralığı için test edilmiştir. Çalışma sonuçlarında yarık genişliğinin kaldırma/direnç oranı üzerinden büyük etkisi olduğunu göstermişlerdir. Kanat üzerine boşluklu olarak açılan bu yarıkların $15-22,5^\circ$ hücum açısı aralığında direnç/kaldırma oranında neredeyse hiç etkinlik sağlayamadığı gösterilmiştir. En iyi kaldırma/direnç oranı ise 0,25 inçlik yarık tarafından $7,5^\circ$ 'lik hücum açısı civarında sağlanmıştır.

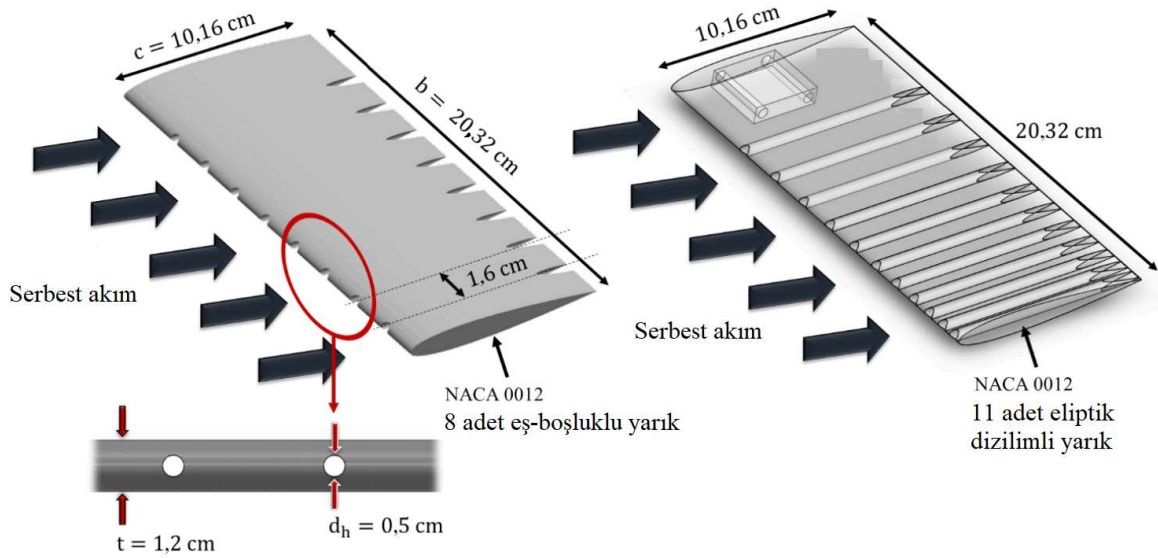


Şekil 1.5. Sentetik jetli NACA 23012C kanat profilinin sayısal modeli (Aziz ve Elsayed, 2019)

Aziz ve Elsayed (2019), NACA 23012C kanat profili aerodinamik karakteristiklerini iyileştirmek için durma noktası civarı ile üst yüzeyi arasında bir yarık açmışlar ve farklı parametreler için (jet konumu, jet açısı ve yarık genişliği) yarığın aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkilerini $Re_c=1000000$ için 2-B'de sayısal olarak

incelemişlerdir (Şekil 1.5). Sayısal çalışmalarında yedi farklı türbülans modelini de test etmişlerdir. Daimi olarak gerçekleştirdikleri sayısal çalışmalarını tek bir hücum açısı değerinde, 16° , gerçekleştirmişlerdir ve elde ettikleri değerler üzerinden optimizasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Optimizasyon çalışmaları sonucunda optimum yarık geometrisini jet konumunun $0,4424c$, jet genişliğinin $0,0183c$ ve jet açısının $27,9^\circ$ olduğu durum olarak tanımlamışlardır. Bu durumda, aerodinamik performansta (C_L/C_D), yarıksız kanat profiline göre %32 artış olduğunu belirtmişlerdir.

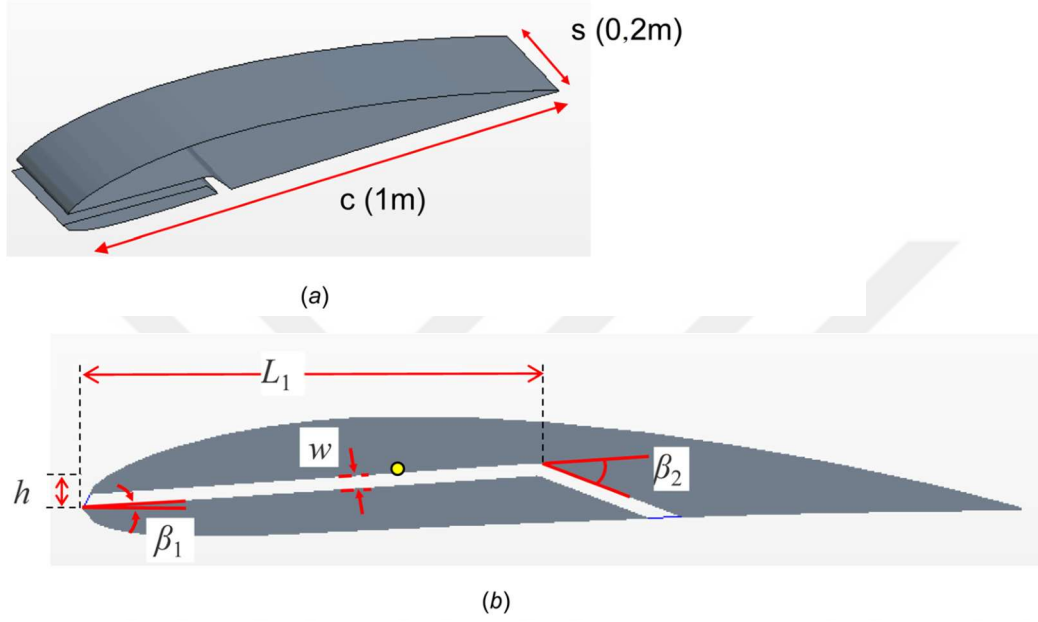
Gunasekaran ve Gerham (2018), NACA 0012 kanat profili içerisine açtıkları, hücum kenarı ile firar kenarını birleştiren çeşitli sayıdaki dairesel yarıkların parazit ve indüklenmiş direnç üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır (Şekil 1.6). Çalışmalarını, yarı-açık (semi-span) kanat üzerinde $Re_c=200000$ ve hücum açısının -15° ila 15° aralığı için gerçekleştirmişlerdir. Düz kanat, 8 adet eş-boşluklu dizilime sahip yarıklı kanat ve 11 adet eliptik dizilime sahip yarıklı kanadın kaldırma katsayılarının birbirine çok yakın olduğu, toplam direnç katsayısının ise %4 civarında düşürülebildiği belirtilmiştir.



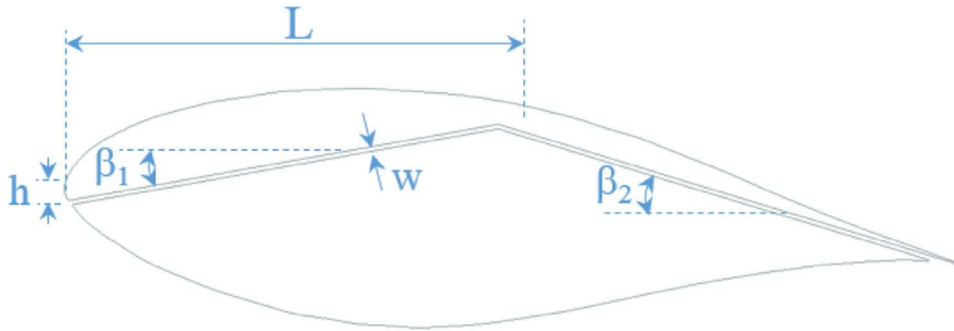
Şekil 1.6. Gunasekaran ve Gerham (2018) tarafından test edilen çoklu dairesel yarığa (delik) sahip NACA 0012 kanatların genel görünümü

Beyhaghi ve Amano (2017) NACA 4412 kanat profiline etkileyen kaldırmayı arttırmak ve direnci de düşürmek amacıyla kanat profili içerisine iki kısımlı yarık açmışlardır (Şekil 1.7). Bu yarığın geometrik parametreleri olan yarık genişliği, yarık uzunluğu, giriş açısı çıkış açısı gibi parametrelerin ana hedef doğrultusunda optimum değerlerini sayısal çalışma üzerinden test etmişlerdir. Çalışmalarında SST $k-\omega$ türbülans

modelini daimi olmayan şartlar altında kullanmışlardır. Üç-boyutlu olarak modelledikleri hesaplama bölgesinin genişliği veter uzunluğunun 0,2 katıdır. Tüm çalışmalarını $Re_c=1600000$ değerinde gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda, optimum şartlarda kaldırma katsayısının ortalama %8 arttırıldığını ve bunu dirençte ciddi bir artışa sebep olmadan elde ettiklerini belirtmişlerdir.



Şekil 1.7. NACA 4412 kanat a) profilinin genel görünümü b) profili içerisine açılan iki kısımlı yarığa ait geometrik parametreler (Beyhaghi, 2017)



Şekil 1.8. DU12W262 kanat profili içerisine açılan iki kısımlı yarığa ait geometrik parametreler (Beyhaghi, 2017)

Acarer (2020) ise Beyhaghi ve Amano'nunkine (2017) yakın bir tasarım yaparak maksimum C_L/C_D oranını arttırmaya çalışmıştır (Şekil 1.8). Sayısal çalışmalarında kanada ait aerodinamik karakteristikleri, daimi şartlar altında, 2-B hesaplama bölgesi üzerinden elde etmiştir. Sayısal çalışmadaki $Re_c=1000000$ 'dur ve tek denklemlili Spalart-Allmaras

türbülans modeli kullanılmıştır. Sayısal çalışma sonrasında optimizasyon çalışması da yapılmış ve maksimum C_L/C_D oranını en fazla arttıran yarık geometrisi belirlenmiştir. Yarıksız kanat için, maksimum C_L/C_D değeri hücum açısının 5° değerinde elde edilmiş ve değeri 28,31 olarak verilmiştir. Optimizasyon sonrası oluşturulan yarıklı kanadın aynı açıdaki C_L/C_D değeri ise 32,97'dir; yani, yarıksızınkinden %16,5 daha iyidir. Acarer (2020) daha sonra bu kanadı, güç katsayılarındaki değişimi incelemek için dikey ve yatay eksen rüzgar türbini benzetimlerinde kullanmıştır.

1.4. Özgün Değer

Yukarıdaki alt başlıkta, içerisinde yarık bulunan çeşitli kanat profillerinin bulunmayanlara kıyasla sergiledikleri aerodinamik iyileşmelerin veya kötüleşmelerin açıklayıcı bir özeti sunulmuştur. O literatür özetinde yer alan yarıkların ortak özelliği, yarık girişlerinin, basıncın kanat üzerindeki değerinin maksimum olduğu nokta olan durma noktası civarında bulunmasıdır. Bu sayede, daha düşük basınçlı bir yüzeyden açılan yarık çıkışına, herhangi bir enerjiye gereksinim duymadan, akışı hareket ettirebilme avantajları olmaktadır. Mevcut çalışmada da aynı prensip kullanılacaktır ve hem aerodinamik karakteristikler hem de kanat profili etrafındaki akış yapıları incelenecektir. Mevcut tez çalışmasının hayata geçmesine zemin hazırlayan temel sebepler ise aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Literatürdeki çalışmalarda yarık çıkışları, üst yüzeyde, firar kenarında veya alt yüzey üzerinde bulunacak şekilde tasarlanmışlardır. Mevcut tez çalışmasında ise üst yüzeyin (emme yüzeyi) hemen başında yani hücum kenarına yakın olacak şekilde tasarlanmıştır. Bunun altında yatan temel sebep ise, belirli bir hücum açısından sonra kanat üst yüzeyinden ayrılan kayma tabakalarını laminlerden türbülanslıya geçirmektir. Bu sayede, ayrılan kayma tabakalarını tekrar yüzeye tutunması sağlanacak ve stol açısı daha ileri bir noktaya taşınacaktır.
- Günümüzde, insansız hava araçlarına (İHA) olan ilgi oldukça artmıştır ve bunlar genellikle $Re_c < 500000$ değerlerinde uçmaktadırlar. Literatürdeki çalışmaların çoğu bu değerin üzerindedir. Bu çalışmada ise $Re_c = 200000$ olarak belirlenmiştir.
- Literatürde yapılmış olan sayısal çalışmaların çoğu iki-boyutlu hesaplama bölgeleri içermektedir. Üç-boyutlu etkiler hesaba katılmamıştır. Dahası, stol sonrasında daimi olmayan şartlar oluşmasına rağmen çalışmalar daimi şartlar altında

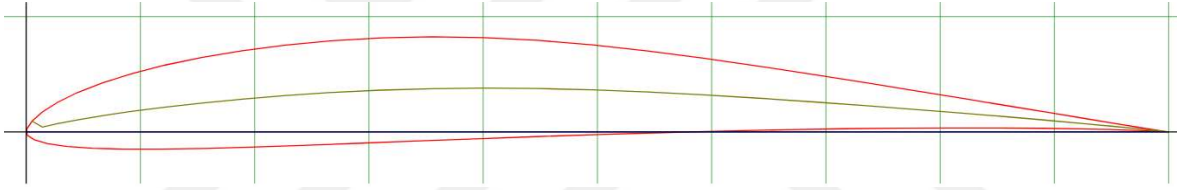
gerçekleştirilmiştir. Bu sayısal çalışmada ise hesaplama bölgesi 3-B olarak tasarlanmış ve hem daimi hem de daimi olmayan şartlar altında çalışmalar gerçekleştirilmiştir.



2. MATERYAL VE METOT

2.1. Düz Kanat Modeli

Sayısal çalışmada test edilmesi planlanan kanat modeli E387'dir. Bu kanat profili birçok kişi tarafından test edildiğinden yeterli deneysel veri literatürde mevcuttur. Bu da sayısal çalışmanın geçerleme (validation) basamağı için önemlidir. Kanat profilinin maksimum kalınlığı, c sembolü veter uzunluğunu temsil etmek üzere, $0,091c$ kadardır ve veterin %31,1'i kadar hücum kenarından geride konumlanmıştır. Kanat profilinin maksimum kamburluğu ise $0,032c$ kadardır ve veterin %44,8'i kadar hücum kenarından geride konumlanmıştır (URL-3, 2022). Kanat profilinin hücum açısız durumdaki görüntüsü aşağıda sunulmuştur (Şekil 2.1).

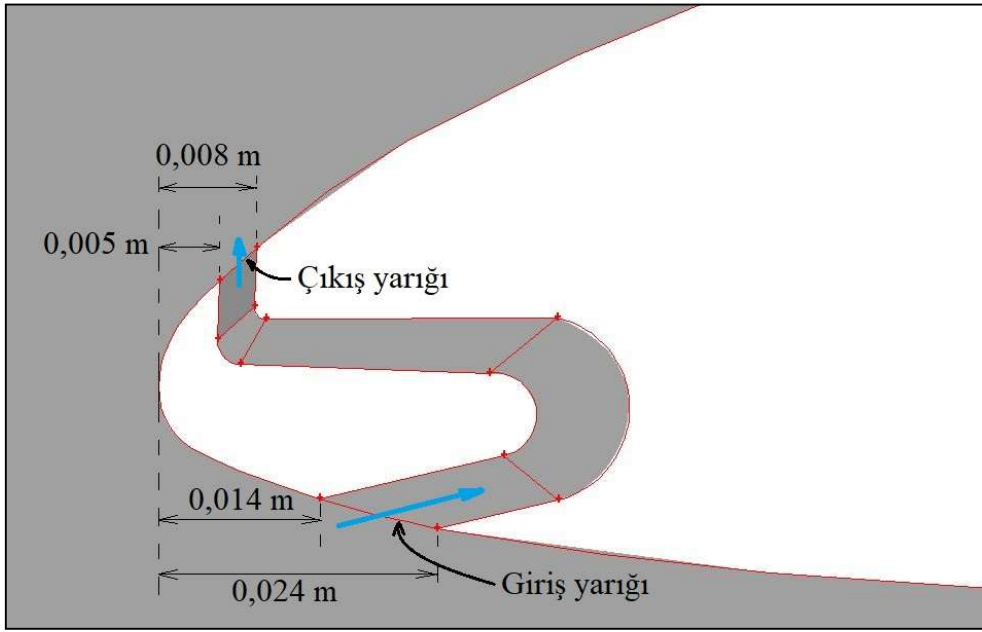


Şekil 2.1. E387 kanat profilinin (kırmızı renkli) genel görünümü

2.2. Yarıklı Kanat Modeli

Sayısal çalışmada kullanılmak üzere tasarlanan yarığın genel görünümü ve bazı boyutları aşağıda sunulmuştur (Şekil 2.2). Hücum açısının sıfır olduğu durumda, giriş yarığının serbest akım doğrultusundan olan açısı 15° olacak şekilde tasarlanmıştır. Kanat profilinin hücum açısı $\alpha=0^\circ$ 'den 15° 'ye doğru arttıkça bu açı da azalmaktadır. Hatta kanat profili vetere-dayalı Reynolds sayısının 200000 değerinde stola girdiğinde, $\alpha \cong 15^\circ$, serbest akım doğrultusu ile giriş yarığı eksenini arasındaki bu açı yaklaşık 0° 'ye düşmektedir. Bu sayede, yarığa giren akışkanın debisi maksimum seviyeye çıkarılabilmektedir ve çıkış yarığında kanat üst yüzeyindeki sınır tabakaya olan momentum transferi de artış sağlamaktadır. Hücum açısının sıfır olduğu durumda, çıkış yarığının serbest akım doğrultusundan olan açısı ise 90° olacak şekilde tasarlanmıştır. O da artan hücum açısıyla birlikte azalmaktadır.

Giriş yarığı genişliğinin çıkış yarığınıninkine oranı yaklaşık 1,56'dır. Giriş yarığının, alt yüzey üzerinde bulunan ağız kısmı, XFOIL programıyla 0-12°'lik hücum açısı aralığında elde edilen durma basıncı konumlarını içerisinde konumlandırarak şekilde tasarlanmıştır. Daha yüksek hücum açıları için programdan değer elde edilememiştir. Çıkış yarığının hiza olarak giriş yarığından daha fazla hücum kenarına yakın olması ise sınır tabakaya erkenden müdahale etmek içindir.

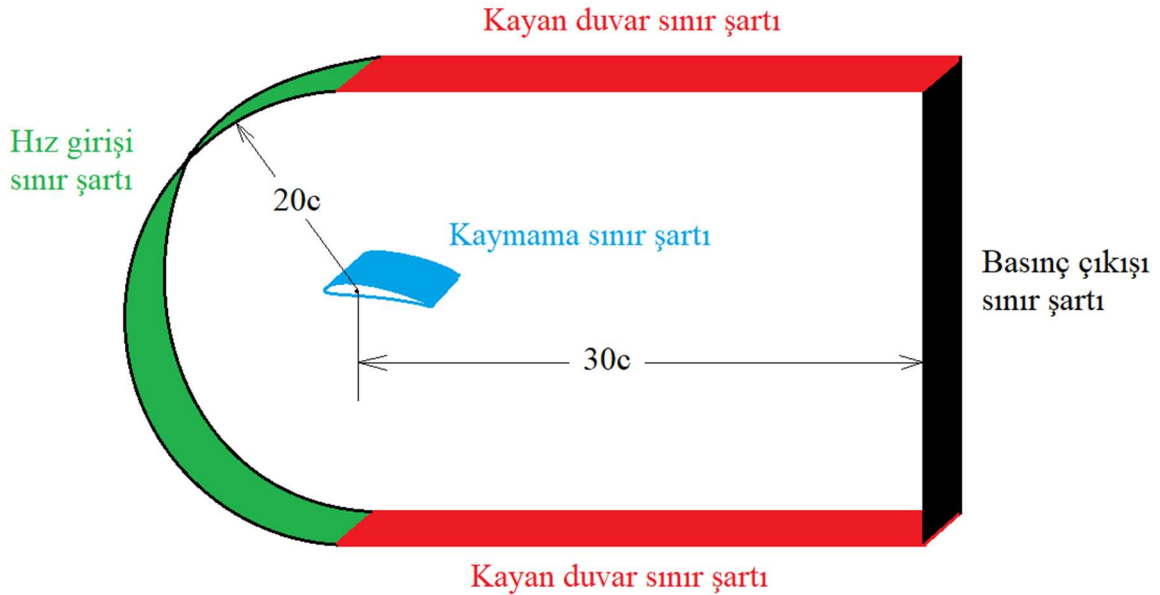


Şekil 2.2. Yarıklı E387 kanat profili hücum kenarının genel görünümü. Gri renkli kısım akışkan bulunan bölgeyi temsil etmektedir

2.3. Hesaplama Bölgesi ve Sınır Şartları

Hesaplama bölgesine ait uzunluklar ve sınır şartları Şekil 2.3 içerisinde sunulmuştur. Hesaplama bölgesinin yeşile boyanmış yüzeyine hız girişi sınır şartı atanmıştır. Bu sınır şartında belirtilmesi gereken, hızın akım yönü ve akıma dik bileşenlerinin değerleri, sırasıyla, $u=2,921$ m/s ve $v=0$ m/s'dir. Türbülans değerleri olarak türbülans şiddeti ve türbülans uzunluk ölçeği seçilmiş ve değerleri, sırasıyla, %0,1 ve 0,0091 ($\alpha \leq 14^\circ$ için) veya 0,091 ($\alpha > 14^\circ$ için) seçilmiştir. Akış türbülanslı olduğu için aralıklılık (intermittency) değeri 1 olarak verilmiştir. Hesaplama bölgesinin kırmızıya boyanmış alt ve üst yüzeylerine kayan duvar sınır şartı verilmiştir. Dahası, bu sınır yüzeyler ile kanadın yer aldığı koordinat merkezi arasında 20c'lik mesafeler bırakılmıştır. Bu iki durum, blokajın kanat aerodinamik karakteristikleri üzerindeki etkilerini minimuma

düşürmek için gerekmektedir. Hesaplama bölgesinin içerisindeki maviye boyanmış kanat dış yüzeyi ve boyutundan dolayı şekilde görülmeyen yarık yüzeylerine kaymama sınır şartı atanmıştır. Bu sebeple, bu yüzeylerdeki akışkanlar herhangi bir hız bileşenine sahip değildir ($u=v=w=0$ m/s). Hesaplama bölgesinin sağ ve sol kısmında yer alan ve akışkan bulunan tüm yüzeylere periyodik sınır şartı atanmıştır. Bu sınır şartı şekil üzerinde beyaz renkli olan kısmı temsil etmektedir. Son olarak, siyaha boyanmış kısma ise basınç çıkışı sınır şartı atanmıştır. Kanat profilinden ayrılan kayma tabakalarının dönüştüğü çevrilerin iyice sönmüldükten sonra bu sınır yüzeyine ulaşmaları için kanat profili ile bu sınır şartı arasında $30c$ 'lik bir mesafe bırakılmıştır.

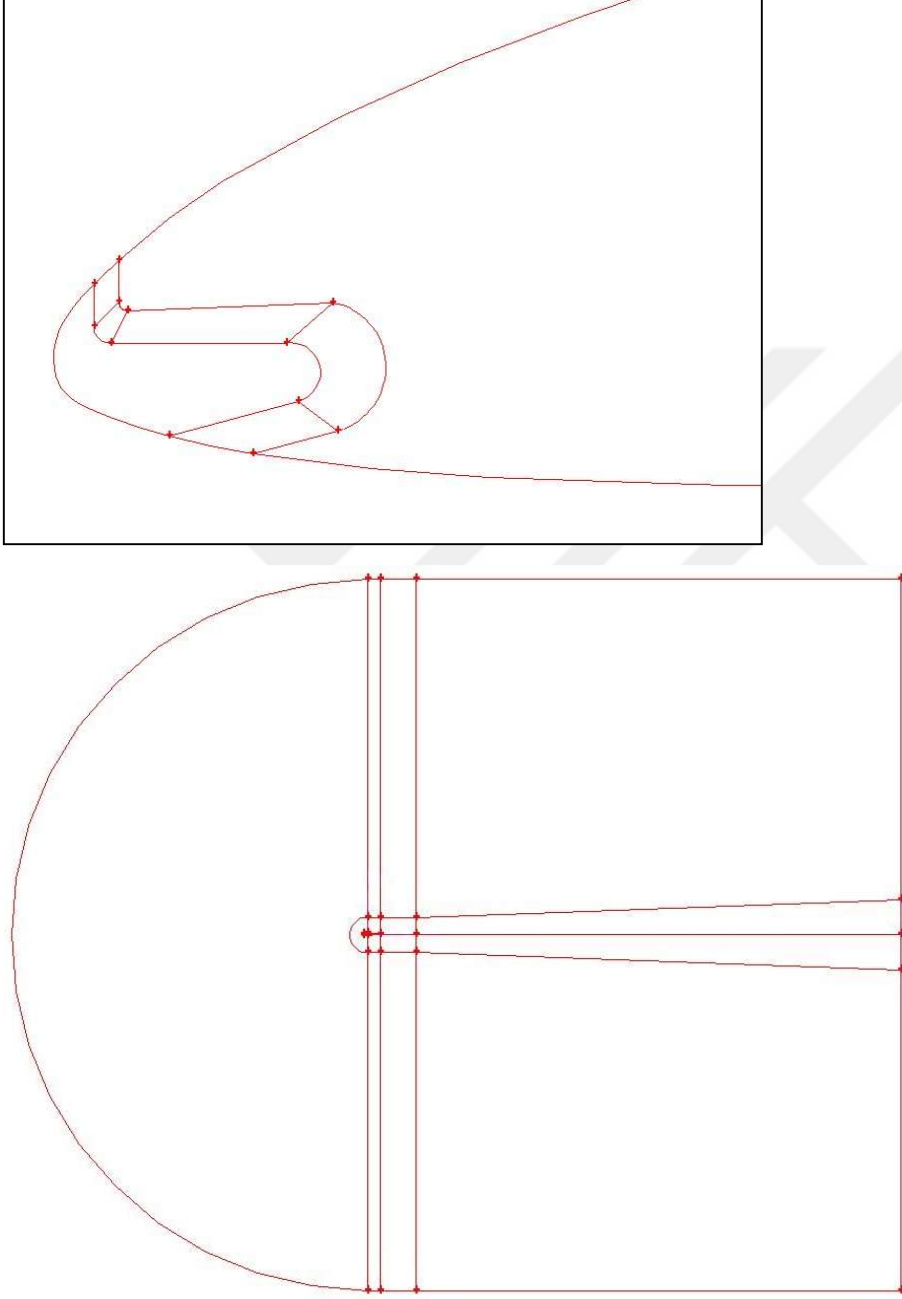


Şekil 2.3. Hesaplama bölgesinin şematiği ve sınır şartları

Hesaplama bölgesinin bloklara ayrılmış hali Şekil 2.4'te sunulmuştur. Buradan da görüleceği üzere kanat içindeki yarık kısmı 5 bloktan, kanat profili etrafı ise 14 bloktan meydana gelmektedir. Bloklar, hesaplama bölgesinde yapılandırılmış ağ oluşturmak için gerekmektedir.

Hesaplama bölgesinin koordinat merkezi hücum kenarından $c/4$ mesafe daha geride olacak şekilde belirlenmiştir. Bu noktanın serbest akım hızı yönü x-eksenini, yukarı yönü ise y-eksenini temsil etmektedir. Burada, z-ekseni ise sayfanın içine doğru olacak şekilde belirlenmiştir.

İki-boyutta çizilen hesaplama bölgesinde bloklar oluşturulduktan sonra, hesaplama bölgesi $+z$ ve $-z$ doğrultularında eşit ve $0,05c$ 'lik mesafelerle 3-boyuta uzatılmıştır. Yani, hesaplama bölgesinin z -ekseni doğrultusundaki kalınlığı $0,1c$ olmuştur.



Şekil 2.4. Hesaplama bölgesinin bloklara ayrılmış hali

Sayısal çalışma, kanat profili veterine bağlı tek bir Reynolds sayısında ($Re_c=200000$) gerçekleştirilmiştir. Birçok mini insansız hava aracının (mİHA) bu Reynolds sayısında uçmasından dolayı bu değer tercih edilmiştir (URL-4, 2022; URL-5, 2022; URL-

6, 2022). Sayısal çalışmada kullanılan temel geometrik ve fiziksel parametreler Tablo 2.1 içerisinde sunulmuştur.

Tablo 2.1. Sayısal çalışmada kullanılan parametreler ve değerleri

Parametre adı ve sembolü	Değeri/Değerleri
Reynolds sayısı (Re_c)	200000 olarak 1 adet
Veter (c)	1 m olarak 1 adet
Çıkış yarığı merkezinin hücum kenarından olan mesafesi	0,0065 m olarak 1 adet
Çıkış yarığı ekseninin yatay eksenden olan açısı	90° olarak 1 adet
Çıkış yarığı genişliği	0,003 m olarak 1 adet
Giriş yarığı merkezinin hücum kenarından olan mesafesi	0,019 m olarak 1 adet
Hücum açısız durumda giriş yarığı ekseninin yatay eksenden olan açısı	15° olarak 1 adet
Hücum açısız durumda çıkış yarığı ekseninin yatay eksenden olan açısı	90° olarak 1 adet
Giriş yarığı genişliği	0,00468 m olarak 1 adet
Test edilen hücum açıları (α)	-2°'den 20°'ye 2°'lik adımlarla 12 adet

2.4. Çalışmada Kullanılan Fiziksel Büyüklükler

Reynolds sayısı, boyutsuz hız olarak da adlandırılabilir ve aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$Re_c = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot c}{\mu} \quad (2.1)$$

Burada yer alan sembollerden ρ (kg/m³) hava yoğunluğunu, U_∞ (m/s) serbest-akım hızını, c (m) veter uzunluğu (bu çalışmada 1 m olarak alınmıştır) ve μ (kg/m/s) havanın dinamik viskozitesini temsil etmektedir. Havanın yoğunluk ve viskozite değerleri, sırasıyla, 1,225 kg/m³ ve 1,7894×10⁻⁵ Pa.s olarak alınmıştır. Zaman-ortalamalı direnç, kaldırma ve moment katsayıları, sırasıyla, aşağıdaki formüllerden hesaplatılmıştır.

$$\langle C_D \rangle = \frac{\langle F_D \rangle}{0,5 \cdot \rho \cdot U_\infty^2 \cdot A_p} \quad (2.2)$$

$$\langle C_L \rangle = \frac{\langle F_L \rangle}{0,5 \cdot \rho \cdot U_\infty^2 \cdot A_p} \quad (2.3)$$

$$\langle C_{M_z} \rangle = \frac{\langle M_z \rangle}{0,5 \cdot \rho \cdot U_\infty^2 \cdot A_p \cdot c} \quad (2.4)$$

Burada, herhangi bir parametrenin zaman ortalaması $\langle \dots \rangle$ operatörüyle, kanada etkiyen direnç ve kaldırma kuvveti, sırasıyla, F_D ve F_L sembolleriyle, kanadın üst görünüş alanı A_p sembolüyle, kanadın hücum kenarından firar kenarına doğru $c/4$ mesafeye göre hesaplatılan moment M_z sembolüyle gösterilmiştir.

Sırasıyla, direnç, kaldırma ve moment katsayılarına ait standart sapma değerleri ise aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır.

$$C_{D-SS} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (C_D(i) - \langle C_D \rangle)^2} \quad (2.5)$$

$$C_{L-SS} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (C_L(i) - \langle C_L \rangle)^2} \quad (2.6)$$

$$C_{M_z-SS} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (C_{M_z}(i) - \langle C_{M_z} \rangle)^2} \quad (2.7)$$

Burada yer alan $C_D(i)$, $C_L(i)$ ve $C_{M_z}(i)$, sırasıyla, kanadın anlık direnç, anlık kaldırma ve anlık moment katsayısını temsil etmektedir. Yukarda verilen i ve n sembolleri ise, sırasıyla, kanat üzerine etkiyen anlık kuvvet ve moment katsayılarının geçici rejim sonrasında periyodiğe yakın değişim göstermeye başladığı 8 s'lik kısımdaki ilk ve son anlık veri numarasını temsil etmektedir. Zaman-ortalamalı basınç katsayısı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır. Bu formülde yer alan ΔP sembolü, serbest-akım statik

basıncı ile model yüzeyindeki herhangi bir konuma ait statik basınç arasındaki farkı temsil etmektedir.

$$< C_p > = \frac{< \Delta P >}{0,5 \cdot \rho \cdot U_{\infty}^2} \quad (2.8)$$

Türbülans kinetik enerji (TKE), uzaysal bir noktadaki türbülansın büyüklüğünü ifade eden bir terimdir ve genellikle birim kütle başına enerji (J/kg=m²/s²) olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$< TKE > = \frac{1}{2} \cdot [< (u')^2 > + < (v')^2 > + < (w')^2 >] \quad (2.9)$$

Burada yer alan sembollerden u' (m/s), v' (m/s) ve w' (m/s), sırasıyla, hızın x-, y- ve z-ekseni yönündeki bileşenlerinin çalkantılarını ifade etmektedir. Yine diğer bir önemli vektörel büyüklük çevrintidir (ζ), birimi Hz'dir ve bir akışkan elemanın dönümlülüğünü gösteren bir ölçüttür. Çevrinti de aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} \vec{\zeta} &= \zeta_x \vec{i} + \zeta_y \vec{j} + \zeta_z \vec{k} \\ \vec{\zeta} &= \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \vec{i} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \vec{k} \end{aligned} \quad (2.10)$$

2.5. Sayısal Çözücünün Ayarları

Mevcut sistem üzerindeki Newton-tipi akışkanın daimi ve daimi olmayan, geçişli (laminerden türbülanslıya ya da tersini içeren), sıkıştırılmaz, üç-boyutlu, izotermal akışı, ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği paket programı olan Ansys Fluent (Ansys Academic 2020 R1) üzerinden modellenmiştir. Programın öğrenci versiyonu kullanıldığı için ağ sayısı en fazla 512000 değerinde paralel işlem için çekirdek sayısı da en fazla 4 değerinde sınırlandırılmıştır.

Bu program ayrıklaştırma metodu olarak sonlu hacimler metodunu kullanmaktadır. Çalışmada hem daimi (steady) hem de daimi olmayan (unsteady) akışların benzetimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, dört denklemlili olan geçişli kayma gerilmesi transport (Transition Shear Stress Transport veya Transition SST) türbülans modeli tercih edilmiştir.

Türbülans modeline ait tüm detaylara programa ait kullanıcı kılavuzundan erişilebilir (ANSYS, 2013). Model ayarlarında, eğrisellik düzeltme (curvature correction) aktif hale getirilmiş ve katsayı değeri olarak 1 kullanılmıştır.

Akışta, herhangi bir sıkıştırılabilirlik durumu olmadığından, sayısal çalışma için basınç-tabanlı (pressure based) çözücü tercih edilmiştir. Basınç-hız bağlaşımı olarak basınç bağlantılı denklemler için yarı-kapalı metot varyantı (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Consistent, SIMPLEC) tercih edilmiştir. Hücre merkezlerindeki çözüm değişkenlerinin gradyanları için hücre-tabanlı en-küçük-kareler (Least square cell based) yaklaşımı seçilmiştir. Basınç değerlerinin her bir hücre yüzeyindeki interpolasyonu için ikinci derece şema seçilmiştir. Uzaysal ayrıklaştırmada, x-, y- ve z-momentum, türbülans kinetik enerji, özgül yitim oranı (specific dissipation rate), aralıklılık ve geçişli momentum kalınlığı Reynolds sayısı için ikinci mertebeden ileri-adım şeması kullanılmıştır. Bu şema, birinci mertebeye göre daha doğru sonuçların elde edilmesi için tercih edilmiştir. Daimi olmayan akışların modellendiği durumlarda kullanılan zaman ayrıklaştırması için ikinci mertebe ayrıklaştırma tercih edilmiştir.

2.6. Doğrulama ve Geçerleme Çalışmaları

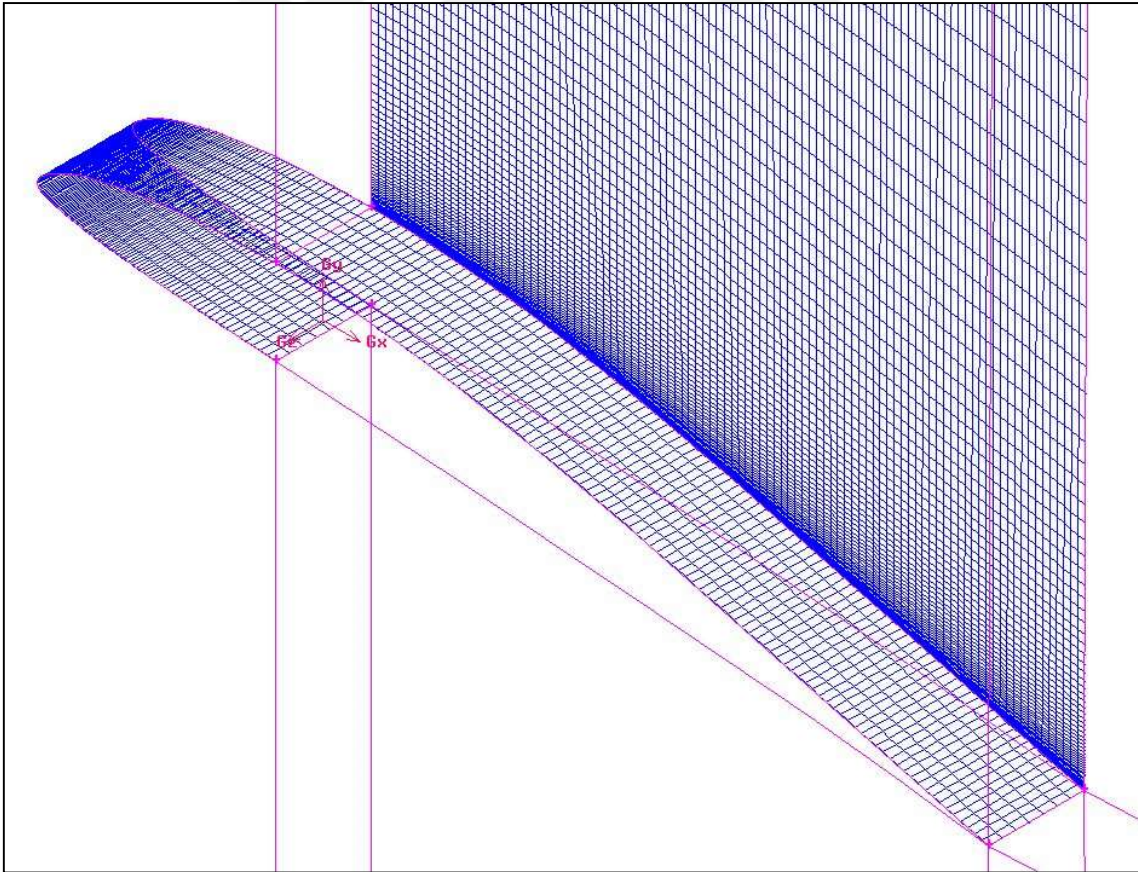
Kullanılan sayısal yöntemlerin, kanat etrafındaki akışın fiziğini yansıtabilecek yeterli kaliteyi sağlayıp sağlamadığını test etmek için düz kanat üzerinde bir takım ön testler gerçekleştirilmiştir. Bu ön testler iki kısma ayrılmıştır: doğrulama ve geçerleme. Bu çalışmalarda karşılaştırma parametresi olarak $\langle C_D \rangle$, $\langle C_L \rangle$ ve $\langle C_{M_z} \rangle$ seçilmiştir. Doğrulama sürecinde, ağdan bağımsızlık testi gerçekleştirilmiş ve en uygun ağ sayısı tespit edilmiştir. Geçerleme sürecinde ise elde edilen çıktılar diğer sayısal ve deneysel çalışma çıktılarıyla kıyaslanmıştır.

Hesaplama bölgesinde, düzgün altıyüzlü ağlar kullanılarak üç farklı toplam ağ sayısına sahip yapılandırılmış ağ oluşturulmuştur (Şekil 2.5). Bunların değerleri 327600, 402500 ve 481250 şeklindedir. Ağ sayısına bakılmaksızın, ağların hepsi kanat yüzeyinde $y^+ < 1$ şartını sağlayacak ilk ağ yüksekliği ile oluşturulmuştur ve z-ekseni yönündeki ağ sayısı 7 olarak sabit tutulmuştur (Şekil 2.5). Burada, y^+ duvar yüzeyi üzerindeki boyutsuz ilk ağ yüksekliğini temsil etmektedir ve genel kabul bu parametrenin değerinin en fazla 1 olmasıdır. HAD programın öğrenci sürümünün kısıtlamalarından dolayı z doğrultusunda 0,1 m'lik uzantıya yalnızca 7 adet ağ atanabilmektedir. Testlerde, en uygun ağ sayısını

belirleyebilmek adına yüzde sapma faktörü (ε_p) kullanılmıştır. Bu faktör aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\varepsilon_p = \frac{|\phi_{m+1} - \phi_m|}{|\phi_{m+1}|} \cdot 100 \quad (2.11)$$

Burada kullanılan ϕ sembolü herhangi bir parametreyi, m ve $m+1$ alt indisleri ise, sırasıyla, mevcut ağ sayısını ve sonraki ağ sayısını ifade etmektedir. Bu faktör, baz alınan katsayılar açısından hem $\alpha=0^\circ$ ve 10° 'de daimi hem de $\alpha=20^\circ$ daimi olmayan akış koşulları için test edilmiştir. Yapılan bu ağdan bağımsızlık testinde, sonraki ağ sayısı için elde edilen sapmanın %2'nin altında kalması durumunda mevcut ağ sayısının geri kalan tüm testlerde kullanılabilecek kalitede olduğu kabul edilecektir. Elde edilen sonuçlar Tablo 2.2, 2.3 ve 2.4 içerisinde sunulmuştur.



Şekil 2.5. Üç-boyutlu düz kanat modeli etrafında yer alan üç-boyutlu yapılandırılmış ağların bazı yüzeyler üzerindeki iki-boyutlu izdüşümleri ve koordinat merkezinin konumu

Tablo 2.2. Düz kanat için $\alpha=0^\circ$ durumunda farklı ağ sayıları için elde edilen daimi çözüm sonuçları

Ağ adı	Ağ sayısı	$\langle C_D \rangle$	ϵ_p	$\langle C_L \rangle$	ϵ_p	$\langle C_{M_z} \rangle$	ϵ_p
Ağ-1	327600	0,00839	14,6	0,307	16,6	0,0657	15,9
Ağ-2	402500	0,00983	0	0,368	0,82	0,0781	0,38
Ağ-3	481250	0,00983		0,371		0,0784	

Tablo 2.3. Düz kanat için $\alpha=10^\circ$ durumunda farklı ağ sayıları için elde edilen daimi çözüm sonuçları

Ağ adı	Ağ sayısı	$\langle C_D \rangle$	ϵ_p	$\langle C_L \rangle$	ϵ_p	$\langle C_{M_z} \rangle$	ϵ_p
Ağ-1	327600	0,0433	0,23	1,22	0	0,0681	1,04
Ağ-2	402500	0,0432	1,89	1,22	1,67	0,0674	5,48
Ağ-3	481250	0,0424		1,20		0,0639	

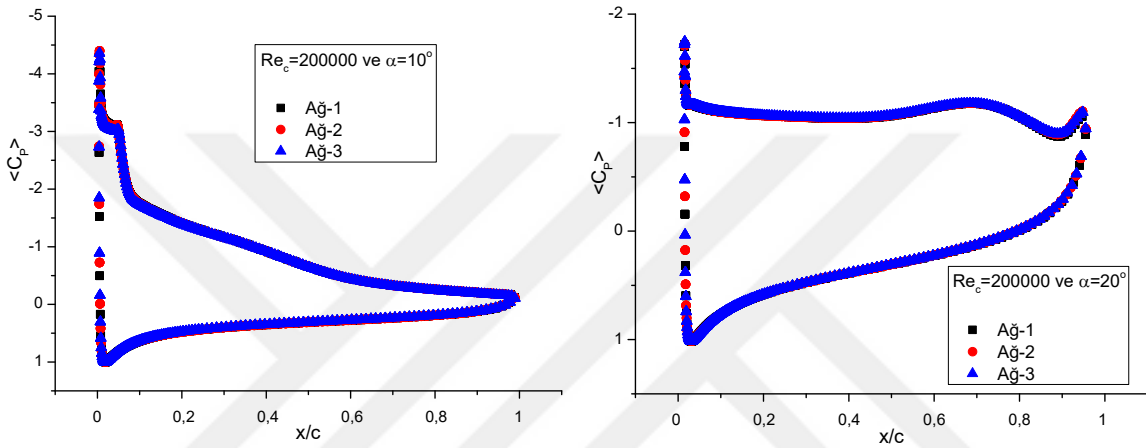
Tablo 2.4. Düz kanat için $\alpha=20^\circ$ durumunda farklı ağ sayıları için elde edilen daimi olmayan çözüm sonuçları

Ağ adı	Ağ sayısı	$\langle C_D \rangle$	ϵ_p	$\langle C_L \rangle$	ϵ_p	$\langle C_{M_z} \rangle$	ϵ_p
Ağ-1	327600	0,459	0	1,29	0	0,242	0
Ağ-2	402500	0,459	0	1,29	0	0,242	0
Ağ-3	481250	0,459		1,29		0,242	

Yukarıdaki tablolar, $\alpha=0^\circ$ durumunda Ağ-2'nin, $\alpha=10^\circ$ durumunda ne Ağ-1 ne de Ağ-2'nin, $\alpha=20^\circ$ durumunda ise tüm ağların ağdan bağımsızlık şartımıza uygun olduğunu bizlere açıklamaktadır. Son olarak, düz kanat yüzeyindeki ortalama basınç katsayısının, $\langle C_p \rangle$, boyutsuz veter uzunluğuna (x/c) göre değişimini veren grafiğe bakılmış ve her üç ağın hem $\alpha=10^\circ$ durumundaki daimi şartlar altında hem de $\alpha=20^\circ$ durumundaki daimi olmayan şartlar altında benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Şekil 2.6). Sonuç olarak, Ağ-3'ün, eldeki olanaklar ışığında, en iyi tercih olacağına karar verilmiştir ve düz kanat için yapılması planlanan tüm testlerde kanat etrafında bu sayıya sahip ağ oluşturulacaktır.

Daimi olmayan benzetimlerde zaman adımı olarak $\Delta t=0,00008$ s değeri kullanılmıştır. Bu değer CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) sayısını 1'in altında tutmaktadır ve daimi olmayan benzetimler için bu şart aranır. Kalıntı değeri daimi benzetimlerde 10^{-5} olarak daimi olmayan benzetimlerde ise 5×10^{-5} olarak belirlenmiştir. Daimi olmayan benzetimlerde, bir zaman adımı için iterasyonlar, bu kalıntı değeri yakalayana kadar sürdürülmüştür. Daimi benzetimlerde toplam 40000 iterasyon gerçekleştirilmiştir fakat

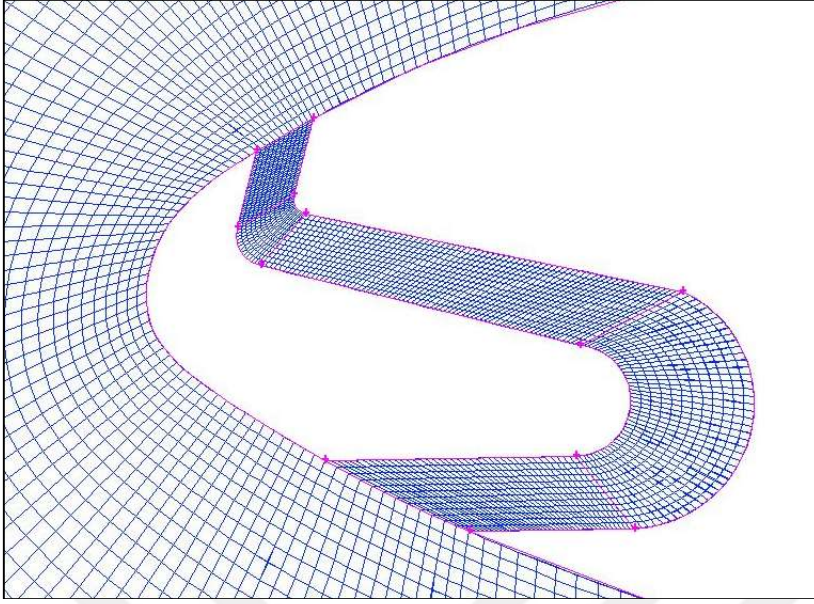
istenilen kalıntı değer, kalıntı değer iterasyon sayısına göre salınım gösterdiğinden, yakalanamamıştır. Daimi çalışmalardaki en yüksek kalıntı değer 10^{-3} olarak elde edilmiştir. Daimi olmayan benzetimlerde ise benzetim yaklaşık 32 s koşturulmuş ve ortalama değerler, yaklaşık düzenli değişimin görüldüğü son 8 s'lik kısımdan elde edilmiştir. Daha uzun bir zaman aralığı üzerinden ortalama alınmak istense de, bir daimi olmayan akış benzetiminin sadece 32 s'lik kısmının bile ortalama 35 gün sürmesinden dolayı bu gerçekleştirilememiştir.



Şekil 2.6. Farklı ağ sayıları için düz kanat modeli yüzeyindeki ortalama basınç katsayılarının boyutsuz veter uzunluğuyla (x/c) değişimleri

Yarıklı kanatta bir de kanat içerisindeki yarıktaki ağ oluşturulmalıdır (Şekil 2.7). Yarıklı kanadın yarık kısmında ise oldukça ince taneli ağ oluşturulmuştur (Şekil 2.7). Bu ince taneli ağ ile yarık giriş ve çıkış kısımlarında yer alan bölgelerdeki daha kaba boyuttaki ağların arayüz kısımlarında, ağ boyutunda ciddi ani değişim yaratmamak adına, olabildiğince, düzgün bir geçiş sağlanmaya çalışılmıştır. Bu eklemeler sonrasında yarıklı kanadın ağ sayısı 501900'e yükselmiştir. Maksimum eş açılı çarpıklık oranı, düz kanatta 0,43 iken yarıklı kanatta 0,73 değerindedir.

Doğrulama süreci sonunda düz kanat testleri için 481250 ağ sayısında modeller oluşturulmasına, yarıklı kanat testleri için 501900 ağ sayısında modeller oluşturulmasına, daimi olmayan şartlar için $CFL < 1$ yapan zaman adımı olan $\Delta t = 0,00008$ s değerinin kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 2.7. Yarıklı kanada ait üç-boyutlu hesaplama bölgesinin yarık içerisinde ve dışarısında yer alan üç-boyutlu yapılandırılmış ağların yan yüzeyler üzerindeki iki-boyutlu izdüşümleri

Tablo 2.5. E387 kanat profili üzerinden daimi şartlarda $Re_c=200000$ için elde edilen sayısal verilerle deneysel verilerin farklı hücum açılarında kıyaslanması

Referans	Çalışmanın türü	α	$\langle C_D \rangle$	$\langle C_L \rangle$	$\langle C_{M_z} \rangle$
Selig ve McGranahan (2004)	Deneysel	0°	0,0104	0,368	0,0854
		4°	0,0134	0,767	0,0819
		8°	0,0181	1,16	0,0730
		12°	0,0774	1,23	0,0568
XFOIL 6.99	Sayısal 2-B Daimi	0°	0,00982	0,402	0,0829
		4°	0,0123	0,8369	0,0805
		8°	0,0208	1,17	0,0644
		12°	0,0528	1,36	0,0375
Mevcut Çalışma	Sayısal 3-B Daimi	0°	0,00988	0,370	0,0784
		4°	0,0131	0,808	0,0786
		8°	0,0249	1,14	0,0669
		12°	0,0870	1,37	0,104

Geçerleme adımımda düz kanat için mevcut sayısal çalışmada elde edilen zaman ortalamalı aerodinamik katsayıların diğer sayısal ve deneysel yolla elde edilenlerle kıyaslanmasını içermektedir. Burada hem daimi benzetimler hem de daimi olmayan benzetimlerin kıyası yapılmıştır ve kıyaslama verileri Tablo 2.5 ve 2.6 içerisinde sunulmuştur. Kıyaslamada, XFOIL 6.99 programından da faydalanılmıştır. Daimi olmayan benzetim, deneysel verilerle elde edilen katsayılardan en fazla %35 sapma göstermiştir. Daimi benzetimlerde ise bu değer, artan hücum açısıyla artmış ve en fazla %82 değerine erişmiştir. Bu durum, artan hücum açısıyla birlikte kanat üst yüzeyinde oluşan kabarcığın davranışına dayandırılmıştır.

Tablo 2.6. E387 kanat profili üzerinden daimi olmayan şartlarda $Re_c=200000$ için elde edilen sayısal verilerle deneysel verilerin farklı hücum açılarında kıyaslanması

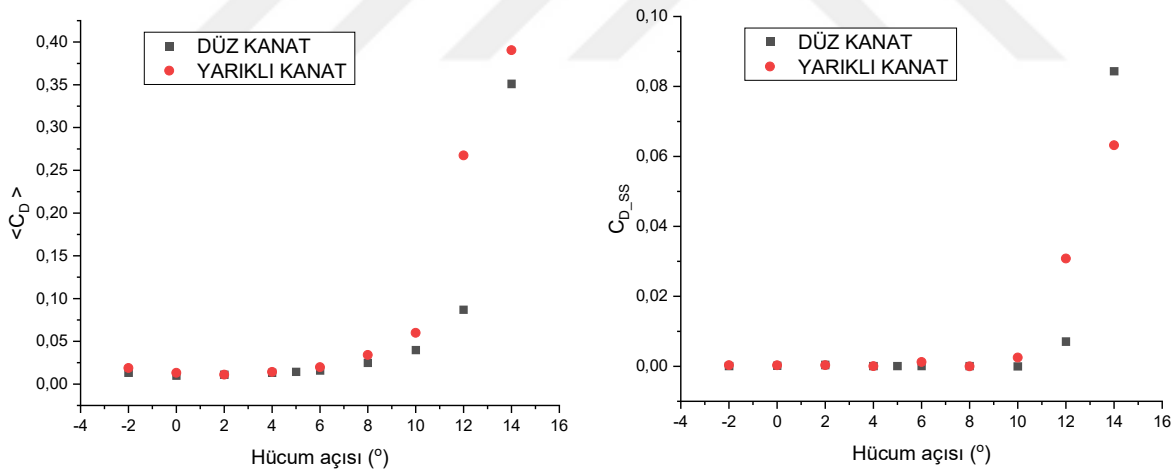
Referans	Çalışmanın türü	α	$\langle C_D \rangle$	$\langle C_L \rangle$	$\langle C_{M_z} \rangle$
Selig ve McGranahan (2004)	Deneysel	12°	-	1,23	0,0568
		16°	-	1,15	0,173
		20°	-	1,05	0,179
Mevcut Çalışma	Sayısal 3-B	12°	0,0658	1,19	0,0629
	Daimi	16°	0,251	1,06	0,152
	olmayan	20°	0,460	1,29	0,242

Sonuç olarak, kullanılan programın kısıtlamalarına ve eldeki olanakların kısıtlı olmasına rağmen elde edilen sonuçların çoğu deneysel verilerle yakındır. Bu sebeple, kurulan sayısal modelin sonraki çalışmalar için de kullanılmasında herhangi bir sakınca olmadığına kanaat getirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

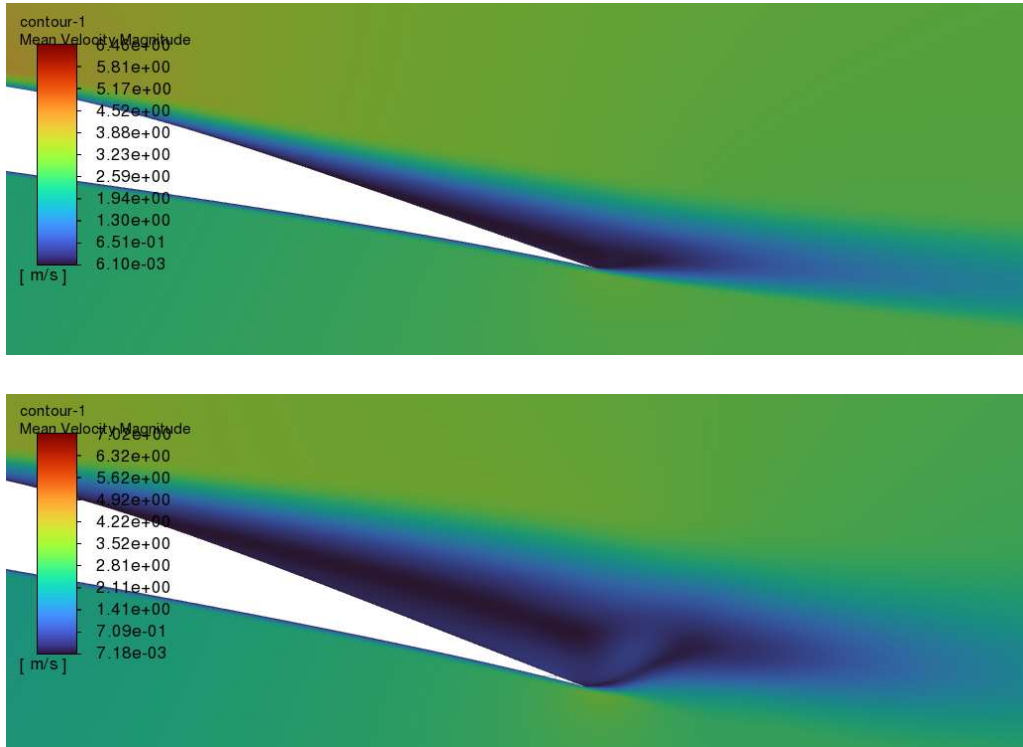
3.1. Daimi Akış İçin Benzetim Sonuçları

Bu kısımda, düz ve yarıklı kanatlar için -2° ila 14° 'lik hücum açısı aralığındaki daimi şartlar altında elde edilen aerodinamik karakteristikler ($\langle C_D \rangle$, $\langle C_L \rangle$, $\langle C_L \rangle / \langle C_D \rangle$, $\langle C_{M_z} \rangle$, C_{D-ss} , C_{L-ss} ve C_{M_z-ss}) kıyaslamalı olarak irdelenecektir. Şekil 3.1 içerisinde zaman-ortalamalı ve standart sapma direnç katsayıları her iki kanat için verilmiştir. Burada her iki kanat $\alpha=8^\circ$ 'lik hücum açısına kadar $\langle C_D \rangle$ açısından benzer sonuçlar sergilerlerken, bu açının artmasıyla birlikte yarıklı kanadın daha fazla direnç ürettiği görülmüştür. Bu açıdan sonra $\langle C_D \rangle$ değerleri de artmaya başlamıştır. Direnç çalkantıları ise $\alpha=10^\circ$ 'lik hücum açısından sonra ciddi bir artış sergilemişlerdir. Bu da, kanat firar kenarından ayrılan kayma tabakalarının çevrilere dökülmeye başlamasıyla ilişkilendirilmiştir (Şekil 3.2.). Bu yalnızca direnç katsayısının değil kaldırma katsayısının ve moment katsayısının standart sapma grafiklerinde de görülmektedir.

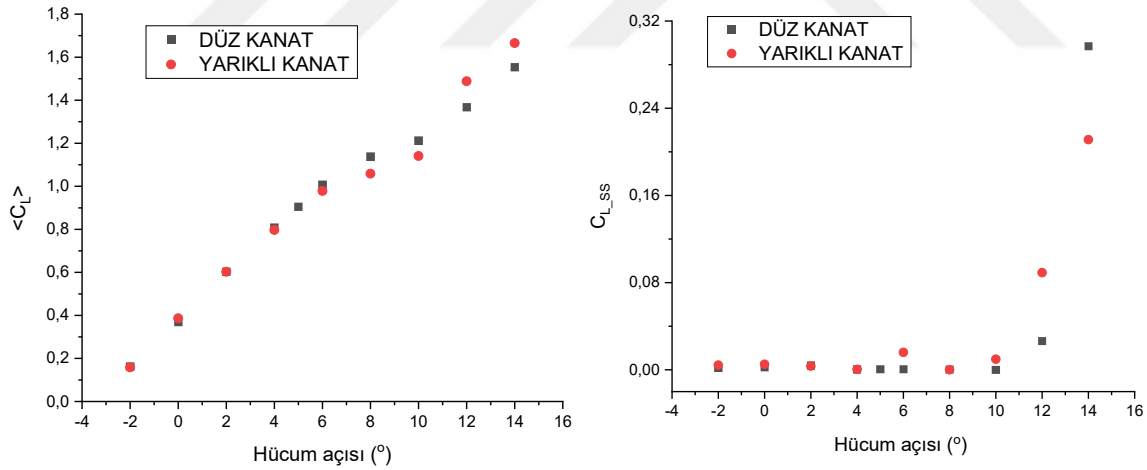


Şekil 3.1. Daimi akış benzetimlerinde her iki kanat için zaman-ortalamalı ve standart sapma direnç katsayılarının hücum açısına göre değişimleri

Şekil 3.3 içerisindeki zaman-ortalamalı kaldırma katsayılarına bakıldığında, her iki kanadın $\langle C_L \rangle$ değerinin $\alpha=6^\circ$ 'ye kadar aynı olduğu görülmüştür. Hücum açısının $\alpha=8^\circ$ ve 10° değerlerinde düz kanat daha fazla kaldırma oluştursa da, bu durum, $\alpha=12^\circ$ ve 14° değerlerinde tersine dönmüştür.



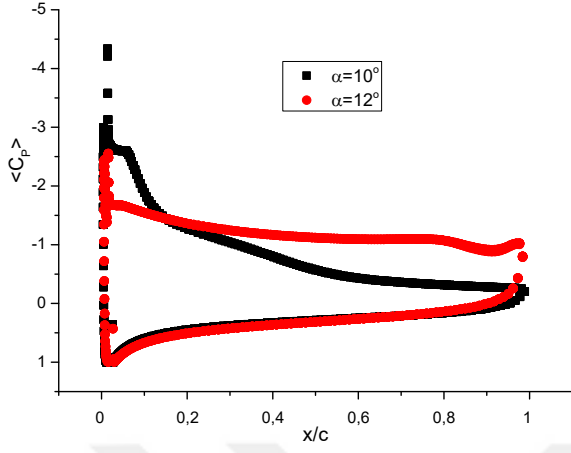
Şekil 3.2. Düz kanat için $\alpha=10^\circ$ (üstte) ve $\alpha=12^\circ$ 'lik hücum açıları için $z=0$ düzleminde elde edilen ortalama hız konturları. Fırar kenarındaki çevri dökülmesi başlangıcı şekilden açıkça görülmektedir



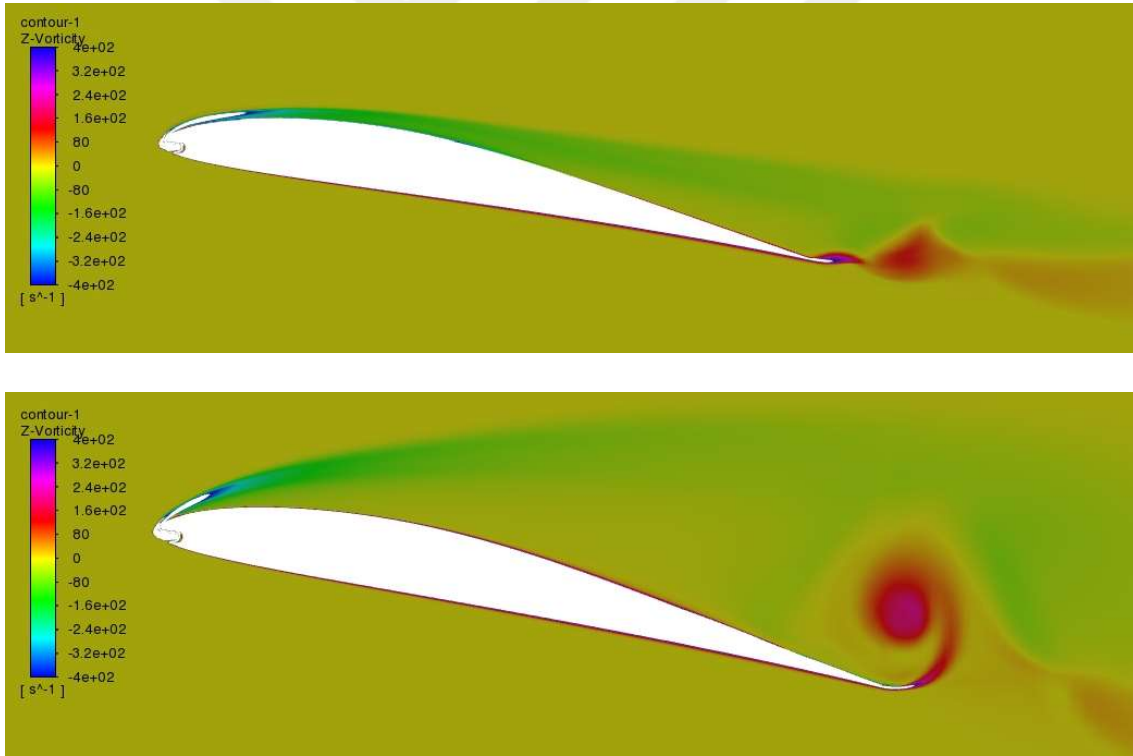
Şekil 3.3. Daimi akış benzetmelerinde her iki kanat için zaman-ortalamalı ve standart sapma kaldırma katsayılarının hücum açılarına göre değişimleri

Yarıklı kanadın $\langle C_L \rangle$ değerinde $\alpha=10^\circ$ 'dan $\alpha=12^\circ$ 'ye artış sonrası gözlemlenen sıçrama, jet tarafından momentum enjeksiyonu yapılan ayrılan kayma tabakasının üst yüzeyde meydana getirdiği fazladan basınç düşüşüne dayandırılmıştır. Çünkü momentum aktarımı yapılan kayma tabakaları daha enerjik hale gelmiş ve üst yüzey boyunca daha fazla düşük basınç oluşumuna sebep olmuştur. Bu durum hem Şekil 3.4 içerisindeki $\langle C_p \rangle$ dağılımı

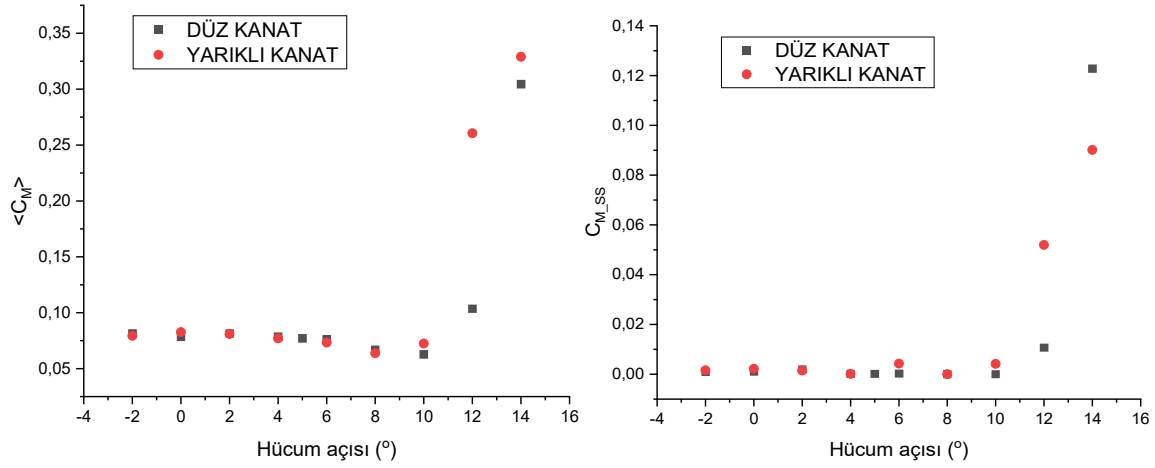
kıyasından hem de Şekil 3.5 içerisindeki çevrinti konturları kıyasından oldukça açık bir şekilde görülebilmektedir.



Şekil 3.4. Farklı hücum açıları için yarıklı kanat etrafındaki $\langle C_p \rangle$ dağılımları

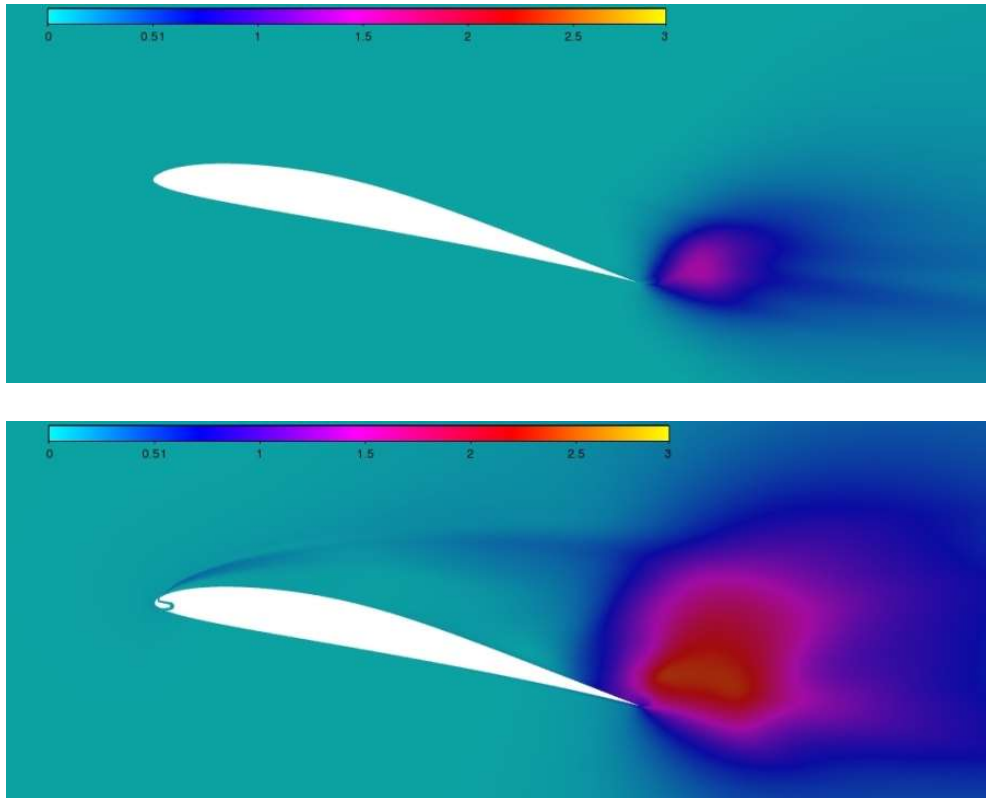


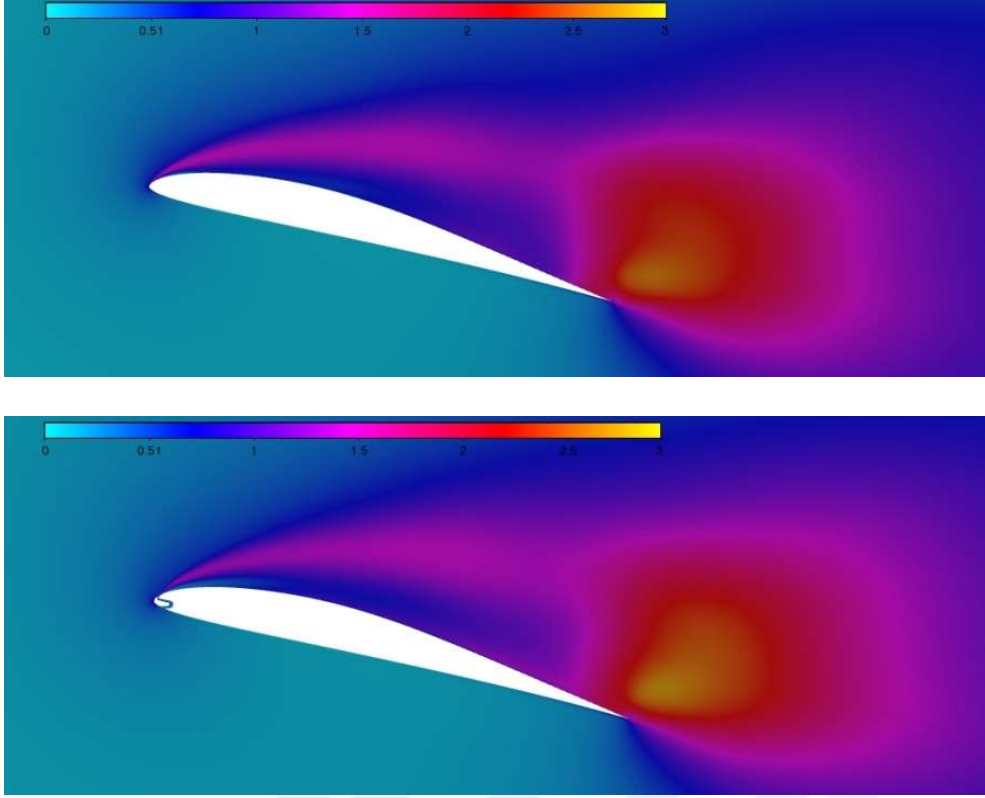
Şekil 3.5. Yarıklı kanat için $\alpha=10^\circ$ (üstte) ve $\alpha=12^\circ$ 'lik hücum açıları için $z=0$ düzleminde elde edilen ortalama çevrinti konturları. Çıkış jeti tarafından momentum aktarılan hücum kenarından ayrılan kayma tabakaları oldukça geriye kadar uzanabilmektedir



Şekil 3.6. Daimi akış benzetmelerinde her iki kanat için zaman-ortalamalı ve standart sapma moment katsayılarının hücum açılara göre değişimleri

Daimi akış için $\alpha=14^\circ$ 'ye kadar elde edilen bu verilerden, çıkış jetinin, sınır tabakayı ayrılma öncesi laminardan türbülanslıya geçirerek ayrılmayı geciktirme ve stolu öteleme sürecini sağlamaktan daha çok sınır tabakanın direkt ayrılmasına sebep olduğu kanısına varılmıştır (Şekil 3.4 ve 3.5). Bundan dolayı yarıklı kanadın $\langle C_D \rangle$ değerinde $\alpha=10^\circ$ 'dan $\alpha=12^\circ$ 'ye artış sonrası gözlemlenen sıçrama $\langle C_L \rangle$ ve $\langle C_{M_z} \rangle$ değerlerinde de görülmüştür ve bu sıçrama, düz kanadinkinden daha yüksek orandadır.

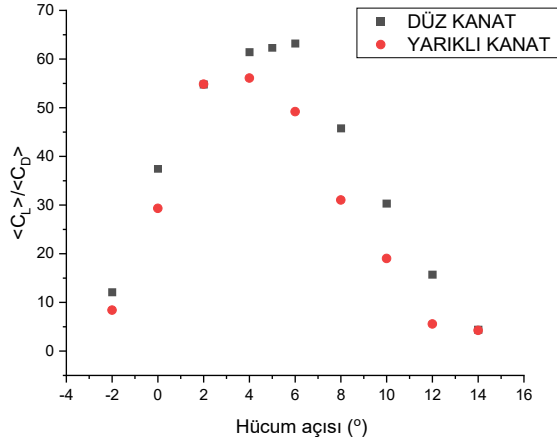




Şekil 3.7. Daimi akış benzetmelerinde her iki kanat için $\alpha=12^\circ$ (üst iki satır) ve 14° 'lik (alt iki satır) hücum açılarında $z=0$ düzleminde elde edilen m/s cinsinden standart sapma hız konturları Burada, düz ve yarıklı kanatlar arasındaki fark yarıklı geometrisinden seçilebilmektedir

Hücum açısının $\alpha=14^\circ$ 'ye varması sonrasında her iki kanat etrafındaki hız çalkantılarının aerodinamik kuvvet ve moment çalkantıları üzerindeki etkileri artmıştır ve birbirlerine yakın değerler almışlardır (Şekil 3.7). Bu artış, kanadın stol açısına yaklaştığına işaret etmektedir.

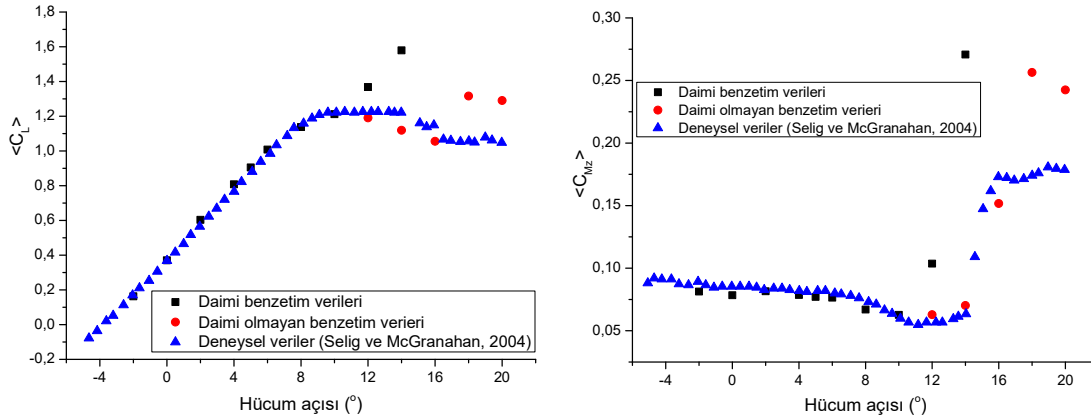
Kanat aerodinamik performansı için temel parametre olan gösterilen kaldırma/direnç oranının boyutsuz hali, $\langle C_L \rangle / \langle C_D \rangle$, her iki kanat için hesaplanmış ve hücum açısına göre değişimleri Şekil 3.8 içerisinde sunulmuştur. Burada, düz kanat etrafındaki akışın $\alpha=5^\circ$ 'deki durumunun da benzetimi yapıldığından, o da grafikte yerini almıştır. Şekil bizlere, kanat alt ve üst yüzeylerinde gelişen laminar sınır tabakanın bu Re_c değerinde, bu yarıklı konfigürasyonu ve bu hücum açılarında rahatsız edilmesi durumunda aerodinamik performansın düşeceğini göstermektedir. Bu sebeple, düz kanat yarıklı olana göre, hücum açısı değerine bakılmaksızın, daha iyi performans sergilemiştir.



Şekil 3.8. Daimi akış benzetimlerinden her iki kanat için elde edilen aerodinamik performansın, $\langle C_L \rangle / \langle C_D \rangle$, hücum açısına göre değişimleri

3.2. Daimi Olmayan Akış İçin Benzetim Sonuçları

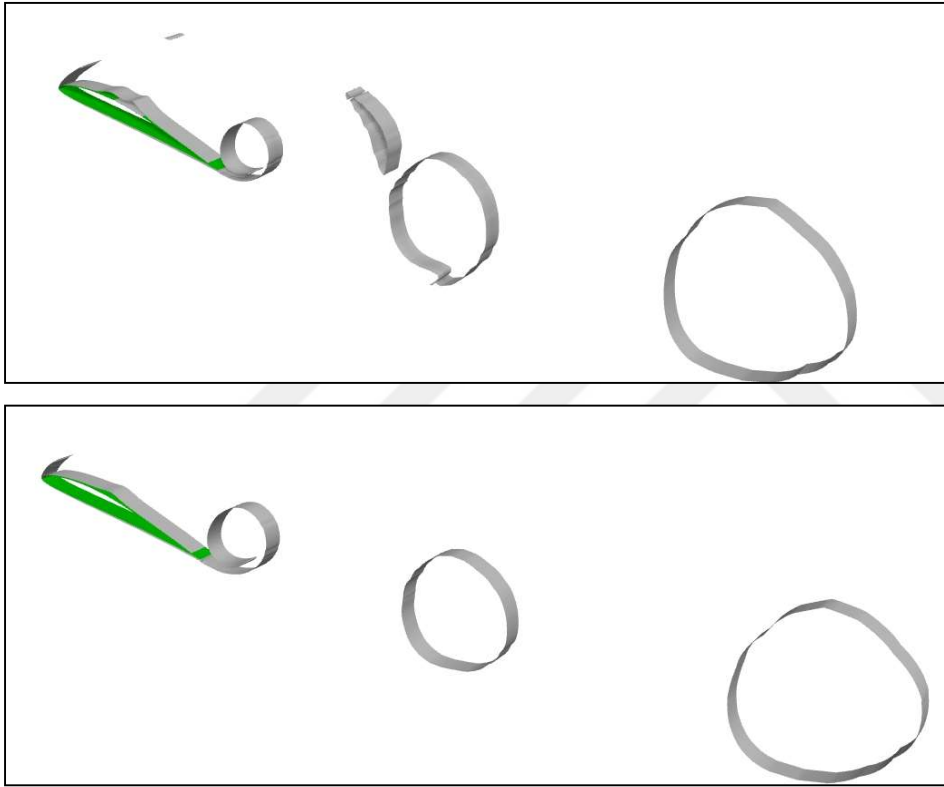
Daimi olmayan akış benzetimleri her iki kanat profili için $\alpha=12^\circ$ ila 20° hücum açısı aralığındaki her 2° adım için gerçekleştirilmiştir. Özellikle, $\alpha=12^\circ$ ve 14° hücum açıları stol açısına oldukça yakın değerlerdir. Bu açılardaki akış ayrılması ya da yeniden tutunması durumlarının meydana getireceği daimi olmayan durumları fiziksel açıdan daha sağlıklı şekilde modelleyebilmek adına daimi olmayan akış benzetimleri $\alpha=12^\circ$ 'den başlatılmıştır.



Şekil 3.9. Düz kanat için daimi ve daimi olmayan akış benzetimlerinden elde edilen bazı aerodinamik katsayıların deneysel verilerle kıyaslanması

Şekil 3.9, hem daimi hem de daimi olmayan durumlar için düz kanat üzerinden elde edilen zaman-ortalamalı aerodinamik katsayıların deneysel verilerle kıyaslanmasını içermektedir. Buradan da görüleceği üzere, daimi akış benzetimlerinden $\alpha=-2^\circ$ ila 10° arasında elde edilen katsayıların deneysel katsayıları çok iyi derecede yakaladığı fakat daimi olmayan akış benzetimlerinin, hem daimi hem de daimi olmayan akış benzetimlerinin birlikte

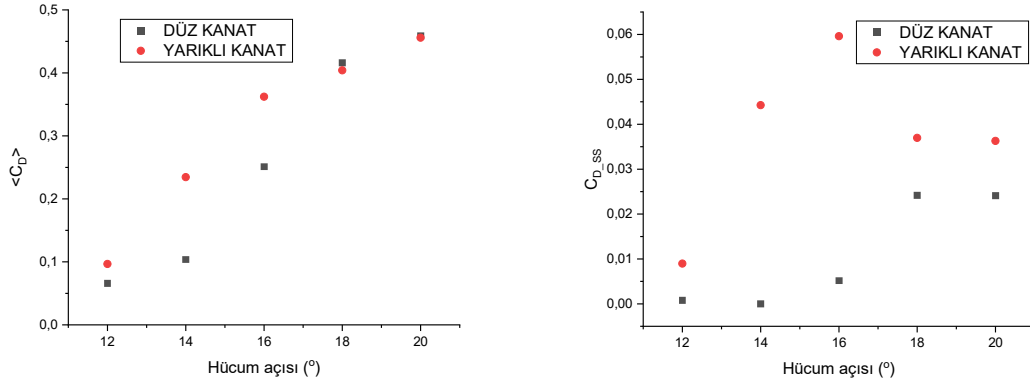
yapıldığı açılar olan $\alpha=12^\circ$ ile 14° durumunda, daimiye kıyasla deneysel verilere daha yakın sonuçlar sunabildiği görülmektedir. Daimi olmayan akış benzetimleri, $\alpha=-12^\circ$ ila 20° arasında deneysel verilerle aynı eğilime sahip değerler sunsa da kanadın tam bir küt cisimmiş gibi davranış sergilediği açılar olan $\alpha=18^\circ$ ile 20° için deneysel verilere göre daha yüksek veriler elde edilmiştir (Şekil 3.10). Bu durum bizlere, akışın hem hücum hem de firar kenarından ayrılarak çevri caddesini meydana getirdiği (derin stol) hücum açılarında Reynolds-ortalamalı Navier-Stokes sınıfındaki mevcut türbülans modelinin (geçişli kayma gerilmesi transport) normalinden fazla değerler elde ettiğini (overestimate) bizlere açıklamaktadır.



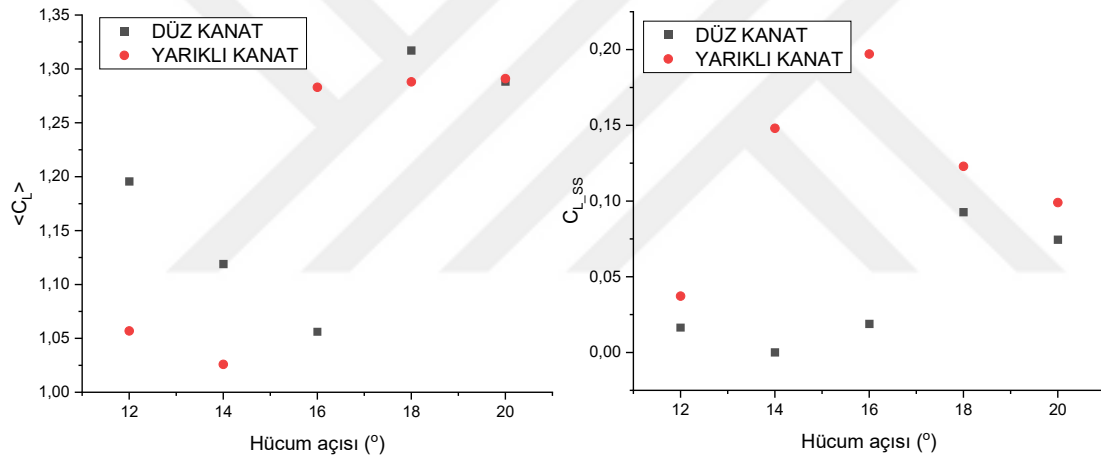
Şekil 3.10. Düz kanat için $\alpha=18^\circ$ (üstte) ile 20° 'deki daimi olmayan akış benzetimlerinden elde edilen z-çevrintiye ait keyfi izo-yüzeyler

Şekil 3.11, hem yarıklı hem de düz kanat için daimi olmayan akış benzetimlerinden elde edilen boyutsuz dirence ait verilerin hücum açlarına göre değişimlerini göstermektedir. Yarıklı kanadın ürettiği direnç, $\alpha=12^\circ$, 18° ve 20° değerlerinde düz kanadın ürettiğine çok yakın olsa da $\alpha=14^\circ$ ve 16° değerlerinde düz kanadın ürettiğinden en az 0,1 değer fazladır. Yarıklı kanadın etrafındaki akış da direncin standart sapması üzerinde, düz kanada kıyasla, daha fazla çalkantı yaratmaktadır. Bu durum kaldırma ve moment için de geçerlidir (Şekil

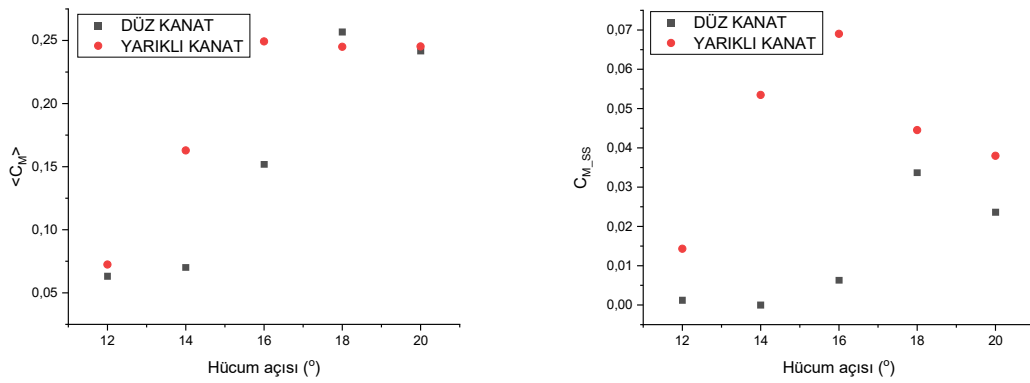
3.12 ve 3.13). Moment katsayısındaki dağılım da direnç katsayısınıninkine oldukça benzerdir (Şekil 3.13).



Şekil 3.11. Daimi olmayan akış benzetmelerinde her iki kanat için zaman-ortalamalı ve standart sapma direnç katsayılarının hücum açlarına göre değişimleri

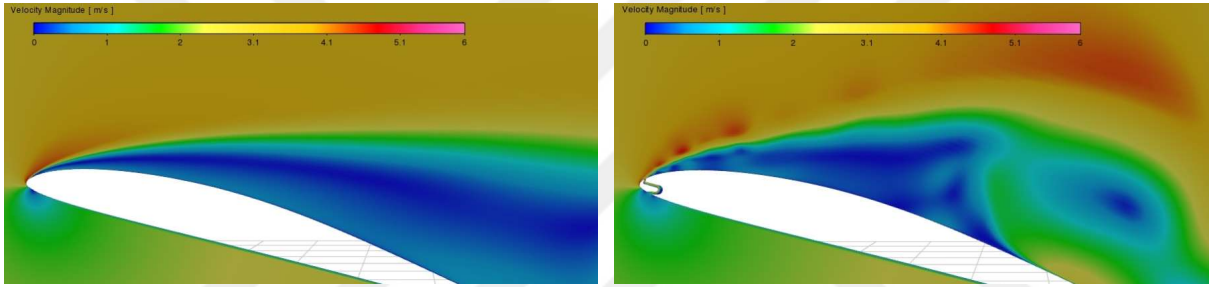


Şekil 3.12. Daimi olmayan akış benzetmelerinde her iki kanat için zaman-ortalamalı ve standart sapma kaldırma katsayılarının hücum açlarına göre değişimleri

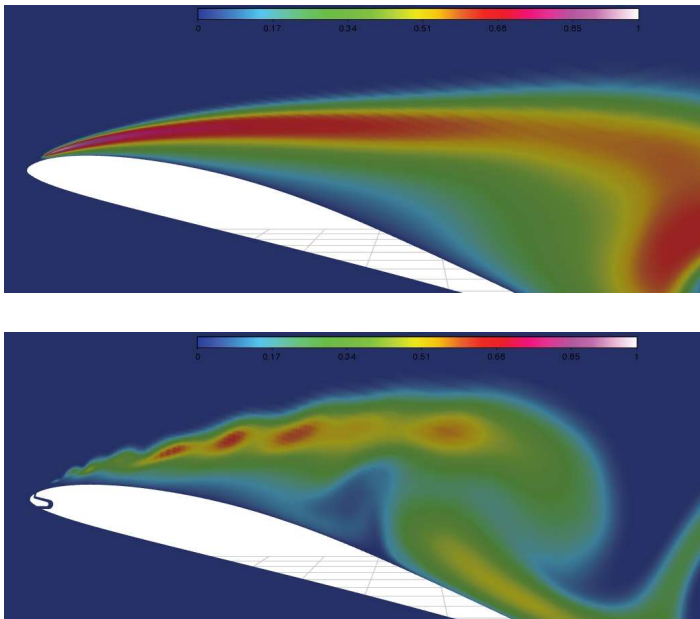


Şekil 3.13. Daimi olmayan akış benzetmelerinde her iki kanat için zaman-ortalamalı ve standart sapma moment katsayılarının hücum açlarına göre değişimleri

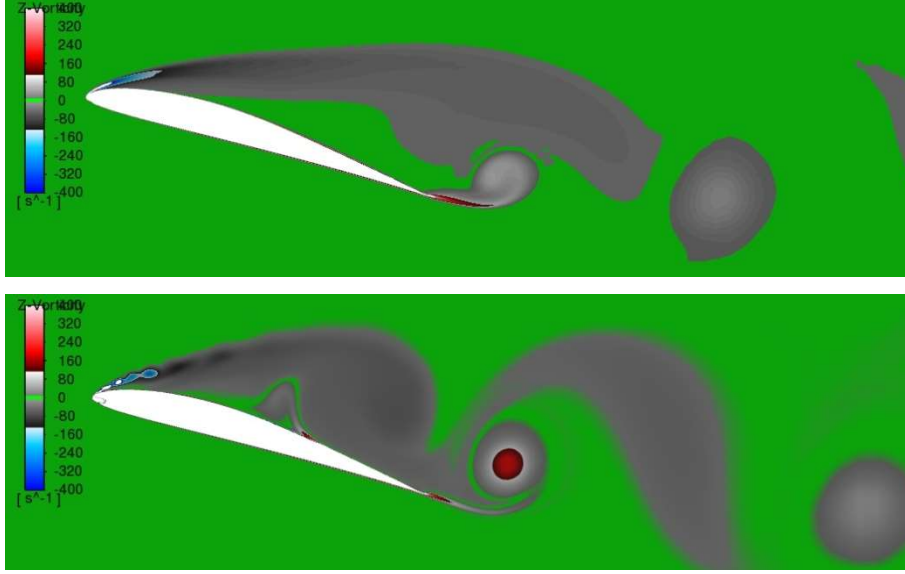
Yarıklı kanadın kaldırma katsayısı bakımından düz kanada üstünlük sağladığı tek açının $\alpha=16^\circ$ olduğu görülmüştür. Buradaki üstünlük yaklaşık 0,25 kadardır ve bu ciddi bir artıştır. Bu artışın altında yatan sebebi bulmak adına Şekil 3.14-3.17'ye bakmak gereklidir. Şekil 3.14, $\alpha=16^\circ$ 'deki anlık hız konturlarını göstermektedir. Düz kanattan ayrılan kayma tabakalarının düzgün bir şekilde ilerlediği fakat yarıklı kanattan ayrılanların salınıma uğradığı görülmektedir. Bu durum, aynı açı değeri için oluşturulan türbülans kinetik enerji konturlarında daha bariz görülmektedir (Şekil 3.15). Bu da bizlere, çıkış yarığında oluşturulan jetin kanat yüzeyinden ayrılan kayma tabakalarını rahatsız edecek düzeyde momentum aktarımı yaptığını açıklamaktadır. Bu aktarım sonrasında serbest kayma tabakaları daha enerjik hale gelmekte ve yarıklı kanat yüzeyine yeniden tutunmaktadırlar (Şekil 3.16). Bu tutunma sayesinde kanat üst yüzeyindeki basınç da düşürülmüştür (Şekil 3.17).



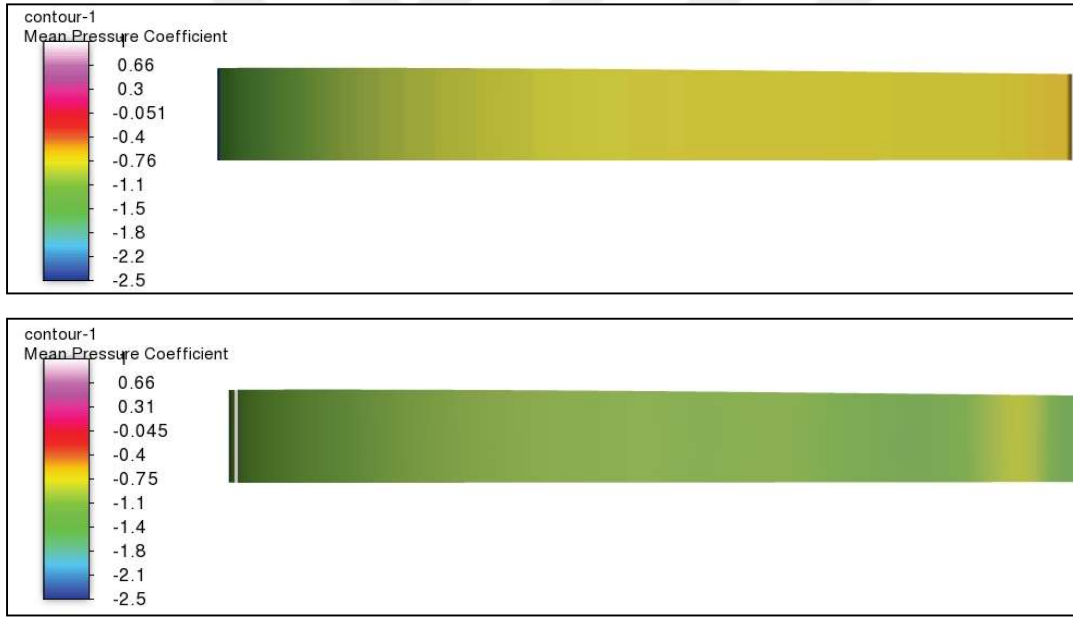
Şekil 3.14. Daimi olmayan akış benzetmelerinden $\alpha=16^\circ$ için $z=0$ düzleminde elde edilen anlık hız konturları



Şekil 3.15. Daimi olmayan akış benzetmelerinden $\alpha=16^\circ$ için $z=0$ düzleminde elde edilen m^2/s^2 cinsinden anlık türbülans kinetik enerji konturları



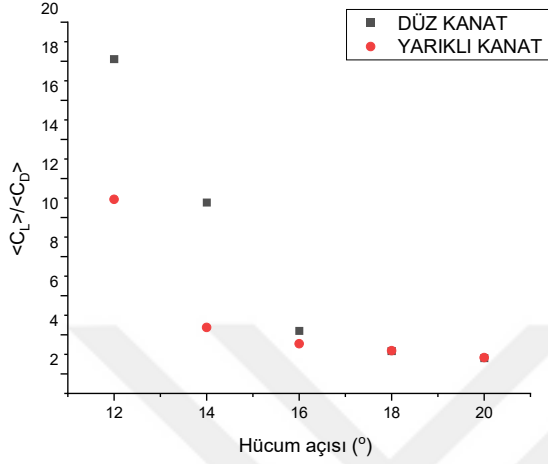
Şekil 3.16. Daimi olmayan akış benzetmelerinden $\alpha=16^\circ$ için $z=0$ düzleminde elde edilen anlık z-çevrinti konturları



Şekil 3.17. Aynı hücum açısında her iki kanat üst yüzeyindeki $\langle C_p \rangle$ dağılımları

Hücum açısının 16° değerinde elde edilen bu durum sayısal çalışmada elde edilmek istenen temel amaca uygun bir fiziksel olaydır. Tasarlanan mevcut yarık geometrisinden dolayı bu fiziksel olay yalnızca $\alpha=16^\circ$ değerinde elde edilmiştir. Sayısal çalışmalarla ilgili önceki bölümde de bahsedilen hesaplama kaynaklarının yetersizliği farklı yarık geometrisi parametrelerinin (giriş yarığı açısı, çıkış yarığı açısı, çıkış yarığının hücum kenarına olan mesafesi gibi) incelenmesini engellemiştir. Bu açıda $\langle C_L \rangle$ değeri için elde edilen artışa karşılık $\langle C_D \rangle$ değeri de benzer oranda artmıştır. Bu da, yarıklı kanat aerodinamik

performansının düz kanadinkinin üzerine bu açıda bile çıkmasını engellemiştir (Şekil 3.18). Hücüm açısının $\alpha=18^\circ$ ve 20° değerleri haricinde aerodinamik performans bakımından yarıklı kanadın düz kanada kıyasla daha düşük bir seviyede kaldığı Şekil 3.18 içerisinde görülmektedir.



Şekil 3.18. Daimi olmayan akış benzetimlerinden her iki kanat için elde edilen aerodinamik performansın, $\langle C_L \rangle / \langle C_D \rangle$, hücüm açısına göre değişimleri

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde daha çok savunma sanayimizle anılan insansız hava araçları (İHA) aslında çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Geniş alanları ve büyük yapıları üç-boyutlu olarak tarama, zirai ilaçlama, çeşitli organizasyonlarda video kaydı yapma, afet durum görüntüleme, arama-kurtarma (search-and-rescue), istihbarat toplama (intelligence), hedef/nesne/aktivite gözetleme (surveillance), yarışmalar, düşman hedeflerini keşfetme (reconnaissance), hedef imhası, hedef işaretlenmesi, sınır güvenliği (border protection), vahşi belgesellerin çekimi gibi insan hayatını riske sokabilecek bölgelerde kayıtlar alma gibi işler bunların yalnızca bazılarıdır.

İHA'ların taşıyabileceği faydalı yük kapasitesini arttırmak onların kalitesini arttırmak adına atılabilecek önemli bir durumdur. Bunu sağlamak için başvurulacak bir yöntem de İHA'larda kullanılan kanatların aerodinamik performansını herhangi bir akış kontrol yönteminden faydalanarak iyileştirmektir. Bu tez çalışmasında da düşük-Reynolds sayılı kanat profillerinden olan E387 üzerinde yarık açma olarak bilinen bir pasif akış kontrol yöntemi uygulanarak, yarık açılmamış orijinal hali ile aerodinamik açıdan kıyası yapılmıştır. Bu kıyas, sabit kanatlı bir ve mini İHA sınıfına giren bir İHA'nın uçtuğu genel hız aralığına tekabül eden Reynolds sayısı $Re_c=200000$ değerindeki durum için ve sayısal olarak elde edilen veriler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler üzerinden çıkarılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde listelenmiştir.

- Düz kanat için kurulan ve daimi şartlarda koşturulan sayısal model, çok küçük çaplı akış ayrılmalarını içeren -2° ile 10° hücum açısı aralığında deneysel verilere çok yakın veriler elde edilmesini sağlamış ve akış fiziğini iyi bir şekilde simüle edebilmiştir. Düz kanat için kurulan ve daimi olmayan şartlarda koşturulan sayısal model de hafif akış ayrılmalarının başladığı 12° ile 16° hücum açısı aralığında deneysel verilere yakın veriler elde edilmesini sağlamış ve akış fiziğini iyi bir şekilde simüle edebilmiştir. Akışın kanat yüzeyine tutunmamak üzere ayrıldığı ve model arka kısmında çevriler oluşturduğu (derin stolun gerçekleştiği) hücum açılarındaki ise deneysel verilerden daha yüksek veriler elde edilmiştir. Bundan dolayı, kanatlar etrafındaki akışlarda en çok tercih edilen türbülans modellerinden olan geçişli kayma gerilmesi transportun (Transition SST) derin stol sürecini yeterli doğrulukta simüle edemediği kanısına varılmıştır.

- Çalışmada, hesaplama kaynaklarının ve ilgili yazılım lisansının yoksunluğundan dolayı, kanat içerisinde tasarlanan yarık geometrilerinden yalnızca bir tanesi test

edilebilmiştir. Bu yarıklı kanat modeli ise yarıksız modele kıyasla yalnızca bir hücum açısı değerinde, $\alpha=16^\circ$, zaman-ortalamalı kaldırma katsayısı değerinde artış sergilemiştir. Bu artışı, kanat hücum kenarına yakın bir bölgeden ayrılan serbest kayma tabakalarına çıkış yarığında oluşturduğu jet ile gerçekleştirmiştir. Bu jet, kayma tabakalarına momentum aktarımı yaparak onları daha enerjik hale getirmiş ve kanat üst yüzeyine yeniden tutunmalarını sağlamıştır. Yeniden tutunan kayma tabakaları üst yüzeydeki düşük basıncı daha düşürerek $\langle C_L \rangle$ değerini arttırmışlardır.

- İncelenen Re_c değerindeki farklı hücum açıları için aerodinamik performans, $\langle C_L \rangle / \langle C_D \rangle$, bakıldığında, yarıklı kanadın yarıksıza (düz) göre daha az başarılı olduğu görülmüştür. Bu da, mevcut tasarımda değişikliğe gidilmesi gerektiğini bize göstermiştir.

- Stol öncesindeki orta hücum açılı durumlara kadar, $\alpha \leq 10^\circ$, kanat yüzeyinde gelişen sınır tabakanın laminar yapısını bozmamak gerektiği görülmüştür. Bu sebeple, tasarlanması gereken yarığın bir aktif akış kontrol yöntemi ile tasarlanması gerektiğine kanaat getirilmiştir. Bu aktif akış kontrol yöntemi belirli bir hücum açısına kadar yarığı kapatacak, gerek duyulan hücum açılarında ise yarığı açarak jet oluşturulacak şekilde tasarlanabilir.

Bu sonuçlarla birlikte tasarlanan fakat tez süresince pratiğe aktarılamayan bazı öneriler de ortaya çıkmıştır ve bunlar aşağıda sıralanmıştır:

1. Mevcut çalışmada gerçekleştirilen benzetimler yalnızca bir kanat profili, E387, için gerçekleştirilmiştir. Bunun temel sebebi bu kanatla ilgili deneysel veri bolluğundan kaynaklanmaktadır. Farklı profile sahip kanatlar için tasarlanan yarığın aerodinamik açıdan nasıl bir performans sergileyeceği bilinmemektedir.
2. Sayısal çalışma, deneysel çalışmadaki verilerle uygunluk oluşturması açısından %0,1'lik serbest akım türbülans şiddetine sahip akış durumu için test edilmiştir. Farklı serbest akım türbülans şiddetinin yarıklı kanadın performansını nasıl etkileyeceği henüz bilinmemektedir.
3. Yarık geometrik parametrelerinden çıkış yarığı genişliğinin giriş yarığı genişliğine oranı, özellikle kanat üst yüzeyinde gelişen sınır tabakaya müdahale için oluşturulan jetin hızını değiştirebilmektedir. Bu oran değiştirilerek yarıklı kanadın performansı incelenebilir.
4. Tez çalışmasında kullanılan yarık geometrisinde, kanat $\alpha=0^\circ$ pozisyonunda iken, çıkış yarığının açısı 90° olarak tasarlanmıştır. Bu açıyı saat yönünde kanat yüzeyine

yaklaştırarak farklı hücum açılarında test ederek yarıklı kanadın performansı incelenebilir.

5. Bir diğeri incelenemeyen ve öneri olarak sunulan parametre de çıkış yarığının hücum kenarından olan konumudur. Bu parametre de diğeri parametrelerle farklı kombinasyonlar halinde test edilebilir.



5.KAYNAKLAR

- Acarer, S.,** 2020 Peak lift-to-drag ratio enhancement of the DU12W262 airfoil by passive flow control and its impact on horizontal and vertical axis wind turbines. *Energy*, 201, 117659.
- ANSYS, Inc.,** 2013. *ANSYS Fluent Theory Guide*, Release 15.0.
- Aziz, M.A., Elsayed, A.M.,** 2018 Numerical investigation and optimization of airfoil flow control using passive air-jet. *Thermophysics and Aeromechanics*, 26(3), 361-374.
- Belamadi, R., Djemili, A., Ilinca, A., Mdouki, R.,** 2016. Aerodynamic performance analysis of slotted airfoils for application to wind turbine blades. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 151, 79-99.
- Chapman, J., Manoharan, S.,** 2019. Numerical Investigation of Flow Characteristics of a Slotted NACA 4414. *ASEE Annual Conference & Exposition*, Tampa Florida 15-19 June, s. 18-725
- Gad-El-Hak, M.,** 2000. *Flow Control: Passive, Active and Reactive Flow Management*. Cambridge University Press, New York, ISBN 0, 521, 77006.
- Gunasekaran, S., Gerham, T.,** 2018. Effect of Chordwise Slots on Aerodynamic Efficiency. In *2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting*, (p. 0342).
- Selig, M.S., McGranahan, B.D.,** 2004. Wind tunnel aerodynamic tests of six airfoils for use on small wind turbines. Subcontractor Report, NREL/SR-500-34515.
- Ni, Z., Dhanak, M., Su, T.C.,** 2019. Improved performance of a slotted blade using a novel slot design. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 189, 34–44 ,
- Whitman, N., Sparks, R., Ali, S., Ashworth, J.,** 2006. Experimental Investigation of Slotted Airfoil Performance with Modified Slot Configurations. In *24th AIAA Applied Aerodynamics, San Francisco, California, Conference 5-8 June*, (p. 3481).
- URL-1,** 2021. <https://practicalmotoring.com.au/car-advice/automotive-aerodynamics-explained/>, Automotive aerodynamics explained, 4 Mayıs 2022.
- URL-2,** 2014. <https://www.autocar.co.uk/car-news/motor-shows/jaguar-c-x17-suv-shown-brussels>, Jaguar C-X17 SUV shown in Brussels, 4 Mayıs 2022.
- URL-3,** 2022. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=e387-il>, 4 Mayıs 2022.
- URL-4,** 2022. <https://www.baykartech.com/en/uav/bayraktar-mini-ihai/>, 4 Mayıs 2022.
- URL-5,** 2022. <https://www.thalesgroup.com/en/global/activities/defence/unmanned-aerial-vehicles-systems/mini-uav-sea>, 5 Mayıs 2022.

URL-6, 2022 <https://www.avinc.com/uas/raven>, 4 Mayıs 2022.

