BİO ESİNLENMELİ KANAT MODELİNDE AERODİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİN İNCELENMESİ

Neslihan AYDIN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİO ESİNLENMELİ KANAT MODELİNDE AERODİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİN İNCELENMESİ

Neslihan AYDIN
0000-0003-3650-0886

Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

BİO ESİNLENMELİ KANAT MODELİNDE AERODİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİN İNCELENMESİ

Neslihan AYDIN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ

Kanat profili ve aerodinamiği; özellikle son yıllarda, uçak kanadı, türbin kanadı, insansız hava araçları, mikro hava araçları tasarımı ve dinamiği ile ilgili konularda çalışan pek çok araştırmacı için ilgi konusu olmuştur. Uzun yıllardan beri doğadaki birçok hayvan ve bitki yapısı ve sistemleri mühendis ve mimarların geliştirdiği tasarım ve sistemlere ilham kaynağı olmuştur. Bu tez çalışmasında akçaağaç tohumunun aerodinamik özelliklerinden istifade etmek amacıyla bio-esinlenmeli bir kanat modeli oluşturulmuştur. Bu modelin aerodinamik karakteristiklerini belirlemek üzere 3 boyutlu yazıcı kullanılarak modelin prototipi üretilip deneysel ve nümerik çalışmalarda kullanılmıştır. Deneyler, açık akışlı rüzgar tünelinde, U=5 m/s, 10 m/s ve 14 m/s hava hızlarında yapılmış; -50° — +50° arasında değişen hücum açılarında, Re=12300, 24600 ve 34440 için kaldırma ve sürüklenme katsayısı değerleri elde edilmiştir. Ayrıca prototip kanadın CAD katı modeli oluşturularak ANSYS R2020 analiz yazılımı ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri gerçekleştirilmiştir. Nümerik testler, farklı çözüm yöntemleri ve farklı türbülans modelleriyle tekrarlanmış, analizlere SST-k-ω türbülans modeli ile devam edilmiştir. Ağdan bağımsızlık çalışmalarından sonra farklı atak açıları için hız ve basınç dağılımları elde edilmiş, hesaplanan kaldırma ve direnç katsayıları deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Yapılan analizlerde modelin asimetrik bir kanat özelliği gösterdiği, bütün Re sayıları için maksimum kaldırma katsayısının pozitif hücum açılarında, α =35º, negatif hücum açılarında ise α =-40º civarında elde edildiği görülmüştür. Bütün Re sayılarında minimum sürüklenme katsayısı yaklaşık α =7º hücum açısında elde edilmiştir. Aerodinamik performansın Re sayısı ile az da olsa arttığı, ancak bütün Re sayıları için maksimum C_L/C_D oranı hücum açısı α =18º'de oluştuğu görülmüştür. Maksimum değer C_L/C_D=1,736 olarak Re=3440 değerinde elde edilmiştir. Negatif hücum açılarında bütün Re sayılarında ekstremum değer, yaklaşık α=-3º de oluşmuş olup minimum değer C_L/C_D=-2,13 olarak Re=3440 değerinde bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Biyo-esinlenmeli kanat tasarımı, biyonik kanat, aerodinamik performans, deneysel aerodinamik, nümerik aerodinamik, türbülans modelleri.
2021, xi + 105 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

INVESTIGATION OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS ON BIO INSPIRED WINGS

Neslihan AYDIN

Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ

Airfoil and aerodynamics have been the subject of interest for many researchers working on issues related to Aircraft wing, turbine wing, unmanned aerial vehicles, micro-aircraft design and dynamics, especially in recent years. For many years, many animal and plant structures and systems in nature have inspired the designs and systems developed by engineers and architects. In this thesis, a bio-inspired wing model was created to take advantage of the aerodynamic properties of the maple seed. In order to determine the aerodynamic characteristics of this model, a prototype of the model was produced using a 3-D printer and used in experimental and numerical studies. Experiments were conducted in an open- flow wind tunnel at air speeds of U=5 m/s, 10 m/s and 14 m/s; lift and drag coefficient values were obtained for Re=12300, 24600 and 34440 at attack angles ranging from -50° to +50°. In addition, a CAD solid model of the prototype wing was created and Computational Fluid Dynamics analysis was performed using ANSYS R2020 analysis software. Numerical tests were repeated with different solution methods and different turbulence models, and analyses were continued with the SST-k-ω turbulence model. After mesh independence studies, velocity and pressure distributions were obtained for different attack angles, and calculated lift and drag coefficients were compared with experimental results. Analysis showed that the model showed an asymmetric wing feature, and the maximum lift coefficient for all Re numbers was obtained at positive attack angles , α =35º, and α =-40º at negative attack angles. For all Re numbers, the minimum drag coefficient was obtained at an angle of approximately α =7º. Aerodynamic performance has been shown to increase slightly with Re number, but the maximum C_L/C_D ratio for all Re numbers occurs at the attack angle α =18º. The maximum value was C_L / C_D=1,736 and for Re=3440. At negative attack angles, the extremum value in all Re numbers occurred at approximately α=-3º and the minimum value was C_L/C_D=-2.13 for Re=3440.

Key words: Bio-inspired airfoil design, Bionic wing, aerodynamic performance, experimental aerodynamics, numerical aerodynamics, turbulence models.
2021, xi + 105 pages.

TEŞEKKÜR

Akademik hayatım boyunca yardımlarını ve fikirlerini benden esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ' e teşekkürlerimi sunarım.

Uludağ Üniversitesi'nde araştırma görevliliğim boyunca eğitim hayatıma katkı sağlayan tüm öğretim elemanı hocalarıma, araştırma görevlisi ve tüm bursiyer arkadaşlarıma tek tek teşekkür ederim.

Ayrıca Tersine Mühendislik çalışmalarında; Akçaağaç tohumunun prototip taranıp, tasarlanıp ve üretilmesinde yardımcı olan Prof. Dr. Abdil KUŞ hocama, HEXAGON Mühendislik ve POLİGON Mühendislik çalışanlarına teşekkür ederim.

Bursa Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarı'ndaki Rüzgar tünelinde deneysel çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen Tübitak Bursiyeri doktora çalışma arkadaşlarım Mehmet Erman Çalışkan ve Muhammed Usame Sabırlı' ya teşekkür ederim.

Bursa Teknik Üniversitesi'nde eşimle prototipini ürettirdiğimiz akçaağaç profilini bizlere zaman ayırarak; PIV akış hız görüntüleme çalışmalarında bana yardım eden Arş. Gör. Gözde Geçim hocama ve Doç. Dr. Ertuğrul Erkoç hocama teşekkür ederim.

Son olarak doktora tez çalışmalarımda bana sabırla maddi manevi yardım eden canım eşim Mahmut AYDIN' a ve ailelerimize teşekkür ederim.

Bu eser canım oğlum ALP AYDIN için sen çok yaşa oğlum ve ahirete intikal etmiş canım annem için yazdım ruhun şad, mekanın cennet olsun…

Neslihan AYDIN
09/09/2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....i
ABSTRACT.....ii
TEŞEKKÜR.....iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....xi
1.GİRİŞ.....1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....7
2.1. Standart Kanatlar Üzerinde Yapılan Çalışmalar.....**7**
2.2. Farklı Biyoesinlemeli Kanat Tasarımı İle İlgili Yapılan Çalışmalar.....**12**
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....**18**
3.1.1. Aerodinamik Karakteristikler, Tanımlar……18
3.1.2. Aerodinamik Kuvvet ve Moment İçin Boyut Analizi……21
3.1.3. Akım Benzerliği; Geometrik Benzerlik, Dinamik Benzerlik……26
3.2. Matematiksel Model……..28
3.2.1. Kütlenin Korunumu Denklemi……...28
3.2.2. Momentumun Korunumu Denklemleri……..29
3.2.3. SST-k-w Türbülans Modeli……29
3.2.4. Hata Analizi.....30
3.3. Model Oluşturma……..30
3.3.1 3B Lazer Ölçüm ve Tarama Sistemleri……33
3.3.2. Akçaağaç Tohumunun Tersine Mühendislik Tekniğiyle 3B Taranması…….....34
3.4. Deneysel Sistem……38
3.5. Sayısal Çözüm Parametreleri ve Sınır Şartları……..43
3.5.1. Geometrinin Oluşturulması……43
3.5.2. Ağ Yapısının Oluşturulması……...44
3.5.3. Sınır Şartları……...46
3.5.4. Türbülans Modelleri ve Çözüm Yöntemleri……...47
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 54
4.1. Deneysel Sonuçlar……54
4.1.1. Re=12300 için C_L-C_D Sonuçları…….....56

4.1.2.Re=24600 için C_L-C_D Sonuçları….....58
4.1.3. Re=34440 için C_L-C_D Sonuçları…….....61
4.1.4. Farklı Reynolds Değerlerine Göre Kaldırma Katsayılarının Değişimi……...64
4.1.5. Farklı Reynolds Değerlerine Göre Sürüklenme Katsayılarının Değişimi……..65
4.1.6. Farklı Reynolds Değerlerine Göre C_L/C_D Oranın Değişimi……66
4.1.7. Atak Açılarına Göre Aerodinamik Karakteristiklerin Değişimi…….67
4.1.8. Belirsizlik Analizi için Hata Hesabı.....72
4.2. CFD Sonuçları ve Karşılaştırma……73
4.2.1. 0 Derece Hız ve Basınç Sonuçları……..74
4.2.2. -20 Derece Hız ve Basınç Sonuçları……...78
4.2.3. -40 Derece Hız ve Basınç Sonuçları……...82
4.2.4. 20 Derece Hız ve Basınç Sonuçları…….87
4.2.5. 40 Derece Hız ve Basınç Sonuçları…….91
5. SONUÇ…….....99
KAYNAKLAR……..101
ÖZGEÇMİŞ……...103

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A	Kanat alanı
c	Veter uzunluğu
C_L	Kaldırma kuvveti katsayısı
C_D	Sürükleme katsayısı
C_M	Moment katsayısı
F_L	Kaldırma kuvveti
F_D	Sürükleme kuvveti
g	Yerçekimi ivmesi
k	Türbülans kinetik enerjisi
p	Basınç
Re	Reynolds sayısı
t	Zaman
T	Sıcaklık
U	Hız
V_∞	Serbest akış hızı
u	x yönündeki hız bileşeni
v	y yönündeki hız bileşeni
w	z yönündeki hız bileşeni
y	Düşey koordinat ekseni
y^+	Boyutsuz uzaklık
z	Sayfa düzlemine dik koordinat ekseni
ρ	Hava yoğunluğu
μ	Dinamik viskozite
ν	Kinematik viskozite
α	Hücum açısı (Atak açısı)

Kısaltmalar	**Açıklama**
ANSYS	Ticari Yazılım (Analysis System)
NACA	National Advisory Commitee for Aeronautics (Amerikan Ulusal Havacılık Dairesi)
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CFD	Computional Fluid Dynamics
SST	Shear Stress Transport (Kayma Gerilmesi Taşınımı)
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi)
SIMPLE	Basınç Bağlantılı Denklemler için Yarı Kapalı Yöntem (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations)
LES	Büyük Girdap Simulasyonu (Large Eddy Simulation)
MAV	Micro Air Vehicles (Mikro Hava Araçları)
NAV	Nano Air Vehicles (Nano Hava Araçları)
İHA	İnsansız Hava Araçları
LEV	Large Eddy Vortex

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Doğadan esinlenerek yapılan icatlar; yusufçuk böceği ve helikopter……...3
Şekil 1.2. Kutu balığından otomobil iskelet yapısı aerodinamik testler için çamur model Daimler Chrysler Prototip Biyonik Araç…….....5
Şekil 2.1. Kaldırma kuvvet katsayısının LES modeli ile farklı y+ değerleri için Reynolds değişimine göre kıyaslanması……7
Şekil 2.2. NACA 0015 nokta 2D ve 3D boyutlu görünümleri.....8
Şekil 2.3. (a) Flaplı kanatın alt üst konfigürasyon şeklinde rüzgar tünelinde görüntüsü (b) Rüzgar tüneline monte edilmiş kanat (c) 0.3 kort uzunluğunda Gurney flap kanat tasarımı.....10
Şekil 2.4. Normal kanat profili ile tüberküllü kanat profili.....12
Şekil 2.5. Akçaağaç tohumu CFD analiz statik basınç dağılım grafiği ve farklı Reynolds değerleri için C_L dağılımı.....13
Şekil 2.6. Optimum kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin oluştuğu atak açılarının gösterimi.....14
Şekil 2.7. Akçaağaç tohumunun etrafında oluşan girdapların smoke wire görüntüleri.....15
Şekil 2.8. Akçaağaç tohumu ve diğer kuş-böcek türlerinde oluşan vorteksler; Leading Edge Vortex (LEV).....16
Şekil 3.1. Aerodinamik kuvvetler.....18
Şekil 3.2. Aerodinamik kuvveti etkileyen büyüklükler.....19
Şekil 3.3. Kanat profil geometrik özellikleri.....21
Şekil 3.4. Akımların benzerliği.....28
Şekil 3.5. Akçaağaç tohumu genel görüntüsü ve farklı boyutlarda toplanan akçaağaç tohumları.....30
Şekil 3.6. Akçaağaç tohumlarının Optik ve Lazer tarama cihazlarında daha detaylı görüntülerinin elde edilmesi için sulu ve guaj boya ile boyanması işlemi.....31
Şekil 3.7. Türbin kanadı formunda örnek akçaağaç tohumlarından 3D Lazer yazıcı ile Uludağ Üniversitesi Tersine Mühendislik Laboratuvarında taranması işlemi.....32
Şekil 3.8. Akçaağaç tohumunun 3B lazer taraması.....33
Şekil 3.9. Çeşitli 3B tarama sistemleri.....34
Şekil 3.10. Prototip Akçaağaç tohumunun taranmasında kullanılan Hp Jet Fusion 3D 4200 Yazıcı.....35
Şekil 3.11. Seçilen optimum tasarımdaki akçaağaç tohumunun 3D yazıcı da üretilmeden önceki 3D yazıcı programında birebir ölçeklendirilmiş resmi 1 numaralı akçaağaç tohumu (orjinal boyut).....35
Şekil 3.12. Seçilen optimum tasarımdaki akçaağaç tohumunun 3D yazıcı da üretilmeden önceki 3D PRİNTER programında birebir ölçeklendirilmiş resmi 2 numaralı akçaağaç tohumu (orjinal boyut).....36

Şekil 3.13. Sırasıyla 1 numaralı akçaağaç tohumunun resimleri a) Orjinal boyut b) 120 mm akçaağaç tohumu c)140 mm akçaağaç tohumu d) 160 mm akçaağaç tohumu.....36
Şekil 3.14. Sırasıyla 2 numaralı akçaağaç tohumunun resimleri a) Orjinal boyut b) 120 mm akçaağaç tohumu c)140 mm akçaağaç tohumu d) 160 mm akçaağaç tohumu.....37
Şekil 3.15. 1 numaralı akçaağaç tohumunun 3 boyutlu optik tarayıcı sonrası görüntüleri.....37
Şekil 3.16. 160 mm akçaağaç tohumu (samara) deneysel ve nümerik analizi için üretilmiş prototip kanat.....38
Şekil 3.17. Kuvvet ölçüm sistemi CAD resmi.....39
Şekil 3.18. Deneysel sistem rüzgar tüneli ve kuvvet denge sistemi üzerinde prototip akçaağaç kanadının görüntüsü.....40
Şekil 3.19. Rüzgar Tüneli içerisine akçaağaç kanat modelinin ve aerodinamik kuvvet ölçüm cihazının yerleşimi.....41
Şekil 3.20. Duman üretme cihazının gaz borusu ile rüzgar tüneline verilmesi şematik resmi.....42
Şekil 3.21. Deney tesisatında prototip Akçaağaç tohumunun üzerine duman makinesinden pitot tüpü ile dumanın verilmesi işlemi.....42
Şekil 3.22. Bursa Teknik Üniversitesi PIV düzeneğinde prototip Akçaağaç tohumu üzerinde akım görüntüleme çalışmaları.....43
Şekil 3.23. Rüzgar tünelinin birebir simülasyonu için ANSYS FLUENT de çizilen geometri.....44
Şekil 3.24. Kanat etrafına sık mesh atıldıktan sonra rüzgar tünelinde kanal içerisinde kanat etrafında yan görüntüsü.....45
Şekil 3.25. Kanat etrafındaki mesh görüntüsü.....45
Şekil 3.26. ANSYS FLUENT de tanımlanan sınır şartları.....46
Şekil 3.27. ANSYS FLUENT de kullanılan viskoz modelde türbülans sabitleri.....48
Şekil 3.28. Ağdan bağımsızlık çalışmaları sonucunda SST-k-w Türbülans modeli için deneysel ve analiz sonuçlarında aerodinamik özelliklerin kıyaslanması.....50
Şekil 3.29. Farklı Türbülans Modelleri için kaldırma ve sürüklenme katsayılarının kıyaslanması.....51
Şekil 3.30. ANSYS FLUENT analizlerde yakınsama eğrileri.....52
Şekil 3.31. SST-k-w Türbülans modeli ile iterasyondan bağımsızlık çalışması sonucu ANSYS FLUENT de elde edilen 0º için aerodinamik özellikler.....53
Şekil 4.1. Re=12300 için biyo-esinlenmeli prototip kanat üzerinde farklı atak açılarında kaldırma katsayıları.....56
Şekil 4.2. Re=12300 için biyo-esinlenmeli prototip kanat üzerinde farklı atak açılarında sürüklenme katsayıları.....57
Şekil 4.3. Re=12300 için biyo-esinlenmeli prototip kanat üzerinde farklı atak açılarında C_L/C_D oranları.....58
Şekil 4.4. Re=24600 için biyo-esinlenmeli prototip kanat üzerinde farklı atak açılarında kaldırma katsayıları.....59
Şekil 4.5. Re=24600 için biyo-esinlenmeli prototip kanat üzerinde farklı atak açılarında sürüklenme katsayıları.....60
Şekil 4.6. Re=24600 için biyo-esinlenmeli prototip kanat üzerinde farklı atak açılarında C_L/C_D oranları.....61
Şekil 4.7. Re=34440 için biyo-esinlenmeli prototip kanat üzerinde farklı atak açılarında kaldırma katsayıları.....62

Şekil 4.8. Re=34440 için biyo-esinlenmeli prototip kanat üzerinde farklı atak açılarında sürüklenme katsayıları.....63
Şekil 4.9. Re=34440 için biyo-esinlenmeli prototip kanat üzerinde farklı atak açılarında C_L/C_D oranları.....64
Şekil 4.10. Reynolds değerine göre samara (akçaağaç) kanadı üzerinde farklı atak açılarında aerodinamik C_L değişimi.....65
Şekil 4.11. Reynolds değerine göre samara (akçaağaç) kanadı üzerinde farklı atak açılarında aerodinamik C_D değişimi.....66
Şekil 4.12. Reynolds değerine göre samara (akçaağaç) kanadı üzerinde farklı atak açılarında aerodinamik C_L/C_D oranı değişimi.....67
Şekil 4.13. Pozitif atak açılarında aerodinamik kaldırma katsayısının değişimi.....68
Şekil 4.14. Negatif atak açılarında aerodinamik kaldırma katsayısının değişimi.....68
Şekil 4.15. Pozitif atak açılarında aerodinamik sürüklenme katsayısının değişimi.....69
Şekil 4.16. Negatif atak açılarında aerodinamik sürüklenme katsayısının değişimi.....70
Şekil 4.17. Pozitif atak açılarında aerodinamik C_L/C_D oranı değişimi.....71
Şekil 4.18. Negatif atak açılarında aerodinamik C_L/C_D oranı değişimi.....71
Şekil 4.19. Re=24600 için kaldırma katsayılarının hata analizi.....72
Şekil 4.20. Re=24600 için sürüklenme katsayılarının hata analizi.....73
Şekil 4.21. Sırasıyla 0 derece için Re=12300 için orta kesit, tohum ve uç kesitlerdeki basınç dağılımı.....75
Şekil 4.22. Sırasıyla 0 derece için Re=12300 için orta kesit, tohum ve uç kesitlerdeki hız dağılımı.....77
Şekil 4.23. 0 derece Re=12300 için Akçaağaç kanadı etrafındaki akım çizgileri.....78
Şekil 4.24. Sırasıyla -20 derece için Re=12300 için orta kesit, tohum ve uç kesitlerdeki basınç dağılımı.....79
Şekil 4.25. Sırasıyla -20 derece için Re=12300 için orta kesit, tohum ve uç kesitlerdeki hız dağılımı.....81
Şekil 4.26. -20 derece Re=12300 için Akçaağaç kanadı etrafındaki akım çizgileri.....82
Şekil 4.27. Sırasıyla -40 derece için Re=12300 için orta kesit, tohum ve uç kesitlerdeki basınç dağılımı.....83
Şekil 4.28. Sırasıyla -40 derece için Re=12300 için orta kesit, tohum ve uç kesitlerdeki hız dağılımı.....85
Şekil 4.29. -40 derece Re=12300 için Akçaağaç kanadı etrafındaki akım çizgileri.....86
Şekil 4.30. Sırasıyla 20 derece için Re=12300 için orta kesit, tohum ve uç kesitlerdeki basınç dağılımı.....88
Şekil 4.31. Sırasıyla 20 derece için Re=12300 için orta kesit, tohum ve uç kesitlerdeki hız dağılımı.....90
Şekil 4.32. 20 derece Re=12300 için Akçaağaç kanadı etrafındaki akım çizgileri.....91
Şekil 4.33. Sırasıyla 40 derece için Re=12300 için orta kesit, tohum ve uç kesitlerdeki basınç dağılımı.....92
Şekil 4.34. Sırasıyla 40 derece için Re=12300 için orta eksen, tohum ve uç eksenlerdeki hız dağılımı.....94
Şekil 4.35. 40 derece Re=12300 için Akçaağaç kanadı etrafındaki akım çizgileri.....95
Şekil 4.36. Deneysel ve nümerik hesaplama sonucu sürüklenme katsayıları.....96
Şekil 4.37. Deneysel ve nümerik hesaplama sonucu kaldırma katsayıları.....96
Şekil 4.38. Deneysel ve nümerik hesaplama sonucu C_L/C_D oranları.....97
Şekil 4.39. Kaldırma katsayısının prototip kanadın Standart kanatlar ile kıyaslanması...98

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1. Farklı mesh (eleman) sayıları ve Türbülans modelleri için ANSYS FLUENT de elde edilen 0º atak açısı 5 m/s rüzgar tüneli hızında akçaağaç tohumu (prototip kanat etrafında) aerodinamik özellikler (sürüklenme ve kaldırma katsayıları).....49
Çizelge 4.2. SST-k-w Türbülans modeli için ANSYS FLUENT de yapılan ağdan bağımsızlık çalışması için yapılan analiz sonuçları.....50
Çizelge 4.1. Negatif atak açıları için (α= -50º→ 0º) deneysel kaldırma ve direnç kuvvetleri.....54
Çizelge 4.2. Pozitif atak açıları için (α= 0º→ +50º) deneysel kaldırma ve direnç kuvvetleri.....55

1. GİRİŞ

Doğada, mühendislik tasarımlarında ilham verecek pek çok olay ve mekanizma mevcuttur. Mühendisler doğada karşılaştıkları olayları sadece taklit etmezler ayrıca benzer tasarımları insanoğlunun faydasına sunmak için doğadan ilham alarak kurgular, tasarlar ve üretirler. Biyo-esinlenme süreci; doğadan (hayvanlardan-bitkilerden) örnek alınarak en kullanışlı, verimli, ekonomik ve ekolojik endüstriyel ürün tasarımının geliştirilmesi sürecini ifade eder.

Son yıllarda akışkanlar mekaniğinde, malzeme üretimi, bina inşası, gemi-inşa sektöründe, tıp ve mühendislik alanında, uçak-kanat tasarımında aerodinamik uçak ve uzay biliminde, yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgar-güneş enerjisinin) kullanımında ve özellikle mimari tasarımlarda biyomimetik (doğadan-esinlenmeli) endüstriyel tasarımlar gerçekleştirilmiş ve insanların kullanımına sunulmuştur. Biyomimikri, doğanın zamanın sınavına tabii tutulmuş motiflerini ve stratejilerini örnek alarak, insanların sorunlarına sürdürülebilir çözümler arayan bir inovasyon yaklaşımıdır.

Biyomimikri (veya biyomimetik), doğadan ilham alarak ya da doğayı taklit ederek tasarım yapma; insan problemleri ve ihtiyaçları için çözüm üreten bir yaklaşımdır. Bu disiplin sadece elde edilen somut ürünün ya da çözümün değil kullanılan sistemi ve aşamaların bütününü içermektedir. Biyo kelimesi Latin dilinde "yaşam" anlamına gelirken mimesis kelimesi de "taklit etmek" anlamına gelmektedir. Yani insanların doğayı taklit etmesi; Türkçe'de karşılığı da biyotaklit olarak bilinmektedir. Aslında Biyotaklit doğadaki canlıların yaşadıkları ortama uyum sağlamak ve hayatta kalmak için yaptıkları bazı davranışlardır. Ağaç kurbağasının yeşil renkli olması ve biraz yaprağa benzemesi, çalı çekirgelerinin, çalı ve bir ağaç sapına benzemeleri biyotaklite örnektir. Bu bilim dalı farklı sözcüklerle tanımlanmaktadır; örneğin biyomimetik-biyonik (biyoloji ve teknik) terimi ilk olarak 1960 yılında biyolojiden öğrenmek, kopyalamak ve taklit etmek sürecinin başlatıcısı olan doktor ve mühendis Jack Steele tarafından ileri sürülmüştür (BarCohen 2005). Biyomimikri, biyolojideki analog ve fikirleri mimarlık, teknoloji ve birçok farklı disipline aktaran yeni ama aslında bir o kadar da eski olan bir bilim dalıdır (Vincent ve ark. 2006). Bir başka deyişle, biyomimikri doğadaki modelleri

taklit eder ve onları insanın yüz yüze olduğu sorunları gidermek için ihtiyaç duyulan çözüme dönüştürür.

Biyomimikri terimsel anlamda ilk kez 1997 yılında Janine M. Benyus tarafından yayımlanan "Biomimicry: Innovation Inspired by Nature" adlı kitabında kullanılmıştır. Temeli ne kadar eskiye dayansa da hak ettiği yerde olamadığı için yeni bir alanmış gibi görülmesine neden olmaktadır. Tarihsel süreç boyunca da biyomimikrinin kullanım alanı yaygınlaşarak yenilikçi bir disiplin olmuştur. Zaman zaman bilim olarak görülse de aslında henüz disiplinsel bir yaklaşımdır. Biyomimikri kavramının altında, temel kavramlar olarak söylemek gerekirse tasarım, biyoloji, mühendislik ve pazarlama yatar. O yüzden bu tanımı sadece çözüm odaklı değil de süreç bazında da düşünmek gereklidir. Biyo-esinlenmeli tasarım ürünlerini örnekleyecek olursak yusufçuk böceğinin ne kadar helikoptere benzediğini ya da diğer bir ifadeyle helikopterin; yusufçuk böceğinden ilham alınarak bilim insanları tarafından hayata geçirildiği söylenebilir. Günümüzde geliştirilen robotlar; pek çok örümcek ve böcek türünün hareket mekanizmaları incelendikten sonra; bu böcek türlerinin hareket mekanizmalarının kabiliyetlerinden ilham alınarak günümüzdeki robotik eller, sanayi robotları tasarlanmışlardır. Aynı şekilde pek çok sinek-arı türü kanat profilleri incelenerek uçak kanadı, türbin kanadı yahut insansız hava araç tasarımları için nümerik- deneysel çalışmalar hızla devam etmektedir. Bu çalışmalar sonucunda sinek böcek kanadı profili biyoesinlenilerek; mikro hatta nano boyutunda; MAV (Mikro Air Vehicles) Mikro hava araçları, NAV (Nano Air Vehicles) nano hava araçları insanoğlunun kullanımına sunulmaya başlanmıştır.



Şekil 1.1. Doğadan esinlenerek yapılan icatlar; yusufçuk böceği ve helikopter https://bilisimveteknik.com/dogadan-esinlenerek-yapilan-icatlar/

Doğadan esinlenerek yapılan icatlar her geçen gün hayatımıza katılıyor. Birçok ev aletinden gemilere, deniz altından olimpiyat stadyumlarına kadar birçok doğadan esinlenerek yapılan tasarımlar mevcut. Araştırmalara göre en temiz yaprakların en pürüzlü yüzeylere sahip olduğu fark edilmiştir. Bu bitkilerin en temizi bataklık nilüferi, daha bilinen ismiyle lotus bitkisidir. Lotus yaprağı üzerinde bulunan minik noktasal kabarcıklar yaprağa konan tozu ayırarak hat halinde dizilmesini sağlar. Yaprağa konan bir damla su bu hatlar üzerinden akarak tüm kirleri temizler. Bitkinin bu özelliği araştırmacılara ilham kaynağı olmuş olmalı ki, aynı isimde üretilen Lotusan adlı, 5 yıl kendisini temiz tutacağı garantisi verilen dış cephe malzemesi üretilmiştir.

Bir başka doğadan esinlenerek yapılan tasarımlar örneği ise daha tropik alanlardan geliyor. Zehirli kurbağaların dokununca dağılıma geçen zehir mekanizması uçaklarda donma karşıtı sıvının kullanımına ilham veriyor. Böylece gerekli zamanda kullanılacak sıvı ile donma olayları daha aza inebiliyor.

Balıkçıl kuşların gaga yapısının suya dalarken onları hızlandırdığı tespit edilmiştir. Bunu fark eden Japon mühendis, Eiji Nakatsu bu sistemi trenlere uygulamıştır. Bu sistemle tasarlanmış hızlı trenlerin aerodinamiği dolayısıyla sürtünmeye karşı verimlilik oranı diğer trenlere göre çok yüksek olmuştur.

Velcro bandı, daha çok bilinen ismiyle cırtcırtlar da bitkilerden esinlenerek yapılan icatlar arasında yerini alıyor. Halk dilinde dulavrat otu olarak bilinen, her çayıra çıktığımızda illaki üzerimize yapışan bu otu çıkarması pekte kolay değildir. İsviçreli mühendis Georges de Mestralin keşfiyle ki, günümüzde giysilerden ayakkabılara, çantalardan astronot kostümlerine kadar her yerde rastladığımız cırtcırtları icat etmiştir.

Doğadan ilham alınarak yapılan icatlar arasında yer alan bir başka teknoloji de geleceğimizin enerji kaynağı güneş panelleri. Ayçiçeğinden esinlenen araştırmacılar güneş panellerini daha da geliştirebilmek amacıyla inovatif bir yola başvurmuşlar. Ayçiçeğinin yaprakları incelenerek geliştirilen partiküller güneş panellerinde kullanılıyor. Böylece sistem güneşli ve gölgeli bölgelerdeki sıcaklık farkından yola çıkarak yön tayini yapabiliyor.

Biyomimikri doğadaki şekilleri kopyalamak değildir; tam tersine doğadan fikirler, çözümler veya ilhamları mimari sorunların içine karıştırır. Ancak, biyolojik bilgiye ulaşmak için bir tasarımcı bir biyoloğa ihtiyaç duyar, çünkü biyoloji yaşamın var olduğu günden beri birçok mühendislik sorunlarını çözmüştür (Zia A, Laraki A. N., 2013)[5]. Bu nedenle, doğa her zaman insana tasarım kabiliyetini ve farklı sorunları –sürdürülebilir mekanlar, binalar, geri dönüşebilen çevreci malzemeler, vb- çözebilme konusunda yol gösterecektir. Biyomimikrinin tasarıma uygulanışının anlaşılmasını sağlayan üç seviye vardır; formu taklit etmek, doğal süreci taklit etmek ve ekosistemi taklit etmek (Benyus 2013). İlk iki seviye bir organizmanın ya da ekosistemin kopyalanması veya taklit edilmesi aşamalarıyken, sonuncu seviye ekosistemdeki kayda değer bir bakış açısı için arayışta bulunmaktır. Tasarımcılar, insanoğlu, mekan ve doğa ile form süreç ve ekosistem arasında mükemmel bir bağın olduğuna inanmalıdır. Biyo-ilhamlı tasarımlar, çevre üzerindeki olumsuz etkinin azalmasına yardımcı olabilir. Biyomimikrinin aşamalarını takip etmek çevre üzerinde yarattığımız negatif etkiyi azaltmaktadır (Benyus 2013).

Aristo, doğanın metotlarını ve amaçlarını tamamlama sürecini “imitasyon” kelimesini kullanarak tanımlamıştır. Aristo’ya göre sanat doğayı taklit eder ve doğadan fikirler edinir, mimarlık da bir sanat olduğu için doğayı taklit etmeli, doğadan ilham almalıdır (DeZurko 1951). Bu söylemlerden şu çıkarılmaktadır; insanoğlunun varlığından beri

doğa taklit edilmiştir. Ancak, teknolojinin eksikliği ve endüstriyel devrimin çok geç bir tarihte ortaya çıkmasıyla doğayı taklit etme eğilimi ya da diğer adıyla biyomimikri beklenen şekilde gelişememiştir. Biyomimikri ancak 1963 yılında bir bilim dalı olmaya başlamış ve bu güne dek gelişmiştir (Vincent ve ark. 2006).

Biyonik tasarım örnekleri biyo kavramını biyoteknik içeriğinde mükemmel tanımlayan örneklerdir. Bu mükemmellik canlı organizmanın işlevsel özelliğini öne çıkarmakta, buna paralel olarak doğrudan benzeme özelliğini de asla ihmal etmemektedir. Daimler Chrysler'deki araştırmacılar tropikal kutu balığının formunu temel alan, hali hazırdaki Mercedes Benz Biyonik Konsept Aracını ele almışlardır. Otomobilin önüne düşebilecek su damlacığı incelenmiş ve bu kutu balığının direnç katsayısı 0,06 iken, su damlacığının aerodinamik olarak ideal olan direnç katsayısı 0,04'e çok yakındı. Damlacık gibi balığın yüzünün tüm uzunluğa oranı çok küçüktür. Balığın bu yapısı, direnci artıran türbülansı oluşturmadan havanın hareketini teşvik eden akışkan yüzey ile birlikte iskelet benzeri bir görüntüye sahiptir. Bütün bu özellikler otomobilin ön cephe tasarımına yansıtılmıştır (Boxfish - Bionic Car, 2015).



Şekil 1.2. Kutu balığından otomobil iskelet yapısı aerodinamik testler için çamur model Daimler Chrysler Prototip Biyonik Araç (http://knowgeee.blogspot.com/2016/07/)

Robotlar her zaman bilgisayarların sınırlarını zorlamaktadırlar, ama bilgisayar teknolojisi evrilmesinin devam etmesi sayesinde daha geniş çaptaki hareketler için daha karışık hesaplamalar mümkün olabilmektedir. Esnek kabiliyeti sayesinde esnek hareketler daha

ileri seviyede tasarımlara yol vermektedir. Yeni bir "biyomekatronik dağıtım" sistemi de filin hortumunun yapısına dayanarak tasarlanmıştır (Brilliant-bio-design, 2015).

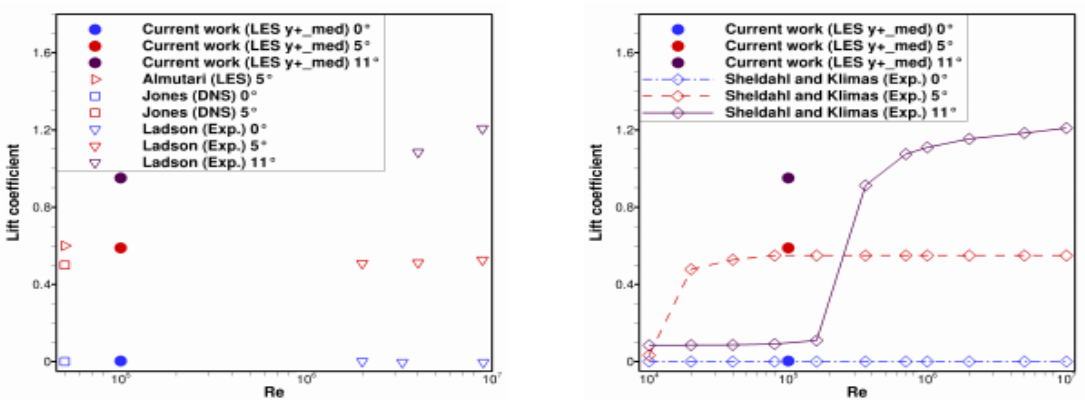
Son olarak ıstakozlar da son dönemde araştırılan ve tasarımda biyonik yaklaşıma örnek alınabilecek canlılar arasında yerini almıştır. Dikenli ıstakozlar basit sinir sistemlerine sahip olmasına rağmen üst düzey bir yer bulma yeteneği sergilemekteler. Florida Üniversitesi'nde yapılan bir araştırma, bu canlıların "patlayan nöronlar" adı verilen sinir hücreleri sayesinde koku kaynağını bulmada çok başarılı olduklarını göstermektedir. Bu araştırmaların sonuçlarının mayın gibi diğer patlayıcıların yerini bulmada yardımcı olması öngörülmektedir. Böylece gelişmiş elektronik cihazların tasarlanmasına yardımcı olabilecektir (Pirge, 2015). Yüzyıllardır doğanın düzeni kusursuz bir şekilde işlemektedir. Bu kusursuzluk ortaya çıkan her türlü problemin kendi içinde çözülmesini sağlamaktan geçmektedir. Bu fikrin ilk örneği Leonardo da Vinci'nin buluşlarında görülmüştür. Kuşların kanatlarını ve çırpınışlarını gözlemleyen Vinci, ilk uçan makineyi icat etmiştir. Onu daha sonra Wright kardeşlerin güvercin kanadından esinlenerek ilk motorlu uçağı uçurmaları izlemiştir. "İnsan zekâsı… Doğanın keşiflerinden daha güzel, daha basit ya da daha direkt bir keşfe asla imza atamayacak. Çünkü doğanın keşiflerinde ne bir şey eksiktir ne de bir şey fazladır." Leonardo Da Vinci.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1.Standart Kanatlar Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Standart kanat profilleri NACA profilleri olarak isimlendirilmiştir. Bunlar genellikle savaş uçaklarında, yolcu ve yük taşıma uçaklarında kullanılan kanat profilleridir. Kodlanmasında da tasarım kaldırma - sürüklenme katsayıları ve kanadın kamburluk ve kalınlık oranlarının hesaplanmasıyla kodlamalar oluşturulmuştur.

NACA 0012 kanatlarının aerodinamik özelliklerini analiz etmeyi amaçlayan sayısal bir simülasyon, Streher tarafından yapılmıştır, çalışma daha iyi aerodinamik performansa sahip bir kanat tasarlamaya odaklanmıştır. NACA 0012 kanadında, ICEM CFD analizi ile Büyük Eddy Simülasyon Modeli (LES) ve farklı atak açıları için türbülanslı akış yapısı ayrıntılı bir şekilde test edilmiştir.



Şekil 2.1. Kaldırma kuvvet katsayısının LES modeli ile farklı y^+ değerleri için Reynolds değişimine göre kıyaslanması (Streher 2017)

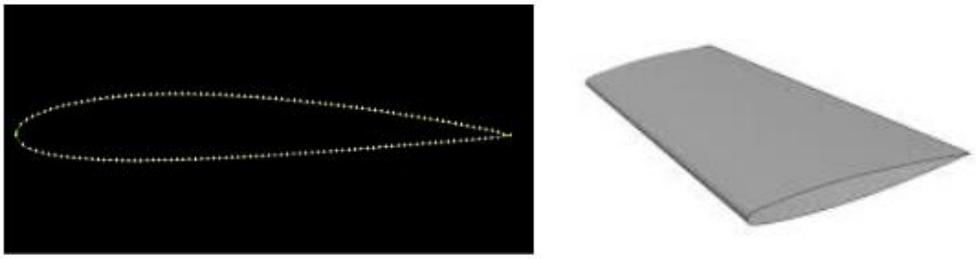
Eftekhari ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada NACA 0012 için yaptıkları çalışmada farklı Reynolds değerleri için Re =100,000-200,000-300,000 için 0º den 50º ye kadar kanat üzerine gelen kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerini deneysel olarak Taylor Üniversitesi subsonik rüzgar tünelinde denemişlerdir. Ayrıca ANSYS CFD programında sst-k-w türbülans modeli kullanılarak analizlerini de yapmışlardır. CFD ve deneysel buldukları

sonuçlarını kıyaslama açısından 2015' de Chiniwicharnam ve ark. (2015) de yaptıkları çalışma ile ayrıca kıyaslamışlardır.

Chiniwicharnam ve ark. (2015) de yaptıkları çalışma da sabit kanatlı bir mikro pervanenin aerodinamik özellikleri üzerinde; pervanenin akıma etkisini araştırmışlardır. MAV (Mikro hava aracı) için pervanenin 0º ile 80º arasında değişen atak açılarında basınç değişimleri, vorteks oluşumları ve deneysel sonuçları verilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada deneysel çalışmalar nümerik olarak RNG k-e, SST k-w ve Spalart Allmaras türbülans modelleri ile karşılaştırılmıştır.

Joseph ve ark. (2021) de yaptıkları çalışmada NACA 0012 için üzerine kare delikli yüzeyler kanadın üst kısmına koyarak bunların ısı transferi ve aerodinamik olarak özelliklerine olan etkisini incelemişlerdir. Ayrıca 2018 de yaptıkları çalışmayı da geliştirmişlerdir. Reynolds değeri $Re=4.0x10^6$-$4.25x10^6$ ve $4.5x10^6$ aralığında kullanmışlardır. Ayrıca kanadın üst ve alt yüzey sıcaklıklarını farklı sıcaklıklarda tutarak alt ve üst yüzeydeki aerodinamik özellikleri C_L- C_D ve C_T değerlerini bulmuşlardır.

Islam ve ark. (2015) NACA 0015 kanat profilinin rüzgar tünelinde aerodinamik performansını farklı atak açılarında deneysel olarak test etmişlerdir. Atak açıları 0 ile 20 derece arasında değişen değerlerde; rüzgar tünelinde serbest akım hızı 12 m/s ve $Re=1,89x\ 10^5$ değerinde sabit tutulmuştur. Alt ve üst yüzeyindeki kanadın etrafında basınç değişim ölçümü dijital basınçlı manometre ile ölçülmüştür.

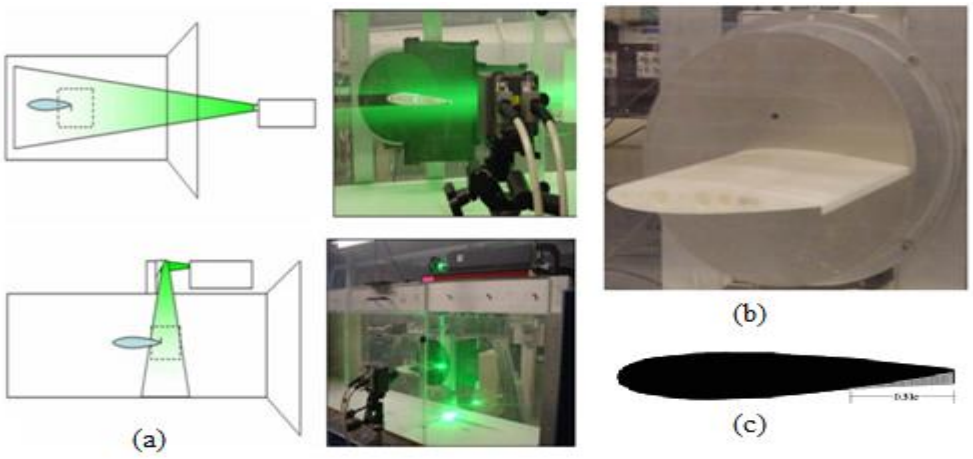


Şekil 2.2. NACA 0015 nokta 2D ve 3D boyutlu görünümleri (Islam ve ark. 2015).

Ölçümler sonucunda $C_L$ve C_D değerleri yaklaşık sırasıyla 1.3 ve 0.31 değerleri civarında bulunmuştur. Optimum atak açısı NACA0015 için 12 derece olarak deneysel olarak tespit

edilmiştir. NACA 0015 için atak açısı 12 derecede (AOA Angles of Attack) C_L=1 , C_D=0.105 ve C_L/C_D=9.52 elde edilmiştir. Ayrıca bu tarz bu çalışmada kullanıldığı gibi subsonic ses altı rüzgar tüneli testlerinde Naca0015 için sınır tabaka ayrılmasının atak açısının 15-20 derece arasında oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Maksimum kaldırma katsayısının 1.3 değerini atak açısının 10 derece olduğu durumda ve sürüklenme katsayısının ise maksimum 0.31 değerinin atak açısının 25 derecede bulmuşlardır. Bu çalışma sonucunda bazı modifikasyonlar ile aktif akış ayrılımı (Active flow separation techniques) teknikleri gibi metotlar ile NACA 0015 de olduğu gibi simetrik eksenli diğer kanatların da aerodinamik karakteristiklerin daha da iyileştirilebileceğini önermişlerdir.

NACA 0015 için bir diğer çalışma da; zaman ayarlı partikül görüntüleme hız ölçüm metoduyla akım karakteristikleri Gurney kesimli ve flapsız şekilde NACA 0015 kanadında denemişlerdir. Gurney flap; kısa uzunlukta (1% den 4% e kadar kanat kort uzunluğunun arkasına) kanadın arka kısmına paralel ekleme yapılmasıdır. Bu Gurney kesim NACA 0015 için C_L değerinde alfaya yani açıya bağlı olarak lineer oranda artış sağlanmaktadır. İki tane keskin akış yolunda akımı etkileyen vorteks oluşumu söz konusudur bu tarz flaplı bir kanatta; birincisi Karman vorteks akımı diye de bahsedilen vorteks oluşumudur ve bu vorteks oluşumu asimetrik katı cismin kanadın arkasında oluşmaktadır. Diğer baskın olmayan vorteks ise yani ikincil vorteks ise flaplı kanadın orta ekseninde akışkan resirkülasyon bölgesinde oluşarak atak açısının artmasıyla birlikte artmıştır. Gurney flaplı Naca0015 kanadında; 4% flap uzunluğu için alfa 8 derecede birincil ve ikincil modlarda; oluşan vorteksler Strouhal sayısına göre flap yüksekliği 0.18 ve 0.13 alınarak ölçülmüştür. Açık ve dolu flap konfigürasyonları kıyaslandığında; her iki konstrüksiyonda da ikincil vorteks oluşumunun kaldırmanın arttırılmasında önemli bir etkisinin olduğu araştırmacılar tarafından gözlemlenmiştir.



Şekil 2.3. (a) Flaplı kanatın alt üst konfigürasyon şeklinde rüzgar tünelinde görüntüsü (b) Rüzgar tüneline monte edilmiş kanat (c) 0.3 kort uzunluğunda Gurney flap kanat tasarımı (Toolin ve ark. 2006).

Rubel ve ark. 2017 yılında yaptığı çalışmada savaş uçaklarının kanat tasarımında uçuş simülasyonunda hava akımında uçak gövdesine, kanat eksenlerine ve uç eksenlere gelen kuvvetleri incelemişlerdir. Yaptıkları deneysel ve simülasyon çalışmaları sonucunda NACA 0015 kanadı için $C_L$ve C_D değerlerini atak açısına göre kıyaslamışlardır. NACA 0015 kanadı açık tip rüzgar tünelinde deneysel olarak denenmiş daha sonrasında CFD analizleri yapılarak kaldırma ve sürüklenme karakteristikleri detaylı olarak gösterilmiştir.

NACA 0015 kanadının; denizaşırı hava taşımacılığındaki uçak kanatlarında, dönen ve bazı sabit uçak kanatlarında uygulama alanı vardır. Herhangi bir kanadın başlıca temel problemlerinden biri uçağın havada kalması için gerekli kaldırmayı elde edebilmeyi başarmasıdır. Fakat; özellikle çok yüksek hızlarda kaldırma kuvveti uçağın düşmesine sebep olabilmektedir. Yeni teknolojiler sayesinde farklı simülasyon metodları; pahalı model testlerinin yerini almaya başlamıştır. Yine de simülasyon bazı temel varsayımlara dayanmaktadır. Bu nedenle bu yapılan çalışmada hem deneysel hem de nümerik olarak 0 dereceden 18 dereceye kadar her iki derecelik değişim için farklı hava hızları için kuvvetler düşük hızlı rüzgar tünelinde denenmiş ve nümerik analizler de CFD ve Fluent de ANSYS programında simüle edilmiştir. CFD hesaplamalar hem hızlı ve hem ekonomik olup kanat etrafındaki akış dağılımını da detaylı olarak göstermektedir.

Şahin ve ark. 2015'te yaptığı çalışmada hem nümerik hem de deneysel olarak NACA 0015 kanat profilini denemişlerdir. Rüzgar tüneli hızı 10m/s olarak alınıp Re=68490 olarak belirlenmiştir. Kanat uzunluğu ve kort uzunluğu 100 mm olarak deneysel çalışmalarda seçilmiştir. Kuvvet ölçümleri kanada gelen kuvvetler transdüker (dönüştürücü) sinyalleri yardımıyla ölçülmüştür. C_L ve C_D değerleri deneysel ve türbülans modellerinden CFD de kullanılan Spalart-Allmaras, k-epsilon modelleri ile denenmiştir. Spalart Allmaras türbülans modelinin deneysel sonuçlar ile daha uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir. Kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin genel olarak atak açısının artmasıyla birlikte arttığını vurgulamışlardır. Durma noktasının (stall angle) 16º olarak tespit etmişlerdir. Ayrıca optimum kaldırma kuvvet katsayısının da bu noktada olduğunu söylemişlerdir. Bu değerden sonra ise kaldırma kuvvetinin düşmeye; sürüklenme kuvvetinin ise artmaya başladığını görmüşlerdir.

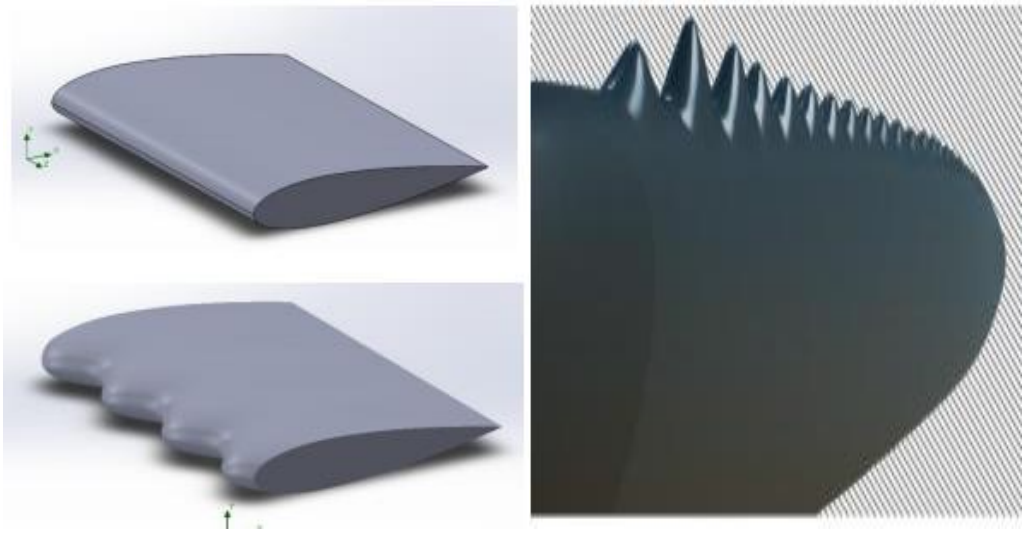
Malti ve ark. 2016' da yaptıkları çalışma da havacılıkta önemli bir problem olan NACA 0015 için zemin etkisini nümerik olarak incelemişlerdir. Kanat zemine yaklaştığında 2 fenomen ortaya çıkmaktadır; kaldırma kuvveti artışı ve sürüklenme kuvvetinin azalışıdır. Kaldırma ve sürüklemeyi belirlemek için farklı negatif atak açıları ve farklı zemin yüksekliği için çeşitli denemeler yapılmıştır. Nümerik simülasyonlar CFD kod ve Spalart-Allmaras türbülans modeli tercih edilmiştir. Yapılan nümerik çalışma deneysel çalışma ile kıyaslandığında kabul edilebilir derecede iyi bir korelasyon sağladığını söylemişlerdir.

Hafiz ve ark. (2011) yaptıkları çalışmada NACA 0044 ve NACA 0063 için aerodinamik özelliklerini dikkate alarak yeni bir türbin kanadı tasarımı yapmışlardır. Bu türbin kanadına (0044-63) demişler ve tasarladıkları bu kanat profili ile deneysel ve CFD sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Bu tasarım için rüzgar tüneli hızı 25 m/s için maksimum aerodinamik özelliklerin 15º atak açısında elde edildiği görülmüştür. Ayrıca rüzgar tünel hızı 40 m/s için karşılaştırıldığında; 25 m/s ye göre daha yüksek kaldırma kuvvet katsayısı elde edildiği bulunmuştur.

2.2. Farklı Biyoesinlemeli Kanat Tasarımı İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Akçaağaç tohumları literatürde samaras tohumu olarak da geçen kanat profili; biyo-esinlenmeli kanat profili ilgi çeken aerodinamik araştırma konularının arasından birisi olmuştur. Akçaağaç tohumunun kanat profilinin incelenmesi CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) uygulaması olmasının ötesinde; akçaağaç tohumlarının otorotasyon özelliklerinden dolayı (kendi kendine dönerek inmesi) biyomimikri alanında yeni perspektifler sağlar. Yenilenebilir enerji teknolojilerinden rüzgar enerjisinde; yeni bir rüzgar türbini kanadı tasarımı incelenerek rüzgar türbini tasarımı yapılabilir. Robotik insansız mikro hava aracı (MAV) tasarımında kullanılabilir.

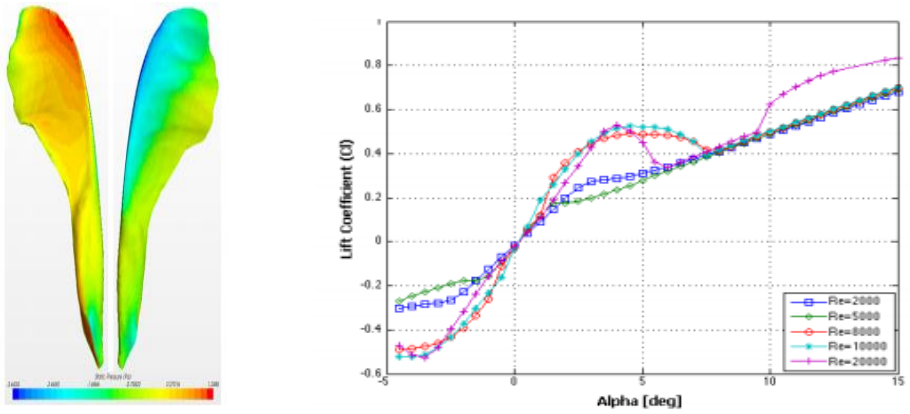
Başak ve Demirhan (2017) kambur balinaların yüzgeçlerinden esinlenerek oluşturulan tüberküllü kanat profilini; düz kanat profili ile kıyaslamaya çalışmışlardır. Sonuç olarak normal düz kanat profiline göre tüberküllü kanat profilinde 100 m/s hızda verimin yaklaşık olarak % 42.09’ a kadar arttırdığını bulmuşlardır.



Şekil 2.4. Normal kanat profili ile tüberküllü kanat profili (Başak ve ark. 2017).

Holden ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada akçaağaç tohumundan rüzgar türbini kanadı tasarımı projesini yapmışlardır. Çalışma sonucunda biyomimetik olarak rüzgar türbini kanadında akçağaaç tohumu profili denendiğinde Cp güç katsayısının maksimum 0.59 değerine kadar çıktığını CFD sonuçlarında hesap etmişlerdir. Ayrıca farklı Reynolds

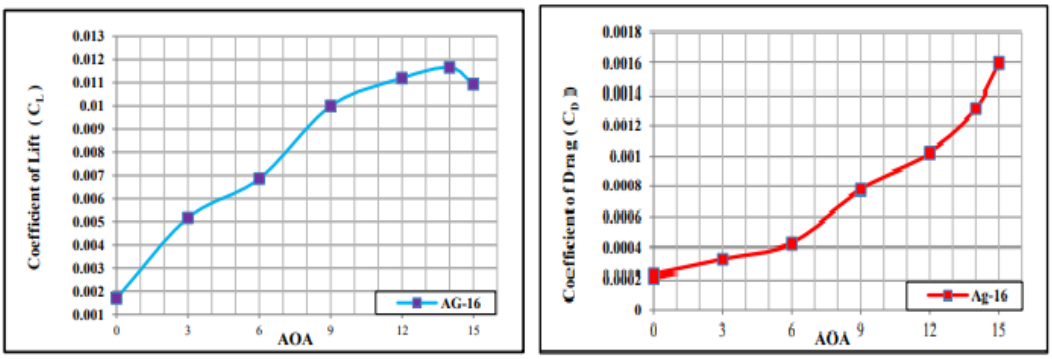
değerleri için Re=2000-20000 arasında değişen değerler için kanat profili tasarımında önemli olan C_L kaldırma katsayısı değerlerini de kıyaslamışlardır. C_L değerini maksimum Re=10000 için 0.8 değerine kadar ulaşmışlardır.



Şekil 2.5. Akçaağaç tohumu CFD analiz statik basınç dağılım grafiği ve farklı Reynolds değerleri için C_L dağılımı (Holden ve ark. 2015).

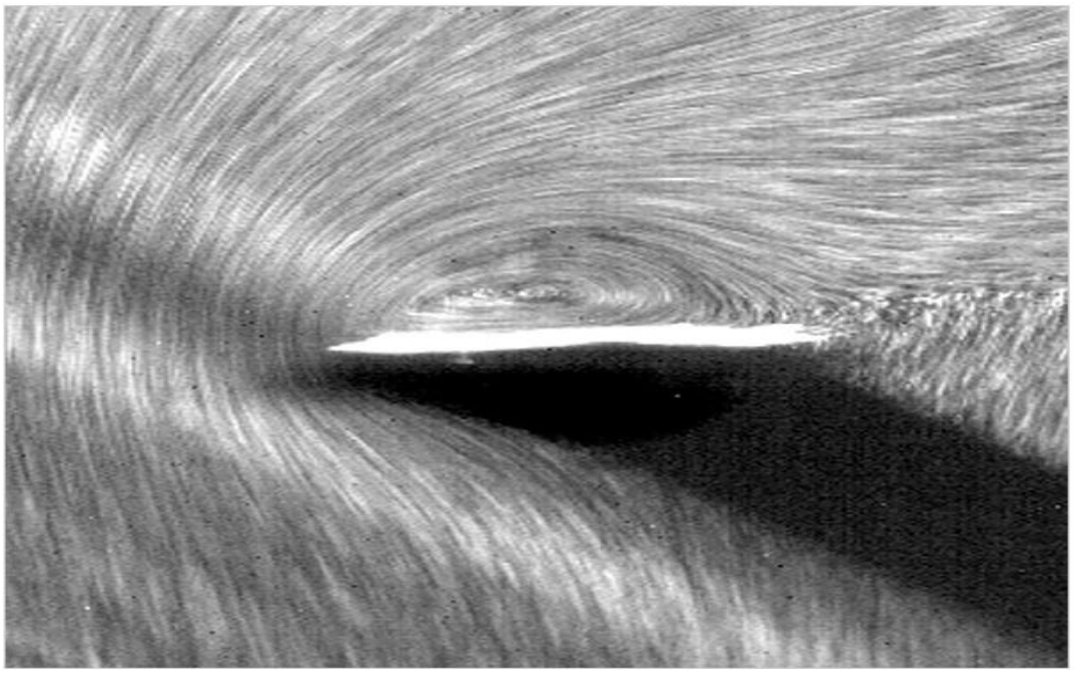
Jeh 2018 yaptığı çalışmada Malezya'da yetişen ağaç türü olan Dryobalanops aromatik ağacının tohumlarından diğer adıyla Kapur ağacı olarak bilinen ağaç türünün yapraklarından biyomimetik olarak rüzgar türbini kanadı tasarlamıştır. CFD akış analizleri için kodlama programı olan OPENFOAM kullamıştır. C_P güç katsayısı, C_T hücum katsayısı değerlerini hesaplamıştır. C_P=0.338-0.386-0.464 ve C_T=1.052-0.974-0.988 olarak sırasıyla farklı kanat ucu hızı oranlarında (TSR=Tip Speed Ratio) bulmuştur.

AG-16 kanat profili üzerindeki akış davranışı, Mutaib ve ark. tarafından sayısal olarak incelenip analiz edilmiştir, AG-16 kanat profili için farklı saldırı açılarında 0 dereceden 15 dereceye kadar değişen aerodinamik performans gerçekleştirilip, sayısal çözüm ANSYS-FLUENT programı kullanılarak elde edilmiştir. AG-16 tipi yüksek kaldırma kuvvetli; kanat profili için maksimum kaldırma katsayısının 0.0016'da kaydedildiğini ve atak açısının durma sınırına (stall point) ulaştığında sürükleme katsayısının büyüklüğünün 0.012'e eşit olduğunu bulmuşlardır.



Şekil 2.6. Optimum kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin oluştuğu atak açılarının gösterimi (Mutaib ve ark. 2019).

Otorotasyon, akçaağaç tohumlarının asimetrik yapısı nedeniyle gerçekleşir. Tohumun kütle merkezi, kaldırma merkezi yaklaşık olarak ortada iken bir uca iyice kaydırılır. Karmaşık bir süreçte, tohum düşerken etrafındaki kuvvetler, tohumun kütle merkezi etrafında dairesel bir dönüşe başlamak için birleşir. Rotasyon aslında,düşme ekseni etrafına doğru bir koni yazar. Koninin şekli, tohum bıçağının (kanat) aerodinamik özelliklerine bağlı olarak değişecektir(NASA Maple Seed Helicopters (https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/TRC/Aeronautics/Maple_Seed.html).

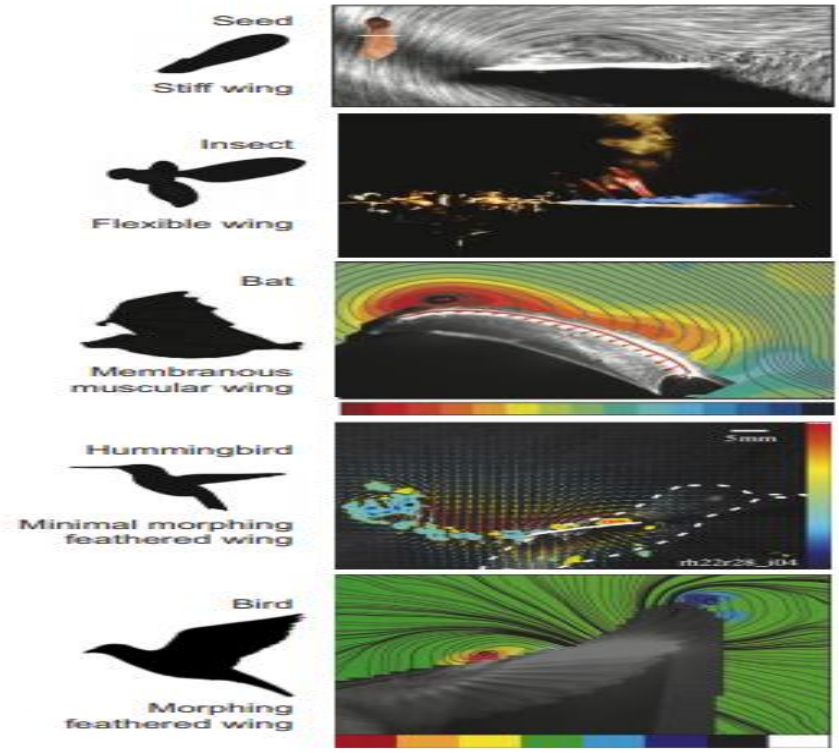


Şekil 2.7. Akçaağaç tohumunun etrafında oluşan girdapların smoke wire görüntüleri (https://www.nytimes.com/2009/06/16/science/16obseed.html).

Serbestçe uçan bir akçaağaç tohumu etrafında lazer ışığı ile aydınlatılan duman parçacıkları, belirgin bir ön kenar girdapını ortaya çıkarır. Bir meşe palamudu ağaçtan uzak düşmeyebilir, ancak aynı şey, kendine özgü kanat şekli ile bir akçaağaç tohumu için söylenemez. Düştükçe, kanadın daha ağır ucu havada dönmesine neden olur, inişini yavaşlatır ve rüzgarın akçaağaç tohumunu bazen bir mil kadar veya daha fazla taşımasına izin verir.

Akçaağaç tohumunun düşme mekanizmasına otomatik dönme (autorotation) denir, yapılan çalışmalarda da ekstra kaldırma kuvveti verdiğini göstermiştir bu otodönmeden dolayı. Lentik ve ark. (2016) kanatların, kanat boyunca dönen yatay bir hava tüneli olan bir öncü girdap oluşturduğunu bildirmişlerdir. Bu girdapın kararlı olduğunu, çünkü kanat üzerindeki hava basıncını düşüren ve kanadın emilmesine neden olan düşük basınçlı bir çekirdeğe sahip olduğunu söylemişlerdir. "Bu gerçekten kaldırmayı arttırıyor" demiştir. https://www.nytimes.com/2009/06/16/science/16obseed.html

Ayrıca Chin ve Lentink (2016) yaptığı bir review derleme çalışmada ön kenar da oluşan girdap bölgelerinin yüksek kaldırma oluşturduğunu değişik türde uçan kuş, böcek hayvan ve bitki türü için göstermiştir.



Şekil 2.8. Akçaağaç tohumu ve diğer kuş-böcek türlerinde oluşan vorteksler; Leading Edge Vortex (LEV) (Chin ve ark. 2016).

Dung ve ark (2014) yaptıkları çalışmada süperkritik bir kanat için kanat açıklık uzunluğu (span length) b=0,4m, veter uzunluğu (chord length) c=0.015m ve açıklık oranı (b/c=27) geometrik boyutlarındaki kanat için deneysel ve nümerik analiz yapmışlardır. Çalışma sonucunda farklı hızlar için basınç dağılımlarına, aerodinamik özelliklerine Cl ve Cd değerlerini elde etmişlerdir. Aerodinamik karakteristikleri incelendiğinde Cl değerinin 0-15 m/s aralığında yaklaşık 1,2; Cd ise 1 değerinde hesaplamışlardır.

Win ve ark. 2019 da yaptıkları bir çalışmada samara akçaağaç tohumunu birebir simüle edip otorotasyon özelliklerinden faydalanılarak yeni bir otorotation yapan hava aracını The Samara Autorotating Wings (SAW) dikey rüzgar tünelinde denemişlerdir. Deney sonuçlarından birebir ne kadar sürede hangi hızlara ulaştıklarını göstermişlerdir.

Zakaria ve ark. 2019 da yaptıkları bir çalışmada akçaağaç tohumunun serbest düşme hızını deneysel olarak tasarlayıp incelemişlerdir. Teknik olarak The unsteady vortex lattice method (UVLM) Methodu denenmiştir. Serbest düşme hızlarının hesaplamaları için çok farklı akçaağaç tohumunun geometrik özellikleri ve açısal hızları belirlenmiştir.

Yogeshwaran ve ark. 2021 de samara akçaağaç tohumunun aerodinamik özelliklerini düşme testlerini 3D baskı yöntemi ile modelleyip, hız profillerini LEV (Large Eddy Vortex) yöntemi ile denenerek elde edilmiştir.

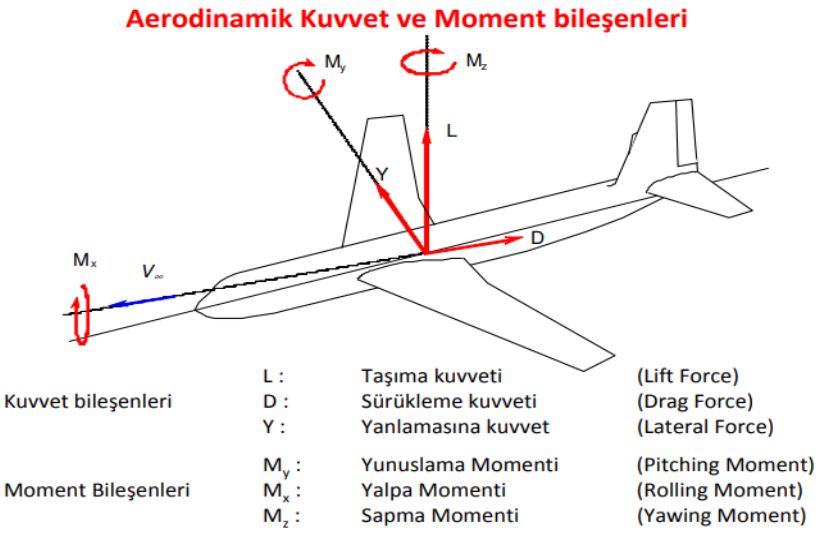
Bu çalışmanın amacı, yeni bir kanat modeli tasarlayıp, literatüre yeni bir bakış açısı katarak önceden denenmiş NACA ve kanat profillerinden farklı olarak yeni bir biyo-esinlenmeli kanat modelinin aerodinamik özelliklerini incelemektir. Ayrıca bu yeni kanadı, doğadan esinlenilerek tasarlanıp üretilerek daha sonraki çalışmalarda türbin kanadı yahut uçak, helikopter, insansız hava araçlarında kullanılarak Türk Milli Savunma Sanayisi'ne ve Enerji sektörüne faydalı olabilmek amaçlanmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1.1. Aerodinamik Karakteristikler, Tanımlar

Aerodinamik, hava içerisinde hareket eden cisimlerin etrafındaki olayları veya sabit bir cisim etrafındaki hava hareketi nedeniyle meydana gelen olayları ya da bu ikisinin birleşimi şeklinde, hareket eden bir cismin etrafında yine hava hareketi ile meydana gelen olayları inceleyen bilim dalıdır.

Aerodinamik kuvvet bir cismin yüzeyi üzerinde her noktada hava tarafından etkitilen dikey ve teğetsel kuvvetlerden oluşur. Ancak uygulamada çoğu zaman bu kuvvetler integre edilerek bir bileşke kuvvet olarak değerlendirilir. Bu kuvvetin bir noktaya göre momenti de aerodinamik moment olarak adlandırılır.



Şekil 3.1. Aerodinamik kuvvetler

Havanın	yoğunluğu	ρ_∞
	viskozitesi	μ_∞
	sıkıştırılabilmesi	a_∞
Cismin	karakteristik uzunluğu	D
	havaya nazaran hızı	V_∞
	Geometrik şekli	G
	Yüzey pürüzlülüğü	G
	Hareket doğrultusu (α)	G

$$R = g(G, \rho_\infty, V_\infty, D, \mu_\infty, a_\infty)$$

Şekil 3.2. Aerodinamik kuvveti etkileyen büyüklükler

Uygulamada çoğu zaman yüzey boyunca yayılı kuvvetlerin nasıl dağıldığı ile ayrıntılı olarak ilgilenilmez, kuvvet dağılımları yüzey boyunca integre edilerek bulunan bileşke kuvvetle ve bunun yarattığı bileşke moment ile ilgilenilir.

Uçak veya benzeri bir cisim ile hava arasında hız farkı bulunduğunda havanın cisme bir aerodinamik kuvvet etki ettiğinden ve ayrıca bu kuvvetin, seçilen bir referans noktaya göre bir moment oluşturduğundan söz edilir. Aslında hava akımı cisme bir tek noktada kuvvet etki etmez. Cisim ile havanın temas yüzeyinin her noktasında etkiyen kuvvetin bir dağılımı, ve her noktadaki kuvvetin de belirtilen bir referans noktaya göre yarattığı bir moment söz konusudur.

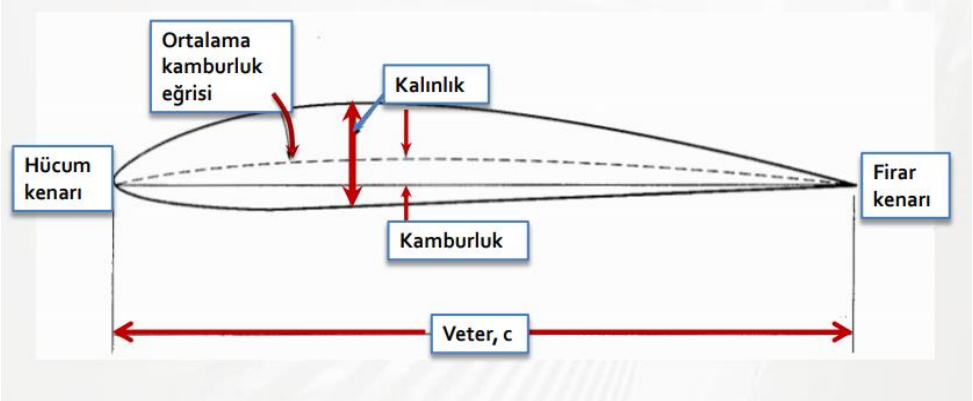
1. **Taşıma (Lift) kuvveti:** V_∞ doğrultusuna dik etkiyen toplam aerodinamik kuvvet. Uçağın havada tutunabilmesini sağlayan kuvvettir. Aerodinamik bileşke kuvvetin, kanat yüzeyine dikey olan bileşkesidir.
2. **Sürükleme (Drag):** V_∞ doğrultusuna ters yönde etkiyen toplam aerodinamik kuvvet. Aerodinamik bileşke kuvvetin, yatay olan bileşkesidir. Uçak üzerindeki durgun noktaların ve hava akıĢı sürtünmelerinin neticesinde uçağın gidiş yönüne ters yönde oluşan kuvvettir.

3. **Aerodinamik bileşke:** Kaldırma kuvveti (Lift) ile sürükleme kuvvetinin (Drag) bileşkesidir. Hücum açısı ile birlikte büyüklüğü değişir. Belli bir hücum açısına kadar, hücum açısı artırıldığında lift ve drag arttığından bileşke kuvvet de artar.
4. **Hücum açısı:** Hücum açısı artırıldığında, havanın kanat üzerinde alacağı yol ve hızı artar. Böylece kanat üstündeki havanın dinamik basıncı, kanat altındaki havanın dinamik basıncından fazla olur. Bu dinamik basınç farkı lift kuvvetini artırırken, durgun nokta alanının ve hava sürtünmesinin artması geri sürüklemeyi arttıracaktır.
5. **Stall:** Hücum açısının artırılması belli bir noktadan sonra kanat üst yüzeyden geçen hava akımının türbülanslı akması ve sınır tabakasının airfoil yüzeyden ayrılması ile lift kuvvetinin azalması ve sürüklenme kuvvetinin artmasına neden olur. Bu durumun, uçağın havada tutunması ve düzgün bir seyrine engel olacak seviyeye gelmesine "stall" denir.

Aerodinamik kuvvetler ile ilgili bir eşitlik çözülürken, kuvvetlerin meydana gelmesine sebep olan faktörlerin tespit edilmesine ihtiyaç vardır. Kuvvetlerin oluşmasına ve etkilenmesine sebep olan pek çok faktör bulunmasına rağmen en önemlileri şunlardır:

- Hava akış hızı (V)
- Hava akışkanının yoğunluğu (ρ)
- Profilin kapladığı alan - Kanat alanı (S)
- Profil yüzeyin şekli
- Hücum açısı (α)
- Viskozite etkileri (μ)
- Sıkıştırılabilme özellikleri

Kanat profili için taşıma ve sürükleme katsayıları deneysel olarak elde edilir ya da profil seçimi sırasında yaklaşık tahmin yapan yazılımlar kullanılabilir.



Şekil 3.3. Kanat profil geometrik özellikleri

- **Veter uzunluğu:** Hücum kenarı ile firar kenarını birleştiren doğru. Chord (kort: veter uzunluğu); kanadın, gövde simetri düzlemine paralel olarak alınmış herhangi bir kesitinin hücum kenarını firar kenarına birleştiren doğrunun uzunluğudur.

- **Ortalama kamburluk eğrisi:** Profil üst ve alt yüzeyleri arasındaki uzaklıkların orta noktalarını birleştiren eğri.

- **Kamburluk:** Profil veteri ile kamburluk eğrisi arasındaki maksimum mesafe (vetere dik ölçülür.) . Camber (Kamburluk) Airfoil yapının kamburluk ölçüsüdür. Büyük yük taşıyan ve düşük hızlarda seyreden uçaklarda chord (kort: veter uzunluğu) uzunluğuna göre camber oranının fazla olması istenir.

- **Kalınlık:** Profil üst ve alt noktaları arasında vetere dik olarak ölçülen mesafe.

3.1.2. Aerodinamik Kuvvet ve Moment İçin Boyut Analizi

Bir cisme etkiyen aerodinamik kuvvetin akışkan ve cismin özellikleri ile cismin akışkana nazaran hareketinin büyüklüğüne bağlı olduğu söylenebilir.

Bu özellikler ve boyutları

- akışkanın basıncı p [$ML^{-1}T^{-2}$]

- akışkanın sıcaklığı T [θ]

- akışkanın yoğunluğu ρ [ML^{-3}]

- akışkanın mutlak viskozitesi μ [$ML^{-1}T^{-1}$]

- akışkanın bulk elastisite modulü K [$ML^{-1}T^{-2}$]

- akışkanın ısıl özellikleri γ , R [$M^2 T^{-2}\theta$]

- cismin karakteristik uzunluğu D [L]

- cismin akışkana nazaran hareket hızı V [LT^{-1}]

- cismin geometrik şekli

- cismin akışkana nazaran hareket doğrultusu α

şeklinde sıralanabilir. Akışkanın fiziksel özelliklerinden basınç, sıcaklık ve ısıl özelliklerini, gerek akım alanını temsil eden denklemler (süreklilik, momentum, enerji) ve gerekse hal denklemi yardımıyla yoğunluğa ve hareket hızına bağlamak mümkündür. Buna göre aerodinamik kuvvetin

$$F = f(G, V, D, \rho, \mu, K) \qquad (3.1)$$

şeklinde sadece akışkanın yoğunluğu, viskozitesi ve elastisite modülü ile cismin karakteristik uzunluğu, geometrik şekli, akıma nazaran doğrultusu ve hızının bir fonksiyonu olduğunu belirtmek mümkündür. Burada G parametresi boyutsuz bir

büyüklük olup cismin geometrik şeklini ve cismin akışkana nazaran hareket doğrultusunu birlikte temsil etmektedir.

Bu kapalı fonksiyonu, her bir parametreye hangi mertebede bağlı olduğunu ifade etmek üzere açık bir fonksiyonla,

$$F = G \cdot V^a D^b \rho^c \mu^d K^e \tag{3.2}$$

şeklinde yazmak mümkündür.

Bu ifadede üssü aynı türden olan büyüklükler bir araya getirilecek şekilde gerekli düzenlemeler yapılırsa;

$$F = G \cdot V^2 D^2 \rho^{1-d-e} \left(\frac{\mu}{\rho V D}\right)^d \left(\frac{K}{\rho V^2}\right)^e \tag{3.3}$$

elde edilir. Buradaki K bulk elastisite modülüne ses hızına

$$a = \sqrt{K/\rho} \quad \rightarrow K = \rho a^2 \tag{3.4}$$

şeklinde bağlamak mümkündür. Buna göre (3.7) bağıntısında yer alan parantezler içindeki ifadeler;

$$\frac{K}{\rho V^2} = \frac{\rho a^2}{\rho V^2} = \frac{1}{(V/a)^2} = \frac{1}{M^2}$$

$$\frac{\mu}{\rho V D} = \frac{1}{Re} \tag{3.5}$$

şeklinde düzenlenebilir. Böylece sonuç olarak aerodinamik kuvvet için;

$$F = G \cdot \rho V^2 D^{2\ 1-d-e} \frac{1}{Re^d} \frac{1}{M^{2e}} \tag{3.6}$$

bağıntısı elde edilir. Buradaki Ma ve Re boyutsuz büyüklükler olup, sırasıyla Mach sayısı ve Reynolds sayısı olarak adlandırılır. G sabiti ise cismin akışkana nazaran hareket doğrultusunuın etkisini de içerdiği gibi, geometrik şeklinin ve pürüzlülüğünün etkisini de içeren boyutsuz bir sabittir. (3.10) bağıntısı çoğu zaman boyutlu ve boyutsuz büyüklükler bir araya getirilerek;

$$F = {}^{1}/_{2}\,\rho V^2 D^2 . f(G, Re, Ma) \tag{3.7}$$

şeklinde yazılır. Bu bağıntı literatürde Rayleigh denklemi olarak bilinir. Rayleigh denklemi bir cisme etkiyen aerodinamik kuvvetin

- Serbest akım dinamik basıncına (${}^{1}/_{2}\,\rho V^2$)
- Cismin karakteristik yüzey alanına (D^2)
- Reynolds sayısına (Re)
- Mach sayısına (Ma) ve
- Akım geometrisine (cismin geometrik şekli, pürüzlülüğü ve akıma nazaran doğrultusu)

bağlı olduğunu göstermektedir.

Aerodinamik kuvvet için yapılan boyut analizinin benzerini moment için de yapmak mümkündür. Bu amaçla moment, kuvvetle ilgili incelemede olduğu gibi

$$M = G . V^a D^b \rho^c \mu^d K^e \tag{3.8}$$

şeklinde akım parametrelerine bağlanarak benzeri analiz yapılırsa

$$M = {}^{1}/_{2}\,\rho V^2 D^2 D . g(G,Re,Ma) \tag{3.9}$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntı aerodinamik momentin, aerodinamik kuvvetlerde olduğu gibi dinamik basınç, Re sayısı, Ma sayısı ve cismin karakteristik yüzey alanına bağlı

olduğunu, ancak ilave olarak cismin karakteristik boyuna da bağlı olduğunu göstermektedir. Reynolds sayısı ve Mach sayısı ısı transferi ve akışkanlar mekaniği için çok önemli bir boyutsuz sayıdır. Şu şekilde gösterilebilir:

$$\mathrm{Re} = \frac{\mathrm{ud}}{\mathrm{v}} \tag{3.10}$$

Mach sayısı, akışkanlar mekaniğinde hareket halindeki bir kütlenin hızının, kütlenin bulunduğu şartlardaki ses hızına oranıdır. Kısaltması Ma ya da M'dir. Adını Avusturyalı fizikçi ve filozof Ernst Mach'tan alır. Ernst Mach'tan önce bu konu üzerine Fransız fizikçi Sarrau da incelemeler yaptığından Sarrau sayısı da denir.

$$\mathrm{Ma} = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{c}} \tag{3.11}$$

Yukarıdaki bağıntılarda (3.8) ve (3.9) sağ tarafındaki bütün boyutlu büyüklükler sol tarafa bölen olarak geçerilirse aerodinamik kuvvet ve moment katsayıları olarak adlandırılır.

$$\frac{\mathrm{F}}{{}^{1}/_{2}\rho\mathrm{V}^{2}\mathrm{D}^{2}} = \mathrm{f}(\mathrm{G}, \mathrm{Re}, \mathrm{M}) \tag{3.12}$$

$$\frac{\mathrm{M}}{{}^{1}/_{2}\rho\mathrm{V}^{2}\mathrm{D}^{2}\mathrm{D}} = \mathrm{g}(\mathrm{G}, \mathrm{Re}, \mathrm{M}) \tag{3.13}$$

şeklinde boyutsuz birer ifade elde edilir. Bu ifadelerin sağ taraflarındaki boyutsuz büyüklükler sırasıyla aerodinamik kuvvet ve moment katsayıları olarak adlandırılır.
Uçak ve benzeri vasıtaların aerodinamik incelemelerinde kuvvet ve moment katsayıları aerodinamik kuvvet ve momentin her bir bileşeni için ayrı ayrı tanımlanır. Örneğin taşıma ve sürükleme kuvvetleri için sırasıyla;

$$\frac{\mathrm{L}}{{}^{1}/_{2}\rho\mathrm{V}^{2}\mathrm{S}} = C_L(G, Re, M) \tag{3.14.a}$$

$$\frac{\mathrm{D}}{{}^{1}/_{2}\rho\mathrm{V}^{2}\mathrm{S}} = C_D(G, Re, M) \tag{3.14.b}$$

yazılır. Yunuslama momenti katsayısı da ;

$$\frac{M_y}{{}^1/_2 \rho V^2 S_C} = C_{M_Y}(G, Re, M) \tag{3.14.c}$$

şeklinde tanımlanır. Burada S karakteristik alanı (bir uçak için kanadın üst görünüm alanı), c ise karakteristik uzunluğu (bir uçak için ortalama veter uzunluğu) belirtmektedir. Yukarıdaki bağıntıların, bir cisme etkiyen aerodinamik kuvvet ve momentlere ait katsayıların, cismin geometrik şekli, pürüzlülüğü ve akışkana nazaran hareket doğrultusu ile Reynolds ve Mach sayılarına bağlıdır.

Aerodinamik incelemelerinde sıklıkla cisimlerin etrafındaki basınç dağılımıyla ilgilenilir. Ancak bu incelemelerde basıncın mutlak değeri yerine bir katsayı şeklindeki ifadesinin kullanılması tercih edilir. Basınç katsayısının genel tanımı;

$$C_P = \frac{p - p_\infty}{{}^1/_2 \rho_\infty {V_\infty}^2} \tag{3.15}$$

şeklinde olup burada p ele alınan statik basıncı, ∞ indisli büyüklükler ise serbest akım şartlarını belirtmektedir.

Uçak ve benzeri vasıtalarla ilgili uygulamalarda çok farklı büyüklüklüklerde ve hızlarda, çok farklı irtifalarda uçan araçlarla ilgilenilmektedir. Birbirine yakın özelliklerdeki vasıtaların kanat, kuyruk gibi elemanlarının geometrileri arasında da farklılıklar vardır. Dolayısıyla bunlara etkileyen aerodinamik kuvvet ve momentler de farklı olacaktır. Bu durumda bu vasıtalardan hangisinin aerodinamik bakımdan daha iyi vasıflara sahip olduğu sorusu ilk bakışta güç gelecektir. Ancak, aerodinamik kuvvet ve momentler yerine aerodinamik katsayıları birbiriyle karşılaştırarak cisimlerin aerodinamik özelliklerini kıyaslamak mümkündür. Örneğin, aynı taşıma katsayısındaki bir uçuş sırasında sürükleme katsayısı daha küçük olan cismin aerodinamik sürükleme açısında daha iyi olduğu söylenebilir.

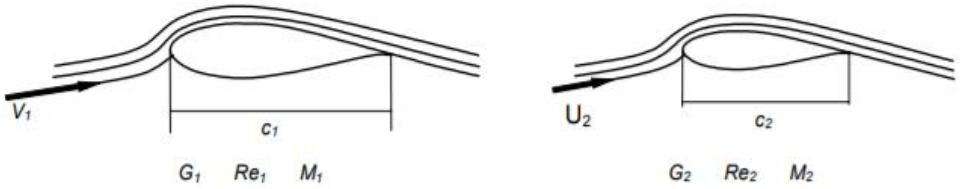
3.1.3. Akım Benzerliği; Geometrik Benzerlik, Dinamik Benzerlik

Rayleigh denklemi bir cisme etkiyen aerodinamik kuvvet ve momentin, cismin büyüklüğü, havaya nazaran hızı ve havanın yoğunluğu gibi boyutlu büyüklüklere bağlı olduğu gibi geometrik şekli ve pürüzlülüğüne, havaya nazaran hareket doğrultusuna ve Reynolds ve Mach sayısı gibi boyutsuz büyüklüklere bağlı olduğunu, buna karşılık aerodinamik katsayıların belirtilen boyutlu büyüklüklerden bağımsız olduğunu göstermektedir. Katsayılar sadece geometrik şekil ve doğrultu ile Re ve M sayılarına bağlıdır.

Bu durumda, herhangi iki cismin büyüklükleri, havaya nazaran hızları ve içinde bulundukları havanın yoğunlukları farklı olsa dahi, bunlara etkiyecek aerodinamik kuvvet ve moment farklı olmakla birlikte, aerodinamik katsayıların aynı olması imkanı bulunmaktadır. Katsayıların aynı olmasının, (2.15) bağıntılarının sağ taraflarında yer alan parametrelerin aynı olmasını gerektirmektedir.

İki cisme etkiyen aerodinamik katsayıların aynı olması için fiziksel olarak iki cisim etrafındaki akımın Şekil 3.4. de de gösterildiği gibi benzer olması gerektiği söylenebilir. Akımların benzer olmasının ilk şartı cisimlerin geometrik şekillerinin birbirine benzemesidir. Bu benzerliğe her iki cisim yüzeyi üzerindeki pürüzlülüklerin de dahil edilmesi gereklidir. Ayrıca cisimlerin havaya nazaran hareket doğrultuları da aynı olmalıdır. Bütün bu şartların sağlanması da ‘geometrik benzerlik’ olarak adlandırılır.

Ancak geometrik benzerlik, akımların benzerliği için yeterli değildir. Bunun yanında her iki akıma ait Reynolds sayıları ve Mach sayıları da aynı olmalıdır. Geometrik benzerlikle birlikte bu şartların gerçekleşmesi ise ‘dinamik benzerlik’ olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 3.4. Akımların benzerliği

Dinamik benzerlik rüzgar tünellerindeki deneysel çalışmaların esasını teşkil eder. Şöyle ki; hiçbir zaman bir uçak olduğu gibi rüzgar tüneline sokularak uçuş hızındaki bie akım içerisinde deneye tabi tutulamaz. Henüz geliştirme (dizayn) aşamasında olan bir uçak uçurularak atmosfer içerisinde deneye tabi tutulamaz. Bunlar yerine uçakların küçük ölçekteki benzeri modelleri rüzgar tünellerine konularak Reynolds ve Mach sayıları uçuş şartlarındakine yakın olacak şekilde deneye tabi tutulur. Deneylerden elde edilen sonuçlar uçuş şartlarındaki değerlere dönüştürülür.

3.2. Matematiksel Model

Rüzgar tüneli deneylerinde ve de bilgisayar destekli ANSYS CFD simülasyonlarda korunum ve Navier-Stokes denklemleri çözülerek akış yapısı, hız profilleri ve basınç gradyanları bulunmaktadır. Bu çalışmada kütlenin korunumu (süreklilik) ve momentumun korunumu denklemleri çözülmüştür. Sıcaklık ortam sıcaklığı sabit kabul edilerek ayrıca enerjinin korunumu prensibine değinilmemiştir.

3.2.1. Kütlenin Korunumu Denklemi

Kütlenin korunumu prensibine göre var olan kütle yok edilemez, yoktan da var edilemez. Bu durumda bir kontrol hacmine birim zamanda birim alana giren kütle miktarı, çıkan kütle miktarına eşittir. Türbülanslı, üç boyutlu, sıkıştırılamaz ve sürekli rejimdeki akışı ifade eden süreklilik denklemi kartezyen koordinatlarda aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u_k}}{\partial z} = 0 \qquad (3.18)$$

3.2.2. Momentumun Korunumu Denklemleri

Momentumun korunumu prensibine göre ise dış kuvvetlerin tamamı toplamı atalet kuvvetlerine eşittir. Diğer bir ifade ile dış kuvvetlerin toplamı momentumun birim zamandaki değişimine eşittir. Akışkan olarak Rüzgar tüneli deneylerinde hava kullanılmıştır. Hava için Reynolds ortalama alınmış korunum denklemi (RANS) ;

$$\rho\left(\frac{\partial\overline{u_i}}{\partial t}+\bar{u}_j\frac{\partial\overline{u_i}}{\partial x_j}\right)=\rho g_i-\frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i}+\mu\frac{\partial^2\overline{u_i}}{\partial x_j^2}+\frac{\partial\tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{3.19}$$

$$\tau_{ij}=-\rho\overline{u_i'u_j'}=\mu_i\left(\frac{\partial\overline{u_i}}{\partial x_j}+\frac{\partial\overline{u_j}}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \tag{3.20}$$

Reynolds Stress Model (RSM) yahut Reynolds Gerilmesi modeli denilen bu yöntem transport denklemlerinin çözümüyle hesaplanmaktadır.

3.2.3. SST-k-w Türbülans Modeli

Bu türbülans modeli türbülanslı sınır tabakasının daha iyi modellenmesini sağlar. Bununla birlikte, standart k-w modeli çözümü, serbest akış türbülans seviyelerine daha duyarlıdır. Analizlerde kullanılan türbülans modelidir.

$$\rho\frac{\partial w}{\partial t}+\rho U_J\frac{\partial w}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left((\mu+\sigma\mu_t)\frac{\partial w}{\partial x_j}\right)+P_w-D_w \tag{3.21}$$

$$P_w=\alpha\frac{w}{k}\tau_{ij}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}=\alpha\frac{w}{k}P_k \tag{3.22}$$

$$D_w=\beta\rho w^2 \tag{3.23}$$

Model türbülansı iki kısım şeklinde belirlemeye çalışır. İki değişken için diferansiyel denklemler, k ve w değişkenleridir. K değişken türbülans kinetik enerjisi iken, ikincisi w türbülans özgül yayılma hızıdır.

3.2.4. Hata Analizi

Deneysel ve analiz sonuçlarında kullanılan elemanlardan ve verilerden kaynaklı hatalar olmaktadır. Bu hataların hangi düzeyde olduklarının belirlenmesi deneylerin ve analizlerin doğruluğu açısından oldukça önemlidir.

F herhangi bir ölçüm mesela kuvvet olsun, x bu ölçüme etki bağımsız değişken ve n bu değişkenlerin sayısı olmak üzere,

$$F=F(x_1,x_2,x_3,,.....,x_n) \tag{3.24}$$

F ölçümündeki belirsizlik ise;

$$\beta_F = \left[\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\beta_1\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\beta_2\right)^2 \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\left(\frac{\partial F}{\partial x_n}\beta_n\right)^2\right]^{1/2} \tag{3.25}$$

Burada β_F toplam hatayı, β_n ise her bir değişkene ait hatayı göstermektedir.

3.3. Model Oluşturma

Akçaağaç tohumunun şekilsel olarak türbin kanadı formunda tasarlamak ve üretmek için öncellikle Bursa'daki çeşitli park ve bahçelerden yaklaşık yüz adet farklı uzunluk ve genişliklerde kurumuş akçaağaç tohumu toplanmıştır.



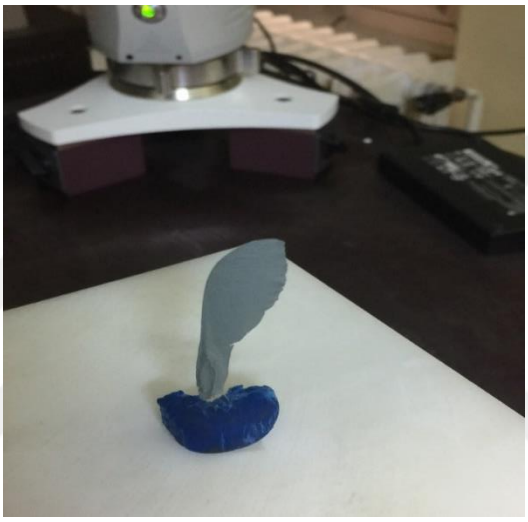
Şekil 3.5. Akçaağaç tohumu genel görüntüsü ve farklı boyutlarda toplanan akçaağaç tohumları

Bu toplanan tohumlar seçilip; sulu boya ve guaj boya ile boyanarak 3D yazıcı ile taranmıştır.



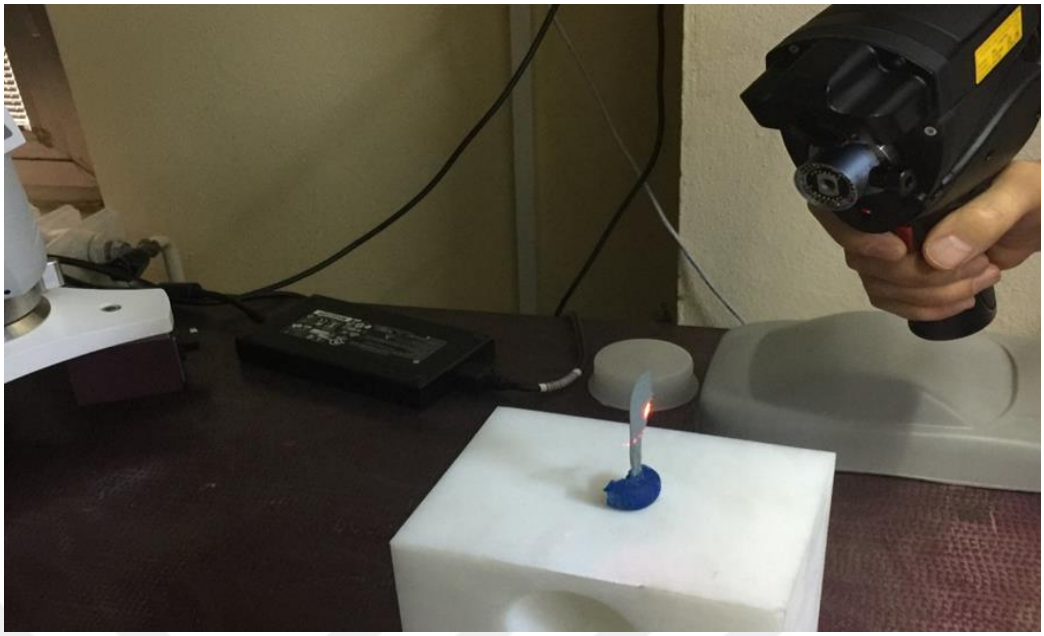
Şekil 3.6. Akçaağaç tohumlarının Optik ve Lazer tarama cihazlarında daha detaylı görüntülerinin elde edilmesi için sulu ve guaj boya ile boyanması işlemi

Akçaağaç tohumlarının sulu boya ve guaj boya ile boyanmasının amacı 3 boyutlu lazer ile taranması yapılırken şeffaf yapısından dolayı net bir şekilde görüntüsünün elde edilmemesinden kaynaklanmıştır. Boyama işleminden sonra kanat tohum UÜ Tersine Mühendislik Laboratuvarı'nda tekrardan taranmış fakat istenilen hassasiyet elde edilemediği için firmalarla görüşülüp 3D yazıcı firmasında detaylı tarama ve prototiplemesi yapılmıştır.



Şekil 3.7. Türbin kanadı formunda örnek akçaağaç tohumlarından 3D Lazer yazıcı ile Uludağ Üniversitesi Tersine Mühendislik Laboratuvarında taranması işlemi

Akçaağaç tohumunun çok ince ve şeffaf bir yapısı olduğu için yapılan farklı denemeler ile Lazer 3B ölçüm cihazları taranması denenmiştir fakat daha ayrıntılı, daha hassas nano boyutlardaki 3D yazıcılar ile son tarama işlemi yapılarak prototip kanat profili (samara) için oluşturulmuştur.



Şekil 3.8. Akçaağaç tohumunun 3B lazer taraması

3.3.1 3B Lazer ölçüm ve tarama sistemleri

3 boyutlu ölçüm çeşitli tekniklerle bir cismin uzaydaki koordinatlarının ve ölçülerinin gerçeğe en yakın biçimde ortaya koyulmasıdır. Bu tekniklerle bazen belli başlı noktaların koordinatları bazen de tüm cismin yüzeyini belli sıklıklarla ölçerek yapılabilmektedir. Bu teknikler ihtiyaç duyulan rapora göre belirlenmektedir.

Üç boyutlu ölçüm metrolojisi, endüstrinin hemen hemen her kesiminde uygulama alanına sahiptir. Özelikle üretim teknolojilerinde üretilen parçaların son kontrollerinin yapılmasında son derece önemli bir yer tutar. Üç boyutlu ölçümleri gerçekleştiren en pratik ve bilinen cihazlar "koordinat ölçme cihazı" anlamına gelen, İngilizce "Coordinate Measurement Machines" başlığının ilk harfleri ile oluşturulan kısaca "CMM" olarak adlandırılmaktadır. CMM cihazları X,Y,Z koordinat eksenlerinde çalışarak, parça boyutlarını bu kordinatlar ile eşleştirilerek, diğer bir değişle karşılaştırılarak ölçümlerini gerçekleştirir. En önemli özelliği ise, elde edilen ölçüm bilgileri ile ölçümü yapılan bir parçanın tüm katı modelinin çıkarılıp, olması gereken ölçüm değerleri ile kontrolünün yapılabilmesidir. Özelikle tersine mühendislik (reverse engineering) uygulamaları için son derece başarılıdır. Ülkemizde, otomotiv sanayi başta olmak üzere birçok uygulama

alanlarında binlerce CMM cihazı kullanılmaktadır. Kullanılan cihazların gelişen teknoloji ile birlikte modernize edilmesi, yeni çıkan tasarım yazılımları ile kullanılması, yeni kontrol ünitelerinin eklenmesi ve daha sonra kalibrasyonlarının yapılması kısaca CMM modernizasyonu veya retrofit olarak tanımlanır.



Şekil 3.9. Çeşitli 3B tarama sistemleri

Mühendisliğin ana konularından biri geliştirmedir. ' Tersine Mühendislik ' , oluşturulmuş bir aygıtın, sistemin veya bir objenin; yapısının, işlevinin ve çalışmasının tekrar incelenerek ve yeniden keşfedilmesine olanak sağlayarak mühendislik alanındaki geliştirme yöntemlerinden biridir. Makine ve mekanik aksamlarda ve yazılım programlarında, sistemin yapısını ve işleyişini en küçük detayına kadar analiz etmektedir. Günümüzde ağırlıklı olarak var olan parçaların üç boyutlu (3B) sanal modellenmesinde kullanılmaktadır. Tersine mühendislik, bilgisayar destekli yazılım (CAD), bilgisayar destekli üretim (CAM) ve bilgisayar destekli mühendislik (CAE) yazılımlarını kullanarak fiziksel nesnenin ölçümünü ve sonrasında üç boyutlu modellenmesini içerir.

3.3.2. Akçaağaç tohumunun Tersine mühendislik tekniğiyle 3B taranması

Çeşitli yerlerden park ve bahçelerden toplanan akçaağaç tohumları optik tarama ve lazer ölçüm tarayıcılarla taranarak bilgisayar ortamına aktarılmış ve 12-14-16 cm olacak şekilde oluşturulan model, 3 farklı uzunlukta prototip modelleri deneysel çalışma ve Ansys programında eş zamanlı analiz çalışmaları için CAD dosyaları oluşturulmuştur.



Şekil 3.10. Prototip Akçaağaç tohumunun taranmasında kullanılan Hp Jet Fusion 3D 4200 Yazıcı

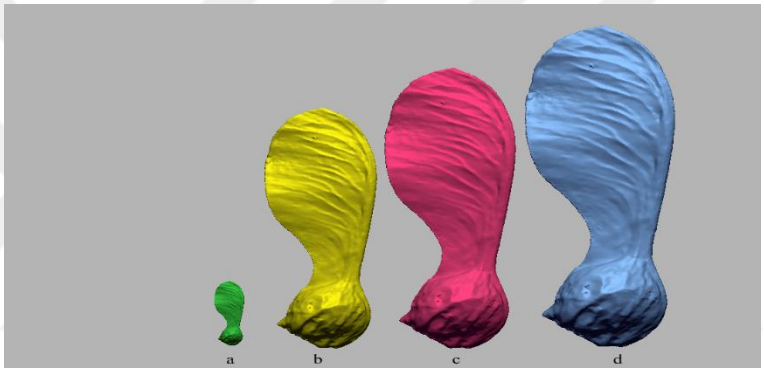
Akçaağaç prototip modelimiz, Breuckmann Smart Scan optik tarama cihazıyla taranmıştır. Sonrasında 12-14-16 cm olarak ölçeklendirilme çalışması yapılmıştır. HP 4200 3D Printer ile Polyamid12 malzemeden prototip kanat, MJF(Multi jet fusion) teknolojisi kullanılarak üretilmiştir.



Şekil 3.11. Seçilen optimum tasarımdaki akçaağaç tohumunun 3D yazıcı da üretilmeden önceki 3D yazıcı programında birebir ölçeklendirilmiş resmi 1 numaralı akçaağaç tohumu (orjinal boyut)

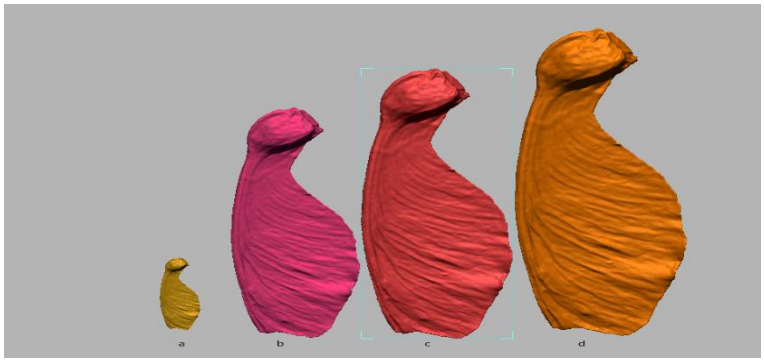


Şekil 3.12. Seçilen optimum tasarımdaki akçaağaç tohumunun 3D yazıcı da üretilmeden önceki 3D PRİNTER programında birebir ölçeklendirilmiş resmi 2 numaralı akçaağaç tohumu (orjinal boyut)



Şekil 3.13. Sırasıyla 1 numaralı akçaağaç tohumunun resimleri a) Orjinal boyut b) 120 mm akçaağaç tohumu c)140 mm akçaağaç tohumu d) 160 mm akçaağaç tohumu

Taranmadan önceki yazılım programında orjinal ölçeklendirilmiş resimleri Şekil 3.13 ve Şekil 3.14 te verilmiştir. İlk Şekil 3.13 1 numaralı analiz ve deneylerde esas alınacak tohumun 3 boyutlu resimleridir. Diğer ikinci resim Şekil 3.14 2 numaralı 2. seçtiğimiz orjinal akçaağaç tohumunun boyutlandırılmış resimleridir.



Şekil 3.14. Sırasıyla 2 numaralı akçaağaç tohumunun resimleri a) Orjinal boyut b) 120 mm akçaağaç tohumu c)140 mm akçaağaç tohumu d) 160 mm akçaağaç tohumu

Model resimleri yukarıdaki gibidir. İlk a) resmi seçilen akçaağaç tohumunun orijinal boyutlarıdır. Devamında b)-c) ve d) akçaağacın prototipleme sonucu printer sırasıyla 120-140 ve 160 mm bilgisayar fotoğraflarıdır.



Şekil 3.15. 1 numaralı akçaağaç tohumunun 3 boyutlu optik tarayıcı sonrası görüntüleri

Şekil 3.15.' da görüldüğü üzere optik tarayıcılar ile 3 boyutlu birebir akçaağaç tohumunun prototip üretimi yapılmıştır. Boyutları Akışkanlar Mekaniği Rüzgar Tünelinde denenecek şekilde ve tasarım noktasında optimum performans sağlanacak şekilde detaylı birebir

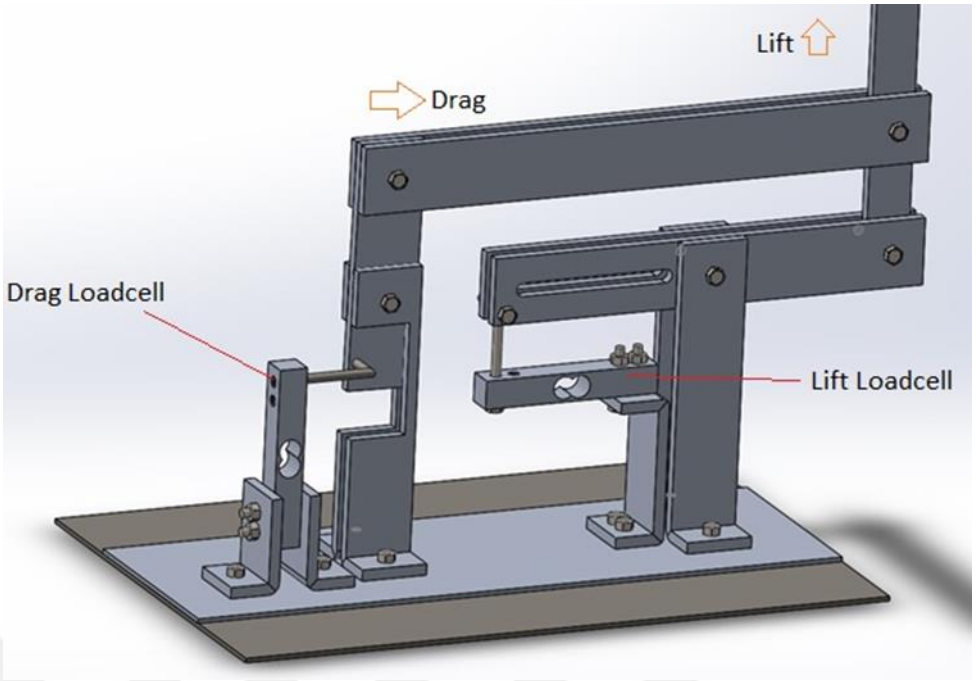
prototip üretimi sağlanmıştır. Sırasıyla akçaağaç tohumu 12 cm, 14 cm ve 16 cm olacak şekilde üretilmiştir.



Şekil 3.16. 160 mm akçaağaç tohumu (samara) deneysel ve nümerik analizi için üretilmiş prototip kanat.

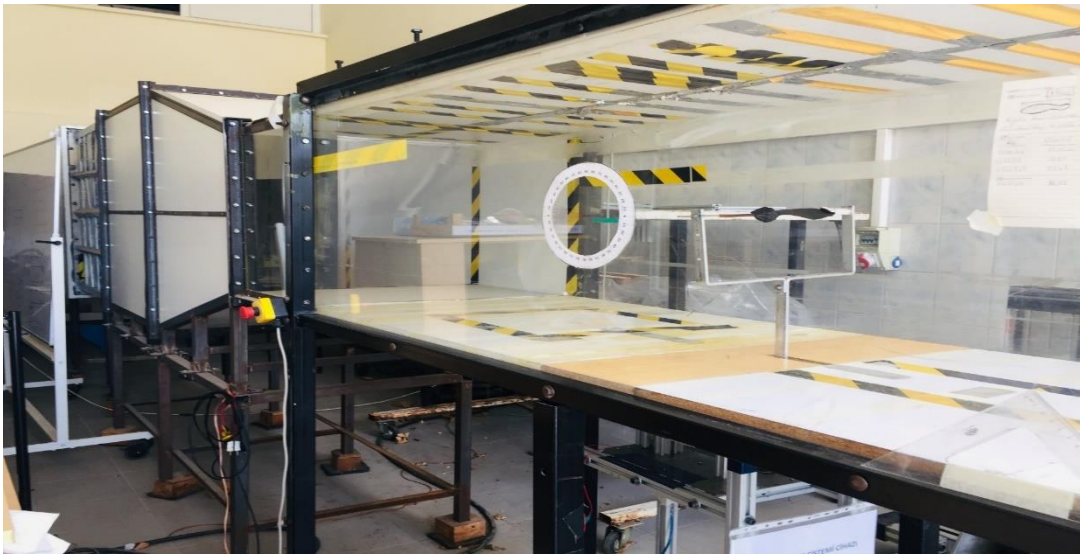
3.4. Deneysel Sistem

Deney Tesisatı Bursa Uludağ Üniversitesi'nde Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında bulunan rüzgar tüneline kurulmuştur, detaylı deneysel aerodinamik çalışma üretilen kanat üzerinde yapılmıştır. 16 cm Akçaağaç prototip kanat için deneysel aerodinamik özellikleri C_L kaldırma kuvvet katsayısı ve C_D sürüklenme kuvveti katsayısı değerleri elde edilmiş olup, prototip kanat etrafında akış görüntüleme çalışmaları için Bursa Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Laboratuvar imkanlarından faydalanılmıştır. Prototip kanada gelen kuvvetleri ölçmek amacıyla bir kuvvet sistemi kurmak için, literatürdeki kuvvet ölçüm sistemleri incelenerek bir kuvvet sistemi tünel içerisine tasarlanmıştır.



Şekil 3.17. Kuvvet ölçüm sistemi CAD resmi

Rüzgar tüneli açık sistem olup içerisinde motor gücü 22 kw olan radyal vantilatör ile hava akışı sağlanmaktadır,motor değişken devirlidir. Rüzgar tüneline gelen hava pitot tüpü ve hız ölçer ile ölçülmüştür. Rüzgar tüneli boyutları uzunluğu yaklaşık 4 m, test kısmı 2m, prototip kanadı koyduğumuz yerden çıkış kısmına kadarki kısım 90 cm dir. Test kuvvet ölçüm sistemi; genişliği 70 cm olan rüzgar tünelinin, 35 cm-35 cm arasına koyulmuştur, rüzgar tünelinin yüksekliği ise 60 cm olup prototip kanat 30 cm yukarıdan yerleştirilmiştir. Prototip kanada gelen havanın kaldırma ve direnç kuvvetleri kuvvet ölçerler ile başlangıçta sistem boş iken 50 gr-100 gr- 150 gr ağırlıklar koyularak sistemin kalibrasyonu yapılmıştır. 0 derece atak açısı yatay eksen baz alınarak prototip kanat sisteme yerleştirilmiş daha sonrasında açı ölçer ve su terazisi ile açılar ölçülmüştür. Açı ölçer 1 derecelik hata payı ile sisteme; 0 dereceden 180 dereceye tanımlanmıştır.



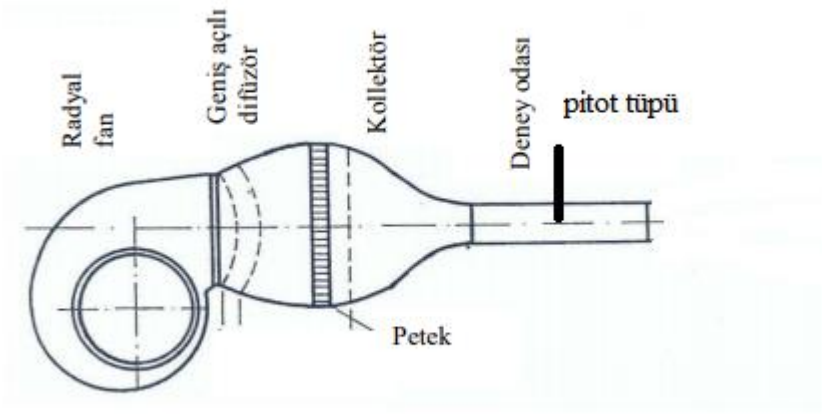
Şekil 3.18. Deneysel sistem rüzgar tüneli ve kuvvet denge sistemi üzerinde prototip akçaağaç kanadının görüntüsü

Kuvvet denge cihazı; load-cells (yük- hücreleri) ile bilgisayarla Ardunio programı ile bağlantı yapılarak rüzgar tüneli içerisine tasarlanıp, yerleştirilmiştir. Daha sonra bu cihazın kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri ölçülerek yani prototip kanat olmadan çalıştırılarak kalibre edilmiş daha sonra aynı deneyler; farklı kanat açıları ve hızlarda prototip samara kanadı için denenmiştir. Deneylerde kullanılan kanat 160 mm boyunda prototipi oluşturulan akçaağaç kanadıdır. -50 ve +50º arasında değişen farklı atak açılarında ve 5-10 ve 14 m/s rüzgar tünelimizin hızlarında rüzgar tüneli içerisinde deneyler yapılmıştır.

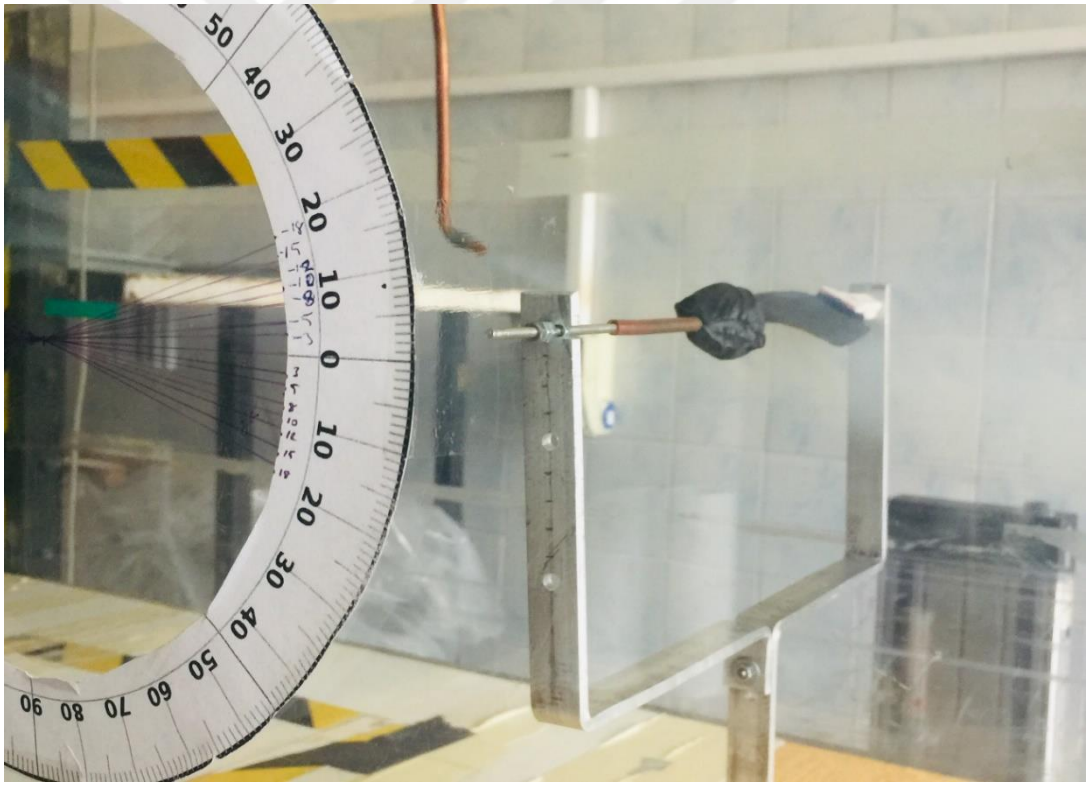


Şekil 3.19. Rüzgar Tüneli içerisine akçaağaç kanat modelinin ve aerodinamik kuvvet ölçüm cihazının yerleşimi

Kanat üzerine gelen aerodinamik kuvvetler ölçüldükten sonra hız görüntüleme çalışmalarına başlanmıştır. Bunun için öncellikle hot-wire tekniği Rüzgar tünelinde denenmiştir. Bunun için mevcut tünelde kullanılan tek boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu hot wireler hız ve türbülans yoğunluğu ölçüm elemanları denenmiştir. Ayrıca önceden rüzgar tünelinde kullanılan transvers cihazı da sisteme bağlanılarak tek boyutlu yönde hız ve türbülans yoğunluğu ölçüm için hot wire denenmiştir. Ayrıca smoke-wire tekniği araştırılmış ve bunun için duman üretme cihazını kullanmak düşünülmüştür. Rüzgar tünelinin üst kısmından bir boru tasarlanarak borunun içerisinden prototip kanadın üzerine duman verilmiş ve lazer ışığını kırarak kanat üzerindeki akış yapısı ve tünel içerisindeki akım görüntülenmeye çalışılmıştır. Ancak burada da yeterli lazer ışınlarının yapısı ile uyumlu donanımlı kameralarımız olmadığı için kanat üzerine gelen ve rüzgar tüneli içerisindeki akış yapısını görüntüleme sağlanamamıştır. Bu denemeler sonunda Bursa Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Laboratuvarları'ndan faydalanmaya karar verilmiş ve PIV akış görüntüleme sonuçlarını Bursa Teknik Üniversitesi'nde devam edilmiştir.



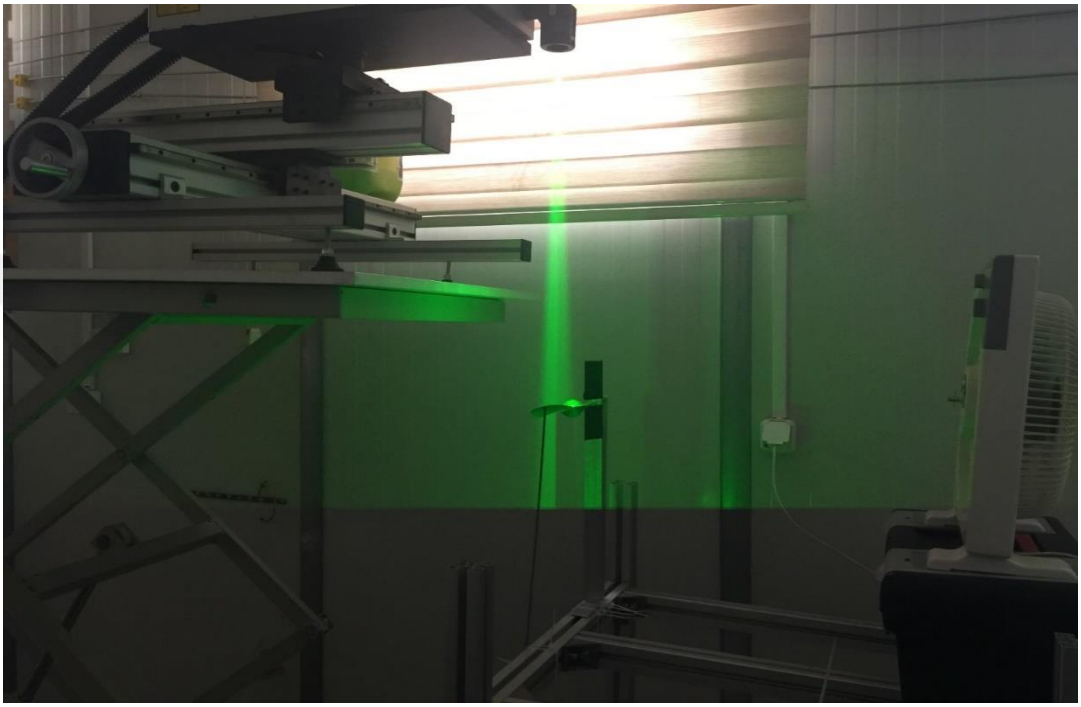
Şekil 3.20. Duman üretme cihazının gaz borusu ile rüzgar tüneline verilmesi şematik resmi.



Şekil 3.21. Deney tesisatında prototip Akçaağaç tohumunun üzerine duman makinesinden pitot tüpü ile dumanın verilmesi işlemi.

Bu denemelerden sonra akım görüntüleme çalışmaları için Bursa Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Laboratuvar imkanlarından faydalanılmıştır. Deney

düzeneğimizdeki prototip samara (akçaağaç tohumu) ve rüzgarı elde etmek için fan (vantilatör) Bursa Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Laboratuvar'ına taşınmıştır. Orada kapalı ortamda duman sis oluşturmak amacıyla, duman tableti yakılarak yoğun sis üretilmiş ve fan çalıştırılarak PIV sisteminde kanat üzerine gelen sis lazer sistemleri ile görüntülenmiştir.



Şekil 3.22. Bursa Teknik Üniversitesi PIV düzeneğinde prototip Akçaağaç tohumu üzerinde akım görüntüleme çalışmaları

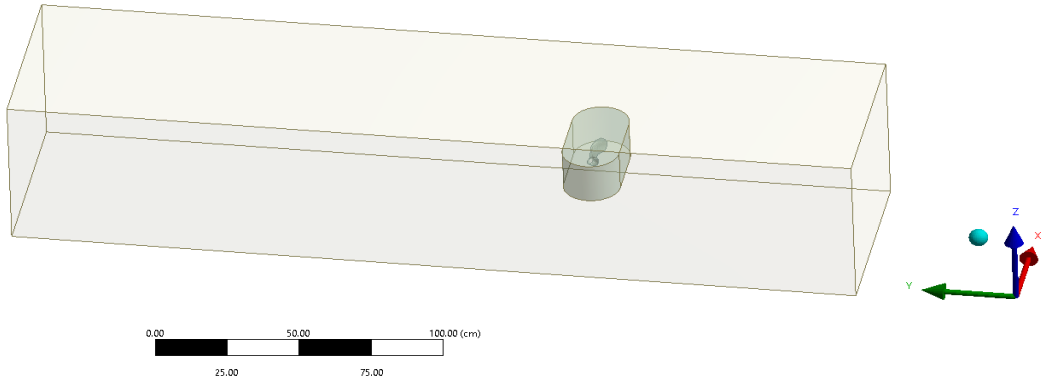
3.5. Sayısal çözüm parametreleri ve sınır şartları

Solidworks programında akçaağaç prototip modelin etrafına ANSYS programında mesh atabilmek için kanat katı model haline getirilmiştir ve ANSYS FLUENT' de analiz çalışmalarına başlanmıştır.

3.5.1. Geometrinin Oluşturulması

ANSYS FLUENT' de önce C type mesh diye adlandırılan kanat etrafına atak açılarına göre hız profillerini uygulayabildiğimiz mesh tipi denenmiştir. Daha sonra simülasyonlar

için daha uygun olacağına karar verilen birebir rüzgar tüneli ile modellemeye geçilmiştir. Birebir rüzgar tüneli modelinde rüzgar tünelinin ölçüleri alınılarak konumlandırılması ve geometrisi tünel boyutlarına göre yapılmıştır. Geometri kısmı geometri design modeler kısmında çizildikten sonra ANSYS FLUENT mesh kısmında mesh atmaya geçilmiştir. Kanat etrafına sık mesh atabilmek için kanat etrafına bir blok çizilerek bu bloğa inflation sık mesh verilmiştir.

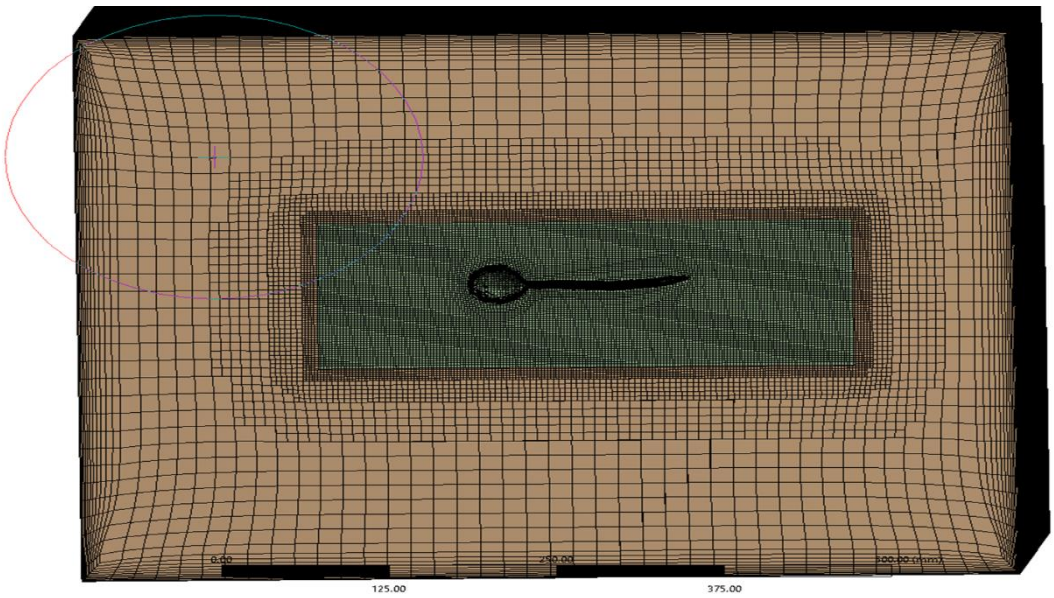


Şekil 3.23. Rüzgar tünelinin birebir simülasyonu için ANSYS FLUENT de çizilen geometri.

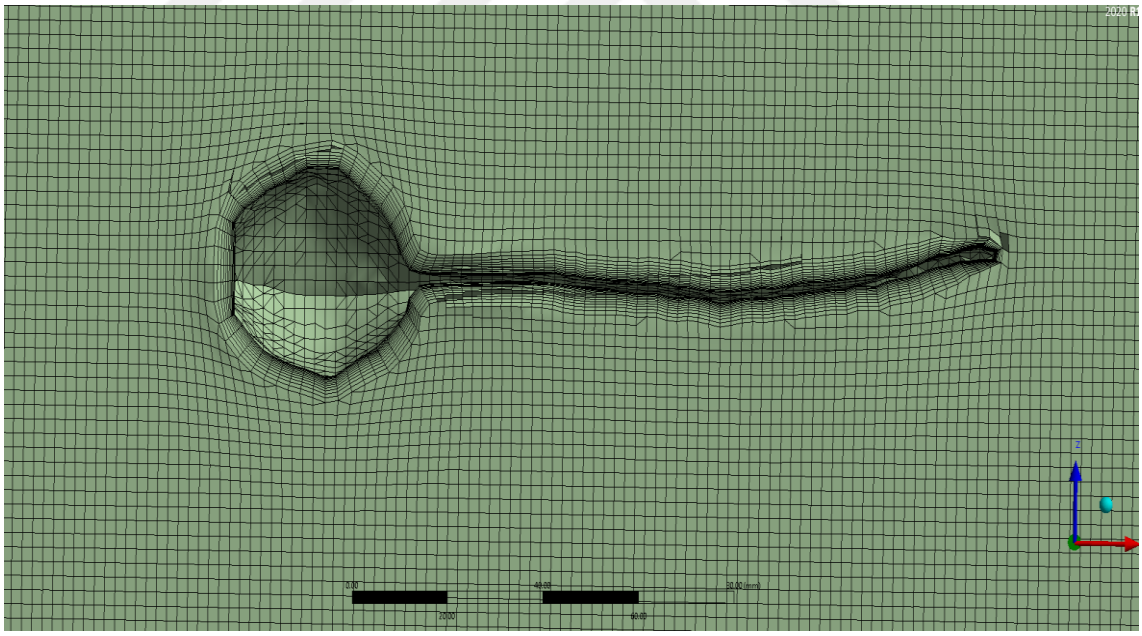
3.5.2. Ağ Yapısının Oluşturulması

Kanadın etrafına daha sık mesh atılarak mesh kalitesi iyileştirilmeye çalışılmıştır. Akçaağaç tohumu için farklı mesh sıklıklarında ve kalitesinde ağdan bağımsızlık çalışmaları denenmiştir. Yaklaşık 2 milyon meshin ağdan bağımsızlık çalışmaları sonucunda yeterli olacağına karar verilmiştir. Bu kararı verebilmek için pek çok ağdan bağımsızlık çalışması yapılmış ve 500 bin-1 milyon-2 milyon ve 4 milyon mesh yapıları ve analiz sonuçları incelendiğinde 4 milyon mesh ve 2 milyon mesh de ağdan bağımsızlık çalışmalarında sonuçların pek fazla değişmediği görülmüş ve 2 milyon meshin yeterli geleceği anlaşılmıştır.

ANSYS FLUENT mesh kısmında hem kanat etrafına hem de tünel duvarlarına sık mesh vermek için inflation komutu uygulanmıştır. Böylelikle kanat etrafındaki akış yapısı ve kanal içerisindeki akım simülasyonları daha ayrıntılı bir şekilde elde edilmiştir.



Şekil 3.24. Kanat etrafına sık mesh atıldıktan sonra rüzgar tünelinde kanal içerisinde kanat etrafında yan görüntüsü.



Şekil 3.25. Kanat etrafındaki mesh görüntüsü.

3.5.2. Sınır Şartları

Şekil 3.26' de sınırlar belirtilmiştir. Giriş kısmı inlet ve 5m/s rüzgar tünelinde ilk seçilen hızdır ve bu hız değerinde Reynolds için simülasyonda analizde aerodinamik özelliklerde sonuçlar alınmıştır. A olarak seçilen kısım outlet (çıkış), B ile seçilen kısım inlet (giriş) ve daha sık mesh yapısının oluşturulduğu çıkış kısmına yakın tarafa da samara (akçaağaç tohumu) için sınır şartları tanımlanmıştır. Meshleme ve sınır şartları tanımlama işlemi bittikten sonra solution (çözüm) kısmında ANSYS FLUENT de pressure-based, absolute velocity ve time olarak da steady seçilmiştir. Rüzgar tünelinde kullanılan akışkan havadır ve havanın yoğunluğu 1,225 kg/m^3 ve viskozitesi de sabit 1,789 *10^{-5} kg/ms olarak seçilmiştir. Bu özellikler kanada gelen karakteristik aerodinamik özellikleri hesaplamada kaldırma ve direnç kuvvetlerini incelemede oldukça önemlidir. Akış olarak 5m/s hava hızı, türbülans yoğunluğu rüzgar tünelinin yapısı da dikkate de alınarak %10 ve türbülans uzunluğu 0,001m alınmıştır.



Şekil 3.26. ANSYS FLUENT de tanımlanan sınır şartları.

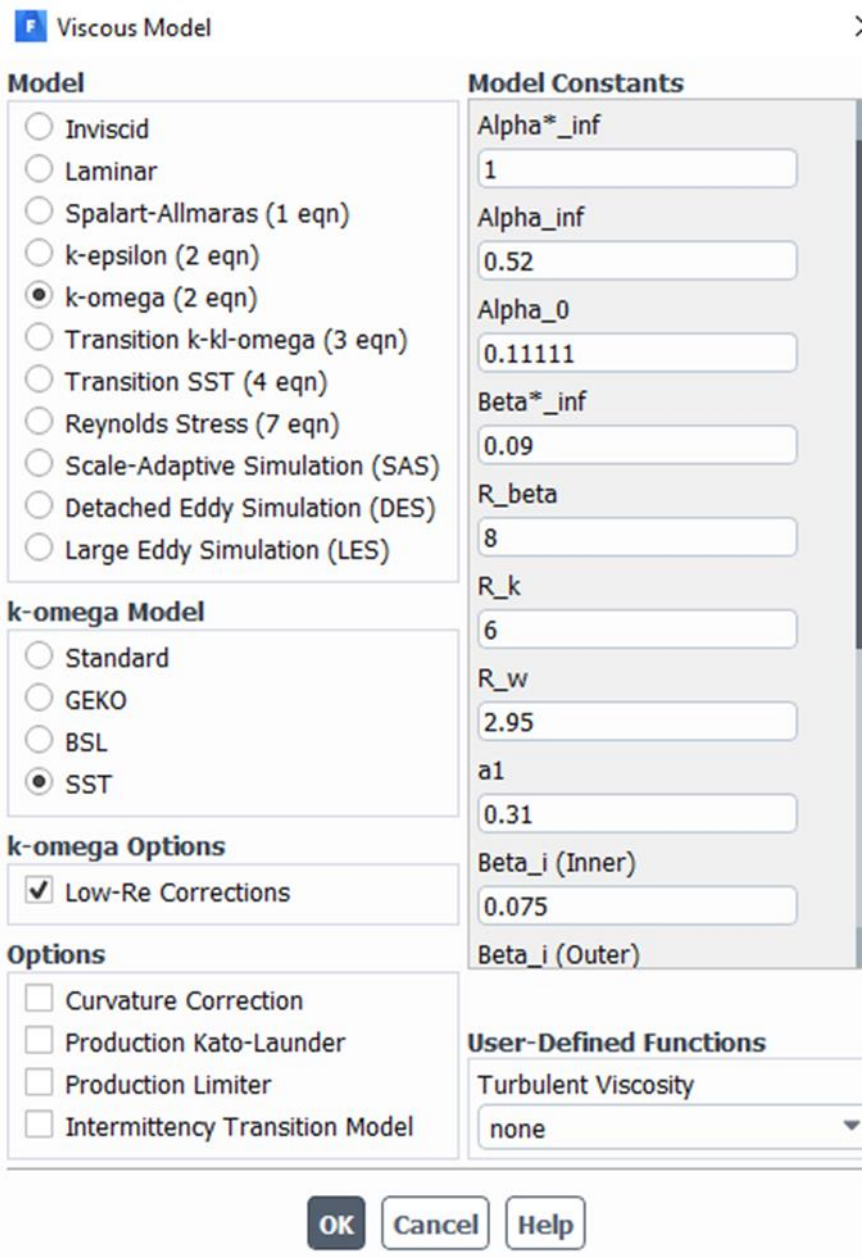
Ayrıca rüzgar tüneli çıkış kısmında arka basınç kısmına da türbülans yoğunluğu verilmesi gerekliydi. Bunun için arka türbülans yoğunluğu da %10 ve türbülans skalası uzunluğu da birebir simülasyon olması için 0,001 m verilmiştir. Diğer sınır şartlarında ise rüzgar tünelinin giriş ve çıkış haricindeki kısımlarına no-slip (kaymama şartı) verilmiştir.

Kanat uzunluğu ve yüksekliği hesap edilerek referans yüzey alanı deneysel hesaplamalar için hesaplanmıştır. Kanat üzerine gelen aerodinamik kuvvetleri hesaplamak için bu özellikler de referans değerleri kısmına girilmiştir. Sıcaklık normal hava sıcaklığı olarak

deneysel çalışmalar yaz kış açık havada denense de 300 Kelvin sabit sıcaklıkta tutulmuştur. Giriş kesitinde hava hızı 5 m/s-10 m/s ve 14 m/s olarak alınmıştır. Havanın viskozitesi de 1,789 10^{-5} kg/m.s dir.

3.5.3. Türbülans Modelleri ve Çözüm Yöntemleri

Ağdan bağımsızlık çalışmalarına başlamadan önce birden çok türbülans modeli (viskoz türbülans modeli olarak k-epsilon, k-epsilon enhancement treatment, SST- k-w ve Reynolds Stress 7 equation) denenmiştir. SST- K-w türbülans modeli ile en uygun sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca solution method (çözüm metodu) kısmında da SIMPLE, SIMPLE-C, PRESTO denenmiş ve Presto Pressure Based – Second Order Upwind seçilmiştir. Aşağıda ANSYS FLUENT de kullanılan viskoz model ve ayrıntıları verilmiştir.



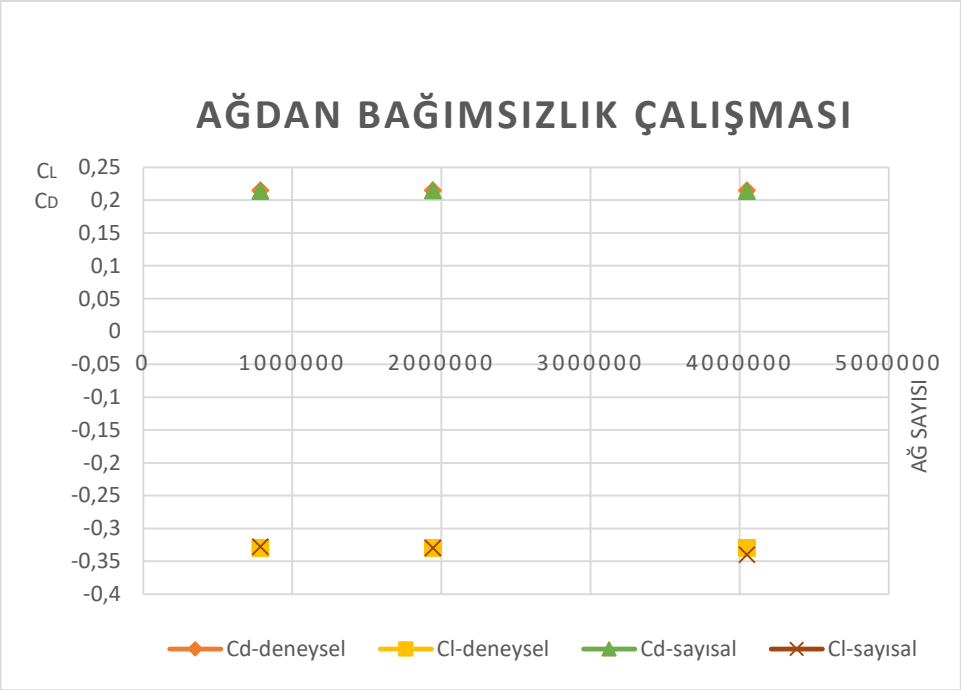
Şekil 3.27. ANSYS FLUENT de kullanılan viskoz modelde türbülans sabitleri.

Analiz simülasyon sonuçlarında; farklı türbülans modelleri için aerodinamik özellikler deneysel sonuçlar ile kıyaslanmıştır.

Çizelge 3.1. Farklı mesh (eleman) sayıları için ANSYS FLUENT de elde edilen 0º atak açısı 5 m/s rüzgar tüneli hızında akçaağaç tohumu (prototip kanat etrafında) aerodinamik özellikler (sürüklenme ve kaldırma katsayıları)

Eleman Sayısı	Cd-analiz	Cl-analiz	Cd-deneysel	Cl-deneysel	Türbülans modelleri
4049026	0,214	-0,360	0,215	-0,33	SST-k-w
3611120	0,215	-0,366	0,215	-0,33	k-epsilon-enhancement wall treatment
1943639	0,208	-0,403	0,215	-0,33	SST-k-w
1759875	0,227	-0,481	0,215	-0,33	k-epsilon
785527	0,214	-0,328	0,215	-0,33	SST-k-w

Deneysel sonuçlarla oldukça örtüşen 2 milyon mesh yapısı diğer atak açıları ve hızlar için seçilmiş ve diğer simülasyonlar da ANSYS FLUENT bu mesh yapısı ve çözüm metodu kullanılmıştır. Burada 750 bin ile 4 milyon arasında farklı türbülans modelleri için sayısız analiz yapılmış ve bu çalışmaların sonucunda 2 milyon mesh yapısının uygun olduğu kararına varılmıştır. Yukarıdaki tabloda 0º atak açısı için Re=12300 (u=5m/s rüzgar tüneli içerisinde hava hızında) de yapılan analiz sonuçları verilmiştir.

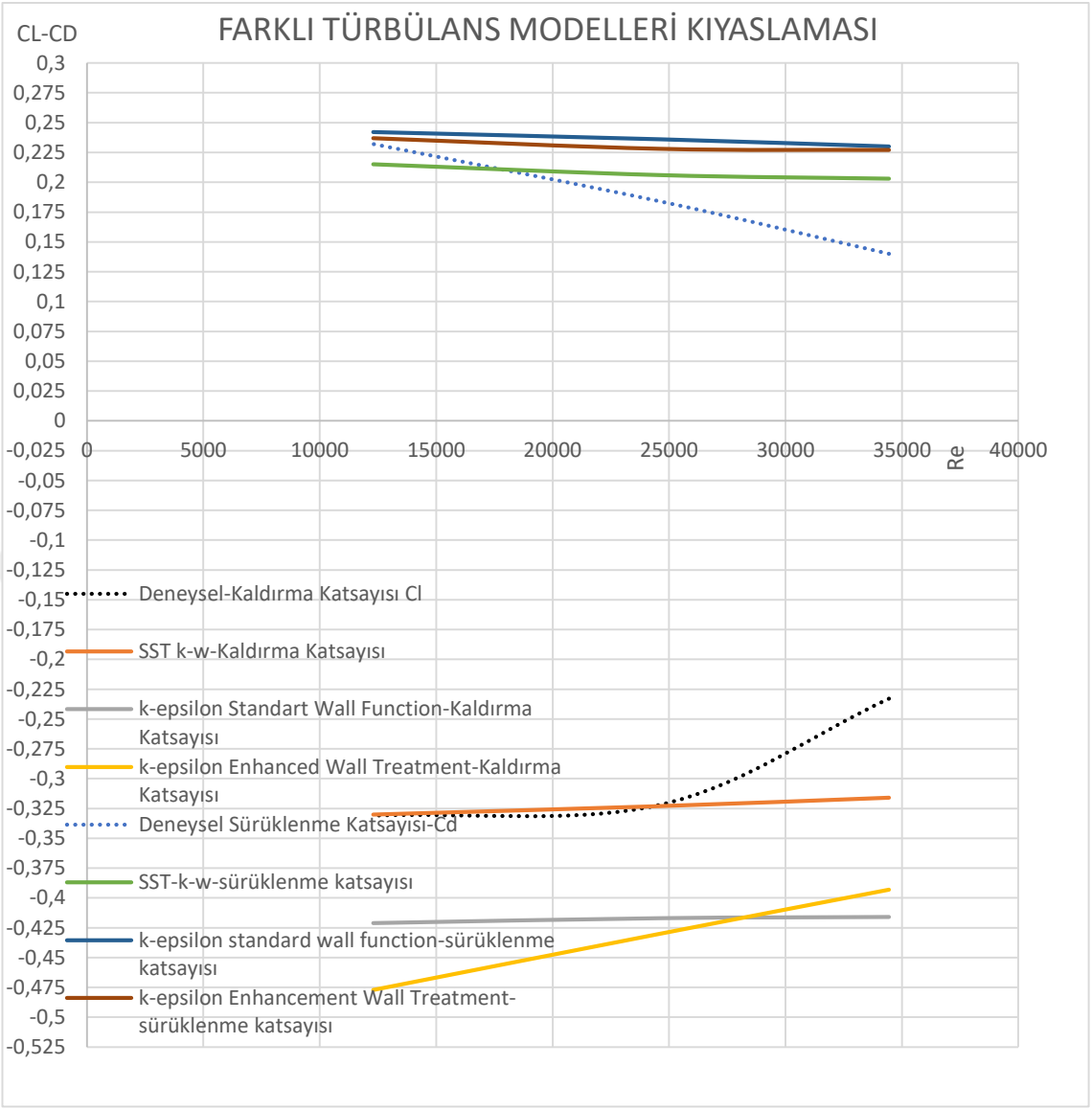


Şekil 3.28. Ağdan bağımsızlık çalışmaları sonucunda SST-k-w Türbülans modeli için deneysel ve analiz sonuçlarında aerodinamik özelliklerin kıyaslanması.

Yukarıdaki şekilden de görüldüğü üzere SST-K-w Türbülans modeli için yapılan kıyaslamalarda, deneysel verilerle oldukça uyumlu sayısal analiz sonuçları elde edilmiştir.

Çizelge 3.2. SST-k-w Türbülans modeli için ANSYS FLUENT de yapılan ağdan bağımsızlık çalışması için yapılan analiz sonuçları

	Eleman Sayısı	**C_D**	**C_L**
1	4049026	0,214	-0,340
2	1943639	0,215	-0,330
3	785527	0,214	-0,328

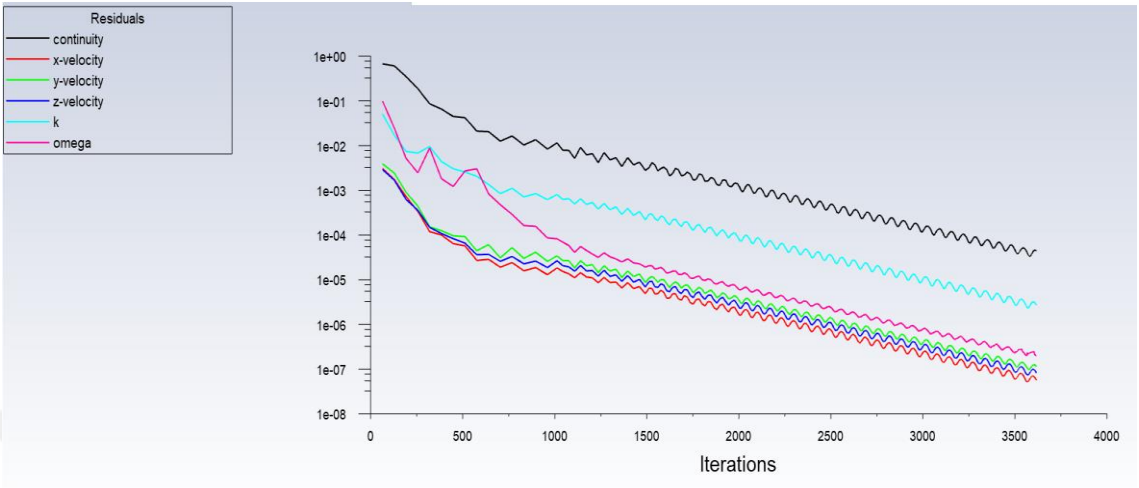


Şekil 3.29. Farklı Türbülans Modelleri için kaldırma ve sürüklenme katsayılarının kıyaslanması.

Farklı Türbülans modelleri ve deneysel sonuçlar ile kıyaslamalar sonucunda SST-k-w türbülans modeline diğer deneysel değerlere yakınlığı sebebiyle seçilmiştir. Yukarıdaki grafik Şekil 3.29 incelendiğinde standard Wall function k-epsilon ve k-epsilon enhancement Wall treatment deneysel sürüklenme ve kaldırma katsayıları değerlerinden uzak bulunmuştur. SST-k-w Türbülans modeli bu problemin çözümünde en yakın türbülans modeli olduğuna karar verilmiştir.

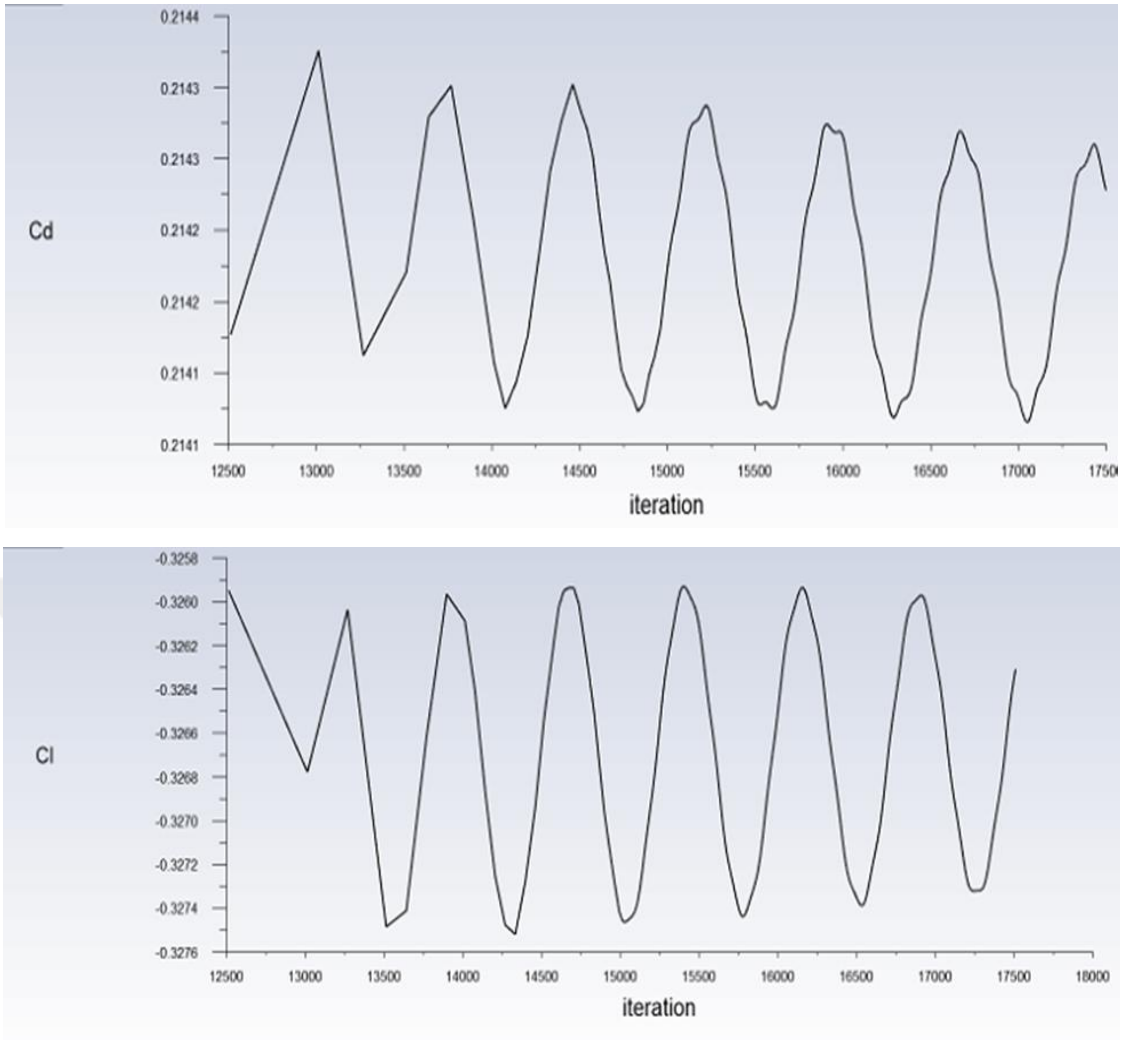
Analiz sonuçlarında 2 milyon mesh için, 1 milyon ve devamında 2 milyon iterasyonla çözülerek sonuçlar elde edilmiştir. Aşağıdaki sonuçlara bakarak ağdan bağımsızlık için aerodinamik özellikler de (kaldırma ve sürüklenme katsayılarında) virgülden sonra

ikinci ya da üçüncü basamak farklı olana kadar çözümlere devam edilmiştir. Ayrıca süreklilik ve yakınsama eğrileri 10^{-7} – 10^{-8} e kadar yakınsamıştır.



Şekil 3.30. ANSYS FLUENT analizlerde yakınsama eğrileri

Ayrıca son olarak Şekil 3.30. ve Şekil 3.31. analiz programından alınan ağdan ve iterasyondan bağımsızlık çalışmaları dikkate alınıp incelendiğinde 2000 ve dahası 3000 iterasyon çalışmaya devam edildiğinde 10^{-8} değerlerine kadar simülasyonların yakınsadığı gözlemlenmiştir. Aerodinamik karakteristiklerin ise (C_{Lort}= -0.3266 ve C_{Dort}=0.21425) değerlerin virgülden sonra 3 ve 4. basamağına kadar yakınsaması sağlanmıştır.



Şekil 3.31. SST-k-w Türbülans modeli ile iterasyondan bağımsızlık çalışması sonucu ANSYS FLUENT de elde edilen 0º için aerodinamik özellikler.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Deneysel Sonuçlar

Deneysel çalışmalar sonucunda BUÜ Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarı'na prototip akçaağaç kanat kuvvet cihazına bağlanılarak, kurulan kuvvet sistemi ile kaldırma ve direnç kuvvetlerini ölçmek mümkün olmuştur. Rüzgar tünelinin hızını ayarlayarak ilk önce u=5m/s → Re=12300 devamında u=10m/s → Re= 24600 ve u=14 m/s → Re=34450 için farklı atak açılarında α= -50 º→ +50 º arasında 5 er derece artışlarla kanat üzerine gelen aerodinamik kuvvetler ölçülmüştür. Ölçümlerin doğruluğu her atak açısı için her iki kuvvet de (kaldırma ve direnç kuvveti de) en az üç kere ölçülerek deneysel veriler oluşturulmuştur.

Çizelge 4.1. Negatif atak açıları için (α= -50º→ 0º) deneysel kaldırma ve direnç kuvvetleri.

maple_16cm_deneyler			Okunan Ort. (mN)		Referans (mN)		Maple		Maple		1.ölçüm		2.ölçüm		3.ölçüm	
α	U (m/s)	Re	FL	FD	FL	FD	FL	FD	CL	CD	FL	FD	FL	FD	FL	FD
-50	5	12297,3	-91,3333	168,6667	-25	71	-66,3333	97,66667	-0,75922	1,117843	-91	169	-92	169	-91	168
	10	24594,59	-270,333	599,3333	-46	259	-224,333	340,3333	-0,6419	0,973821	-270	599	-271	599	-270	600
	14	34432,43	-360,667	909,3333	-44	390	-316,667	519,3333	-0,4623	0,758166	-360	909	-361	909	-361	910
-45	5	12297,3	-91	160,3333	-25	71	-66	89,33333	-0,7554	1,022464	-90	160	-91	160	-92	161
	10	24594,59	-283,667	568,6667	-44	257	-239,667	311,6667	-0,68578	0,891795	-283	569	-284	569	-284	568
	14	34432,43	-383	866,6667	-42	388	-341	478,6667	-0,49782	0,698798	-382	866	-384	867	-383	867
-40	5	12297,3	-92	144	-22	71	-70	73	-0,71725	0,835521	-92	144	-93	144	-91	144
	10	24594,59	-280	514	-40	255	-240	259	-0,65812	0,741096	-280	514	-280	514	-280	514
	14	34432,43	-380	780	-39	387	-341	393	-0,48955	0,573734	-380	780	-381	779	-379	781
-35	5	12297,3	-89,3333	133	-23	70	-66,3333	63	-0,75922	0,721066	-90	133	-89	133	-89	133
	10	24594,59	-276	473,3333	-39	252	-237	221,3333	-0,67815	0,633317	-276	474	-276	473	-276	473
	14	34432,43	-379,667	722,3333	-36	381	-343,667	341,3333	-0,50171	0,498307	-379	722	-380	723	-380	722
-30	5	12297,3	-85,6667	122	-23	67	-62,6667	55	-0,71725	0,629502	-85	122	-86	122	-86	122
	10	24594,59	-268	439,3333	-38	249	-230	190,3333	-0,65812	0,544615	-268	440	-268	439	-268	439
	14	34432,43	-368,333	673	-33	377	-335,333	296	-0,48955	0,432126	-368	672	-369	674	-368	673
-25	5	12297,3	-80,3333	114	-21	68	-59,3333	46	-0,6791	0,526493	-81	114	-80	114	-80	114
	10	24594,59	-250	411,3333	-31	243	-219	168,3333	-0,62664	0,481664	-251	412	-249	411	-250	411
	14	34432,43	-346	632	-24	368	-322	264	-0,47008	0,385409	-347	633	-345	631	-346	632
-20	5	12297,3	-71,3333	105	-20	68	-51,3333	37	-0,58754	0,423483	-72	105	-71	105	-71	105
	10	24594,59	-206	379,6667	-27	241	-179	138,6667	-0,51219	0,396777	-206	380	-206	379	-206	380
	14	34432,43	-308	582,3333	-18	362	-290	220,3333	-0,42337	0,321661	-309	583	-307	582	-308	582
-18	5	12297,3	-67	104,6667	-19	67	-48	37,66667	-0,54938	0,431113	-67	104	-68	105	-66	105
	10	24594,59	-197,333	373	-23	239	-174,333	134	-0,49883	0,383424	-198	373	-197	373	-197	373
	14	34432,43	-297	572,3333	-13	362	-284	210,3333	-0,41461	0,307062	-298	572	-296	573	-297	572
-15	5	12297,3	-67,6667	102	-20	68	-47,6667	34	-0,54557	0,389147	-67	102	-68	102	-68	102
	10	24594,59	-219,667	369	-28	241	-191,667	128	-0,54843	0,366256	-218	369	-221	369	-220	369
	14	34432,43	-315,333	558,6667	-16	366	-299,333	192,6667	-0,43699	0,281271	-314	558	-317	559	-315	559
-12	5	12297,3	-71,6667	98	-21	67	-50,6667	31	-0,5799	0,35481	-72	98	-72	98	-71	98
	10	24594,59	-230	352	-31	244	-199	108	-0,56941	0,309028	-230	353	-230	351	-230	352
	14	34432,43	-306,667	528	-23	370	-283,667	158	-0,41412	0,230662	-309	528	-305	528	-306	528
-10	5	12297,3	-67,3333	96	-21	68	-46,3333	28	-0,53031	0,320474	-68	96	-67	96	-67	96
	10	24594,59	-216,667	343,3333	-36	244	-180,667	99,33333	-0,51695	0,28423	-217	343	-216	344	-217	343
	14	34432,43	-298,667	516	-32	370	-266,667	146	-0,3893	0,213143	-300	516	-298	516	-298	516
-8	5	12297,3	-65	94	-22	71	-43	23	-0,49216	0,263246	-66	94	-64	94	-65	94
	10	24594,59	-203,333	337,3333	-36	246	-167,333	91,33333	-0,4788	0,261339	-205	339	-202	336	-203	337
	14	34432,43	-285,333	506,3333	-32	373	-253,333	133,3333	-0,36984	0,194651	-287	507	-284	506	-285	506
-5	5	12297,3	-56,6667	90	-18	70	-38,6667	20	-0,44256	0,22891	-56	90	-57	90	-57	90
	10	24594,59	-167,667	325	-26	251	-141,667	74	-0,40536	0,211742	-168	326	-167	324	-168	325
	14	34432,43	-240,333	487,6667	-14	381	-226,333	106,6667	-0,33042	0,155721	-240	488	-240	487	-241	488
-3	5	12297,3	-55,3333	89,33333	-18	71	-37,3333	18,33333	-0,4273	0,209834	-55	90	-55	89	-56	89
	10	24594,59	-166,333	325	-25	250	-141,333	75	-0,40441	0,214603	-167	326	-166	324	-166	325
	14	34432,43	-239,667	486,3333	-13	380	-226,667	106,3333	-0,33091	0,155234	-239	487	-240	486	-240	486
0	5	12297,3	-52	85,33333	-23	65	-29	20,33333	-0,33192	0,232725	-51	85	-53	86	-52	85
	10	24594,59	-149,667	306,3333	-37	242	-112,667	64,33333	-0,32238	0,184082	-150	307	-149	306	-150	306
	14	34432,43	-195	462,3333	-35	366	-160	96,33333	-0,23358	0,140635	-196	463	-195	462	-194	462

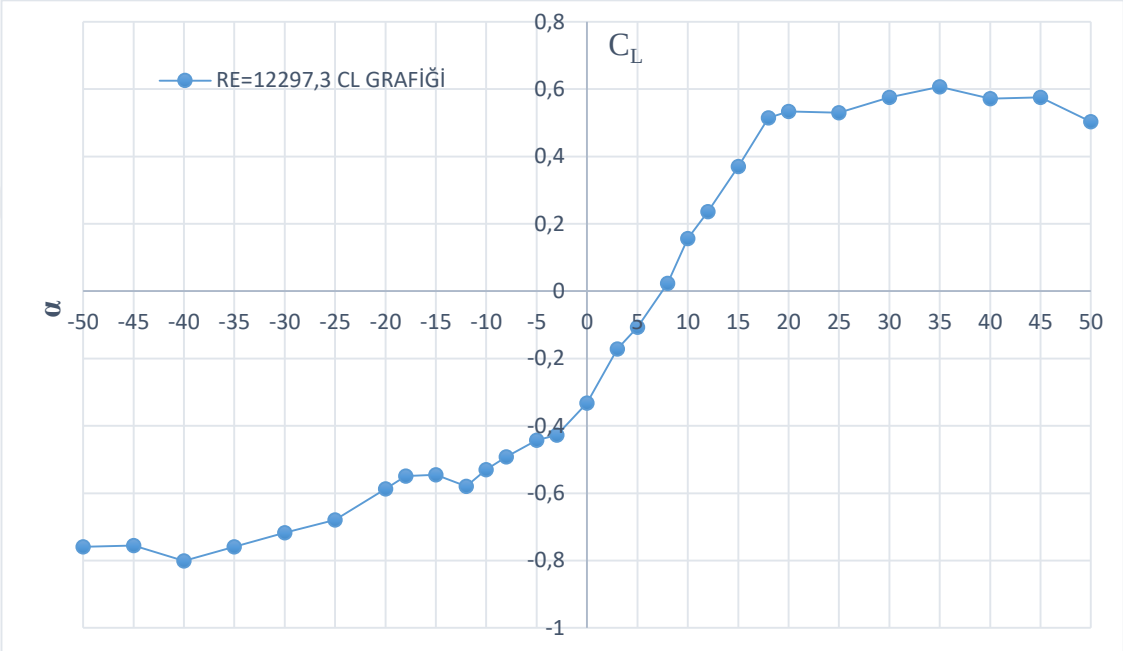
Her iki tabloda incelendiğinde her atak açısı için 3 farklı hızda 5-10-14 m/s için load-cellerden (yük hücrelerinden) okunan değerlerden, önceden prototip akçaağaç kanadı olmadan rüzgar tünelinden okunan referans değeri çıkartılarak kuvvetler ölçülmüş ve sonrasında her bir deney en az üç kere okuma-insan-bilgisayar-loadcellerin hatası olmaması için tekrarlanmıştır. Deneysel aerodinamik kuvvetler (sırasıyla kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri) F_L ve F_D değerleri okunduktan sonra (kaldırma ve sürüklenme katsayıları önceki bölümde bahsedilen çıkartılan formülasyonlardan) C_L ve C_D değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 4.2. Pozitif atak açıları için (α= 0º→ +50º) deneysel kaldırma ve direnç kuvvetleri.

maple_16cm_deneyler		Okunan Ort. (mN)		Referans (mN)		Maple		Maple		1.ölçüm		2.ölçüm		3.ölçüm	
0	5	12297,3	-52	85,33333	-23	65	-29	20,33333	-0,33192	0,232725	-51	85	-53	86	-52	85
	10	24594,59	-149,667	306,3333	-37	242	-112,667	64,33333	-0,32238	0,184082	-150	307	-149	306	-150	306
	14	34432,43	-195	462,3333	-35	366	-160	96,33333	-0,23358	0,140635	-196	463	-195	462	-194	462
3	5	12297,3	-38	82,66667	-23	65	-15	17,66667	-0,17168	0,202204	-38	83	-38	83	-38	82
	10	24594,59	-90,3333	300,6667	-41	243	-49,3333	57,66667	-0,14116	0,165006	-92	302	-89	300	-90	300
	14	34432,43	-133,333	448,3333	-40	367	-93,3333	81,33333	-0,13626	0,118737	-135	449	-133	448	-132	448
5	5	12297,3	-32,3333	85	-23	66	-9,33333	19	-0,10682	0,217464	-33	85	-32	85	-32	85
	10	24594,59	-70	300,6667	-42	243	-28	57,66667	-0,08012	0,165006	-72	301	-69	300	-69	301
	14	34432,43	-99	447,6667	-43	367	-56	80,66667	-0,08175	0,117764	-99	448	-99	448	-99	447
8	5	12297,3	-21	84	-23	65	2	19	0,022891	0,217464	-21	84	-21	84	-21	84
	10	24594,59	-27	300,3333	-46	243	19	57,33333	0,054366	0,164052	-27	302	-27	299	-27	300
	14	34432,43	-29,6667	450	-49	368	19,33333	82	0,028224	0,11971	-31	450	-28	450	-30	450
10	5	12297,3	-10,3333	85,33333	-24	65	13,66667	20,33333	0,156422	0,232725	-11	85	-10	85	-10	86
	10	24594,59	-3	302,6667	-47	242	44	60,66667	0,1259	0,17359	-3	305	-3	302	-3	301
	14	34432,43	20	455	-56	364	76	91	0,110951	0,132849	19	456	20	454	21	455
12	5	12297,3	-4,33333	85	-25	66	20,66667	19	0,23654	0,217464	-4	85	-5	85	-4	85
	10	24594,59	19	305,3333	-51	238	70	67,33333	0,200296	0,192666	19	307	19	304	19	305
	14	34432,43	61,33333	456,3333	-58	361	119,3333	95,33333	0,174213	0,139176	61	457	62	456	61	456
15	5	12297,3	8,333333	92	-24	65	32,33333	27	0,370071	0,309028	8	92	9	92	8	92
	10	24594,59	76	329,3333	-46	238	122	91,33333	0,349087	0,261339	75	332	76	329	77	327
	14	34432,43	161,3333	501,3333	-49	362	210,3333	139,3333	0,307062	0,203411	161	502	161	501	162	501
18	5	12297,3	22	96,33333	-23	67	45	29,33333	0,515047	0,335734	22	96	21	96	23	97
	10	24594,59	125,6667	347	-42	240	167,6667	107	0,479757	0,306167	126	347	125	347	126	347
	14	34432,43	251,6667	533,6667	-43	364	294,6667	169,6667	0,430179	0,247694	252	534	251	533	252	534
20	5	12297,3	24,66667	101	-22	65	46,66667	36	0,534123	0,412038	24	101	25	101	25	101
	10	24594,59	140,3333	357,3333	-38	240	178,3333	117,3333	0,510278	0,335734	140	359	141	356	140	357
	14	34432,43	267,3333	547	-36	367	303,3333	180	0,442832	0,262779	268	549	266	546	268	546
25	5	12297,3	25,33333	107	-21	67	46,33333	40	0,530308	0,45782	26	107	25	107	25	107
	10	24594,59	154,3333	384,3333	-34	243	188,3333	141,3333	0,538892	0,404407	155	383	154	386	154	384
	14	34432,43	281,3333	586	-29	369	310,3333	217	0,453051	0,316795	282	586	281	586	281	586
30	5	12297,3	30,33333	119	-20	68	50,33333	51	0,57609	0,58372	31	119	30	119	30	119
	10	24594,59	186,3333	424,3333	-30	246	216,3333	178,3333	0,61901	0,510278	187	425	186	424	186	424
	14	34432,43	341,3333	652,3333	-21	374	362,3333	278,3333	0,528965	0,406334	342	653	341	652	341	652
35	5	12297,3	35	128,3333	-18	69	53	59,33333	0,606611	0,679099	35	129	35	128	35	128
	10	24594,59	202	454,3333	-25	250	227	204,3333	0,649532	0,584674	199	452	204	456	203	455
	14	34432,43	364	705,3333	-14	378	378	327,3333	0,551836	0,477869	366	707	363	704	363	705
40	5	12297,3	37	141	-13	68	50	73	0,572275	0,835521	37	141	37	141	37	141
	10	24594,59	218	500,6667	-10	256	228	244,6667	0,652393	0,700083	218	500	218	501	218	501
	14	34432,43	382,3333	769	7	390	375,3333	379	0,547943	0,553296	383	769	382	769	382	769
45	5	12297,3	36,33333	150,3333	-14	69	50,33333	81,33333	0,57609	0,9309	36	149	37	152	36	150
	10	24594,59	213,3333	555,3333	-10	260	223,3333	295,3333	0,63904	0,700083	214	556	213	555	213	555
	14	34432,43	378	846,3333	9	394	369	452,3333	0,538697	0,660354	381	848	376	845	377	846
50	5	12297,3	32	157,6667	-12	71	44	86,66667	0,503602	0,991943	31	158	33	158	32	157
	10	24594,59	197,6667	575,3333	-3	262	200,6667	313,3333	0,574182	0,896563	197	576	198	575	198	575
	14	34432,43	361	878,3333	20	398	341	480,3333	0,49782	0,701231	361	880	361	877	361	878

4.1.1. Re=12300 için C_L-C_D Sonuçları

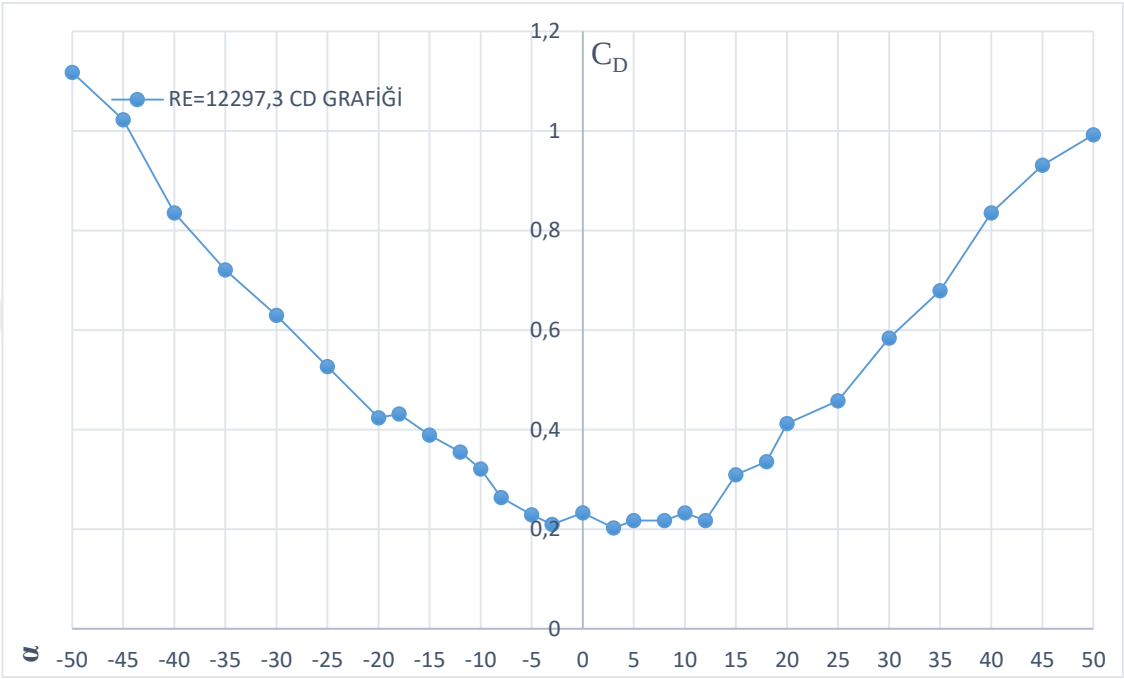
Biyo-esinlenmeli prototip kanat üzerinde samara (akçaağaç prototip kanadında) α= -50º→ +50º arasında atak açıları değiştirdikçe kanat üzerine gelen aerodinamik kuvvetler ölçülmüştür. Maksimum aerodinamik kaldırma kuvveti u=5 m/s için α= +35º için ölçülmüş ve C_L= 0,606 deneysel olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Re=12300 için biyo-esinlenmeli prototip kanat üzerinde farklı atak açılarında kaldırma katsayıları.

Re=12300 için atak açısının (α=0º→+50º) artmasıyla birlikte sürüklenme katsayısı değerleri de artmaya başlamıştır. En düşük sürüklenme katsayısı değerleri ise atak açısının α= -3º ve α= +3º olduğu durumlarda sırasıyla α= -3º→ C_D = 0,209 ve α= +3º→C_D = 0,202 değerleri olduğu deneysel hesaplamalardan bulunmuştur. Bu değerler atak açısı α= + 15º-18º olana kadar devam etmiş daha sonrasında hızla 1 değerine doğru artmaya başlamıştır. Minimum atak açısı 0 derecede değil; -3 derecede en düşük sürüklenme katsayısı elde edilmiştir. Bunun nedeni kanadın aerodinamik olarak yapısı incelendiğinde akçaağaç tohumu simetrik gelmemektedir. Akçaağacın genel şeklinden dolayı kamburluk ve asimetrilik vardır. Bu kanat profili yapısı da kanadın bu bölgelerinde hava akımlarında negatif basınç akımı oluşturarak buralarda vortekslerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu

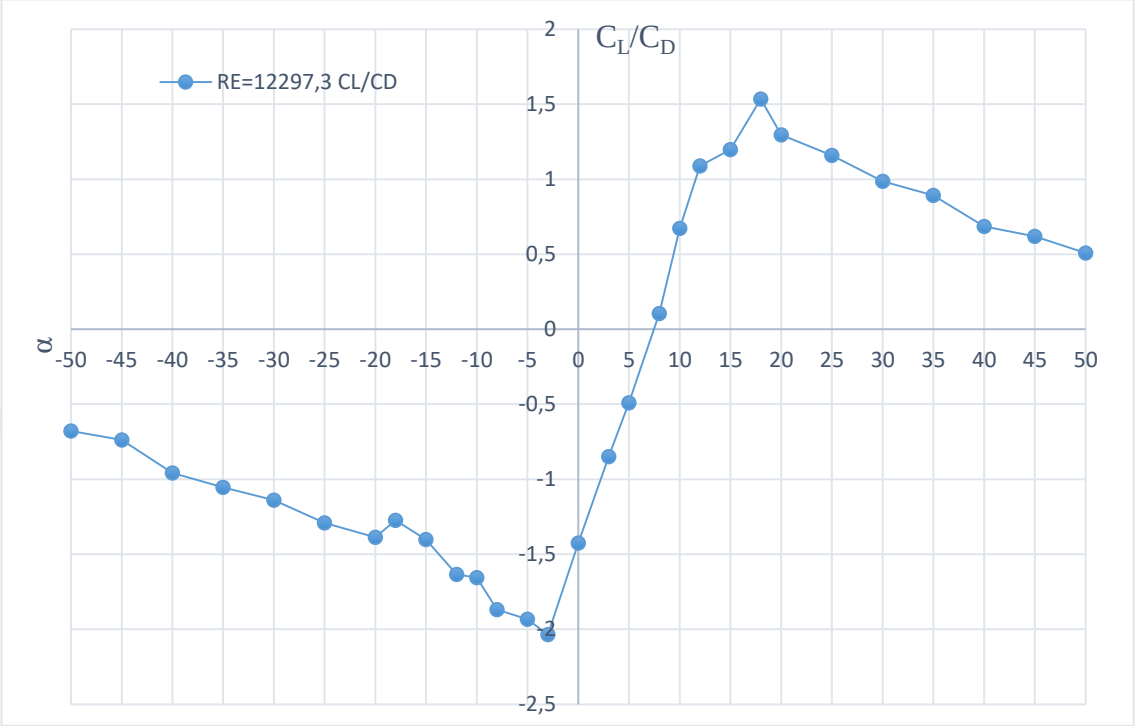
nedenle eğri tam olarak 0 dan geçmemektedir. Bir miktar daha aşağıya düşmektedir. Negatif atak açılarında ise (α=0º→-50º) -50º ye kadar kademeli olarak sürüklenme katsayısının da arttığı en yüksek sürüklenme katsayısının ise α=-50º için C_D = 1,117 e ulaştığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.2.).



Şekil 4.2. Re=12300 için biyo-esinlenmeli prototip kanat üzerinde farklı atak açılarında sürüklenme katsayıları.

Aerodinamik problemlerde; uçak kanatlarında, türbin pervanelerinde, helikopter kanatlarında ve mikro-nano hava araçlarında aerodinamik performansı belirlenirken çoğunlukla kaldırma kuvvetinin yahut kaldırma katsayılarının, sürüklenme kuvvet-katsayılarına oranına bakılır. Bu özelliğin (C_L/C_D oranın) yüksek olması istenir. L/D (Lift/Drag) maksimum olması gerekir. Bu durumda sürüklenme katsayısının oldukça düşük, kaldırma katsayısının ise kanat üzerine gelen kuvvetlerde olabildiğince yüksek olması beklenir. Burada C_L/C_D oranı en yüksek 1,534 olarak, atak açısı pozitif α=18º için deneysel olarak elde edilmiştir. Bu değerden sonra aerodinamik bu oran hızla pozitif atak açılarında (α=0º→+50º) 0.5 değerine kadar düşmüştür. En düşük C_L/C_D oranı ise α= -3º için yaklaşık -2,036 dir. Bu aerodinamik oran negatif atak açılarında -3º değerinden sonra

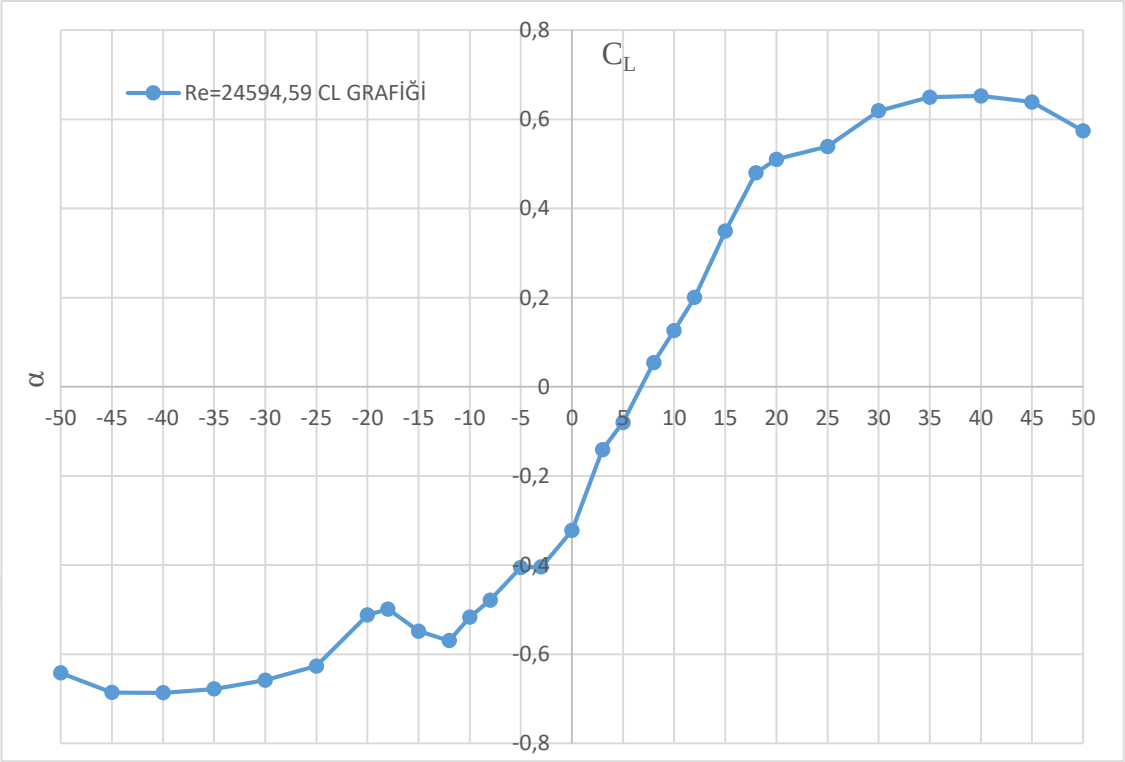
artmış fakat yine de negatif değerlerde kalmıştır (α=0º→-50º, C_L/C_D = -1,42623→ -0,67918) (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Re=12300 için biyo-esinlenmeli prototip kanat üzerinde farklı atak açılarında C_L/C_D oranları.

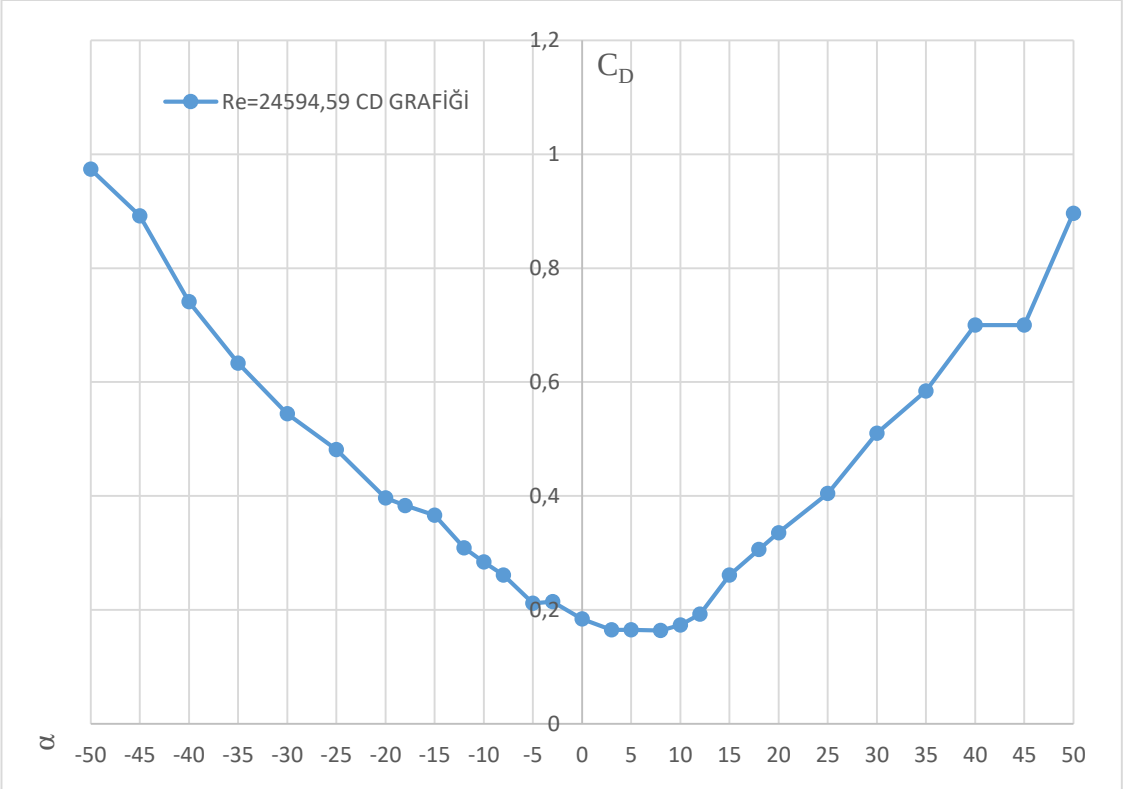
4.1.2. Re=24600 için C_L-C_D Sonuçları

Rüzgar tünelinde hava hızı arttırıldığında u=10 m/s için Re=24600 rüzgar tüneli sabit sıcaklıkta hava hızımızda prototip kanadımızın samara (akçağaç tohumunun) üzerine gelen kaldırma kuvveti ve katsayıları incelendiğinde atak açılarının artmasıyla birlikte kaldırma katsayısının da artmaya devam ettiği görülmüştür (α=0º→50º, C_L= -0,322→ 0,574). Maksimum kaldırma katsayısı ise pozitif atak açısı α=45º için C_L= 0,652 deneysel olarak elde edilmiştir. Bu değerden sonra α=+50º için aerodinamik olarak kaldırma da C_L= 0,574 değerine düşmüştür. Negatif atak açılarında ise negatif aerodinamik olarak azalan kaldırma katsayıları elde edilmiştir (α=0º→-50º, C_L= -0,32238→ -0,6419) (Şekil 4.4.)



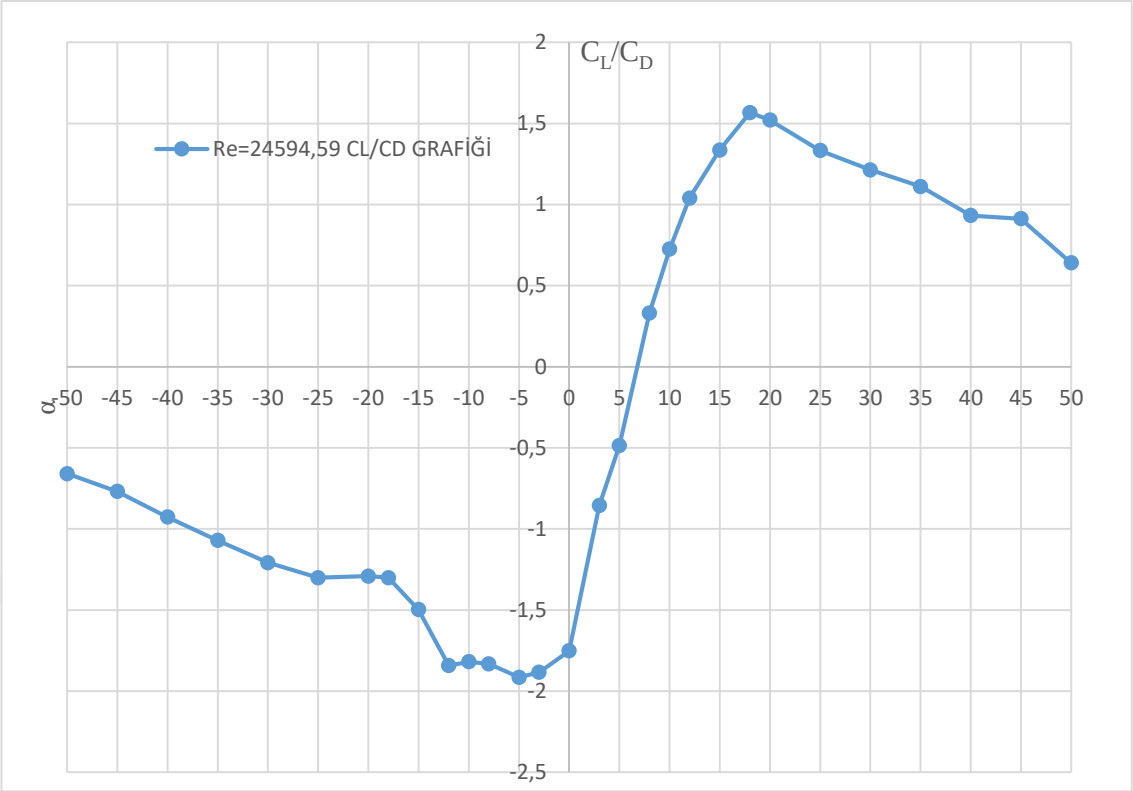
Şekil 4.4. Re=24600 için biyo-esinlenmeli prototip kanat üzerinde farklı atak açılarında kaldırma katsayıları.

Aerodinamik olarak Re=24600 için sürüklenme katsayılarında pozitif atak açıları için deneysel olarak incelendiğinde özellikle düşük atak açılarında (α=0º-3º-5º-8º-10º) hafif bir düşme oluşmuş C_D= 0,184- 0,165- 0,1650- 0,164- 0,173 değerleri elde edilmiş fakat α=12º itibaren sürüklenme katsayıları da artmıştır. Minimum sürüklenme katsayısı ise C_D= 0,164 ile pozitif atak açısı α=8º için bulunmuştur. Negatif atak açıları içinse aerodinamik sürüklenme katsayısı grafiği simetrik bir şekilde atak açısı arttıkça artmaya devam etmiştir (α=0º→-50º, C_D= 0,184→ 0,973). Maksimum sürüklenme katsayısı negatif atak açısında α=-50º değeri için C_D= 0,973 kadar çıkmıştır (Şekil 4.5.)



Şekil 4.5. Re=24600 için biyo-esinlenmeli prototip kanat üzerinde farklı atak açılarında sürüklenme katsayıları.

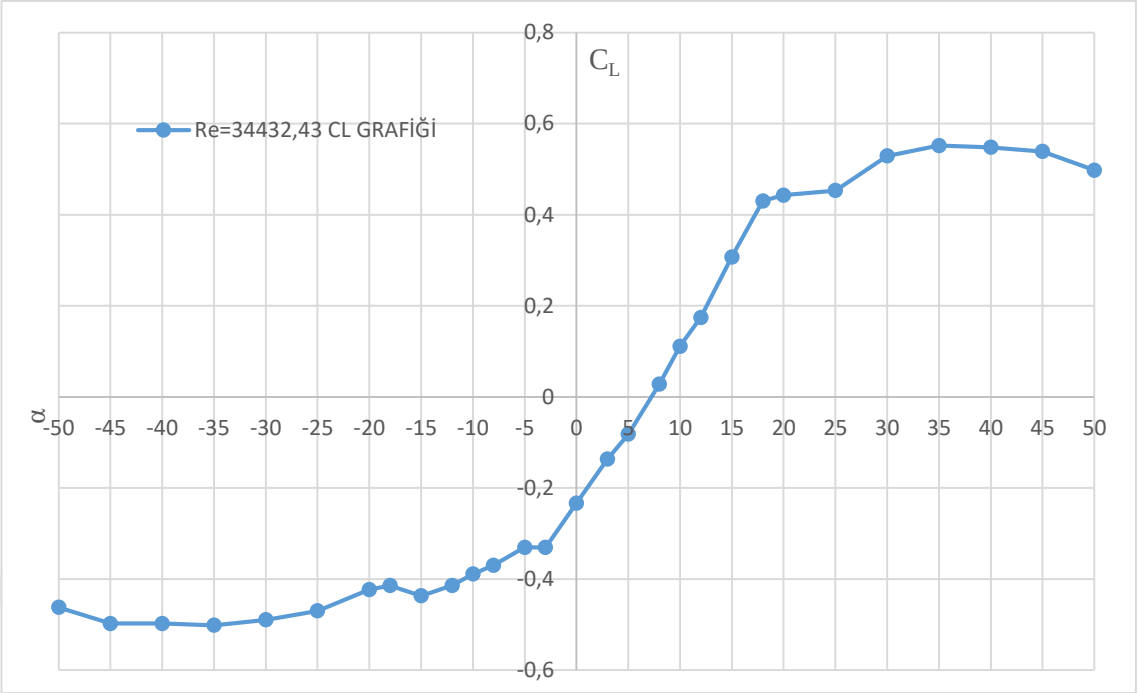
Re=24600 değerinde farklı atak açıları için aerodinamik özellikler incelendiğinde bu hızda u=10m/s de; u=5m/s ile aynı atak açısı için optimum kaldırma direnç oranı bulunmuştur (α=18º için C_L/C_D=1,566). Bu atak açısından sonra diğer Reynolds değeri ile benzer şekilde kademeli olarak oran azalmaya başlamıştır (α=18º→50º, C_L/C_D=1,566 →0,640). Negatif atak açıları içinse negatif değerlerde aerodinamik özellikler hesaplanmıştır (α=0º→-50º, C_L/C_D= -1,751→ -0,659). Minimum oran ise α= -5º için C_L/C_D= -1,914 kadar düşmüştür (Şekil 4.6.)



Şekil 4.6. Re=24600 için biyo-esinlenmeli prototip kanat üzerinde farklı atak açılarında C_L/C_D oranları.

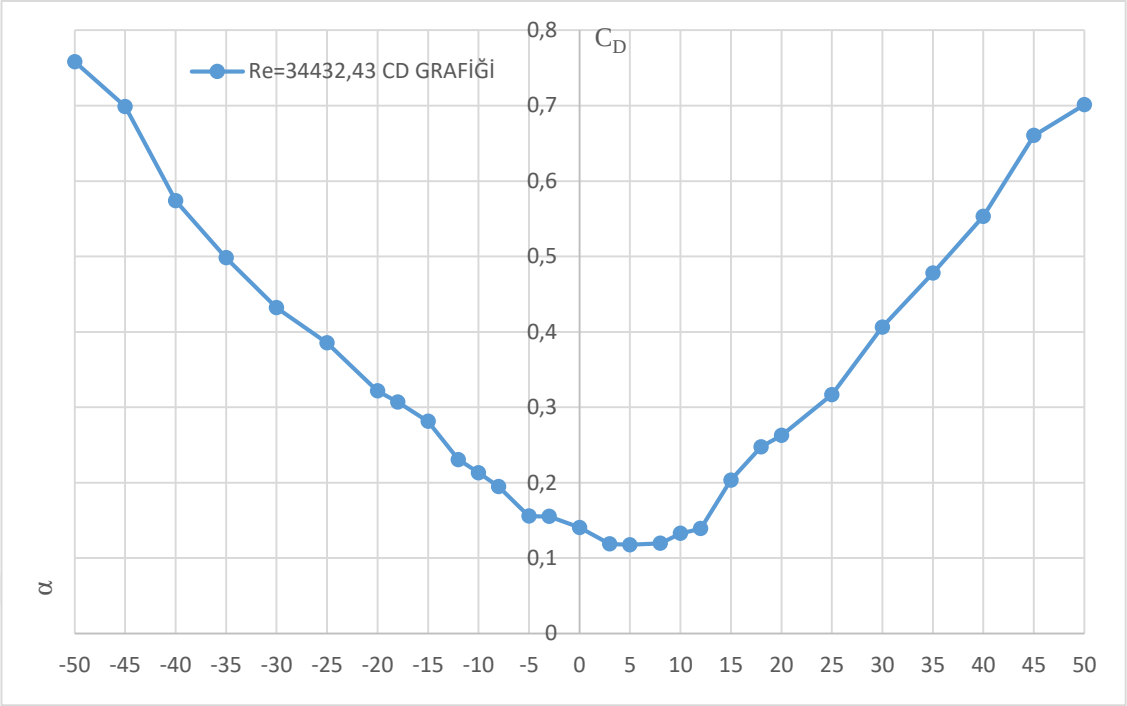
4.1.3. Re=34440 için C_L-C_D Sonuçları

Prototip akçaağaç kanadımızın bulunduğu rüzgar tünelimizi en son u=14m/s hızına ayarlayarak Re=34440 için aerodinamik özelliklerini inceledik. Burada aerodinamik olarak kaldırma kuvveti ve katsayısının maksimum olduğu açı α=35º olmuştur ve bu atak açısında kaldırma katsayısı maksimum C_L=0,551 değerine ulaşmaktadır. Ayrıca minimum kaldırma katsayısına da negatif atak açısı α= -35º de oluşmuştur (C_L= -0,501). Rüzgar tünelinin içerisindeki hız ve türbülanslar arttığı için kanat üzerinde oluşan kaldırma kuvveti de bir miktar daha diğer hız- Reynolds değerlerine göre düşmüştür($C_{Lmax\ Re=34440}$=0,551) (Şekil 4.7.)



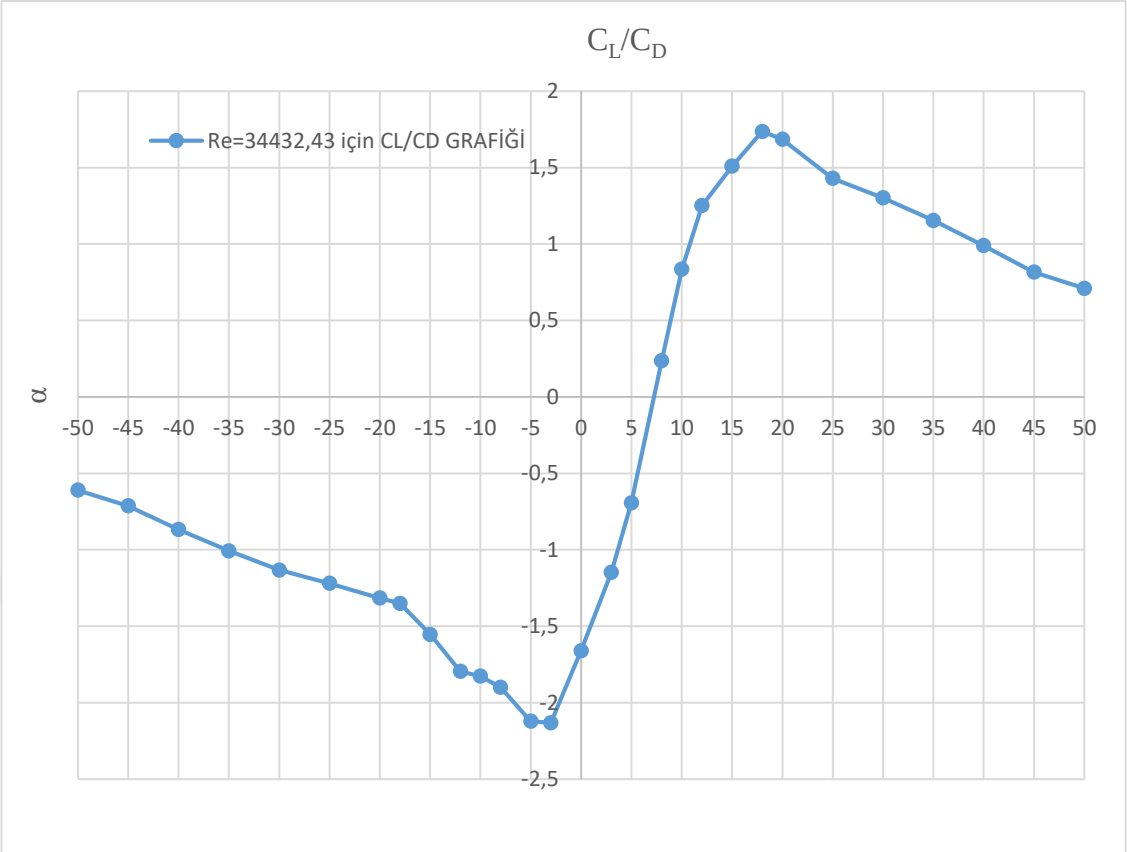
Şekil 4.7. Re=34440 için biyo-esinlenmeli prototip kanat üzerinde farklı atak açılarında kaldırma katsayıları.

Sürüklenme katsayıları incelendiğinde ise diğer hızlarda olduğu gibi düşük atak açılarında α=0º-3º-5º ve 8º ufak bir düşüş olmuştur (Atak açıların sırasıyla C_D= 0,140635- 0,118- 0,117- 0,119). Fakat α=8º den itibaren atak açılarının da artmasıyla birlikte sürüklenme katsayıları da artmıştır (α=8º→50° C_D= 0,1191→ 0,701). Maksimum sürüklenme katsayısı diğer hızlarda da olduğu gibi negatif atak açısı α=-50° için C_D= 0,758 deneysel sonuçlardan bulunmuştur (Şekil 4.8.).



Şekil 4.8. Re=34440 için biyo-esinlenmeli prototip kanat üzerinde farklı atak açılarında sürüklenme katsayıları.

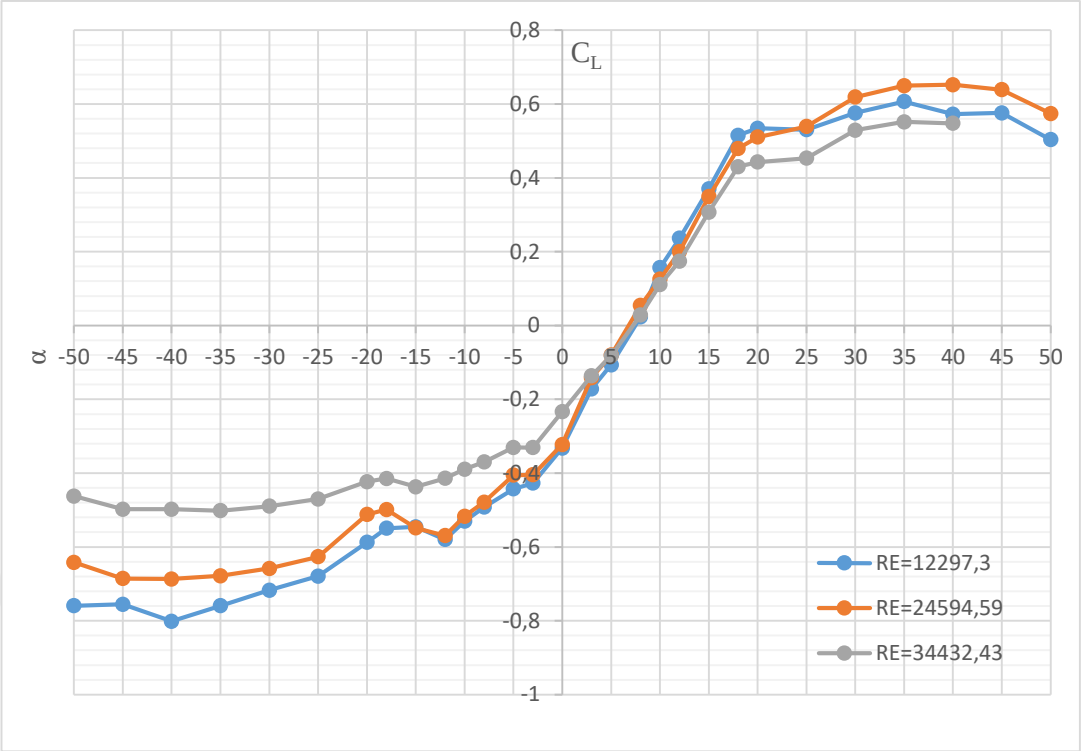
En son olarak aerodinamik özelliklerden kaldırmanın sürüklenmeye oranına bakıldığında, optimum kaldırmanın sürüklenmeye oranı 18° de elde edildiği gözlemlenmiştir ($\alpha_{optimum}$=18º→C_L/C_{Dmax}= 1,736). Minimum kaldırmanın sürüklenmeye oranı ise -3° ve -5° için bulunmuştur ($\alpha_{minimum}$= -3° - -5°→ C_L/C_{Dmin}= -2,131- -2,121). Yüksek Reynolds değerlerinde görüldüğü gibi negatif atak açılarında negatif aerodinamik özellikler bulunmuştur (α=0→-50°, C_L/C_D=-1,660→-0,609) (Şekil 4.9.).



Şekil 4.9. Re=34440 için biyo-esinlenmeli prototip kanat üzerinde farklı atak açılarında C_L/C_D oranları.

4.1.4. Farklı Reynolds değerlerine göre kaldırma katsayılarının değişimi

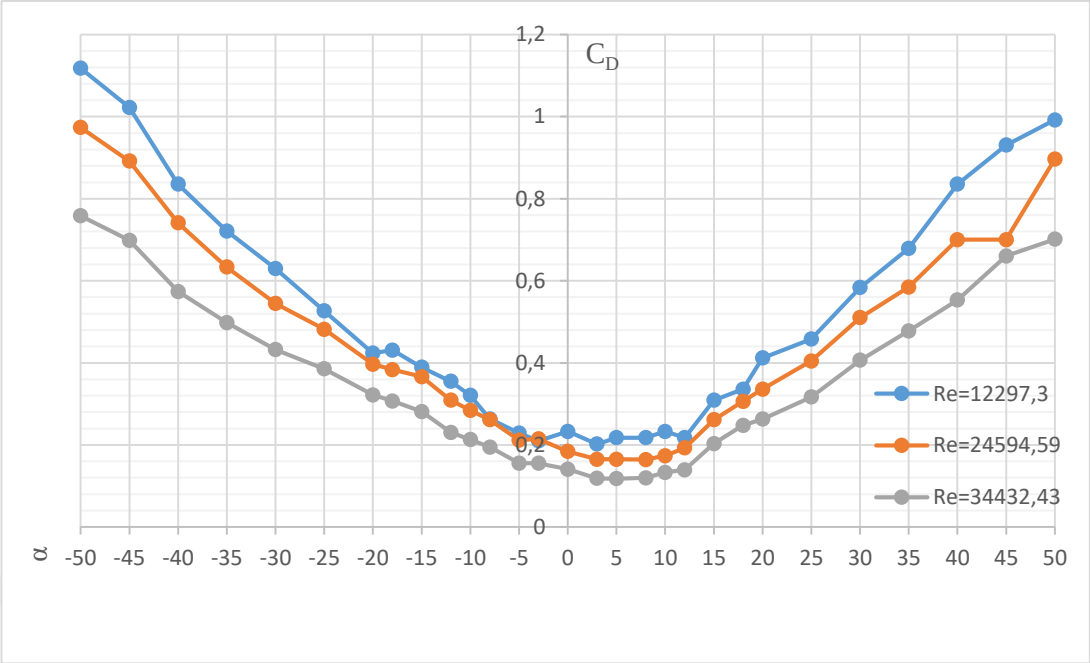
Yapılan deneysel çalışmalarda rüzgar tünelinde hava hızı değiştirilerek ölçümler alınmıştır. Özellikle uçak kanatları ve rüzgar türbini pervanelerde rüzgar hızının etkisi oldukça önemlidir. Deneysel kaldırma katsayısının değişimine bakıldığında Re=24594,60 için maksimum C_L değerine ulaşıldığı Şekil 4.10' da görülmektedir. Ayrıca Reynolds sayısı ile C_L değişiminin oldukça birbirine yakın olduğu, ancak Re=34440 değerinde minimum kaldırma katsayılarına ulaşıldığını özellikle pozitif atak açıları için Şekil 4.10' dan incelemek mümkündür.



Şekil 4.10. Reynolds değerine göre samara (akçaağaç) kanadı üzerinde farklı atak açılarında aerodinamik C_L değişimi.

4.1.5. Farklı Reynolds değerlerine göre sürüklenme katsayılarının değişimi

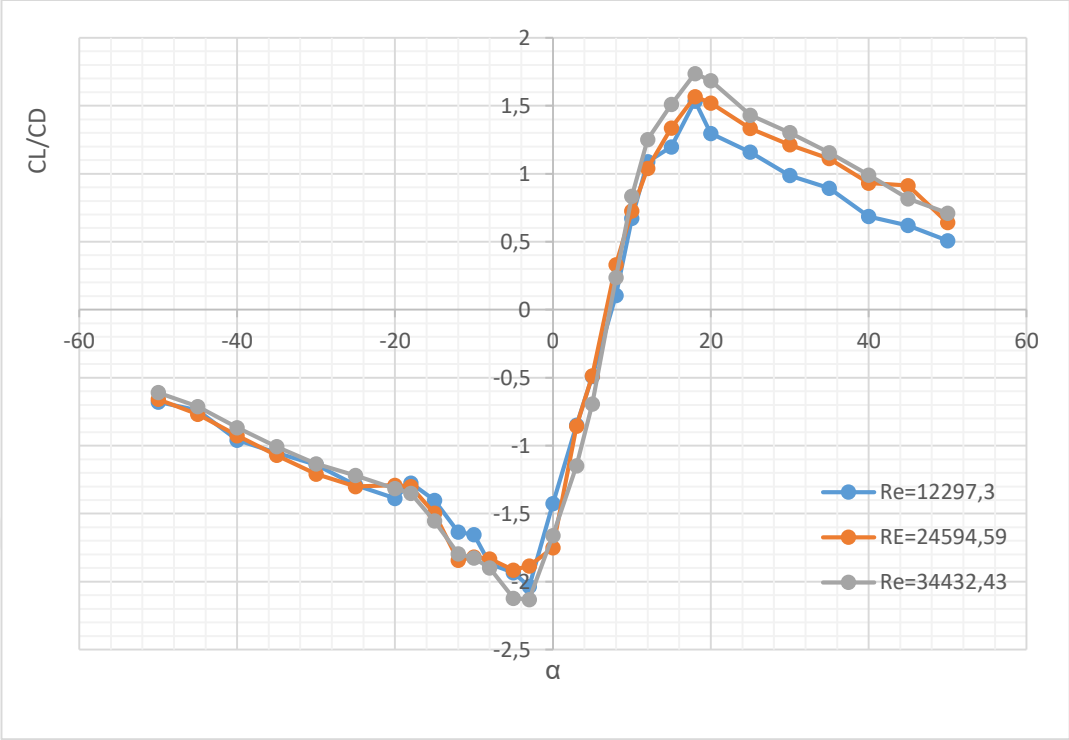
Sürüklenme katsayısı değişimleri incelendiğinde ise C_D değerleri beklenildiği gibi negatif ve pozitif atak açıları arttıkça artmıştır. Kaldırma katsayılarında olduğu gibi bir açıya kadar yükselip oluşan stall durma noktasından sonra azalmamış, sürekli olarak kaldırma katsayısı arttıkça sürüklenme katsayıları da artmaya devam etmiştir. Ayrıca maksimum C_D değerine negatif atak açısı -50° için Re=12300 de ulaşılmıştır (C_{Dmaks}=1,117). Minimum sürüklenme katsayısı Re=34440 için $\alpha=5° \rightarrow C_{D\ min} = 0{,}117$ bulunmuştur (Şekil 4.11.)



Şekil 4.11. Reynolds değerine göre samara (akçaağaç) kanadı üzerinde farklı atak açılarında aerodinamik C_D değişimi.

4.1.6. Farklı Reynolds değerlerine göre C_L/C_D oranın değişimi

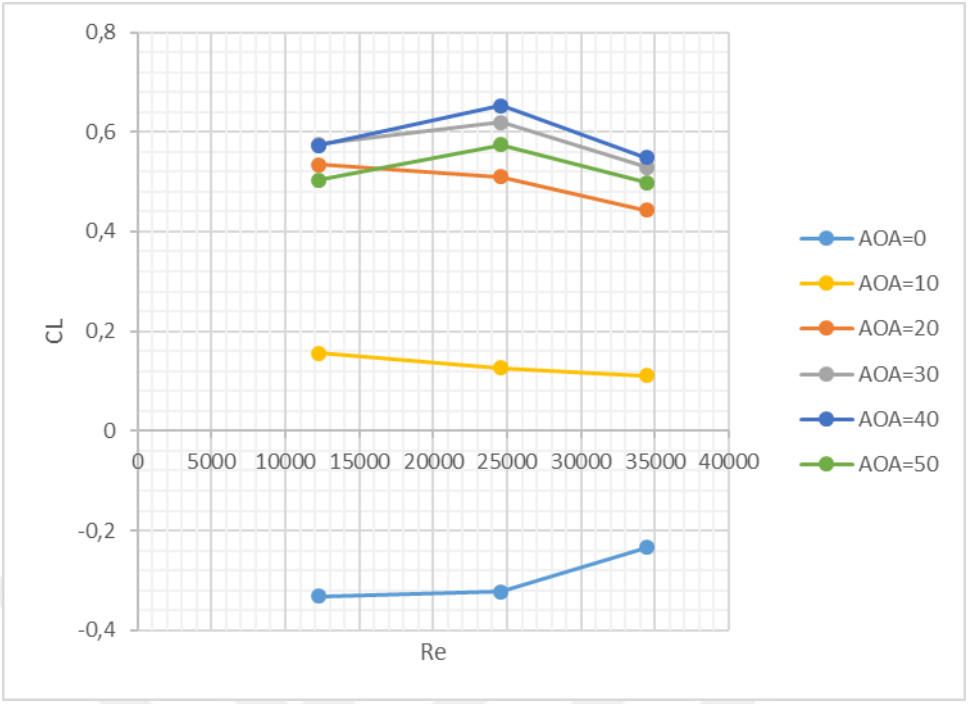
Reynolds değerleri atak açılarına göre incelendiğinde α=18° için maksimum aerodinamik oran Re=34440 değeri için C_L/C_{Dmaks}= 1,736 olmuştur. Bu değerden sonra C_L/C_D oranı atak açılarının artmasıyla birlikte düşmüştür. Pozitif atak açılarında Reynolds değerlerinin artmasıyla genel olarak benzer eğilim göstermekle birlikte, yüksek Reynolds sayılarında yüksek aerodinamik C_L/C_D oranları bulunmuştur. Negatif atak açılarında ise minimum oran α=-3° için Re=34440 de C_L/C_{Dmin}= -2,131 dir. Reynolds sayılarının artmasıyla birlikte negatif atak açılarında aerodinamik C_L/C_D oranlarında azalış olmuştur (Şekil 4.12.)



Şekil 4.12. Reynolds değerine göre samara (akçaağaç) kanadı üzerinde farklı atak açılarında aerodinamik C_L/C_D oranı değişimi.

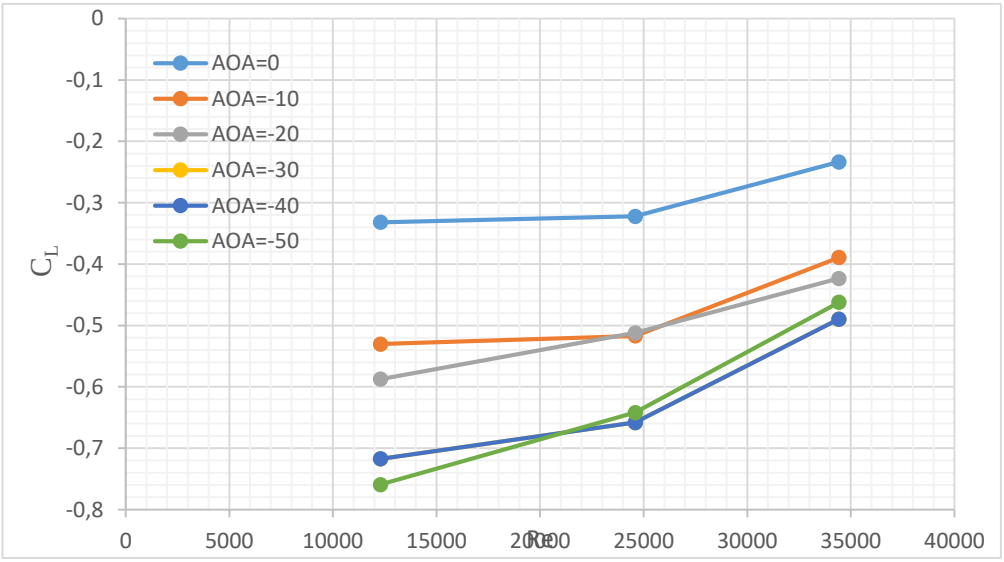
4.1.7. Atak açılarına göre aerodinamik karakteristiklerin değişimi

Kaldırma kuvvetinin atak açılarına göre değişimine bakıldığında negatif atak açılarında negatif kaldırma kuvveti, pozitif atak açılarında ise pozitif kaldırma kuvveti elde edildiği görülmektedir. Şekil 3.13 incelendiğinde Re=0→4000 arasındaki değişime bakıldığında atak açılarından α=0° için C_L=-0,2→-0,4 arasında değişmiş diğer atak açılarında ise C_L pozitif çıkmıştır (C_L=0,2→0,8). Bunun nedeni ise atak açısı sıfır derecede akçaağaç profili eğimli ve asimetrik yapısından dolayı bir miktar kanadın orta ekseninde girdap bölgeleri oluşturmaktadır. Bu da kanadın üzerine gelen kaldırma kuvvetinde negatif basınç ve dolayısıyla negatif kaldırma etkisi oluşturmaktadır (Şekil 4.13.).



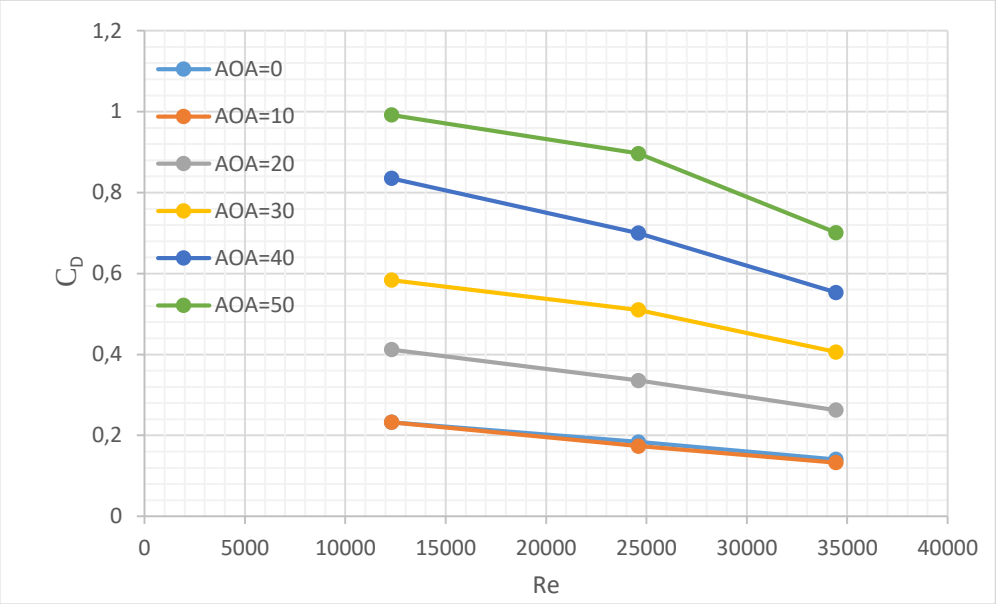
Şekil 4.13. Pozitif atak açılarında aerodinamik kaldırma katsayısının değişimi.

Negatif atak açılarında ise görüldüğü gibi atak açılarının artmasıyla birlikte α=0°→-50° kaldırma katsayıları da Reynolds sayılarının artmasıyla birlikte azalmıştır (C_L=-0,2→-0,8). Negatif atak açılarında maksimum kaldırma katsayısı 0 derece atak açısı için -0,2, minimum atak açısı -50 derece içinse C_L minimum -0,8 e yaklaşmıştır ($C_{L\text{-}50°}$=0,759) (Şekil 4.14.).



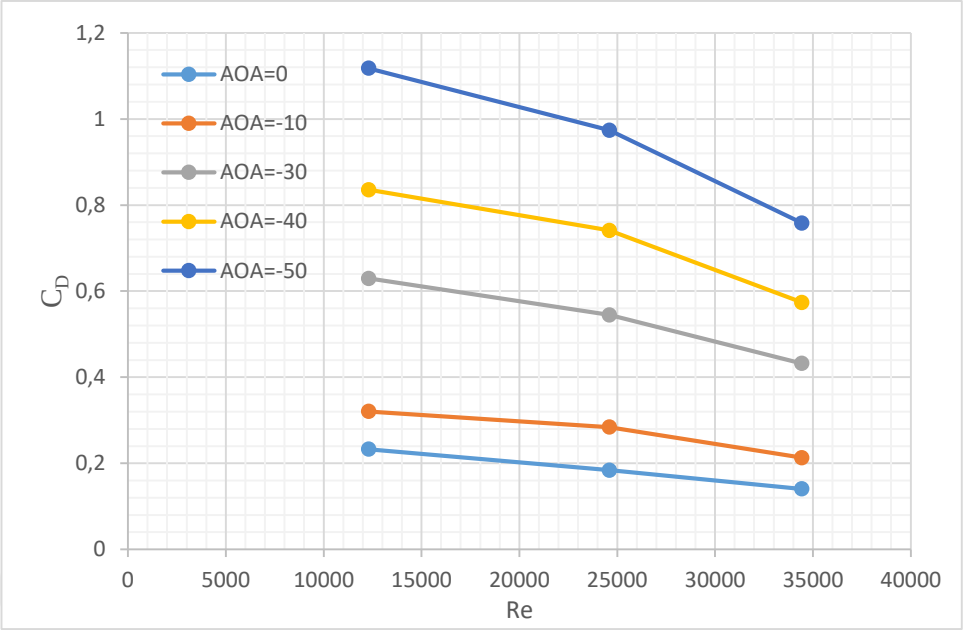
Şekil 4.14. Negatif atak açılarında aerodinamik kaldırma katsayısının değişimi.

Sürüklenme katsayıları ise atak açıları arttıkça artmıştır. Maksimum artış 50 derece için olmuş fakat 10 derece ve 0 derece için sürüklenme katsayıları neredeyse birbirine yakın çıkmıştır. Ayrıca Reynolds sayılarının artmasıyla birlikte sürüklenme katsayılarının artış oranında bir miktar da düşüş olmuştur (Şekil 4.15.).



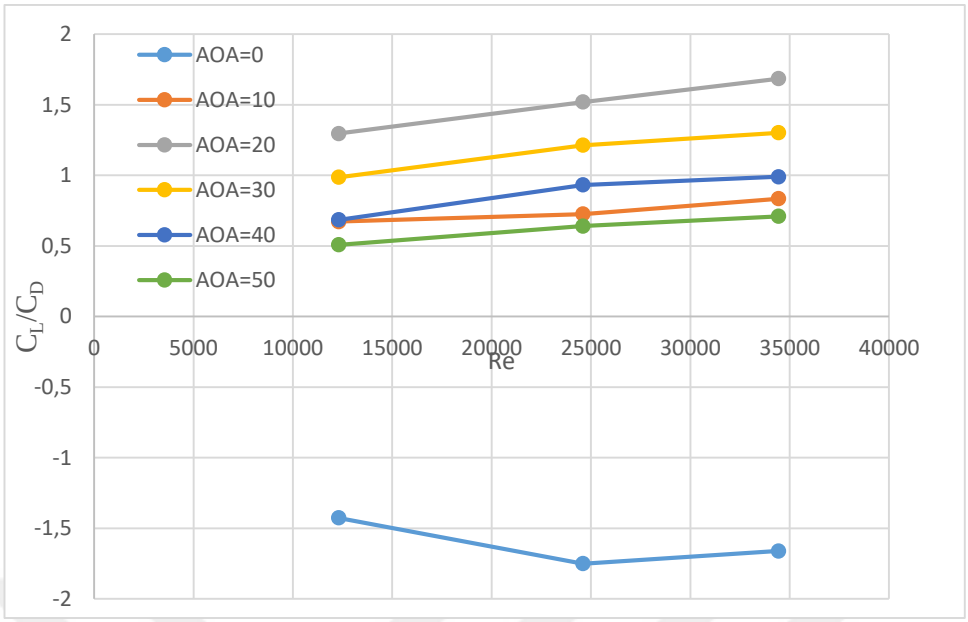
Şekil 4.15. Pozitif atak açılarında aerodinamik sürüklenme katsayısının değişimi.

Negatif atak açılarında da Şekil 4.16 dan görüldüğü gibi 0 dereceden -50 dereceye doğru artan bir grafik olmakla birlikte maksimum C_D= 1,117 değerine negatif 50 derecede ulaşmaktadır. Ayrıca bu grafikte pozitif atak açılarından farklı olarak negatif 10 ile 0 derece arasında belirgin bir fark oluşup negatif 10 derecede direnç katsayılarında bir miktar daha artmıştır (Şekil 4.16.).



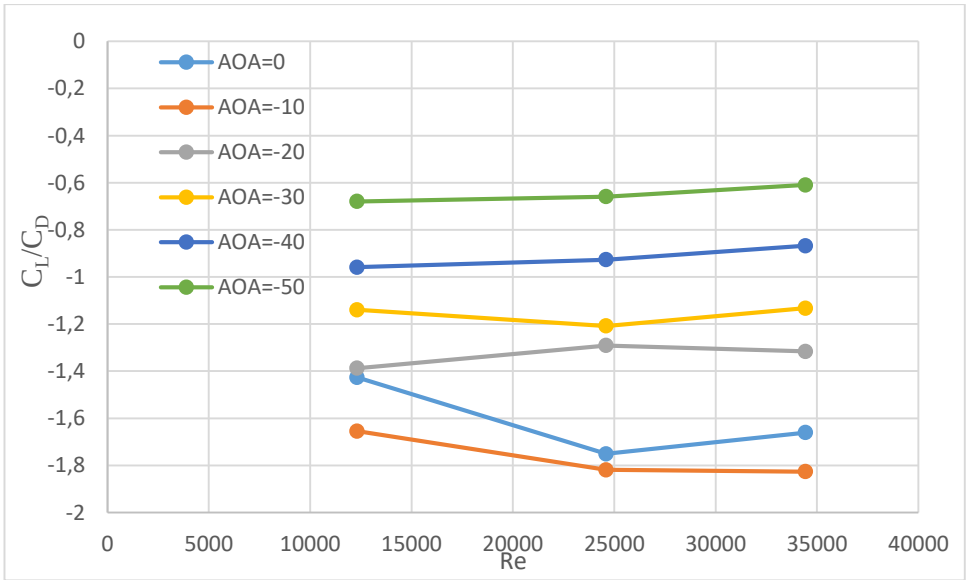
Şekil 4.16. Negatif atak açılarında aerodinamik sürüklenme katsayısının değişimi.

Kaldırmanın sürüklenmeye oranına bakılıp; Şekil 4.17. incelendiğinde kanadın optimum dizayn açısını belirlememizi sağlamaktadır. Çünkü grafik incelendiğinde kaldırma direnç katsayısı oranı 0 derece için negatif, 10 derece için 0 ile 1 arasında değişmekte, ancak maksimum değerlerine 20 derece pozitif atak açısında ulaşmaktadır. Deneysel değerlerde incelendiğinde yaklaşık olarak α=18° için kaldırma katsayısına ve kaldırmanın direnç katsayı oranına ulaşılmaktaydı. Yani dizayn noktasında akçaağaç tohumu dizayn edilirken aerodinamik olarak en iyi uçuş karakteristiklerini pozitif atak açısı olan 18 20 derece civarında sağlamaktadır.



Şekil 4.17. Pozitif atak açılarında C_L/C_D oranı değişimi.

Negatif atak açılarında ise atak açısı -10 -20 dereceye doğru artmasıyla birlikte doğrusal olarak C_L/C_D oranı da negatif olarak artmıştır. Ancak -50° ve -40° negatif atak açılarında bir miktar daha yüksektir. Minimum atak açısına C_L/C_D oranına -10° için Re=34440 için ulaşılmıştır. ($C_L/C_{D\text{-min}}$= -1,826) (Şekil 4.18.).



Şekil 4.18. Negatif atak açılarında C_L/C_D oranı değişimi.

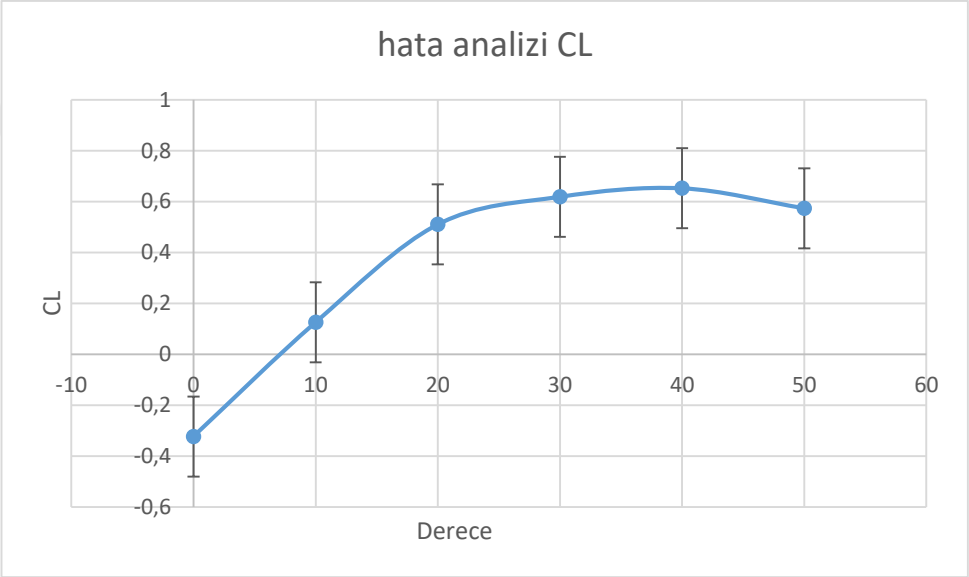
4.1.8 Belirsizlik Analizi için Hata Hesabı

C_L ve C_D için fonksiyon hatası;

$$\Delta C_L = \sqrt{\left(\frac{\partial C_L}{\partial F}\Delta F\right)^2 + \left(\frac{\partial C_L}{\partial A}\Delta A\right)^2 + \left(\frac{\partial C_L}{\partial U}\Delta U\right)^2} \quad (4.1)$$

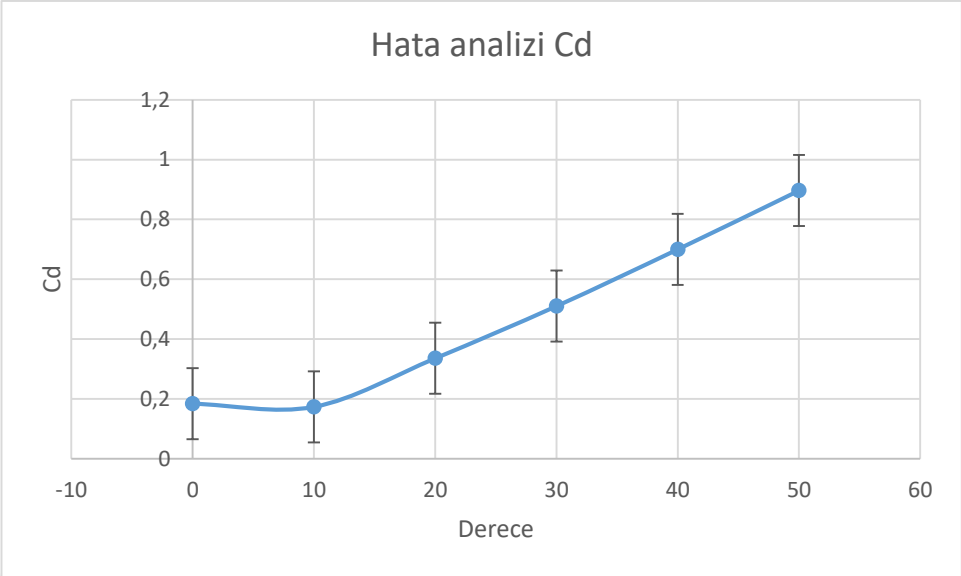
$$\Delta C_D = \sqrt{\left(\frac{\partial C_D}{\partial F}\Delta F\right)^2 + \left(\frac{\partial C_D}{\partial A}\Delta A\right)^2 + \left(\frac{\partial C_D}{\partial U}\Delta U\right)^2} \quad (4.2)$$

şeklinde bulunur.



Şekil 4.19. Re=24600 için kaldırma katsayılarının hata analizi.

Yukarıdaki grafikten de görüleceği üzere hata analizi detaylı hesaplandığında oldukça düşük hata çubukları elde edilmiştir. Re=12300 için kaldırma katsayılarının 0 derece için 0.0203, 10° için 0.0168, 20° için 0.0261, 30° için 0.0274, 40° için 0.0273, 50° için 0,0252 hatası bulunmuştur. Re=24600 için 0°→50°, ΔC_L= 0.0098→ 0.0135 hatası hesap edilmiş, Re=34440 için 0°→50°, ΔC_L= 0.00621→ 0.0087 bulunmuştur (Şekil 4.19.).



Şekil 4.20. Re=24600 için sürüklenme katsayılarının hata analizi.

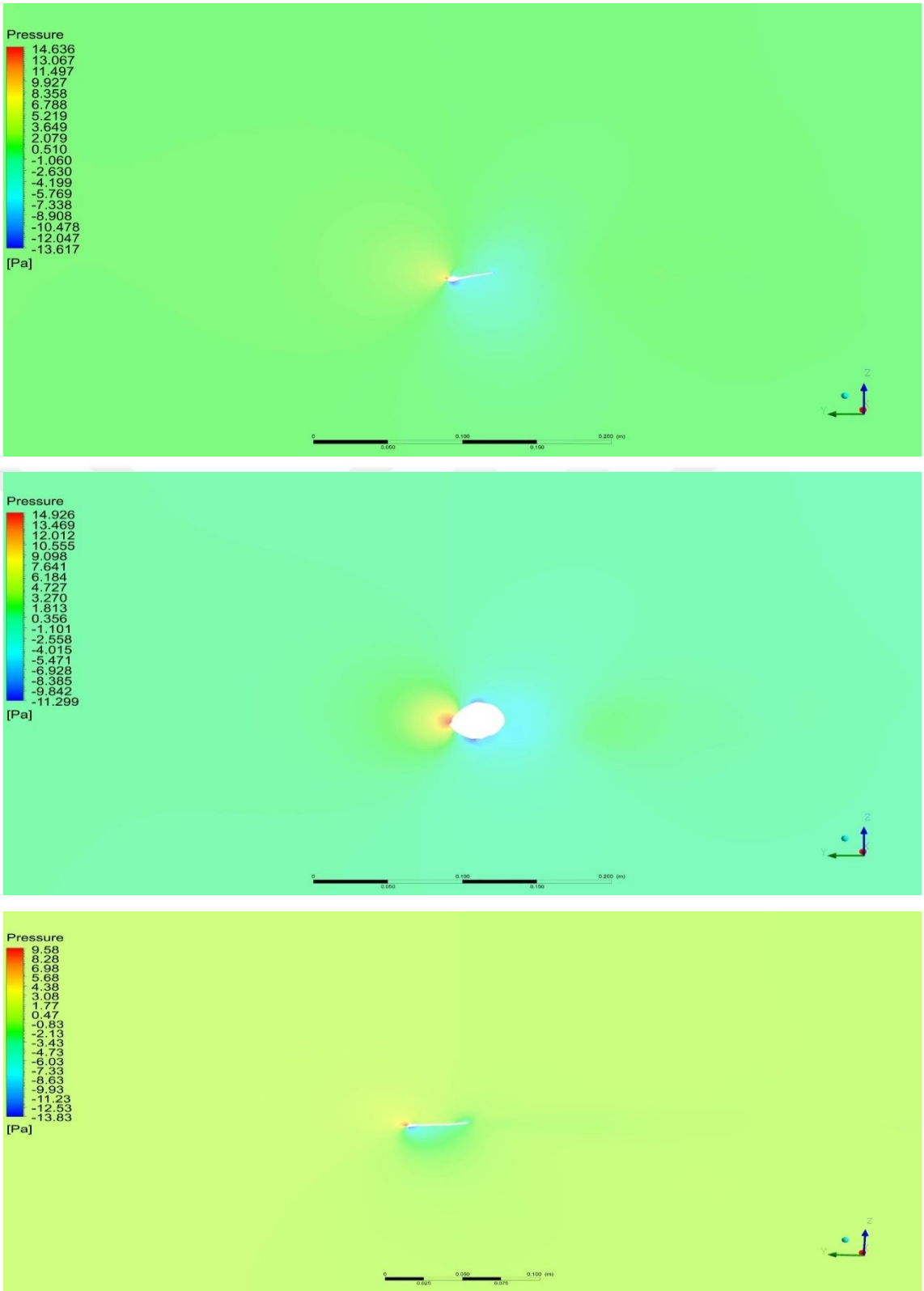
Re=12300 için sürüklenme katsayılarının 0 derece için 0.0105, 10° için 0.0105, 20° için 0.0179, 30° için 0.023, 40° için 0.033, 50° için 0,038 hatası bulunmuştur. Re=24600 için 0°→50°, ΔC_D= 0.00491 → 0.0178 hatası hesap edilmiş, Re=34440 için 0°→50°, ΔC_D= 0.0033→ 0.0101 bulunmuştur (Şekil 4.20.).

4.2. CFD Sonuçları ve Karşılaştırma

Deneysel yapılan çalışmalardan sonra ANSYS FLUENT programında simülasyon çalışmalarına geçilmiştir. Burada 0°-20°-40° ve negatif açılar için analiz sonucunda elde edilen akçaağaç kanadının belirli kesitlerindeki hız ve basınç grafikleri verilmiştir.

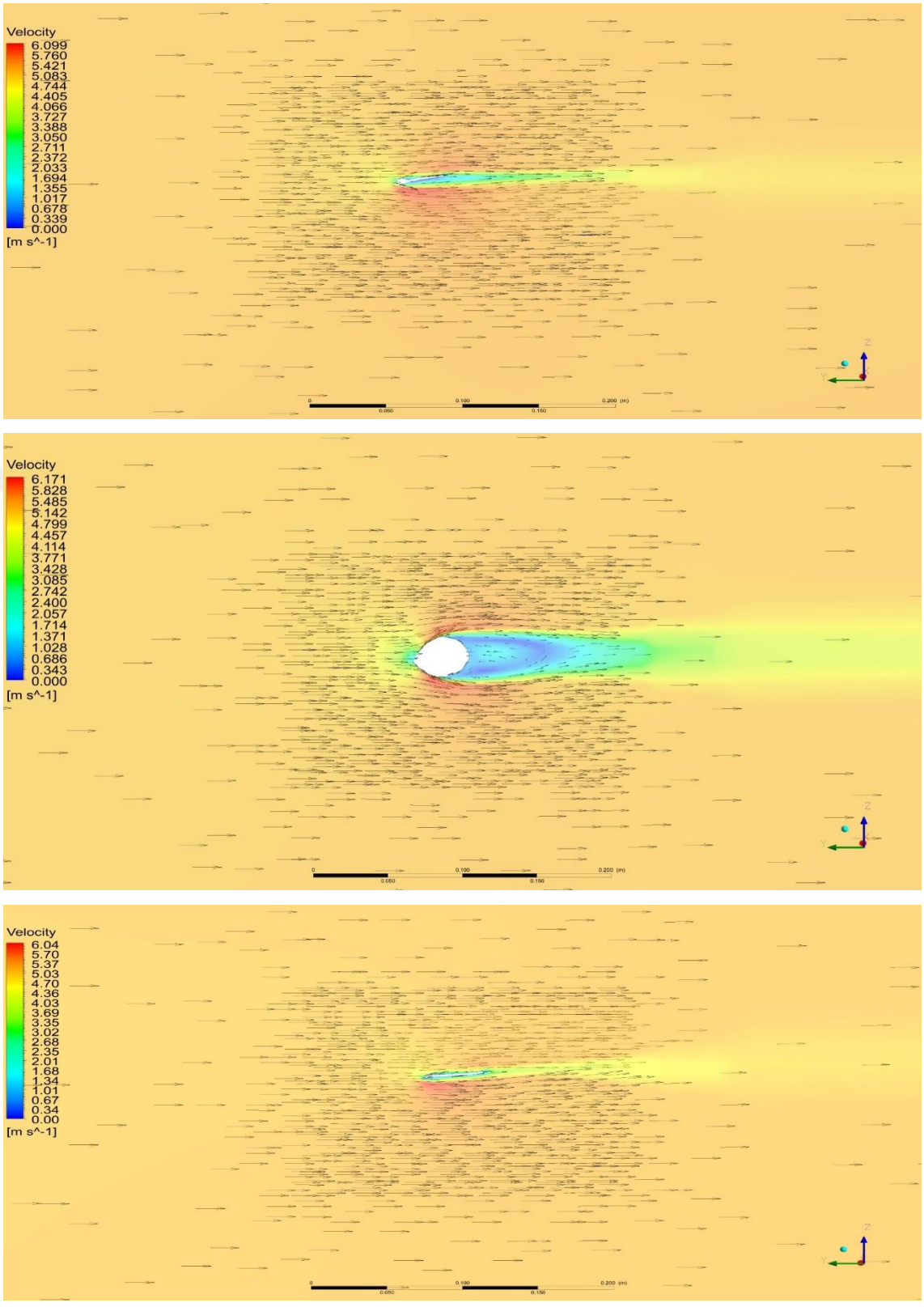
4.2.1. 0 Derece Hız ve Basınç Sonuçları

0° için prototip kanadın orta eksenine, uç eksenine ve tohum kısmına birer düzlem atıp oradaki akış yapısı, vorteksler ve oluşan basınçlar incelendiğinde; kanadın uç kesitinde ve üst kısmında pozitif basınçlar oluşmakta ve bu basınç değerleri p=14,636 Pa değerine kadar çıkmaktadır. Tohum ve orta kesitlerde bu basınç değeri daha yüksek olmakla birlikte, uç kısmında p=9,58 Pa maksimum değerine ulaşmaktadır. Ayrıca kanadın alt bölgesinde negatif basınç değerleri oluşmakta, kanadın orta ekseninde minimum p= -13,617 Pa, tohum kısmında p= -11,299 Pa ve uç kısmında ise p= -13,58 değerine kadar düşmektedir (Şekil 4.21.).



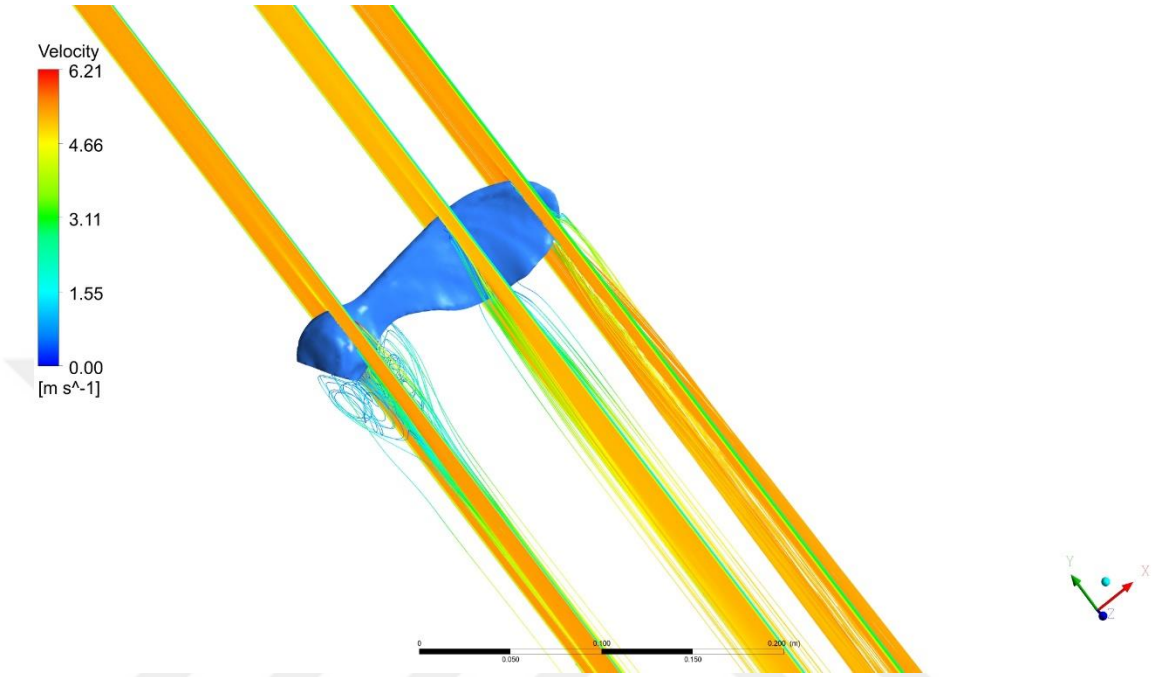
Şekil 4.21. Sırasıyla 0 derece için Re=12300 için orta eksen, tohum ve uç kesitlerdeki basınç dağılımı.

0 derece için hız dağılımı ve vektörleri inceleyecek olursak, kanadın alt ve üst yüzeylerinde arka taraflarında girdaplar oluşmuştur. Orta kesit için inceleyecek olursak, orta kesit kanat alt kısım boyunca 0 derecede girdaplar oluşmuş ve bu girdaplar kaldırma etkisini azaltıp, sürüklenmeyi arttırmıştır. Tohum kısmında ise tıpkı bir silindir etrafından küt bir cisim etrafından akış gibi negatif bir vorteks etkisi oluşmuş, tohum arkasında en düşük hızlara, tohum üst ve altında ise maksimum hıza ulaşılmıştır. En son kanat uç kısmına bakıldığında ise bu sefer kanadın üst tarafında girdaplar oluşmuş ve kanadın alt tarafında ise vortekslerden sonra maksimum hıza uç kısmında ulaşıldığı görülmektedir (Şekil 4.22.).



Şekil 4.22. Sırasıyla 0 derece için Re=12300 için orta eksen, tohum ve uç kesitlerdeki hız dağılımı.

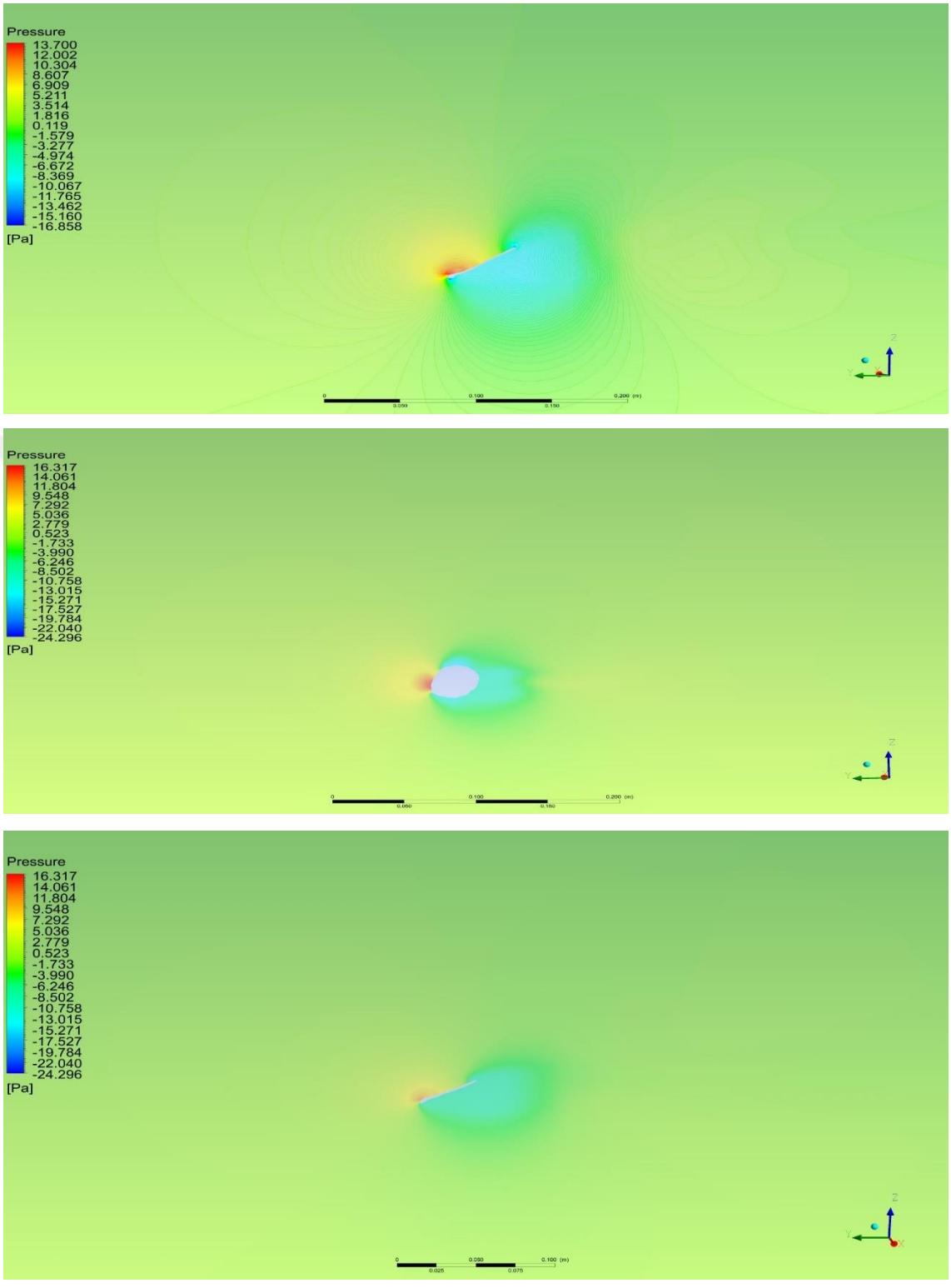
Son olarak 0 derecede akım çizgilerine 3 boyutlu baktığımızda kanat uç kısmında alt tarafında, orta kesitde ve tohum kısmının arka tarafında oluşan vorteksler Şekil 4.23. de görülmektedir.



Şekil 4.23. 0 derece Re=12300 için Akçaağaç kanadı etrafındaki akım çizgileri.

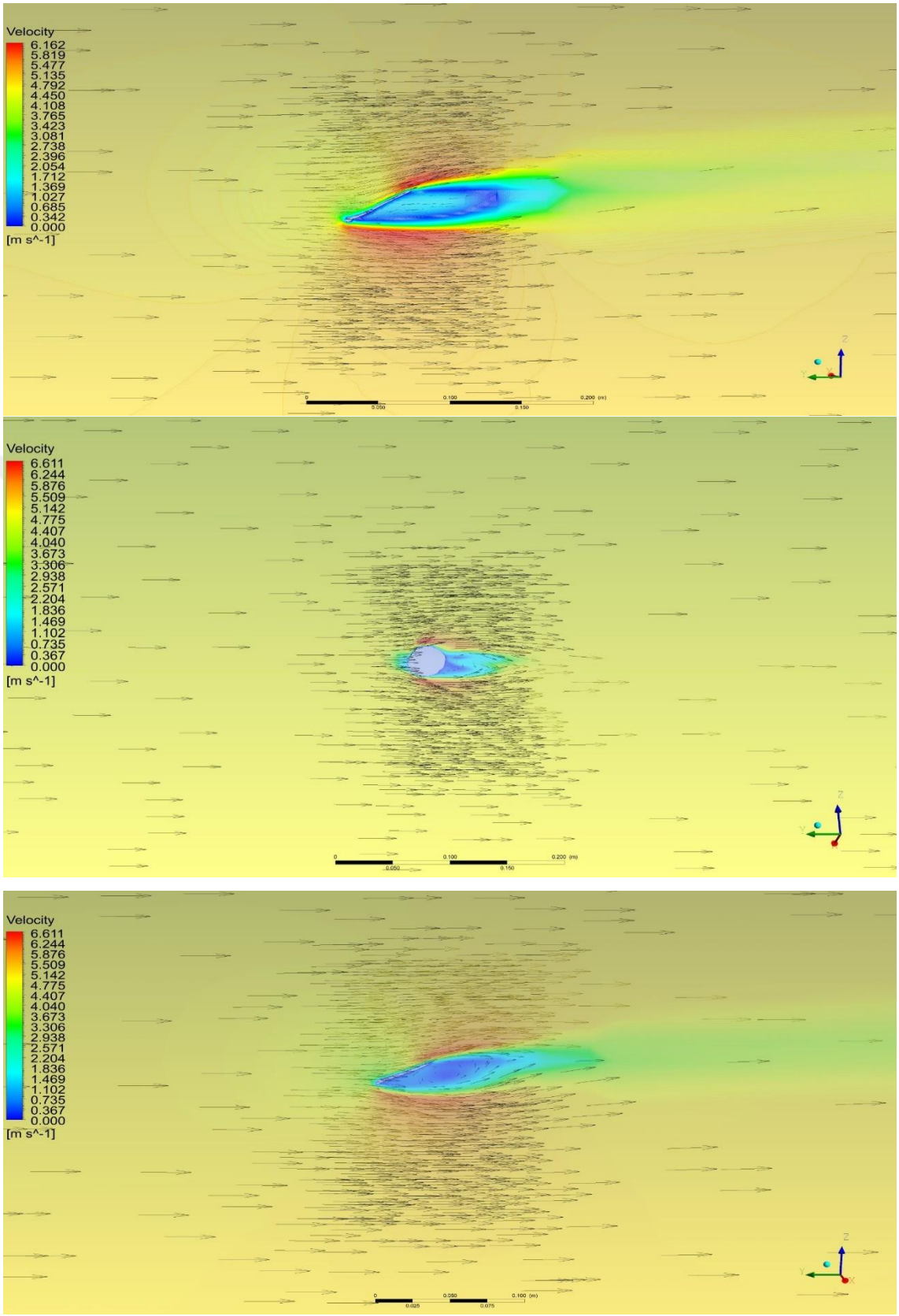
3.2.2. -20 Derece Hız ve Basınç Sonuçları

Negatif atak açısı -20 derece için yapılan simülasyon sonucunda basınç dağılımları incelendiğinde negatif basıncın bir miktar daha arttığı görülmektedir. Prototip kanadın orta eksenin ardında alt tarafında negatif alçak basınç oluşmakta ve bu basınç p= -16,858 Pa değerine kadar düşmektedir. Aynı şekilde kanadın orta kısmında üst tarafında da yüksek basınç oluşmakta ve maksimum p= 13,7 Pa değerine ulaşmaktadır. Akçaağaç prototip kanadının tohum kısmında ise negatif basınç tohumun arka kısmında p= -24,296 Pa değerine kadar düşmektedir. Tohumun ön tarafında ise kanada p=16,317 Pa olara kanadın tohum kısmına hava çarpmaktadır. Son olarak kanadın uç kısmında basınç dağılımını inceleyecek olursak kanadın uç kısmında da kanadın alt tarafında alçak basınç p= -24,296 değerine kadar çarpan havanın sürüklenme etkisinden dolayı düşmekte, kanadın üst uç kısmında ise maksimum p= 16,317 Pa basınca ulaştığı görülmektedir (Şekil 4.24.).



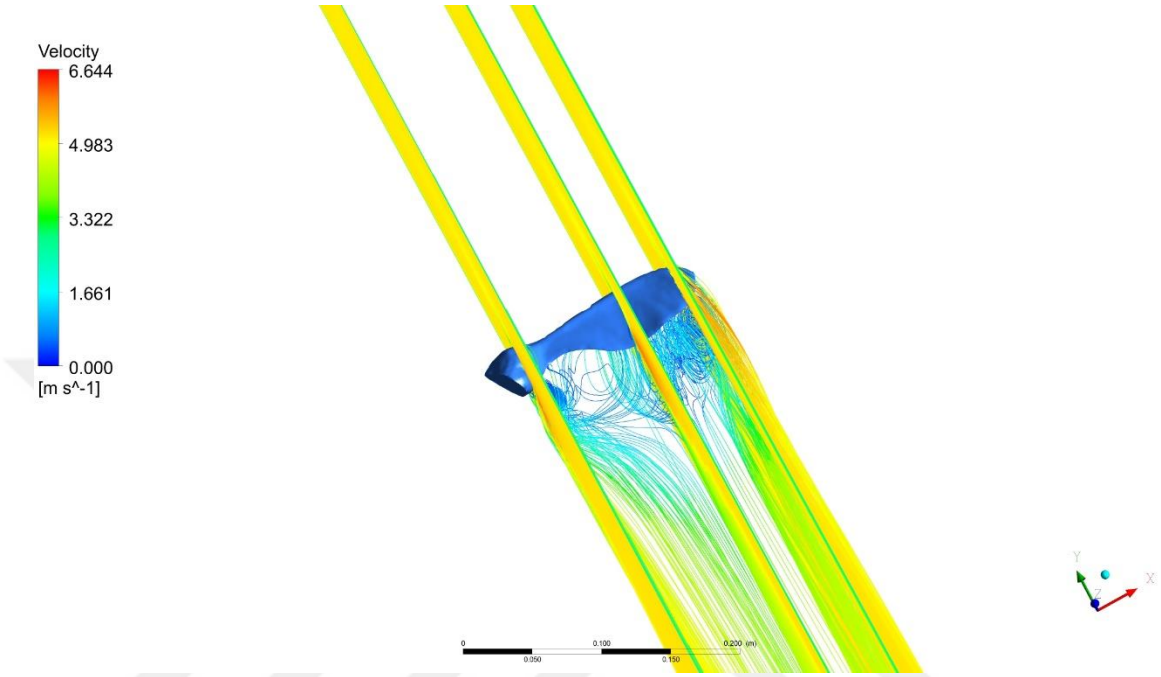
Şekil 4.24. Sırasıyla -20 derece için Re=12300 için orta kesit, tohum ve uç kesitlerdeki basınç dağılımı.

Ayrıca -20° için hız dağılımı orta, tohum ve uç kesitlerde bakılacak olursa; orta kesitde üst ve alt kısımda maksimum kanatta hıza ulaşıldığı görülmekte orta kesit arka tarafında ise vortekslerin oluştuğu vektör ve hız grafiklerinden görülmektedir. Tohum kısmında tohumun her iki üst ve alt bölgesinde tohumun arka bölgesinde vorteksler oluşmakta, orta kesitde oluşan hız vektörleri gibi tohumun üst ve altında maksimum hıza ulaşıldığı görülmektedir. Son olarak tohumun uç kısmındaki akış yapısı incelendiğinde; kanadın arka kısmında uç bölgesinde negatif 20 derecede girdap bölgesi uzamaktadır (Şekil 4.25.).



Şekil 4.25. Sırasıyla -20 derece için Re=12300 için orta kesit, tohum ve uç kesitlerdeki hız dağılımı.

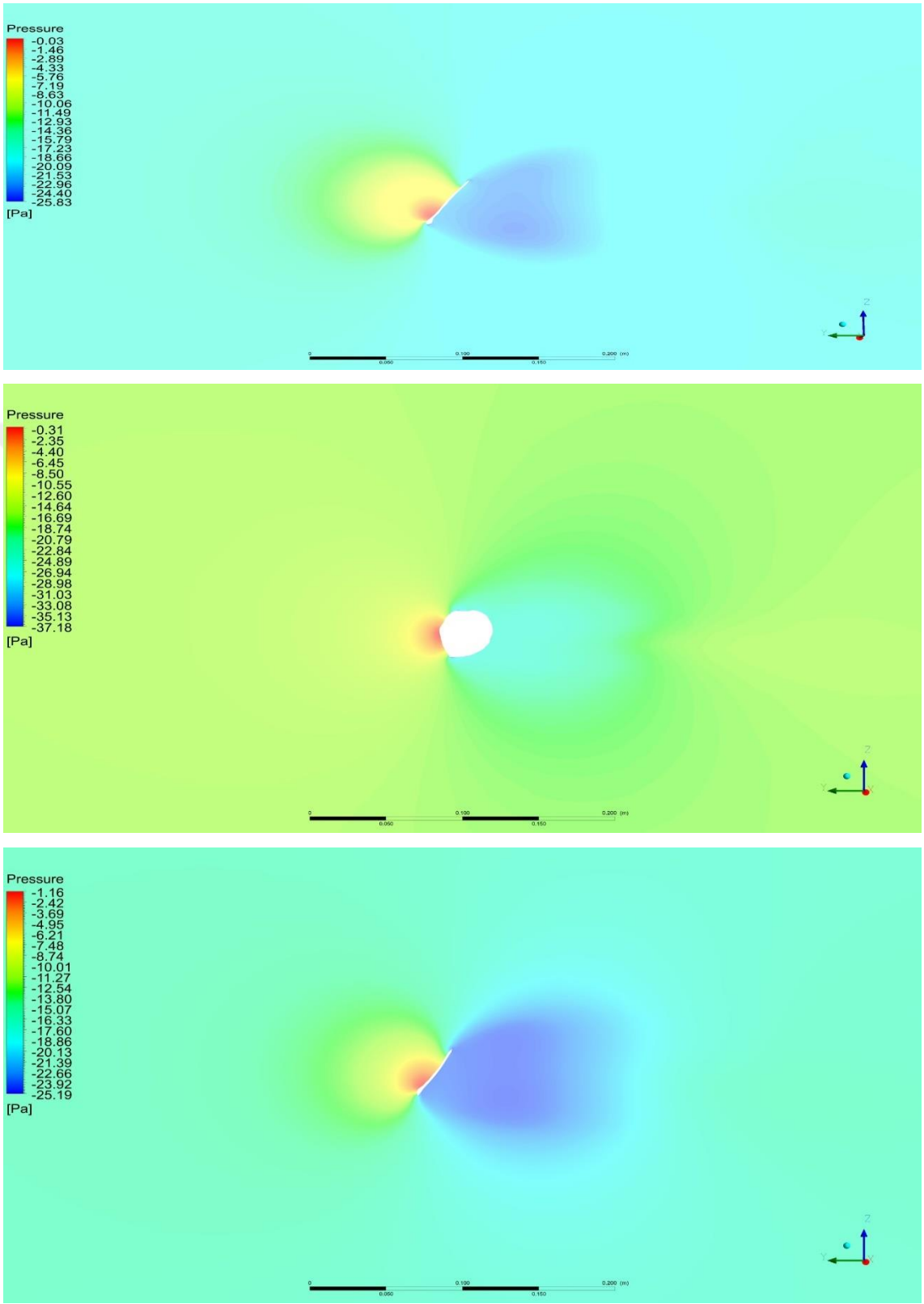
Üç boyutlu olarak akım çizgileri Şekil 4.26. incelendiğinde kanat alt tarafında girdapların arttığı, 0 dereceden farklı olarak kanadın uç alt tarafında ayrıca orta kesitde kanadın alt yüzeyi boyunca vortekslerin yoğunlaştığı görülmektedir.



Şekil 4.26. -20 derece Re=12300 için Akçaağaç kanadı etrafındaki akım çizgileri.

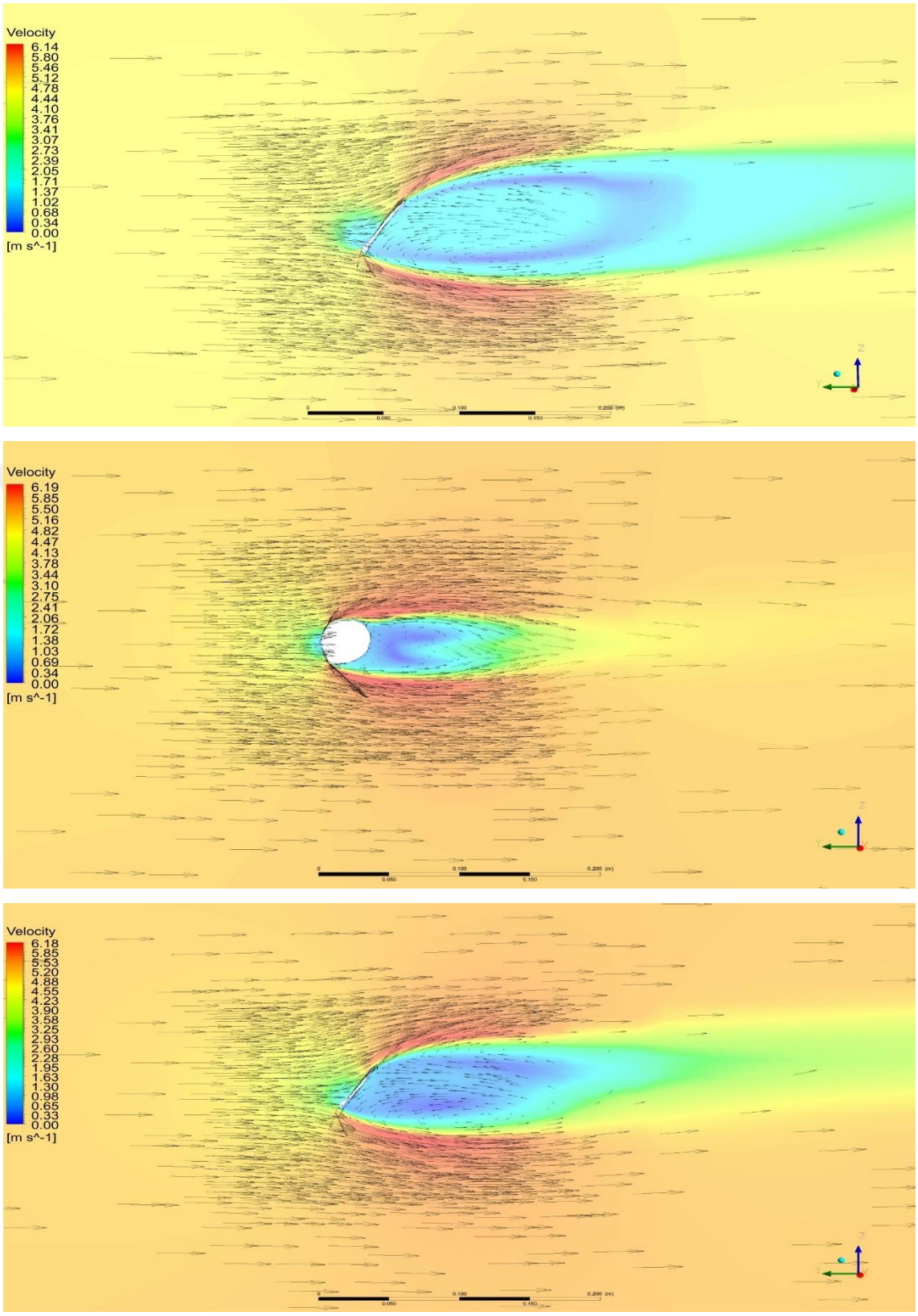
4.2.3. -40 Derece Hız ve Basınç Sonuçları

-40 derece için basınç dağılımı incelendiğinde negatif basıncın arttığı görülmektedir. Kanadın orta ekseninde maksimum basıncın p= -0,03 Pa kanadın ön üst yüzeyi boyunca kademeli olarak azaldığı, kanadın arka tarafında ise negatif basıncın p= -25,83 Pa kadar düştüğü görülmektedir. Tohum kısmında ise basınç p= -0,31 Pa ile tohum ön tarafında maksimum basınç oluşmuş, tohumun arka tarafında ise negatif basınç p= -37,18 Pa olarak en düşük basınca ulaştığı görülmektedir. Son olarak kanadın uç kısmında basınç dağılımına bakıldığında; kanadın uç kısmında negatif basınç p= -1,16 Pa değerine düşmüş, kanadın arka uç yüzeyinde ise p= -25,19 Pa kanat uç arka ekseni boyunca dağılarak negatif bir basınç görülmektedir. Bunun nedeni negatif atak açılarında sürüklenme etkisinden dolayı kanat arka yüzeyinde negatif basınçlar oluşmuştur. Bu da kanadın negatif atak açılarında kaldırma sürüklenme katsayısı oranlarını negatif seyretmesine neden olmuştur (Şekil 4.27.).



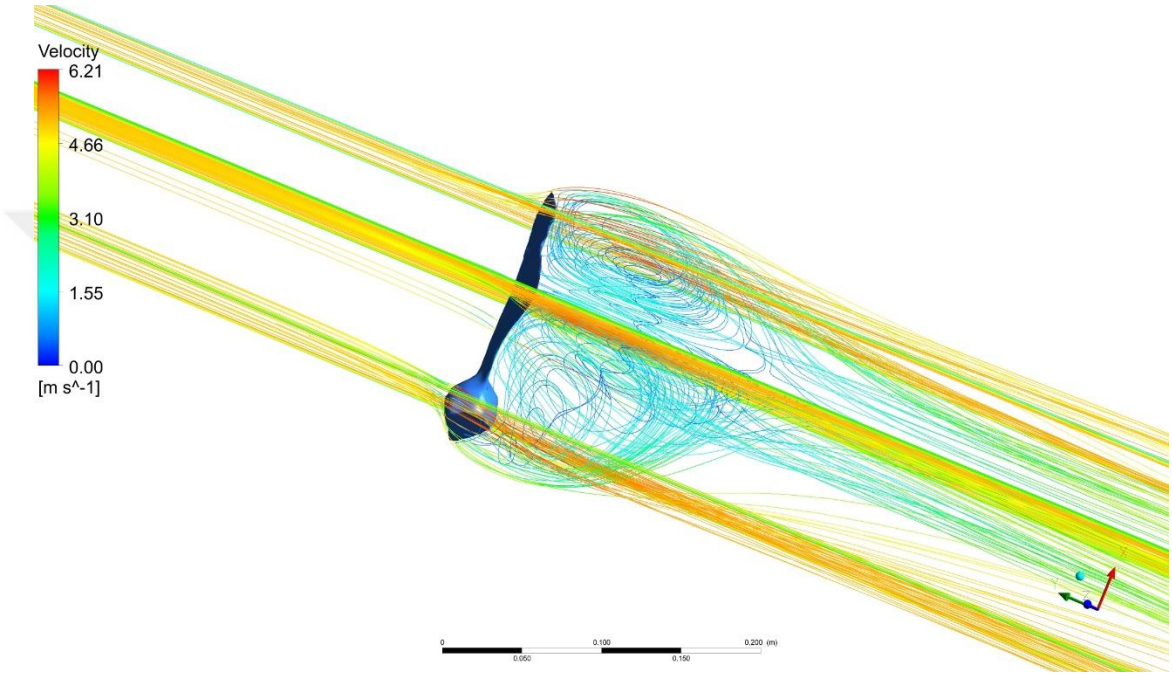
Şekil 4.27. Sırasıyla -40 derece için Re=12300 için orta eksen, tohum ve uç eksenlerdeki basınç dağılımı.

-40 derece için hız dağılımı Şekil 4.28. dan incelendiğinde; kanadın ön tarafında çok küçük de olsa negatif hız profili oluşmuş kanadın alınan üç kesitinde de görülmektedir. Kanadın arka tarafında orta ekseninde iki tane ayrı girdap bölgesi oluştuğunu vorteks çizgilerinden görmek mümkündür. Ayrıca bu girdap bölgeleri diğer -20 dereceden daha uzun ve fazladır. Bu oluşan girdaplar negatif hava akışı oluşturmakta buralarda kaldırma kuvvetini düşürmekte ve sürüklenmeyi de arttırmaktadır.



Şekil 4.28. Sırasıyla -40 derece için Re=12300 için orta kesit, tohum ve uç kesitlerdeki hız dağılımı.

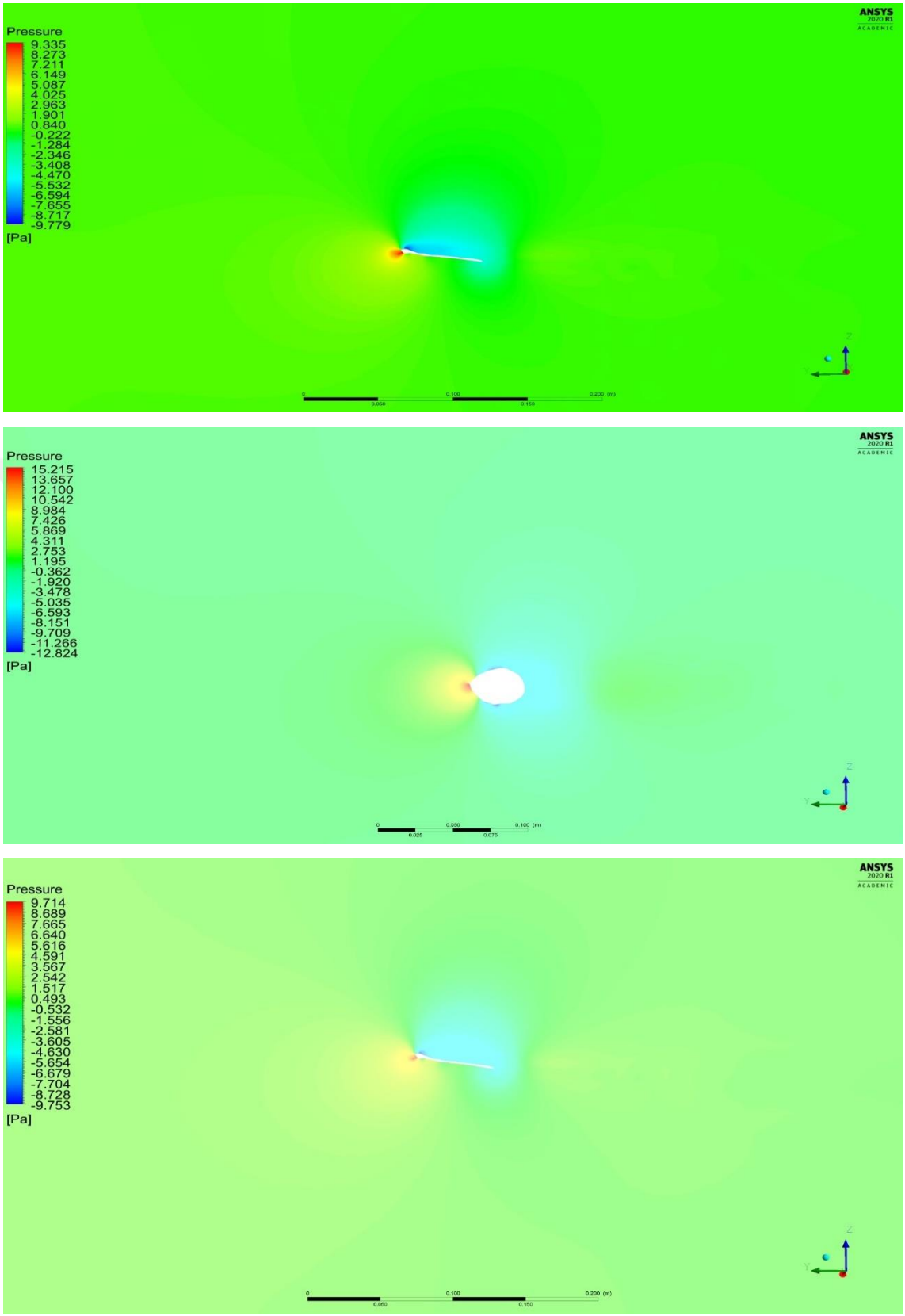
Negatif 40 derece için üç boyutlu olarak akım çizgileri incelendiğinde kanadın arka tarafında oluşan girdaplar Şekil 4.29 de net bir şekilde görülmektedir. Yüksek atak açısından dolayı kanadın arka tarafında oluşan vorteksler de büyümüştür. Ayrıca girdap uzunlukları da -20 dereceye göre artmış daha uzundur.



Şekil 4.29. -40 derece Re=12300 için Akçaağaç kanadı etrafındaki akım çizgileri.

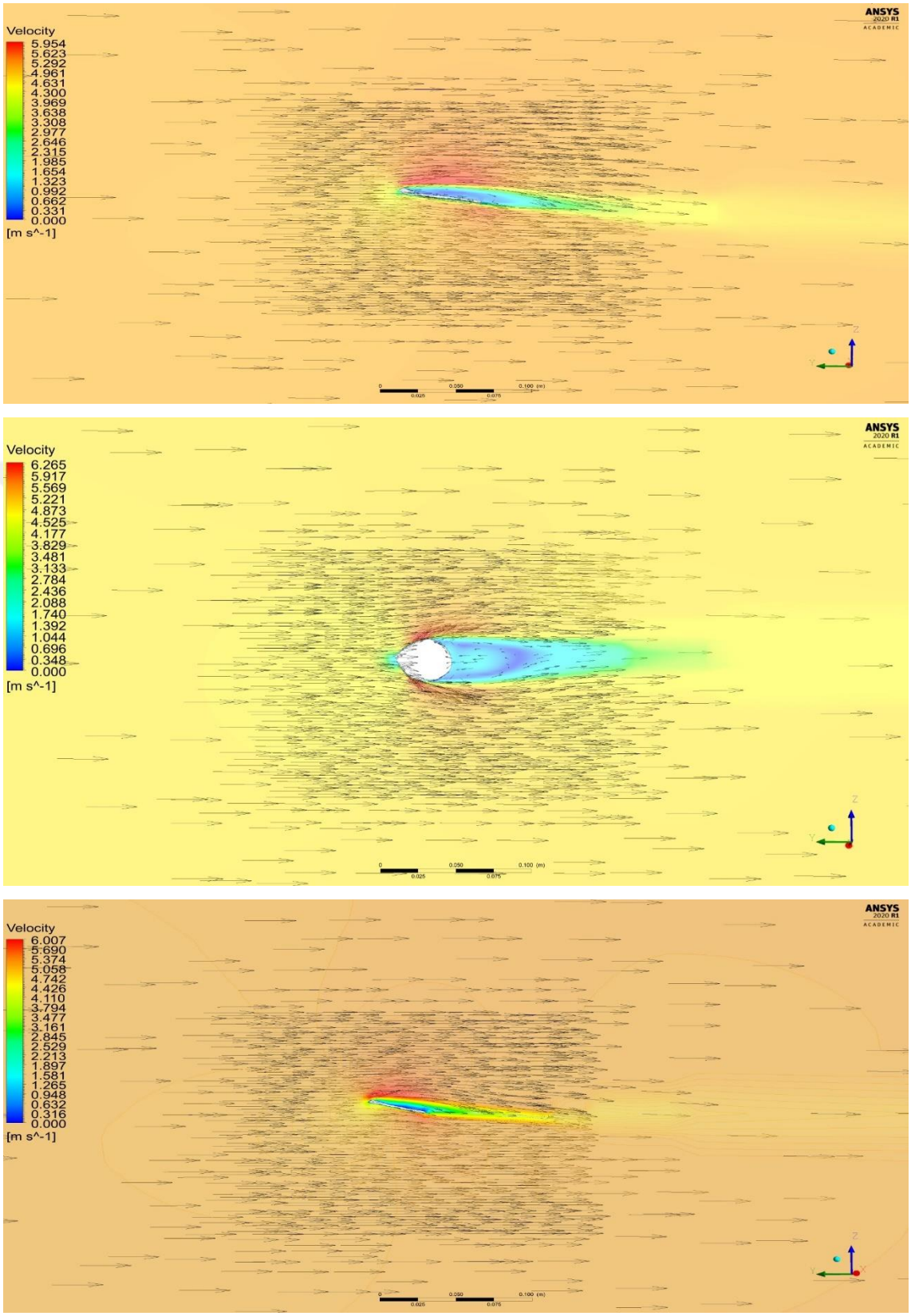
4.2.4. 20 Derece Hız ve Basınç Sonuçları

Pozitif atak açısı 20 derece için basınç dağılımı farklı eksenlerde orta, uç ve tohum kısımlarında düzlem alınılarak simülasyonda incelendiğinde, kanadın orta eksenindeki basınç dağılımında kenar kısmında veter hattı boyunca yüksek basınç oluşmakta, kanadın üst yüzeyinde ve arka yüzeyinde ise negatif basınçlar oluşmaktadır. Negatif basınçların değerleri negatif atak açılarında oluşanlardan daha düşük olmakla birlikte, ön kısımda negatif atak açıların aksine yüksek basınç değerleri oluşmuştur. Bu yüksek basınç değerleri kaldırma kuvvetini arttırmakla birlikte, sürüklenme katsayısı değerlerini düşürmekte ayrıca 20 derece için deneysel değerler de incelenip kıyaslandığında, 20 derecede optimum aerodinamik karakteristiklerin elde edildiği görülmektedir. 20 derecede tohum kısmında basınç değerleri p=15,215 Pa değerine kadar çıkmakla birlikte, tohumun arka kısmında negatif basınçlar oluşmaktadır (Şekil 4.30.).



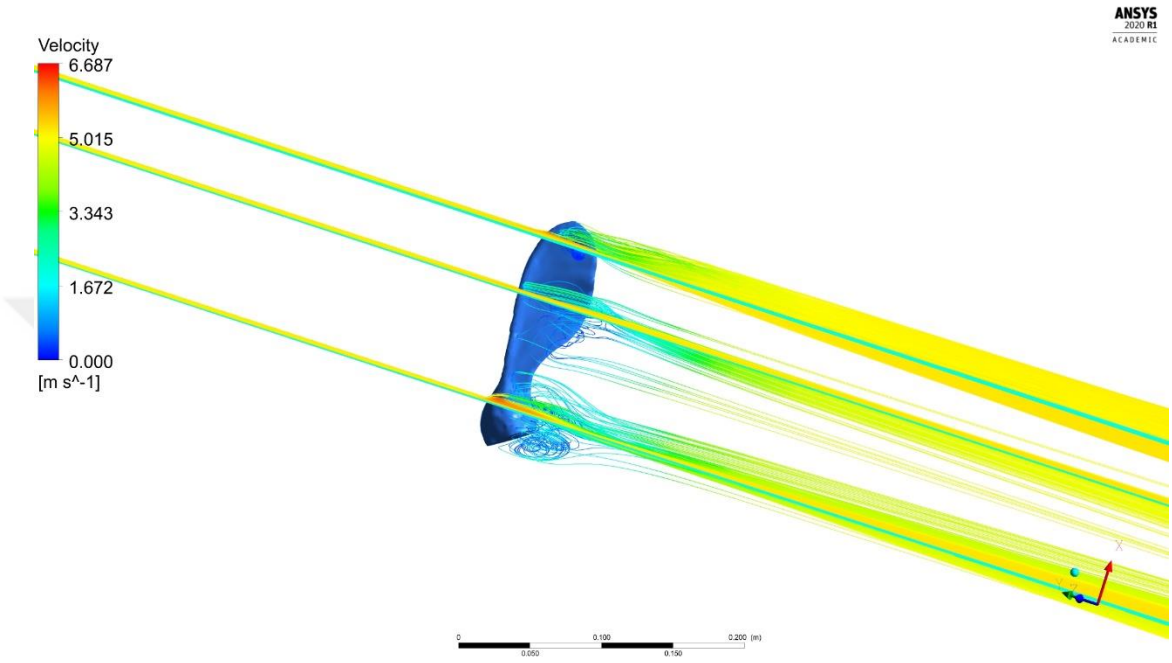
Şekil 4.30. Sırasıyla 20 derece için Re=12300 için orta kesit, tohum ve uç kesitlerdeki basınç dağılımı.

20 derecede hız profilleri ve vektörleri incelendiğinde Şekil 3.29. da görüldüğü gibi, kanadın orta kesitinde, girdap bölgesi kanadın üst yüzeyinde oluşmaktadır. Tohum kısmında ise kanadın ön tarafında küt cisime havanın çarpma etkisinden dolayı hız sıfıra düşmekte üst ve alt yüzeylerinde ise maksimuma ulaşmakta, tohumun arka kısmında ise türbülans bölgesi oluşmaktadır. Prototip kanadın uç kısmında, kenar tarafında maksimum hız oluştuğu görülmektedir. Bu da kanat profilinin bu atak açısında gerekli kaldırma kuvvetinin oluştuğunu hız ve vektör dağılımından incelenmektedir. Diğer negatif atak açılarındaki hız profilleri ile kıyaslandığında, 20 derecede oluşan vortekslerin uzunluğunun daha kısa ve az olduğu görülmektedir (Şekil 4.31.).



Şekil 4.31. Sırasıyla 20 derece için Re=12300 için orta kesit, tohum ve uç kesitlerdeki hız dağılımı.

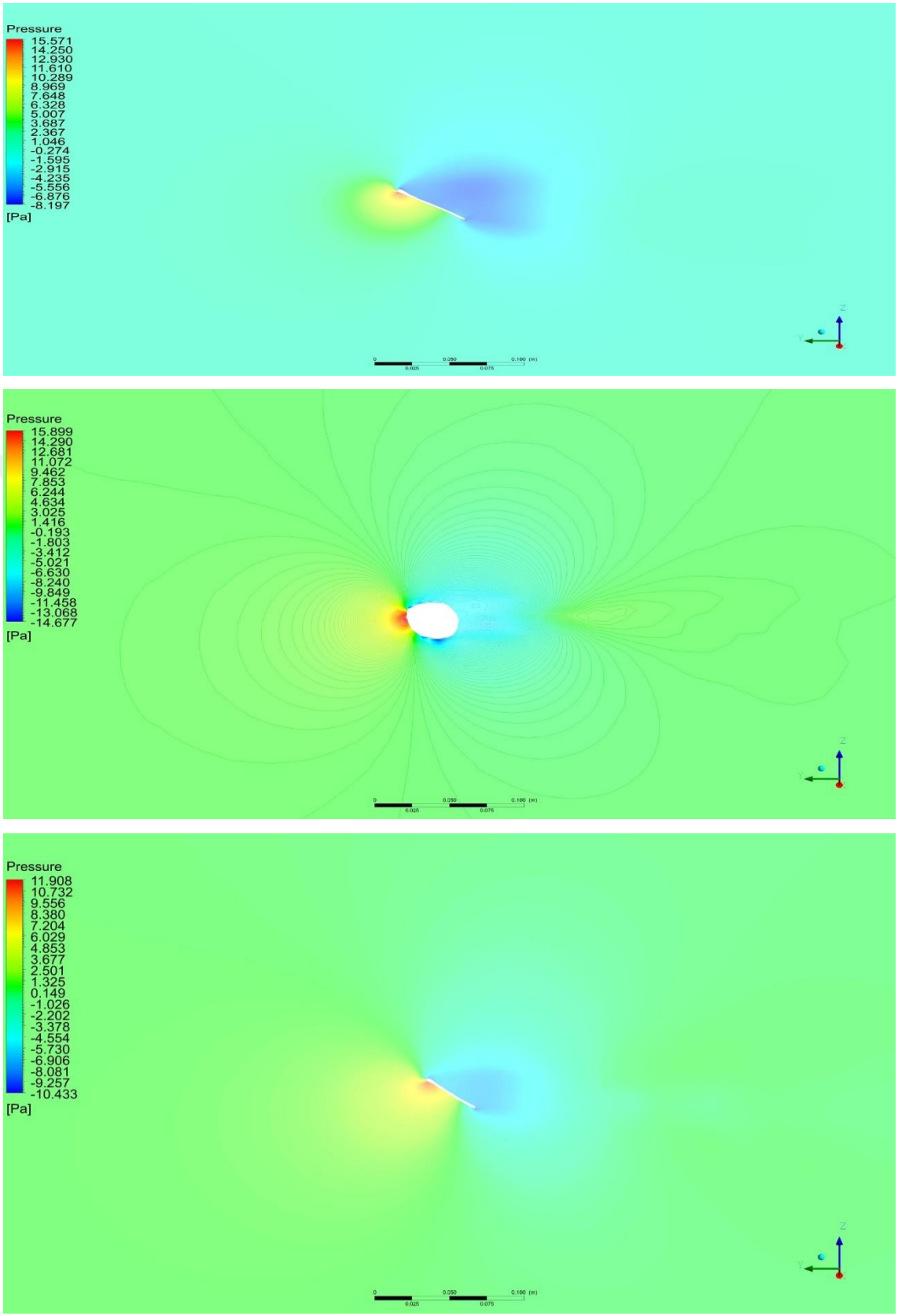
20 derece pozitif atak açısından 3 boyutlu akım çizgileri incelendiğinde, oluşan girdap ve vortekslerin negatif atak açılarına oranla oldukça düşük olduğu görülmektedir. Prototip kanadın tohum kısmında vortekslerin yoğunlaştığı, kanadın orta kesiti ve uç kesitlerinde, diğer atak açılarına kıyasla çok daha az vortekslerin oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.32.).



Şekil 4.32. 20 derece Re=12300 için Akçaağaç kanadı etrafındaki akım çizgileri.

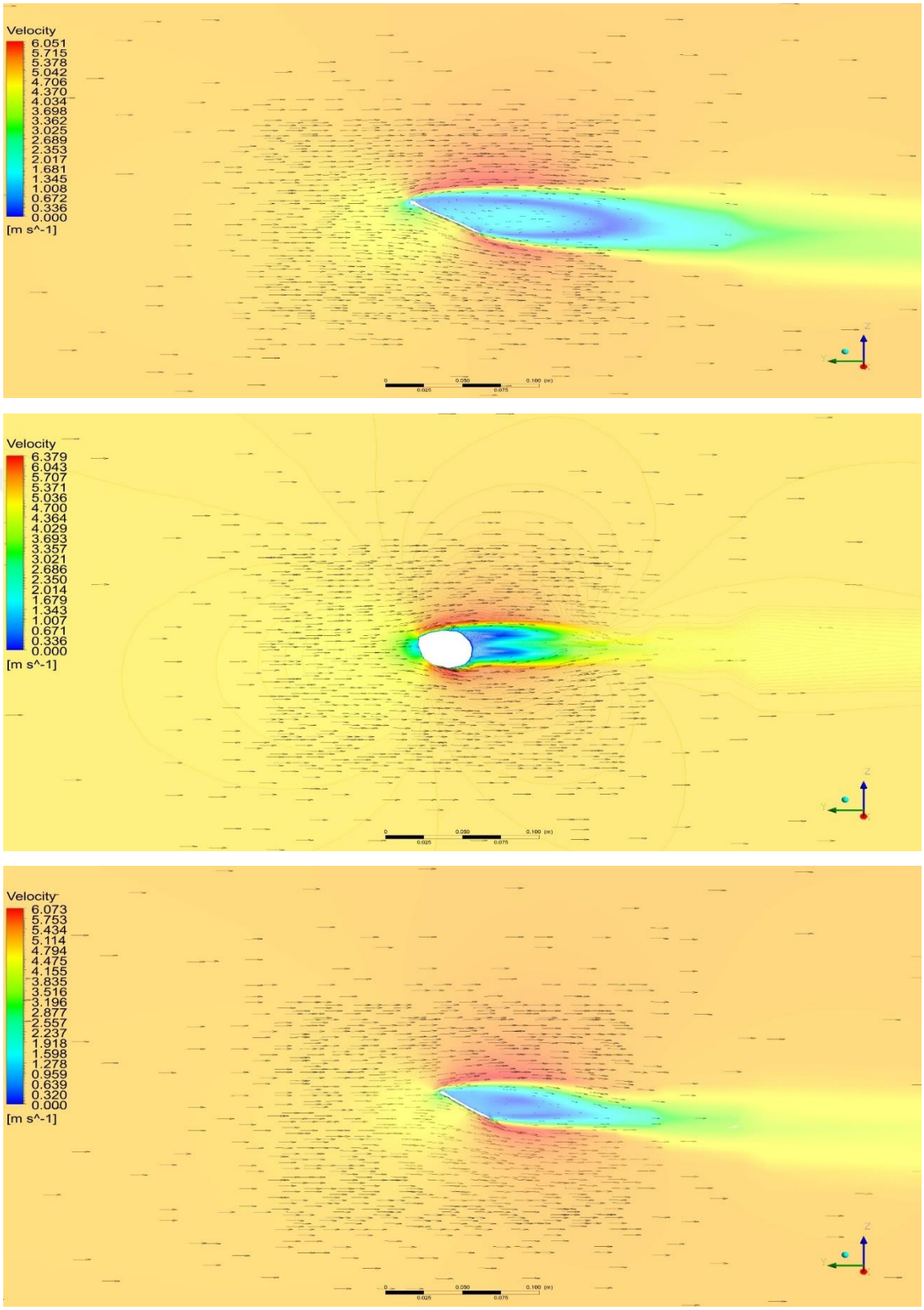
4.2.5. 40 Derece Hız ve Basınç Sonuçları

Pozitif atak açısı 40 derece için basınç dağılımında, kanadın orta kesiti boyunca basıncın yükselerek kanada çarptığı arka kısmında ise düşük basınçların oluştuğu görülmektedir. Kanadın orta kesiti boyunca p=15,571 Pa değerine kadar çıkmış, arka tarafında ise p= -8,197 Pa değerine düşmüştür. Kanadın tohum kısmında ise basınç tohumun ön tarafında p=15,899 Pa, tohumun arka tarafında ise üst ve alt yüzeylerinde negatif basınç oluşturmuş p= -14,677 Pa değerine kadar düşmüştür. Kanadın uç kısmında ise basınç p=11,908 Pa kadar yükselmiş, arka kısmında negatif basınç oluşturmuş p= -10,433 Pa kadar azalmıştır. Burada oluşan negatif basınç eğrileri, 20 dereceden bir miktar daha fazla olup, uzunluğu ve genişliği de daha fazladır (Şekil 4.33.).



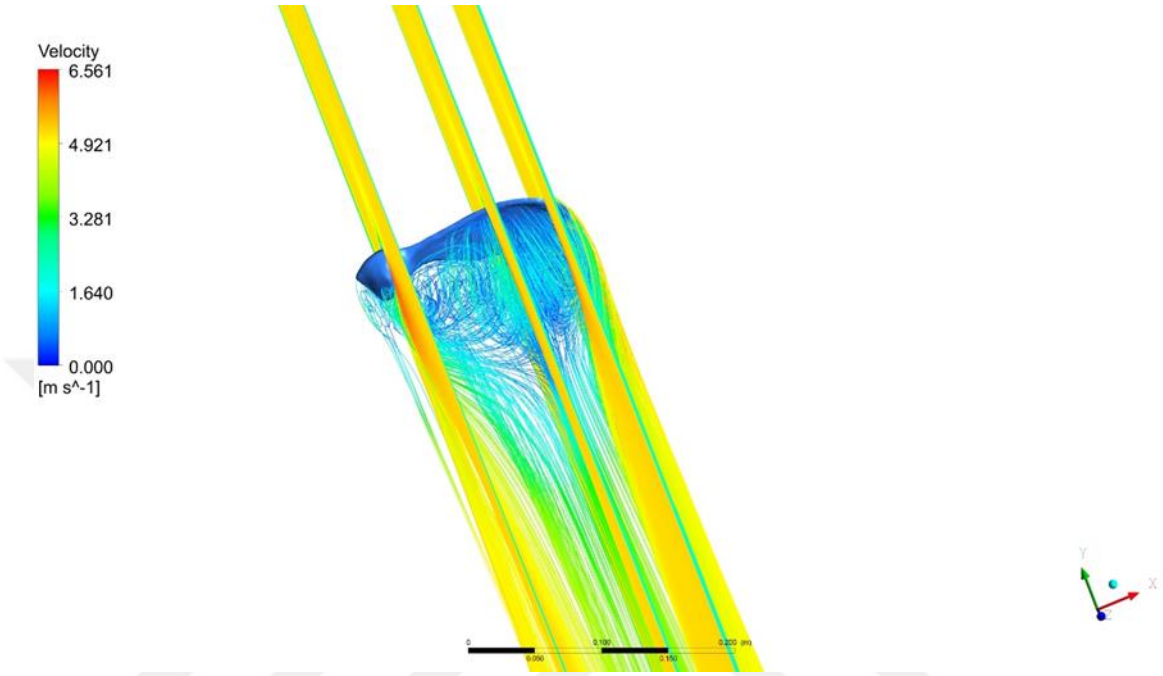
Şekil 4.33. Sırasıyla 40 derece için Re=12300 için orta kesit, tohum ve uç kesitlerdeki basınç dağılımı.

40 derecede hız dağılımında ise orta kesit boyunca kanadın arka kesiti boyunca, hız oldukça düşmüş ve vortekslerde artmıştır. Aynı şekilde tohum kısmı içinde belirgin bir şekilde kanadın tohumun arka kısmında iki tane vorteks uzunlukları birbirine eşit girdaplar oluşmuştur. Bu vorteksler kanadın kaldırma kuvvetini azaltıp, sürüklenme kuvvetini arttırdığı için deneysel ve nümerik sonuçlara bakıldığında, en yüksek sürüklenme katsayıları da bu yüksek atak açılarında çıkmıştır (Şekil 4.34.).

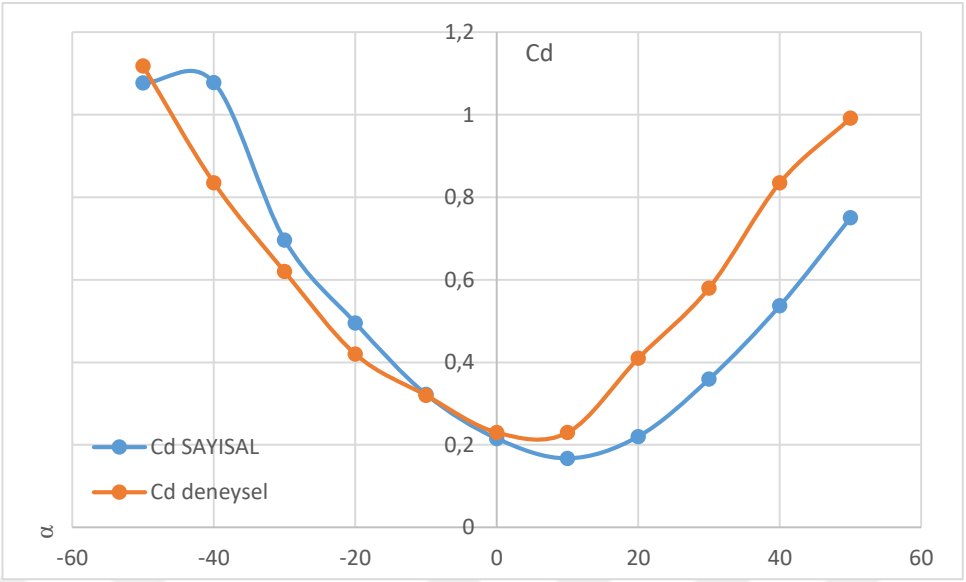


Şekil 4.34. Sırasıyla 40 derece için Re=12300 için orta kesit, tohum ve uç kesitlerdeki hız dağılımı.

Son olarak 40 derece atak açısında 3 boyutlu olarak akım çizgilerini inceleyecek olursak Şekil 4.35. den de görüldüğü gibi vorteksler hem kanat uç kısmında, hem orta eksende, hem de tohum bölgesinde yoğunlaşmıştır.

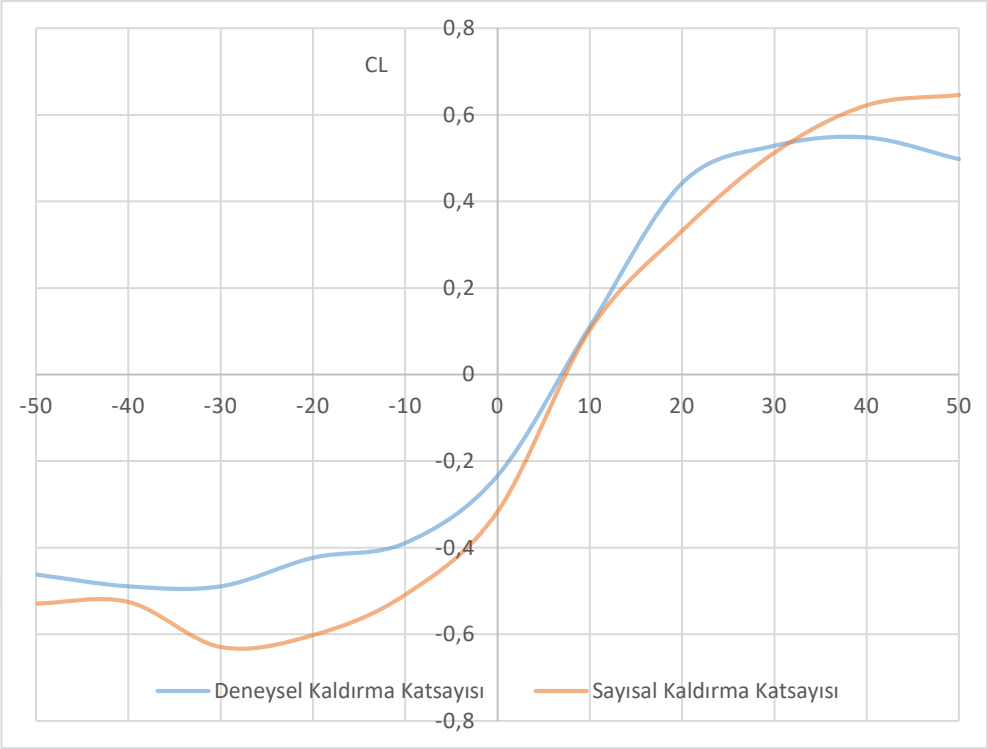


Şekil 4.35. 40 derece Re=12300 için Akçaağaç kanadı etrafında akım çizgileri.

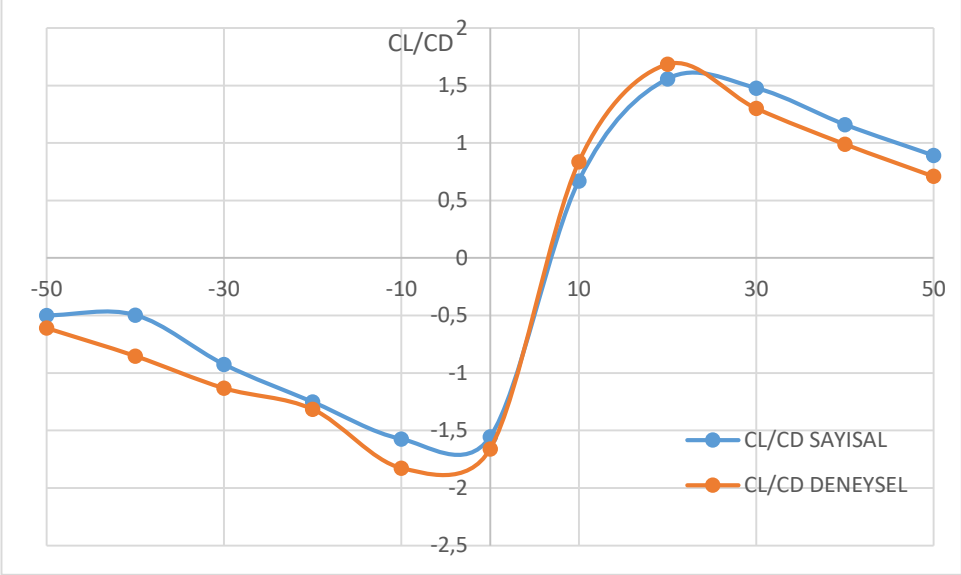


Şekil 4.36. Deneysel ve nümerik hesaplama sonucu sürüklenme katsayıları.

Deneysel elde ettiğimiz aerodinamik katsayıları, CFD analiz sonuçlarımızla kıyasladığımızda sonuçların oldukça iyi, birbiriyle uyumlu ve yakın olduğu görülmektedir. Kıyaslamada 0 derece atak açısı Re=12300 için deneysel ve sayısal C_D ve C_L değerleri incelendiğinde $C_{D\text{-sayısal}}$=0,215→$C_{D\text{-deneysel}}$=0,23, $C_{L\text{-sayısal}}$=-0,33→ $C_{L\text{-deneysel}}$=-0,33 bulunmuştur. Aradaki fark kullanılan türbülans modeli, deneysel kaynaklı insan hatası ve bilgisayar küsürat hesaplamalarından kaynaklanmaktadır.



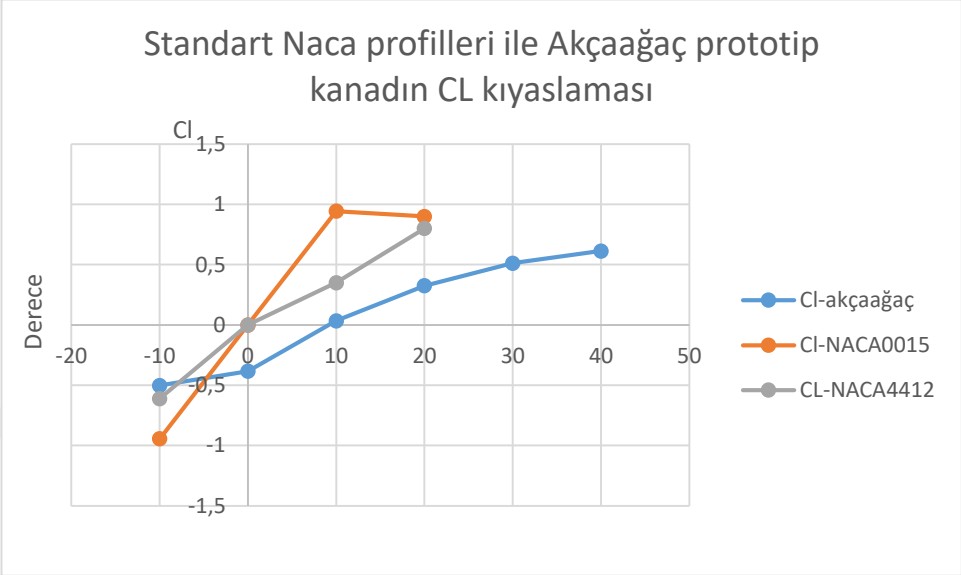
Şekil 4.37. Deneysel ve nümerik hesaplama sonucu kaldırma katsayıları.



Şekil 4.38. Deneysel ve nümerik hesaplama sonucu C_L/C_D oranları.

Deneysel ve nümerik olarak kaldırmanın sürüklenmeye oranları incelendiğinde -50 +50 arasında değişen farklı atak açılarında oranların birbirleri ile uyumlu çıktığı görülmüştür (Şekil 4.38.). Son olarak standart Naca profilleri ile prototip akçaağaç kanadının kaldırma katsayısının kıyaslaması Re=50000 için yapılmıştır. Ayrıca standart kanatlarla

kıyaslandığında akçaağaç profili daha yüksek atak açılarında 30-40° kaldırma sağlamakta olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.39.).



Şekil 4.39. Kaldırma katsayısının prototip kanadın Standart kanatlar ile kıyaslanması.

5. SONUÇ

Biyo-esinlenmeli tasarımlar pek çok bilim insanı tarafından araştırılmış ve uygulanmıştır. Bu çalışmada biyo-esinlemeli bir kanat modeli olan akçaağaç tohumundan prototip kanat oluşturularak deneysel ve sayısal olarak aerodinamik performansları incelenmiştir. Doğadan ilham alınılarak yapılan bu çalışmada amaç yeni bir kanat profili oluşturarak, bu yeni modeli rüzgar türbini tasarımında, helikopter ya da mikro insansız hava araçlarında kullanabilmesi düşünülmektedir. Aerodinamik olarak prototip kanat incelendiğinde deneysel ve nümerik analiz sonuçlar doğrultusunda, atak açısının optimum dizayn noktasında α=18° de farklı Reynolds değerlerinde maksimum kaldırma katsayıların sürüklenmeye oranları elde edildiği görülmüştür. Ayrıca bu tarz, elde edilen birkaç önemli noktayı son kez vurgulamak gerekirse;

- Re=12300 için C_L/C_{Dmax}= 1,534 atak açısı α=18° için deneysel olarak rüzgar tünelinden hesaplanmıştır.
- Deneysel ve analiz sonuçlarının kıyaslamalarında pek çok türbülans modeli CFD programında denenmiştir(Spalart-Allmaras, k-epsilon, k-epsilon-wall-enhancement-treatment, k-w, SST-k-w, Reynolds Stress Model (7 Equation)). Ağdan bağımsızlık çalışmaları sonucunda SST-k-w türbülans modeli, meshe uygunluk, iterasyondan bağımsızlık, uygun eleman sayıları ve deneysel sonuçlara yakınlığından dolayı seçilmiştir.
- Negatif atak açılarında minimum aerodinamik karakteristik oranı α=-3° için Re=34440 de C_L/C_{Dmin}= -2,131 dir. Reynolds sayılarının artmasıyla birlikte negatif atak açılarında aerodinamik C_L/C_D oranlarında azalış olmuştur.
- Analiz sonuçlarında α=20° için basınç ve hız dağılımları incelendiğinde diğer negatif atak açılarına göre daha az miktarda kanat arkasında ve tohum kısmında vortekslerin oluştuğu görülmektedir. Bu da kaldırma kuvvetini arttırmakla birlikte, sürüklenme katsayılarını düşürmekte dolayısıyla aerodinamik olarak performansı yükseltmektedir.
- Deneysel sonuçlardan minimum sürüklenme katsayısı Re=24600 için C_D= 0,164 ile pozitif atak açısı α=8º için bulunmuş bu değerden sonra artmıştır. Negatif atak

açıları için ise aerodinamik sürüklenme katsayısı grafiği simetrik bir şekilde atak açısı arttıkça artmaya devam etmiştir ($\alpha=0^{o}\rightarrow-50^{o}$, C_D= 0,184→ 0,973).

- Re=12300 için C_L katsayısı hücum açısıyla artarak α=35° de 0,606 değerine ulaşmış daha yüksek hücum açılarında azalmaya başlamıştır. C_D katsayısı ise α=3° hücum açısında 0,202 minimum değerini almıştır. Bu değerler Re=24600 için α=40° için C_L=0,652 de maksimum değeri, α=5° için C_D=0,165 de minimum, Re= 34440 için α=35° de C_L=0,551 de maksimum, α=5° için C_D= 0,117 minimum değerlerini almıştır.
- Negatif hücum açılarında ise Re=12300 için maksimum C_L= -0,427 değeri α= -3° hücüm açısında elde edilmiştir. Bu değerler R=23600 için α= -3° de C_L= -0,404, Re=34440 için ise α= -5° için C_L= -0,330 olmuştur.
- Aerodinamik performansa bakıldığında Re=12300 için C_L/C_D oranı, α=18° hücum açısında 1,534 maksimum değerine ulaşmıştır. Bu değerler Re=23600 için α=18° de C_L/C_D=1,566 maksimum, Re=34440 için α=18° de 1,7367 olmuştur.
- Akçaağaç profili damarlı ve yüzeyi pürüzlü bir tohum yapısına sahiptir, yüzey pürüzlülüğünün etkisi de dikkate alınarak ayrıca akçaağaç profil yüzeyi pürüzsüz hale getirilerek,bundan sonra yapılacak çalışmalarda mesela rüzgar türbinlerinde ve insansız hava araçlarında denenebilir. Tohum kısmınında kaldırma katsayısına etkisi bulunmakta olduğundan diğer standart profillere göre stall açısı bir miktar daha yüksek bulunmuştur. Bu değerler de dikkate alınarak yeni bir bio-esinlenmeli kanat profili yapımı denenebilir.

KAYNAKLAR

Bar-Cohen Y. (2005). Biomimetics Biologically Inspired Technologies, Iı Eccomas Thematıc Conference On Smart Structures and Materıals,C.A. Mota Soares et al. (Eds.),Lisbon, Portugal, Taylor-Francis.

Benyus J. M. (2002). Biomimicry: Innovation Inspired by Nature Paperback .

Başak H., & Demirhan H. (2017). Kambur Balina'nın Yüzgeçlerinden Esinlenilerek Oluşturulan Kanat Profil Veriminin CFD Analizi ile İncelenmesi, Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD), 3(2):15-20.

Chinwicharnam, K., Ariza, E. D. G., Moschetta, J. M., & Thipyopas, C. (2015). A computation study on the aerodynamic influence of interaction wing-propeller for a tilt-body MAV. Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal,87(6), (521-529).

Chin D. D., Lentink D. (2016). Flapping wing aerodynamics: from insects to vertebrates, Journal of Experimental Biology, 219 (920-932).

Chu Y. J. (2018). Conceptual design and performance analysis of a biomimetic wind turbine inspired by the Dryobalanops aromatica seed/Chu Yung Jeh (Doctoral dissertation, University of Malaya).

Detanico F. B. (2015). Biomimicry: Human Creation Inspired By Nature.

DeZurko, E. R. (1952). Greenough's Theory of Beauty in Architecture. Rice Institute Pamphlet-Rice University Studies, 39(3).

Dung, H. T. K., Ngoc, T. M., Hung, N. V., & Khanh, N. P. (2014). Numerical and Experimental Study of Aerodynamic Characteristics of Supercritical Airfoil. Journal of Science & Technology, 1(02), 26-30.

Eftekhari, S., & Al-Obaidi, A. S. M. (2019). Investigation of a NACA0012 Finite Wing Aerodynamics at Low Reynold's Numbers and 0º to 90º Angle of Attack. Journal of Aerospace Technology and Management, 11.

Goldstein, J., & Johnson, E. (2015). Biomimicry: New natures, new enclosures. Theory, Culture & Society, 32(1), 61-81.

Holden, J. R., Caley, T. M., & Turner, M. G. (2015). Maple Seed Performance as a Wind Turbine. In 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting (p. 1304).

Islam, M. R., Hossain, M. A., Uddin, M. N., & Mashud, M. (2015). Experimental evaluation of aerodynamics characteristics of a baseline airfoil. American Journal of Engineering Research, 4(1), 91-96.

Joseph, D. R., Devi, P. B., & Gopalsamy, M. (2021). Investigation on effect of square dimples on NACA0012 airfoil with various Reynolds numbers. International Journal of Ambient Energy, 42(4), 397-402.

Malti, K., Hebow, H., & Imine, B. (2016). Numerical study of flow around NACA0015 in ground effect. In EPJ Web of Conferences (Vol. 114, p. 02069). EDP Science.

Mohd Hafiz, M. N., Ahmad Hussein, A. H., Helmi, R., Wirachman, W., & Mohd, S. N. (2012). Wind tunnel experiment for low wind speed wind turbine blade. In Applied Mechanics and Materials (Vol. 110, pp. 1589-1593). Trans Tech Publications Ltd.

Mutaib, A. H., AL-Khateeb, A., Khashan, M. K., & Kamil, F. (2019). Computational study of flow characteristics over high lift airfoil at various angles of attack. Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERD), 42(1), 90-9.

Rubel, R. I., Uddin, M. K., Islam, M. Z., & Rokunuzzaman, M. D. (2016). Numerical and experimental investigation of aerodynamics characteristics of NACA 0015 aerofoil. International Journal of Engineering Technologies IJET, 2(4), 132-141.

Streher, L. B. (2018). Large-eddy simulations of the flow around a NACA0012 airfoil at different angles of attack. arXiv preprint arXiv:1807.01576.

Şahin, İ., & Acir, A. (2015). Numerical and experimental investigations of lift and drag performances of NACA 0015 wind turbine airfoil. International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, 3(1), 22-25.

Troolin, D. R., Longmire, E. K., & Lai, W. T. (2006). Time resolved PIV analysis of flow over a NACA 0015 airfoil with Gurney flap. Experiments in Fluids, 41(2), 241-254.

Vincent, J. F., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A., & Pahl, A. K. (2006). Biomimetics: its practice and theory. Journal of the Royal Society Interface, 3(9), 471-482.

Yogeshwaran, G., Rao, M. S., & Gopalan, J. (2021). Aerodynamics and Design of Spinning Samara Model. In Proceedings of 16th Asian Congress of Fluid Mechanics (pp. 51-57). Springer, Singapore.

Win, S. K. H., Sufiyan, D., Win, L. S. T., Soh, G. S., & Foong, S. (2019). Design Optimization of Flap Configuration in Samara Autorotating Wing with Multi-Functional Aerodynamic Structure. In 2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM) (pp. 1359-1364). IEEE.

Zakaria, M. Y., dos Santos, C. R., Dayhoum, A., Marques, F. D., & Hajj, M. R. (2019). Modeling and prediction of aerodynamic characteristics of free fall rotating wing based on experiments. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 610, No. 1, p. 012098). IOP Publishing.

Zia, A., & Laraki, A. N. (2013). Sustainable Building Strategies: Learning from the Nature. Global Journal of Science, Engineering and Technology, (10), 2.

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. Aydın N., Özalp A., Karagöz İ., Numerical investigation of heat and flow characteristics in a laminar flow past two tandem cylinders, Thermal Science, 25(4A) (2021), 2807-2818. https://doi.org/10.2298/TSCI201119175A
2. Aydın N., Çalışkan M. E., Karagöz İ., A Study on a New Bioinspired wing Design and 2D Analysis of Its Aerodynamic Characteristics. Euroasia Journal of Mathematics Engineering natural medical sciences, 8(2020), 126-136., Doi: 10.38065/euroasiaorg.29 (konferansta sunulmuştur.) ISPEC 6th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING NATURAL SCIENCES , Şanlıurfa, Turkey,2020.
3. Aydın N., Çalışkan M. E., Karagöz İ**.,** Numerical Simulation of Flow Over NACA 0015 airfoil with different turbulence models. International Journal of Energy Applications and Technologies, 7(2) (2020), 42-49. https://doi.org/10.31593/ijeat.692291 (konferansta sunulmuştur.) 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED TECHNOLOGIES,SARAJEVO, BOSNA-HERZEGOVANİA,(ICAT'19) , 2019.
4. Güneş N., Özalp A., Yüksek Blokajlı Kanal İçinde Art Arda İki Silindir Etrafında Sürekli Laminer Akış İçin Isı ve Akış Karakteristiklerinin Nümerik Olarak İncelenmesi, Mühendis ve Makine, 56(667) (2015), 53–63. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1099792

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler:

1. Aydın N., Karagöz İ., Çalışkan M. E., A Study on a New Bioinspired Wing Design and 2D Analysis of its Aerodynamic Characteristics, (24.01.2020 -26.01.2020)
2. Aydın N., Çalışkan M. E., Karagöz İ., Numerical Simülation Of Flow Over Different Types Of Airfoils, (26.08.2019 -30.08.2019) 8TH INTERNATIONAL

CONFERENCE ON ADVANCED TECHNOLOGIES,SARAJEVO, BOSNA-HERZEGOVANİA,(ICAT'19) , 2019.

3. Karagöz İ., Aydın N., Özalp A., The Effects of Reynolds Number on the laminar flow past two tandem cylinders with High Blockage in a Channel, (19.10.2017 - 22.10.2017),Fırat University, 8th INTERNATIONAL ADVANCEDTECHNOLOGIES SYMPOSIUM , (IATS 2017), Elazığ,Turkey, 2017.
4. Aydın N., Karagöz İ., An Overview of Biologically Inspired Engineering on Wing Design, (26.04.2018 -29.04.2018) INTERNATIONAL CONGRESS ON ENGINEERING AND LIFE SCIENCE, Kastamonu,Turkey, 2018.
5. Güneş N., Karagöz İ., Türkiye' de Güneş Enerjisi ve Bursa İli için Bir Uygulama, (19.04.2017 -22.04.2017) , TESKON 2017 / TERMODİNAMİK SEMPOZYUMU, İZMİR ,TURKEY, 2017.
6. Güneş N., Özalp Abdurrahman A., Yüksek Blokajlı Kanal İçinde Laminersürekli Akış İçin Ard Arda İki Silindir etrafında Akış Ve Isıkarakteristiklerinin Nümerik Olarak İncelenmesi, (08.04.2015 -11.04.2015) TESKON 2015 / SİMÜLASYON VE SİMÜLASYON TABANLI ÜRÜN GELİŞTİRME SEMPOZYUMU,İZMİR ,TURKEY, 2015.
7. Güneş N., Özalp Abdurrahman A., Yüksek Blokaj Etkisinde (B=0.6) Ard Arda Silindirler Etrafından Laminer Akış İçin Isı ve Akış Karakteristiklerinin İncelenmesi, (11.11.2014 -13.11.2014) ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ IV. BİLGİLENDİRME VE ARGE GÜNLERİ, BURSA,TURKEY, 2014.