

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOĞADAN ESİNLENİLEN KANATLARDA DALGALI HÜCUM
KENARININ AERODİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aleyna ÇOLAK

EYLÜL 2023
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOĞADAN ESİNLENİLEN KANATLARDA DALGALI HÜCUM
KENARININ AERODİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

Aleyna ÇOLAK

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

"MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ"

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 / 07 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 18 / 09 / 2023

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mustafa SARIOĞLU

ORCID :

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

“Doğadan Esinlenilen Kanatlarda Dalgalı Hücüm Kenarının Aerodinamik Karakteristiklerinin İncelenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca değerli görüş ve önerileriyle yol gösteren danışmanım Doç. Dr. Mustafa SARIOĞLU’na ve hiçbir desteğini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Mehmet SEYHAN’a en içten teşekkürlerimi sunarım. Tüm destekleri için değerli hocalarım Öğr. Gör. Veysel DEMİRCİ, Dr. Öğr. Üyesi Erhan FIRAT ve Dr. Öğr. Üyesi Hürrem AKBIYIK’a teşekkür ederim. Bu süreçte desteklerinin önemini kelimelerle tarif edemeyeceğim arkadaşlarım Büşra YAVUZ, Saliha GENÇ ERDEM ve Fırat ERDEM’e teşekkür ederim.

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen 118M592 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Proje kapsamında sağladıkları destek için TÜBİTAK’a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, her konuda yanımda olan canım aileme teşekkür ve minnetlerimi sunarım.

Aleyna ÇOLAK

Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Doğadan Esinlenilen Kanatlarda Dalgalı Hücum Kenarının Aerodinamik Karakteristiklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Mustafa SARIOĞLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 18/09/2023

Aleyna ÇOLAK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Akış Kontrol ve Biomimetik	2
1.2. Kambur Balina (<i>Megaptera novaeangliae</i>).....	5
1.3. Kambur Balina Yüzgeçleri.....	7
1.4. Dalgalı Hücum Kenarı.....	8
1.5. Dalgalı Geometrinin Etkileri ve Önerilen Mekanizmalar	13
1.6. Uygulama Alanları	14
1.7. Tezin Amacı ve Kapsamı	16
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	18
2.1. Rüzgâr Tüneli	18
2.2. Test Modellerinin Oluşturulması.....	19
2.3. Kuvvet Ölçüm Sistemi	25
2.4. Akış Görüntüleme Yöntemleri	28
2.4.1. Yüzey Yağ Akış Görüntüleme Yöntemi	28
2.4.2. Duman Tel Akış Görüntüleme Yöntemi	31
2.5. Tekrarlanabilirlik Analizi	32
2.6. Belirsizlik Analizi.....	33
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	34
3.1. Yüzgeç Modeller için Deneysel Sonuçlar	34
3.1.1. C1, C2 ve C3 Modellerinin Kuvvet Ölçümlerinin Değerlendirilmesi.....	35
3.1.2. C1, C2 ve C3 Modellerinin Yağ Akış Görüntüleme Yöntemi ile Değerlendirilmesi.....	41

3.1.3. C4, C5 ve C6 Modellerinin Kuvvet Ölçümlerinin Değerlendirilmesi.....	49
3.1.4. C4, C5 ve C6 Modellerinin Yağ Akış Görüntüleme Yöntemi ile Değerlendirilmesi.....	57
3.1.5. Temel Modeller için Duman Tel Akış Görüntüleme Sonuçları.....	62
3.2. Yüzgeç ve Dikdörtgen Modellerin Karşılaştırılması.....	64
4. SONUÇLAR.....	67
5. ÖNERİLER.....	69
6. KAYNAKLAR	70
7. EKLER.....	77
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DOĞADAN ESİNLENİLEN KANATLARDA DALGALI HÜCUM KENARININ AERODİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

Aleyna ÇOLAK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Mustafa SARIOĞLU
2023, 76 Sayfa, 2 Ek Sayfa

Bu çalışmada kambur balina yüzgeçlerinde bulunan dalgalı geometri daha gerçekçi yaklaşımla modellenerek dalgalı geometrinin kanat aerodinamiği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Dalga geometrisinin etkilerini incelemek için kuvvet ölçümleri ve akış görüntüleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler, dalgalı geometriye sahip 8 yüzgeç modeli ve 4 dikdörtgen kesitli NACA 0020 kanat modeli kullanılarak $5 \times 10^4 - 1.2 \times 10^5$ Reynolds sayıları aralığında gerçekleştirilmiştir. Kuvvet ölçümlerine göre dalgalı modeller düz modele göre stol sonrasında taşımada iyileşme sağlamıştır. Akış görüntüleme sonuçları, dalgalı kanatta düz kanatta oluşan laminar ayrılma kabarcığı yerine ters dönen girdap çiftlerinin oluştuğunu göstermektedir. Dikdörtgen ve yüzgeç modellerinin kuvvet grafiklerinin de benzer eğilimlere sahip olduğu görülmüştür. Dalga geometrisini oluşturan dalga boyu ve genlik değerlerini boyutsuz olarak ifade eden Ms sayısı aynı olan C3 ve C6 modelleri hem düz modele göre hem de diğer dalgalı modellere göre daha yüksek aerodinamik performansa sahip modeller olarak belirlenmiştir. C6 modeli düz modele göre 1.2×10^5 Reynolds sayısında maksimum taşıma katsayısında yaklaşık %16 artış sağlamıştır. Ayrıca dalga geometrisine sahip tüm yüzgeç modelleri stol açısını öteleyerek stol karakteristiklerini iyileştirmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kambur balina, Yüzgeç model, Taşıma katsayısı, Sürükleme katsayısı

SUMMARY

Master Thesis

INVESTIGATION OF THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF LEADING- EDGE TUBERCLES ON BIOMIMETIC WINGS

Aleyna ÇOLAK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Mustafa SARIOĞLU
2023, 76 Pages, 2 Pages Appendix

In this study, the wave geometry in humpback whale flippers was modeled with a more realistic approach and the effects of the leading-edge tubercles on wing aerodynamics were investigated. Force measurements and flow visualization experiments were performed to investigate the effects of the leading-edge tubercles. The experiments were conducted in the Reynolds number range of $5 \times 10^4 - 1.2 \times 10^5$ using 8 flipper models and 4 rectangular NACA 0020 airfoil models. According to the force measurements, the wavy models exhibited enhancement in lift compared to the baseline model at post-stall. Flow visualization results indicated the formation of counter-rotating vortex pairs on the wavy wing instead of the laminar separation bubble observed on the baseline wing. Similar trends were observed in the force measurement of the rectangular and flipper models. Models C3 and C6, which had the same non-dimensional M_s number defining the wave geometry, were identified as models with higher aerodynamic performance compared to both the baseline model and wavy models. The C6 model provided about 16% increase in maximum lift at $Re=1.2 \times 10^5$ compared to the baseline model. In addition, all flipper models having wave geometry improved stall characteristics by delaying the stall angle.

Key Words: Humpback whale, Flipper model, Lift coefficient, Drag coefficient

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Akış kontrol mekanizmalarında hedeflenen iyileşmeler (Gad-El-Hak, 2000).....	3
Şekil 2.	Kambur balina (<i>Megaptera novaeanglia</i>) (URL-1, 2023)	6
Şekil 3.	Kabarcık ağı (bubble net feeding) yöntemi (Moscato vd., 2022).....	7
Şekil 4.	(a)Kambur balina yüzgeç görünümü (Fish & Battle, 1995) (b)yüzgeç kesit alanı(New & Ng) ve (c) kambur balina yüzgeci (Fish vd., 2008)	8
Şekil 5.	(a) Sinüzoidal eğri (Miklosovic vd., 2007) (b) eğri (F-spline) ile elde edilen dalga yapısı (Lu vd., 2021) (c) eğri uydurma ile elde edilen dalga yapısı (Srinivas vd., 2018)(d) daha gerçekçi yaklaşımla elde edilen dalga yapısı (Seyhan vd., 2021).....	12
Şekil 6.	(a) Dalgalı yapıda üretilmiş sörf tahtası (Shormann & Panhuis, 2020) (b) sörf tahtası (c) rüzgâr türbin kanadı (Fish vd., 2011).....	16
Şekil 7.	Rüzgâr tünelinin genel görünümü	19
Şekil 8.	Yüzgeç modelleri (Miklosovic vd., 2007).....	20
Şekil 9.	Dalga geometrisinin oluşturulması	21
Şekil 10.	NACA 0020 yüzgeç modelleri	22
Şekil 11.	NACA 0020 dikdörtgen kesitli uçak kanadı modelleri	23
Şekil 12.	(a) B1 ve (b) B2 yüzgeç modellerinin yüzey pürüzlülükleri	24
Şekil 13.	B1 modeli için blokaj oranı	25
Şekil 14.	Kuvvet ölçüm deney düzeneği	26
Şekil 15.	B1 modelinin (a) 5.0×10^4 ve (b) 1.0×10^5 Reynolds sayılarında uç plakalı ve uç plakasız kuvvet ölçümlerinin karşılaştırılması.....	27
Şekil 16.	Yüzey yağ akış görüntüleme (a) deney düzeneği (b) uygulama örneği	30
Şekil 17.	Duman tel akış görüntüleme deney şematiği.....	31
Şekil 18.	Düz yüzgeç modelinin C_L ve C_D değerlerinin $Re=1.2 \times 10^5$ için tekrarlanabilirliği	32
Şekil 19.	Literatürde kullanılan yüzgeç modellerinin farklı Reynolds sayılarında (a) C_L ve (b) C_D katsayılarının karşılaştırılması	35
Şekil 20.	B1, B2, C1, C2 ve C3 modellerinin $Re=5.0 \times 10^4$ için (a) C_L (b) C_D (c) L/D oranlarının karşılaştırılması.....	37
Şekil 21.	B1, B2, C1, C2 ve C3 modellerinin $Re=8.0 \times 10^4$ için (a) C_L (b) C_D (c) L/D oranlarının karşılaştırılması.....	39
Şekil 22.	B1, B2, C1, C2 ve C3 modellerinin $Re= 1.2 \times 10^5$ için (a) C_L (b) C_D (c) L/D oranlarının karşılaştırılması.....	40

Şekil 23.	Laminer ayrılma kabarcığı (LAK) oluşumu ve B1 modelinde LAK oluşumu	42
Şekil 24.	Yüzgeç modelleri B1, B2, C1, C2 ve C3 için 5° hücum açısında yüzey yağ akış görüntüleri	43
Şekil 25.	Yüzgeç modelleri B1, B2, C1, C2 ve C3 için 8° hücum açısında yüzey yağ akış görüntüleri	45
Şekil 26.	Yüzgeç modelleri B1, B2, C1, C2 ve C3 için 10° hücum açısında yüzey yağ akış görüntüleri	46
Şekil 27.	Yüzgeç modelleri B1, B2, C1, C2 ve C3 için 13° hücum açısında yüzey yağ akış görüntüleri	48
Şekil 28.	B1, B2, C4, C5 ve C6 modellerinin $Re=5.0 \times 10^4$ için (a) C_L (b) C_D (c) L/D oranlarının karşılaştırılması.....	50
Şekil 29.	B1, B2, C4, C5 ve C6 modellerinin $Re= 8.0 \times 10^4$ için (a) C_L (b) C_D (c) L/D oranlarının karşılaştırılması	52
Şekil 30.	B1, B2, C4, C5 ve C6 modellerinin $Re= 1.2 \times 10^5$ için (a) C_L (b) C_D (c) L/D oranlarının karşılaştırılması	53
Şekil 31.	Dalgalı geometriye sahip C3 ve C6 modellerinin L/D oranlarının $Re=5.0 \times 10^4$, 8.0×10^4 ve 1.2×10^5 değerlerinde karşılaştırılması	56
Şekil 32.	Yüzgeç modelleri B1, B2, C4, C5 ve C6 için 5° hücum açısında yüzey yağ akış görüntüleri	58
Şekil 33.	Yüzgeç modelleri B1, B2, C4, C5 ve C6 için 8° hücum açısında yüzey yağ akış görüntüleri	59
Şekil 34.	Yüzgeç modelleri B1, B2, C4, C5 ve C6 için 10° hücum açısında yüzey yağ akış görüntüleri	60
Şekil 35.	Yüzgeç modelleri B1, B2, C4, C5 ve C6 için $\alpha=13^\circ$ hücum açısında yüzey yağ akış görüntüleri.....	61
Şekil 36.	Düz B1, dalgalı C3 ve C6 yüzgeç modellerinin karşılaştırması.....	62
Şekil 37.	B1 ve B2 modellerinin tepe ve çukur akış düzlemleri için iki boyutlu duman tel akış görüntülemesi	63
Şekil 38.	Dikdörtgen modellerin aerodinamik karakteristiklerinin $Re=1.2 \times 10^5$ 'te karşılaştırılması.....	65
Şekil 39.	Yüzgeç B1 ve C3 modelleri ile dikdörtgen kesitli düz ve dalgalı S3 modellerinin C_L ve C_D değerlerinin karşılaştırılması ($Re=1.2 \times 10^5$)	66

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Biyomimetik uygulama örnekleri	5
Tablo 2. Literatürde yüzgeç modelinin kullanıldığı çalışmalar	12
Tablo 3. Dalgalı geometrinin önerilen fiziksel etkileri	14
Tablo 4. Modellerin genlik (a) ve dalga boyu (λ) değerleri.....	23
Tablo 5. Literatürde kullanılan karışımlar ve oranları	29
Tablo 6. Yüzgeç modellerin $Re=5.0 \times 10^4$ değerinde aerodinamik parametreleri	54
Tablo 7. Yüzgeç modellerin $Re=8.0 \times 10^4$ değerinde aerodinamik parametreleri	55
Tablo 8. Yüzgeç modellerin $Re=1.2 \times 10^5$ değerinde aerodinamik parametreleri	55

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α	: Hücüm açısı
λ	: Dalga boyu (mm)
μ	: Havanın dinamik viskozitesi (kg/m×s)
ρ	: Havanın yoğunluğu (kg/m ³)
U_0	: Serbest akış hızı (m/s)
a	: Dalganın genliği (mm)
AAK	: Aktif akış kontrolü
A_p	: Kanat alanı (m ²)
c	: Veter uzunluğu (mm)
C_D	: Sürükleme katsayısı
C_L	: Taşıma katsayısı
EBO	: En boy oranı
F_D	: Sürükleme katsayısı (N)
FKA	: Firar kenar ayrılması
FKAÇ	: Firar kenarı ayrılma çizgisi
F_L	: Taşıma katsayısı (N)
L/D	: Taşıma sürükleme oranı
LAK	: Laminer ayrılma kabarcığı
PAK	: Pasif akış kontrolü
R_a	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü
Re	: Reynolds sayısı
TDGÇ	: Ters dönen girdap çifti

1. GENEL BİLGİLER

Havanın hareket halindeki cisimler üzerine etkilerinin incelenmesi olarak ifade edilen aerodinamik, yüzyıllar öncesine uzanan zengin bir geçmişe sahiptir. Yıllar boyunca, aerodinamik ilkelerin anlaşılması için sağlanan ilerlemeler, özellikle kara, deniz ve hava ulaşım alanlarında olmak üzere çeşitli mühendislik uygulamalarının geliştirilmesinde önemli bir rol oynamıştır.

Aerodinamiğin temelleri, mucitlerin hava akışı ile ilgili gözlemler yaptığı ve ilkel deneyler gerçekleştirdiği Mısır, Yunanistan ve Çin eski uygarlıklarına kadar uzanmaktadır. Bu alanda, 15. yüzyılın sonları ve 16. yüzyılın başlarına kadar önemli bir ilerleme kaydedilmemiştir. Leonardo da Vinci, gözlemleri ve kapsamlı çizimleriyle Rönesans dönemi boyunca aerodinamiğin anlaşılmasına önemli ölçüde katkıda bulunmuştur. Kuşlar üzerinde gerçekleştirdiği anatomik çalışmalar, aerodinamik tasarımda daha sonraki gelişmelerin yolunu açmaya yardımcı olmuştur (Anderson, Jr, 1997). 18. yüzyılda, İsviçreli matematikçi Daniel Bernoulli, aerodinamiğin temel bir kavramı olacak olan Bernoulli ilkesini geliştirmiştir. Bu ilke, uçakların uçmasını sağlayan kuvvet olan taşıma kuvvetini anlamının temelini oluşturmaktadır (Mungan vd., 2017). 20. yüzyılın başında Wright Kardeşlerin kontrol kavramlarını kullanarak yenilikçi bir şekilde tasarladıkları Wright Flyer, 1903 yılında ilk motorlu uçuşu mümkün kılmıştır. Bu önemli gelişme modern havacılığın başlangıcı olmuştur (Anderson, Jr, 1997). Birinci Dünya Savaşı sırasında askeri uçakların geliştirilmesi, aerodinamik alanının ilerlemesini hızlandıran önemli bir dönüm noktası olmuştur. Mühendislerin, hava akışının uçak performansı üzerindeki etkilerini araştırmaya başlaması ile kanat tasarımında, sürtünmeyi azaltmada ve stabilite kontrolünde ilerlemeler elde edilmiştir. Savaşın ardından, gelişmiş aerodinamik tasarımlarla daha hızlı ve daha verimli uçaklar mümkün kılındıkça havacılık sektörü hızla büyümüştür (Paula, 2016). 20. yüzyılın ortalarında, yüksek hızlara çıkabilen hava araçları için aerodinamik alanında, önemli ilerlemeler görülmüş ve Concorde gibi süpersonik uçaklar geliştirilmiştir (Paris, 2004). Geçmişten günümüze havacılık tarihinde yaşanan önemli gelişmeler sadece aerodinamikte yaşanan iyileşmelerle sınırlı olmasa da aerodinamik bu sektörün en temel ve belirleyici unsurlarından biridir. Bu sebeple aerodinamik akış kontrolüne bir akış içerisinde bulunan araçlarda titreşim, gürültü ve akış ayrılması gibi akıştan kaynaklı problemlerin çözümü ya da etkilerinin azaltılması için ihtiyaç duyulmaktadır. Akış kontrolü ile ihtiyaç

duyulan iyileştirmelerin sağlanması akış kaynaklı problemlerin çözümünü sağlamakla birlikte endüstriyel uygulamalara da önemli katkılar sağlamaktadır (Gad-El-Hak, 2000).

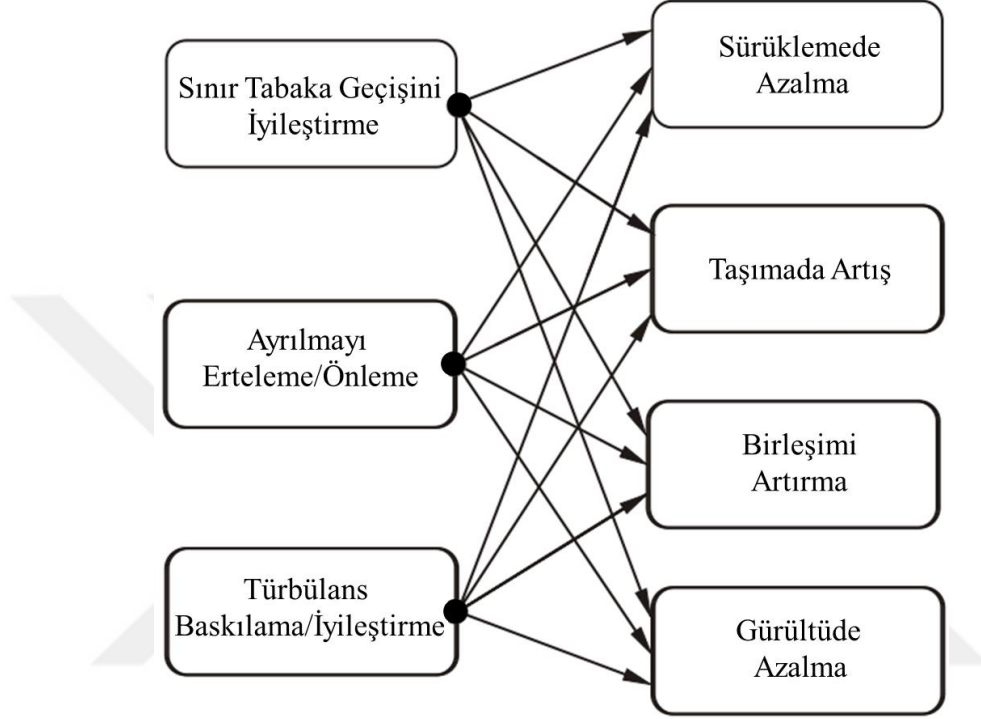
Biyomimetik, aerodinamik özellikler de dahil olmak üzere çeşitli özellikleri taklit etmek için doğada bulunan yapısal, fiziksel ve kimyasal özelliklerin karmaşık etkileşimini taklit etmektir (Bar-Cohen, 2005). Araştırmacılar, doğanın adaptasyonlarını ve mekanizmalarını analiz ederek kuşlar, böcekler ve deniz organizmalarından ilham alan yenilikçi teknolojiler oluşturmuşlardır. Bu biyomimetik yöntemler, yenilenebilir enerji, otomobil sektörü ve havacılık gibi çeşitli mühendislik alanlarında etkinliği ve sürdürülebilirliği artırmayı amaçlamaktadır. Aerodinamik üzerine yapılan çalışmalar, eski uygarlıkların ilk gözlemlerinden modern hesaplama tekniklerine ve biyomimetik yaklaşımların gelişimine kadar ilerlemiş ve gelişmeye devam ederek daha verimli mühendislik sistemlerinin oluşturulmasına olanak sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında, dalga geometrisinin biyomimetik kanatlar olan yüzgeç modeli üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla dalgalı geometriye sahip modeller için farklı dalga boyu ve genlik kombinasyonları oluşturularak düz ve dalgalı modellerin aerodinamik performansları incelenmiştir. Bu çalışma, literatürden farklı olarak düzgün dağılıma sahip olmayan kambur balina yüzgeç geometrisini daha gerçekçi bir yaklaşımla incelemiştir. Bu tez çalışması biyomimetik aerodinamik bir uygulaması olduğu için bundan sonraki bölümlerde biyomimetik ve akış kontrol üzerine odaklanılarak dalgalı geometrinin etkileri daha ayrıntılı açıklanmıştır.

1.1. Akış Kontrol ve Biomimetik

Aerodinamik akış kontrolü, aerodinamik performansı iyileştirmek için akış alanına uygulanan teknik ve yöntemleri ifade etmektedir. Sınır tabakası teorisini öneren ve ayrılma fenomeninin fiziğini açıklayan Prandtl, 1904 yılında akış alanını kontrol etmeye yönelik bilimsel yaklaşımın temelini atmıştır (Gad-El-Hak, 1996). Akış alanını kontrol etme kabiliyeti, mühendislik açısından önemli getiriler taşımaktadır. Akış kontrolü ile temel olarak akış ayrılmasının önlenmesi ya da ertelenmesi, aerodinamik ya da hidrodinamik karakteristiklerin iyileştirilmesi, gürültü ve titreşimin azaltılması hedeflenmektedir. İstenilen bu iyileştirmeler ile kara, hava ve deniz araçlarında yakıt tasarrufu, yolcu konforu, uçuş güvenliği, karbon salınımının azaltılması gibi önemli katkılar sağlanabilmektedir. Mühendislik alanında hedeflenen iyileştirmeler ve buna bağlı olarak akışta meydana gelen

değişiklikler Şekil 1’de şematik olarak gösterilmiştir. Sınır tabaka geçişinde iyileşme, ayrılmayı erteleme veya önleme, türbülansa sağlanan iyileştirmeler ile aerodinamik kuvvet katsayılarının iyileştirilmesi, birleşimi artırma (mixing augmentation), gürültü ve titreşimde azalma sağlanması mümkün olabilmektedir (Gad-El-Hak, 2000).



Şekil 1. Akış kontrol mekanizmalarında hedeflenen iyileşmeler (Gad-El-Hak, 2000)

Akış kontrolü enerji harcanıp harcanmamasına göre aktif ve pasif kontrol olarak iki gruba ayrılmaktadır. Pasif akış kontrolü (PAK) yöntemlerinde kontrol, enerjiye ihtiyaç duymadan geometrik eklemelerle sağlanırken, aktif akış kontrolü (AAK) yöntemlerinde akışı kontrol etmek, enerji girdisi gerektirmektedir. AAK yöntemleri gerçek zamanlı koşullara göre ayarlanabilir olmasından dolayı karmaşık ve dinamik akış durumları için kullanılabilir.

PAK yöntemleri ile, enerji girişi olmaksızın akış özelliklerini değiştirmek için bir cismin geometrik şeklini, yüzeyini veya konfigürasyonunu değiştirilmektedir. PAK yöntemlerinde genel olarak yapılan geometrik değişiklikler; çukur (dimples) gibi cisim yüzeyinde çıkıntılar ve girintiler, gözenekli yüzeyler, yüzey pürüzlülüğü, keskin köşelere uygulanan işlemler, cismin yüzeyine dalga geometrisinin eklenmesi olarak sıralanabilir. Bu geometrik değişiklikler dikkatlice tasarlanarak akış koşullarına göre uyarlanmaktadır ve deniz, kara,

hava araçlarından rüzgâr türbinlerine kadar çeşitli mühendislik sistemlerinin performansını artırmak için çözümler sunmaktadır. AAK yöntemlerine örnek olarak yüzeyde emme ve üfleme (Atzori vd., 2020), sentetik jet (Hao Feng vd., 2010), plazma aktüatör (Corke vd., 2010; Güler vd., 2018) ve ters dönen silindirler (Chan vd., 2011) verilebilir. Pasif kontrol, geometrik modifikasyonlar yapılarak gerçekleştirilmektedir. Girdap üreteçleri (Fouatih vd., 2019), kontrol çubuğu (Firat vd., 2015), ayırıcı plaka (Sarioglu vd., 2006) ve hücum kenar dalgalı yapısı (Sudhakar vd., 2020) PAK yöntemlerinin klasik örnekleridir. Genellikle AAK yöntemleri daha etkili gibi görünse de maliyet açısından incelendiğinde PAK yöntemlerine göre daha maliyetlidir. Bir askılı köprüde ya da yüksek katlı bir binada PAK yöntemlerinin kullanılması, karmaşık olan AAK yöntemlerinin kullanılmasına kıyasla daha uygulanabilir. Ayrıca herhangi bir PAK yönteminin avantajı, ek masraf ve enerjiye ihtiyaç duyulmadan uygulanabilmesi ve sürdürülebilmesidir (Mishra vd., 2020).

Genel olarak, AAK ve PAK yöntemleri, çeşitli uygulamalarda verimli bir akış kontrolü elde etmek için biyolojik sistemlerden ilham almaktadır. Örnekler arasında kafadanbacaklıların (cephalopod) itiş gücünden esinlenen sentetik jet aktüatörler (Tang vd., 2020) yer almaktadır. Bu yaklaşımlar akış kontrolünü, enerji dönüşümünü ve biyoteknolojik süreçleri geliştirmek için yenilikçi çözümler sunmaktadır.

Biyomimetik, biyolojik sistemlerden ilham alarak bu biyolojik organizmaların özelliklerini ve işlevlerini insan temelli teknolojilerin tasarım ve işleyişine dahil etmeye çalışan bir çalışma alanıdır (Bhushan, 2009). Biyolojik mekanizmaların mühendislik alanlarına uygulanması ve biyomimetik yoluyla mühendislik problemlerinin çözülmesi şeklinde gerçekleştirilmesi ile biyomimetik yaklaşım endüstriyel alanlarda giderek önem kazanmaktadır (Miyauchi & Shimomura, 2019). Aerodinamik alanda özellikle kuşlar ve deniz canlılarının özellikleri dikkate alınarak havacılık alanında performansta iyileştirmeler amaçlanmaktadır (Rose vd., 2021). Tablo 1’de aerodinamik performansta artışa olanak veren doğadaki bazı canlıların özellikleri ve sağladıkları iyileştirmeler sunulmuştur.

Çeşitli kuş türlerinin kanat ucu tüyleri, kanatçıklar (winglets) için ilham kaynağı olmuştur. Kanatçıklar, uçakların kanat uçlarına veya rüzgâr türbini kanatlarına eklenen yapılardır ve kanat ucu (wing tip) girdaplarının oluşmasını azaltarak sürtünmeyi düşürmekte ve yakıt verimliliğini artırmaktadır (Kulak vd., 2021).

Tablo 1. Biyomimetik uygulama örnekleri

Yazarlar	Mekanizmalar	Sağlanan Etki
Rao & Liu (2020)	Hücum kenarında çentikler -Baykuşlar	Aerodinamik verimlilik
H. Chen vd. (2013)	Riblets-Kepçe kuşu	Sürüklemeye azalma
Ito vd. (2019)	Alula- Doğan	Akış ayrılmasında kontrol
Siddiqui vd. (2017)	Kanat ucu tüyleri- Harris Şahinler	Sürüklemeye azalma
Dean & Bhushan (2010)	Köpek balığı	Sürüklemeye azalma
Cummins vd. (2018)	Karahindiba	Taşımada iyileşme

Deniz canlılarından kambur balinanın hidrodinamik adaptasyonlardan ilham alarak performans iyileştirmek için kullanılan kambur balina yüzgeçlerinde bulunan dalgalı yapı PAK yöntemine örnek olarak verilebilir. Bu dalgalı yapının taşımada artış sağladığı, stolu geciktirdiği, sürüklemeye kuvvetinde azalma sağladığı ve genel olarak kanatlar üzerinde performansı önemli derecede iyileştirdiği bilinmektedir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde kambur balina yüzgeci hücum kenar geometrisi farklı terimlerle ifade edilmiştir. Bu dalga geometrisini ifade ederken yumru (tubercle)(Hansen vd., 2011), çıkıntı (protuberance)(Cai, Zuo, Liu, vd., 2018), yumru (bump)(Watts & Fish, 2001), sinüzoidal (sinusoidal)(Ntantis vd., 2021) ve dalgalı (wavy)(Xing vd., 2023) gibi terimler kullanılmıştır. Genel olarak aynı anlama gelen bu ifadelerden, dalgalı yapıyı ifade etmek için bu tez çalışmasında dalgalı geometri ifadesi kullanılmıştır.

1.2. Kambur Balina (*Megaptera novaeangliae*)

Kambur balina (*Megaptera novaeangliae*) balinaların ve yunusların dahil olduğu deniz takımının bir üyesidir. Bu gruplandırma içinde kambur balinaların üyesi olduğu aile, mavi balina (*Balaenoptera musculus*), oluklu balina (*Balaenoptera physalus*) ve minke (*Balaenoptera acutorostrata*) balinalarını içerir (New & Ng, 2020). Şekil 2’de kambur balina ve yüzgeçleri görülmektedir. Tüm deniz memelileri gibi kambur balinalar da kuyruklarının salınımı ile yüzmekte ve manevra için kontrol yüzeyleri olarak yüzgeçlerini

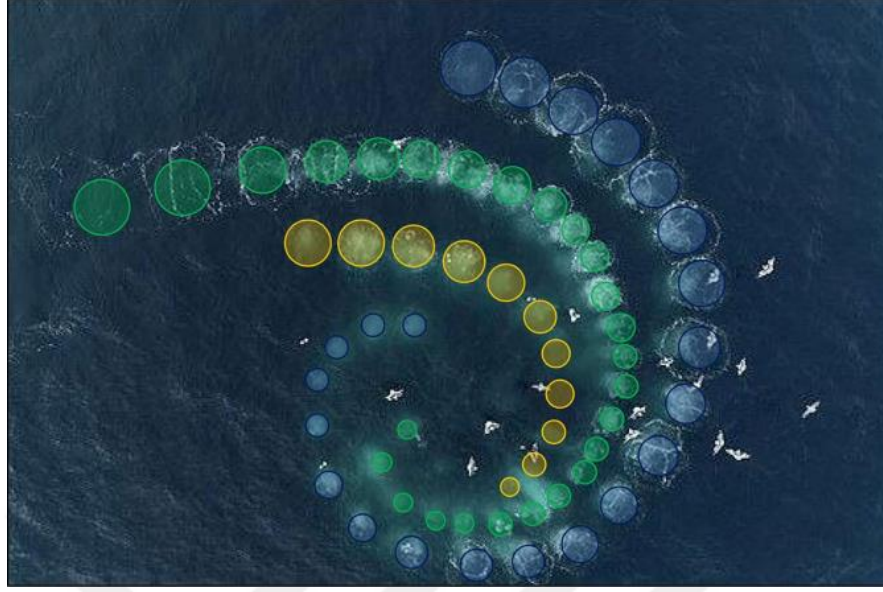
kullanmaktadır (Fish, 2002). Balinaların en büyüğü olmasa da kambur balina diğer balinalara kıyasla nispeten kısa ve daha iri bir balıdır. Uzunlukları 19 metreye, ağırlıkları 53 tona ulaşabilir (New & Ng, 2020). İri cüssesine rağmen kambur balinalar yüksek manevra kabiliyetine sahiptir (Fish & Rohr, 1999).



Şekil 2. Kambur balina (*Megaptera novaeangliae*) (URL-1, 2023)

Yüksek manevra kabiliyetinin beslenme davranışları ile ilişkili olduğu düşünülmüştür. Kambur balinalar güçlü dönüş, yüze çıkma ve dalış yetenekleri gerektiren birkaç avlanma tekniği kullanmaktadırlar. Bu teknikler hamle avlanma (lunge feeding), iç döngü avlanma (inside loop), kabarcık ağı (bubble-net) avlanması olarak incelenmiştir (Fish & Battle, 1995).

Hamle avlanma (lunge feeding) yönteminde kambur balinalar 30°- 90° aralığında bir açıyla su yüzeyine yüzerken yaklaşık 2,6 m/s hızla avına doğru ilerlemektedir (Jurasz & Jurasz, 1979). İç döngü (inside loop) avlanma yönteminde kambur balina önce avından uzaklaşır sonra keskin bir U dönüşü ile avına ilerlemektedir (Edel & Winn, 1978). Kabarcık ağı (bubble net feeding) yönteminde ise, balina deniz yüzeyine doğru yüzerken bir kabarcık ağı (bubble net) üretmektedir. Yarım daireler ve tam daireler şeklindeki kabarcık sütunları kabarcık ağlarını oluşturmaktadır. Şekil 3'te iş birliği içerisinde üç kambur balina tarafından oluşturulan ağ tekniği görülmektedir. Ortaya çıkan kabarcıklar avı çevreler ve böylece balina ağın ortasından yukarı doğru yüzerken büyük miktarda avı yakalayabilmektedir. Daha küçük bir dönüş yarıçapı, avın kabarcıklar içinde daha yoğun bir şekilde bulunacağı anlamına gelir ve bu da besleme yönteminin etkinliğini artırabilmektedir (Fish & Battle, 1995).



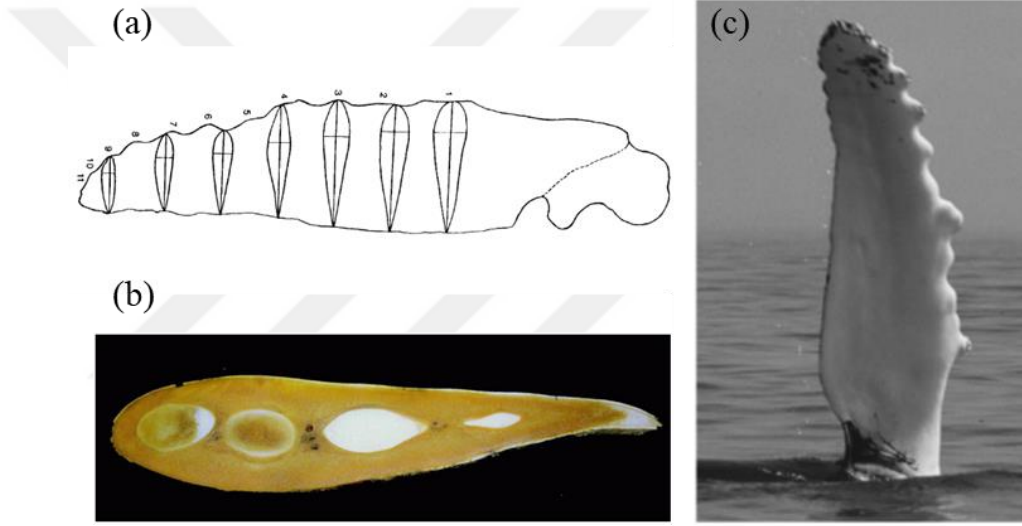
Şekil 3. Kabarcık ağı (bubble net feeding) yöntemi (Moscato vd., 2022)

Kambur balinaların dönüş yarıçapı Weihs (1981) tarafından, balinaya etki eden atalet kuvvetinin yüzgeçler tarafından üretilen taşıma kuvvetine eşitlenmesiyle hesaplanmıştır ve daha dar bir dönüşün daha büyük bir taşıma katsayısı veya daha büyük yatış açısı ile gerçekleştirilebileceğini göstermiştir. Avlanma teknikleri ile ani dönüşler için daha yüksek taşıma kuvveti oluşması gerektiği ve bunu da kambur balina yüzgeçlerinin sağladığı öne sürülmüştür.

1.3. Kambur Balina Yüzgeçleri

Kambur balinalar vücut ölçüleri dikkate alındığında diğer deniz canlılarına göre daha uzun yüzgeçlere sahiptir. Kambur balinaların yüzgeç uzunluğu 5 metre üzerinde olabilir. Yüzgeç en boy oranı (EBO) 3.6 ila 7.7 arasında değişmektedir (Fish & Battle, 1995). EBO kanat açıklık uzunluğunun kanat alanına bölünmesi ile hesaplanmaktadır ve EBO ile bir kanadın taşıma ve sürüklenme performansı arasında güçlü bir ilişki vardır. Diğer tüm balinalara kıyasla, kambur balina yüzgeçleri vücut uzunluğuna göre daha uzun açıklık uzunluğu ile daha yüksek EBO'na sahiptir (Edel & Winn, 1978). Ayrıca koniklik oranı (taper ratio) ve ok açılı (swept-back) yapı taşıma üretiminde ve sürüklenme azaltımında iyileşme sağlamaktadır.

Yüzgeçlerin kesit alanı incelendiğinde hücum kenarında yuvarlak firar kenarında sivri olarak aerodinamik bir yapıdadır. Farklı dalga boyu genlik değerlerine sahip yumrular ile yüzgeç yapısının genel görünümü Şekil 4 (a ve c)'de görülmektedir. Maksimum kalınlık %20 veter uzunluğunda olarak Şekil 4 (b)'de görüldüğü gibi yüzgeçlerin kesit alanı NACA 634-021 ile benzerlik göstermektedir (Fish & Battle, 1995). Kalınlık oranı yüzgeç boyunca değişerek aerodinamiğini ve taşıma oluşumunu etkilemektedir. Yüzgeçlerde görülen dalga geometrisi belirli tepe ve çukur noktasına sahiptir. Hücum kenarında bulunan yumrular kanat gövdesinden (wing root) kanat ucuna (wing tip) yaklaştıkça küçülmektedir. Yumruların yüzgeç üzerindeki konumları eklemlerin oluşumu ile ilgilidir. Yumrular arasındaki mesafeler yüzgeç boyunca uç bölgeye doğru azalır.



Şekil 4. (a)Kambur balina yüzgeç görünümü (Fish & Battle, 1995) (b)yüzgeç kesit alanı(New & Ng, 2020) ve (c) kambur balina yüzgeci (Fish vd., 2008)

1.4. Dalgalı Hücum Kenarı

Yapılan çalışmalar ile dalgalı hücum kenarına sahip kambur balina yüzgecinin akış kontrol aracı olarak kullanılabileceği görülmüştür. Literatürde yapılan çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Fish & Battle (1995) iri bir cüsseye sahip olmasına rağmen diğer balina türleriyle kıyasladığında daha yüksek manevra kabiliyetine sahip olan kambur balinaların dalgalı yapıya sahip yüzgecinin akış kontrolü için kullanılabileceğini önermişlerdir. Watts & Fish (2001) dalgalı hücum kenarının aerodinamik ve hidrodinamik etkilerini incelemek için sayısal bir çalışma yürütmüştür. Dalgalı geometriye sahip modelle, düz modeli

karşılaştırarak taşıma kuvvetinde %4.8 artış, sürüklenme kuvvetinde %12.8 azalma meydana geldiğini göstermişlerdir. Bu konudaki ilk deneysel çalışma Miklosovic vd. (2004) tarafından yapılmıştır. NACA 0020 uçak kanadı profiline sahip yüzgeç (flipper) modellerini rüzgâr tüneline incelemişlerdir. Sonuçlar, dalgalı geometrinin stol açısını %40 geciktirdiğini, maksimum taşımayı %6 arttırdığını, sürüklemeyi ise %32 azalttığını göstermiştir. Dalgalı modelin düz modele kıyasla daha iyi aerodinamik performansa sahip olduğunu göstermişlerdir. Bu sonuçlar, dalgalı geometrinin yüksek hücum açılarında daha yüksek taşıma sağladığını göstermiş ve bu konuda yapılan öncül çalışma olmuştur. Miklosovic vd. (2007), yüzgeç modellerini dikdörtgen kesitli modellerle karşılaştırmış ve dalgalı geometriye sahip NACA 0020 uçak kanadının aerodinamik kuvvetlerini yük hücreleri yardımıyla ölçmüşlerdir. Yüksek hücum açılarında dalgalı geometrinin uçak kanadı performansında iyileşme sağladığını göstermişlerdir.

Johari vd. (2007) hücum kenarında dalgalı geometrinin NACA 634-021 profiline sahip uçak kanadı modelleri üzerine etkisini, kuvvet ölçüm ve iplikçik akış görüntüleme deneylerini gerçekleştirerek incelemişlerdir. Hücum kenarında dalga geometrisi 0.025c, 0.05c ve 0.12c genlik değerlerine ve 0.25 ve 0.50c dalga boyu değerlerine sahip uçak kanadı modelleri kullanmışlardır. Stol sonrası açılarda dalgalı modeller düz modele göre taşıma kuvvetinde yaklaşık %50 artış sağlamıştır. Dalgalı geometrinin stol sonrası açılarda etkinliği net bir şekilde gözlenirken stol öncesi açılarda düz modele kıyasla taşıma kuvveti üzerine bir etkinliği olmadığını göstermişlerdir. Taşıma ve sürüklenme katsayılarına en büyük etkiyi genliğin sağladığını dalga boyunun önemli bir etkisinin olmadığını göstermişlerdir.

Stanway (2008) su tüneline dalgalı geometrinin etkilerini yüzgeç modeller için farklı Reynolds sayılarında incelemiş ve dalgalı geometriye sahip modellerin stol açısını ertelediğini göstermişlerdir. Pedro & Kobayashi (2008) yüzgeç modellerini incelemek için sayısal bir çalışma gerçekleştirmiş ve dalgalı geometriye sahip modelin aerodinamik iyileşme sağlamanın akış yönünde üretilen girdaplardan kaynaklandığını, girdap oluşumunun sınır tabakaya momentum kazandırarak fırr kenar ayrılmasını geciktirdiğini ve bu girdapların hücum kenar ayrılmasının kanatın uç bölgesinde sınırlı kalmasını sağladığını belirtmişlerdir.

Hansen vd. (2011) deneysel çalışmalarında dalgalı hücum kenarının iki farklı kanat profilinin performansı üzerine etkisini $Re=1.2 \times 10^5$ değerinde incelemişlerdir. Farklı genlik ve dalga boylarına sahip modellerin kuvvet ölçümleri sonuçlarına göre dalgalı geometrinin NACA 65-021 profiline sahip modellerde daha iyi performansa sahip olduğunu

göstermişlerdir. İncelenen NACA 0021 ve NACA 65-021 kanat profilleri için daha küçük genlik, daha yüksek taşıma katsayısı sağlarken stol sonrası daha büyük genlik değerinin daha iyi performans sağladığını göstermişlerdir. Ayrıca, dalgalı geometrinin girdap üreteçlerine benzer karakteristiklere sahip olduğunu öne sürmüşlerdir.

Custodio vd. (2015) hücum kenarında dalgalı geometriye sahip NACA 634-021 uçak kanadı profiline sahip dikdörtgen kesitli ve yüzgeç modellerini su tüneline incelemişlerdir. Kuvvet ölçümleri sonuçlarına göre, stol öncesinde düz modelin dalgalı modellerle eşit veya daha büyük bir taşıma ürettiğini, stol sonrasında ise dalgalı geometriye sahip modellerin düz modelden daha yüksek taşıma sağladığını göstermişlerdir. Akış görüntüleme sonuçları, stol sonrası sağlanan iyileşmeyi dalgalı geometrinin ürettiği girdapların sağladığını ifade etmişlerdir.

Wei vd. (2015) deneysel çalışmalarında su tüneline $Re=1.4 \times 10^4$ sayısında dalgalı geometriye sahip modellerin hidrodinamik karakteristiklerini araştırmışlardır. Parçacık akış görüntüleme yöntemi (PIV) ile dalgalı geometrinin akış ayrılma karakteristiklerinde iyileştirme sağladığını belirtmişlerdir. Dalgalı geometrinin girdap üreteçlerine benzer şekilde davrandığını ifade etmişlerdir. Özellikle, daha büyük dalga genliklerine ve daha küçük dalga boylarına sahip modellerin, akış kontrolünde önemli ölçüde iyileşme sağlama eğiliminde olduklarını göstermişlerdir. De Paula vd. (2017) dalgalı geometrinin NACA 0030 uçak kanadı üzerine etkilerini, farklı Reynolds sayıları için incelemişlerdir. $Re=1.2 \times 10^5$ sayısında $\alpha=0.03c$ ve $\lambda=0.11$ parametrelerine sahip modelin düz modele göre maksimum taşıma katsayısında artış sağladığını ve stol açısını geciktirdiğini göstermişlerdir. Post vd. (2018) dalgalı geometrinin NACA 0020 uçak kanadı üzerine etkilerini 1.0×10^5 - 5.0×10^5 Reynolds sayısı aralığı için kuvvet ölçüm ve akış görüntüleme teknikleri ile akış yapısını inceledikleri deneysel ve sayısal bir çalışma yürütmüşlerdir. Dalgalı geometrinin stol karakteristiklerini iyileştirdiği, stol açısını ötelediği ve stol sonrasında taşıma kuvvetinde yaklaşık %25'lik bir artış sağladığını göstermişlerdir.

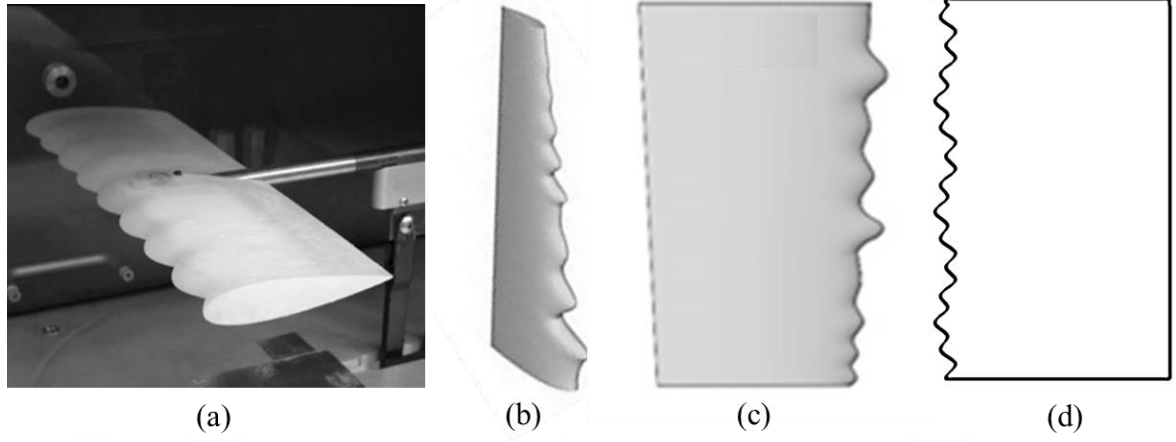
Kim vd. (2018) dalgalı geometriye sahip yüzgeç modellerinin girdap yapılarını yüzey yağ akış ve parçacık akış görüntüleme yöntemleri ile $Re=1.8 \times 10^5$ sayısında incelemişlerdir. Dalgalı geometrinin stol açısını ötelediğini ve taşıma katsayısında artış sağladığını göstermişlerdir. Akış görüntüleme sonuçları, düşük hücum açılarında, düz ve dalgalı yüzgeç modelleri için akış ayrılmasının ilk olarak kanadın uç bölgesi yakınında meydana geldiğini göstermektedir. Srinivas vd. (2018) yaygın manevra cihazı olarak kullanılan dümen için düzgün dağılıma sahip ve daha gerçekçi dalga yapısına sahip olan iki farklı modifikasyon

kullanmışlardır. Uygun geometriyi elde etmek için taşıma ve sürüklenme özelliklerinin sayısal incelemeler gerçekleştirilmiştir. Dalga geometrisinin etkisinin düşük Reynolds sayılarında daha belirgin olduğunu göstermişlerdir. Balina yüzgeçlerinin dağılımına daha yakın gerçekçi modellerin, belirli koşullar altında düzgün dağılıma sahip modellerden daha iyi performans gösterebileceğini belirtmişlerdir.

Sudhakar vd. (2019), deneysel çalışmalarında NACA 4415 kanat profiline sahip modellerde dalgalı geometrinin etkisini $Re=1.2 \times 10^5$ sayısında incelemişlerdir. Basınç ölçümleri gerçekleştirerek dalgalı ve düz modellerin performanslarını karşılaştırmışlardır. Ayrıca yüzey yağ akış görüntüleme ve PIV yöntemleri ile dalgalı modellerin akış yapılarını incelemişlerdir. Sonuçlar, dalgalı modellerde düşük hücum açılarında düz kanat üzerindeki baskın akış özelliği olan laminar ayrılma kabarcığının etkisinin hücum kenarındaki dalgalı geometrinin varlığı ile önemli ölçüde değiştiğini belirtmişlerdir. Ntantis vd. (2021) kambur dalgalı geometrinin NACA 2421 uçak kanadı performansına etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, dalgalı geometrinin aerodinamik performansta iyileştirme sağladığını göstermektedir. Ayrıca, dalgalı geometrinin aerodinamik performansı iyileştirdiği ve akustik güç seviyelerinin azaltılmasına da yardımcı olduğunu göstermişlerdir.

Literatürde dalgalı hücum kenarının etkisini incelemek için farklı modeller (dikdörtgen, yüzgeç, konik açılı, delta), kanat profili (NACA 0020, NACA 634-021), dalga geometrisi yapısı ve Reynolds sayısında deneysel ve sayısal çalışmalar yürütülmüştür. Dalga geometrisi ifade edilirken genellikle sinüs veya kosinüs eğrisi kullanılmıştır. Kambur balinaların yüzgecinde bulunan yumruların düzgün bir dağılım göstermediği dikkate alınarak bazı çalışmalar daha gerçekçi yaklaşımlar geliştirmiştir. Seyhan vd. (2021), Srinivas vd. (2018) ve Lu vd. (2021) yüzgeç dalga geometrisine benzer bir geometri oluşturmayı hedefleyerek daha gerçekçi bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Şekil 5 (a)'da geleneksel olarak sinüs eğrisi ile oluşturulan dalga geometrisi, Şekil 5 (b)'de eğri (F-spline) ile elde edilen dalga yapısı (Lu vd., 2021), Şekil 5 (c)'de Srinivas vd. (2018) tarafından eğri uydurma ile elde edilen dalga geometrisi ve Şekil 5 (d)'de Seyhan vd. (2021) tarafında önerilen daha gerçekçi dalga geometrisi görülmektedir. Srinivas vd. (2018) tarafından eğri çizimiyle geliştirilen gerçekçi dalgalı yapının daha iyi performans potansiyeline sahip olduğu gösterilmesine rağmen dalga yapısı matematiksel olarak ifade edilemediği için tekrarlanması mümkün olmamaktadır. Literatürde dalgalı geometri ile ilgili yapılan çalışmalar, ayrıntılı bir şekilde Seyhan (2022) tarafından tablo halinde düzenlenmiştir. Bu tez çalışmasında, yüzgeç

modellere yoğunlaşmış ve literatürde yüzgeç model kullanılarak yapılan çalışmalar kronolojik olarak Tablo 2’de verilmiştir.



Şekil 5. (a) Sinüzoidal eğri (Miklosovic vd., 2007) (b) eğri (F-spline) ile elde edilen dalga yapısı (Lu vd., 2021) (c) eğri uydurma ile elde edilen dalga yapısı (Srinivas vd., 2018)(d) daha gerçekçi yaklaşımla elde edilen dalga yapısı (Seyhan vd., 2021)

Literatürde Miklosovic vd. (2007) tarafından modellenen yüzgeç modelleri kullanılarak yapılan birçok çalışma mevcuttur. Tablo 2’de literatürde kullanılan yüzgeç modellerinin kanat uzunluğu, ortalama veter uzunluğu ve deneylerin gerçekleştirildiği Reynolds sayısı gösterilmiştir. Bu çalışmalarda uçak kanadı profili olarak NACA 0020 kullanılmıştır.

Tablo 2. Literatürde yüzgeç modelinin kullanıldığı çalışmalar

Yazarlar	Kanat Uzunluğu	Veter Uzunluğu	Yöntem	Reynolds Sayısı
Miklosovic vd. (2007)	571.5 mm	129.18 mm	DeneySEL	500.000
Stanway (2008)	246 mm	59.5 mm	DeneySEL	119.060
Pedro & Kobayashi (2008)	571.5 mm	129.18 mm	Sayısal	500.000
D. Custodio vd. (2015)	229 mm	51 mm	DeneySEL	230.000
Post vd. (2018)	229 mm	58 mm	DeneySEL	400.000
Kim vd. (2018)	571.5 mm	129 mm	DeneySEL	180.000
Mevcut Çalışma	457 mm	103.3 mm	DeneySEL	50.000-120.000

Miklosovic vd. (2007) tarafından modellenen yüzgeç modelleri 129.18 mm (5.086 in) ortalama veter uzunluğu ve 571.5 mm (22.5 in) yarım kanat açıklığına sahiptir. Bu tez çalışmasında kullanılan yüzgeç modellerinin ortalama veter uzunluğu 103.3 mm (4.068 in) ve kanat açıklığı 457 mm (17.99 in) olarak belirlenmiştir.

1.5. Dalgalı Geometrisinin Etkileri ve Önerilen Mekanizmalar

Literatürde dalga geometrisinin fiziksel etkilerini ve çalışma mekanizmasını açıklayabilmek için sayısal ve deneysel birçok çalışma yapılmıştır. Öncelikle dalgalı geometrisinin nasıl iyileşme sağladığının anlaşılabilmesi için model üzerindeki fiziksel etkisinin nasıl olduğu araştırılmıştır. Çalışma prensibinin bazı taşıma artırıcı mekanizmalar ile benzerliği incelenerek analogi kurulmuştur.

Dalga geometrisinin uçak kanatları üzerindeki etkileri, stol öncesi, stol açısı ve stol sonrası açılarda incelenmektedir. En belirgin etkileri, stol sırasında ve stol sonrasında meydana gelmektedir. Sreejith & Sathyabhama (2020) stol öncesi hücum açılarında dalga geometrisine sahip modellerin düz modellere göre daha düşük taşıma katsayılarına ve daha yüksek sürüklenme katsayılarına sahip olduklarını belirtmiştir. Taşıma katsayısında meydana gelen ani düşüş veya taşıma kaybı olarak ifade edilen stolun meydana geldiği açı, maksimum taşıma katsayısının elde edildiği açı ya da kritik açı olarak kabul edilmektedir. Dalgalı hücum kenarının stol sırasında taşımada ani düşüş yerine kademeli düşüş sağlayarak daha yumuşak stol karakteristiği görüldüğü (Post vd., 2018), stol açısının ötelendiği (Lu vd., 2021), stolu düzleştirdiği (Nierop vd., 2008) gibi sonuçlar elde edilmiştir. Literatürde bu konu ile yapılan çalışmalar incelendiğinde, tüm çalışmalar stol sonrasında dalgalı modelin düz modele göre taşımada önemli ölçüde artış sağladığı konusunda ortak noktada birleşmektedir. Dalgalı geometriye sahip modellerin stol öncesinde taşımada artışa neden olmalarına rağmen stol sonrasında düz modele benzer sürüklenme oluşturdıkları görülmüştür. Bundan dolayı, stol sonrasında taşımada meydana gelen artış ile dalgalı modeller düz modele göre L/D oranlarında artış sağlamaktadır.

Literatürde stol sonrası taşımada meydana gelen artışı sağlayan fiziksel etkilerin başlıca, artan sınır tabakası momentum değişimi (Fish & Battle, 1995), akışın bölümlere ayrılması (Pedro & Kobayashi, 2008), kanat profili üzerindeki basınç dağılımının değişimi (Nierop vd., 2008) olabileceği düşünülmektedir. Çalışma prensibi olarak girdap üreteçleri (Hansen vd., 2011), kanat bariyeri (Watts & Fish, 2001), girdap kaldırması (D. Custodio,

2007), stol şeritlerine (Seyhan vd., 2021) benzerlik önerilmiştir. Dalgalı geometrinin kanatlar üzerindeki olası fiziksel etkileri Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3. Dalgalı geometrinin önerilen fiziksel etkileri

Çalışmalar	Fiziksel Etkiler
Fish & Battle (1995)	Artan sınır tabaka
Pedro & Kobayashi (2008)	Akışın bölümlere ayrılması
Nierop vd. (2008)	Kanat üzerinde basınç dağılımı değişimi
Johari vd. (2007)	Üniform olmayan akış karakteristiği

Girdap üreteçler laminlerden türbülanslı sınır tabakaya geçişi sağlayan ve yaygın olarak uçaklarda kullanılan bir akış kontrol aracıdır. Literatürde girdap üreteçlerin stol açısını geciktirmesi ve kritik hücum açısında önemli ölçüde yüksek taşıma sağlanması ile dalgalı geometrinin etkilerinin benzerliği vurgulanmıştır (Hansen, 2012). Pedro & Kobayashi (2008) yaptıkları sayısal çalışmada dalga geometrinin akışı ceplere bölerek stol hücrelerinin yayılmasını sınırladığı için dalga geometrisi ile kanat bariyerinin çalışma mekanizmasının benzerliğini göstermiştir. Keskin hücum kenarı ve yüksek ok açısına sahip delta kanatlarda güçlü girdaplar oluşmasıyla girdap taşıması oluşmaktadır (Bolzon vd., 2016). Dalga geometrisi tarafından oluşturulan akış yönünde ters yönde dönen girdapların, delta kanatlarına benzer bir şekilde girdap taşıması oluşturduğu Custodio, (2007) tarafından öne sürülmüştür. Seyhan vd. (2021) yaptıkları çalışmada, stol şeridinin kanadın stol karakteristiğini iyileştirdiği, sürüklenme katsayısını düşürdüğü gibi etkilerini göz önüne alarak dalgalı geometri ile stol şeritlerinin çalışma prensiplerinin benzer olabileceğini vurgulamıştır.

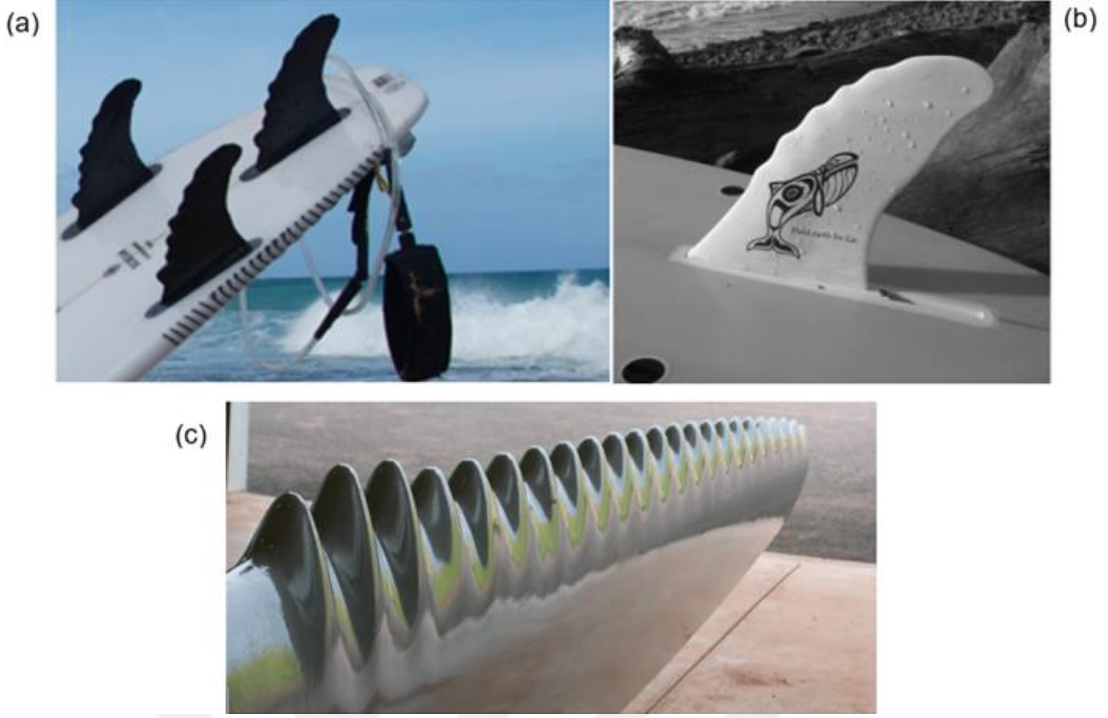
1.6. Uygulama Alanları

Literatürde dalgalı geometrinin taşıma kuvvetini arttırdığı, sürüklenme kuvvetini azalttığı ve akış ayrılmasını geciktirdiği görülmüştür (Johari vd., 2007; Wei vd., 2019). Ayrıca dalgalı geometrinin gürültüyü azaltıcı etkisinin olduğu da öne sürülmüştür (Xing vd., 2023). Dalga geometrisinin uygulama alanlarını, stol karakteristiklerinde iyileştirmelerin istendiği ve yüksek manevra kabiliyetinin istendiği alanlar oluşturmaktadır.

Potansiyel uygulama alanlarının başında insansız hava araçları (İHA) gelmektedir. Düşük Reynolds sayılarında İHA'larda laminar ayrılma kabarcığı gibi performansta düşüşe neden olan akış olayları görülmektedir (Mueller & DeLaurier, 2003). Bu sebeple, insansız hava araçlarının kanat yapılarında dalgalı hücum kenarının etkisi, kararlı uçuşu sağlamak ve aerodinamik performansı artırmak amacıyla incelenmiştir. Sudhakar vd. (2017) dalgalı hücum kenarının özellikle İHA'lar operasyon sırasında ani dikey rüzgarlarla karşılaştığında faydalı etkileri olduğunu göstermiştir. Guerreiro & Sousa (2012) mikro hava araçları için dalgalı geometrinin uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Sonuçlar, yüksek oranda kanadın EBO'na bağlı olmakla birlikte, genlik ve dalga boyunun uygun bir kombinasyonunun taşımada önemli bir artışa yol açtığını göstermiştir.

Dalgalı hücum kenar geometrisi dümenlere (rudder) ve sörf tahtası yüzgeçlerine de uygulanmıştır. Dalgalı geometrinin dümenlere uygulanmasının ana nedeni dümen performansının düşmesine neden olan kavitasyonun başlamasında gecikme sağlamaktır (Weber vd., 2010). Şekil 6 (a ve b)'deki gibi sörf tahtasında kullanılan dalgalı geometri, standart ticari yüzgeçlere kıyasla güç üretiminde önemli iyileştirmeler sağlayabilmektedir. Shormann & Panhuis (2020) tarafından yapılan çalışmada, dalgalı yüzgeçlerin dönüş hızlarında iyileşme sağladığı ve dalgalı yapıdaki yüzgeçlere sahip sörf tahtasını kullanan ortalama bir sörfçünün, profesyonel bir sörfçüye göre sörf performansını iyileştirdiği görülmüştür.

Dalgalı geometrinin uygulama alanlarından bir diğeri rüzgâr türbin kanatlarıdır. Literatürde dalgalı geometrinin rüzgâr türbin kanatlarındaki etkilerini inceleyen çok sayıda çalışma bulunmaktadır. WhalePower şirketi Şekil 6 (c)'de görülen dalgalı geometriye sahip rüzgâr türbini kanatları kullanarak saha testleri gerçekleştirmiş ve düz kanatla karşılaştırıldığında, dalgalı geometriye sahip kanatın daha yüksek performans sağladığını belirtmiştir (Fish vd., 2011). Rüzgâr türbinlerinde sağladığı yararların yanında ayrıca dalgalı geometri gürültü azaltmada (noise reduction) da kullanılabilmektedir. Dalgalı hücum kenarının, kanatlarda gürültünün azalmasını sağladığı çeşitli çalışmalarda öne sürülmüştür (Chen vd., 2022). Dalgalı geometrinin gürültüde azalma sağlaması, dalgalı geometrinin akışı ceplere bölerek kanat akışını (spanwise flow) önleyebileceği ve böylece kanat ucu türbülansını ve gürültüyü azaltabileceği fikrine dayanmaktadır (Bolzon vd., 2016).



Şekil 6. (a) Dalgalı yapıda üretilmiş sörf tahtası (Shormann & Panhuis, 2020) (b) sörf tahtası (c) rüzgâr türbin kanadı (Fish vd., 2011)

Kambur balina yüzgeçlerinden esinlenilen dalga geometrisinin uygulama alanlarını, genel olarak daha yumuşak stol karakteristikleri, sınır tabaka ayrılma kontrolünde iyileşmelerin istendiği, yüksek manevra kabiliyeti ve gürültüde azalmanın istendiği alanlar oluşturmaktadır.

1.7. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasının amacı, daha gerçekçi bir yaklaşımla modellenen hücum kenarının dalgalı geometrisinin NACA 0020 uçak kanadı profiline sahip yüzgeç modelleri üzerindeki etkisinin araştırılmasıdır. Bu nedenle hücum kenarında dalga geometrisine sahip yüzgeç modelleri, kambur balina yüzgecinin geometrisi dikkate alınarak farklı genlik ve dalga boyu parametrelerinin kanat üzerindeki etkilerini bulmak için tasarlanmıştır. Düşük Reynolds sayılarında üç boyutlu bir model olan yüzgeç modeline etki eden farklı akış yapılarını incelemek ve aerodinamik karakteristikleri belirlemek amaçlanmıştır. Ayrıca aynı dalga geometrisine sahip dikdörtgen kesitli modeller kullanılarak dalgalı geometrinin dikdörtgen ve yüzgeç modeller olmak üzere farklı kanat modellerinin aerodinamik karakteristikleri üzerine etkilerinin araştırılması amaçlanmaktadır.

Bu tez çalışmasının birinci bölümünde akış kontrolü, biyomimetik ve havacılık sektöründeki gelişmeler açıklanmış ve literatürdeki çalışmalar özetlenmiştir. İkinci bölümde hücum kenarı dalgalı geometriye sahip modellerin aerodinamik karakteristiklerini rüzgâr tüneline deneysel olarak incelemek için kuvvet ölçümü, duman tel ve yüzey yağ akış görüntüleme yöntemleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Deneysel olarak incelenen dalgalı geometriye sahip yüzgeç modellerinin kuvvet ölçüm ve akış görüntüleme sonuçları üçüncü bölümde sunulmuştur. Ayrıca bu bölümde dalga geometrisinin farklı modeller üzerindeki etkileri, yüzgeç ve dikdörtgen modellerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Hücum kenarı dalgalı geometriye sahip modeller üzerine Reynolds sayısı, dalga geometrisinin dalga boyu ve genlik parametreleri ve bu geometrinin farklı modeller üzerine etkilerinin sonuçları dördüncü bölümde sunulmuştur.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Kambur balina yüzgeçlerinden esinlenilerek modellenen yüzgeç modelleri etrafında oluşan akış yapısının ve hücum kenarı dalga geometrisinin etkilerinin, kuvvet ölçüm ve akış görüntüleme yöntemleri kullanılarak incelendiği bu deneysel çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Termodinamik Laboratuvarında TÜBİTAK tarafından desteklenen 118M592 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar aşağıda verilen altı başlık altında ayrıntılı olarak incelenmiştir.

- Rüzgâr Tüneli
- Test Modellerinin Hazırlanması
- Kuvvet Ölçüm Sistemi
- Akış Görüntüleme Yöntemleri
- Belirsizlik Analizi
- Tekrarlanabilirlik Analizi

2.1. Rüzgâr Tüneli

Bu tez çalışması kapsamında deneylerin gerçekleştirildiği ses altı rüzgâr tüneli emmeli tip ve açık çevrimlidir. Şekil 7’de görülen rüzgâr tüneli temel olarak daralma konisi, test bölgesi, difüzör ve eksenel fan olmak üzere dört ana kısımdan oluşmaktadır. Daralma konisi, 6:1 daralma oranına sahiptir. Akışın türbülans seviyesini azaltmak ve üniform akış sağlamak için elekler bulunmaktadır. Deneylerde kullanılacak modellerin yerleştirildiği test bölgesi $570 \times 570 \text{ mm}^2$ kesit alanına ve 1200 mm uzunluğa sahiptir. Test bölgesinin çıkış kesit alanı giriş kesitinden çıkış kesitine 0.3° genişleme açısı ile $585 \times 585 \text{ mm}^2$ olmaktadır. Test bölgesi çıkışında kare kesiti fan çapına denk getirmek için kare-daire ve daire-daire olmak üzere iki kademeli yayıcı/difüzör kullanılmıştır. Eksenel fan 900 mm çapa sahip ve 11 kW gücündedir. Frekans değiştirici kullanılarak test bölgesinde serbest akım hızı, 0 – 50 m/s aralığında istenilen değere ayarlanabilmektedir. Tünelin türbülans şiddeti %1’den küçüktür.

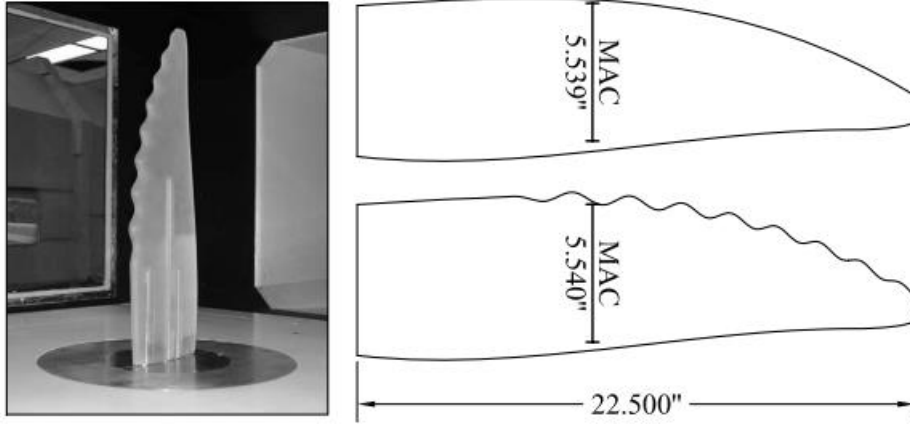


Şekil 7. Rüzgâr tünelinin genel görünümü

2.2. Test Modellerinin Oluşturulması

Yetişkin bir kambur balinanın sol yüzgeci incelenmiş ve yüzgeçler Miklosovic vd. (2004) tarafından matematiksel olarak modellenmiştir. Her bir kambur balina, her bir insan gibi eşsiz olduğu için amaçları bir balina yüzgecini modellemektense genel olarak yüzgeç geometrine benzer bir yapı oluşturmak olmuştur. Oluşturdukları ilk model düz hücum kenarına sahipken ikinci model kambur balina yüzgeci gibi dalgalı bir yapıya sahiptir. Dalgalı geometriye sahip modelin genliği, yüzgecin yapısından dolayı kanat boyunca azalan yapıdadır. Şekil 8’de oluşturdukları yüzgeç modelleri görülmektedir.

Bu çalışmada yüzgeç modeller, Miklosovic vd. (2007) tarafından belirlenen denklemler kullanılarak oluşturulmuştur. Deneylerin yapılacağı rüzgâr tüneli özellikleri ve blokaj oranı sınırları göz önünde bulundurularak tasarlanan modelin veter ve kanat uzunluğu belirlenmiştir. Yüzgeç modellerinin ortalama veter uzunluğu 103.3 mm ve kanat uzunluğu 457 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 8. Yüzgeç modelleri (Miklosovic vd., 2007)

Hücum kenarında dalga geometrisi bulundurmayan düz modelin hücum kenarı,

$$x_{LE} = 2.916 + 0.0624y + 0.000428y^2 - 0.000462y^3 \quad (1)$$

denklemleri ile ifade edilmiştir. Hem dalgalı hem düz modelin firar kenarı,

$$x_{TE} = \begin{cases} -3.152 - 0.113y + 0.094y^2 - 0.000552y^3, & y < 19.98 \text{ in.} \\ -0.374\sqrt{1 - 0.158(y - 19.98)^2} - 1.7, & y \geq 19.98 \text{ in.} \end{cases} \quad (2)$$

biçiminde oluşturulurken dalgalı hücum kenarına sahip modelin hücum kenarı ise,

$$x_{LE} = 0.125(1 - 0.001y^2) \sin(0.57y^{1.5} - 0.4) [\tanh(y - 7) + 1] \quad (3)$$

denklemleri ile ifade edilmiştir.

Yüzgeç yapılarının dalga geometrisi üniform olmadığından dolayı, dalga geometrisinin daha gerçekçi olarak modellenmesi için Seyhan vd. (2021) tarafından bir matematiksel denklem önerilmiştir. Literatürde genellikle dalgalı geometriyi elde etmek için Denklem (4)'de gösterilen sinüs veya kosinüs fonksiyonu kullanılmaktadır. Seyhan vd. (2021) önerdiği denklem ile daha gerçekçi bir yaklaşımla artan azalan genlikli bir yapı elde edilmiştir. İki adet Denklem (4)'ün toplanmasıyla Denklem (5) elde edilerek farklı dalga boyu ve genlik değerleriyle artan azalan genlikli yapının elde edilmesi sağlanmıştır. Şekil 9'da bu denklemin nasıl elde edildiği ve bu denklem kullanılarak elde edilen dalga

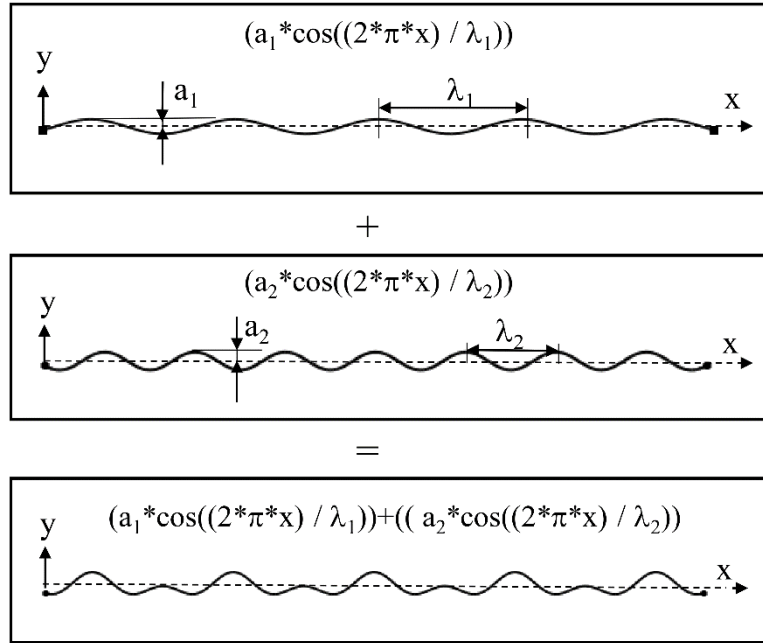
geometrisi görülmektedir. Bu denklemde iki genlik (a_1, a_2) ve iki dalga boyu (λ_1, λ_2) olmak üzere dört parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerden dalga boyu iki dalga tepesi veya iki dalga çukuru arasındaki mesafe olarak tanımlanırken genlik değeri bir dalganın tepe ve çukur arasındaki mesafenin yarısı olarak tanımlanmaktadır.

$$F(x) = a_1 \times \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda_1}\right) \quad (4)$$

Burada iki adet Denklem (4) toplanarak,

$$F(x) = a_1 \times \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda_1}\right) + a_2 \times \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda_2}\right) \quad (5)$$

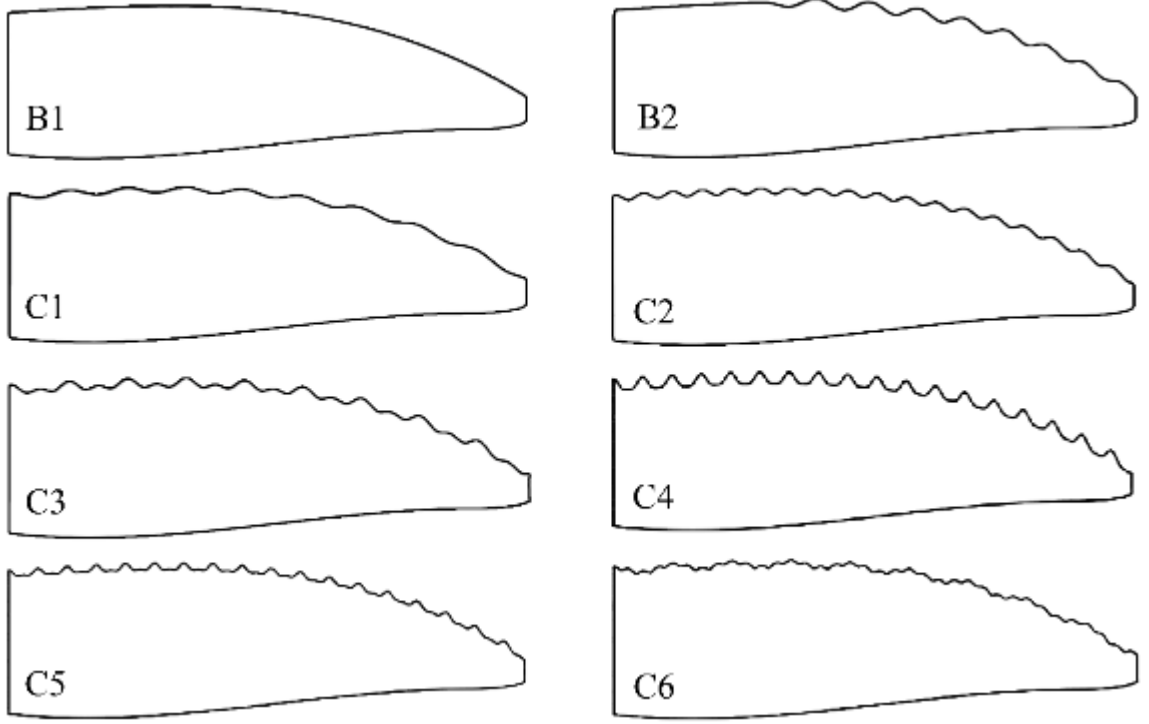
biçiminde daha gerçekçi bir yaklaşım sunan dalga geometrisi elde edilmektedir.



Şekil 9. Dalga geometrisinin oluşturulması

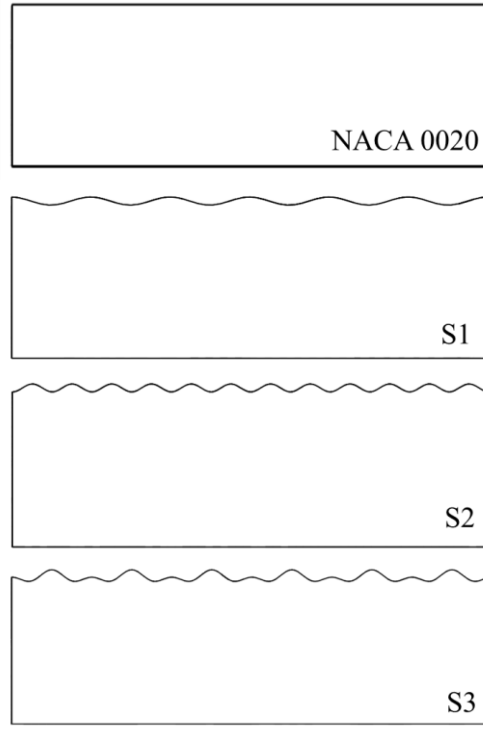
Şekil 10’da yüzgeç modellerinin görünüşleri verilmiştir. Bu çalışmada düz ve dalgalı hücum kenarına sahip yüzgeç modelleri arasında karşılaştırma yapılabilmek adına için Miklosovic vd. (2007) tarafından modellenenler temel modeller kabul edilmiş ve düz model B1 ve dalgalı model B2 olarak adlandırılmıştır. Yüzgeç modeller C1 ve C2 ile dikdörtgen kesitli modeller S1 ve S2 modellerinin dalga boyu ve genlik değerleri belirlenirken Johari

vd. (2007) tarafından belirlenen genlik ve dalga boyu değerleri dikkate alınmıştır. Yüzgeç model C3 ve dikdörtgen model S3 ise bu iki modelin parametreleri kullanılarak oluşturulmuştur. 118M592 numaralı proje kapsamında iyi sonuç veren modellerin dalga boyu ve genlik parametreleri C4, C5 ve C6 olarak isimlendirilen modeller oluşturulurken kullanılmıştır.



şekil 10. NACA 0020 yüzgeç modelleri

Dalgalı geometrinin etkileri farklı modeller için farklı olabilmektedir (Custodio vd., 2015). Modellerin en boy oranları ve yüzey alanları aynı olmasa bile farklı modellerdeki etkilerinin incelenebilmesi ve benzer eğilimler gösterip göstermediği belirlenebilmesi için dikdörtgen kesite sahip modeller kullanılmıştır. Geliştirilen dikdörtgen kesitli modeller, yüzgeç modeller ile aynı dalga geometrisine sahiptir. Dikdörtgen kesitli modeller düz model, S1, S2 ve S3 şematik görüntüleri şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11. NACA 0020 dikdörtgen kesitli uçak kanadı modelleri

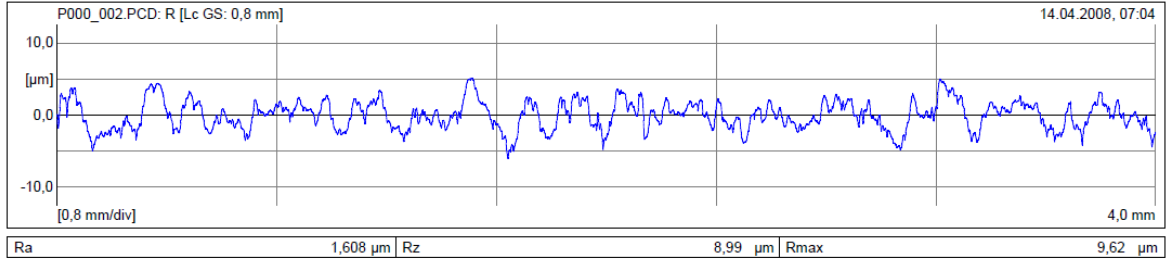
Tablo 4’te 8 adet yüzgeç modeli ve 4 adet dikdörtgen kesitli NACA 0020 uçak kanadı profiline sahip modellerin dalga boyu ve genlik değerleri verilmiştir. C3 ve C6 modellerinin a_1/λ_1 ve a_2/λ_2 oranlarının çarpımı olarak tanımlanan M_s boyutsuz sayıları aynıdır ve ‘*’ işareti ile aynı oldukları vurgulanmıştır.

Tablo 4. Modellerin genlik (a) ve dalga boyu (λ) değerleri

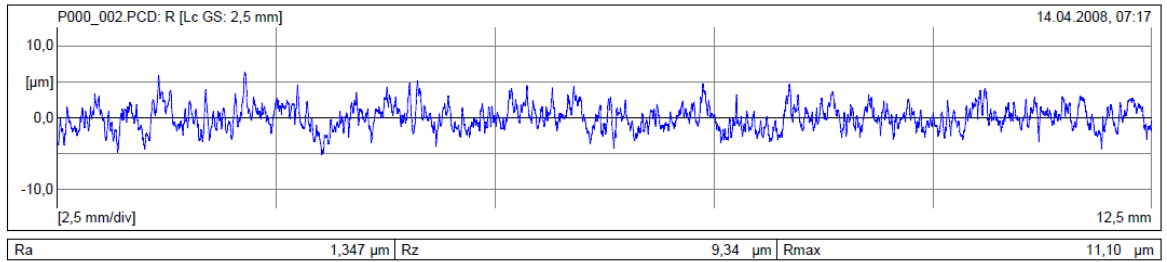
Modeller	a_1	a_2	λ_1	λ_2	a_1/λ_1	a_2/λ_2	$(a_1/\lambda_1)(a_2/\lambda_2)$
C1 – S1	0.025		0.5		0.05		
C2 – S2	0.025		0.25		0.1		
C3 – S3	0.025	0.025	0.5	0.25	0.05	0.1	0.005*
C4	0.05	0.0125	0.25	0.125	0.2	0.1	0.02
C5	0.025	0.0125	0.25	0.125	0.1	0.1	0.01
C6	0.025	0.0125	0.5	0.125	0.05	0.1	0.005*

Tüm modeller CCH Teknoloji MY Z35 model 3D yazıcıda PLA materyali ile üretilmiştir. 3D yazıcı x =200 mm, y=200 mm ve z=350 mm baskı hacmine sahiptir. Yazıcı 350 mm yüksekliğe sahip olduğundan modeller 225 mm olacak şekilde iki parça halinde üretilmiş ve birleştirilmiştir. Birleştirme yapıldıktan sonra pürüzsüz bir yüzey elde etmek için sırasıyla 180, 600 ve 1000 kum zımpara kullanılarak zımpara işlemi uygulanmıştır. Akış görüntüleme deneyleri için yüzeyde kontrast oluşturacak zıt renkler tercih edilmektedir. Daha iyi sonuç elde edebilmek için model yüzeyleri spreyl boya ile mat siyaha boyanmıştır. Her bir modele çeyrek veter konumunda delik açılmıştır. Deneyler sırasında bağlantı mili ile yük hücrelerine bağlantıları gerçekleştirilmiştir.

Şekil 12 (a ve b)'de B1 ve B2 modelleri için MAHR marka pürüzlülük ölçüm aleti ile yapılan ölçüm sonuçları görülmektedir. B1 ve B2 modeli için sırasıyla 1. 608 μm ve 1.347 μm ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) elde edilmiştir.



(a)

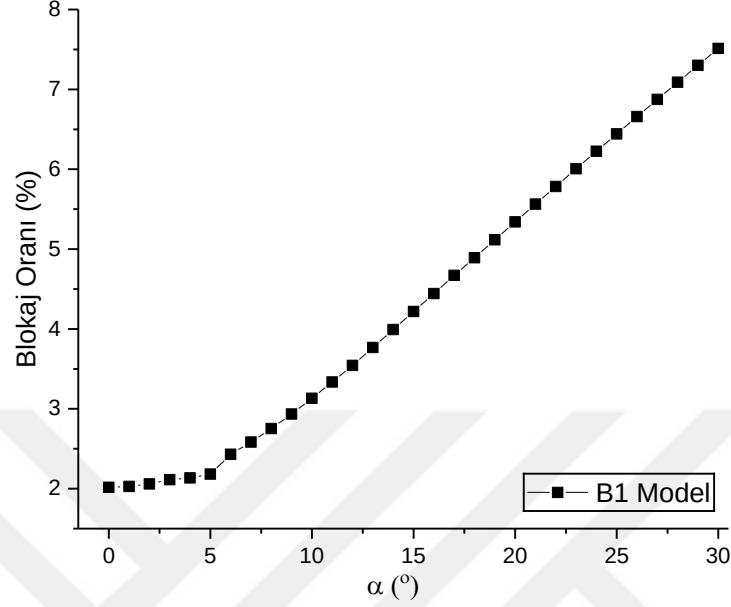


(b)

Şekil 12. (a) B1 ve (b) B2 yüzgeç modellerinin yüzey pürüzlülükleri

Rüzgâr tünellerinde kullanılacak model belirlenirken blokaj oranı dikkate alınması gereken önemli bir unsurdur. Blokaj oranı, model ön projeksiyon alanının test bölgesi kesit alanına oranı olarak tanımlanmaktadır. Şekil 13'te görülen B1 modeli için blokaj oranı,

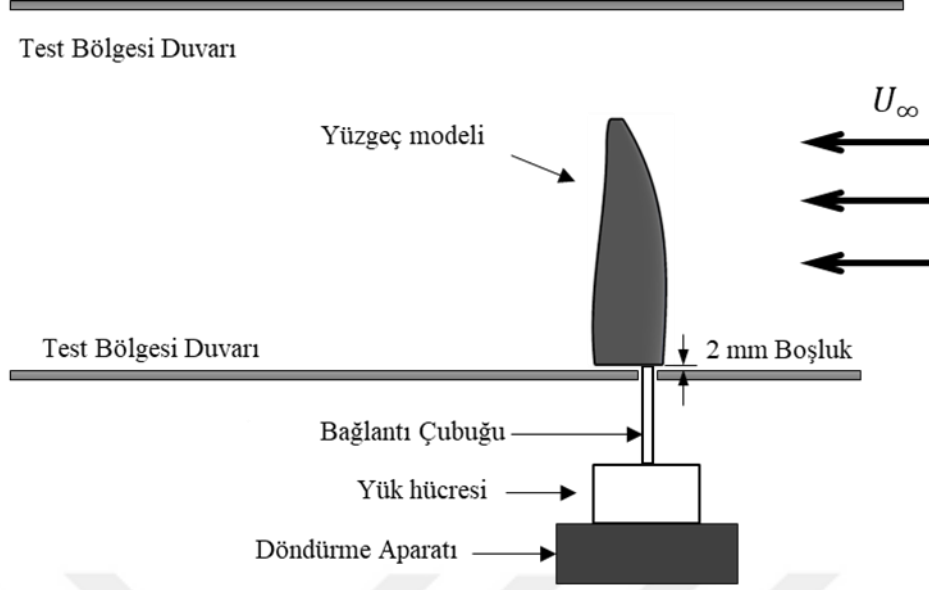
%10'un altında ve literatürdeki çalışmalarla benzer seviyede olduğu için blokaj düzeltmesi yapılmamıştır.



Şekil 13. B1 modeli için blokaj oranı

2.3. Kuvvet Ölçüm Sistemi

Kambur balina yüzgeç geometrisi modellenerek geliştirilirken, hücum kenarı dalgalı kanat modellerinin aerodinamik karakteristiklerinin belirlenmesi için kuvvet ölçüm deneyleri $Re = 5.0 \times 10^4$, 8.0×10^4 ve 1.2×10^5 sayılarında gerçekleştirilmiştir. Kuvvet ölçüm sisteminin şematik gösterimi Şekil 14'te görülmektedir. Kuvvet ölçüm düzeneği 6 eksenli yük hücresi, döndürme aparatı, test modeli ve uç plakadan oluşmaktadır. Kuvvet ölçümü $F_x = \pm 32$ N, $F_y = \pm 32$ N, $F_z = \pm 100$ N ölçüm aralıklarına sahip ATI Gamma SI-32-2.5 model yük hücresi ve PCI Express NI 6320 veri toplama kartı ve yükseltici ile gerçekleştirilmiştir. Örnekleme oranı 1000 Hz olup 20 saniye boyunca 20000 veri alınmıştır. Her deney için en az iki ölçüm alınarak tekrarlanabilirliği incelenmiştir. Kuvvet ölçümleri, hücum açısı bir derece artırılarak $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ hücum açıları aralığında yapılmıştır. İstenilen hücum açısı step motorun döndürülmesiyle sağlanmıştır. Açı ayarlamada hassasiyet $\pm 0.2^\circ$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 14. Kuvvet ölçüm deney düzeneği

Atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olan Reynolds sayısı akışkanlar mekaniğinde önemli bir boyutsuz sayıdır. Reynolds sayısı,

$$Re = \frac{\rho U_0 c}{\mu} \quad (6)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada ρ (kg/m^3) havanın yoğunluğunu, c (m) karakteristik veter uzunluğunu, U_0 (m/s) ortalama serbest akış hızını, μ ($\text{kg/m}\times\text{s}$) havanın dinamik viskozitesini göstermektedir.

Kritik Reynolds sayısı, bir kanat profilinin akış davranışının değiştiği, akışın laminardan türbülansa geçtiği noktayı ifade etmektedir ve özellikle düşük Reynolds sayılılarında, kanatların tasarımında dikkate alınması gereken önemli bir parametredir. Kritik Reynolds sayısı belirlenirken literatürdeki çalışmalar dikkate alınmıştır. Carmichael (1981) ve Lissaman (1983) tarafından yapılan çalışmalarda kritik Reynolds sayıları uçak kanatları için 3.0×10^4 , 5.0×10^4 , 7.0×10^4 , 1.0×10^5 ve 2.0×10^5 olarak belirtilmiştir. Bu çalışmada literatürde değerlendirilen kritik Reynolds sayısı aralığında kuvvet ölçüm deneylerini gerçekleştirmek için $Re = 5.0 \times 10^4$, 8.0×10^4 ve 1.2×10^5 sayıları seçilmiştir.

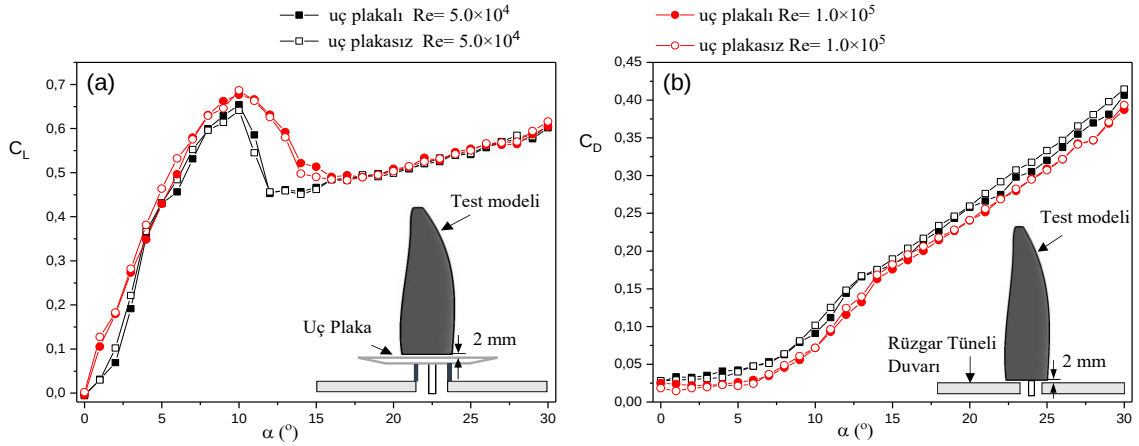
Aerodinamik kuvvetler boyutsuz sayılar olan taşıma ve sürüklenme katsayıları ile ifade edilmektedir. Taşıma katsayısı (C_L) ve sürüklenme katsayısı (C_D) sırasıyla Denklem (7) ve (8) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho U_0^2 A_p} \quad (7)$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U_0^2 A_p} \quad (8)$$

Burada F_L taşıma kuvveti, F_D sürüklenme kuvveti, ρ (kg/m^3) havanın yoğunluğu, A (m^2) kanadın üst bakış alanı, U_0 (m/s) serbest akış hızıdır. Kuvvet ölçüm deneylerinde her hücum açısı için alınan 20000 verinin ortalaması alınarak taşıma ve sürüklenme katsayıları hesaplanmıştır.

Uç plakasının etkisini incelemek için $Re = 5.0 \times 10^4$, 1.0×10^5 sayılarında uç plakalı ve uç plakasız kuvvet ölçümleri yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Şekil 15 (a) ve (b)'de 5.0×10^4 ve 1.0×10^5 sayıları için taşıma ve sürüklenme kuvvetlerinin neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Deney sistemini basite indirmek için kuvvet ölçümleri uç plaka kullanılmadan yapılmıştır.



Şekil 15. B1 modelinin (a) 5.0×10^4 ve (b) 1.0×10^5 Reynolds sayılarında uç plakalı ve uç plakasız kuvvet ölçümlerinin karşılaştırılması

Dikdörtgen kesitli modellerin kuvvet ölçümleri için alt ve üst tarafında bulunan uç plakalar 1- 2 mm boşluk bırakılarak gerçekleştirilmiştir. Uç etkilerinin azaltılması ve tünel içerisinde gelişen sınır tabakanın modeli etkilememesi ve modelin üniform akış bölgesinde kalması için uç plakalar kullanılmıştır. Yüzgeç modelleri için ise test bölgesi alt yüzeyinden

1- 2 mm boşluk bırakılmıştır. Barlow vd. (1999) tünel yüzeyi ile model arasında belli bir boşluğun olması gerektiğini ifade etmektedir.

2.4. Akış Görüntüleme Yöntemleri

Akış görüntüleme uzun yıllardır cismin etrafındaki akış yapısını anlamak için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Akış görüntüleme yöntemleri, kullanılan test modeli, çalışılan hız aralığı gibi parametrelere göre farklılık göstermektedir. Akış görüntüleme yöntemleri farklı metotlar kullanılarak yapılabilir. Bu tez çalışması kapsamında uygulaması kolay, etkin ve düşük maliyetli olan yüzey yağ akış görüntüleme ve duman tel akış görüntüleme teknikleri kullanılmıştır. Bu yöntemler hakkında ayrıntılı bilgiler 2.4.1 ve 2.4.2 alt başlıklarında sunulmuştur.

2.4.1. Yüzey Yağ Akış Görüntüleme Yöntemi

Kambur balina yüzgecinin daha gerçekçi yaklaşımla modellenerek geliştirilen kanat modelinin 3 boyutlu karmaşık akış yapısına sahip olmasından dolayı oluşan karmaşık akış yapılarının görsel olarak elde edilmesi oldukça zordur. Fakat yüzey yağ akış görselleştirme yöntemi kullanılarak kanat yüzeyi üzerinde oluşan geçiş (transition), ayrılma (separation), tekrar tutunma (reattachment) vb. akış yapılarının elde edilmesi sağlanabilmektedir. Bu yöntemin uygulaması noktasında literatürde belirli bir test koşulu için çok farklı karışım oranları ve uygulama şekilleri mevcut olmasına rağmen bu çalışmalarda verilen karışım oranları ve kullanılan malzemelerin uygulanmasıyla her zaman benzer sonuçlar elde etmek mümkün olmamaktadır. Literatürde farklı karışımlar kullanılarak yapılan çalışmalarla belirli bir karışım oranı olmadığı, test koşullarına ve modellerine göre karışımın değişiklik göstermesi gerektiği, istenilen karışımın deneme yanılma yoluyla elde edilebildiği belirtilmiştir (Maltby, 1962; Pierce vd., 2010). Deneysel olarak incelemesi yapılan test modeli ve koşullarına göre kullanılan malzemeler değişiklik göstermektedir ve Merzkrich (1987) tarafından yazılan “Techniques of Flow Visualization” başlıklı kitapta karışım hazırlanırken dikkat edilmesi gereken hususlar, kullanılan malzemeler ve teknikler ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

Yüzey yağ akış görüntüleme yönteminde ilk olarak, uygun viskozite ve yüzey gerilimi kombinasyonuna sahip bir karışım hazırlamak hedeflenmektedir. Karışımın pigment çizgileri bırakması ve aynı zamanda iyi bir fotoğraf kalitesi sağlaması istenmektedir

(Maltby, 1962). Literatürde uçak kanadı üzerinde oluşan akış yapısını incelemek için yapılan yüzey yağ akış görüntüleme deneylerinde kullanılan karışımlar aşağıda özetlenmiş ve Tablo 5'te sunulmuştur. Bolzon (2016) gaz yağı, keten tohumu yağı, pudra (talcum powder) kullanılarak 5:2:1 oranında hazırlanan karışım çabuk kurumadığı için kanat yüzeylerinde oluşan akış çizgilerinin belirlenmesinde, etanol ve pudra kullanılarak 5:2 oranında hazırlanan karışım yüzey kayma gerilimini incelemek için olmak üzere iki ayrı karışım hazırlayarak oluşan akış yapılarını incelemiştir. Sudhakar vd. (2019) oleik asit, titanyum dioksit (TiO_2) ve SAE 60 vakum pompası yağı kullanarak 1:5:7 oranına göre bir karışım hazırlamıştır. Chen vd. (2012) 3:6:2 oranında titanyum dioksit, gaz yağı ve oleik asitten oluşan bir karışım kullanarak bir akış görselleştirmesi gerçekleştirmişlerdir. Çeşitli araştırmacılar ise yüksek kontrast sağlamak için karışımlarında floresan pigment kullanmışlardır (McGranahan & Selig, 2003; Wei vd., 2019). Ayrıca çoğu çalışmada sadece kullanılan karışım bileşenleri belirtilmiş olup kullanılan karışım oranı verilmemiştir (Ghorbanishohrat & Johnson, 2018).

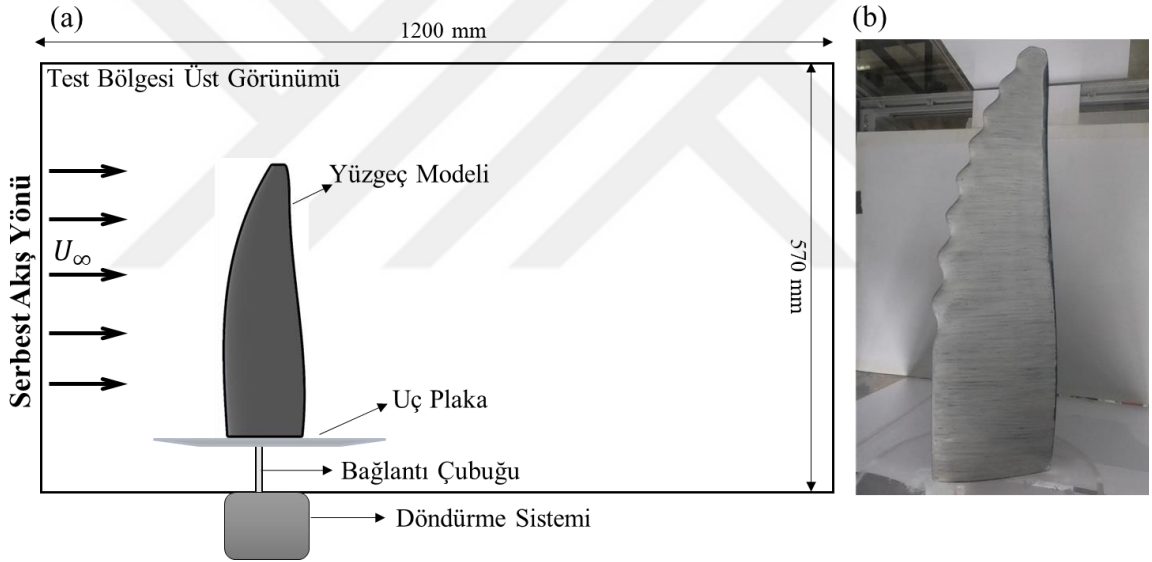
Tablo 5. Literatürde kullanılan karışımlar ve oranları

Yazar/lar	Karışım Bileşenleri	Karışım Oranı
Chen vd. (2012)	Titanyum dioksit (TiO_2)	3
	Gaz yağı	6
	Oleik asit	2
Bolzon (2016)	Gaz yağı	5
	Keten tohumu yağı	2
	Pudra (Talcum powder)	1
Bolzon (2016)	Etanol	5
	Pudra (Talcum powder)	2
Sudhakar vd. (2019)	Oleik asit	1
	Titanyum dioksit (TiO_2)	5
	SAE 60 vakum pompası yağı	7

Bu tez çalışmasında Sudhakar vd. (2019) tarafından hazırlanan karışım dikkate alınarak oleik asit, titanyum dioksit tozu ve SAE 20 motor yağı karışımı 1:5:7 oranında hazırlanmıştır. Titanyum dioksit ve oleik asit sabit tutularak motor yağı yerine gaz yağı ve etanol farklı oranlarda kullanılarak hazırlanan karışımlarla aynı model üzerinde denemeler yapılmıştır. Gaz yağı kötü koktuğu için uzun deney sürelerinde çalışamama, çabuk buharlaştığı için tekrar karışım hazırlama gereksinimi gibi dezavantajlarından dolayı tercih edilmemiştir. Etanol de çabuk buharlaştığı için tekrar karışım hazırlanması gerekmektedir ve etanol kullanılarak hazırlanan karışım fotoğraflarda soluk kalmış istenilen görüntü elde

edilememiştir. Etanol ve gaz yağının bu dezavantajlarından dolayı motor yağı kullanılarak karışım hazırlanmıştır.

Yüzey yağ akış görüntüleme yönteminin uygulamasına ait şematik Şekil 16 (a) ve (b)'de yüzey yağ akış görüntüleme deney düzeneğinin şematığı ve uygulama örneği olarak verilmiştir. Şekil 16 (a)'da görülen deney düzeneği, test modeli, yatay döndürme sistemi, uç plaka, bağlantı çubuğu ve yağ karışımından oluşmaktadır. Burada test modeli rüzgâr tüneli test bölgesi içerisine yatay olarak yerleştirilmiştir. Hazırlanan karışım yüzgeç modelinin emme yüzeyine ipek bir fırça kullanılarak sürülmüştür. Karışımın model üzerine sürülmesi basit bir konu olmasına rağmen en iyi sonucun elde edilebilmesi için uygulamanın dikkatli yapılması gerekmektedir. Test modeli yüzeyinde en uygun kaplama kalınlığını belirlemek için bazı denemeler yapılması gerekmektedir. Karışım fazla miktarda uygulandığında biriken yağ miktarı oluşan akış görüntüsünde değişikliklere neden olabilmektedir.



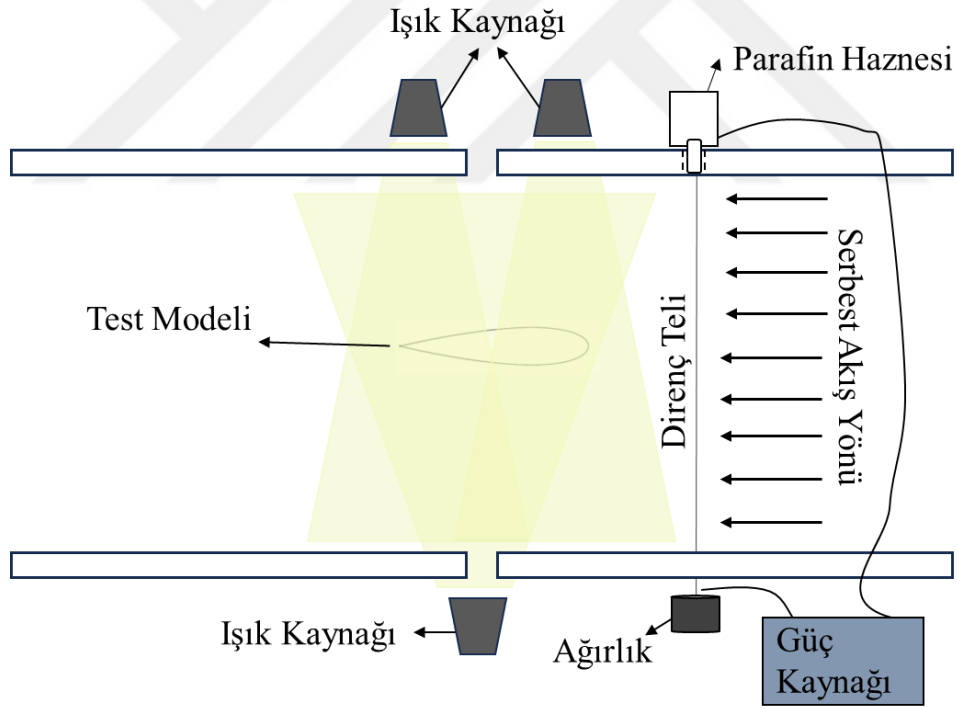
Şekil 16. Yüzey yağ akış görüntüleme (a) deney düzeneği (b) uygulama örneği

Test modeli, tünel dışında bulunan bilgisayar kontrollü yatay döndürme sistemine bağlanarak istenilen açıya hassas bir şekilde ayarlanmıştır. Kuvvet ölçüm deneylerinden elde edilen sonuçlar irdelenerek kritik hücum açıları belirlenmiş ve bu açılarda 1.2×10^5 Reynolds sayısında deneyler yapılmıştır. Hava akışının yağın yüzeyde hareketini sağlaması için tünel yaklaşık 10 dakika çalıştırılmıştır. Yağın hareketsiz kaldığı gözlemlendiğinde tünel kapatılmıştır. Gopro Hero7 Black kamera deney düzeneğinin üst kısmına yerleştirilerek hızlandırılmış (time-lapse) video ve her bir ölçüm sonunda fotoğraf görüntüsü alınmıştır.

2.4.2. Duman Tel Akış Görüntüleme Yöntemi

Duman tel akış görüntüleme yöntemi; akış ayrımını, girdapları, sınır tabaka davranışını ve diğer karmaşık akış olaylarının görselleştirmelerine yardımcı olarak akışkanlar dinamiği araştırmalarında, araştırmacılara tasarımları optimize etmek ve çeşitli uygulamalarda performansı artırmak için değerli bilgiler sağlamaktadır (Seyhan vd., 2021; Yarusevych vd., 2009). Bu çalışmada temel yüzgeç modellerinin uç bölgesinin akış üzerindeki etkilerinin incelenmesi için duman tel akış görüntüleme yöntemi kullanılmıştır.

Duman tel akış görüntüleme deneyinde dumanın net bir şekilde görüntülenebilmesi için rüzgâr hızının düşük olması gerekmektedir. Bu sebeple bu duman tel akış görüntüleme deneyleri 5.0×10^4 Reynolds sayısında gerçekleştirilmiştir. Şekil 17’de şematiği görülen duman tel akış görüntüleme deney düzeneği ışık kaynağı, parafin haznesi, direnç teli, güç kaynağı, ağırlık, uç plaka ve test modelinden oluşmaktadır.



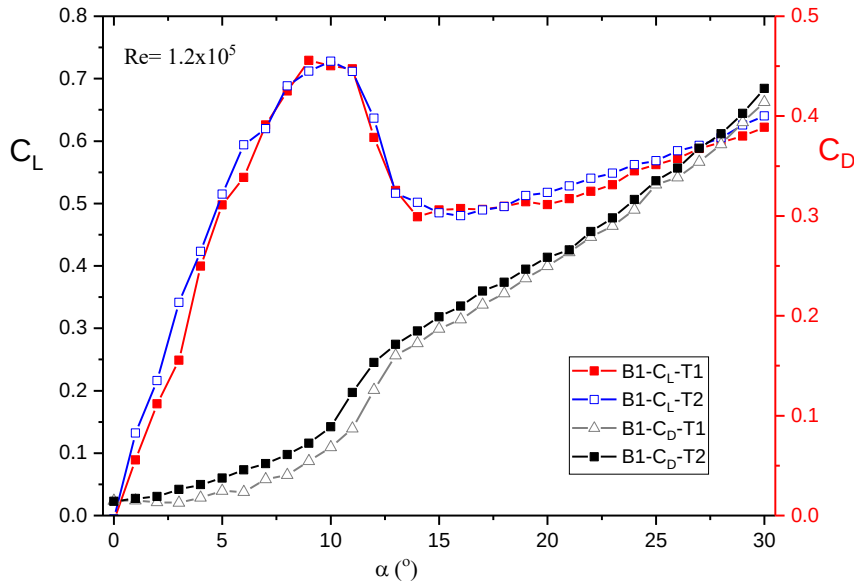
Şekil 17. Duman tel akış görüntüleme deney şematiği

Test modeli rüzgâr tüneli test bölgesi içerisine yatay olarak yerleştirilmiştir. İstenilen hücum açısı yatay döndürme sistemi ile ayarlanmıştır. Yüzgeç modelinin uç bölgesinde akış yapısının incelenmesi amaçlandığı için bir adet uç plaka kullanılmıştır. İstenilen netlikte

fotoğraflar elde edebilmek için test bölgesinin iyi aydınlatılması büyük önem taşımaktadır. Oluşan akış yapısının görüntülenebilmesi için aydınlatma, test bölgesinin üst bölümünde iki adet ve alt bölümünde bir adet olmak üzere toplam üç adet yoğun ışık kaynağı kullanılarak sağlanmıştır. Üniform akış çizgilerinin elde edilebilmesi için direnç teline ağırlık bağlanarak direnç telinin düz ve gergin kalması sağlanmıştır. Deney sırasında parafin haznesinden direnç teli üzerine sıvı parafin akıtılmaktadır. Güç kaynağının, tel yüzeyine tutunan parafin taneciklerini buharlaştırmasıyla akım çizgileri oluşmaktadır. Yoğun ışık kaynakları ile aydınlatılan düzlemde oluşan akım çizgileri Gopro Hero 7 kamera kullanılarak kaydedilmiştir.

2.5. Tekrarlanabilirlik Analizi

Bu çalışma kapsamında kuvvet ve akış görüntüleme deneyleri iki tekrar alınarak gerçekleştirilmiştir. Kuvvet ölçümünde elde edilen değerlerin tekrarlanabilirliğini ve akış görüntüleme deneylerinde ise oluşan akış görüntülerinin aynı şartlarda aynı oluşup oluşmadığını belirlemek için deneyler en az iki tekrarlı olmak üzere tekrarlanarak gerçekleştirilmiştir. Düz yüzgeç modelinin C_L ve C_D katsayılarının tekrarlanabilirliği Şekil 18’de verilmiştir. Tekrarlı yapılan deneylerin benzer sonuçlar gösterdiği görülen kuvvet sonuçları için ortalamaları alınmıştır.



Şekil 18. Düz yüzgeç modelinin C_L ve C_D değerlerinin $Re=1.2 \times 10^5$ için tekrarlanabilirliği

2.6. Belirsizlik Analizi

Deneyisel çalışmalarda hata ve belirsizlikler birçok sebepten kaynaklanabilir. Hata oranının belirlenmesi deney sonuçlarının doğruluğu ve geçerliliğinin belirlenebilmesi açısından önemlidir. Deneyisel çalışmalarda bir büyüklüğün ölçülmesinde, ölçüm aleti seçimi, kalibrasyon, deney şartları ve insan faktörlerinden kaynaklanan farklılıklar oluşmaktadır. Yapılan tekrarlı deneyler sonucunda, bu farklılıkların belirli bir aralık içinde olması beklenmekte ve deneyisel belirsizlik olarak adlandırılmaktadır (Holman, 1984).

Bu çalışmada ölçümü ve hesaplamaları yapılan parametrelerin belirsizlik değerleri, Coleman ve Steele (1989) tarafından sunulan hesaplama yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Denklem (9)'da belirsizlik belirlenirken kullanılacak fonksiyonun genel ifadesi verilmiştir. Bu formun belirsizlik ifadesi Denklem (10)'da matematiksel olarak ifade edilmektedir. Bu bağtıda yer alan X, her bir ölçülen değişkeni ifade etmektedir.

$$r = r(X_1^a, X_2^b, X_3^c, \dots, X_\infty^z) \quad (9)$$

$$u_r = \frac{w_r}{r} = \left[a^2(u_{x_1})^2 + b^2(u_{x_2})^2 + c^2(u_{x_3})^2 + \dots \right]^{1/2} \quad (10)$$

Denklem (7)'de verilen taşıma katsayısı formülünde oluşacak belirsizlik, Denklem (10) kullanılarak Denklem (11)'de verilmiştir.

$$u_{c_L} = \frac{w_{c_L}}{c_L} = \left[(1)^2 \left(\frac{w_{FL}}{F_L} \right)^2 + (-1)^2 \left(\frac{w_\rho}{\rho} \right)^2 + (-2)^2 \left(\frac{w_{U_0}}{U_0} \right)^2 + (-1)^2 \left(\frac{w_{AP}}{A_P} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

Denklem (8)'de verilen sürüklenme katsayısı formülünde oluşacak belirsizlik, Denklem (12)'de sunulmuştur.

$$u_{c_D} = \frac{w_{c_D}}{c_D} = \left[(1)^2 \left(\frac{w_{FD}}{F_D} \right)^2 + (-1)^2 \left(\frac{w_\rho}{\rho} \right)^2 + (-2)^2 \left(\frac{w_{U_0}}{U_0} \right)^2 + (-1)^2 \left(\frac{w_{AP}}{A_P} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

Burada u_{c_L} taşıma katsayısının toplam belirsizliği, u_{c_D} sürüklenme katsayısının toplam belirsizliği ve w ölçülen veya hesaplanan büyüklüğün sapmasıdır. Bu deneyisel çalışmada kuvvet ölçümleri gerçekleştirilmiş ve hesaplanan taşıma ve sürüklenme katsayılarının belirsizlik değerleri Denklem (11) ve (12) kullanılarak elde edilmiştir. Taşıma katsayısının belirsizliği %3.55 ve sürüklenme katsayısının belirsizliği %3.95 olarak belirlenmiştir. Belirsizlik hesaplamaları ayrıntılı olarak EKLER bölümünde açıklanmıştır.

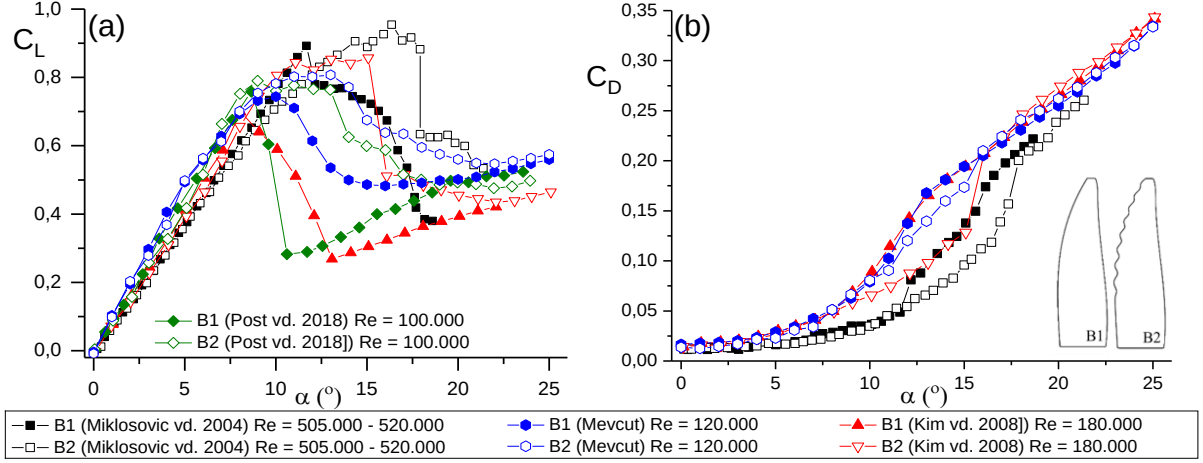
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, hücum kenarı dalgalı geometriye sahip yüzgeç modelleri ve dikdörtgen kesitli uçak kanadı modelleri deneysel sonuçları sunulmuştur. Reynolds sayısı ortalama veter uzunluğuna bağlı olarak hesaplanmış ve 5.0×10^4 , 8×10^4 , 1.2×10^5 Reynolds sayılarında kuvvet ölçüm deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kuvvet ölçümleri, $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ hücum açısı aralığında birer derece artışlarla gerçekleştirilmiştir. C_L ve C_D katsayıları Denklem (7) ve (8) kullanılarak hesaplanarak hücum açısı değişimine göre grafiklerde gösterilmiştir. Akış görüntüleme deneyleri yüzey yağ, iplikçik ve duman akış yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir akış görüntüleme deneyi için test bölgesinin üstüne yerleştirilen GoPro Hero Black 7 ile hızlandırılmış videolar çekilmiştir. Kuvvet ölçüm ve akış görüntüleme deneyleri sonuçları yüzgeç ve dikdörtgen kesitli modeller için iki başlık altında incelenecektir. Çolak vd. (2023) deneysel bir çalışmada yüzgeç modelinde dalgalı geometrinin etkilerini kuvvet ölçümleri ve yüzey yağ akış görüntüleme deneyleri gerçekleştirilerek araştırmıştır. B1, B2, C1, C2 ve C3 modelleri kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmanın sonuçları, bu tez çalışması kapsamında 3.1.1 ve 3.1.2 bölümlerinde verilmiştir.

3.1. Yüzgeç Modeller için Deneysel Sonuçlar

Hücum kenarı sırasıyla düz ve dalgalı geometriye sahip B1 ve B2 olarak isimlendirilen temel yüzgeç modellerinin C_L ve C_D değerlerinin literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırıldığı grafikler Şekil 19 (a) ve (b)'de sırasıyla sunulmuştur.

Post vd. (2018) ve Miklosovic vd. (2007) tarafından yapılan çalışmaların sonuçları Reynolds sayısının 400.000 değeri için uyumludur ancak dalgalı modelde kaldırma kuvveti %20 düşük bulunmuştur. Bunun sebebi, Post vd. (2018)'nin tam kanat uzunluklu model ve dış balans sistemi, Miklosovic vd. (2007)'nin ise yarım kanat uzunluklu model ve iç balans sistemi kullanmalarından kaynaklı olabilir.



Şekil 19. Literatürde kullanılan yüzgeç modellerinin farklı Reynolds sayılarında (a) C_L ve (b) C_D katsayılarının karşılaştırılması

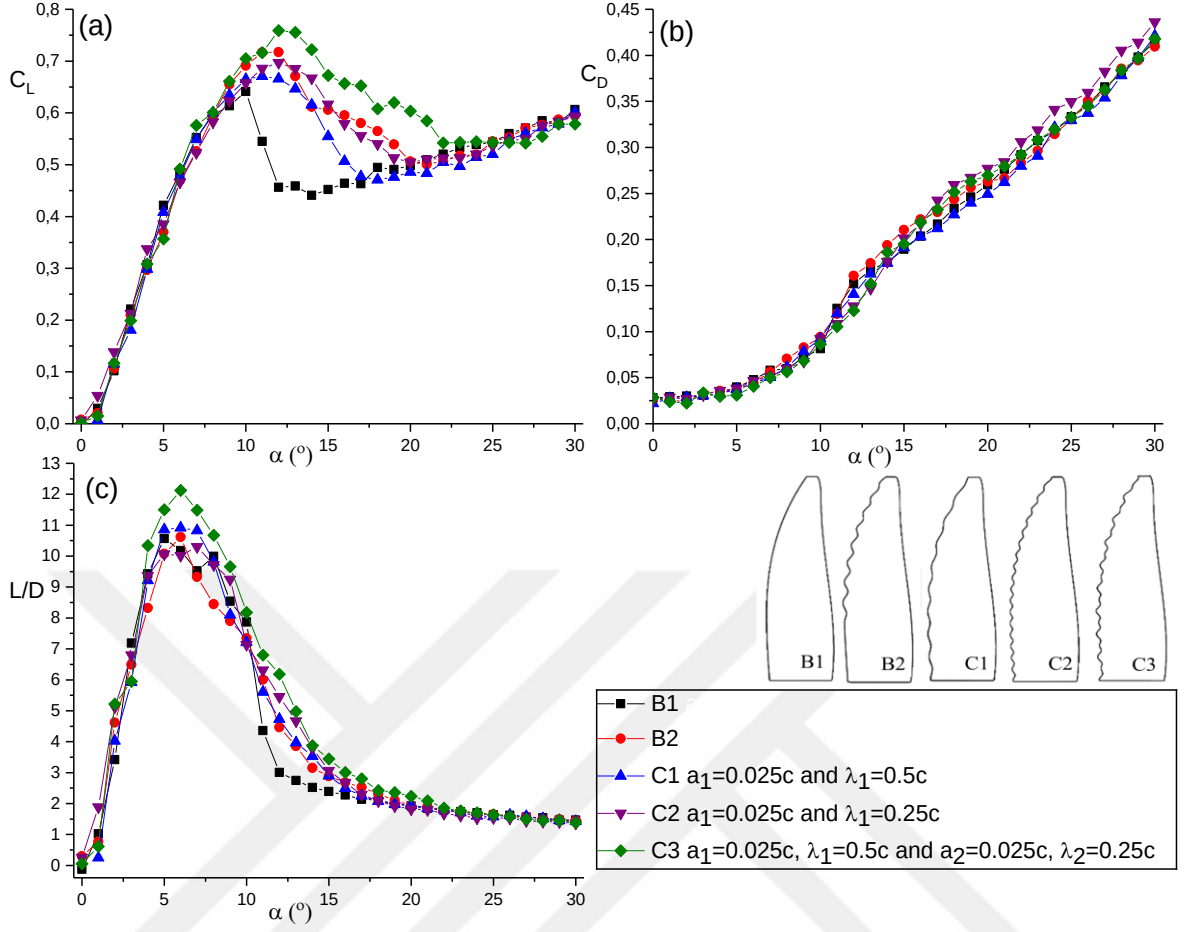
Literatürdeki yüzgeç modeli kullanılarak yapılan çalışmalar ve dalgalı geometriye sahip kanat modellerinin düz modellerle ilişkisi incelendiğinde, dalgalı modellerin, stol bölgesinde daha yüksek taşıma sağladığı, stol açısını geciktirdiği ve daha yumuşak stol karakteristikleri sağladığı şeklinde genel bir trend olduğu görülmektedir. Ancak tüm çalışmalarda aynı model kullanılmasına rağmen artan Reynolds sayısına göre beklenen artış görülmemektedir. Bu farklılığın kullanılan modelin geometrik özellikleri, en boy oranı, yüzey pürüzlülüğünden kaynaklandığı düşünülebilir. Moscato vd. (2022) de çalışmalarında aynı model kullanılmasına rağmen farklılığın olabileceğini vurgulamış ve buna rağmen ortak bir trendin olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 19 (b)'de dalgalı geometriye sahip modellerin sürüklemeyi düz modele kıyasla önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Düz modelde sürüklemeye meydana gelen artış dalgalı modellerde görülmemektedir.

3.1.1. C1, C2 ve C3 Modellerinin Kuvvet Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

Şekil 20 (a, b ve c)'de $Re = 5.0 \times 10^4$ sayısında B1, B2, C1, C2 ve C3 yüzgeç modelleri için C_L , C_D ve L/D oranları karşılaştırması verilmiştir. Daha önce bahsedildiği gibi matematiksel modeli oluşturulan yüzgeç modelleri olan B1 ve B2 modelleri temel modeller olarak ele alınmıştır. Hücum kenarında dalga geometrisi olmayan model B1, dalga geometrisi olan model ise B2 olarak isimlendirilmiştir. C1 ve C2 modelleri Johari vd. (2007) tarafından yapılan çalışmada, dikdörtgen NACA 634-021 uçak kanadı profiline sahip modeller ile aynı genlik ve dalga boyu parametrelerine sahiptir. Dalgalı geometrinin etkisi C1, C2 ve C3 modelleri için stol öncesinde dikkate alınmayabilir. Şekil 20 (a)'da görüldüğü

gibi B1 modelinde stol, taşıma katsayısının maksimum olduğu 10 derecede meydana gelmektedir. 10 dereceden sonra taşıma katsayısının düştüğü görülmektedir. B2 modelin C_L değeri stol öncesinde B1 modelinden daha düşük olmasına rağmen yaklaşık 21 dereceye kadar B1 modelinden daha yüksektir. Dalgalı geometriye sahip modeller göz önüne alındığında artan hücum açısı ile taşımada ani düşüş görülmemiş olup dalgalı geometrinin stol karakteristiklerini yumuşattığı söylenebilir. B1 modeli için 10 derecede maksimum C_L değeri 0.6 iken dalgalı C3 modelinin maksimum C_L değeri 12 derecede 0.758 olmuştur. 12 derecede B1 modelinin C_L değeri 0.45 iken dalgalı C3 modeli bu açıda 0.758 değerine yükselmiş ve %68.4'lik bir artış sağlamıştır. Hücum açısının 6° - 12° aralığı için C3 modeli diğer modellere göre daha yüksek C_L değerine sahiptir. 8 dereceden düşük hücum açılarında dalgalı modeller B1 model ile benzer trend göstermektedir. Daha uzun dalga boyuna sahip olan C1 modeli, daha kısa dalga boyuna sahip olan C2 modeline göre daha iyi performans göstermiştir. C3 modeli stol açısını 10° 'den 12° 'ye öteleyerek maksimum C_L değerini B1 modeline göre %18.25 artırmıştır. C1 ve C2 modelleri, B1 modelinin maksimum C_L değerine sahip olduğu $\alpha=12^\circ$ 'de maksimum C_L değerini sırasıyla yaklaşık %45.8 ve %52.7 oranında artırmıştır. B2 modeli $\alpha=12^\circ$ 'de C1 ve C2 modellerinden daha fazla taşıma oluşturmaktadır. C1 ve C2 modellerinin parametreleri ile oluşturulan C3 modeli, C1 ve C2 modellerinden daha iyi taşıma sağlamıştır.

Şekil 20 (b)'de 5.0×10^4 Reynolds sayısında B1, B2, C1, C2 ve C3 yüzgeç modelleri için C_D değerlerinin hücum açısına göre karşılaştırması görülmektedir. B2 modeli $12^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ aralığında B1 modeline göre daha yüksek C_D değerine sahiptir. C2 modeli, düz B1 ve dalgalı C1 modellerinden daha yüksek C_D 'ye sahiptir. C3 modeli 14° 'ye kadar daha düşük C_D değerine sahip iken $14^\circ \leq \alpha \leq 21^\circ$ aralığında düz B1 modelinden daha yüksek C_D değerine sahiptir. B2 modeli ile kıyaslama yapılırsa $6^\circ \leq \alpha \leq 17^\circ$ aralığında C3 modeli daha düşük C_D değerine sahiptir. 17° 'den 23° 'ye kadar B2 modeli C3 modeline göre daha düşük C_D değerine sahiptir. C3 modelinin C_D değeri diğer modellere göre stol öncesi hücum açılarında daha düşük değerlere sahipken C1 modelinin stol sonrası açılarda daha düşük sürüklemeye sahip olduğu görülmektedir. Taşıma katsayısında görülen stol durumunda meydana gelen düşüş, sürüklenme katsayısında artış olarak görülmektedir. Dalgalı geometriye sahip C1, C2, C3 modellerinin C_L değerleri B1 ve B2 temel modellere göre $10^\circ \leq \alpha \leq 14^\circ$ aralığında daha düşüktür. Stol karakteristiklerindeki iyileştirme dalgalı geometrinin sağladığı üç boyutlu akış yapısından kaynaklanmaktadır.



Şekil 20. B1, B2, C1, C2 ve C3 modellerinin $Re=5.0 \times 10^4$ için (a) C_L (b) C_D (c) L/D oranlarının karşılaştırılması

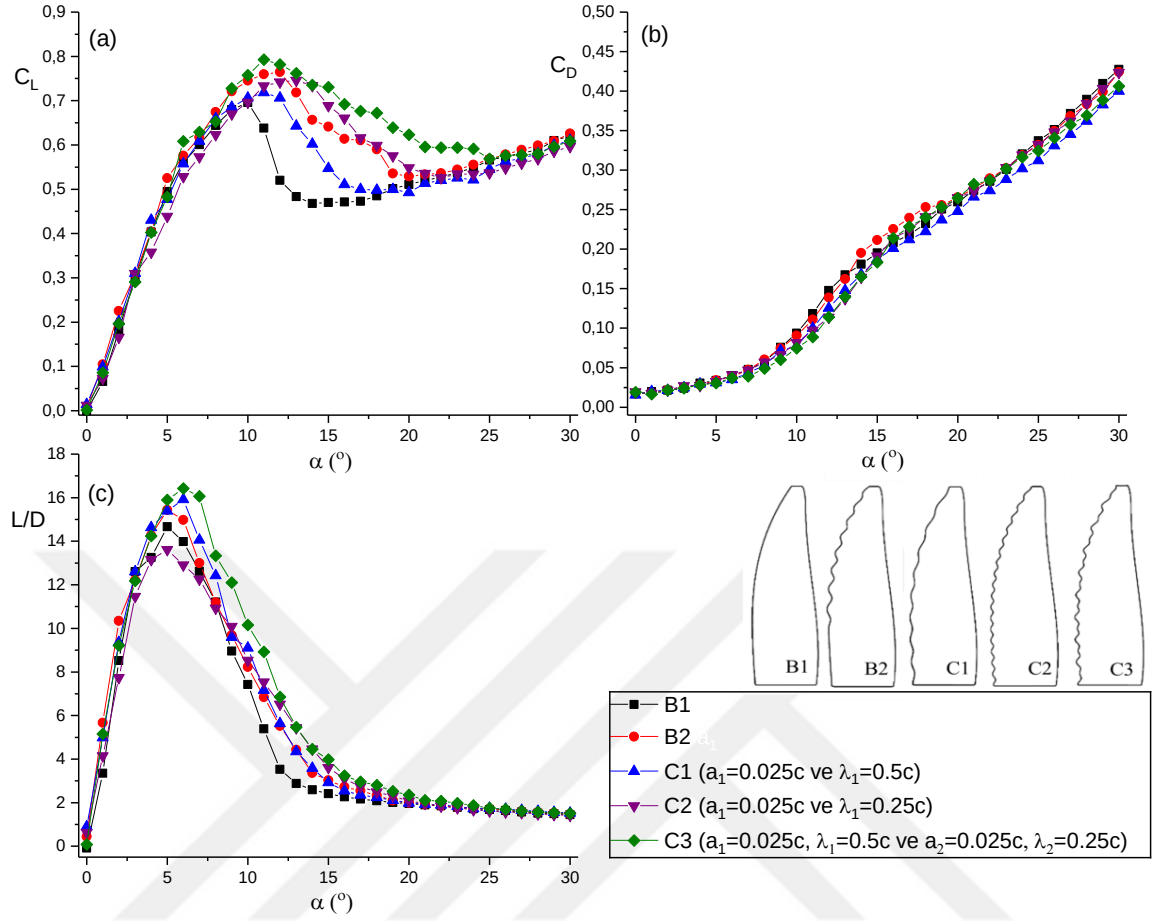
Test modellerinin aerodinamik performansı incelenirken taşıma katsayısının sürüklenme katsayısına oranı (L/D ya da C_L/C_D) dikkate alınmaktadır. Şekil 20 (c)'de $Re = 5 \times 10^5$ için L/D oranları verilmiştir. En yüksek L/D oranına sahip olan model en iyi aerodinamik performansa sahip olarak yorumlanabilir. B2 modeli B1 modelinden $8^\circ \leq \alpha \leq 18^\circ$ aralığında daha yüksek L/D oranına sahiptir. Miklosovic vd. (2004) dalgalı geometriye sahip yüzgeç modelinin düz yüzgeç modeline göre yüksek hücum açılarında daha iyi performans gösterdiğini belirtmiştir. C2 model yaklaşık olarak B2 modeli ile benzer L/D oranına sahiptir. C3 modeli $\alpha = 6^\circ$ 'de en yüksek L/D oranına sahiptir ve B1 modeline göre bu derecede %20'lik bir artış sağlamıştır. 11° - 18° derece aralığı dışında B2 model B1 model ile aynı L/D değerine sahiptir. C1 ve C2 modellerinin parametreleri kullanılarak oluşturulan C3 modeli bu dalgalı modellerden ve temel modeller B1 ve B2 modellerinden 4° - 21° aralığında daha yüksek L/D değerlerine sahiptir. C3 modelinin L/D değeri 3° - 22° aralığı için B1, B2,

C1, C2 ve C3 modellerinden daha yüksektir. Bu sonuçlardan daha gerçekçi bir yaklaşımla oluşturulan C3 modelinin en iyi aerodinamik performansı gösterdiği görülmektedir.

Şekil 21 (a, b ve c)'de $Re = 8.0 \times 10^4$ için B1, B2, C1, C2 ve C3 yüzgeç modelleri için C_L , C_D ve L/D oranları karşılaştırması verilmiştir. $Re = 5.0 \times 10^5$ sayısında olduğu gibi $Re = 8.0 \times 10^4$ sayısında da stol 10 derecede gerçekleşmektedir. Tüm modellerin C_L değeri 11 dereceye kadar lineer olarak artmaktadır. C3 modeli, 6° ile 25° aralığında B1 modelinden daha yüksek C_L değerine sahiptir. Stol sonrası bölgede, B2 modeli 21° 'ye kadar B1'den daha yüksek C_L değerine sahiptir. Daha gerçekçi bir yaklaşımla geliştirilen C3 modelinin 8° ile 25° arasında C_L değeri B1, B2, C1 ve C2 modellerine göre daha yüksektir. Daha küçük dalga boyuna sahip C2 modelinin C_D değeri stol açısından önce C1 modelinden daha düşük, bu modelin C_D değeri ise stol gerçekleştikten sonra C1 modelinden daha yüksektir. B2 modeli taşımayı artırarak B1 modeli için maksimum stol açısını 10° 'den 12° 'ye ötelemiştir. C1 ve C3 modellerinin a_1/λ_1 oranları aynı olmasına rağmen bu modellerin C_L değerleri oldukça farklıdır. Bunun olası bir açıklaması, C3 modelinin ikinci bir a/λ oranına sahip olmasıdır. C3 modeli, C3 modelinin maksimum kaldırma katsayısına sahip olduğu $\alpha = 11^\circ$ 'de B1 modeline göre C_L değerini yaklaşık %24.2 artırmıştır.

Tüm yüzgeç modellerinin C_D değerlerinin hücum açısına göre değişimleri Şekil 21 (b)'de gösterilmektedir. C3 modeli, stol öncesi bölgede en düşük C_D değerine sahiptir. C1 modeli, $\alpha = 15^\circ - 30^\circ$ arasında en düşük C_D değerine sahiptir. B2 modeli, 13° ile 23° hücum açıları arasında B1 modelinden daha yüksek C_D 'ye sahiptir ve 30° 'ye kadar benzer sürüklenme davranışı gözlenir. Hücum açısı 15° 'den sonra C2 modelinin C_D 'si C1 modelinden daha yüksektir. C3 modeli, $\alpha = 16^\circ$ 'ye kadar dalgalı modellerden daha düşük C_D 'ye sahiptir. C3 modeli, 6° ile 19° arasında B2 modelinden daha küçük bir C_D 'ye sahiptir. C1 modeli, $\alpha = 9^\circ$ 'den sonra B1 modelinden daha düşük bir C_D 'ye sahiptir.

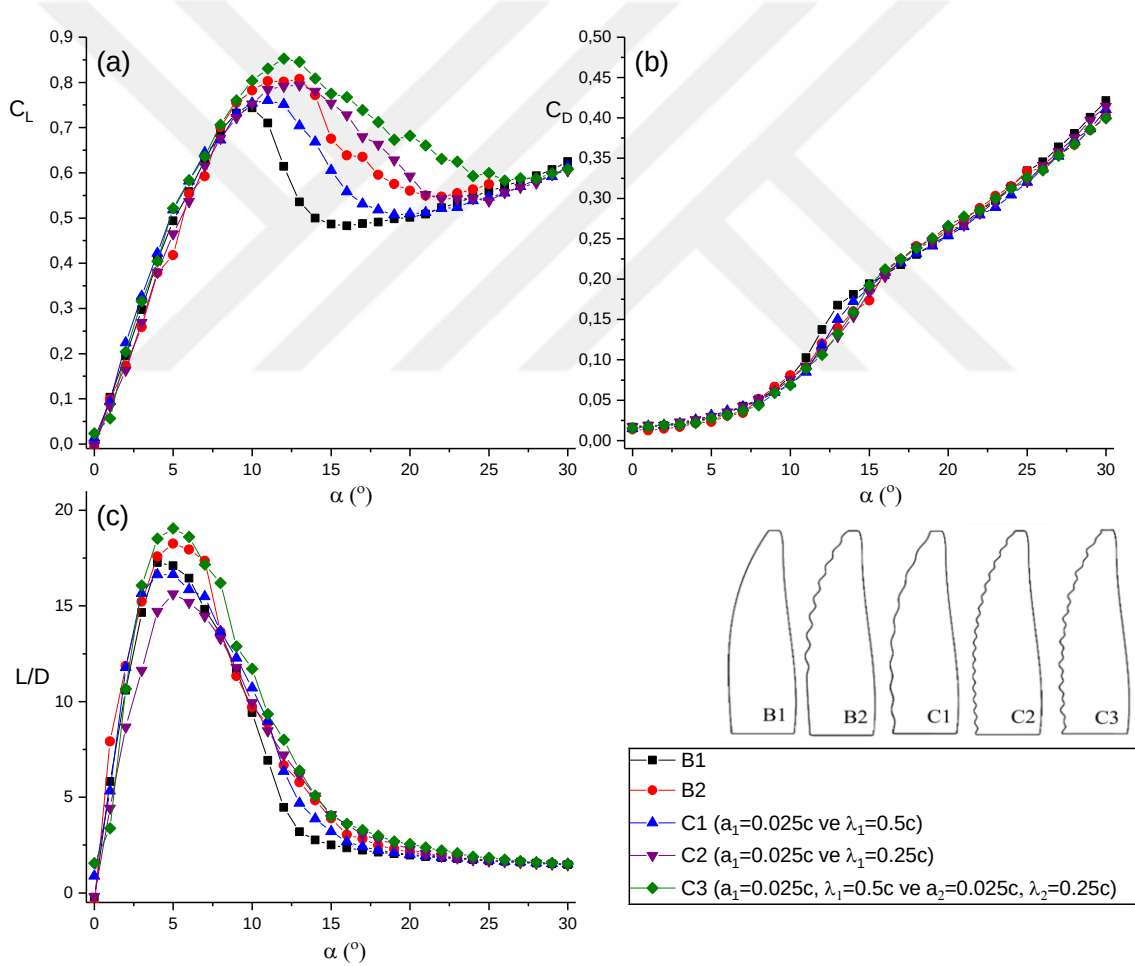
$Re = 8.0 \times 10^4$ 'teki tüm yüzgeç modellerinin L/D oranı Şekil 21 (c)'de gösterilmektedir. Tüm kanat modelleri için L/D oranı 4 derecenin altında aynıdır. Dalgalı geometriye sahip tüm kanat modelleri C2 haricinde, $6^\circ \leq \alpha \leq 18^\circ$ aralığında temel B1 modeline eşit veya daha büyük L/D 'ye sahiptir. C2 modeli, B1 modeline kıyasla $2^\circ \leq \alpha \leq 9^\circ$ daha düşük L/D 'ye sahiptir. 9° 'den sonra, C2 modelinin L/D değeri $\alpha = 20^\circ$ 'ye kadar B1 modelinden daha yüksektir. Bu modellerin L/D oranları $\alpha = 6^\circ$ öncesinde birbirine yakınken, 6° ile 20° arasında C3 modelinin L/D oranı C1 modelinden daha yüksektir.



Şekil 21. B1, B2, C1, C2 ve C3 modellerinin $Re=8.0 \times 10^4$ için (a) C_L (b) C_D (c) L/D oranlarının karşılaştırılması

Şekil 22 (a, b ve c)'de $Re=1.2 \times 10^5$ için B1, B2, C1, C2 ve C3 modellerinin C_L , C_D ve L/D oranları hücum açısında göre değişimi görülmektedir. Hücum açısı 8° 'nin altında, temel ve dalgalı modellerin taşıma eğrisi benzerlik göstermektedir. Dalgalı modeller, B1 modeline kıyasla stol açısını geciktirmiştir. Dalgalı geometriye sahip B2, C1, C2 ve C3 modelleri, stol sonrası bölgede B1 modeline göre daha yüksek taşıma katsayıları üretmiştir. $\alpha=13^\circ$ 'de, C3 modelinin C_L değeri B1 modelinin $C_L=0.535$ değerine kıyasla C_L değerini 0.794'e yükselterek %48.4'lük bir iyileşme sağlamıştır. B2 modeli, stol açısını 3° geciktirmiş ve maksimum C_L değerini yaklaşık %5.5 artırmıştır. Johari vd. (2007) çalışmalarında biri 4S ($a=0.025c$, $\lambda=0.5c$) ve diğeri 8S ($a=0.025c$, $\lambda=0.25c$) olarak adlandırılan iki dalgalı kanadı karşılaştırmıştır. Johari vd. (2007)'nin yaptıkları çalışmanın sonuçlarına göre, daha kısa dalga boyuna sahip olan model 8S'nin, daha uzun dalga boyuna sahip olan model 4S'ye göre stol öncesi açılarda daha büyük bir kaldırma katsayısına sahip olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde, 4S modeli ile aynı değerlere sahip C1 modeli, 8S modeli ile aynı değerlere

sahip C2 modeline göre daha düşük kaldırma katsayısı göstermiştir. Tüm modeller, stol sonrası bölgede taşımada bir gelişme göstermektedir, özellikle daha gerçekçi bir yaklaşımla modellenen C3 modeli, temel ve dalgalı modellere kıyasla en yüksek taşımaya sahiptir. Dalgalı B2, C1, C2 ve C3 modellerinin maksimum C_L değeri B1 modelinin değerinden daha büyüktür. B2 modeli, $9^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$ arasında B1 modelinden daha fazla taşıma oluşturmaktadır. B2, C1, C2 ve C3 modelleri stol açısını sırasıyla 2° , 1° , 3° ve 1° geciktirmiştir. Hansen (2012) aynı a/λ oranına sahip kanat profilli modeller için genel eğilimlerin benzer olduğunu ifade etmiştir. Tablo 4, C1 ve C3 modellerinin aynı a_1/λ_1 değerine sahip olduğunu, ancak modellerin benzer artış trendleri sergilemediklerini göstermektedir. Bunun nedeni, C3 modelinin ikinci bir a/λ oranına sahip olması olabilir.



Şekil 22. B1, B2, C1, C2 ve C3 modellerinin $Re = 1.2 \times 10^5$ için (a) C_L (b) C_D (c) L/D oranlarının karşılaştırılması

$Re = 1.2 \times 10^5$ 'teki temel B1, B2 ve dalgalı C1, C2, C3 kanat modelleri için C_D , Şekil 22 (b)'de gösterilmektedir. Dalgalı B2, C1, C2 ve C3 modellerinin C_D değeri, $\alpha = 11^\circ$ 'ye kadar

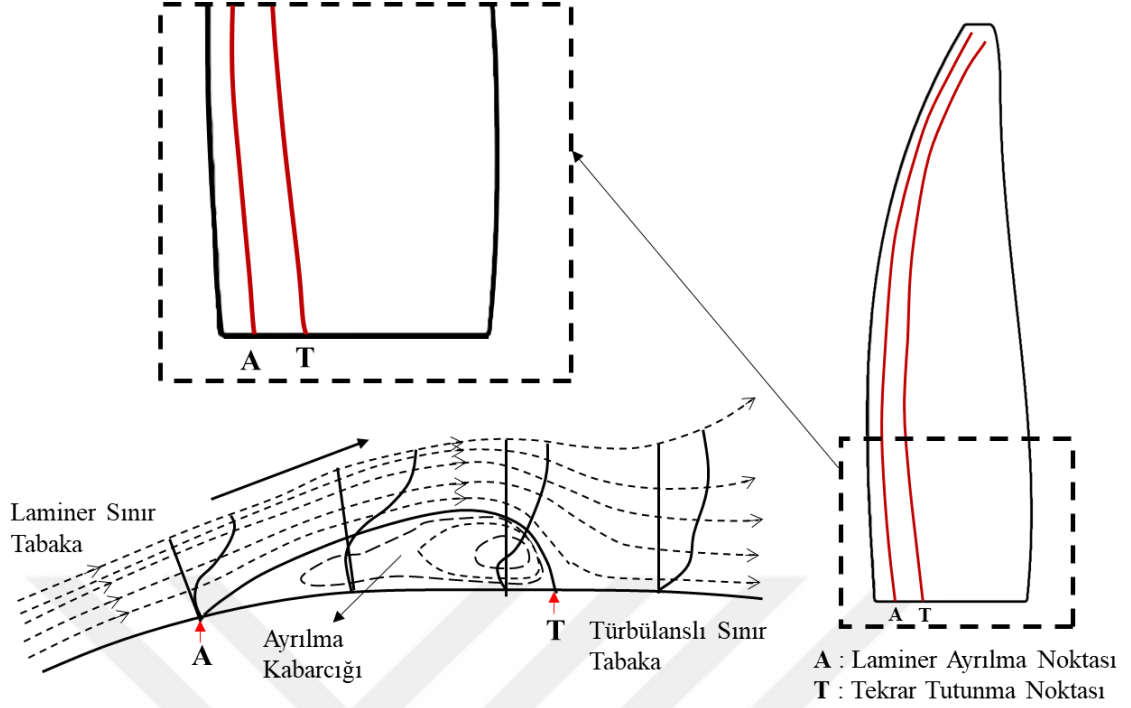
B1 modelininkine benzer eğilim göstermektedir. Tüm dalgalı modeller, B1 modeline kıyasla $11^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$ aralığında daha düşük C_D değerine sahiptir. C1 modeli ($a = 0.025c$, $\lambda = 0.5c$), C2 modelinden ($a = 0.025c$, $\lambda = 0.25c$) $17^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$ için daha düşük C_D göstermektedir. C3 modeli, $15^\circ \leq \alpha \leq 24^\circ$ için temel B1 modeline kıyasla daha yüksek sürükleme katsayısına sahiptir ve $24^\circ - 30^\circ$ arasında temel B1 modeline kıyasla daha az C_D değerine sahiptir.

Yüzgeç modellerin L/D oranları 1.2×10^5 Reynolds sayısı için Şekil 22 (c)'de gösterilmektedir. C2 modeli, $\alpha = 8^\circ$ 'den önce B1 modelinden daha az L/D oranına sahiptir. C1 ve C2 modelleri, $\alpha = 5^\circ$ 'de B1 modeline kıyasla L/D oranını sırasıyla %2.7 ve %8.6 azaltmıştır. C3 modeli $\alpha = 5^\circ$ 'de 19.054 ile en yüksek L/D oranına sahiptir ve maksimum L/D oranını yaklaşık %11 artırmaktadır. C1 ve C2 modeli, B1 modeline göre daha küçük L/D oranına sahiptir. Dalgalı modeller C1, C2 ve C3 modelleri $10^\circ \leq \alpha \leq 21^\circ$ aralığında daha büyük L/D değerine sahiptir.

3.1.2. C1, C2 ve C3 Modellerinin Yağ Akış Görüntüleme Yöntemi ile Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, akış ayrılma ve tekrar tutunma noktaları, girdap yapıları gibi akış etrafındaki akış özelliklerini ortaya çıkarmak için yüzey yağ akışı görselleştirme yöntemi kullanılmıştır. Yüzey yağ akış görüntüleme yöntemi akış karakteristiklerini belirleyebilmek için kullanılmaktadır. Deneyler, stol öncesi ve sonrası olmak üzere seçilen 5° , 8° , 10° ve 13° hücum açılarında gerçekleştirilmiştir. Yağ akış görüntüleme deneyleri 1.2×10^5 Reynolds sayısında gerçekleştirilmiştir.

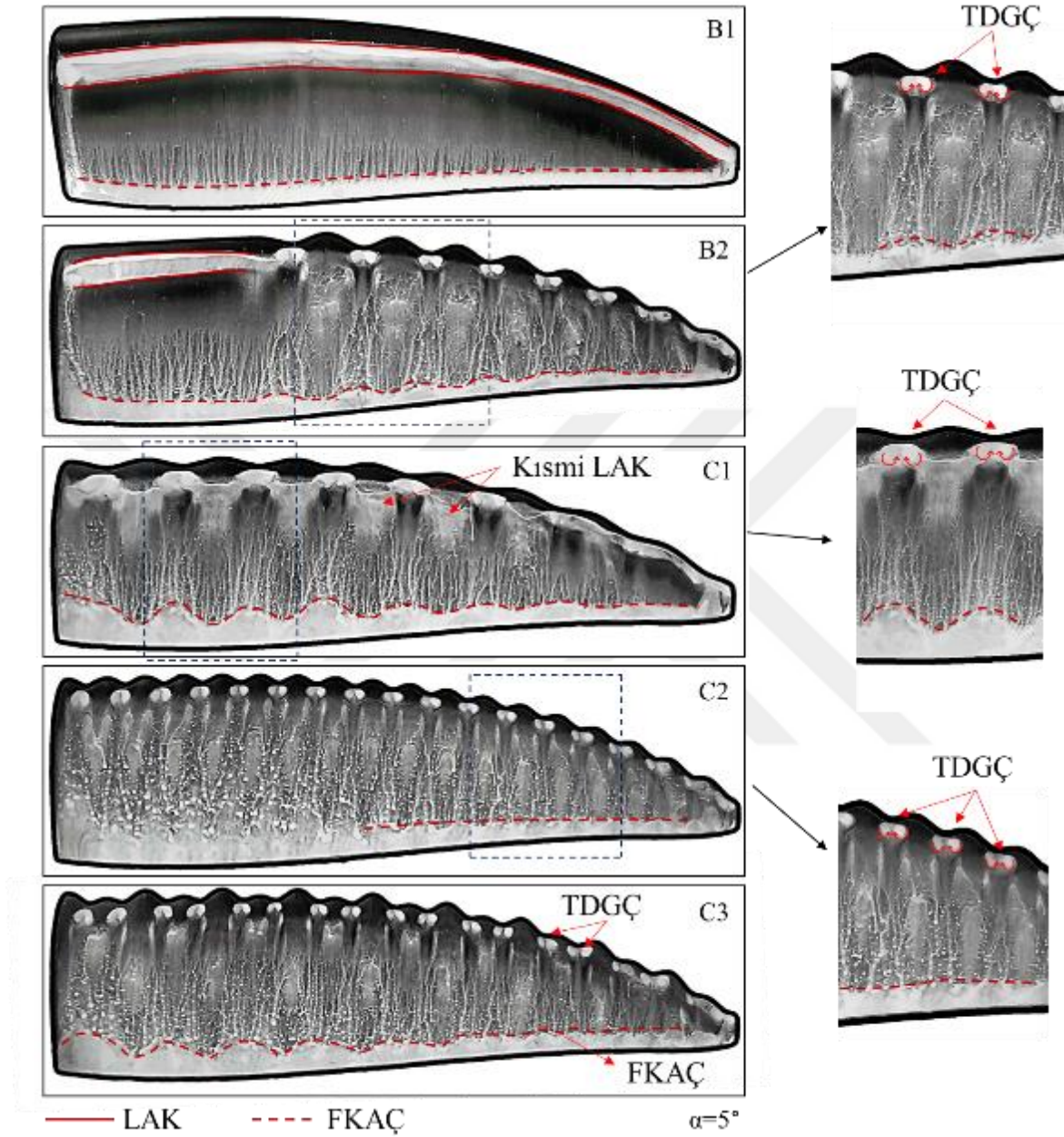
Laminer ayrılma kabarcığı (LAK), laminar ayrılma noktası ile tekrar tutunma noktası arasında kalan bölge olarak ifade edilmektedir. LAK iki kırmızı çizgi arasındaki bölge olarak işaretlenmiştir. LAK oluşumu Reynolds sayısı ile ilişkilidir. Reynolds sayısı, akışın laminar veya türbülanslı olduğunu belirten boyutsuz bir sayıdır. Düşük Reynolds sayılarında LAK oluştuğu gözlenmiştir. Sınır tabakası, büyüyen ters basınç gradyanını sürdüremezse kanat profilinin yüzeyinden ayrılabilir. Türbülanslı sınır tabakası yeterli enerjiye sahipse, laminar sınır tabakası ayrıldıktan sonra türbülanslı sınır tabakası olarak yüzeye yeniden tutunabilir. Yeniden tutunma noktası, türbülans akışının yüzeye yeniden bağlandığı konumdur. Şekil 23'te LAK oluşumu şematığı ve B1 modelinde $\alpha = 5^\circ$ 'de laminar ayrılma ve yeniden tutunma noktaları gösterilmektedir.



Şekil 23. Laminer ayrılma kabarcığı (LAK) oluşumu ve B1 modelinde LAK oluşumu

Şekil 24'te, $\alpha=5^\circ$ 'de tüm kanat modelleri için kanat profilinin emme yüzeyindeki yüzey yağ akışı görüntüleri verilmiştir. Kırmızı çizgiler arasındaki alan, B1 ve B2 modellerinde LAK bölgesini tanımlamaktadır. Kesikli kırmızı çizgiler, tüm kanat modelleri için ayrılma çizgilerini göstermektedir. B1 modeli için, laminer sınır tabakası, viskoz etkiler ve ters basınç gradyanları nedeniyle kanat ortasına yakın kanat boyunca bir LAK oluşturarak ayrılır ve yeniden birleşir. LAK, B2 modelinin dalgalı geometriye sahip olduğu bölgede oluşmazken, düz bölgesinde hücum kenarı yakınında oluştuğu gözlenmiştir. LAK oluşumu yerine, B2 modelinin dalga geometrisine sahip bölgesinde oluşan TDGÇ, LAK oluşumunu ortadan kaldırmaktadır. B2 modelinin LAK bölgesi, B1 modeline kıyasla hücum kenarına daha yakındır. Bu durumda düz ve dalgalı bölgelerden oluşan B2 modeli, temel ve dalgalı modellerle karşılaştırıldığında, dalga geometrisinin akış yapısı üzerindeki etkisini en iyi ortaya koyan modeldir. B2 modeli, açıklık uzunluğunun üçte ikisi kadar hücum kenarı boyunca dalgalı geometriye sahiptir. Dalga geometrisi genliği, kambur balina yüzgeci gibi gövde kısmından uç kısma doğru azalmaktadır. Bu nedenle, B2 modelinin dalgalı geometriye sahip bölgesinde karmaşık akış yapısı gözlenirken, B2 modelinin düz bölgesinde B1 modeli ile aynı akış modeli gözlenmiştir. B2 modelinin düz bölgesinde firar kenar

ayrılmasının (FKA) düz bir çizgide, dalga bölgesinde ise dalgalı bir çizgide olduğu görülmektedir.

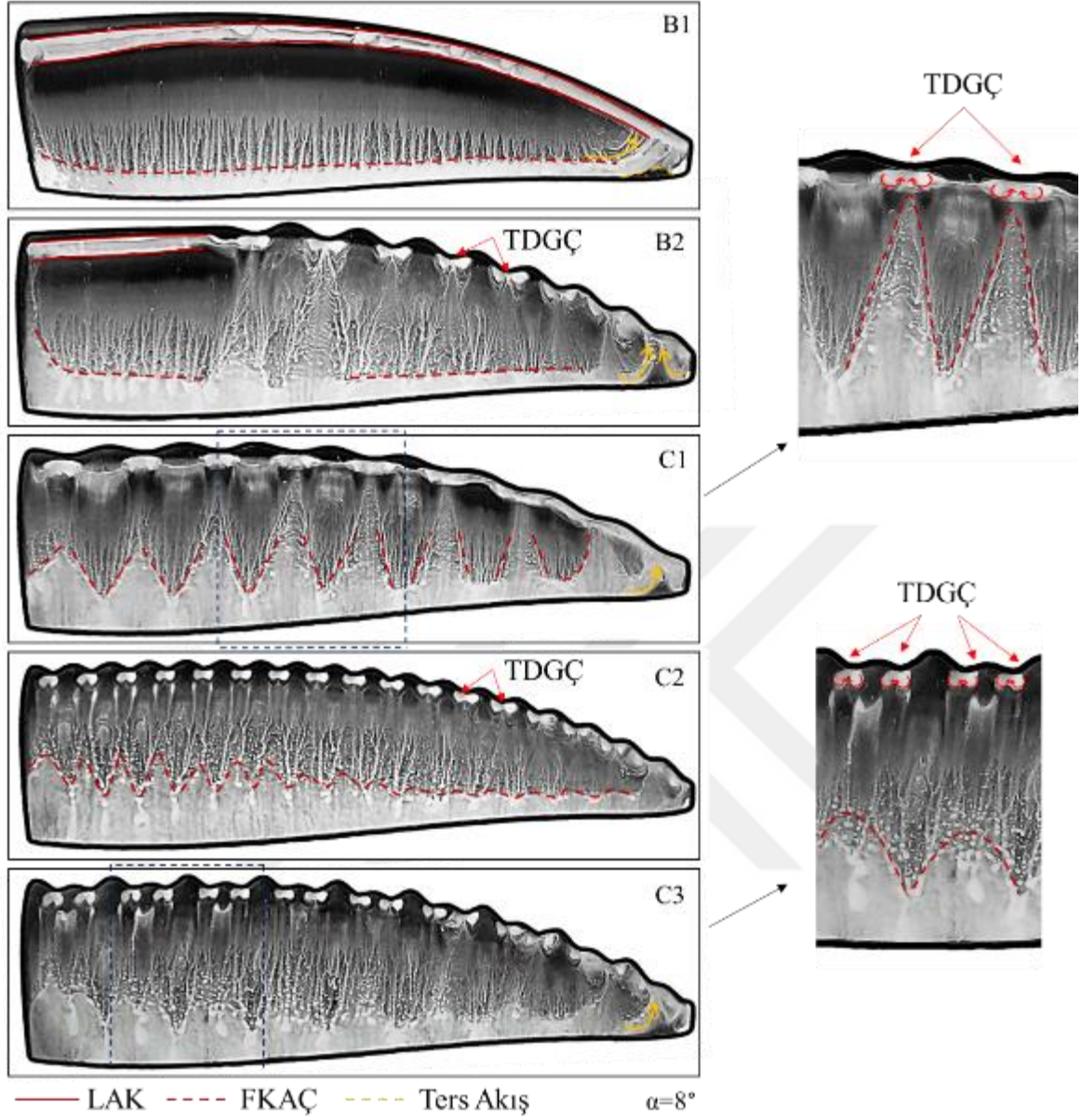


Şekil 24. Yüzgeç modelleri B1, B2, C1, C2 ve C3 için 5° hücum açısında yüzey yağ akış görüntüleri

Wei vd. (2019) çalışmasında belirtildiği gibi, TDGÇ oluşumu dalga tepeleri ve çukurları arasındaki basınç farklılıklarına bağlanmaktadır. Dalga tepelerindeki basınç, dalga çukurlarındakinden daha yüksektir, bu nedenle akış, dalga tepesinden çukur bölgesine doğru hareket eder. Wei vd. (2019) çalışmasına benzer şekilde bu çalışmada da çukurun arkasındaki akış, B2 modeli için kırmızı oklarla gösterilen TDGÇ oluşumuna yol

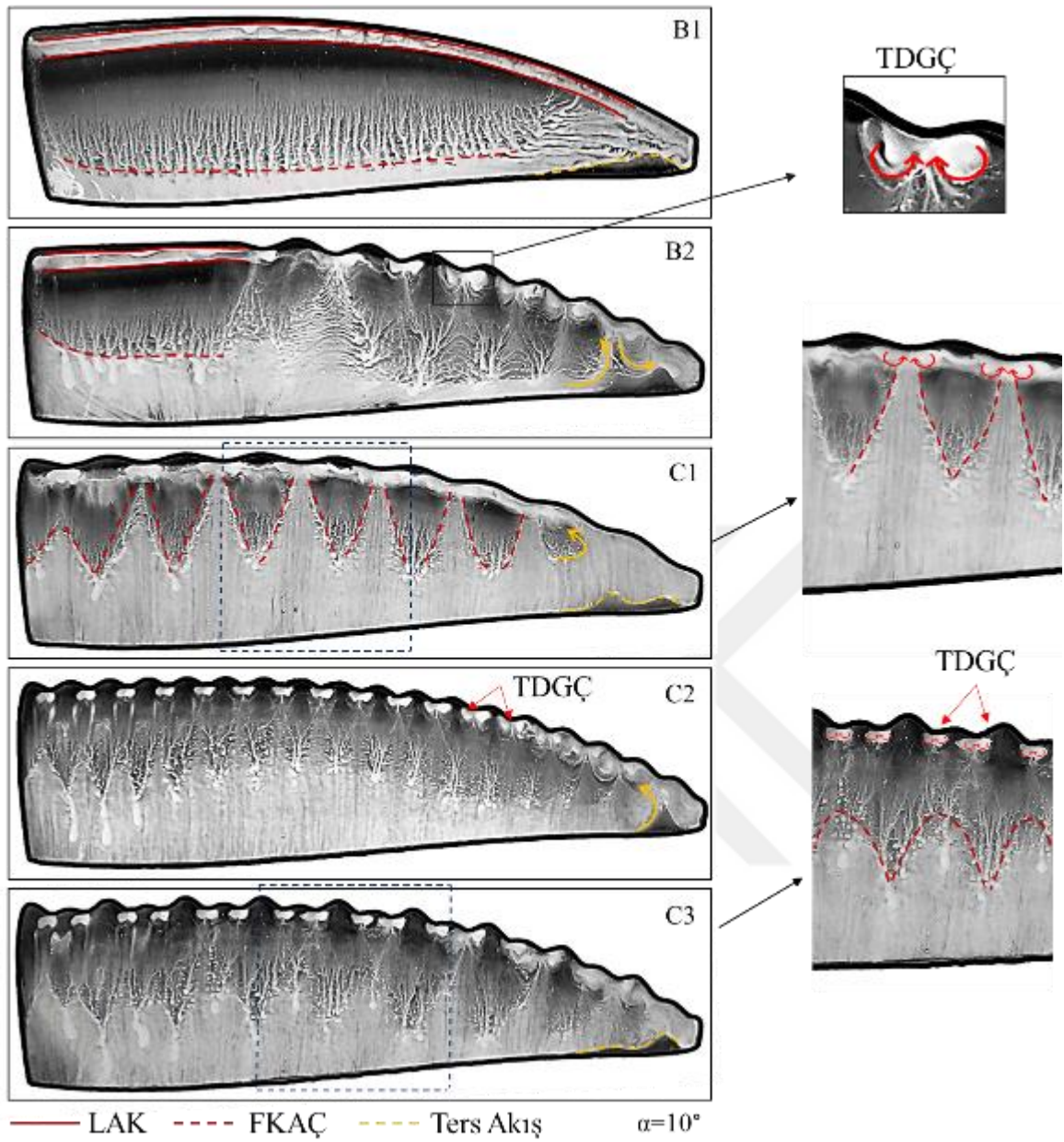
açmaktadır. Akış firar kenarı yakınında ayrılır ve bu ayrılma C1 modeli için mini delta şekilli bölge olarak adlandırılır. Benzer bir akış fenomeni, Rostamzadeh vd. (2014) tarafından NACA 0021 kanat profili üzerinde yapılan sayısal ve deneysel çalışmada elde edilmiştir. C1 modeli için dalga çukur noktalarında TDGÇ oluşumu görülmektedir. C1 modeli, gövdeden çukura doğru ilk çukurdan başlayarak altı TDGÇ'ne sahiptir. Ayrıca bu modelde, iki TDGÇ arasında yer alan kısmi LAK oluşumu görülmüştür. Benzer bir durum Wei vd. (2019) çalışmasında da gözlenmektedir. C2 modeli için, on altı TDGÇ oluşumu belirgin şekilde görülmektedir. C3 modeli için akış uç kısmındaki. C3 modelinde en yüksek dalga tepe noktaları arasında yedi çift TDGÇ oluşmaktadır. Yüzgeç geometrisine bağlı olarak, tüberkül kanat modelleri B2, C1, C2 ve C3 için, dalgalı ayrılma çizgisi (DAÇ), Sreejith & Sathyabhama (2020) tarafından belirtildiği gibi gövde bölgesinden uç bölgesine doğru firar kenara yaklaşmaktadır.

B1, B2, C1, C2 ve C3 için yüzey yağ görüntülerinin karşılaştırması $\alpha=8^\circ$ 'de Şekil 25'te verilmiştir. B1 modeli için, LAK hücum kenara doğru ilerler ve tekrar tutunmadan sonra arka kenarın yakınında akış ayrımı gerçekleşir. B2 modeli için sarı oklarla gösterilen saat yönünün tersine ve saat yönüne dönüş hareketleri, uç bölgede ayrılmaya neden olmuştur. TDGÇ oluşumu B2 modelinin dalga geometrisine sahip bölümünde gerçekleşir. C1 modeli için akış ayrımı, yayılma yönü boyunca delta şeklinde firar kenarına yakın bir yerde gerçekleşir. Tüm şekillerde modeller üzerinde işaretlenen kısımlar, oluşan akış yapılarını daha ayrıntılı gösterebilmek için modellerin yan tarafında yer almaktadır. C1 modelinin işaretlenen bölgesinde çukur kısımlardan ayrılan akışın delta şeklinde bir bölge oluşturduğu görülmektedir. $\alpha=8^\circ$ 'de oluşan delta şeklindeki bölgenin oluşum alanı, $\alpha=5^\circ$ 'de oluşan bölgeden daha büyüktür. Dalganın dalga boyu azaldıkça yumru sayısı artar. C2 modeli, C1 modelinden daha küçük bir dalga boyuna sahiptir, dolayısıyla sahip olduğu yumru sayısı C1 modelinden daha fazladır. Bu nedenle, daha fazla TDGÇ oluşumu, akış yönünde girdapların etkileşimini artırır ve bu etkileşim, türbülansı artırarak sınır tabakada momentum değişimini artırmaya yol açabilir. TDGÇ oluşumu $\alpha=8^\circ$ 'de gövde bölümünde daha belirgindir, ancak C1 modeli için uç kısmında herhangi bir oluşum gözlenmemiştir. C2 modeli için, 13 adet TDGÇ oluşumu gözlenmiştir. Bu nedenle, TDGÇ uç bölgede tam olarak oluşamamıştır. Arka kenar ayrımı, gövde kısımda dalga benzeri bir biçimde oluşur ve uç kısımda düzleşmektedir. Dalgalı firar kenar ayrılması Seyhan vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada da görülmektedir.



Şekil 25. Yüzgeç modelleri B1, B2, C1, C2 ve C3 için 8° hücum açısında yüzey yağ akış görüntüleri

Kesikli mavi çizgilerle sınırlanan C3'ün yakın çekim görüntüleri, iki dalga tepesi arasında bir çift TDGÇ oluştuğunu göstermektedir. Akış, bir kanat profilinin arka kenarından ön kenarına doğru hareket ettiğinde, bu ters akış olarak adlandırılır. Kanadın uç bölgesinde B1, B2, C1 ve C3 modellerinde ters akış gözlenmiştir. B1, B2, C1, C2 ve C3 modellerinin $\alpha = 10^\circ$ 'de yüzey akış görselleştirme sonuçları Şekil 26'da gösterilmektedir. Hücum açısı 8° 'den 10° 'ye yükseldiğinde uç bölgesinde ayrılmanın başladığı görülmektedir ve B1 modeli için ayrılma yüzgecin uç kısmından gövde kısmına doğru hareket etmektedir.



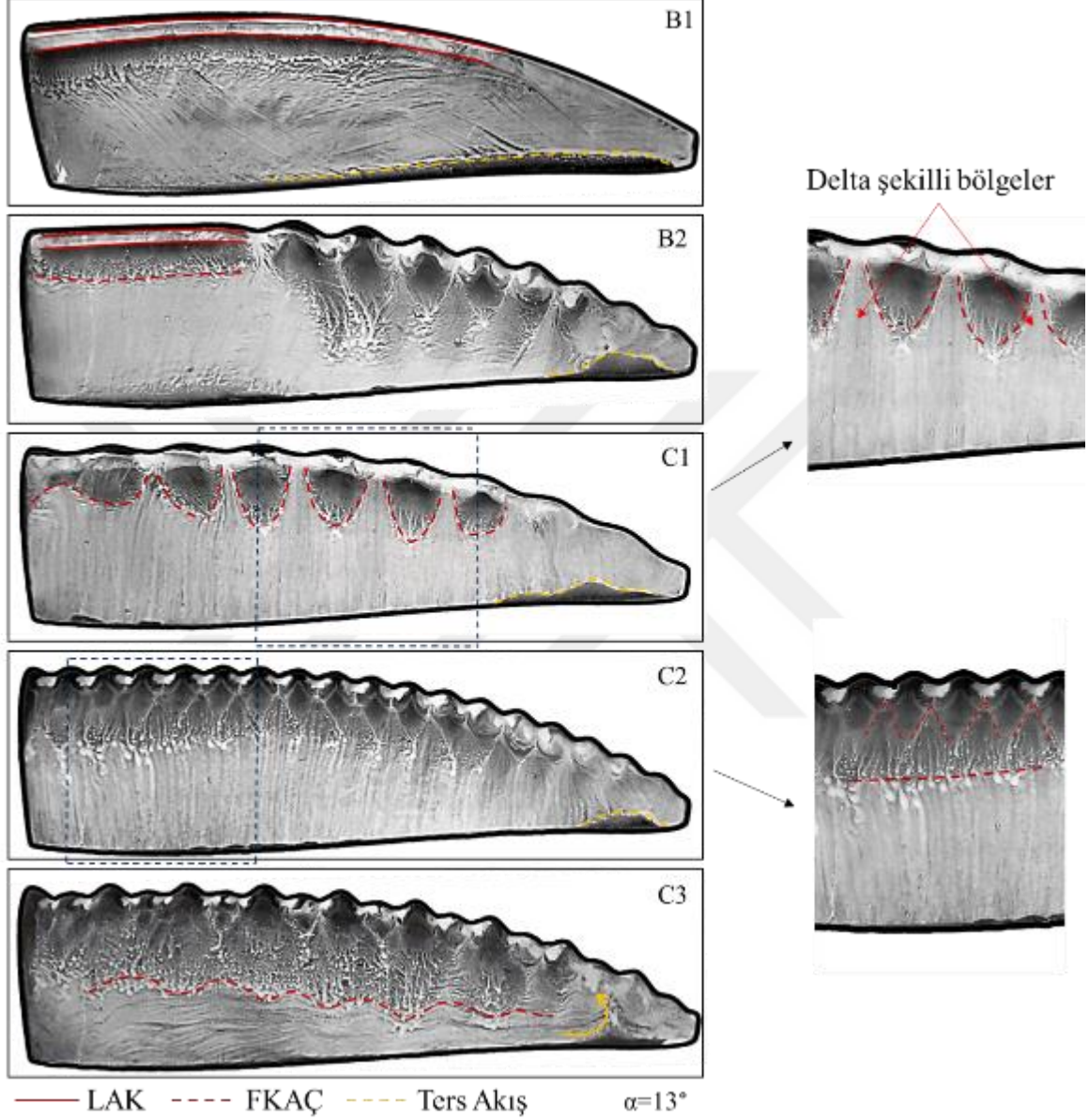
Şekil 26. Yüzgeç modelleri B1, B2, C1, C2 ve C3 için 10° hücum açısında yüzey yağ akış görüntüleri

LAK bölgesi $\alpha=10^\circ$ 'de, $\alpha=8^\circ$ 'dekinden daha küçük bir bölgeye ve laminar ayrılma noktası yukarı akım yönüne doğru hareket eder. B1 modelinin uç kısmında ise ters akışın meydana geldiği görülmektedir. Bu açıda B2 modelinin ayrılma noktası firar kenarına doğru hareket etmektedir. TDGÇ oluşumu yakın plan görüntülerde kırmızı oklarla gösterilmiştir. C1 modeli için, hücum açısı arttıkça delta şeklindeki bölgenin oluşum alanı artmıştır. Ayrılma, kanadın uç bölümünde hücum kenarında gerçekleşir ve ters akış etkisi ile akış, yukarı doğru yönelmektedir. TDGÇ oluşumu ve çukurdan ayrılan akışın oluşturduğu delta

şeklindeki bölgelerin oluşumu C1 modelinin yan tarafında gösterilmiştir. $\alpha=10^\circ$ 'de oluşan delta şeklindeki bölgenin oluşum alanı, daha düşük hücum açılarında oluşandan daha büyüktür. Hücum açısı $\alpha=10^\circ$ 'ye yükseldikçe, akış ayrımı C2 modeli için hücum kenarına önemli ölçüde hareket etmiştir. Şekil 22 (a)'da görülebileceği gibi, $\alpha=13^\circ$ 'de C3 modelinin taşıma katsayısı B1, B2, C1 ve C2 modellerinden daha büyüktür. C1 ve C2 modellerinde yüzeyin büyük bir kısmında akış ayrımı oluşsa da B2 ve C3 modellerinden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle C3 modelinde akış $\alpha=10^\circ$ 'de oluşan kanadın orta kısmında ayrılmaya başlar.

Şekil 27, B1, B2, C1, C2 ve C3 modellerinin $\alpha=13^\circ$ 'de yüzey akış görüntüleme sonuçlarını göstermektedir. LAK alanı, B1 modeli için $\alpha=10^\circ$ ile karşılaştırıldığında daha dar ve daha kısadır. B1 modelinde hücum açısı arttıkça LAK oluşumu hücum kenarına yaklaşmaktadır ve oluştuğu alan ve genişliği küçülmektedir. B2 modelinin düz ve dalgalı bölgeleri farklı ayrılma karakteristikleri göstermektedir. B2 modelinin düz bölgesinde firar kenar ayrımı meydana gelirken, dalgalı bölgesinde hücum kenar ayrılması gözlenmektedir. Akış ayrımı ilk önce uç bölgesinin yakınında meydana gelmiş ve hücum açısı arttıkça akış ayrımı gövde kısmına doğru kanat boyunca hareket etmektedir. Bu durum Pedro & Kobayashi (2008)'in sonuçlarıyla tutarlıdır. Firar kenarda ise uç bölgeden başlayan bir ters akışın etkili olduğu görülmektedir. B2 modeli için, akış ayrımı $\alpha=10^\circ$ 'de orta veter kısmında gerçekleşir ve hücum açısı $\alpha=13^\circ$ 'ye ulaştığında ayırma çizgileri ön kenara doğru hareket eder. C1 modeli için $\alpha=13^\circ$ 'de oluşan delta şekli bölgeleri $\alpha=10^\circ$ 'de oluşarlardan daha büyüktür. Ayırma çizgisi C1 modeli için hücum kenarına hareket eder. C2 modeli, tüberküller arasında daha küçük boşluklara sahiptir, bu nedenle C1 modelinden biraz daha büyük bir bağlı akış bölgesini gösterir. C1 ve C2 modeli akış ayrımı hücum kenarı yakınında meydana gelirken, C3 modelinde akış ayrılması yaklaşık olarak orta veterde meydana gelmektedir. Taşıma katsayılarının karşılaştırıldığı Şekil 22 (a)'da $\alpha=13^\circ$ 'de, daha kısa dalga boyuna sahip C2 modeli, C1 modeline göre daha yüksek taşıma katsayısına sahiptir. Ek olarak, önerilen geometriye sahip C3 modeli, aynı hücum açısında hem C1 hem de C2 modellerinden daha yüksek bir kaldırma katsayısına sahiptir. Ayrıca, Şekil 22 (c)'de C3 modeli daha yüksek L/D oranına sahiptir. C3 modelinin akış görselleştirme sonuçları hem C1 hem de C2 modellerinden daha iyi bir performans göstermektedir. C3 modelinin $\alpha=10^\circ$ 'deki ayrılma çizgisi, $\alpha=8^\circ$ ile hemen hemen aynı konuma sahiptir. Bu, dalgalı geometriye sahip model olan C3 modelinin, artan hücum açısına rağmen akışın yüzeyde

kalmasını sağladığı anlamına gelir. B2, C1, C2 ve C3 modellerinde ters akış gözlenir, ancak B1 modelinde daha belirgindir.



Şekil 27. Yüzgeç modelleri B1, B2, C1, C2 ve C3 için 13° hücum açısında yüzey yağ akış görüntüleri

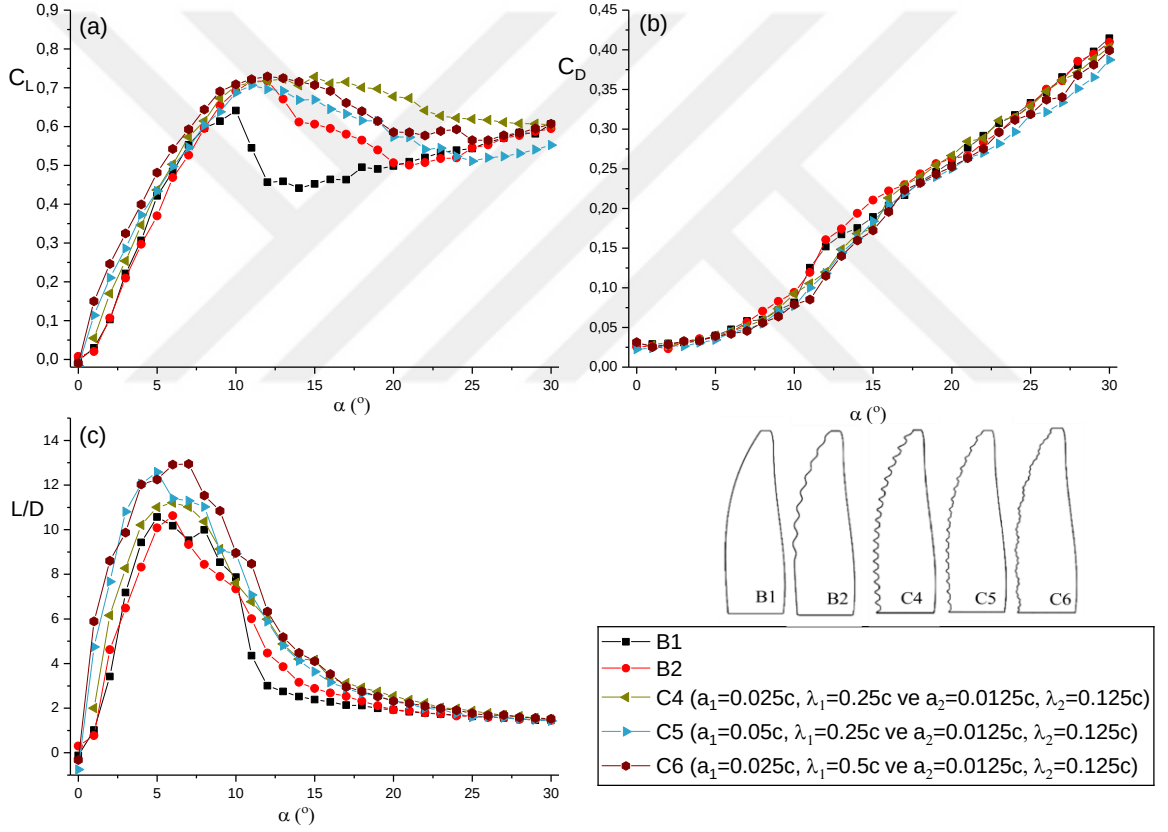
Dalgalı modellerinin performansı; geometrik model (tam açıklık, yarı açıklık, süpürülmüş, delta, yüzgeç), kanat profili, koniklik oranı ve en boy oranı gibi çeşitli geometrik özelliklerden ve ayrıca dalga geometrisinin parametrelerinden etkilenir. Dalgalı geometri etkilerini anlamak için öncelikle incelenen parametreler genlik ve dalga boyudur. Bu parametrelere ek olarak sırasıyla Hansen (2012) ve Seyhan vd. (2021) tarafından önerilen

genlik/dalga boyu (a/λ) oranı ve Ms sayısı da dikkate alınmıştır. Bu parametrelerin etkileri konusunda literatürde farklı değerlendirmeler bulunmaktadır. Johari vd. (2007) yaptıkları çalışmada NACA 634-021 profili için optimum parametrelerin en küçük genlik ve en büyük dalga boyu olduğunu öne sürmüşlerdir. Genliğin önemli bir etkiye sahip olduğunu, dalga boyunun ise daha az etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada, optimum model parametreleri Johari vd. (2007) tarafından önerilenlerle uyumludur. Hansen (2012) en küçük genlik değerine sahip NACA 0021 uçak kanadı modeli için maksimum kaldırma katsayısına ulaşmıştır. Dalgalı geometri performansını değerlendirmek için boyutsuz bir sayı, genliğin dalga boyuna oranı (a/λ) tanımladılar. Aynı a/λ oranına sahip modellerin benzer girdap yapıları ürettiğini gösterdiler. Seyhan vd. (2021) en iyi performansın en küçük genlik ve en büyük dalga boyu modeline sahip olarak elde edildiğini öne sürmüşlerdir. Genlik ve dalga boyu a_1/λ_1 ve a_2/λ_2 oranlarının çarpımı ile boyutsuz bir sayı tanımlamışlardır. Sonuçları, Ms sayısı ile kaldırma eğrisi arasında bir ilişki olduğunu göstermiştir. Ms sayısı azaldıkça kaldırma katsayısı daha iyi bir eğri gösterir. 6.3×10^4 Reynolds sayısı için en iyi kaldırma performansının $Ms=0.005$ ile elde edildiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada tüm Reynolds sayılarında $Ms=0.005$ olan C3 modeli C1 ve C2 modellerine göre en iyi L/D sonucunu göstermiştir. Ms sayısının küçük olabilmesi için daha küçük genlik ve daha büyük dalga boyu parametreleri gereklidir.

3.1.3. C4, C5 ve C6 Modellerinin Kuvvet Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

Şekil 28 (a, b ve c)'de B1, B2, C4, C5, C6 modellerinin $Re=5.0 \times 10^4$ için C_L , C_D ve L/D oranlarının karşılaştırılması verilmiştir. C4, C5 ve C6 modellerinin aerodinamik karakteristikleri temel modeller ile karşılaştırılmıştır. B1 modelinde stol, maksimum taşıma katsayısının elde edildiği 10° 'de meydana gelmektedir. Hücum kenarında dalga geometrisine sahip tüm dalgalı modellerin düz modele kıyasla, stol sonrası taşımada artış sağladığı görülmüştür. B2 modeli stol öncesi 9° 'ye kadar B1 modelinden daha düşük taşıma oluşturmaktadır. C4, C5 ve C6 modelleri 6° 'ye kadar temel modellerden daha yüksek taşıma katsayısına sahiptir. Stol öncesi en iyi kaldırma katsayısına sahip model C6 olmuştur. C4 ve C5 modelleri düz temel model ile stol öncesinde benzer eğriye sahiptir. C6 modeli taşıma katsayısında 12° 'de B1 modeline kıyasla yaklaşık %60 artış sağlamıştır. 12° 'de taşıma katsayısında sırasıyla C4, C6, C5, B2 dalgalı modellerinde %15, %2, %6, %5 artış görülmüştür. 15° 'ye kadar C6 modeli en yüksek C_L elde edilen model olmuştur. C5 modeli

stol sonrası bölgede taşıma artış sağlamasına rağmen 24° 'den sonra en düşük taşıma katsayısına sahiptir. C5 modeli stol açısını 1 derece ötelemiş ve 24 dereceye kadar düz modelden yüksek taşıma sağlamıştır. Buna rağmen 24° - 30° hücum açısı aralığında düz modelden ve diğer dalgalı C4 ve C6 modellerinde daha düşük C_L değerine sahiptir. Şekil 28 (b)'de tüm dalgalı modellerin 11° - 17° hücum açısı aralığında temel modellerden daha düşük sürüklenme katsayısına sahip oldukları görülmektedir. C4 modeli hariç diğer dalgalı C5 ve C6 modelleri stol sonrasında B1 modeline göre daha düşük sürüklenme katsayısı üretmişlerdir. C4 modelinin sürüklenme katsayısı B1 modelininki ile 11° - 16° aralığı dışında yakın olmuştur.

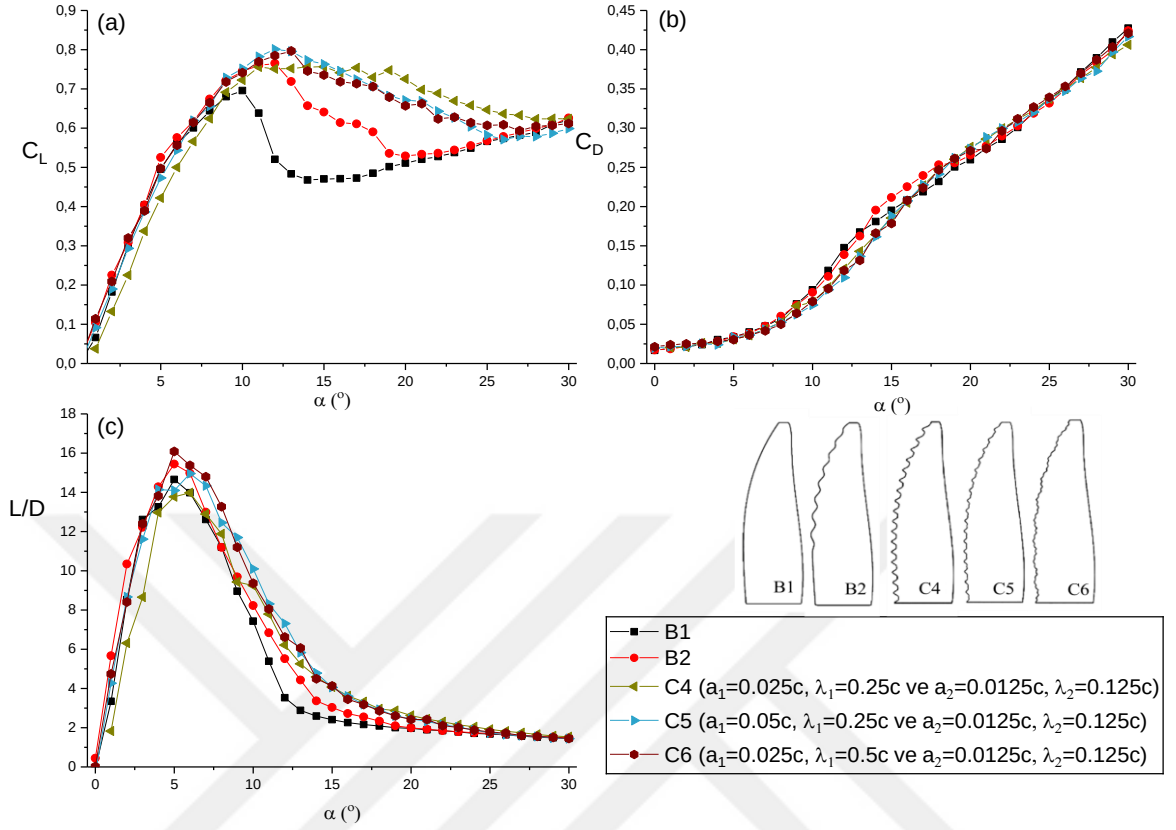


Şekil 28. B1, B2, C4, C5 ve C6 modellerinin $Re=5.0 \times 10^4$ için (a) C_L (b) C_D (c) L/D oranlarının karşılaştırılması

Şekil 28 (c)'de yüzgeç modelleri L/D oranlarının 5.0×10^4 Reynolds sayısında hücum açısına göre değişimleri görülmektedir. C6 modeli diğer dalgalı modellere göre stol öncesi ve sonrasında daha yüksek L/D oranına sahiptir. C4 modeli stol sonrası taşıma en iyi performans gösteren model olmasına rağmen stol sonrası sürüklenme katsayısı değerleri B1

modeli ile benzerdir. Bundan dolayı L/D oranı neredeyse tüm hücum açısı aralığı için temel modellerden iyi olmasına rağmen C5 ve C6 modellerinden daha düşük performans göstermiştir. C5 ve C6 modelleri C4 modeline göre tüm hücum açısı aralığı için daha iyi performans göstermektedir.

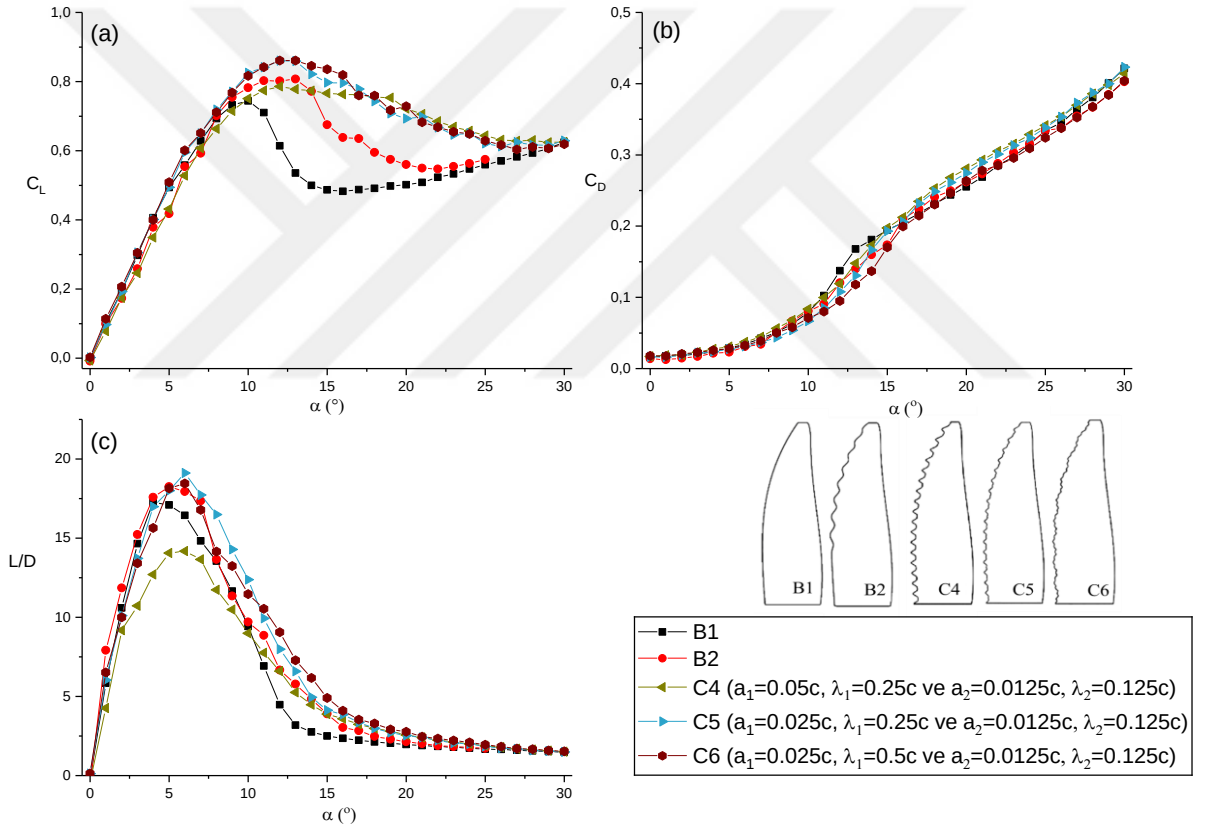
Şekil 29 (a, b ve c)'de B1, B2, C4, C5, C6 modellerinin $Re=8.0 \times 10^4$ için C_L , C_D ve L/D oranlarının karşılaştırılması verilmiştir. Stol öncesi 10° 'ye kadar C4 modeli hariç tüm modellerde lineer ve birbirine benzer bir artış meydana gelmiştir. Tüm dalgalı modellerin düz modele kıyasla stol sonrası taşımada artış sağladığı ve sağlanan iyileşmelerin C5 ve C6 modeli için benzer olduğu görülmüştür. C5 ve C6 modelleri taşıma katsayısında 12° 'de B1 modeline kıyasla sırayla %60 ve %50 artış sağlamışlardır. Stol öncesi en düşük taşıma katsayısına sahip model C4 olmasına rağmen stol sonrasında ise 16° - 30° aralığında en yüksek taşıma katsayısına sahip model olmuştur. C5 modeli için en yüksek taşıma katsayısının elde edildiği 12° 'de C5 modeli taşıma katsayısında düz modele göre %54 artış sağlamıştır. Bu açıda en düşük iyileşme C4 modelinden elde edilmiştir. C6 modeli için en yüksek taşıma katsayısının elde edildiği 13° 'de C6 modeli taşıma katsayısında düz modele göre yaklaşık %65 artış sağlamıştır. Dalgalı C4, C5 ve C6 modelleri maksimum C_L değerlerine ulaştıkları hücum açısından sonra 30° 'ye kadar ani bir düşüş yerine kademeli bir düşüş göstermişlerdir. B2 modelinin C_L değeri 12° 'de 0.765 iken 20° 'de 0.510 değerine düşmüştür. Dalgalı C4, C5 ve C6 modelleri stol sonrası taşımada sağladıkları iyileşme bakımından B2 modeline göre daha iyi sonuç vermiştir. Stol sonrası 25° - 30° hücum aralığında, C5 modelinde temel modellerden daha düşük taşıma katsayısı elde edilmiştir. Şekil 29 (b)'de dalgalı yüzgeç modellerinin temel modeller ile C_D katsayıları açısından karşılaştırılmasında dalgalı modeller C4, C5 ve C6 modellerinin 10° - 16° aralığında temel modellerden daha düşük sürükleme oluşturdıkları görülmektedir. Stol öncesi 9° hücum açısına kadar tüm dalgalı yüzgeç modelleri düz model ile benzer sürükleme katsayısına sahiplerdir. Stol sonrası 19° 'den sonra tüm yüzgeç modellerinin C_D değerlerinde benzer bir eğilim gözlenmiştir. Yüzgeç modellerinin $Re=8.0 \times 10^4$ için taşıma-sürükleme oranlarının (L/D) hücum açısına bağlı değişimi incelendiğinde tüm dalgalı yüzgeç modelleri arasında C6 modelinin diğer modellere göre $4^\circ < \alpha < 9^\circ$ aralığında daha yüksek L/D oranına sahip olduğu görülmektedir. C5 modeli $8^\circ < \alpha < 13^\circ$ aralığında C6 modelinden daha yüksek aerodinamik performansa sahiptir. C4 modeli stol öncesi açılarda düz modelden daha düşük veya benzer sürükleme sağlarken stol sonrasında taşımada meydana gelen artış ile düz modelden daha yüksek L/D oranına sahiptir.



Şekil 29. B1, B2, C4, C5 ve C6 modellerinin $Re = 8.0 \times 10^4$ için (a) C_L (b) C_D (c) L/D oranlarının karşılaştırılması

Şekil 30 (a, b ve c)'de B1, B2, C4, C5, C6 modellerinin $Re = 1.2 \times 10^5$ için C_L , C_D ve L/D oranlarının karşılaştırılması verilmiştir. Stol öncesi B2 ve C4 modeli daha düşük taşıma sağlarken C5 ve C6 modelleri düz model ile benzer bir taşıma eğrisine sahiptir. Düz modelde stol 10° 'de meydana gelmektedir. Bu açıya kadar düz modelden daha düşük taşıma sağlayan C4 modeli, stol sonrasında taşımada artış sağlamıştır ve stol açısını 2° ötelemiştir. Stol sonrasında C4 modelinde meydana gelen artış 14° 'ye kadar B2 modelinin altında kalmıştır. Stol sonrası dalgalı yüzgeç modellerinin taşıma katsayıları 16° 'den sonra benzerdir. Maksimum taşıma katsayısında en iyi artışı C5 ve C6 modelleri sağlamıştır. C6 modeli için en yüksek taşıma katsayısının elde edildiği 12° 'de C6 modeli taşıma katsayısında düz modele göre yaklaşık %40 artış sağlarken C5 modeli 13° 'de taşıma katsayısında %60.5 artış sağlamıştır. Şekil 30 (b)'de C4, C5 ve C6 dalgalı modelleri temel modeller ile C_D katsayıları açısından 1.2×10^5 Reynolds sayısında karşılaştırılması verilmiştir. C6 modeli $11^\circ < \alpha < 17^\circ$ aralığında en düşük sürüklemeyi sağlamaktadır. B2, C4 ve C5 modelleri ise $10^\circ - 15^\circ$ hücum açısı aralığında düz modelden daha düşük C_D değerine sahiptir. Hücum açısı 16° 'den sonra

C4 ve C5 modelleri 29° hücum açısına kadar sürüklenme katsayısı yüksektir. C6 modeli 25° 'den sonra düz modelden daha düşük sürüklenme katsayısına sahiptir. Yüzgeç modellerinin $Re=1.2 \times 10^5$ için L/D oranlarının hücum açısına bağlı değişimi Şekil 30(c)'de verilmiştir. Tüm dalgalı yüzgeç modelleri arasında C5 modeli diğer modellere göre $5^\circ < \alpha < 11^\circ$ aralığında daha yüksek L/D oranına sahip olduğu görülmektedir. C6 modeli 10° 'den sonra en yüksek L/D oranına sahiptir. C4 modeli stol öncesi açılarda düz modelden daha düşük sürüklenme sağlarken stol sonrasında taşımada meydana gelen artış ile düz modelden daha yüksek L/D oranına sahiptir. C4 modeli stol öncesi en düşük aerodinamik performansa sahip model olmuştur.



Şekil 30. B1, B2, C4, C5 ve C6 modellerinin $Re= 1.2 \times 10^5$ için (a) C_L (b) C_D (c) L/D oranlarının karşılaştırılması

Tablo 6'da yüzgeç modellerinin $Re=5.0 \times 10^4$ değerindeki aerodinamik parametreleri verilmiştir. Her sütunda temel model B1'e göre en iyi iyileşmeyi sağlayan modelin değerleri '*' ile gösterilmiştir. Düz B1 modelinde maksimum C_L , 10° derecede, stol açısından sonra en düşük C_L değeri ise 14° derecede elde edilmiştir. Düz modelin maksimum C_L değerinin elde edildiği 10° 'de 0.641 olan C_L değerini, C3 modeli, maksimum C_L değerinin elde edildiği

12°'de 0.759 değerine yükselterek maksimum taşımada %18.4 iyileşme sağlamıştır. $\alpha=14^\circ$ 'de B1 modeline göre en iyi artışı sağlayan model C3 modeli olmuştur. C3 modeli düz modelinin $\alpha=14^\circ$ 'deki C_L değerini 0.441 değerinden 0.722 değerine yükselterek taşımada yaklaşık %64 iyileşme sağlamıştır. Dalga geometrisine sahip tüm yüzgeç modelleri stol açısını ötelemiştir. C1 ve C5 modelleri stol açısında 1 derece, B2, C2, C3 ve C6 modelleri 2 derece öteleme sağlarken C4 modeli stol açısını 5 derece ötelemiştir. Ayrıca en yüksek L/D değeri 7 derecede C6 modelinden elde edilmiştir.

Tablo 6. Yüzgeç modellerin $Re=5.0 \times 10^4$ değerinde aerodinamik parametreleri

	Modeller	Aerodinamik Karakteristikler				
		$C_{L(max)}$	$\alpha(^{\circ})$	L/D_{max}	$\alpha(^{\circ})$	$C_{L(14^{\circ})}$
Reynolds Sayısı $Re = 5.0 \times 10^4$	B1	0.641	10	10.56	5	0.441
	B2	0.717	12	10.62	5	0.611
	C1	0.670	11	10.91	6	0.615
	C2	0.696	12	10.30	7	0.667
	C3	0.759*	12	12.13	6	0.722*
	C4	0.728	15*	11.20	6	0.706
	C5	0.706	11	12.58	5	0.669
	C6	0.729	12	12.95*	7	0.715

Tablo 7'de yüzgeç modellerin $Re=8.0 \times 10^4$ değerindeki maksimum taşıma katsayısı, L/D oranının maksimum değeri ve meydana geldikleri hücum açıları gibi aerodinamik karakteristikleri hesaplanmıştır. Her sütunda temel model B1'e göre en iyi iyileşmeyi sağlayan modelin değerleri '*' ile gösterilmiştir. Dalga geometrisine sahip tüm yüzgeç modellerinin stol açısını ötelediği ve en yüksek ötelemeyi 5 derece ile C4 modelinin sağladığı görülmektedir. C5 modeli, düz modelin $\alpha = 10^\circ$ 'deki maksimum C_L değerini 0.696 değerinden $\alpha=12^\circ$ 'deki 0.801 değerine yükselterek maksimum taşımada yaklaşık %15 iyileşme sağlamıştır. Ayrıca stol açısını 1 derece ötelemiştir. C5 modeli B1 modeline göre $\alpha= 14^\circ$ 'de yaklaşık %65 artış sağlamıştır. Maksimum L/D oranına $\alpha= 6^\circ$ 'de 16.72 değeri ile C3 modeli sahiptir.

Tablo 7. Yüzgeç modellerin $Re=8.0 \times 10^4$ değerinde aerodinamik parametreleri

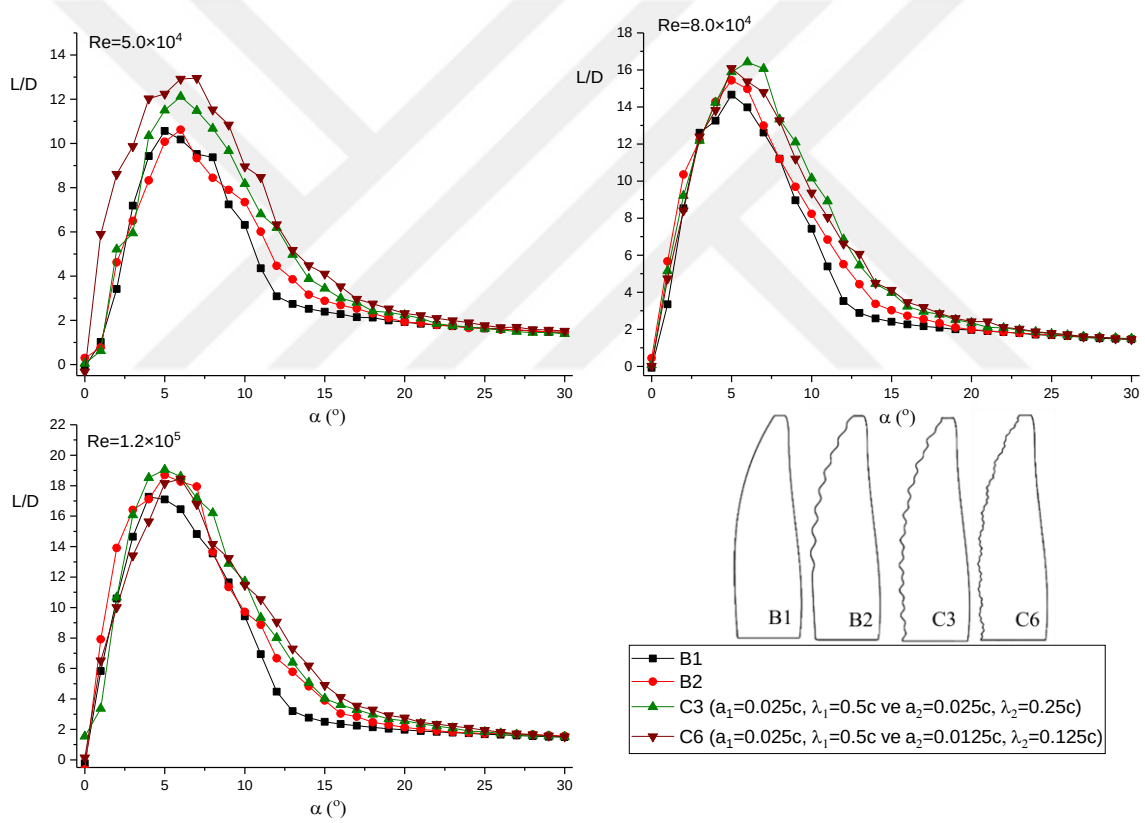
	Modeller	Aerodinamik Karakteristikler				
		$C_{L(max)}$	$\alpha(^{\circ})$	L/D_{max}	$\alpha(^{\circ})$	$C_{L(14^{\circ})}$
Reynolds Sayısı $Re = 8.0 \times 10^4$	B1	0.696	10	14.66	5	0.468
	B2	0.765	12	15.44	5	0.657
	C1	0.718	11	15.91	6	0.602
	C2	0.746	13	13.61	5	0.734
	C3	0.793	11	16.42	6	0.735
	C4	0.756	15*	13.98	6	0.756
	C5	0.801*	12	14.96	6	0.773*
	C6	0.797	13	16.08	5	0.746

Yüzgeç modellerinin $Re=1.2 \times 10^5$ teki aerodinamik özellikleri Tablo 8’de özetlenmiştir. B2, C2 ve C5 modelleri stol açısını 3 derece ötelemiştir. B1 modeline göre maksimum taşımada en yüksek iyileşmeyi sağlayan model $Re=1.2 \times 10^5$ için C6 modeli olmuştur. B1 modelinde stol meydana geldikten sonra en düşük taşıma katsayısı $\alpha=16^{\circ}$ ’da elde edilmiştir. Bu hücum açısında tüm modeller arasında en yüksek iyileşme C6 modelinde olmuştur. C6 modeli B1 modeline göre 16° ’de taşıma katsayısında yaklaşık olarak %70 artış sağlamıştır. En yüksek L/D oranı 6 derecede C5 modelinde elde edilmiştir.

Tablo 8. Yüzgeç modellerin $Re=1.2 \times 10^5$ değerinde aerodinamik parametreleri

	Modeller	Aerodinamik Karakteristikler				
		$C_{L(max)}$	$\alpha(^{\circ})$	L/D_{max}	$\alpha(^{\circ})$	$C_{L(16^{\circ})}$
Reynolds Sayısı $Re = 1.2 \times 10^5$	B1	0.744	10	17.26	4	0.483
	B2	0.807	13*	18.25	5	0.638
	C1	0.760	11	16.64	5	0.558
	C2	0.792	13*	15.63	5	0.728
	C3	0.853	12	19.05	5	0.767
	C4	0.786	12	14.17	6	0.763
	C5	0.859	13*	19.11*	6	0.796
	C6	0.861*	12	18.45	6	0.819*

Şekil 31’de Ms sayısı 0.005 değerine sahip C3 ve C6 modellerinin temel modellere göre L/D oranlarının karşılaştırılması farklı 5.0×10^4 , 8.0×10^4 , 1.2×10^5 Reynolds sayılarında gösterilmektedir. B1 ve B2 temel modellerinin stol öncesi dalgalı geometrinin etkisi görülmezken dalgalı geometrinin stol sonrası iyileşme sağladığı daha önce vurgulanmıştır. Daha gerçekçi modellenen dalgalı modeller C4, C5 ve C6 incelendiğinde $Re=5.0 \times 10^4$ için C6 modeli C3 modelinden tüm hücum açısı aralığında daha iyi performans göstermektedir. Ayrıca C5 ve C6 modelleri stol öncesinde de iyileşme sağlamıştır. $Re=8.0 \times 10^4$ için $5^\circ < \alpha < 12^\circ$ aralığında C3 modeli daha iyi performansa sahip olmakla birlikte diğer hücum açılarında benzer performansa sahiptirler. $Re=1.2 \times 10^5$ için stol sonrasında C6 daha iyi performans göstermiştir.



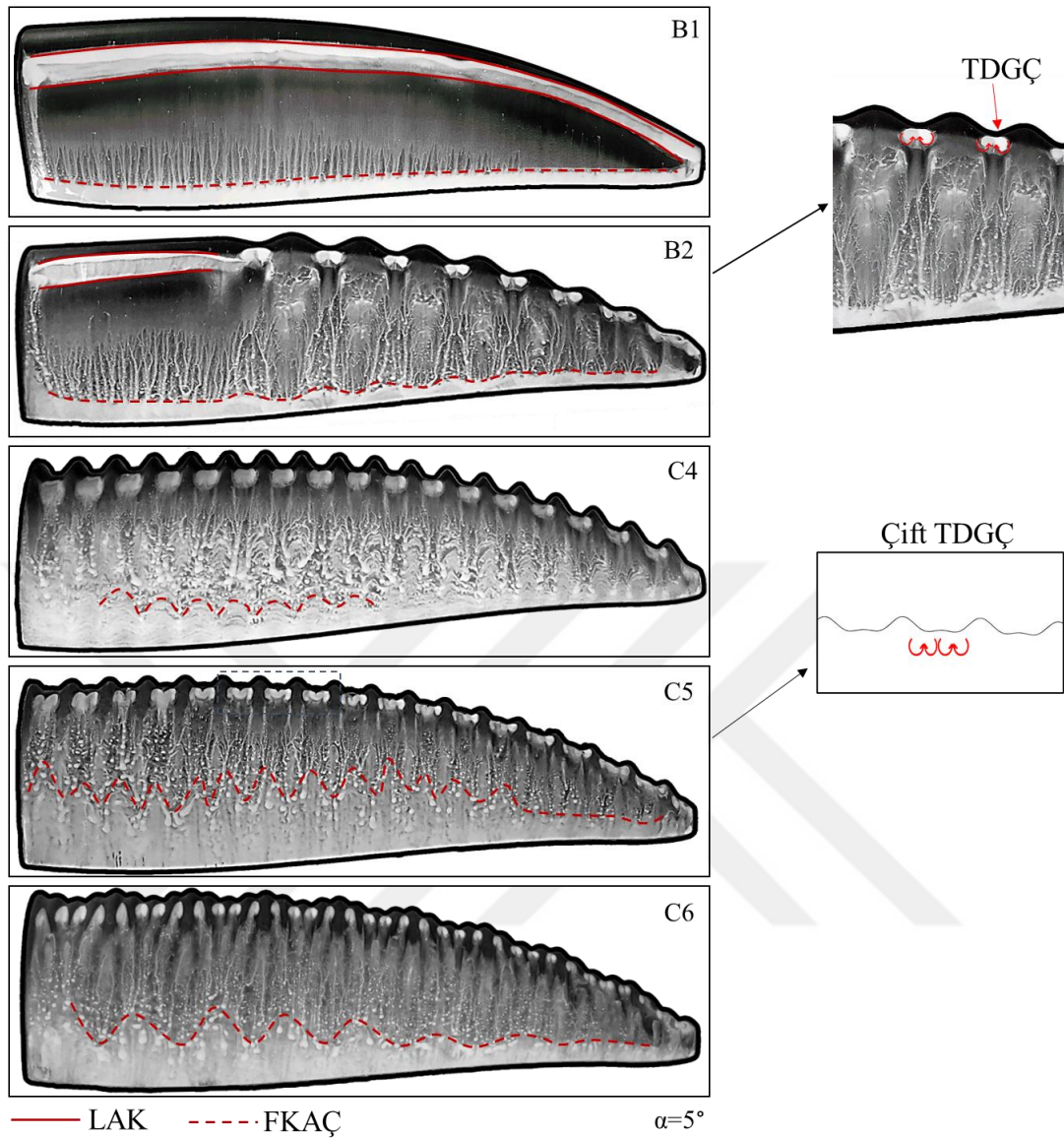
Şekil 31. Dalgalı geometriye sahip C3 ve C6 modellerinin L/D oranlarının $Re= 5.0 \times 10^4$, 8.0×10^4 ve 1.2×10^5 değerlerinde karşılaştırılması

Dalgalı kanat modellerinde taşımada ani düşüş görülmemiş ve dikkate alınan tüm Reynolds sayılarında taşımada artış gözlenmiştir. B1 modeli için Reynolds sayısı arttıkça stol açısının değişmediği gözlenmiştir. Bu önerilen yöntem ile aerodinamik performansta önemli bir artış sağlanmıştır. B2 modeli, $Re=1.2 \times 10^5$ sayısında daha yüksek C_L elde edilmesine rağmen $Re=5.0 \times 10^4$ ve $Re=8.0 \times 10^4$ sayılarında benzer L/D oranına sahiptir.

3.1.4. C4, C5 ve C6 Modellerinin Yağ Akış Görüntüleme Yöntemi ile Değerlendirilmesi

Yüzgeç modelleri B1, B2, C4, C5 ve C6 için $\alpha=5^\circ$ hücum açısında yüzey yağ akış görüntüleri Şekil 32’de verilmiştir. Burada B1 ve B2 modellerinde LAK oluşumu kırmızı çizgiler arasında gösterilmiştir. Akış yapılarının daha ayrıntılı incelenebilmesi için modeller üzerinde bazı bölümler işaretlenerek fotoğraflarının yan tarafında oluşan akış yapılarının yakın görüntüleri yer almaktadır. Dalgalı firar kenar ayrılması (DFKA) kesikli kırmızı çizgilerle gösterilmektedir. C4 ve C5 modellerinin hücum kenarında dalga geometrisini oluşturan $a_2=0.0125c$, $\lambda_1=0.25c$ ve $\lambda_2=0.125c$ parametreleri aynı iken C4 modelinde $a_1=0.05c$ olan genlik değeri C5 modelinde $a_1=0.025c$ olarak seçilmiştir. C5 ve C6 modellerinin hücum kenarında dalga geometrisini oluşturan $a_1=0.025c$, $a_2=0.0125c$ ve $\lambda_2=0.05c$ parametreleri aynı iken C6 modelinde $\lambda_1=0.5c$ olan dalga boyu değeri C5 modelinde $\lambda_1=0.25c$ olarak seçilmiştir.

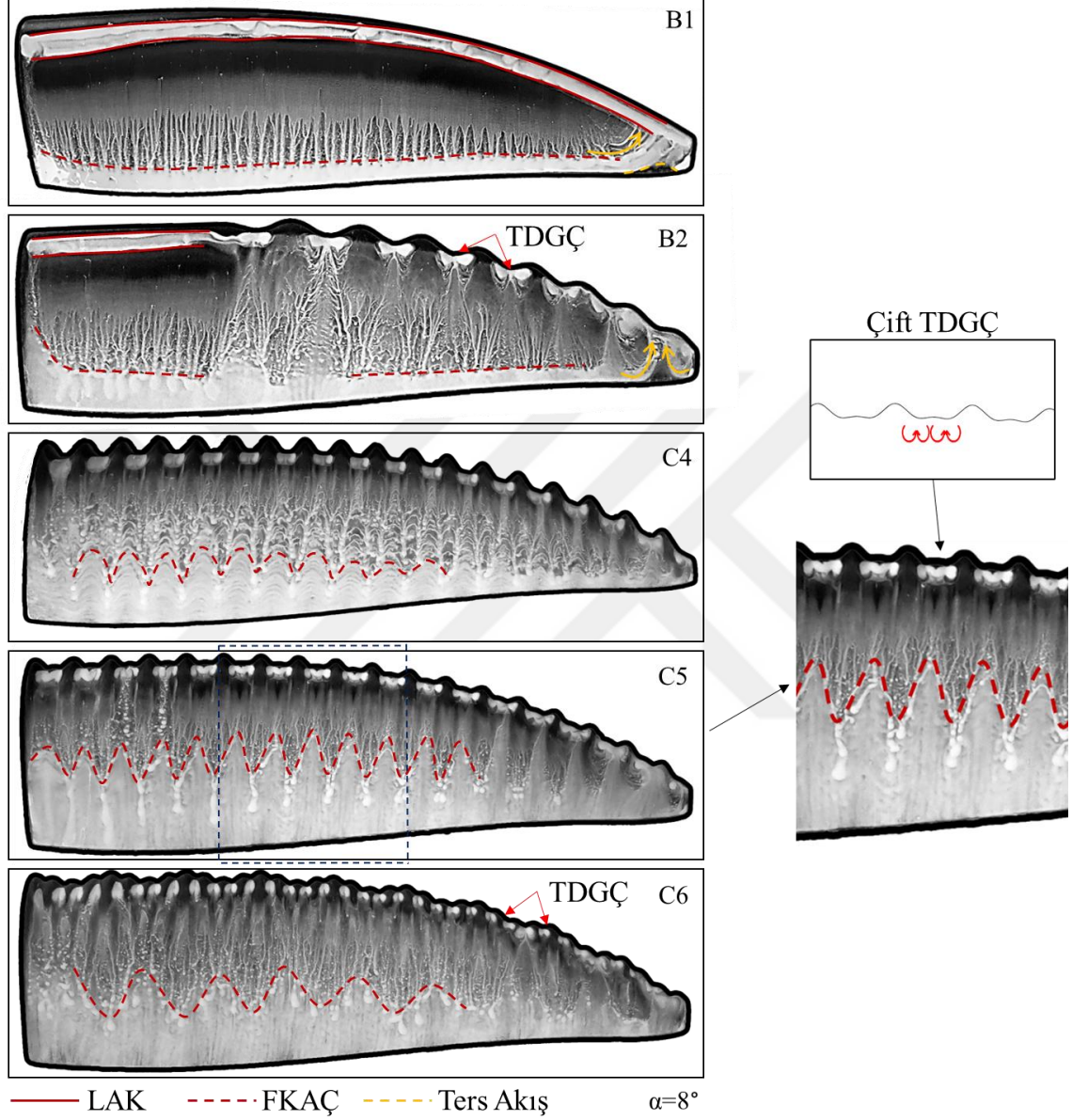
C4 ve C5 modellerinde dalga yapısının tepe ve çukur arasında TDGÇ oluşumunun başlangıcı görülmektedir. C4 ve C5 modelleri sahip oldukları dalga geometrisinden kaynaklı olarak tepe ve çukur arasında iki adet TDGÇ oluştuğu ve birleştiği görülmektedir. Modelin yan kısmında şematik olarak gösterilen bu oluşum çift TDGÇ olarak ifade edilmiştir. C6 modelinde ise çift TDGÇ oluşumu görülmemektedir. C6 modelinde dalga tepe ve çukur arasında TDGÇ oluşumu gözlenmektedir. Düşük hücum açısı olan bu açıda kanadın uç kısmında akış ayrılması tüm dalgalı modellerde henüz başlamamıştır. Bu açıda Şekil 30’da görüldüğü üzere kuvvet sonuçlarında C4, C5 ve C6 modellerinin benzer taşıma eğrisine sahip olmakla birlikte en düşük taşıma C4 modelinden elde edilmiştir.



Şekil 32. Yüzgeç modelleri B1, B2, C4, C5 ve C6 için 5° hücum açısında yüzey yağ akış görüntüleri

Yüzgeç modelleri B1, B2, C4, C5 ve C6 için $\alpha=8^\circ$ hücum açısında yüzey yağ akış görüntüleri Şekil 33'te verilmiştir. C4 ve C5 modellerinde yüzgeç modelinin geometrik yapısından dolayı akış ayrılması kanatın uç kısmından başlayarak gövde kısmına ilerlemektedir. C4, C5 ve C6 modellerinin kanat gövde kısmından uç kısmına ilerleyen yapının periyodik olduğu görülmektedir. Bu periyodik yapının uç bölgede oluşmadığı görülmektedir. Dalgali geometriye sahip modellerde firar kenar ayrılmasının dalgali bir yapıda olduğu görülmektedir. C4 ve C5 modellerinde $\alpha=5^\circ$ 'de oluşmaya başlayan çift TDGÇ'leri $\alpha=8^\circ$ 'de tamamen oluşmaktadır. C6 modelinde dalgali firar kenarı ayrılmasının

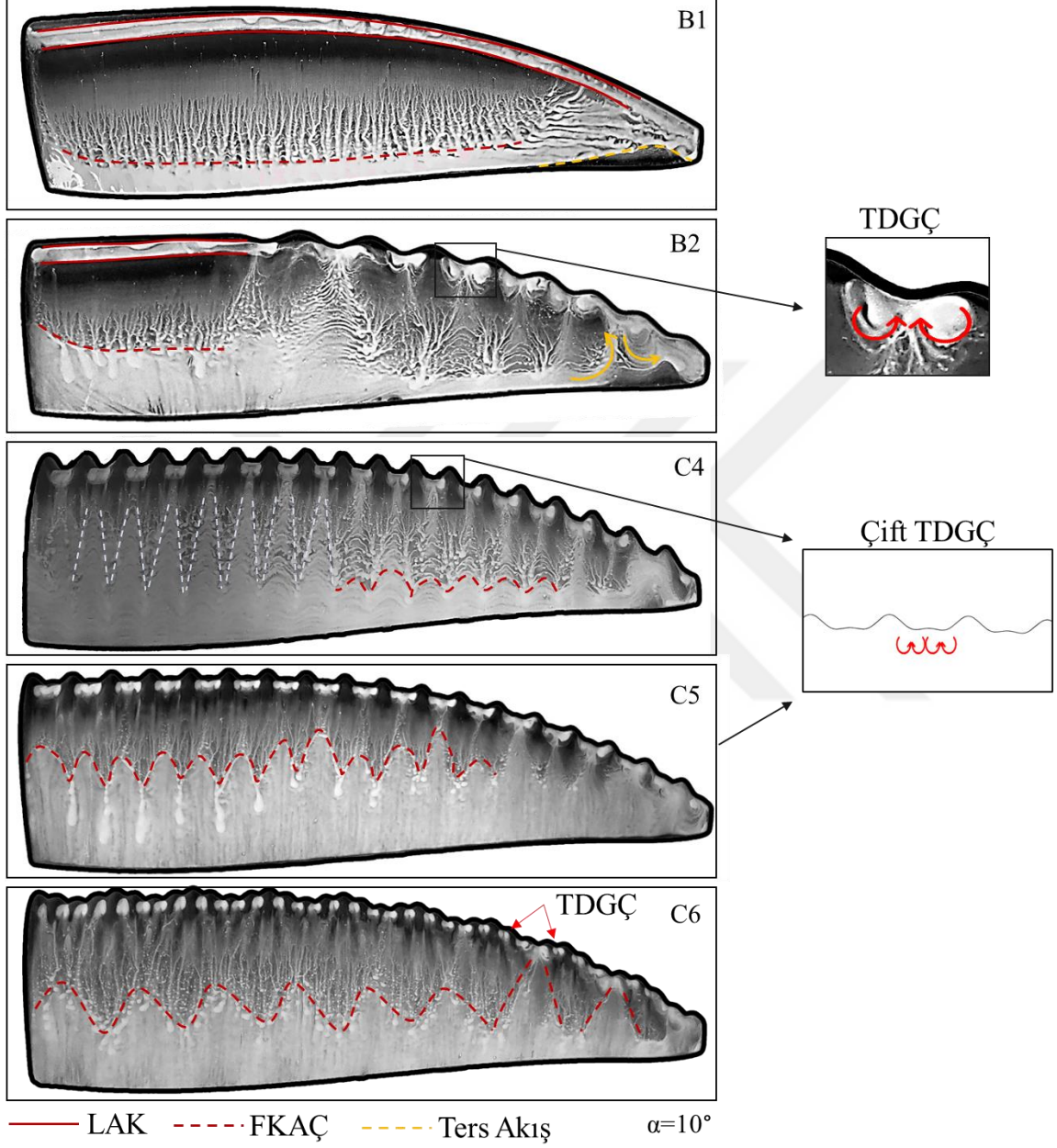
başlangıç noktası kanadın hücum kenarına doğru genişleyerek FKAÇ hücum kenarına yaklaşmakta ve FKA oluşum alanı büyümektedir.



Şekil 33. Yüzgeç modelleri B1, B2, C4, C5 ve C6 için 8° hücum açısında yüzey yağ akış görüntüleri

Yüzgeç modelleri B1, B2, C4, C5 ve C6 için $\alpha=10^\circ$ hücum açısında yüzey yağ akış görüntüleri Şekil 34'te verilmiştir. C6 modelinde 8 adet periyodik akış yapısı oluşmaktadır. Kanatın uç bölgesine yaklaştıkça periyodik bölgenin büyüdüğü görülmektedir. Kanat açıklığı boyunca oluşan benzer akış yapıları periyodik akış yapısı olarak ifade edilmektedir. (Cai vd., 2018). C4 modelinin gövde kısmında oluşan 7 adet periyodik akış yapısı uç

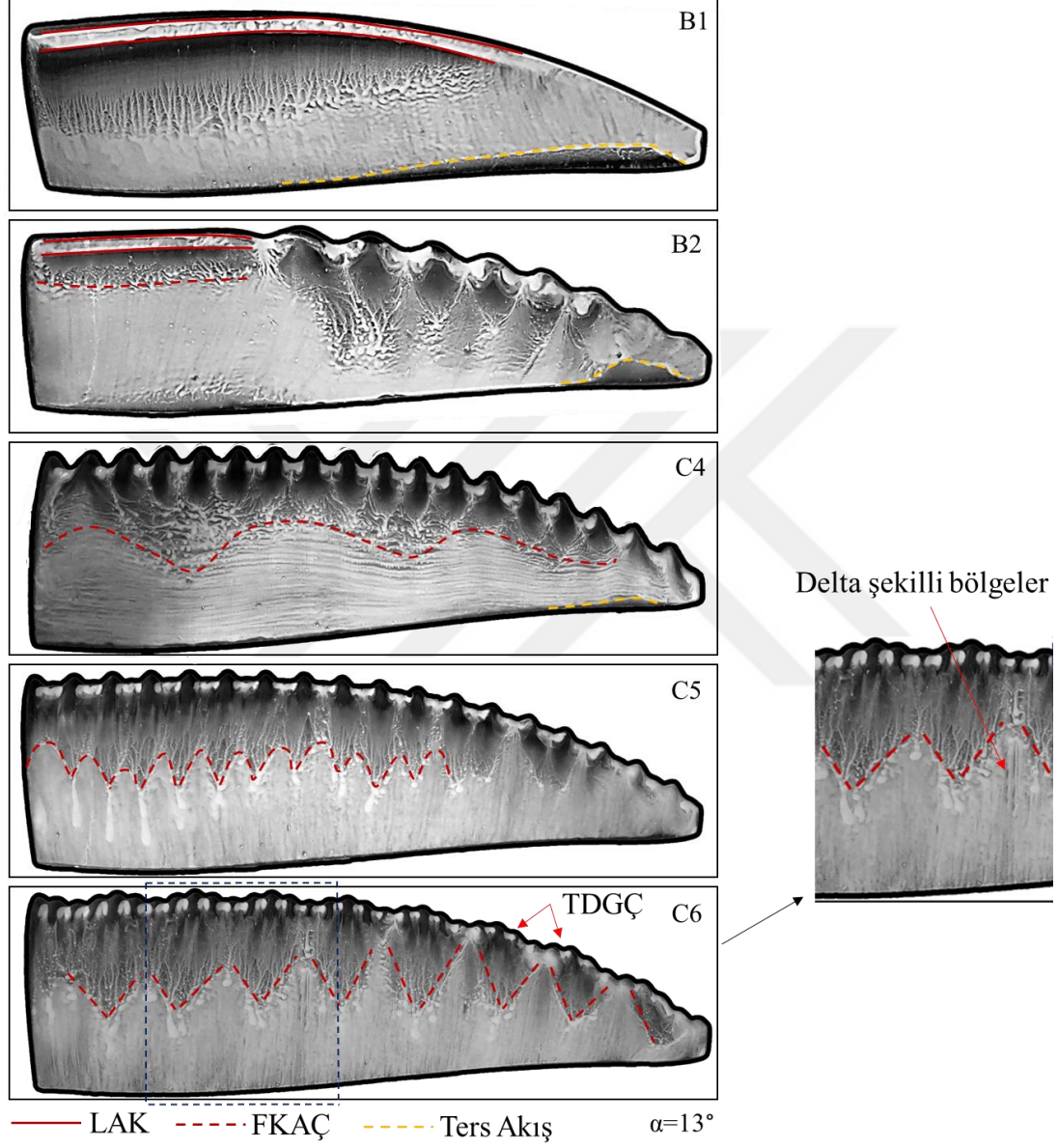
bölgesinde bozulmakta karmaşık bir akışı yapına dönüşmektedir. C5 modelinin $\alpha=8^\circ$ 'de uç bölgede başlayan ayrılma $\alpha=10^\circ$ 'da kanat gövdesine doğru genişlemiştir.



Şekil 34. Yüzgeç modelleri B1, B2, C4, C5 ve C6 için 10° hücum açısında yüzey yağ akış görüntüleri

Yüzgeç modelleri B1, B2, C4, C5 ve C6 için $\alpha=13^\circ$ hücum açısında yüzey yağ akış görüntüleri Şekil 35'te verilmiştir. Düz B1 modelinde hücum açısının artışıyla birlikte laminar ayrılma kabarcığı, kanadın hücum kenarına doğru yaklaşırken oluşma alanının ve genişliğinin azaldığı görülmüştür. Düz B1 modelinde, hücum açısının artmasıyla beraber

kanadın hücum kenarına doğru yaklaşırken laminar ayrılma kabarcığının oluştuğu bölge ve bu genişliği azalmıştır. $\alpha=5^\circ$ 'te firar kenarına yakın alanda meydana gelen FKA, hücum açısının artmasıyla birlikte daha da büyümeye devam etmiştir.

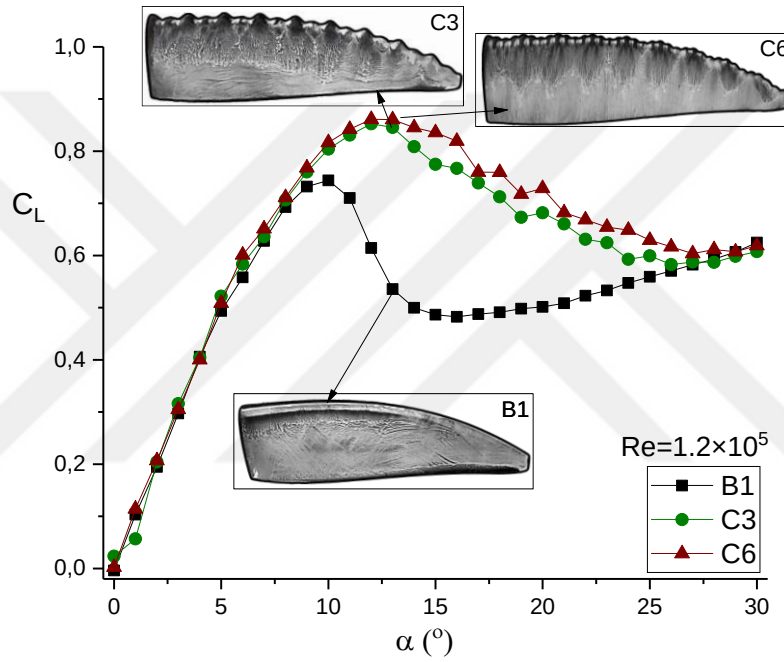


Şekil 35. Yüzgeç modelleri B1, B2, C4, C5 ve C6 için $\alpha=13^\circ$ hücum açısında yüzey yağ akış görüntüleri

C6 modelinde $\alpha=10^\circ$ 'de oluşan 8 adet periyodik yapı $\alpha=13^\circ$ 'de de görülmektedir. Ancak kırmızı kesik çizgilerle belirtilen akış ayrılma çizgisi hücum kenarına yaklaşmaktadır. C5 modeli için $\alpha=10^\circ$ 'de görülen DFKA $\alpha=13^\circ$ 'de akış ayrılması daha düz

bir çizgi halindedir. Kanatın uç kısmında başlayan ayrılma kanadın gövdesine doğru hareket etmektedir. C4 modelinde diğer modellere göre akışın yüzeyden ayrıldığı görülmektedir.

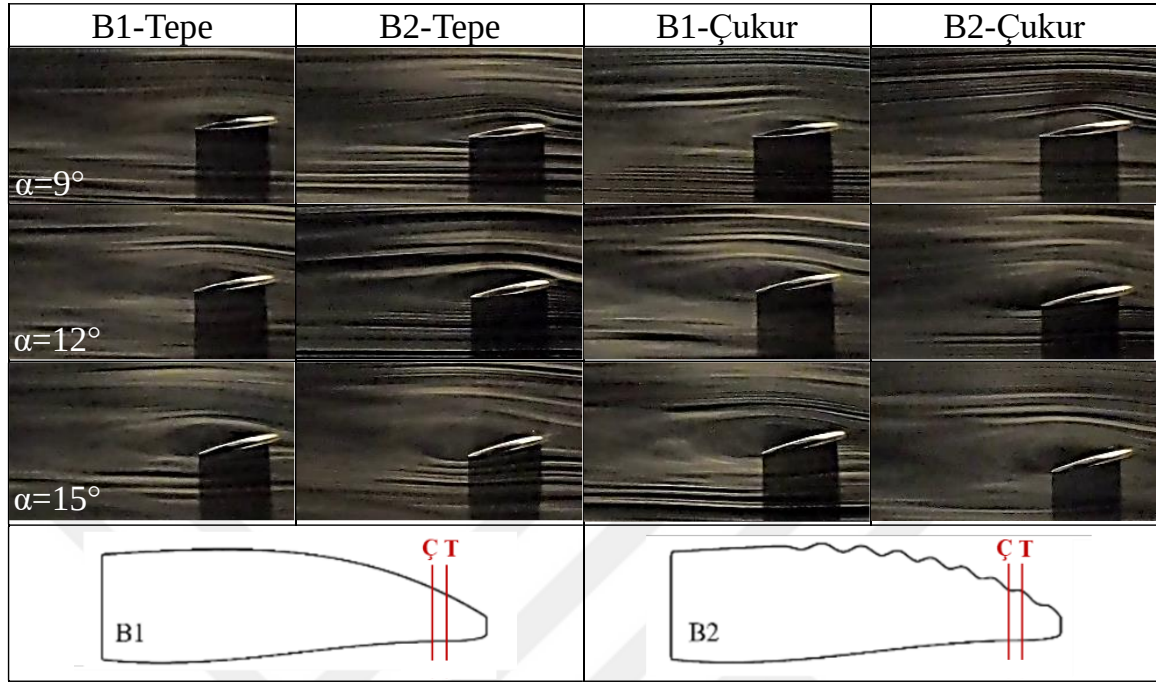
Şekil 36’da aynı $Ms=0.005$ sayısına sahip dalgalı C3 ve C6 modelleri ile düz B1 modelinin 13° hücum açısında yağ akış görüntüleri taşıma katsayılarının hücum açısına bağlı değişimini gösteren grafik üzerinde gösterilmiştir. C3 ve C6 modelleri ile düz modelin taşıma katsayısı 12° hücum açısına kadar lineer artış göstermiştir. C3 ve C6 modelleri stol açısını 2 derece ötelemiştir. Her iki model, stol sonrası stol karakteristiklerinde iyileşme sağlasa da C6 modeli taşımada daha fazla artış sağlamıştır.



Şekil 36. Düz B1, dalgalı C3 ve C6 yüzgeç modellerinin karşılaştırması

3.1.5. Temel Modeller için Duman Tel Akış Görüntüleme Sonuçları

Duman tel akış görüntüleme deneyleri gerçekleştirilerek temel modellerin dalga tepe ve çukur düzlemleri incelenmiştir. Şekil 37’de 9° , 12° ve 15° hücum açılarında B1 ve B2 temel modellerinin duman görüntüleri görülmektedir. Dalga tepesi “T” ve çukuru “Ç” ile ifade edilmiştir. Dalga ve çukur olmak üzere akış düzlemleri kırmızı çizgiler ile işaretlenmiştir.



Şekil 37. B1 ve B2 modellerinin tepe ve çukur akış düzlemleri için iki boyutlu duman tel akış görüntülemesi

Temel modellerin iz bölgesi genişliği tepe ve çukur düzlemlerine göre değişiklik göstermektedir. $\alpha=9^\circ$ 'de, tepe ve çukur düzlemlerinde akış yapısında belirgin bir farklılık görülmemiştir. $\alpha=12^\circ$ 'de, dalgalı B2 modelinin tepe akış düzlemi için iz bölgesi düz B1 modelinden daha küçüktür. Hücum açısı $\alpha=15^\circ$ 'ye geldiğinde iz bölgesinin büyüdüğü görülmektedir. B2 modelinin çukur akış düzlemi için B2 modelinin iz bölgesi B1 modelinden daha küçüktür.

Kim vd. (2018) yaptıkları çalışmada temel modellerin uç bölgesine yakın, bu çalışmada da alınan aynı çukur ve tepe akış düzlemlerinde hız vektörlerini incelemiştir. Tepe düzleminde $\alpha=9^\circ$ 'de dalgalı B2 modelinin firar kenar yakınında ters akış oluştuğunu belirtmişlerdir. Dalgalı geometrinin etkilerinin daha ayrıntılı incelenebilmesi için temel modellerin tüm dalga ve çukur akış düzlemleri için duman tel akış görüntüleme yöntemi gerçekleştirilmelidir.

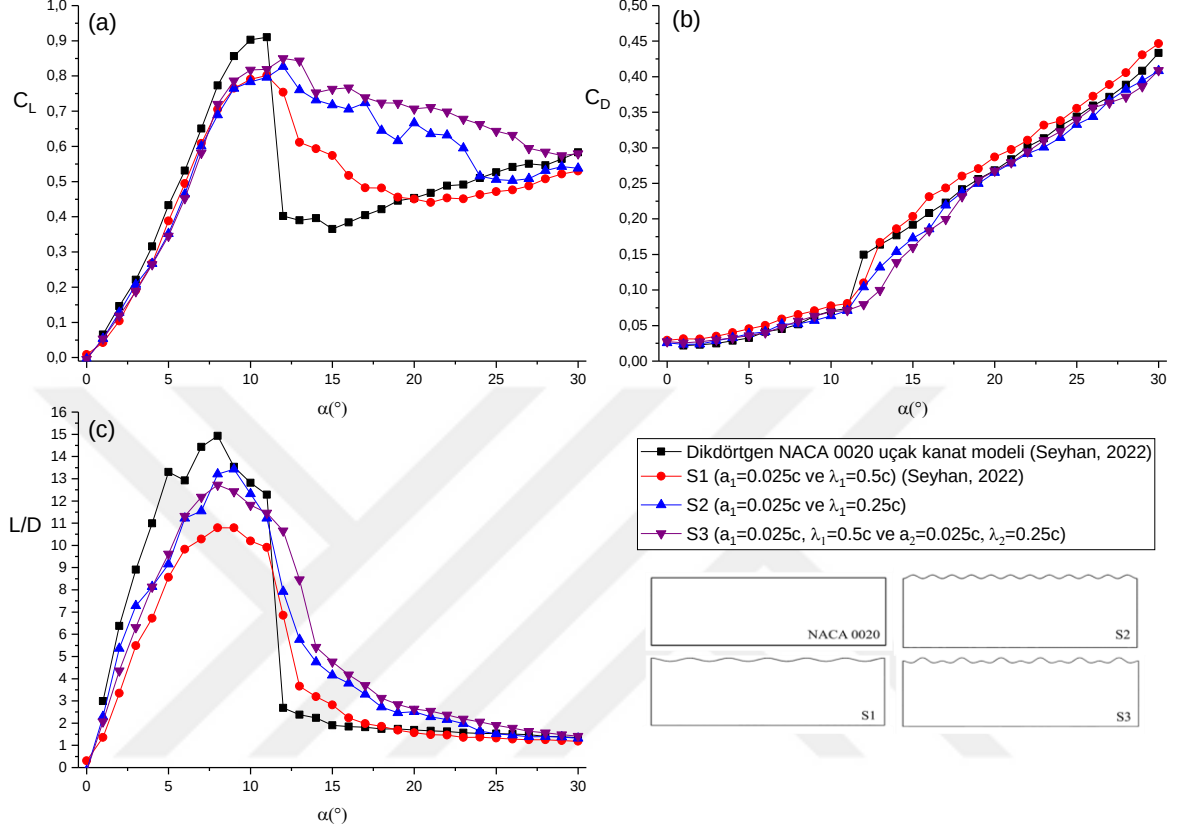
3.2. Yüzgeç ve Dikdörtgen Modellerin Karşılaştırılması

Kambur balina yüzgeçlerinin matematiksel modelini oluşturan Miklosovic vd. (2007) aynı zamanda tam açıklıklı dikdörtgen kesitli NACA 0020 uçak kanatlarını da ayrı bir rüzgar tüneline 270.000 Reynolds sayısında incelemişlerdir. Dalga geometrileri benzer olsa da yüzgeç ve dikdörtgen kesitli modellerin etkilerinin farklı olduğunu belirtmişlerdir. Sonuçlarda, dikdörtgen model için taşımada kayıp ve sürüklemeye artış ile düz modele göre aerodinamik performansının daha düşük olduğu, yüzgeç modelin ise özellikle stol sonrasında taşımada artış sürüklemeye düşüş ile daha iyi performansa sahip olduğu görülmüştür.

Dikdörtgen modelin performansının düşük olmasını etkileyen en önemli faktör dalga geometrisidir. Yapılan çalışmalarda genlik modülasyonunun performansı etkilediği bulunmuştur. Yüzgeç modelleri için genel olarak, düz modele kıyasla dalga geometrisine sahip modellerin taşıma performansını artırıcı sürüklemeyi azaltıcı bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Şekil 38 (a, b ve c)'de dikdörtgen kesitli NACA 0020 uçak kanadı için taşıma, sürüklenme katsayıları ve L/D oranlarının hücum açısına göre değişimi verilmiştir. Şekil 38 (a)'da düz model stola 11° hücum açısında girmiş ve taşıma katsayısında ani bir düşüş meydana gelmiştir. Dalgalı modeller stol öncesi düz modelden daha düşük taşıma katsayısına sahip olsa da stol sonrasında ani bir düşüş yerine kademeli bir düşüş sağlamışlardır. Dalgalı S2 ve S3 modelleri stolu 1° ötelemişlerdir ancak maksimum taşıma katsayıları düz modelden daha düşüktür. $\alpha=12^\circ$ 'de dalgalı geometriye sahip S1, S2 ve S3 modelleri taşıma katsayısında düz modele göre sırasıyla yaklaşık olarak %88, %106, ve %112 artış sağlamışlardır. S1 modeli $11^\circ < \alpha < 20^\circ$ aralığında düz modelden daha yüksek taşıma katsayısına sahip olsa da dalgalı modeller arasında en düşük taşıma katsayısına sahip model olmuştur. Stol sonrası dalgalı modeller arasında en yüksek taşıma katsayısına S3 modeli sahiptir. Şekil 38 (b)'de düz modelin stol açısında sürüklenme katsayısında ani bir artış meydana gelmiştir. Stol sonrası açılarda S1 modelinin sürüklenme katsayısı düz ve dalgalı S2, S3 modellerinden daha yüksektir. Hücum açısının $11^\circ < \alpha < 19^\circ$ aralığında S3 modeli en düşük sürüklenme katsayısına sahiptir. Şekil 38 (c)'de düz ve dalgalı S1, S2 ve S3 modellerinin L/D oranları görülmektedir.

Düz dikdörtgen modellerinde, akış ayrılması ilk olarak firar kenarı yakınlarında meydana gelmekte ve hücum açısı arttıkça hücum kenarına doğru hareket etmektedir (Rostamzadeh vd., 2014). Bununla birlikte, düz yüzgeç modeli için, akış ayrılması ilk olarak

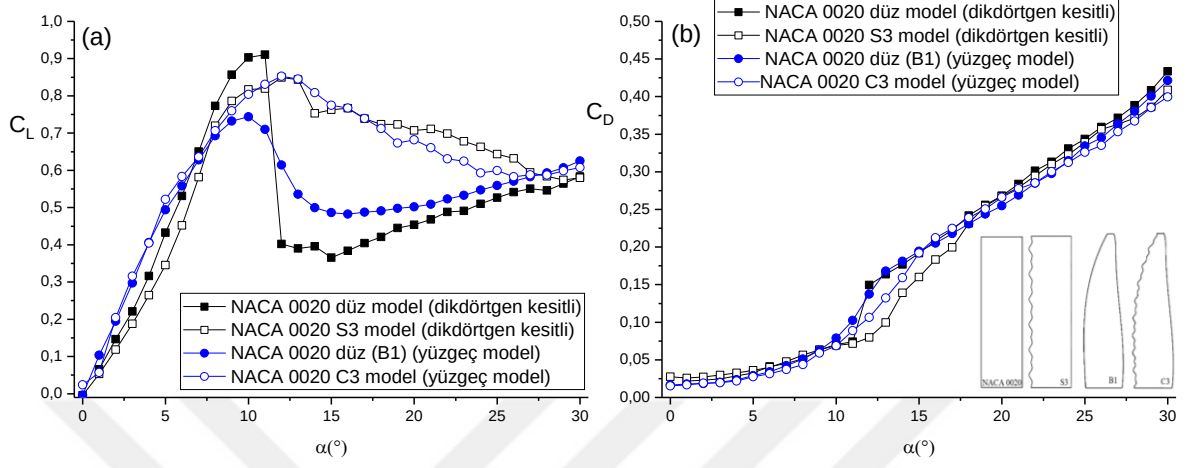
kanat ucunda meydana gelmekte ve artan hücum açısıyla içeriye doğru ilerlemektedir. Bu da Pedro & Kobayashi (2008) tarafından yapılan sayısal çalışma ile tutarlıdır.



Şekil 38. Dikdörtgen modellerin aerodinamik karakteristiklerinin $Re=1.2 \times 10^5$ 'te karşılaştırılması

Yüzgeç ve dikdörtgen modellerinin yüzey alanları ve en boy oranları farklı olmasına rağmen dalgalı geometrinin farklı modeller üzerindeki etkisini incelemek için karşılaştırılmıştır. Genel olarak dalgalı geometriler benzer karakteristikleri göstermektedir. Gerçekçi yaklaşımla ele alınan C3 ve S3 modellerinin en iyi karakteristiğe sahip olduğu görülmektedir. Yüzgeç modellerde stol öncesinde çukur arkasında oluşan girdapların hareketleri nedeniyle firar kenarında akış ayrılması meydana gelmektedir. Bu durum taşımada düşüşe neden olmaktadır. Bununla birlikte, oluşan girdaplar uç bölgede akış ayrılmasının içe doğru ilerlemesini önler ve bu da firar kenarı akış ayrılmasının neden olduğu taşıma kaybını telafi eder. Şekil 39 (a ve b)'de yüzgeç düz ve C3 modelleri ile dikdörtgen kesitli düz ve S3 modellerinin taşıma ve sürükleme katsayıları karşılaştırılmıştır. Yüzgeç ve dikdörtgen kesitli modeller için genliğin ve dalga boyunun değişmesi, yüzgeç ve dikdörtgen

kesitli modeller için performansta benzer farklılıklara yol açmaktadır. Aynı geometrik parametrelere sahip modeller benzer eğilim göstermiştir.



Şekil 39. Yüzgeç B1 ve C3 modelleri ile dikdörtgen kesitli düz ve dalgalı S3 modellerinin C_L ve C_D değerlerinin karşılaştırılması ($Re=1.2 \times 10^5$)

Dikdörtgen kesitli dalgalı S3 model için düz modele göre stol sonrası taşıma katsayısında artış sağlamıştır. Dikdörtgen kesitli modeller için stol karakteristiklerinde olan iyileşme daha belirgindir. Düz modelde 12° 'de ani bir düşüş görülmesine rağmen yüzgeç modelde ani düşüş görülmemektedir.

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında doğadan esinlenilerek kambur balina yüzgeçlerindeki dalgalı yapının yüzgeç modelleri üzerindeki etkileri daha gerçekçi bir yaklaşımla incelenmiştir. NACA 0020 profiline sahip 8 yüzgeç ve 4 dikdörtgen kesitli uçak kanadı modellerinin hücum kenarına uygulanan dalga geometrinin etkisi kuvvet ölçümleri, akış görüntüleme teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Kuvvet ölçümü yük hücresi kullanılarak 5×10^4 , 8×10^4 , 1.2×10^5 Reynolds sayılarında $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ aralığında birer derece artışla gerçekleştirilmiştir. Yüzey yağ akış görüntüleme deneyleri stol öncesi ve sonrasında olmak üzere yüzgeç modellerinde oluşan akış yapısını daha iyi anlayabilmek için 1.2×10^5 Reynolds sayısında gerçekleştirilmiştir. Dalgalı geometrinin farklı modellerde etkisini inceleyebilmek için dalga geometrisinin parametreleri aynı tutularak yüzgeç modeller ile dikdörtgen kesitli modeller karşılaştırılmıştır.

- Dalgalı geometriye sahip modeller stol öncesinde düz modelden daha düşük taşıma katsayılarına sahip iken stol sonrası açılarda düz modelden daha yüksek taşıma katsayıları elde edilmiştir. Reynolds sayısı 5.0×10^4 için C3 modeli $\alpha=14^\circ$ 'de düz modele göre taşımada yaklaşık %64 iyileşme sağlamıştır. C5 modeli, düz modelin $\alpha=10^\circ$ 'deki maksimum C_L değerini 0.696 değerinden $\alpha=12^\circ$ 'deki 0.801 değerine yükselterek maksimum taşımada yaklaşık %15 iyileşme sağlamıştır. Reynolds sayısı 1.2×10^5 için C6 modeli B1 modeline göre $\alpha=16^\circ$ 'de taşıma katsayısında yaklaşık olarak %70 artış sağlamıştır. Ayrıca C6 modeli 1.2×10^5 Reynolds sayısında maksimum taşıma katsayısında da düz modele göre %16 artış sağlamıştır. Dalga geometrisine sahip tüm yüzgeç modelleri düz modele göre stol açısını ötelemiştir ve stol karakteristiklerinde iyileşme sağlamıştır.
- Hücum kenarında dalga geometrisine sahip modellerinin taşıma ve sürüklenme katsayıları stol öncesinde genel olarak düz modelden daha düşüktür. Ancak, stol sonrası bölgede dalgalı modellerin taşıma katsayıları düz modelden daha yüksektir. Bu durum daha gerçekçi yaklaşımla elde edilen dalga yapısının, yüksek hücum açılarında sınır tabaka içerisinde momentum transferini artırarak daha yüksek taşıma katsayısı sağlaması ile açıklanabilir.

- Yüzey yağ akış görüntülemeleri sonuçları, laminar ayrılma kabarcığı (LAK) ve firar kenar ayrılması (FKA) gibi akış yapıları düz kanat modelde görülürken önerilen dalga geometrisi kullanıldığında dalgalı modellerde düz modelde oluşan yapılardan farklı olarak periyodik akış yapısı, dalgalı firar kenarı ayrılması (DFKA), ters dönen girdap çiftleri (TDGÇ) gibi akış yapıları oluştuğunu göstermiştir.
- Yüzgeç modellerde akış ayrılmasının kanat ucundan (wing tip) başlayarak kanat gövdesine (wing root) ilerlediği görülmüştür. LAK oluşumu hücum açısının artmasıyla yüzgeç modellerinin hücum kenarına ilerlemiştir ve oluşum alanı daralmıştır. Dalgalı modellerde düz modelde oluşan LAK yapısının oluşmadığı bunun yerine ters dönen girdap çiftlerinin (TDGÇ) oluştuğu görülmüştür.
- Dikdörtgen ve yüzgeç modellerinin yüzey alanları aynı olmasa da benzer trendlere sahip olduğu görülmüştür. Gerçekçi yaklaşımla ele alınan C3 ve S3 modellerinin en iyi karakteristiğe sahip olduğu görülmüştür. Yüzgeç modellerde stol öncesinde dalga yapısının çukur arkasında oluşan girdapların hareketleri nedeniyle firar kenarında akış ayrılması meydana gelmiştir.
- Dalga geometrisini oluşturan dalga boyu ve genlik değerlerini boyutsuz olarak ifade eden Ms sayısı aynı olan C3 ve C6 modelleri hem düz modele göre hem de diğer dalgalı modellere göre daha yüksek aerodinamik performansa sahiptir.

5. ÖNERİLER

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, kambur balinaların yüzgeçlerinde sahip oldukları yumruların etkisinin incelenmesi için kambur balina yüzgeçlerindeki yumruların geometrik yapısından yararlanılarak geliştirilen yeni bir dalga denklemi kullanılmıştır. Daha gerçekçi modellenen hücum kenarının etkisini ortaya koyabilmek için kuvvet ve akış görüntüleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu konuda yapılacak olan gelecek çalışmalar için öneriler aşağıda sunulmuştur:

- Sayısal yöntemler kullanılarak üç boyutlu bir model olan yüzgeç modeli üzerinde oluşan karmaşık akış yapıları incelenebilir.
- Deneysel olarak akış yapısının daha iyi anlaşılabilmesi için yüzgeç modeli üzerinde basınç ölçümü ve farklı akış görüntüleme teknikleri kullanılabilir.
- Dalgalı geometrinin etkileri farklı kanat modelleri için incelenebilir.
- Akış yapılarının ayrıntılı incelenebilmesi için duman tel akış görüntüleme yöntemi üç boyutlu gerçekleştirilerek yüzgeç modeli daha kapsamlı incelenebilir.
- Kambur balinalar yüzme esnasında 90 derecelik kanat duruşu yerine farklı yüzme açılarında yüzgeçlerini kullanmaktadır. Bu durum göz önüne alınarak farklı yüzme açılarında yüzgeç model için dalgalı yapının etkileri incelenebilir.

6. KAYNAKLAR

- Anderson, Jr, J. D. (1997). A History of Aerodynamics: and Its Impact on Flying Machines. İçinde *Cambridge University Press* (First Edit). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511607158>
- Akbıyık, H. (2014). Dairesel Silindir Etrafındaki Akışın Aktif ve Pasif Yöntemler ile Kontrolü. Niğde Ömer Halis Üniversitesi., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Niğde
- Atzori, M., Vinuesa, R., Fahland, G., Stroh, A., Gatti, D., Frohnapfel, B., & Schlatter, P. (2020). Aerodynamic Effects of Uniform Blowing and Suction on a NACA4412 Airfoil. *Flow, Turbulence and Combustion*, 105(3), 735–759. <https://doi.org/10.1007/s10494-020-00135-z>
- Bar-Cohen, Y. (2005). *Biomimetics: biologically inspired technologies*. CRC Press.
- Barlow, J. B., Rae, W. H., & Pope, A. (1999). *Low-Speed Wind Tunnel Testing* (Third edit). John Wiley & Sons.
- Bhushan, B. (2009). Biomimetics: Lessons from Nature - an overview. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367(1893), 1445–1486. <https://doi.org/10.1098/rsta.2009.0011>
- Bolzon, M. D. (2016). *The effects of tubercles on swept wing performance at pre-stall angles of attack*. Ph.D. Thesis. The University of Adelaide. Australia.
- Bolzon, M. D., Kelso, R. M., & Arjomandi, M. (2016). Tubercles and Their Applications. *Journal of Aerospace Engineering*, 29(1), 1–10. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)as.1943-5525.0000491](https://doi.org/10.1061/(asce)as.1943-5525.0000491)
- Cai, C., Zuo, Z., Liu, S., & Maeda, T. (2018). Effect of a single leading-edge protuberance on NACA 634-021 airfoil performance. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 140(2). <https://doi.org/10.1115/1.4037980>
- Cai, C., Zuo, Z., Morimoto, M., Maeda, T., Kamada, Y., & Liu, S. (2018). Two-step stall characteristic of an airfoil with a single leading-edge protuberance. *AIAA Journal*, 56(1), 64–77. <https://doi.org/10.2514/1.J055921>
- Carmichael, B. H. (1981). Low Reynolds number airfoil survey. *NASA Contractor Report*, 1.
- Carreira Pedro, H., & Kobayashi, M. (2008). Numerical Study of Stall Delay on Humpback Whale Flippers. *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January*, 7–10. <https://doi.org/10.2514/6.2008-584>
- Chan, A. S., Dewey, P. A., Jameson, A., Liang, C., & Smits, A. J. (2011). Vortex suppression and drag reduction in the wake of counter-rotating cylinders. *Journal of Fluid*

- Mechanics*, 679(February 2014), 343–382. <https://doi.org/10.1017/jfm.2011.134>
- Chen, H., Rao, F., Shang, X., Zhang, D., & Hagiwara, I. (2013). Biomimetic drag reduction study on herringbone riblets of bird feather. *Journal of Bionic Engineering*, 10(3), 341–349. [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(13\)60229-2](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(13)60229-2)
- Chen, J., Li, S. ., & Nguyen, V. T. (2012). The effect of leading edge protuberances on the performance of small aspect ratio foils. *15th International Symposium on Flow Visualization*, 25–28.
- Chen, W., Zhang, L., Wang, L., Wei, Z., & Qiao, W. (2022). Utilization of Whale-inspired Leading-edge Tubercles for Airfoil Noise Reduction. *Journal of Bionic Engineering*, 19(5), 1405–1421. <https://doi.org/10.1007/s42235-022-00210-3>
- Çolak, A., Seyhan, M., & Sarioğlu, M. (2023). Leading-edge tubercle modifications to the biomimetic wings. *Physics of Fluids*, 35(1). <https://doi.org/10.1063/5.0131803>
- Coleman, H. W., ve Steele W. G., Uncertainty Analysis For Engineers Uncertainty Analysis For Engineers, Fourth Edition, John Wiley & Sons, New York, 1989.
- Corke, T. C., Enloe, C. L., & Wilkinson, S. P. (2010). Dielectric barrier discharge plasma actuators for flow control. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 42, 505–529. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-121108-145550>
- Cummins, C., Seale, M., Macente, A., Certini, D., Mastropaolo, E., Viola, I. M., & Nakayama, N. (2018). A separated vortex ring underlies the flight of the dandelion. *Nature*, 562(7727), 414–418. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0604-2>
- Custodio, D. (2007). *The Effect of Humpback Whale-Like Leading Edge Protuberances*. 79.
- Custodio, D., Henoch, C. W., & Johari, H. (2015). Aerodynamic Characteristics of Finite Span Wings with Leading-Edge Protuberances. *AIAA Journal*, 53(7), 1878–1893. <https://doi.org/10.2514/1.J053568>
- Custodio, D. S., & Custodio, D. (2007). The Effect of Humpback Whale-like Protuberances on Hydrofoil Performance. *Thesis*.
- De Paula, A. A., Meneghini, J. R., Kleine, V. G., & Girard, R. da M. (2017). The wavy leading edge performance for a very thick airfoil. *AIAA SciTech Forum - 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, January*, 1–27. <https://doi.org/10.2514/6.2017-0492>
- Dean, B., & Bhushan, B. (2010). Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: A review. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1929), 4775–4806. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0201>
- Edel, R. K., & Winn, H. E. (1978). Observations on underwater locomotion and flipper movement of the humpback whale *Megaptera novaeangliae*. *Marine Biology*, 48(3), 279–287. <https://doi.org/10.1007/BF00397155>
- Firat, E., Akansu, Y. E., & Akilli, H. (2015). Flow past a square prism with an upstream

- control rod at incidence to uniform stream. *Ocean Engineering*, 108, 504–518. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.08.041>
- Fish, F. E. (2002). Balancing requirements for stability and maneuverability in cetaceans. *Integrative and Comparative Biology*, 42(1), 85–93. <https://doi.org/10.1093/icb/42.1.85>
- Fish, F. E., & Battle, J. M. (1995). Hydrodynamic design of the humpback whale flipper. *Journal of Morphology*, 225(1), 51–60. <https://doi.org/10.1002/jmor.1052250105>
- Fish, F. E., Howle, L. E., & Murray, M. M. (2008). Hydrodynamic flow control in marine mammals. *Integrative and Comparative Biology*, 48(6), 788–800. <https://doi.org/10.1093/icb/icn029>
- Fish, F. E., & Rohr, J. J. (1999). *Review of Dolphin Hydrodynamics and Swimming Performance*. Spawar.
- Fish, F. E., Weber, P. W., Murray, M. M., & Howle, L. E. (2011). The tubercles on humpback whales' flippers: Application of bio-inspired technology. *Integrative and Comparative Biology*, 51(1), 203–213. <https://doi.org/10.1093/icb/icr016>
- Fouatih, O. M., Imine, B., & Medale, M. (2019). Numerical/experimental investigations on reducing drag penalty of passive vortex generators on a NACA 4415 airfoil. *Wind Energy*, 22(7), 1003–1017. <https://doi.org/10.1002/we.2330>
- Gad-El-Hak, M. (1996). Modern developments in flow control. *Applied Mechanics Reviews*, 49(7), 365–469. <https://doi.org/10.1115/1.3101931>
- Gad-El-Hak, M. (2000). *Flow control passive, active, and reactive flow measurement*.
- Ghorbanishohrat, F., & Johnson, D. A. (2018). Evaluating airfoil behaviour such as laminar separation bubbles with visualization and IR thermography methods. *Journal of Physics: Conference Series*, 1037(5). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1037/5/052037>
- Guerreiro, J. L. E., & Sousa, J. M. M. (2012). Low-reynolds-number effects in passive stall control using sinusoidal leading edges. *AIAA Journal*, 50(2), 461–469. <https://doi.org/10.2514/1.J051235>
- Güler, A. A., Seyhan, M., & Akansu, Y. E. (2018). Effect of signal modulation of dbd plasma actuator on flow control around NACA 0015. *Isi Bilimi Ve Teknigi Dergisi/ Journal of Thermal Science and Technology*, 38(1), 95–105.
- Hansen, K. L. (2012). Effect of leading edge tubercles on airfoil performance. *Ph.D. Thesis*. The University of Adelaide.Australia.
- Hansen, K. L., Kelso, R. M., & Dally, B. B. (2011). Performance Variations of Leading-Edge Tubercles for Distinct Airfoil Profiles. *AIAA Journal*, 49(1), 185–194. <https://doi.org/10.2514/1.J050631>
- Hao Feng, L., Wang, J. J., & Pan, C. (2010). Effect of novel synthetic jet on wake vortex

- shedding modes of a circular cylinder. *Journal of Fluids and Structures*, 26(6), 900–917. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2010.05.003>
- Holman, J. P., *Experimental Methods for Engineers*, 4th edition., McGraw-Hill, New York, USA, 1984
- Ito, M. R., Duan, C., & Wissa, A. A. (2019). The function of the alula on engineered wings: A detailed experimental investigation of a bioinspired leading-edge device. *Bioinspiration and Biomimetics*, 14(5). <https://doi.org/10.1088/1748-3190/ab36ad>
- Johari, H., Henoch, C., Custodio, D., & Levshin, A. (2007). Effects of leading-edge protuberances on airfoil performance. *AIAA Journal*, 45(11), 2634–2642. <https://doi.org/10.2514/1.28497>
- Jurasz, C. M., & Jurasz, V. P. (1979). Feeding modes of the humpback whale, *Megaptera novaeangliae*, in southeast Alaska. *Scientific Reports of the Whales Research Institute*, 31(31), 69–83. <https://www.icrwhale.org/pdf/SC03169-83.pdf>
- Kim, H., Kim, J., & Choi, H. (2018). Flow structure modifications by leading-edge tubercles on a 3D wing. *Bioinspiration and Biomimetics*, 13(6). <https://doi.org/10.1088/1748-3190/aae6fc>
- Kulak, M., Lipian, M., & Zawadzki, K. (2021). Investigation of performance of small wind turbine blades with winglets. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, 31(2), 629–640. <https://doi.org/10.1108/HFF-09-2019-0695>
- Lissaman, P. B. S. (1983). *Low-reynolds-number airfoils*. 223–239.
- Lu, Y., Li, Z., Chang, X., Chuang, Z., & Xing, J. (2021). An aerodynamic optimization design study on the bio-inspired airfoil with leading-edge tubercles. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 15(1), 293–313. <https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1856723>
- Maltby. (1962). *Flow visualization in wind tunnels using indicators*.
- McGranahan, B. D., & Selig, M. S. (2003). Surface oil flow measurements on several airfoils at low Reynolds numbers. *21st AIAA Applied Aerodynamics Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.2003-4067>
- Merzkrich, W. (1987). *Techniques of Flow Visualization*, AGARDograph No.302.
- Miklosovic, D. S., Murray, M. M., & Howle, L. E. (2007). Experimental evaluation of sinusoidal leading edges. *Journal of Aircraft*, 44(4), 1404–1408. <https://doi.org/10.2514/1.30303>
- Miklosovic, D. S., Murray, M. M., Howle, L. E., & Fish, F. E. (2004). Leading-edge tubercles delay stall on humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) flippers. *Physics of Fluids*, 16(5). <https://doi.org/10.1063/1.1688341>
- Mishra, A., Hanzla, M., & De, A. (2020). Passive control of the onset of vortex shedding in flow past a circular cylinder using slit. *Physics of Fluids*, 32(1), 1–31.

<https://doi.org/10.1063/1.5132799>

- Miyauchi, A., & Shimomura, M. (2019). *Industrial Biomimetics (1st ed.)*. Jenny Stanford Publishing.
- Moscato, G., Mohamed, J., & Romano, G. P. (2022). Improving performances of biomimetic wings with leading-edge tubercles. *Experiments in Fluids*, 63(9), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s00348-022-03493-8>
- Mueller, T. J., & DeLaurier, J. D. (2003). Aerodynamics of small vehicles. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 35, 89–111. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.35.101101.161102>
- Mungan, C. E., Huang, L., Pan, Z., Yu, C., & Chakrabarti, S. (2017). *The principle and applications of Bernoulli equation*.
- New, D. T. H., & Ng, B. F. (2021). *Flow Control Through Bio- inspired Leading- Edge Tubercles*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23792-9>
- Nierop, E. A. Van, Alben, S., & Brenner, M. P. (2008). *How Bumps on Whale Flippers Delay Stall: An Aerodynamic Model*. *PhysRevLett*, 100, 054502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.054502>
- Ntantis, E. L., Francis, E., Pugazendi, V., George, J., Tarek, A., Emthias, M., & Rasheed, S. (2021). Study of Sinusoidal Perturbations on the Leading Edge of an Aircraft Wing. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation*, 53(3), 375–386. [https://doi.org/10.6125/JoAAA.202109_53\(3\).04](https://doi.org/10.6125/JoAAA.202109_53(3).04)
- Paris, E. C. (2004). *Concorde and the Future of Supersonic Transport*. 20(1), 59–68.
- Paula, A. A. de. (2016). The airfoil thickness effects on wavy leading edge phenomena at low Reynolds number regime. *Ph.D. Thesis*.
- Pedro, H. T. C., & Kobayashi, M. H. (2008). Numerical study of stall delay on humpback whale Flippers. *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January*, 7–10. <https://doi.org/10.2514/6.2008-584>
- Pierce, A. J., Lu, F. K., Bryant, D. S., & Shih, Y. (2010). New developments in surface oil flow visualization. *27th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference 2010*, 1(July), 1–11. <https://doi.org/10.2514/6.2010-4353>
- Post, M. L., Decker, R., Sapell, A. R., & Hart, J. S. (2018). Effect of bio-inspired sinusoidal leading-edges on wings. *Aerospace Science and Technology*, 81, 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.07.043>
- Rao, C., & Liu, H. (2020). Effects of reynolds number and distribution on passive flow Control in Owl-inspired leading-edge serrations. *Integrative and Comparative Biology*, 60(5), 1135–1146. <https://doi.org/10.1093/ICB/ICAA119>
- Rose, J. B. R., Natarajan, S. G., & Gopinathan, V. T. (2021). Biomimetic flow control techniques for aerospace applications: a comprehensive review. *Içinde Reviews in*

- Environmental Science and Biotechnology* (C. 20, Sayı 3). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09583-z>
- Rostamzadeh, N., Hansen, K. L., Kelso, R. M., & Dally, B. B. (2014). The formation mechanism and impact of streamwise vortices on NACA 0021 airfoil's performance with undulating leading edge modification. *Physics of Fluids*, 26(10), 1–22. <https://doi.org/10.1063/1.4896748>
- Sarioglu, M., Akansu, Y. E., & Yavuz, T. (2006). Flow Around a Rotatable Square Cylinder-Plate Body. *AIAA Journal*, 44(5), 1065–1072. <https://doi.org/10.2514/1.18069>
- Seyhan, M. (2022). Genlik modülasyonlu dalgalı geometriye sahip uçak kanadının aerodinamik performansının deneysel incelenmesi. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon
- Seyhan, M., Sarioglu, M., & Akansu, Y. E. (2021). Influence of Leading-Edge Tubercle with Amplitude Modulation on NACA 0015 Airfoil. *AIAA Journal*, 59(10), 3965–3978. <https://doi.org/10.2514/1.J060180>
- Shanmukha Srinivas, K., Datta, A., Bhattacharyya, A., & Kumar, S. (2018). Free-stream characteristics of bio-inspired marine rudders with different leading-edge configurations. *Ocean Engineering*, 170(April), 148–159. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.10.010>
- Shormann, D. E., & Panhuis, M. in het. (2020). Performance evaluation of humpback whale-inspired shortboard surfing fins based on ocean wave fieldwork. *PLoS ONE*, 15(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232035>
- Siddiqui, N. A., Asrar, W., & Sulaeman, E. (2017). Literature review: Biomimetic and conventional aircraft wing tips. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 4(2). <https://doi.org/10.15394/ijaa.2017.1172>
- Sreejith, B. K., & Sathyabhama, A. (2020). Experimental and numerical study of laminar separation bubble formation on low Reynolds number airfoil with leading-edge tubercles. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(4), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-2229-2>
- Stanway, M. J. (2008). Hydrodynamic effects of leading-edge tubercles on control surfaces and in flapping foil propulsion . by in partial fulfillment of the requirements for the degree of at the by. *Ocean Engineering*, December.
- Sudhakar, S., Karthikeyan, N., & Suriyanarayanan, P. (2019). Experimental studies on the effect of leading-edge tubercles on laminar separation bubble. *AIAA Journal*, 57(12), 5197–5207. <https://doi.org/10.2514/1.J058294>
- Sudhakar, S., Karthikeyan, N., & Venkatakrishnan, L. (2017). Influence of leading edge tubercles on aerodynamic characteristics of a high aspect-ratio UAV. *Aerospace Science and Technology*, 69, 281–289. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.06.031>
- Sudhakar, S., Venkatakrishnan, L., & Ramesh, O. N. (2020). The influence of leading-edge tubercles on airfoil performance at low reynolds numbers. *AIAA Scitech 2020 Forum*,

- 1 PartF(January), 1–25. <https://doi.org/10.2514/6.2020-2219>
- Tang, C., Ma, W., Li, B., Jin, M., & Chen, H. (2020). Cephalopod-Inspired Swimming Robot Using Dielectric Elastomer Synthetic Jet Actuator. *Advanced Engineering Materials*, 22(4), 1–10. <https://doi.org/10.1002/adem.201901130>
- URL-1. (2023, Temmuz 27). Fotoğrafçı Craig Lambert tarafından çekilen kambur balina fotoğrafı <https://www.shutterstock.com/tr/g/Craig+Lambert+Photography> adresinden alınmıştır.
- Watts, P., & Fish, F. E. (2001). The influence of passive, leading edge tubercles on wing performance. *Proc. Twelfth Intl. Symp. Unmanned Untethered Submers. Technol., Durham New Hampshire*, 2–9.
- Weber, P., Howle, L., & Murray, M. (2010). Lift, Drag, and Cavitation Onset On Rudders With Leading-edge Tubercles. *Marine Technology*, 47, 27–36. <https://doi.org/10.5957/mtsn.2010.47.1.27>
- Wei, Z., New, T. H., & Cui, Y. D. (2015). An experimental study on flow separation control of hydrofoils with leading-edge tubercles at low Reynolds number. *Ocean Engineering*, 108, 336–349. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.08.004>
- Wei, Z., Toh, J. W. A., Ibrahim, I. H., & Zhang, Y. (2019). Aerodynamic characteristics and surface flow structures of moderate aspect-ratio leading-edge tubercled wings. *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 75, 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2019.01.001>
- Weihs, D. (1981). Effects of swimming path curvature on the energetics of fish motion. *Fishery Bulletin*, 79, 171–176.
- Xing, Y., Chen, W., Wang, X., Tong, F., & Qiao, W. (2023). Effect of Wavy Leading Edges on Airfoil Trailing-Edge Bluntness Noise. *Aerospace*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/aerospace10040353>
- Yarusevych, S., Sullivan, P. E., & Kawall, J. G. (2009). Smoke-wire flow visualization in separated flows at relatively high velocities. *AIAA Journal*, 47(6), 1592–1595. <https://doi.org/10.2514/1.43539>

7. EKLER

Bu deneysel çalışma kapsamında hız, sıcaklık, kuvvet vb. parametreler ölçülerek Reynolds sayısı, taşıma ve sürüklenme katsayıları olmak üzere boyutsuz sayılar hesaplanmıştır. Bu boyutsuz sayıların belirsizliğini bulabilmek için her bir bağımsız değişkenin belirsizlik değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Belirsizlikler hesaplanırken Akbıyık (2014) ve Seyhan'ın (2022) çalışmalarından faydalanılmıştır.

Yoğunluğun belirsizliğinin hesaplanması

Atmosfer basıncı ölçümünde, 1.1 kPa'lık değişim için atmosfer basıncının belirsizliği %1.085 olarak elde edilmiştir. $\left(u_{P_{atm}} = \frac{w_{P_{atm}}}{P_{atm}} \cong \frac{1100}{101300} = 0.01085 = \%1.085\right)$

Sıcaklık ölçümünde oluşan 0.1°C hata nedeni ile 25°C'deki sıcaklığa ait belirsizlik %0.4 olarak elde edilmiştir. $\left(u_T = \frac{w_T}{T} \cong \frac{0.1}{25} = 0.004 = \%0.4\right)$

$$u_\rho = \left[(1)^2 \left(\frac{w_{P_{atm}}}{P_{atm}} \right)^2 + (-1)^2 \left(\frac{w_T}{T} \right)^2 \right]^{1/2} = [(0.01085)^2 + (0.004)^2]^{1/2} = 0.01156$$

Atmosfer basıncı ve sıcaklık değerlerine göre değişen $\rho = \frac{P_{atm}}{RT}$ olarak ifade edilen yoğunluk için belirsizlik %1.156 olarak hesaplanmıştır.

Taşıma ve sürüklenme kuvvetinin ölçümünde oluşan belirsizlikler

Yük hücresinin x yönünde meydana gelen belirsizlik değeri %2'dir. $\left(u_{X_1} = \frac{w_{X_1}}{X_1} \cong 0.02 = \%2\right)$

Yük hücresinin y yönünde meydana gelen belirsizlik değeri %1'dir. $\left(u_{X_2} = \frac{w_{X_2}}{X_2} \cong 0.01 = \%1\right)$

Kuvvet ölçümünde hücum açısının 0.5°'lik hatalı ölçümü için belirsizlik değeri %0.6'dir. $\left(u_{X_3} = \frac{w_{X_3}}{X_3} \cong 0.0083 = \%0.83\right)$

Veri toplama kartının çözünürlüğü dolayısı ile oluşan belirsizlik değeri %0.34'tür. $\left(u_{X_4} = \%0.34\right)$

Kanat alanının belirsizliği (u_{Ap}) %0.492 olarak elde edilmiştir. $\left(u_{Ap} = u_{X_5} = \frac{w_{Ap}}{A_P} = \%0.492\right)$

Hız ölçümünde 10 m/s hız için oluşan hata 0.15 m/s'dir. Oluşan belirsizlik %1.5 olarak elde edilmiştir. $\left(u_{U_0} = \frac{w_{U_0}}{U_0} \cong 0.015\right)$

$$u_{F_L} = \frac{w_{F_L}}{F_L} = \left[\left(\frac{w_{X_2}}{X_2} \right)^2 + \left(\frac{w_{X_3}}{X_3} \right)^2 + \left(\frac{w_{X_4}}{X_4} \right)^2 + \left(\frac{w_{X_5}}{X_5} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$u_{F_L} = [(0.01)^2 + (0.0083)^2 + (0.0034)^2 + (0.00492)^2]^{1/2} \cong 0.01430 \cong \%1.430$$

Taşıma kuvvetinin belirsizliği %1.430 olarak elde edilmiştir.

$$u_{F_D} = \frac{w_{F_D}}{F_D} = \left[\left(\frac{w_{X_1}}{X_1} \right)^2 + \left(\frac{w_{X_3}}{X_3} \right)^2 + \left(\frac{w_{X_4}}{X_4} \right)^2 + \left(\frac{w_{X_5}}{X_5} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$u_{F_D} = [(0.02)^2 + (0.0083)^2 + (0.0034)^2 + (0.00492)^2]^{1/2} \cong 0.0224 \cong \%2.24$$

Sürüklenme kuvvetinin belirsizliği %2.24 olarak elde edilmiştir.

Taşıma ve sürüklenme katsayısı için belirsizlik hesaplanması

Taşıma katsayısının belirsizliği yukarıda hesaplanan taşıma kuvveti, yoğunluk, hız ve üst bakış alanının belirsizliğinin Denklem (11)'de yerine konulması ile hesaplanmıştır. Denklem (7) ile hesaplanan taşıma katsayısının belirsizliği, Denklem (11) kullanılarak $\pm\%3.55$ olarak hesaplanmıştır

$$u_{C_L} = \frac{w_{C_L}}{C_L} = \left[(u_{F_L})^2 + (u_\rho)^2 + 4(u_{U_0})^2 + (u_{A_P})^2 \right]^{1/2}$$

$$u_{C_L} = [(0.01430)^2 + (0.01156)^2 + 4(0.015)^2 + (0.00492)^2]^{1/2} = 0.0355$$

Sürüklenme katsayısının belirsizliği yukarıda hesaplanan sürüklenme kuvveti, yoğunluk, hız ve ön bakış alanının belirsizliğinin Denklem (12)'de yerine konulması ile hesaplanmıştır. Denklem (8) ile hesaplanan sürüklenme katsayısının belirsizliği, Denklem (12) kullanılarak $\pm\%3.95$ olarak hesaplanmıştır.

$$u_{C_D} = \left[(u_{F_D})^2 + (u_\rho)^2 + 4(u_{U_0})^2 + (u_{A_P})^2 \right]^{1/2}$$

$$u_{C_D} = [(0.0224)^2 + (0.01156)^2 + 4(0.015)^2 + (0.00492)^2]^{1/2} = 0.0395$$

ÖZGEÇMİŞ

Aleyna ÇOLAK, Lise eğitimini 2012 yılında Tevfik Serdar Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2013 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2019 yılında bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. İyi derecede İngilizce bilmektedir.

Yüksek lisans tezi kapsamında yapılan makale ve bildiriler:

- Çolak, A.,** Seyhan, M., ve Sarioğlu, M., (2023). Leading-edge tubercle modifications to the biomimetic wings. *Physics of Fluids*, 35(1), 017118.
- Çolak, A.,** Seyhan, M., ve Sarioğlu, M., (2021). Determination of optimum mixing parameter for oil flow visualization. ISATECH2021, Budapest, Hungary, 28- 30 June 2021
- Çolak, A.,** Seyhan, M., ve Sarioğlu, M., (2020). The effects of leading-edge tubercles on flow around a semi-span NACA 0020 airfoil. International Conference on Engineering Technologies, Konya, Turkey, 19- 21 November 2020, 132