T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGÂR ENERJİSİ SİSTEMLERİ İÇİN BİYOMİMETİK KANAT TASARIMI, PERFORMANS ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

Mehmet Erman ÇALIŞKAN
0000-0002-6123-9627

Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

RÜZGÂR ENERJİSİ SİSTEMLERİ İÇİN BİYOMİMETİK KANAT TASARIMI, PERFORMANS ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

Mehmet Erman ÇALIŞKAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ

Biyomimikrinin sunduğu yöntemlerle, doğadan esinlenilerek oluşturulan biyomimetik kanatlar, aerodinamik ve rüzgâr enerjisi alanında yenilikçi çözümleri sunma potansiyeli barındırmaktadır. Bu çalışmada; doğada gösterdiği aerodinamik performansla dikkat çeken akçaağaç tohumundan esinlenilerek oluşturulan özgün biyomimetik kanat modelleri incelenmiştir. Deneysel ve nümerik olarak belirli rüzgâr hızlarında ve geniş bir hücum açısı aralığında analizleri yapılan modellerin, kaldırma kuvveti katsayıları (C_L) ve sürükleme kuvveti katsayıları (C_D) belirlenmiştir. İlk model M0, ortalama akçaağaç tohumunun belirli bölgelerinden kesilmesiyle elde edilen 36 eğriyle tasarım programında modellenmiştir. Bu biyomimetik kanadın her bir eğrisi, Fourier serisi denklemleriyle en az %99,5'lik bir oranla temsil edilmiş ve denklemlerin katsayıları bulunmuştur. Böylece kanadın tasarım parametreleri, geleneksel bir kanat profili gibi sunulmuştur. M0 modelinin, akçaağaç tohumu ile daha önce yapılan çalışmalarda da bahsedilen geç stol özelliği ve kaldırma kuvvetine katkı sağladığı düşünülen, LEV (Leading Edge Vortex) yapısı dikkat çekmiştir. M0 üzerinde, LEV'i oluşturan model yapısı incelenip, yapıyı oluşturduğu düşünülen topografik özellik, M0 modelinin kanat yüzeyinin tamamına uygulanmıştır. Böylece, aerodinamik performans kriterini (C_L/C_D) artırmak amacıyla yapılan iki aşamalı kanat performansı geliştirme çalışmasının ilki olan topografya optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve çalışma sonucunda "M5" modeli elde edilmiştir. M5 modeli, M0 modeline göre, değişen hücum açılarında, %15 ile %52 arasında daha üstün bir performans sergileyebilmiştir. İkinci kanat performansı geliştirme çalışması olarak da, M5 modelinin tohum kısımlarındaki eğrilerinin yüksekliklerinin düşürülüp, yerel veter uzunluklarının, belirli bir seviyeye kadar artırılacağı şekil optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Eğrilerin boyutlarının optimize şekilde ölçeklendirilmesi adına, istatiski bir metot olan Taguchi metodunun kullanıldığı bu şekil optimizasyonu sonucu elde edilen M5C modeli, M0 modeline göre, değişen hücum açılarında, %99 ile %320 arasında performans artışı göstermiştir. Ayrıca, oluşturulan bu biyomimetik modellerin rüzgâr enerjisi kullanan sistemler için potansiyeli de tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr enerjisi, biyomimetik kanat, akçaağaç tohumu, topografya optimizasyonu, şekil optimizasyonu, kaldırma kuvveti, sürükleme kuvveti, LEV

2023, xvii + 180 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

BIOMIMETIC BLADE DESIGN, PERFORMANCE ANALYSIS AND OPTIMIZATION FOR WIND ENERGY SYSTEMS

Mehmet Erman ÇALIŞKAN

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

Supervisor: Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ

Biomimetic wings, inspired by nature with the methods offered by biomimicry science, have the potential to offer innovative solutions in the field of aerodynamics and wind energy. In this study, unique biomimetic wing models inspired by the maple seed, which attracts attention with its superior aerodynamic performance at low wind speeds in nature, were examined. The lift force coefficients (C_L) and drag force coefficients (C_D) of the models, which were analyzed experimentally and numerically at certain wind velocities and a wide angle of attack were determined. The first model, M0, was modeled in the design program with 36 curves obtained by cutting a selected average maple seed from certain parts. Each curve of this modeled biomimetic wing was represented by the Fourier series equations with a ratio of at least 99,5% and the coefficients of the equations were found. Thus, the design parameters of the wing are presented like a conventional airfoil. The stall delay feature of the M0 model, whose aerodynamic performance was measured, and the LEV (Leading Edge Vortex), which is thought to contribute to the lift force, attracted attention. The model structure forming the LEV on M0 was examined and the topographic feature, which is thought to form this structure, was applied to the entire wing surface of the M0 model. Thus, topography optimization, which is the first of the two-stage wing performance development work carried out to increase the aerodynamic performance criterion (C_L/C_D), was carried out and the M5 model was obtained as a result of this study. The M5 model was able to outperform the M0 model by 15% to 52% at varying angles of attack. As the second wing performance development study, shape optimization was carried out by reducing the height of the curves in the seed parts of the M5 model and increasing the local chord lengths up to a certain level. The M5C model, which was obtained as a result of this shape optimization, in which the Taguchi method, a statistical method for optimizing the scaling of the dimensions of the curves, was used, showed an aerodynamic performance increase between 99% and 320%, at varying angles of attack, compared to the M0 model. In addition, the potential of these biomimetic models created in the study for systems using wind energy is also discussed.

Key Words: Wind energy, biomimetic wing, maple seed, topography optimization, shape optimization, lift force, drag force, LEV

2023, xvii + 180 pages.

TEŞEKKÜR

Öncelikle, doktora çalışmamda ve lisansüstü yapmış olduğum tüm çalışmalarda bana, bilgi ve deneyimi ile her zaman yardımcı olan, tez sürecini en iyi şekilde yürüten ve yol gösteren saygı değer hocam Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ'e yaptığı tüm katkılar için tüm içtenliğimle teşekkürlerimi sunarım.

Bana doktora sürecim boyunca mesafe tanımadan, zamanını ayırıp desteğini sunan, bilgi ve birikimlerini benden esirgemeyen değerli ağabeyim Dr. Ali SAKİN'e de teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi'nde gerçekleştirdimiz deneysel çalışmada yardımlarını esirgemeyen, değerli bilgilerinden faydalandığım, bu çalışmaya katkı sağlayan sayın Dr. Öğr. Üyesi Fuat KAYA'ya ve sayın Prof. Dr. Yahya Erkan AKANSU'ya teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Doktora sürecim boyunca; tüm bilimsel projelerimizi ortak gerçekleştirdiğimiz, her türlü zorlukta beni yalnız bırakmayan, bu çalışmanın her aşamasında değerli mühendislik bilgileriyle destek ve katkı sağlayan, hem çalışma arkadaşlarım hem de yol arkadaşlarım olan değerli dostlarım Muhammet Üsame SABIRLI ve Emre ORUÇ'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tüm çalışmlarım sürecinde bana yardımcı olan Bursa Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği'ndeki tüm hocalarıma, asistan ve bursiyer arkadaşlarıma da teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak; beni her giriştiğim işte olduğu gibi, doktora çalışmamda da ayakta tutan, ilerlememi sağlayan, sabrı ve sonsuz desteği ile hep yanımda olan sevgili eşim Başak ÇALIŞKAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet Erman ÇALIŞKAN
21/02/2023

Bu tez çalışması, YÖK tarafından desteklenen YÖK 100/2000 doktora bursiyerlik programı kapsamında, yenilenebilir enerji/rüzgâr enerjisi öncelikli alanında gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca yine bu tez çalışması, TÜBİTAK tarafından sağlanan 2211/A bursiyerlik programı tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET....vi
ABSTRACT....vii
TEŞEKKÜR....viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ....xi
ŞEKİLLER DİZİNİ....xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ....xvii
1. GİRİŞ….. 1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI....4
2.1. Giriş….. 4
2.2. Biyomimikri ile İlgili Çalışmalar....4
2.3. Biyomimetik Kanat ile İlgili Çalışmalar....8
2.4. Akçaağaç Tohumu ile İlgili Çalışmalar....10
2.5. Hücum Kenarı Girdabı (Leading Edge Vortex - LEV) ile İlgili Çalışmalar....14
2.6. Değerlendirme....17
3. MATERYAL ve YÖNTEM....19
3.1. Giriş….. 19
3.2. Kanat Aerodinamiği....19
3.2.1. Kanat profili geometrisi....19
3.2.2. Aerodinamik kuvvetler ve momentler....27
3.3. Biyomimikri Bilimi....53
3.3.1 Terminoloji....54
3.3.2 Biyomimetik tasarım yaklaşımları....58
3.3.3 Biyomimetik tasarım sürecinde görev modeli....58
3.4. Biyomimetik Tasarımın Oluşturulması....62
3.4.1. Akçaağaç tohumunun modellenmesi (biyomimetik tasarım)....63
3.4.2. Biyomimetik tasarımın analitik ifadesi....68
3.5. Deneysel Çalışmalar....76
3.5.1. Deney modellerinin üretimi....76
3.5.2. Parametrelerin belirlenmesi....78
3.5.3. Rüzgâr tünelinin özellikleri....79
3.5.4. Aerodinamik performans ölçer sistemi ve diğer ekipmanlar....83
3.5.5. Deney verilerinin toplanması....88
3.5.6. Hata (belirsizlik) analizi....89
3.6. Nümerik Çalışmalar....92
3.6.1. Geometri modelleme ve sonlu elemanlara ayırma....93
3.6.2. Akışın modellenmesi....96
3.6.3. Nümerik sonuçların elde edilmesi....100
3.7. Tez Şeması....101
4. BULGULAR ve TARTIŞMA....103
4.1. Giriş….. 103
4.2. M0 Modelinin Bulguları....103
4.2.1. M0 Modelinin aerodinamik performansı....103
4.2.2. M0 Modelinin nümerik akış görselleri....107
4.2.3. M0 Modelinin değerlendirmesi....110
4.3. Kanat Geliştirme ve Optimizasyon Çalışması....110

4.3.1 Topografya optimizasyonu 111
4.3.2 Şekil optimizasyonu 124
4.4. M5C Modelinin Bulguları 135
4.4.1. M5C Modelinin aerodinamik performansı 135
4.4.2. M5C Modelinin nümerik akış görselleri 138
4.4.3. M5C Modelinin değerlendirmesi 142
4.5. Oluşturulan Biyomimetik Modellerin Kıyaslanması ve Tartışma 142
5. SONUÇ VE YORUMLAR 149
5.1. Giriş…. 149
5.2. Sonuçlar…. 149
5.3. Tavsiye ve Gelecek Çalışmaları 152
KAYNAKLAR 155
EKLER 164
ÖZGEÇMİŞ 180

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
a	Rastgele alınan bir cismin yarıçapı, m
a_n	Fourier serisi sin denklem katsayıları (n:1-8)
A	Aksiyal kuvvet, N
AR	Kanat genişlik oranı
b	Kanat boyu, m
b_n	Fourier serisi cos denklem katsayıları, n:1-8
c	Kanat ortalama veter uzunluğu, m
c_y	Eğrilerin yerel veter uzunluğu, m
C_D	Sürükleme kuvveti katsayısı
$C_{D\infty}$	Sonsuz kanadın sürükleme kuvveti katsayısı
C_L	Kaldırma kuvveti katsayısı
$C_{L\infty}$	Sonsuz kanadın kaldırma kuvveti katsayısı
C_M	Moment katsayısı
D	Sürükleme kuvveti, N
g	Yerçekimi ivmesi, m/s^2
h	Kanadın azami kamburluk mesafesi, m
h_n	Model eğrilerinin yükseklikleri (n: eğri adı), m
K	Akış dolanım şiddeti, m^2/s
l	Referans uzunluk, m
L	Kaldırma kuvveti, N
M	Moment, Nm
M_{LE}	Hücum kenarı etrafında oluşan moment, Nm
M_x	Yalpa momenti, Nm
M_y	Sapma momenti, Nm
M_z	Yunuslama momenti, Nm
N	Normal kuvvet, N
p	Basınç dağılımı, N/m^2
p_l	Kanadın alt yüzeyindeki basınç, N/m^2
p_u	Kanadın üst yüzeyindeki basınç, N/m^2
P	Statik basınç, Pa
P_{din}	Dinamik basınç, Pa
R	Toplam kuvvet, N
Re	Reynolds sayısı, $Re = V_\infty c/\nu$
s_l	Kanadın alt yüzeyinde alan, m^2
s_u	Kanadın üst yüzeyinde alan, m^2
S	Kanadın planform alanı, m^2
t	Kanadın kalınlığı, m
T_∞	Ortam havasının sıcaklığı, ℃
u, v, w	x, y, z yönlerinde hız değerleri, m/s
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	x, y, z yönlerinde ortalama hız değerleri, m/s
$\overline{u'}, \overline{v'}, \overline{w'}$	x, y, z yönlerinde türbülans değerleri, $1/s$
V_∞	Serbest akış hızı, m/s
V_s	Kanat yüzeyindeki akış hızı, m/s

x, y, z	Kartezyen koordinat noktaları
x_{ac}	Kanadın aerodinamik merkezinin hücum kenarına uzaklığı, m
x_{cp}	Kanadın basınç merkezinin hücum kenarına uzaklığı, m
z_L	Yaprak kısmındaki eğrilerin başlangıç eğrisine olan uzaklığı, m
α	Hücum açısı, °
β	Azami kamburluk açısı, °
Γ	Akışın net dolanımı, m^2/s
θ	x, y ekseniyle oluşan açı, °
θ_L	Yaprak kısmındaki eğrilerin yatayla yaptığı açı, °
μ	Dinamik viskozite, $Pa\ s$
ν	Kinematik viskozite, m/s^2
ρ	Yoğunluk, kg/m^3
τ	Kayma gerilmesi, N/m^2
τ_l	Kanadın alt kısmındaki kayma gerilmesi, N/m^2
τ_u	Kanadın üst kısmındaki kayma gerilmesi, N/m^2
Ψ	Akım fonksiyonu
ω	Fourier serisi denklemlerin sabit katsayısı

Kısaltmalar	**Açıklama**
3D	3 boyutlu
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
DES	Detached Eddy Simulation
FK	Firar Kenarı
HK	Hücum Kenarı
ISO	International Organization for Standardization
LES	Large Eddy Simulation
LEV	Leading Edge Vortex
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PIV	Particle Image Velocimetry
RANS	Reynolds Avarage Navier Stokes
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation
SIMPLEC	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation Consistent
TRIZ	Theory of Inventive Problem Solving

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 1.1.	Akçaağaç tohumundan bir görünüm	2
Şekil 3.1.	Kuş kanadı ile uçak kanadı (Royal Aeronautical Society, 2021)	20
Şekil 3.2.	Kanatların kullanım alanlarına örnekler	21
Şekil 3.3.	Horatio Phillips'in deneylerini gerçekleştirdiği kanat profilleri (a) ve patentini aldığı kanat profili (b) (Zhonghua ve ark., 2021)	22
Şekil 3.4.	Wright kardeşlerin deneylerinde kullandığı bazı kanat profilleri (Anderson, 2011)	22
Şekil 3.5.	Birinci Dünya Savaşı'nda kullanılan bazı kanat profilleri	23
Şekil 3.6.	Farklı kanat profili şekilleri	24
Şekil 3.7.	Uçağın kanat profilinin seyir (a), kalkış (b) ve iniş (c) pozisyonları (Anderson, 2011)	24
Şekil 3.8.	Bir kanat profili üzerindeki terminolojik terimler	25
Şekil 3.9.	Üç boyutlu kanat gösterimi	26
Şekil 3.10.	Kanat profili üzerinde kaldırma ve sürükleme kuvvetleri	26
Şekil 3.11.	Kayma gerilmesinin kanat profili yüzeyinde oluşumu	28
Şekil 3.12.	Basınç dağılımının kanat profili yüzeyinde oluşumu	28
Şekil 3.13.	Kayma gerilimi ve basınç dağılımının kanat profilinde oluşturduğu toplam R kuvveti ve M momenti	29
Şekil 3.14.	Toplam aerodinamik kuvvetin(R) komponentlerine ayrılmış şekli	29
Şekil 3.15.	Kanat profilinin alt ve üst yüzeyinde rastgele alınan noktalar üzerindeki kayma gerilmesi ve basınç	30
Şekil 3.16.	Kanat profili üzerinde oluşan kaldırma kuvveti	32
Şekil 3.17.	Akış alanı içerisinde kanadın üzerinde oluşan durma noktası	33
Şekil 3.18.	Kanadın üst kısmında havanın sıkışması	34
Şekil 3.19.	Dolaşımsız bir akışta kanat profili üzerindeki akış çizgileri (Houghton ve ark., 2016)	34
Şekil 3.20.	Kaldırmanın gelişmesindeki geçici durumlar	35
Şekil 3.21.	Kutta – Joukowski koşulu ve oluşturduğu kaldırma	36
Şekil 3.22.	Newton'un üçüncü yasasına dayanan kaldırma teorisi	37
Şekil 3.23.	Bir küre üzerinden laminer akışta ayrılma (Tec-Science, 2020)	39
Şekil 3.24.	Laminer ve türbülans sınır tabaka akışları (Boldt, 2022)	39
Şekil 3.25.	Laminer akış kontrolü ile türbülansın geciktirilmesi (Krishinan ve ark., 2017)	40
Şekil 3.26.	Köpek balıklarının derilerindeki mikroskobik çıkıntılar (New Atlas, 2018)	41
Şekil 3.27.	Yüksek hücum açısında kanat üzerinden akışta ayrılma ("Flow Separation," 2017)	41
Şekil 3.28.	İndüklenmiş sürükleme (Boldmethod, 2021)	42
Şekil 3.29.	Dalga sürüklemesi (Boldmethod, 2021)	43
Şekil 3.30.	İnterferans sürüklemesi (Boldmethod, 2021)	43
Şekil 3.31.	Akışkan içerisindeki bir cisme etki eden momentler(White, 2004)	45
Şekil 3.32.	Yunuslama momentinin kanat profili üzerinde gösterimi (Anderson, 2011)	46
Şekil 3.33.	Sonsuz kanat profili	47

Şekil 3.34. Akış içerisindeki cismin, K = 0 (*a*) ve K ≠ 0 anında (*b*) görüntüsü (White, 2004) 48
Şekil 3.35. NACA 2412 kanat profili için CL'nin α'ya karşı değişiminin teorik ve deneysel verileri (Abbott ve von Doenhoff, 1959) 51
Şekil 3.36. Biyomimikri örnekleri: Stealth B2 Bomber – şahin (a), SHINKANSEN yüksek hızlı tren – yalıçapkını kuşu (b), yüksek hızlı yüzme sağlayan köpek balığı derisi (c), bardane bitkisi – cırt cırt (d), Kuşların kıvrık uçlu kanatları – uçakların kanat uçlarının kıvrılması (e) (Mibelle Biochemistry, 2021) 53
Şekil 3.37. Kan damarları yardımıyla kendi kendini iyileştiren insan epidermi sistemi (*a*), biyoesinlenmeli sensetik mikrovasküler ağ (*b*) (Zhao ve ark., 2014) 55
Şekil 3.38. Günlük aktiviteleri gerçekleştirebilen bir biyonik kol örneği (George ve ark., 2022) 56
Şekil 3.39. Biyomimetik tasarım örneği (Ryan, 2014) 56
Şekil 3.40. Biyomimimkri Tasarım Sarmalı (Biomimicry Design Spiral) (Biomimicry Institue, 2017) 59
Şekil 3.41. Çözüm odaklı yaklaşım için biyomimikri tasarım sarmalı (Goel ve ark., 2014) 61
Şekil 3.42. Toplanan akçaağaç tohumu numuneleri 63
Şekil 3.43. Akçaağaç tohumunun tohum kısmı çeşitleri 64
Şekil 3.44. Numune üzerinde kesilmek üzere oluşturulan rastgele çizgiler (*a*) ve tasarım programında bu çizgilere denk şekilde oluşturulan çizim düzlemleri (*b*) 65
Şekil 3.45. Ölçülen kalınlıklardan elde edilen eğrinin, çizim düzlemlerine aktarılmasına bir örnek 66
Şekil 3.46. Eğrilerin şekil yapısına göre oluşturulan modelin kesitleri 66
Şekil 3.47. Tohum modelinin her bir kısmına ait eğrilerden birer örnek 67
Şekil 3.48. Akçaağaç tohumunun biyomimetik modelinin tasarım programında oluşturulmuş 3D hali 68
Şekil 3.49. Tasarlanan akçaağaç tohumunun ana hat eğrisi 69
Şekil 3.50. zL ve θL arasındaki korelasyon 71
Şekil 3.51. Örnek bir eğri üzerinde oluşturulan 30 nokta 72
Şekil 3.52. S1 eğrisinin fourier serisi denkleminin çözülmesi için oluşturulmuş örnek tablonun ekran görüntüsü 73
Şekil 3.53. S1 eğrisi için belirlenen denklemin eğri ile uyumu 74
Şekil 3.54. Akçaağaç tohumunun biyomimetik tasarımı için oluşturulan görev modeli 75
Şekil 3.55. Creality 3D LD-006 yazıcı 76
Şekil 3.56. Baskı sonu model (*a*) ve deneye hazır, temizlenmiş hali (*b*) 77
Şekil 3.57. Biyomimetik model üzerindeki tanımlanan parametreler 79
Şekil 3.58. Açık (a) ve kapalı (b) döngüye sahip rüzgar tünelleri (Cattafesta ve ark., 2010) 80
Şekil 3.59. Emiş tipli, açık döngülü bir rüzgâr tünelinin bölümleri (Kaushik, 2019) 81
Şekil 3.60. Çalışmanın gerçekleştirildiği açık çevrim, emmeli tip rüzgâr tüneli 82
Şekil 3.61. Rüzgar tüneli ve entegre ekipmanların şematik görünümü 83
Şekil 3.62. ATI Gamma model dönüştürücü ölçüm cihazı (ATI Industrial

Automation, 2022) 84
Şekil 3.63. Isel ZD30 açısal döndürme aparatı (Isel USA, 2022)..... 85
Şekil 3.64. Mano Air 500 mikromanometre 85
Şekil 3.65. Aerodinamik performans ölçer sistem ve diğer ekipmanlar..... 87
Şekil 3.66. Test bölümü içerisinde bir akçaağaç tohumu modelinin konumlandırılması..... 88
Şekil 3.67. 100 Hz frekansta “x” ve “y” yönündeki verilerin elde edilmesi..... 89
Şekil 3.68. Modellenen akış alanı 93
Şekil 3.69. Ansys programındaki 3D ağ yapısı tipleri 94
Şekil 3.70. Oluşturulan ağ yapısının genel *(a)*, Kesit A-A’ya göre *(b)* ve kanat modeline yakınlaştırılmış *(c)* görünümü 95
Şekil 3.71. Örnek bir konfigürasyon çözümünden yakınsama eğrileri..... 100
Şekil 3.72. Tez çalışması algoritması..... 102
Şekil 4.1. M0 modelinin, 10 m/s’de, α’ya göre CL değişimi 104
Şekil 4.2. M0 modelinin, 10 m/s’de, α’ya göre CD değişimi..... 104
Şekil 4.3. M0 modelinin, 10 m/s’de, α’ya göre CL/CD değişimi 105
Şekil 4.4. M0 modelinin, farklı serbest akış hızlarında, α’ya göre CL değişimi..... 105
Şekil 4.5. M0 modelinin, farklı serbest akış hızlarında, α’ya göre CD değişimi..... 106
Şekil 4.6. M0 modelinin, farklı serbest akış hızlarında, α’ya göre CL/CD değişimi..... 106
Şekil 4.7. M0 modelinin, 8° hücum açısında, hız değişimine bağlı olarak aerodinamik performanslarındaki değişim..... 107
Şekil 4.8. M0 modelinin, α:8° ve V∞:10 m/s’deki basınç konturları..... 108
Şekil 4.9. M0 modelinin, α:8° ve V∞:10 m/s’deki hücum kenarından firar kenarına kadar olan basınç dağılımı..... 108
Şekil 4.10. Kanat uzunluğu boyunca alınan dört kesit..... 109
Şekil 4.11. M0 modelinin, α:8° ve V∞:10 m/s’deki belli kesitlerindeki hız konturları ve girdap eğilimi değerleriyle akış çizgileri..... 109
Şekil 4.12. M0 modelinin, α:10° ve V∞:10 m/s’deki basınç konturlarındaki; en yüksek basınç farkını oluşturan 6 eğri..... 112
Şekil 4.13. M1 modeli..... 112
Şekil 4.14. M1 modelinin, α:10° ve V∞:10 m/s’deki basınç konturlarındaki; en yüksek basınç farkını oluşturan 3 eğri..... 113
Şekil 4.15. M2 modeli..... 114
Şekil 4.16. M2 modelinin, α:10° ve V∞:10 m/s’deki basınç konturlarındaki; en yüksek basınç farkını oluşturan 2 eğri..... 115
Şekil 4.17. M3 modeli..... 115
Şekil 4.18. M3 modelinin, α:10° ve V∞:10 m/s’deki basınç konturları..... 116
Şekil 4.19. M4 modeli..... 117
Şekil 4.20. M4 modelinin, α:10° ve V∞:10 m/s’deki basınç konturları..... 117
Şekil 4.21. L7 ve L8 eğrilerinin oluşturduğu tepe-çukur yapı 118
Şekil 4.22. M5 modeli..... 119
Şekil 4.23. M5 modelinin, α:10° ve V∞:10 m/s’deki basınç konturları..... 119
Şekil 4.24. M5 modelinin deneysel çalışma için 3D yazıcıdan alınan baskısı .. 122
Şekil 4.25. M5 modelinin, farklı serbest akış hızlarında, α’ya göre CL değişimi..... 122

Şekil 4.26. M5 modelinin, farklı serbest akış hızlarında, α'ya göre CD değişimi 123
Şekil 4.27. M5 modelinin, farklı serbest akış hızlarında, α'ya göre CL/CD değişimi 123
Şekil 4.28. M5 modelinin, α:8° ve V∞:10 m/s'deki belli kesitlerindeki hız konturları ve girdap eğilimi değerleriyle akış çizgileri 124
Şekil 4.29. S11 eğrisine ait h ve cy uzunlukları 125
Şekil 4.30. M5 modelinin üzerinde DTP uzunluklarının gösterimi 125
Şekil 4.31. 0,4xDTP ve 0,2xDTP değişken faktörleri için örnek hesaplama 127
Şekil 4.32. S11 eğrisinin şekil optimizasyonu için ölçeklendirilmiş eğrileri..... 128
Şekil 4.33. Taguchi analizinden elde edilen, değişkenler için ana etki grafiği.. 131
Şekil 4.34. M5A, M5B, M5C ve M5D modellerinin, V∞:10 m/s'de α'ya göre CLCD değişimleri 134
Şekil 4.35. M5C modelinin, farklı serbest akış hızlarında, α'ya göre CL değişimi 136
Şekil 4.36. M5C modelinin, farklı serbest akış hızlarında, α'ya göre CD değişimi 136
Şekil 4.37. M5C modelinin, farklı serbest akış hızlarında, α'ya göre CL/CD değişimi 137
Şekil 4.38. M5C modelinin, farklı serbest akış hızlarında, α'ya göre CL/CD değişimi 138
Şekil 4.39. M5C modelinin, α:5° ve V∞:10 m/s'deki basınç konturları 139
Şekil 4.40. M5C modelinin, α:8° ve V∞:10 m/s'deki belli kesitlerindeki hız konturları ve girdap eğilimi değerleriyle akış çizgileri 139
Şekil 4.41. M5C modelinin, α:8°, 20°, 30°, 45° ve V∞:10 m/s'deki 0,5b kesitindeki hız konturları ve girdap eğilimi değerleriyle akış çizgileri..... 140
Şekil 4.42. M5C modelinin, α:8° ve V∞:10 m/s'deki B-B kesitindeki, hız konturları ve girdap eğilimi değerleriyle akış çizgileri 141
Şekil 4.43. M5C modelinin, α:8° ve V∞:10 m/s'deki C-C kesitindeki, hız konturları ve girdap eğilimi değerleriyle akış çizgileri 141
Şekil 4.44. M5 ve M5C modellerinin, M0 modeline göre α:5° ve V∞:10 m/s'deki, aerodinamik performanslarının kıyaslanması 144
Şekil 4.45. M5 ve M5C modellerinin, M0 modeline göre α:8° ve V∞:10 m/s'deki, aerodinamik performanslarının kıyaslanması 144
Şekil 4.46. M5 ve M5C modellerinin, M0 modeline göre α:10° ve V∞:10 m/s'deki, aerodinamik performanslarının kıyaslanması 145
Şekil 4.47. Üç kanada ait, tohum kısmındaki kesitte, α:8° ve V∞:10 m/s'deki hız konturları ve girdap eğilimi değerleriyle akış çizgileri..... 146
Şekil 4.48. Üç kanada ait, yaprak kısmındaki kesitte, α:8° ve V∞:10 m/s'deki hız konturları ve girdap eğilimi değerleriyle akış çizgileri..... 147

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 3.1.	Mühendislik ürününün komponentleri ve esinlenilen biyolojik yapının uzuvları arasında kurulan ilişki (Bar-Cohen, 2006).....	57
Çizelge 3.2.	Tasarlanan akçaağaç tohumu modelinin kısımlarının bazı özellikleri.....	69
Çizelge 3.3.	Yaprak kısmındaki eğrilerin yatay düzlemle olan açıları (θL) ve başlangıç eğrilerine olan uzaklıkları (zL).....	70
Çizelge 3.4.	Creality 3D LD-006 yazıcının bazı teknik özellikleri.....	77
Çizelge 3.5.	ATI Gamma model dönüştürücü cihazın ölçüm özellikleri.....	84
Çizelge 3.6.	Mano Air 500 mikromanometrenin ölçüm özellikleri.....	86
Çizelge 3.7.	National Instruments PCI-6220 veri toplama kartı teknik özellikleri.....	88
Çizelge 3.8.	Pdin değerlerine göre her hız için hesaplanan ΔV∞ değerleri	92
Çizelge 3.9.	Ağdan bağımsızlık çalışması	94
Çizelge 3.10.	Nümerik çalışma için oluşturulan ağ yapısının temel özellikleri.	95
Çizelge 4.1.	Topografya optimizasyonundan elde edilen modellerin, α:10° ve V∞:10 m/s'deki aerodinamik performansı ve M0'a göre kıyaslaması.....	120
Çizelge 4.2.	Topografya optimizasyonundan elde edilen modelleri tanımlayan eğriler	121
Çizelge 4.3.	Taguchi metodu için belirlenen amaç ve faktörler	129
Çizelge 4.4.	Taguchi metodu için oluşturulan L16 ortogonal dizisi.....	130
Çizelge 4.5.	Şekil optimizasyonu için ANOVA ile elde edilen bilgiler	132
Çizelge 4.6.	M5 modelinden oluşturulan 4 farklı model	133
Çizelge 4.7.	M0, M5 ve M5C modellerinin 10 m/s'de, bazı hücum açılarında aerodinamik performanslarının sayısal ifadesi.....	143
Çizelge 4.8.	Çalışmada kullanılan M0, M5 ve M5C modellerinin bazı geometrik özellikleri	148

1. GİRİŞ

Doğada canlıların sahip olduğu birçok kanat modeli vardır. Bu kanat modelleri canlıların yaşamlarını devam ettirebilmeleri için çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Bu avantajlar, insanoğlunun da kullandığı teknolojik cihazlarda üstün performans parametrelerinin elde edilmesi için bir gereklilik olarak ortaya çıkabilmektedir.

Biyomimikri, sürdürülebilir bir gelişim için, karşılaşılan sosyal, çevresel ve ekonomik zorlukların giderilmesine yönelik, doğayı bir rol model alarak yapılan tasarım yaklaşımlarını içeren bir bilim dalıdır. Biyolojik sistemlerin fonksiyon analizinin yapılıp, bu modellerin pratik problemleri çözmek amacıyla disiplinler arası bir işbirliği ile bir tasarıma aktarılmasıyla ise biyomimetik tasarımlar ortaya çıkmaktadır (International Organization for Standardization 18458 [ISO], 2015). Dolayısıyla; biyomimetik için, biyolojik olarak esinlenilmiş teknolojiler diyebiliriz. (Bar-Cohen Y, 2005)

Biyomimetik tasarımlar pek çok alanda görülebilmektedir. Bunlardan birisi de rüzgâr enerjisinin etkin rol oynadığı aerodinamik alanıdır. Aerodinamik bir tasarım yapılırken genelde verimliliği kanıtlanmış, kendini kabul ettirmiş tasarımlar kullanılır. Kimi zaman ise tasarımcı, geleneksel tasarımların dışına çıkarak, verimi daha iyi hale getirmek adına, doğada bulunan biyolojik varlıklardan esinlenerek tasarımına yön verir. Bu gibi tasarımlarda doğada aerodinamik özellikleri göze çarpan, bu özellikleriyle varlığını sürdüren biyolojik kanat yapıları taklit edilmeye çalışılır.

Şekil 1.1'de gösterilen, literatürde samara olarak da bilinen, Sapindaceae familyasından akçaağaç tohumu, kuruduktan sonra dalından düşerken aerodinamik özellikleri sayesinde, rüzgarın da etkisiyle, dönerek kilometrelerce uzağa savrulabilmektedir (Nathan ve ark., 2002).



Şekil 1.1. Akçaağaç tohumundan bir görünüm

Akçaağaç tohumunun otorotasyonu ve havada uzun sürede uçuşta kalabildiği düşünüldüğünde, bu tohumun biyomimetik bir kanat olarak aerodinamik performansının incelenmeye değer olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada; akçaağaç tohumu alt ve üst yüzeylerden simetrik olacak şekilde bilgisayar destekli bir program vasıtasıyla tasarlanmıştır. Tasarlanan biyomimetik model denklemlerle ifade edilip tasarımın analitiksel olarak verileri sunulmuştur. Biyolojik örneğinden bire bir taklit edilen bu biyomimetik modelin aerodinamik performansı belli koşullarda ve parametrelerde incelenmiş ve buradan elde edilen verilerle akçaağaç tohumu modelinin geometrik özelliklerine göre gösterdiği performans değerlendirilmiştir.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda akçaağaç tohumundan ilk elde edilen biyomimetik model, aerodinamik performansının artırılmasına yönelik iki aşamalı bir optimizasyon ve geliştirme çalışmasına dahil edilmiştir. Bu çalışmalar sırasıyla topografya ve şekil optimizasyonu olmuştur.

Geliştirme ve optimizasyon çalışmaları sırasında, akçaağaç tohumundan oluşturulan biyomimetik modellerin belli parametrelerde rüzgar akışına karşı ölçülen verileri ve akış şemaları incelenip sunulmuştur. Aynı zamanda akçaağaç tohumundan ilk elde edilen model dışında, iki aşamalı yapılan bu çalışmalar sonucunda elde edilen diğer iki biyomimetik modelin de aynı koşullarda aerodinamik performansı deneysel ve nümerik çalışmaya tabi tutulmuş ve sonuçlar sunulmuştur.

Tüm bu çalışmalar sonucunda elde edilen bu üç ana biyomimetik modelin birbirleriyle yapılan aerodinamik kıyaslamaları ve çalışmanın nicelik ve nitelik olarak katkısı verilerle ve akış görselleriyle sunulmuştur. Çalışmanın sonunda elde edilen en geliştirilmiş biyomimetik modelin, rüzgâr türbini ve hava taşıtları gibi kanat barındıran sistemlerde geleneksel kanatlar yerine kullanılabilmesi için ipucu verebilecek karşılaştırmalar yapılmak istenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Giriş

Biyomimikri çalışmaları, özellikle Jack Steele (1960) tarafından 1960 yılında ortaya atılan 'biyonik' teriminden sonra çıkmıştır. Bu yıldan sonra, araştırmacılar biyomimikri kavramının diğer terimlerini de geliştirerek doğadan esinlendikleri ya da doğayı taklit ettikleri tasarımlarıyla çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalar arasında biyomimetik kanat modeli oluşturma çalışmaları da oldukça yaygındır.

Akçaağaç tohumu doğada sergilediği aerodinamik savrulma hareketleriyle bilimsel çalışmalar için dikkat çekici olmuştur. Araştırmacılar, bu tohumun havadaki hareket mekanizmasını incelemişlerdir ve bunu nicel olarak açıklamaya çalışmışlardır. Ayrıca bazı araştırmacılar bu tohumu biyomimetik bir kanat olarak belirli sistemlere geleneksel kanatların yerine eklemişlerdir.

Yıllardır süregelen çalışmalarda, çeşitli koşullarda incelenen kanat modellerinin aerodinamik parametrelerini oluşturan etkiler de araştırılmıştır. Biyomimetik kanatlar için kaldırma kuvvetini oluşturan LEV (Leading Edge Vortex), biyomimikri alanında araştırma konuları arasına girmiştir.

Kaynak araştırması, biyomimimkri ile ilgili, biyomimetik kanat ile ilgili, akçaağaç tohumu ile ilgili, LEV ile ilgili çalışmalar olmak üzere 4 farklı başlık altında toplanmıştır.

2.2. Biyomimikri ile İlgili Çalışmalar

Biyomimetik anlayışı, bilindiği kadarıyla, Çinlilerin suni ipek arayışları nedeniyle, insanlık tarihinde 3000 yıl öncesine kadar dayanmaktadır (Vincent, 2001). Tarih boyunca da doğadan kopyalama veya esinlenme, yeni sistemlerin oluşturulması veya mevcut sistemlerin geliştirilmesi için sürekli hale gelmiştir.

Biyomimetik alanıyla ilgili makaleler, 1990'larda yılda 100'den az iken, yıllar geçtikçe, 2005 yılına kadar, katlanarak gelişip yılda 1000'den fazla bir olgunluğa ulaşmıştır. Yılda

ortalama %6 gibi bir büyüme gösterip 2010 yılında yılda 3000'e yakın bir yayın bulunmaktadır (Larsen ve Von Ins, 2010).

Biyomimikri çalışmaları arasında; "biyomimetik", "robot", "esaslı", "model", "tasarım", "kontrol", "biyonik", "esinlenme" gibi terimler daha popüler olurken, bu çalışmalar daha çok biyomateryal konulu dergilerde yayınlanmıştır (Lepora ve ark., 2013)

Günlük hayatımızdaki eşya veya aletlerde kullanılabilecek malzemeler açısından doğa önemli potansiyelleri barındırmaktadır:

Carlson ve ark., (2005) yaptıkları çalışmada; biyolojik malzemelerin, insan yapımı malzemeleri aşan özelliklere sahip olduğunu belirtmişlerdir. O yüzden biyolojik malzeme kullanımına örnek olarak; ipek, deri ve yünü vermişlerdir. Yine yaptıkları çalışmada arıların yaptığı bal peteği yapısını da, arıların verimli bir paketleme tekniği açısından, örnek göstermişlerdir. Bu petek yapısı, sağladığı düşük ağırlık ve yüksek dayanıklılık nedeniyle birçok uçak parçasında kullanılması da söz konusu olmuştur.

Zhu ve ark., (2016), çeşitli doğal yaratıkların, sisten su toplamalarıyla, yeni ve işlevsel su toplama malzemeleri geliştirmek için bir ilham kaynağı oluşturmalarından söz etmişlerdir. Yayınladıkları derleme makalesinde; kaktüs, örümcek ve çöl böceği gibi su toplama konusunda uzman olan canlıların biyoesinlenmeli malzemeye olan ilhamı üzerinde durmuşlardır. Bunu, namib otu, yeşil ağaç kurbağaları ve çöl kertenkeleleri gibi damlacık taşıma yapan diğer doğa canlılarından verdikleri örnekler izlemiştir. Son olarak, çalışmalarında; biyoesinlenmeli sis toplama malzemelerinin gelecekteki gelişimi ile ilgili sonuçlarını sunmuşlardır.

Doğayı, malzeme bilimi için bir okul olarak gören Sun ve ark., (2011), işlevsel biyoarayüz malzemeleri için bir çalışma yayınlamışlardır. Bu çalışmada doğadaki malzemelerin işlevsel 3 özelliğinden bahsetmişlerdir. Bunlarda ilki, doğal biyomalzemelerin üstün özelliklerinin normalde yığın özellikleri tarafından belirlenmediği, daha çok yüzeydeki çok ölçekli mikro ve nano yapılarla ilgili olduğu; ikincisi, biyolojik sistemlerin biyomolekül etkileşimlerinin sorunlarını çözmek için genellikle oldukça özellikli zayıf

etkileşimleri (örneğin hidrojen bağı etkileşimi, hidrofobik etkileşim, vb.) kullanmasıdır; üçüncüsü, doğadaki biyomoleküllerin genellikle kiral moleküller olması ve belirli bir enantiomorf konfigürasyon için yüksek tercih göstermesi.

Meredith ve ark., (2013), yayınladıkları derleme makalesinde; doğadan esinlenilen elektronik ve optoelektronik malzemeler üzerinde durmuşlar ve bunların davranışlarını kontrol eden karmaşık yük aktarımını ve foto fiziğini özetlemişlerdir. İyon veya proton akışına ("iyonikler ve protonikler") dayalı elektrikli cihazlar kavramını da tanıttıkları makalelerinde; bazıları biyoesinlenmeli yapılara sahip çalışan cihazların üretilmesindeki son gelişmeleri vurgulamışlar ve mevcut sorunları, zorlukları ve olası çözümleri özetlemişlerdir.

Heinzmann ve ark., (2016), yayınladıkları makalede; kovalent olmayan bağlantıların, canlı organizmalar tarafından kullanılan, çeşitli zorlu ortamlarda farklı yüzeylere yapışmalarına ve dış uyaranlara tepki olarak ayrılmalarına izin veren çoğu yapışma işleminin merkezindeki yapı olduğunu belirtmişlerdir. Bu tür gelişmiş işlevselliklerin, araştırmacılara, uyarıcıya duyarlı özelliklere sahip sentetik yapıştırıcı polimerlerin geliştirilmesi için benzer tasarım yaklaşımları kullanma konusunda ilham verdiğinden bahsetmişlerdir.

Doğadaki canlıların davranışlarının taklit edilip teknolojiye uygulanması veya doğadaki sistemlerin esinlenme kaynağı olarak kullanıldığı birçok çalışma da mevcuttur:

Mazzolai ve ark., (2012), yumuşak robotikte yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesinde bir ilham noktası olarak ahtapotları model olarak görmüşlerdir. Çalışmalarında; ahtapot kollarının, sert yapılardan yoksun oldukları, ancak sertlik derecelerini değiştirebildikleri ve kontrol edebildikleri için, önemli esneklik ile büyük bir kuvvet uygulama becerisini birleştiren benzersiz biyomekanik yeteneklere sahip olduklarını belirtmişlerdir Bu özellikler araştırmacılar tarafından robotik alanında incelenmişlerdir. Oluşturdukları robot, uyumluluk, uzama ve kuvvet açısından biyolojik modeldekiyle aynı performansı sağlama becerisini göstermektedir.

Stahlberg ve Taya (2005), çalışmalarında; doğadaki bitkilerin davranışlarının taklit edilecek birçok yanı olduğundan bahsederler. Örneğin; böcek içine girdiğinde bir tuzak mantığı ile yapraklarını kapatan bitkiler veya ayçiçeğinin daha fazla güneşe maruz kalmak için yönünü sürekli değiştirmesi gibi insanoğlunun yapabileceği teknolojik sistemler için bitkilerden örnekler vermişlerdir.

Buck (2017), kentsel altyapı planlaması ve tasarımı bağlamında bir tasarım metodolojisi olarak biyomimikrinin önemini tartışmıştır. Biyomimikri ilkelerinin kentsel altyapı sorunlarına uygulanmasını, 'ana akım' altyapı yaklaşımları yerine biyomimikriden ilham alan tasarımların kullanıldığı vaka çalışmalarını analiz edilerek inceleyen araştırmacı makalesinde; biyomimikrinin, gelecekteki şehir altyapı stratejilerini birden fazla perspektiften bilgilendirmede, potansiyel olarak kritik bir bakış açısı olduğunu göstermiştir.

Doğada bulunan canlıların şekilleri ve tasarımlarının onlara sağladığı avantajlar da araştırmacıların yeni bir yapı tasarımında dikkatini çekmiştir:

Clark ve ark., (2001) hamam böceğinden esinlenerek tasarladıkları yeni bir altı ayaklı çalışan robot sınıfının tasarımını ve üretimini sunmuşlardır. Çalışmalarında; hem robotun hem de hamamböceğinin hareket dinamiklerini karşılaştırmaya odaklanmışlardır. Çalışmalarının sonuçları, aynı zamanda adaptasyon ihtiyacını da göstermektedir. Eğim ve doku gibi farklı çevresel koşullar, optimum geçiş için farklı operasyonel parametre grupları gerektirdiğini belirten araştırmacılar, gelecekteki çalışmalarında, ortam ve görevdeki bu değişikliklere uyum sağlamak için mevcut kontrol yapısını güçlendirmeye odaklanacaklarını belirtmişlerdir.

El-Zeiny (2012), iç mimaride biyomimikri uygulamaları hakkında bir makale yayınlamıştır. Biyomimikrinin bir problem çözme metodolojisi olduğunu savunan araştırmacı, iç ortamdaki; gün ışığı, termal konfor, enerji verimliliği, dayanıklılık ve üretkenlik gibi konularda etkili çözümler bulmamız için biyomimikrinin sağladığı tasarımların yardımcı olabileceğini örneklerle belirtmiş.

Öte yandan, Nkandu ve Alibaba (2018) yayınladıkları makalelerinde; birçok mimarın doğadan ilham almakla ilgilenmesine rağmen, bir tasarım yöntemi olarak biyomimikrinin yaygın bir şekilde uygulanmasının büyük ölçüde aslında gerçekleştirilemediğinden, bu nedenle, biyomimikriyi belirli bir noktada gerçekten entegre eden çok az sayıda mevcut proje olduğundan bahsetmektedirler. Mimari tasarıma etkili bir biyomimetik yaklaşım, davranış modellemesini, malzemelerin kısıtlamalarını ve çevresel faktörlerin etkisini dikkate alan tasarım yöntemlerinin geliştirilmesini, biçim, malzeme ve yapının ayrı ayrı değil, karmaşık ilişkilere sahip olarak derinlemesine anlaşılmasının gerektiğinden bahsetmişlerdir. Ayrıca çalışmalarında, farklı biyomimikri seviyeleri için bir çerçeve sunmuşlardır.

2.3. Biyomimetik Kanat ile İlgili Çalışmalar

Tucker (1987), dengede süzülen şahin ve akbaba kuşlarının farklı kanat açıklıkları için kaldırma ve sürükleme arasındaki ilişkiyi analiz etmiş ve bu ilişkiyi maksimum süzülme performansını tahmin etmek için kullanmıştır. Rüzgâr tünelinde iki kuş kanadı ile yaptığı deneylerde de; kuşların, kanat açıklığını azaltarak sürükleme kuvvetini arttırdığını görmüştür. Araştırmacı, bu değişikliğin, indüklenen sürüklemeyi artırdığını ve kuş kanadı gibi modellerde, geleneksel kanatların aksine, 1'e yakın C_L değerlerinde, minimum C_D değerleri görüldüğünü belirtmiştir.

Bowman ve ark., (2002), Şekil değiştirme (morphing) konseptini, kuşları kullanarak araştırmışlardır. Kanat alanı, kamber, dihedral değişiklikleri ve süzülerek uçuşta sürüklemenin uçuş yolu açısı üzerindeki etkisi dahil olmak üzere, bazı kuş benzeri biçim değiştirme mekanizmaları için performans tahminleri vermişlerdir. Şekil değiştirme için, çalışmalarında farklı konfigürasyonlar oluşturan araştırmacılar, örneğin; kuşların kanat alanını değiştirmesi gibi şekil değişikliklerinin uçak kanadına uygulandığında yakıt tüketimini azaltacağı gibi çeşitli çıkarımlar yapmışlardır.

Park ve Yoon (2008), tasarladıkları 4 ornitopterin (kanat çırparak uçma elde eden araçlar) kanat tasarımlarını, gerçek bir böcek kanadından ilham alarak yapmışlardır. Böcek uçuşunun geç stol olma gibi özelliklerini tasarladıkları araçta kullanmayı hedefleyen

araştırmacılar, araç performansını etkileyen en önemli faktörün, kanat çırpma genliğini genişleterek veya kanat çırpma frekansını yükselterek kontrol edilen ilerleme oranının olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarından çıkardıkları sonuca göre; biyomimetik kanatlı bir ornitopterin, optimizasyonu için esinlenilen daha küçük böcek kanadının gerçekte sahip olduğu, özellikle kanat çırpma gibi mekanizmaların irdelenip, uygun bir şekilde taklit edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Galantai ve ark., (2012), doğadan esinlenilerek kanatlarda uygulanan şekil değiştirme (morphing) üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu şekil değiştirme için yeni bir tasarım sunulan bu çalışmada; kanadın aerodinamik analizi Fluent programı ile gerçekleştirilmiştir. Bu analizin sonucunda; şekil değiştirilmiş yeni kanadın maksimum hızda güç gereksinimini yaklaşık %9-12 oranında azaltabileceği sonucuna varmışlardır.

Başak ve Demirhan (2017), gerçekleştirdikleri çalışmada; kambur balinaların yüzgeçlerinden esinlenerek tüberkül kanat profilini oluşturmuşlardır ve düz kanat profili ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, tüberkül kanat profilinde 100 m/s hızda aerodinamik verimini, normal düz kanat profiline göre yaklaşık % 42,09'a kadar daha yüksek olarak bulmuşlardır.

Yan ve ark., (2020) mersin balığını 3D tarayıcı ile tarayarak, balığın yapısını dijital olarak aktarmışlardır. Bu yapıdan 3 tane simetrik 3 tane asimetrik olmak üzere, toplamda 6 tane biyonik kanat profili (airfoil) oluşturmuşlardır. Bu 6 profil ile belli hız ve hücum açısında gerçekleştirdikleri nümerik analizler sonucu; asimetrik biyonik kanatların kaldırma-sürükleme kuvveti katsayılarının karakteristiklerinin, simetrik kanatlara göre daha iyi olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca bir su-jet pompası için kanadının hidrolik performansı açısından; simetrik olan 3 biyonik kanat, geleneksel olarak kullanılan NACA 0015 profilinden daha iyi sonuç verirken, asimetrik olan diğer 3 biyonik kanat profili de, asimetrik kanat yapısı olan nonbiyonik Clark-Y kanat profilinden daha iyi sonuç vermiştir.

Chu (2016), Malezya'da yetişen Dryobalanops aromatik ağacının tohumlarından, biyomimetik olarak, rüzgar türbini kanadı tasarlamıştır. CFD (Computational Fluid

Dynamics) akış analizi için OPENFOAM'ı kullanan araştırmacı, güç faktörünü hesaplayıp ve bu tür tohumlarda CT itme katsayısı değerlerinin analizini yapmıştır. Çalışmasında biyonik kanatlı bu rüzgâr türbininin rüzgârdan enerji elde edilmesinde etkili ve uygulama potansiyelinin yüksek olduğunu belirtmiştir. Chu ve Chong daha sonra yine Dryobalanops aromatik ağacının tohumlarından esinlenilerek oluşturulan yatay eksenli bir rüzgar türbininin rotor kanadının performansını incelemiştir. Yaptıkları simülasyon sonuçlarında, önerilen biyomimetik rüzgar türbininin, 10 m/s'lik serbest akış hızında 1,5'lik uç hız oranında (TSR) 0.386 güç katsayısına sahip olduğunu göstermektedir. Çalışmada incelenen bu biyomimetik rüzgâr türbininin, karşılaştırdıkları geleneksel kanatlı rüzgâr türbinlerine göre çok daha iyi başlangıç torkuna sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Ikeda ve ark. (2018), güçlü aerodinamik kuvvet üretimi ve dengeli uçuş sağlayan kuş kanatlarından ilham alarak, küçük rüzgâr türbinleri için biyomimetik bir kanat yapısı tasarlamışlardır. Bu kanadın aerodinamik karakteristiklerini hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile inceleyip, bu tasarlanan biyomimetik kanadın, kompleks doğal türbülanslı alanlarda, rüzgar türbinleri için sürdürülebilir bir potansiyeli olduğunu belirtmişlerdir.

Tanürün ve Acır (2019), kambur balinalarının aerodinamik özelliklerini, geleneksel olarak kullanılan NACA 0015 kanat yapısına uygulamışlardır. Ansys Fluent ile yaptıkları numerik analizlerde; balinaların tüberküllerinin eklenmesiyle yeniden tasarlanan bu modifiyeli kanat yapısının, 7,2x105 Reynolds sayısında, irtifa kaybı (Stol) sonrası aerodinamik veriminin (C_L/C_D), modifiyesiz düz kanada göre % 3,81 daha fazla olduğunu görmüşlerdir.

2.4. Akçaağaç Tohumu ile İlgili Çalışmalar

Biyomimikri çalışmaları arasında, Sapindaceae familyasından çeşitli türleri bulunan akçaağaç ağacının tohumu ile ilgili çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmalar bu tohumun havada yol alış mekanizmasına ve bu tohumun biyomimetik olarak kullanılabileceği kanat tasarımlarına değinmektedirler.

Akçaağaç tohumunun dönerek havada süzülme mekanizmasını inceleyen Norberg (1973), akçaağaç tohumunun dönme merkezinin kütle merkezi ile hemen hemen çakıştığını ve bu merkezin, hücum kenarından veter uzunluğunun 3'te 1'i kadar uzaklıkta bulunduğunu belirtmiştir. Bu özellikler ile akçaağaç tohumunda; aerodinamik ve merkezkaç kuvvetleri, hücum açılarının ve süzülme açılarının stabilitesini içeren yunuslama stabilitesi verecek şekilde etkileşime girdiğini de belirtmiştir.

Azuma ve Yasuda (1989), akçaağaç tohumunun, dikey bir rüzgâr tünelinde deneylerini yapıp kameralarla dönüş mekanizmasını görüntülemişlerdir. Çalışmalarında; akçaağaç tohumunda kaldırma kuvvetinin çoğu, kanadın ucunun veya dış terminalinin yakınında üretildiği belirlenirken, itici kuvvet ve direnç kuvvetinden oluşan yatay kuvvet, kanat ucunda negatif ve kök yakınında pozitif olduğunu da söylemişlerdir.

Seter ve Rosen (1992) bir akçaağaç tohumu kanadının farklı konfigürasyonlarının otorotasyonunun ve kararlılığının test edildiği bir dizi deney gerçekleştirmişlerdir. Yayınladıkları makalede; kanadın, dönüş hızını belirleyen tek bir parametreyi belirtmemenin zor olduğunu, bunun yerine muhtemelen farklı parametrelerin etkileri arasındaki doğrusal olmayan bağlantının bir sonucu olduğunu belirtmişlerdir. Öte yandan, dönüş hızı ile dönüş hızı arttıkça azalan konik açı arasında tutarlı bir ilişki olduğunu da eklemişlerdir.

Ulrich ve ark., (2010) çalışmalarında tasarlayıp ürettikleri robotik bir akçaağaç tohumunun hareket denklemlerinin türetilmesini sunmuşlardır. Doğrusal olmayan Euler denklemlerini, aracın katı cisim dinamiklerini sabit bir dönüşte tanımlamak için kullanmışlar ve bir denklemlerin eğilim durumu ile doğrusal hale getirmişlerdir. Ayrıca; çalışmalarında tartıştıkları sabit dönüş kavramı, robotik akçaağaç tohumunun ölçekli versiyonlarında gözlemlendiğini raporlamışlardır.

Akçaağaç tohumundan modellenen bir başka mini robot ise, Aslam ve ark., (2014) tarafından üniversite öğrencilerine STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics) kavramlarını öğretmek için kullanılmıştır. Robotik uçucu olarak ifade ettikleri, gelişime açık, pasif akçaağaç tohumu robotu ile öğrencilere, bu robotun, mikro

işlemcileri, kanat sayısı ve üretimi gibi konularda geliştirme yapmaları için fırsatlar sunmuşlardır.

Pounds ve Singh (2015) akçaağaç tohumundan ilham alarak, orman ve park alanlarındaki yangın alanlarına sensör taşıma sistemi önermişlerdir. Çalışmalarında; yangın sonrası bile, orman alanlarında ısının yüksek olması ve dumanlı olmasından kaynaklı yer ve hava ekiplerinin alan hakkında yeterince bilgi alamamasından bahseden araştırmacılar, drone vasıtasıyla yangın alanlarına sıcaklık sensörlerini iletmek için çözüm aramışlardır. Bu sensörlerin güvenli bir şekilde alana inişi için, tohumunu koruyan ve onu yavaş bir şekilde indiren akçaağaç tohumundan esinlenerek, sensörü tohum bölgesine koydukları bir akçaağaç tohumu modeli geliştirmişlerdir. Böylece; sensörlerin taşıyıcı hava araçlarından yangın alanına güvenli bir şekilde ineceğini ifade etmişlerdir.

Çalışmalarında; akçaağaç tohumunun ürettiği kaldırma kuvvetinden, LEV oluşumunun sorunlu olduğunu ifade eden Rezgui ve ark. (2020), akçaağaç tohumunun mikro hava araçlarının kanat tasarımında ilham olabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca; kaldırma kuvveti katsayısı ifadesinin tahmini için "Blade Element Model" (BEM) kullanmışlardır.

Kapil Varshney ve ark. (2011), akçaağaç tohumunun dönüşünü kameralarla incelemişler ve yaptığı karakteristik helisel hareketten, 3D kinematiğini çıkarmışlardır. Tohumun hareketini 3 farklı açı (azimut, devirme, dönme) üzerinden açıklayan araştırmacılar, bu helisel hareketlere yol açan bileşenleri açıklamaya çalışmışlardır. Ayrıca tohumun farklı yerlerinden kesilmiş hallerinin de hareketlerini inceleyip bu durumların oluşturduğu etkiyi incelemişlerdir.

Kirthi Tennakone (2017), yaptığı çalışmada; içinde akçaağaç tohumunun da bulunduğu, doğada bulunan birçok türün tohumlarının yayılmasının aerodinamiğini, sağ-sol asimetri ile ilişkisini incelemiştir ve doğada bu simetrinin kendiliğinden veya içsel olarak gerçekleşmesine örnekler vermiştir.

Lee ve Choi (2018), serbest düşüş sırasında kendi kendine dönen akçaağaç tohumunun, etrafındaki akış için kararsız bir üç boyutlu sayısal simülasyon gerçekleştirmişlerdir.

Tohumun hareketindeki aerodinamik özellikler için tohum geometrisi, yere düşüş ve dönme hızları arasındaki ilişkiyi açıklamak için bir ölçekleme yasası önerilmiştir. Bu mevcut ölçeklendirme yasası, otomatik olarak dönen, düşen tohumların kaldırma kuvvetini terminal hızda makul bir şekilde tahmin ettiğini göstermiştir.

Seidel ve ark. (2017), dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin kentsel alanlarda daha verimli kullanılabilmesi için türbin kanadı tasarımını akçaağaç tohumundan esinlenilerek yapmışlardır. Sonlu elemanlar analizi simülasyonlarından elde edilen sonuçlara göre; yapısal olarak bu biyomimetik rüzgâr türbini kanatlarının 55 m/s'ye varan kuvvetli rüzgâr hızlarına dayanabileceği, bununla birlikte yapısal olarak karşılaştırılabilir olduğu ve çoğu durumda normal kanadın mukavemetinden üstün olduğu görülmüştür. Ek olarak, akçaağaç tohum kanat yapılarının, geleneksel kanat yapılarından daha az büküldüğü anlaşılmıştır.

Holden ve ark. (2015), yaptıkları çalışmada; akçaağaç tohumundan bir rüzgâr türbini kanadı tasarımı yapmışlardır. CFD sonuçlarında, akçaağaç tohumu, türbinde test edildiğinde güç faktörünün maksimuma çıktığını görmüşlerdir (0,59). Farklı Reynolds değerleri için (Re = 2000-20000) kanat profili tasarımında önemli olan C_L kaldırma katsayısı değerlerini de karşılaştırmışlardır. Maksimum Re için 0,8'e kadar C_L değerine ulaşabilmişlerdir.

Hsu ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada; akçaağaç tohumundan kanat profili geliştirip bunu yatay kanatlı bir rüzgar türbinine entegre etmişlerdir. CFD analizini de gerçekleştirdikleri çalışmalarında türbini rüzgâr tünelinde test etmişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda biyonik kanatlı rüzgâr türbinlerinin geleneksel rüzgâr türbinlerine göre daha geniş bir hücum açısı aralığına olanak sağladığı, stol açısının çok daha yüksek değerlerde gerçekleştiği ve en yüksek rüzgâr/elektrik enerjisi dönüşümünü (%37) gerçekleştirdiğini görmüşlerdir.

2.5. Hücum Kenarı Girdabı (Leading Edge Vortex - LEV) ile İlgili Çalışmalar

Bu bölümden sonra "LEV" olarak ifade edilecek olan, "hücum kenarı girdabı", isminden de anlaşılacağı gibi, kanatların hücum kenarında oluşan girdapları ifade etmektedir.

LEV, konumu hücum kenarına yakın kaldığı ve zamanla büyümediği için kararlı bir yapı olmakla birlikte; bu kararlı yapı, kanadın üst yüzeyi üzerindeki akışı, hücum kenarından ayrılmasına izin vermeyip, daha sonra firar kenarından önce yüzeye yeniden bağlanmasına izin verir. Stabil bir LEV oluşumuna sahip bir kanat, bu nedenle, LEV'lerin bulunmadığı kanatlar için akışın kanat yüzeyinden ayrılma durumunu ifade eden stolun oluşabileceği hücum açılarında, firar kenarında Kutta koşulunu karşılayabilir ve sonuç olarak kanat kaldırma katsayısında önemli bir artış elde edilmesini sağlar (Sane, 2003).

Polhamus (1971), hücum kenarında oluşan akış dönüşlerinden meydana gelen bir hücum kenarı vakum analojisinden bahseder. Bu anoloji kaldırma ve kaldırmadan dolayı sürükleme özelliklerini tahmin edebilmektedir. Çalışmasında detaylarından bahsedilen bu anolojinin, delta ve delta olmayan kanatlarda uygulamasından bahseden araştırmacı, bu anolojinin kanat üzerindeki yük dağılımı açısından araştırılmaya değer olduğunu belirtmiştir.

LEV ile ilgili öncü çalışmalardan birisi, Maxworthy (1979) tarafından 1979 yılında yapılmıştır ve özellikle bu çalışmadan sonra bu konu ile ilgili araştırmalar gelmeye başlamıştır. Bu çalışmada; uçan böceklerin havada uçuş anında ürettikleri kaldırma kuvvetinin, kanatlarındaki hücum kenarından, yani akışın kanatla buluştuğu ilk kısımdan, itibaren oluşan girdapların sorumlu olduğunu ifade ediyor. Çalışmada, bu girdap sürecinin eğilim, oluşum ve gelişim süreçleri incelenmiş ve açıklanmıştır. Ayrıca çalışmada; bu olgunun, uçan böceklerdeki kaldırma kuvvetinin asıl sorumlusu olduğu bahsedilmektedir. Daha sonra yapılan araştırmalar da LEV'in kanatlarda kaldırma kuvvetine katkısı araştırılmaya değer bulunmuş ve belirtilmiştir (Bomphrey ve ark., 2006; Wu ve Sun, 2004).

Böcek uçuşundaki, kanatlar tarafından üretilen kararsız kuvvetlerden yola çıkarak araştırmalarını yapan Dickinson ve Götz (1993), yuvarlatılmış hücum kenarlı, keskin firar kenarlı, 1 mm kalınlığındaki test modelleriyle, bazı şartlarda, kaldırma ve sürükleme kuvvetleri ölçmüşlerdir. Çalışmalarının sonucunda; 13,5° üzerindeki hücum açılarında, dürtüsel hareket, ilk 2 veter uzunluğu boyunca kanada bağlı kalan bir LEV üretilmesine neden olduğunu ve bu, 5 kiriş uzunluğu sonrası ölçülen performansa kıyasla kaldırmada %80'lik bir artışa neden olmuştur. Bu artışın, delta kanatlı uçaklarda kuvvet üretme yöntemine benzer şekilde, ayrılmış girdap kaldırma (detached vortex lift) sürecinden kaynaklandığını öne sürmektedirler. Ayrıca modellerinin, 54° hücum açısına kadar geniş bir kaldırma kuvveti sergilediğini ve bunun kanat yüzeyine çıkıntılar eklenmesiyle değişmediğini belirtmişlerdir.

Srygley ve Thomas, (2002) kırmızı amiral kelebekleri üzerinde yaptıkları çalışmada; serbest uçan kelebeklerin kaldırma gücü oluşturmak için çeşitli geleneksel olmayan aerodinamik mekanizmalar kullandığını belirtmişlerdir. Rüzgâr tünelinde, duman ile görüntüleme yaptıkları deneylerinde, bu mekanizmalar arasında iki tip LEV oluşumundan da bahsetmektedirler.

Bomphrey ve ark., (2006) serbest uçan yaban arılarının akış topolojisini tanımlamak için duman görselleştirmeyi kullanarak deneyler yapmışlardır ve kanat dönüşünün LEV oluşumunda önemli bir rol oynayabileceğini öne sürmüşlerdir.

Böcek kanadı gibi kanatlardaki LEV oluşumu ve bu oluşumun kanadın oluşturduğu kaldırma kuvvetine katkısı bilimsel çalışmalarda ispatlanmıştır (Ellington ve ark., 1996; Sane, 2003; Birch ve ark., 2004; Shyy ve ark., 2007). Bununla birlikte, LEV oluşumu, doğadaki bazı ağaç yaprakları ve tohumlarında da görülmektedir.

Salcedo ve ark., (2013) maun ağacı tohumunun düşüşünü dikey bir rüzgar tünelinde incelemiş, DPIV ile akış hareketlerini görselleştirdikleri tohumun üzerinde oluşan LEV yapısını gözlemlemişlerdir. LEV'in kanat profili üzerinde, kanat boyu doğrultusundaki bir gelişiminden bahseden araştırmacılar, LEV oluşumunun kanat boyunca basınç farkındaki artışa sebep olduğunu söylemektedirler. Ayrıca hücum kenarındaki girdabı

ifade eden LEV'in, kanat üzerinde iki farklı bölgede oluştuğunu ancak kanat tabanında oluşmadığını belirtmişlerdir.

Lentink ve ark., (2009) akçaağaç ve gürgen tohumlarının dinamik olarak ölçeklendirilmiş modelleri etrafındaki üç boyutlu akışı ölçmüşlerdir. Çalışmalarında LEV oluşumunu, akçaağaç tohumu kanat boyuna; %25, %50 ve %75 oranındaki uzunluklarda göstermişler ve LEV'in nasıl etkilediğine dair açıklamalar yapmışlardır. Nihayetinde; akçaağaç tohumunun, ağaçtan düşerken sağladığı yüksek kaldırma kuvvetinin LEV'den kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Akçaağaç tohumu ile yapılan başka bir çalışmada ise; Rezgui ve ark., (2020), dönen tohum kanatlarının kaldırma kuvveti üzerindeki LEV'lerin etkisini tanımlayabilen basit bir analitik aerodinamik modelin geliştirilmesini sunmuşlardır. Bu araştırma, biyoesinlenmeli döner mikro hava araçlarının tasarımında, potansiyel olarak kullanılabilecek, performans tahmini için LEV'ler tarafından dönen akçaağaç tohumu kanatları üzerinde üretilen kaldırma kuvvetinin, verimli aerodinamik modellemesine katkıda bulunabileceğini ifade etmektedir.

Yasuda ve Azuma (1997) ise yaptıkları çalışmalarında; köke yakın negatif bombenin, yüzey pürüzlülüğünün ve köke yakın hücum kenarı ekstra kalınlığının akçaağaç tohumlarında gözlenen gelişmiş aerodinamik özelliklere yol açtığı sonucuna vardılar. Çalışmalarında ayrıca, akçaağaç tohumlarının kanat özelliklerinin, LEV'lerin stabilitesinde önemli bir rol oynayabileceğini öne sürmüşlerdir.

Lu ve Shen (2008), yusufçuk kanadından esinlenerek oluşturdukları deney modelleri ile kanat çarpan sistemlerdeki LEV gelişimini incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda; bir ana girdap ve üç küçük girdap olmak üzere, LEV sisteminin dört girdaplı elementten oluşan karmaşık bir koleksiyon olduğu bulmuşlardır. Ayrıca, LEV sisteminin karmaşıklığı aynı zamanda kanat boyu yönündeki akışların çeşitlendirilmesinin ve LEV elemanlarının kanat boyu yönündeki farklı bölümlerinde kalma özelliklerinin bir sonucu olduğunu da belirtmişlerdir.

Ozen ve Rockwell (2012), dikdörtgen bir plakanın dönüşünün etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir ve bazı Reynolds sayıları için dönme ivmesi etkilerinin yokluğunda merkezcil ve Coriolis kuvvetlerinin etkilerini değerlendirmek için LEV'i genel akış yapısıyla ilişkili olarak karakterize etmişlerdir. Çalışmalarının çıktısı olarak, 30° ile 75° arasında değişen etkili hücum açısı değerleri için, kararlı bir LEV'in var olduğunu ve belirli bir hücum açısı değerinde, LEV'in ölçeğinin ve formunun Reynolds sayısından bağımsız bir şekilde kendini gösterdiğini belirtmişlerdir.

2.6. Değerlendirme

Gerçekleştirilen literatür araştırmasından, tez çalışması kapsamında yapılaması planlanan çalışma için şu çıkarımlar yapılmıştır:

- Biyomimikri çalışmaları, doğadaki üstün özelliğe sahip olan canlıların, o özelliğini taklit etmek üzerine kurulan bir alan olsa da bunu yaparken izlenilecek yöntemler, özelliğin başarılı şekilde aktarılması için çok önemlidir.
- Biyomimetik tasarımlar çoğunlukla bir probleme çare olmakla birlikte, bu tasarımların üretim ve standartlaştırma sorunu da göz ardı edilemeyecek bir konu olmuştur.
- Biyomimetik kanat tasarımı yapılırken, kanadın orijinal biyolojik yapısındaki şekli mi yoksa şekil değiştirme özelliği mi etkili üstün özelliği barındırıyor sorusu önemlidir. Ayrıca, tasarımının aktarılacağı sistemde biyomimetik kanat, uygulanabilir formda olması gerekmektedir.
- Akçaağaç tohumu ile yapılan çalışmalarda, akçaağacın geç stol, otorotasyon özelliği ve havada süzülürken elde ettiği yüksek kaldırma kuvveti vurgulanmıştır. Bu aerodinamik üstünlüklerden özellikle geç stol olma ve yüksek kaldırma kuvveti tez çalışması için dikkat çekmiştir.
- Literatürdeki çoğu çalışmada; akçaağaç tohumundaki yüksek kaldırma kuvvetinden sorumlu olduğu ifade edilen LEV kavramı çalışmada incelenecek ve üstünde durulacak bir yapı olmuştur. Bu girdapları oluşturan etkilerin incelenmesi ve bu etkilerin değiştirilmesi ile LEV'in geliştirilme potansiyelinin araştırılması planlanmaktadır.

Kaynak araştırmasından elde edilen ön bilgiler tez çalışmasının ana hatlarını belirlerken aynı zamanda yapılacak olan çalışmanın karşılaştırılması için bir veri tabanı da sunmaktadır. Tezin 3. bölümünde sunulacak olan; çalışmayı oluşturan başlıkların teorileri, materyal ve yöntemleriyle birlikte çalışmanın birbirleriyle etkileşimli kısımların oluşturulmasının faydalı olması beklenmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Giriş

Rüzgâr enerjisini kullanan kanatların tasarımı ve aerodinamik incelemesi, kanat kullanan araç ve sistemler için en önemli unsurlardan olmuştur. Bu bölümde; bu süreçler belli başlıklar altında incelenmiştir.

Öncelikle kanat aerodinamiğinin anlaşılabilmesi için gerekli tarihsel süreç ve terminolojiden bahsedilmiştir. Daha sonra kanat aerodinamiğinin temellerini oluşturan kuvvetler ve momentler, etki parametreleriyle birlikte teorik analizi gerçekleştirilmiştir. Gerekli teoremlerden sonra biyomimikri biliminden bahsedilmiş ve tez çalışmasıyla ilgisi belirtilmiştir. Tez kapsamında yapılan öncü çalışmalar ise biyomimetik tasarım, deneysel ve nümerik çalışmalar kapsamında açıklanmıştır.

3.2. Kanat Aerodinamiği

3.2.1. Kanat profili geometrisi

İnsanoğlu gözünü gökyüzüne çevirip uçmayı hayal ettiğinden beri, yerçekimini yenip, havada yol almak için taşıyıcı sistemlerin geliştirilmesi, tarih boyunca bilimin önemli konularından birisi olmuştur.

Taşıyıcı bir cisim, içinde bulunacağı serbest akıma dik bir şekilde büyük bir kuvvet ve mümkün olduğunca küçük bir direnç sağlamak üzere tasarlanır. Bu şartların sağlanması için taşıyıcı bir cisim olarak geleneksel kanatların akımı karşılayan kenarı yuvarlatılmış, akımın kanadı terk ettiği kenarı ise keskin bir hat şeklinde tasarlanmıştır (Şekil 3.1). Bu da ilk kanat tasarımının doğadaki kuşlardan esinlenmeli bir model olduğunu göstermektedir.



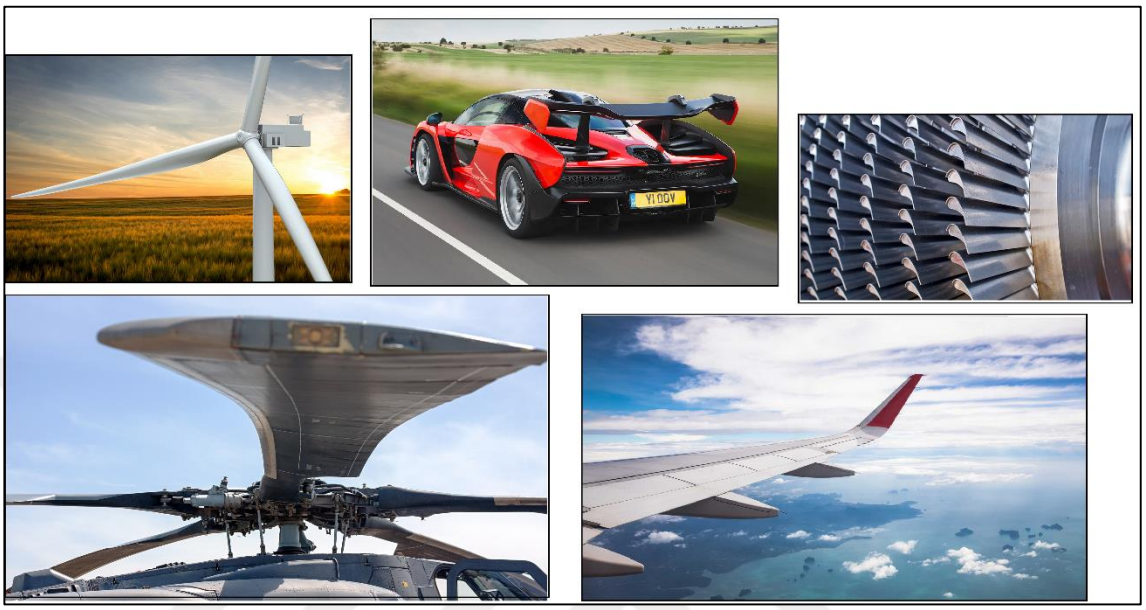
Şekil 3.1. Kuş kanadı ile uçak kanadı (Royal Aeronautical Society, 2021)

Tarihsel Gelişimi

Taşıyıcı cisimler olarak ifade edilen kanatların, kesit görünüşleri olan iki boyutlu kanat profilleri (airfoil), tasarımcılar tarafından farklı şekillerde oluşturulup bu kanat profillerinin aerodinamik performansları incelenmiştir. İlk patentli kanat profili şekli, rüzgâr tünelinde bu profillerin deneylerini ilk defa gerçekleştiren İngiliz Horatio F. Phillips tarafından 1884 yılında geliştirilmiştir. 1902 yılında ise Wright kardeşler, kendi verimli kanat profillerini rüzgâr tünelinde test etmişlerdir ve tarihteki ilk başarılı uçuşu, bu kanat profilleri ile oluşturdukları uçakları ile 17 Aralık 1903'te gerçekleştirmişlerdir. Bu olay, tarihte havacılık için önemli bir dönüm noktası olmuştur ve bu tarihten sonra kanat profilleri çeşitli kişiler ve kurumlar tarafından ihtiyaca göre kişiselleştirilip geliştirilmiştir (Anderson Jr ve ark., 1998)

Kanat profilleri çeşitli kurumlar tarafından sistematik ve rasyonel şekilde özelleştirilip katalog haline getirilmiştir. Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesinin (NASA) öncü kuruluşu olan Ulusal Havacılık Danışma Komitesi (NACA), kuruluşunun kısaltmasına ekledikleri çeşitli rakamlarla, kanat profillerini, sistematik ve tasarımına erişilebilir bir yapıya getirmişlerdir. 3 Mart 1915'te kurulan NACA bir Birleşik Devletler federal kurumu olarak, kendi oluşturdukları kanat profillerinin çeşitli şartlarda aerodinamik performans deneylerini gerçekleştirmişlerdir ve standartlaştırdıkları NACA kanat profillerini sunmuşlardır (Abbott ve ark., 1945).

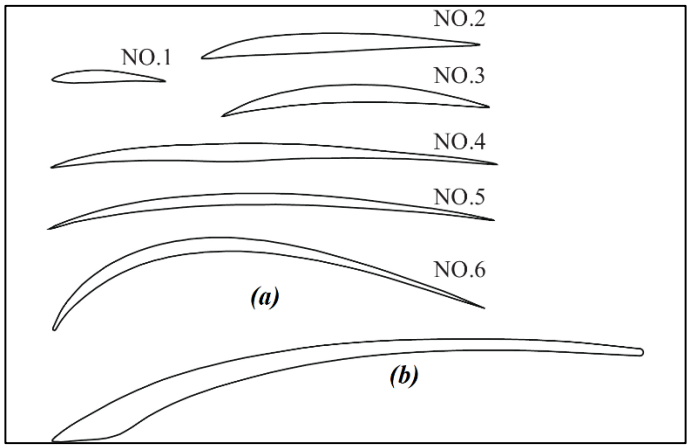
Kanat profillerinden elde edilen kanatları birçok yapıda ve ya sistemde görmek mümkündür. Bunlara; uçak, rüzgâr türbinleri, helikopter pervaneleri, turbo makine kanatları, araba rüzgârlıkları gibi yapılar örnek verilebilir (Şekil 3.2).



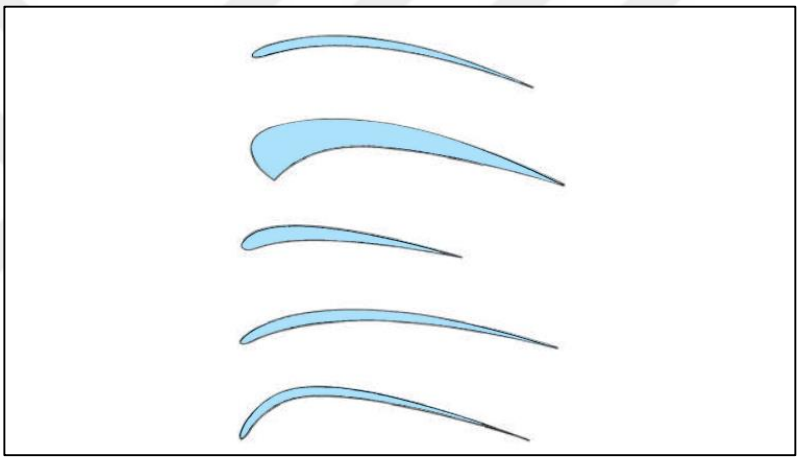
Şekil 3.2. Kanatların kullanım alanlarına örnekler

Temel amacı üzerine gelen akımla kaldırma kuvveti oluşturmak olan kanat profilleri, kullanıldığı yere göre farklı şekiller alıp farklı uçuş özelliklerine sahip olmaktadır. Buna göre; kanat profili gelişim sürecinde, kullanılan sistemin ağırlığı kanatların maruz kalacağı serbest akış hızı ve kullanım amacı gibi parametreler kanat şeklini etkilemiştir.

Tarihteki ilk patentli kanat profilleri ile rüzgâr tünellerinde deneylerini gerçekleştiren H. Phillips, deneylerinde oldukça ince kanat profilleri kullanmıştır. İnce kanat profili tasarımı, ilk başarılı uçuşu gerçekleştiren Wright kardeşler tarafından da kullanılmış ve onlar da deneysel çalışmalarını benzer kanat profili tasarımları ile gerçekleştirmişlerdir (Anderson, 2005). Şekil 3.3'te Phillips'in deneylerini gerçekleştirdiği kanat profilleri, patentini aldığı kanat profili ve Şekil 3.4'te Wright kardeşlerin deneylerinde kullandığı bazı kanat profilleri sunulmuştur.



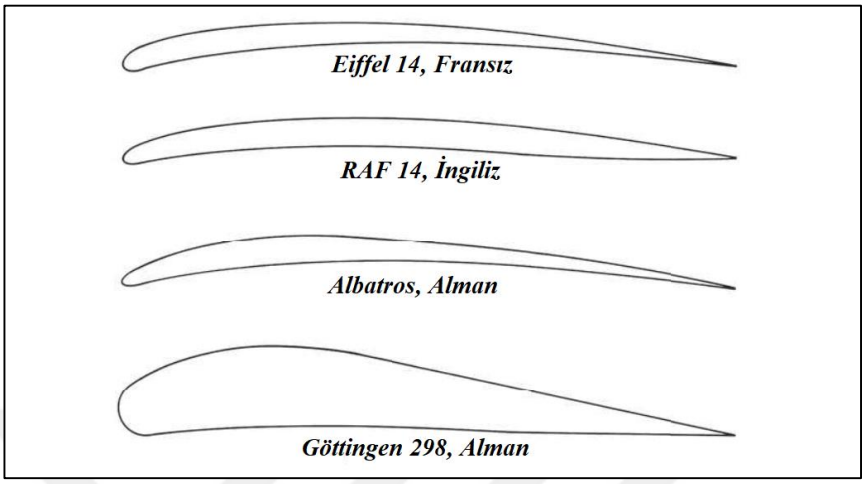
Şekil 3.3. Horatio Phillips'in deneylerini gerçekleştirdiği kanat profilleri (a) ve patentini aldığı kanat profili (b) (Zhonghua ve ark., 2021)



Şekil 3.4. Wright kardeşlerin deneylerinde kullandığı bazı kanat profilleri (Anderson, 2011)

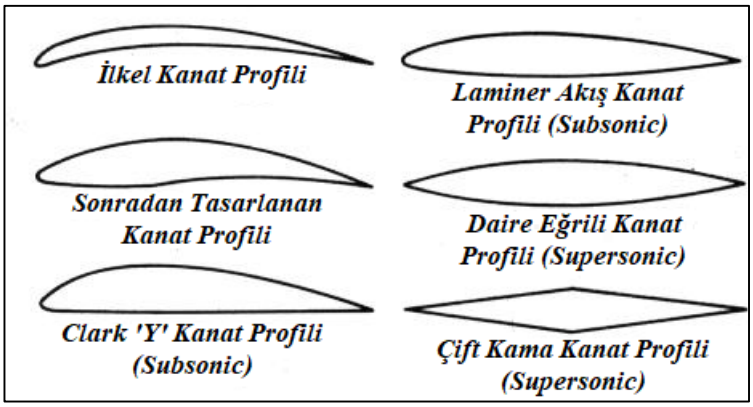
Öncü tasarımlar olan bu ince kanat modelleri yüksek bir kaldırma kuvveti oluşturmak için yetersiz olduğu için ilkel tasarımlar olmuştur. Yine de, bu ince tasarımlı kanat modelleri sürtünmeyi azalttıkları için daha düşük sürükleme oluşturuyorlardı ve taşıta hız sağlıyordu. Bu yüzden buna benzer kanat profili tasarımlarını Birinci Dünya Savaşı'nda kullanılan uçaklarda da görmek mümkündür (Şekil 3.5). Ancak Almanlar için Göttingen aerodinamik laboratuvarında geliştirilen kalın profilline (Göttingen 298) sahip uçaklar, rakiplerine göre üstünlük elde ederek belki de bir yargıyı kırmışlardır. Çünkü bu kanat, yüksek kaldırma kuvveti oluşturması sebebiyle uçağa ani tırmanma ve yüksek manevra kabiliyeti sağlamıştır. Bu kanat profilinin başarısı, kanat profili geliştirme sürecinde farklı

fikirleri ve gelişimi de beraberinde getirerek günümüze kadar ihtiyaca göre birçok kanat profilinin gelişimini sağlamıştır.



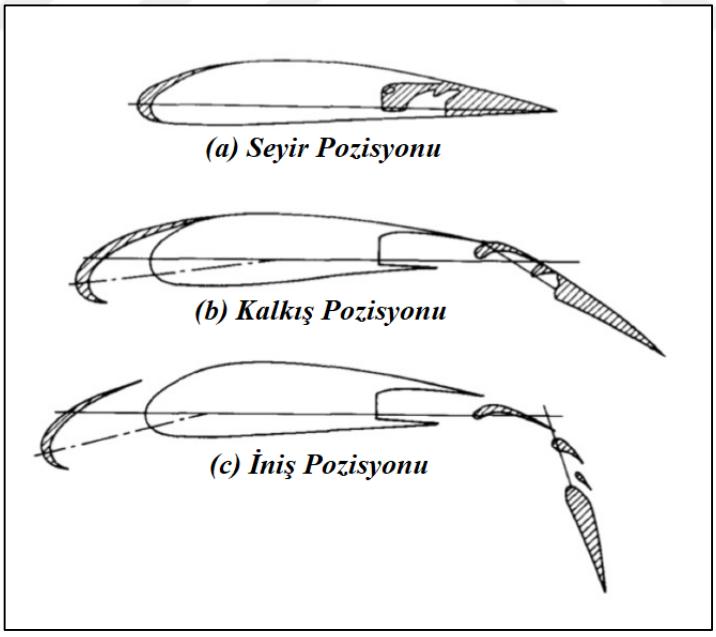
Şekil 3.5. Birinci Dünya Savaşı'nda kullanılan bazı kanat profilleri

Daha kalın kanat profillerinin geliştirilmesiyle, en büyük kaldırmayı sağlamak için en verimli kanat profilinin içbükey alt yüzeyi olan kanat profili olduğu yıllarca yapılan deneysel çalışmalar sonucu bulunmuştur. Daha sonra, sabit bir tasarım olarak, bu tip kanat profilinin kaldırma kuvveti üretirken çok fazla hızdan ödün verdiği ve bu nedenle yüksek hızlı uçuş için uygun olmadığı görülmüştür. Özellikle yüksek hızlara maruz kalan kanat profilleri geleneksel kanat şekillerinden farklılaşmışlardır. 342,2 $^{m}/_{s}$ olan ses hızının altında (subsonic) ve üstünde (supersonic) olan akışlarda kanatların şekilleri akışa uygun olarak tasarlanmıştır. Şekil 3.6'te bazı farklı kanat profilleri kullanıldıkları şartlar için verilmiştir.



Şekil 3.6. Farklı kanat profili şekilleri

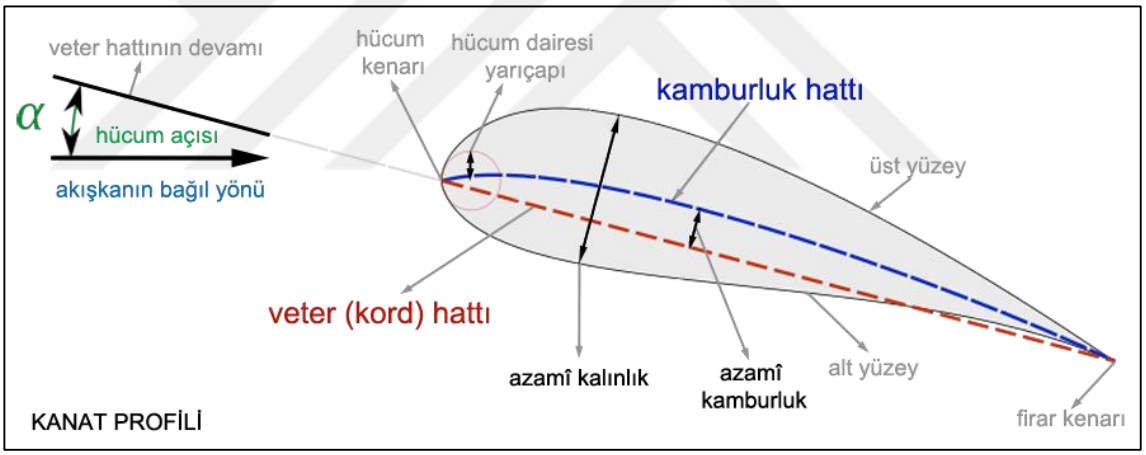
Günümüz modern teknolojisinde özellikle uçak kanatları, belirtilen bu kanat profillerine entegre edilen flaplarla (kanatçık) özel şartlarda yüksek kaldırma gibi optimum performanslar elde edebilmektedir. Hücum kenarına eklenen kumada edilebilen flap ve firar kenarında bulunan çoklu elemanlı flaplarla kanat, Şekil 3.7'de gösterildiği gibi kalkış, iniş ve seyir pozisyonları için gerekli kaldırma ve sürükleme şartlarını optimum şekilde sağlamaktadır (Anderson, 2011).



Şekil 3.7. Uçağın kanat profilinin seyir (a), kalkış (b) ve iniş (c) pozisyonları (Anderson, 2011)

Terminoloji

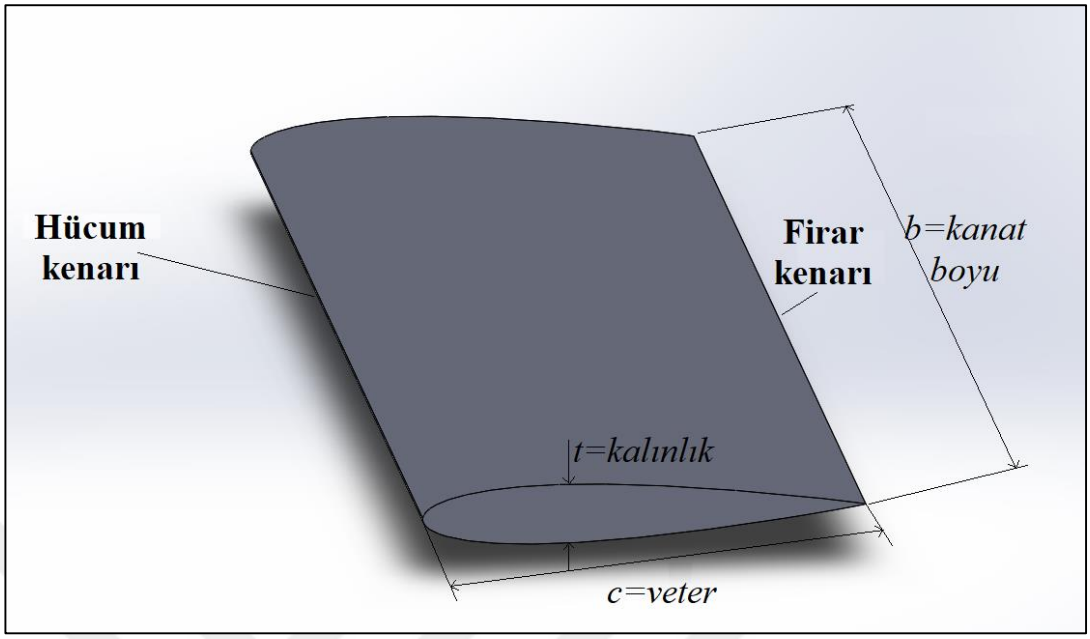
Aerodinamik terminolojisinde kanat ve kanat profilleri için genelleştirilmiştir terimler bulunmaktadır. Buna göre; V_∞ hızına sahip serbest akış hacmi içerisinde akıma maruz kalan bir kanadın, akımı karşılayan ön kenarına hücum kenarı (leading edge), akışın kanadın üzerinden ayrıldığı arka kısmındaki kenarına ise firar kenarı (trailing edge) ya da kaçma kenarı denir. Bu iki kenar arasındaki en yakın yolu oluşturacak doğrusal çizgiye ise kord (chord) çizgisi ya da veter hattı ya da bazı literatürde olduğu gibi kiriş çizgisi denir. Bu uzunluğa ise veter (kord) uzunluğu (c) denir. Hücum kenarı ile firar kenarı arasında, bu iki çizgiye eşit mesafede olacak noktalardan oluşacak çizgiye ise kamburluk hattı (çizgisi) denir. Kamburluk hattı ile veter hattı arasındaki azami mesafeye ise azami kamburluk (h) denir. Veter çizgisi ile serbest akımın bağıl yönü arasındaki açıya hücum açısı (α) denir. Bu terminolojiler Şekil 3.8'de bir kanat profili üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Bir kanat profili üzerindeki terminolojik terimler ("Kanat Profili," 2012)

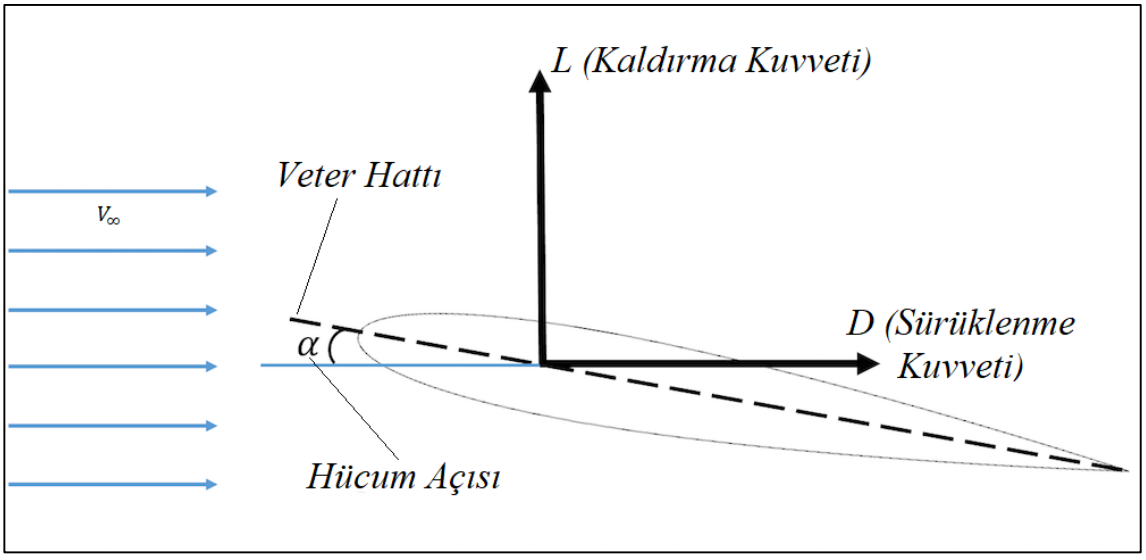
Kanat profili üzerindeki veter hattı ile kamburluk hattı kesişmiyorsa bu kanat profillerine kambur, kesişiyorsa simetrik kanat profili denir.

İki boyutlu, t kalınlığındaki kanat profili, b uzunluğunda bir boy ile uzatılırsa üç boyutlu kanat geometrisi elde edilmiş olur (Şekil 3.9). Burada; kanada üstten bakıldığında görülen dörtgen alana planform ya da referans alan (S) denir. $S = \int c\, db$ denklemi ile ifade edilen bu alan, eğer veter uzunluğu sabit ise $S = bc$ şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 3.9. Üç boyutlu kanat gösterimi

Serbest bir akış alanı içerisinde kalan taşıyıcı kanat, belli bir rüzgâr hızında ve hücum açısında kaldırma (L) ve sürükleme (D) kuvveti oluşturur (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Kanat profili üzerinde kaldırma ve sürükleme kuvvetleri

Bu bölümü takip eden bölümlerle nasıl oluştuğu ve hangi parametrelerin üzerinde rol oynadığı detayları ile açıklanacak olan kaldırma ve sürükleme kuvvetleri, sırasıyla Eşitlik

3.1 ve 3.2 vasıtasıyla kaldırma kuvveti katsayısı (C_L) ve sürükleme kuvveti katsayısına (C_D) dönüştürülebilir.

$$C_L = \frac{L}{0{,}5\rho {V_\infty}^2 S} \tag{3.1}$$

$$C_D = \frac{D}{0{,}5\rho {V_\infty}^2 S} \tag{3.2}$$

Bu denklemlerde; ρ, serbest akımdaki akışkanın yoğunluğunu temsil etmektedir. C_L ve C_D katsayıları bize kaldırma ve sürükleme ile ilgili boyutsuz bir parametre sunmakta ve farklı geometriler için belli şartlarda karşılaştırma yapabilme imkanı vermektedir. Bu çalışmada da aerodinamik performans incelemelerinde, özellikle bu katsayılar üzerinde durulacak, kanadın kaldırma ve sürükleme performansı bu katsayılarla ifade edilecektir.

3.2.2. Aerodinamik kuvvetler ve momentler

Serbest akım alanında, üzerinden belli bir hızda akışkan geçen bir cisim, kuvvet ve moment gibi belirli aerodinamik etkilere maruz kalmaktadır. Kanat yapıları için bu aerodinamik etkilerden kaldırma ve sürükleme kuvvetinden bir önceki bölümde bahsedilmişti. Bu bölümde daha detaylı bir inceleme ile bu kuvvetleri ve momentleri oluşturan etkiler incelenecektir.

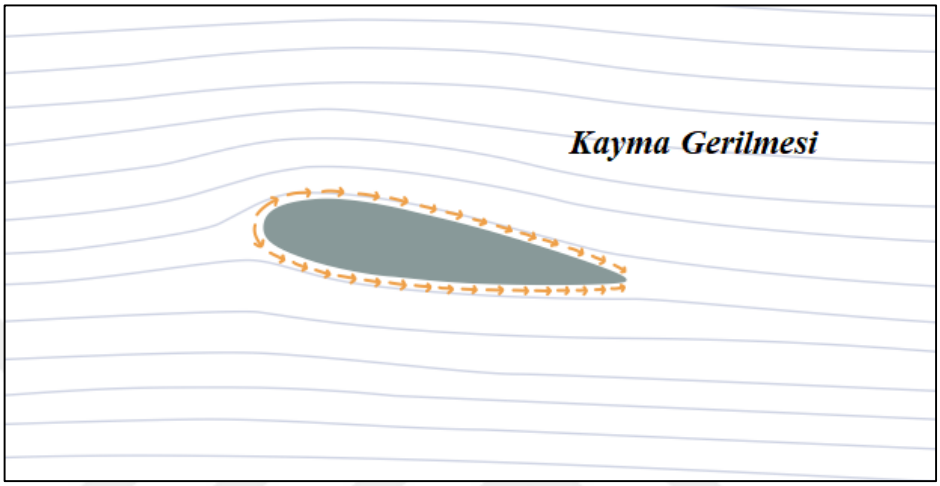
Aerodinamik Kuvvet ve Momentin Kaynağı

Kanat profili üzerinden akan akışkandan dolayı kanat yüzeyi üzerinde iki etki oluşmaktadır. Bunlar;

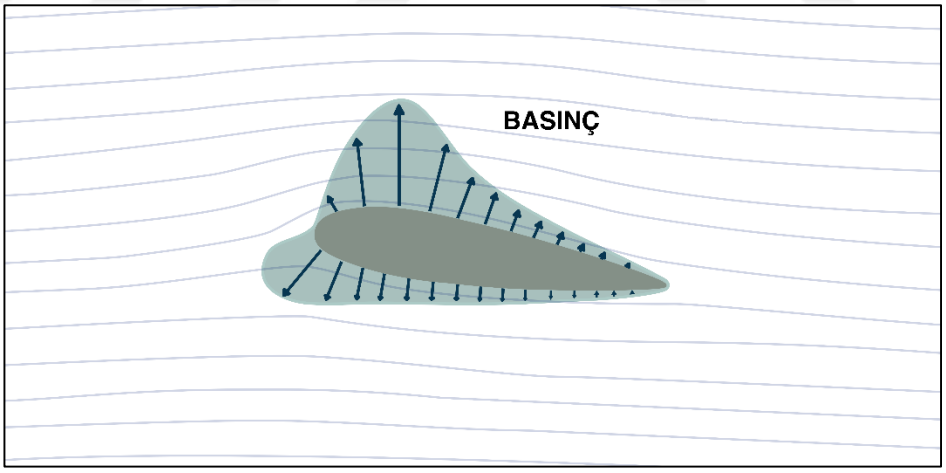
- Kayma Gerilmesi (τ)
- Basınç Dağılımı (p)

olarak isimlendirilir. Bu gerilme ve dağılım, kuvvetin birim alana etkisidir. Birimleri (N/m^2) olarak alınabilir. Akışkan içerisindeki cismin şekli nasıl olursa olsun, üzerinde

oluşan aerodinamik kuvvetler ve momentler, bu iki temel kaynaktan meydana gelir. Dolayısıyla bu faktörlerin yüzey üzerindeki dağılımı, oluşan kuvvet ve momentler için önemlidir. Şekil 3.11'de gösterildiği üzere kayma gerilmesi (τ), kanat profilinin yüzeyine teğet şekilde etki etmektedir. Basınç dağılımı ise (p), kanat profili yüzeyine dik bir şekilde oluşur (Şekil 3.12).

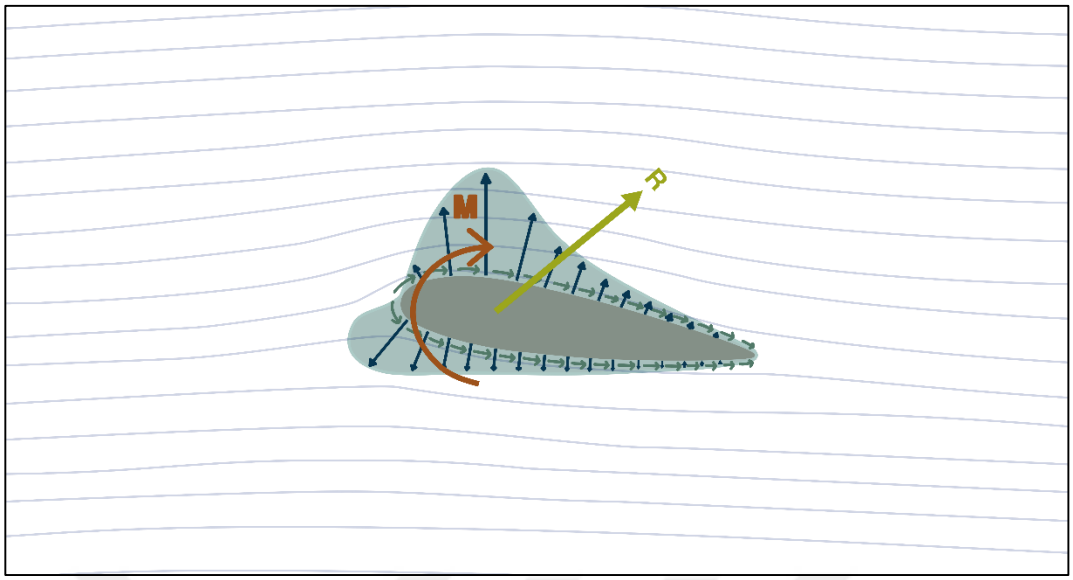


Şekil 3.11. Kayma gerilmesinin kanat profili yüzeyinde oluşumu



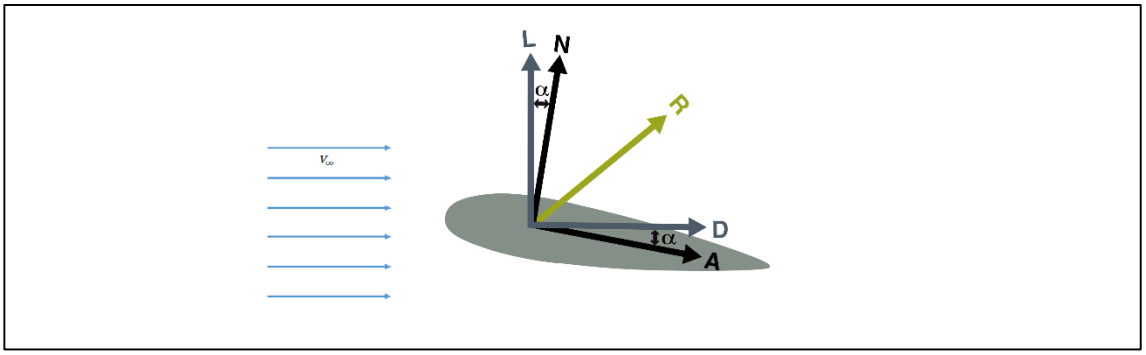
Şekil 3.12. Basınç dağılımının kanat profili yüzeyinde oluşumu

Kanat yüzeyi üzerinde kayma gerilmesi ve basınç dağılımının net etkisinin görülmesi için yüzeydeki bu dağılım integre edilirse bize toplam bir R kuvveti ve M momenti verir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Kayma gerilimi ve basınç dağılımının kanat profilinde oluşturduğu toplam ***R*** kuvveti ve ***M*** momenti

Toplam R kuvveti, pozitif hücum açısıyla serbest akış alanında duran kanat profili yüzeyine dik olacak bir N (normal kuvvet) bileşenine ve kanat yüzeyine paralel olarak bir A (aksiyal kuvvet) bileşenine ayrılabilir. Toplam R kuvvetinden; kaldırma kuvveti (L), V_∞ serbest akış hız vektörüne dik, sürükleme kuvveti (D) ise V_∞ serbest akış hız vektörüne paralel komponentleriyle açıklanır.



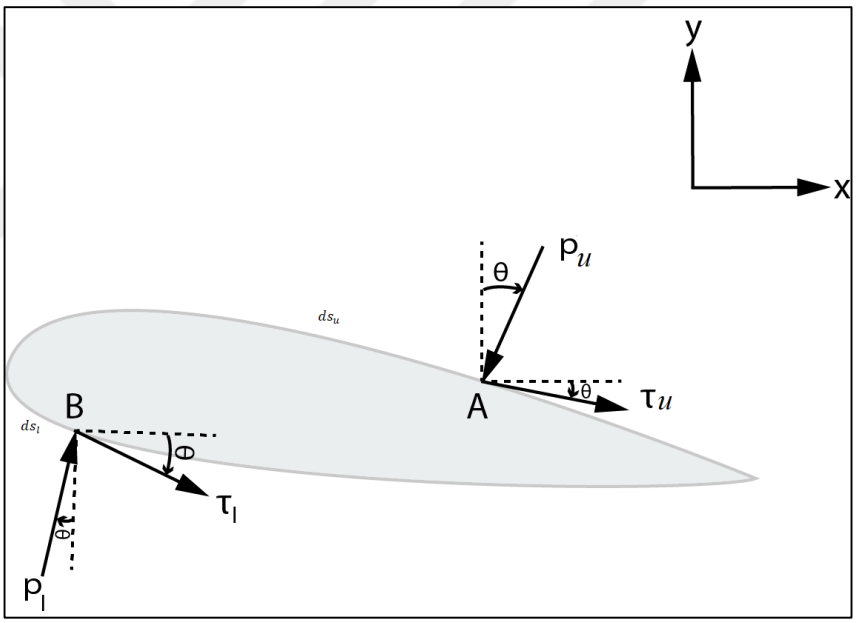
Şekil 3.14. Toplam aerodinamik kuvvetin (***R***), komponentlerine ayrılmış şekli

Şekil 3.14'ten de görüldüğü üzere; kaldırma kuvveti L ve sürükleme kuvveti D, fiziksel olarak sırasıyla Eşitlik 3.3 ve 3.4'teki gibi açıklanabilir.

$$L = N\cos\alpha - A\sin\alpha \tag{3.3}$$

$$D = N\sin\alpha + A\cos\alpha \tag{3.4}$$

Kaldırma ve sürükleme kuvvetini oluşturan N ve A bileşenleri için kanat yüzeyinde oluşan toplam kayma gerilmesi ve basınç dağılımını hesap etmek gerekir. Bunun için Şekil 3.15'te gösterildiği gibi üst ve alt yüzeylerde rastgele noktalar (A ve B) alınmıştır. Bu noktalar üzerinde etki eden kayma gerilmesi; üst yüzeyde τ_u, veter hattı ile θ açısı oluşturmakta, alt yüzeye etki eden τ_l de, veter hattı ile θ açısı oluşturmaktadır. Yine aynı noktalarda basınç; üst yüzeyde p_u, y ekseni ile θ açısı oluşturmakta, alt yüzeyde p_l, y ekseni ile θ açısı oluşturmaktadır.



Şekil 3.15. Kanat profilinin alt ve üst yüzeyinde rastgele alınan noktalar üzerindeki kayma gerilmesi ve basınç

Şekil 3.15'teki kanat profilinin üst yüzeyinde (ds_u) ve alt yüzeyinde (ds_l) diferansiyel alanlardaki gerilmeler integre edilir, hücum kenarından (HK) firar kenarına (FK) kadar N' ve A' kuvvetleri sırasıyla Eşitlik 3.5 ve 3.6 ile hesaplanabilir.

$$N' = -\int_{HK}^{FK} (p_u cos\theta + \tau_u sin\theta)\, ds_u + \int_{HK}^{FK} (p_l cos\theta - \tau_l sin\theta)\, ds_l \tag{3.5}$$

$$A' = \int_{HK}^{FK} (-p_u sin\theta + \tau_u cos\theta)\, ds_u + \int_{HK}^{FK} (p_l sin\theta + \tau_l cos\theta)\, ds_l \tag{3.6}$$

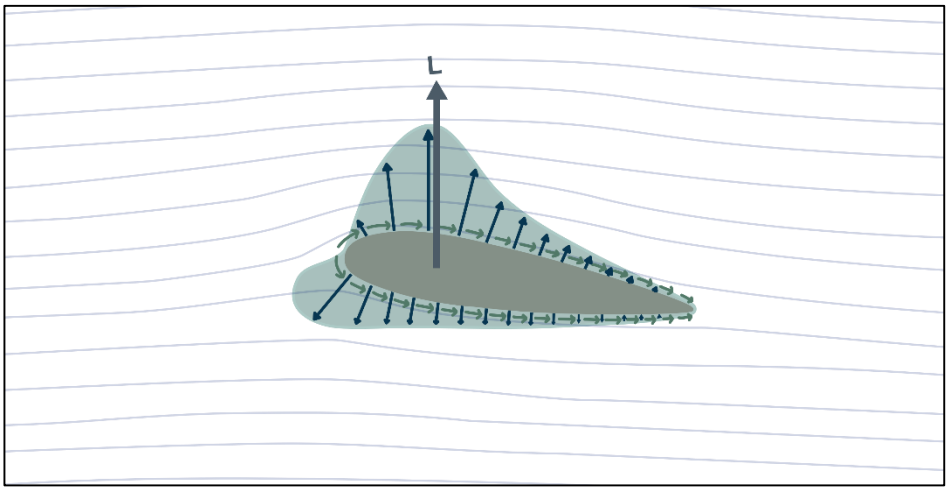
Yine benzer bir mantıkla kuvvetlerin etki ettiği x ve y uzunlukları dikkate alınarak diferansiyel alana etki eden moment (M') Eşitlik 3.7 vasıtasıyla bulunabilir.

$$M' = \int_{HK}^{FK} [(p_u cos\theta + \tau_u sin\theta)x - (p_u sin\theta - \tau_u cos\theta)y]\, ds_u + \int_{HK}^{FK} [(-p_l cos\theta + \tau_l sin\theta)x + (p_l sin\theta + \tau_l cos\theta)y]\, ds_l \tag{3.7}$$

Diferansiyel alana etki eden bu kuvvetler ve moment, kanat yüzeyini kapsayacak şekilde integre edilirse, bu kuvvetlerin komponentlerini oluşturan kaldırma ve sürükleme kuvveti ve her eksendeki moment hesaplanabilir.

Kaldırma Kuvveti Teorisi

Bir akım içerisinde, kayma gerilmesi ve basınç dağılımına maruz kalan S planform alanına sahip bir kanatta, serbest akış çizgisine dik yönde bir kaldırma kuvveti (L) oluşur (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Kanat profili üzerinde oluşan kaldırma kuvveti

Bu etkilerden dolayı oluşan yüzeydeki toplam L, Eşitlik 3.8 ile ifade edilebilir.

$$L = \int_{HK}^{FK} (-psin\theta - \tau cos\theta)\, dS \tag{3.8}$$

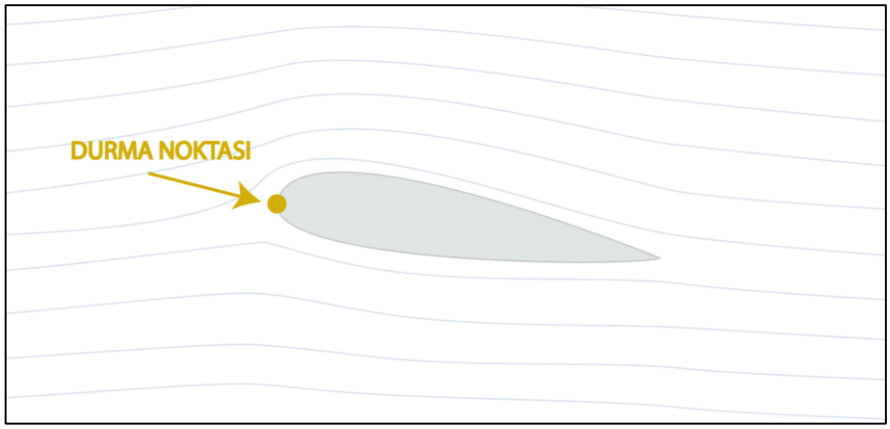
Burada daha sonra üzerinde durulacak olan kayma gerilmesi τ, akışkanın yüzeyle olan sürtünmesinden kaynaklandığı ve daha çok sürükleme kuvvetine etki ettiğinden dolayı, Eşitlik 3.8 deki kayma gerilmesinin etkisi ihmal edilip, Eşitlik 3.9 yazılabilir.

$$L = \int_{HK}^{FK} (-psin\theta)\, dS \tag{3.9}$$

Eşitlik 3.9'dan da anlaşılacağı üzere kaldırma kuvvetini oluşturan etken kanat üzerindeki basınç dağılımı olmaktadır. Dolayısıyla kaldırma kuvvetinin nasıl olduğunu anlamak için basınç dağılımının nasıl oluştuğunu anlamamız gerekmektedir.

Basınç dağılımını oluşturan birkaç prensip vardır. Bunlardan birisi Bernouilli prensibidir. Bu prensip, basınç dağılımını serbest akış hızına (V_∞) odaklanarak açıklıyor.

Akış alanındaki kanadın hücum kenarına bakıldığında, serbest akış hızının sıfıra düştüğü bir nokta vardır. Bu noktaya durma noktası (stagnation point) denir (Şekil 3.17).

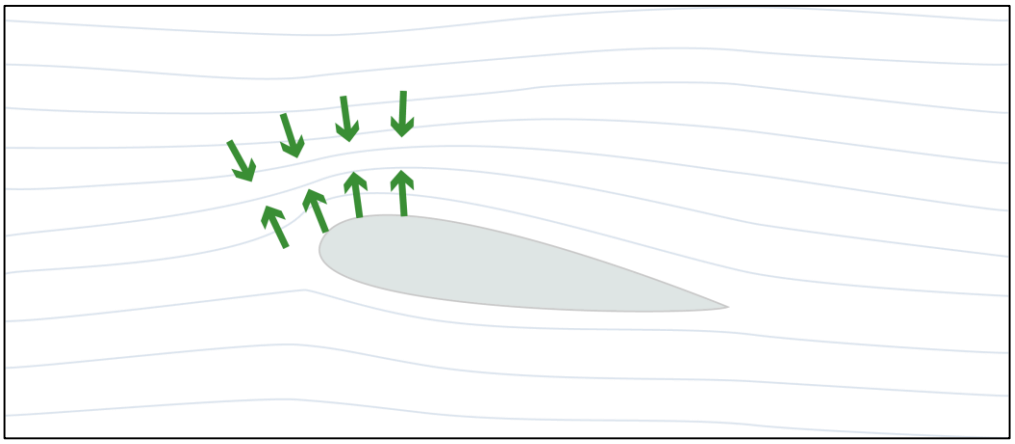


Şekil 3.17. Akış alanı içerisinde kanadın üzerinde oluşan durma noktası

Kanat profilini saran ince sınır tabaka kalınlığının dışında, serbest akış, pozitif hücum açısının oluşturduğu, veter hattındaki eğrilikten dolayı akış, durma noktasının üzerinden daha hızlı, bu noktanın altından ise daha yavaş hareket eder. Eşitlik 3.10'da gösterildiği gibi aralarında yükseklik farkı bulunmadığı kabul edilen kanadın alt ve üst yüzeyleri arasında sürekli rejimde Bernouilli denklemi yazılırsa, buradan akışın hızı azaldığında basıncının artacağı, hızının arttığında ise basıncının düşeceği görülmektedir.

$$\int_{l}^{u} dP + \int_{l}^{u} \rho V \, dV = 0 \tag{3.10}$$

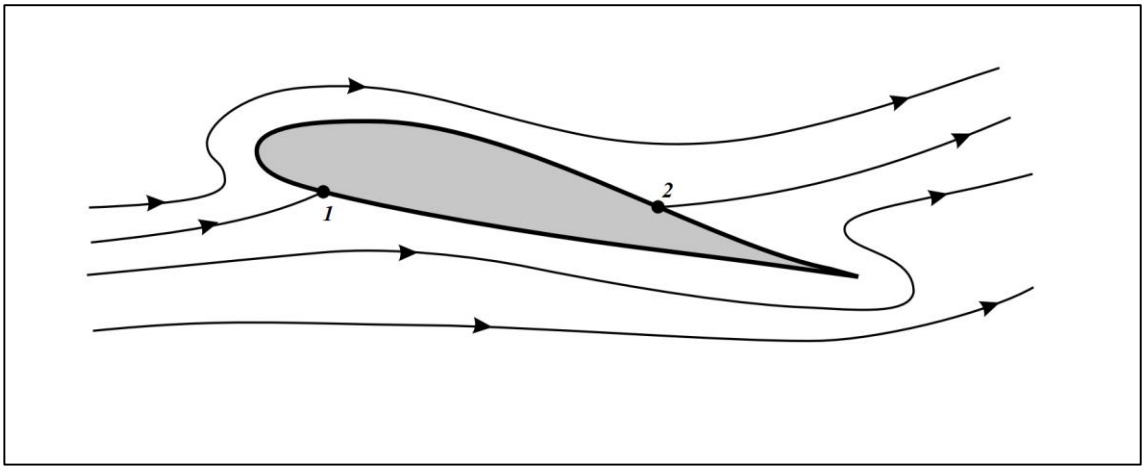
Dolayısıyla basınç dağılımını oluşturan ana etken, Bernoulli denkleminden de görüldüğü gibi kanadın alt ve üst noktalarında oluşan akışkan hızı farkıdır. Bu hız farklarını oluşturan etmenlere bakılırsa kaldırma kuvvetinin oluşumu da anlaşılabilir. Bunun için en basit düşünce olarak; pozitif hücum açılı ya da kamburlu kanat profilinin üstündeki havayı sıkıştırmasıyla, kütle korunumundan dolayı havanın hızı kanadın üstünde artmaktadır. Bu durum Şekil 3.18'de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Kanadın üst kısmında havanın sıkışması

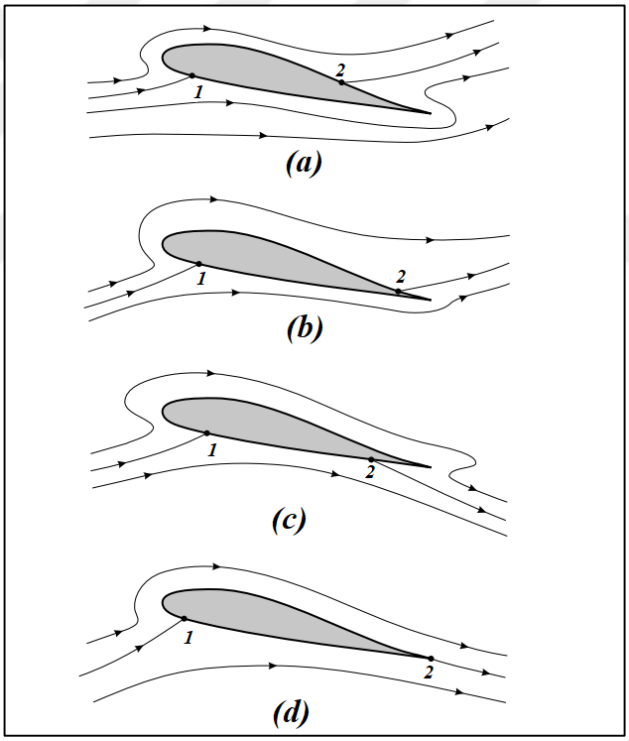
Kanadın üst tarafında hızın artmasına dair bir başka teoriyi ise Kutta-Joukowski koşulu açıklamaktadır. Bu koşulu ifade eden teorem ismini Alman matematikçi M. Wilheim Kutta ve Rus fizikçi Nikolai E. Joukowski'den almıştır. Bu teori daha sonra ise Prandtl, Karman ve öğrencileri tarafından geliştirilmiştir. Bu teori akış alanı içerisinde bulunan kanat profilinin üzerinden gerçekleşen akışın, dolaşımlı bir akış olduğundan bahseder. Cismin şekli içerisinde muhafaza edilen bu toplam net dolaşımı (Γ) şu şekilde açılanabilir.

Eğer kanat profili etrafında dolaşımsız bir akış gerçekleşseydi, akış çizgileri Şekil 3.19'daki gibi görülürdü. Buradaki 1 ve 2 noktaları durma noktalarını göstermektedir.



Şekil 3.19. Dolaşımsız bir akışta kanat profili üzerindeki akış çizgileri (Houghton ve ark., 2016)

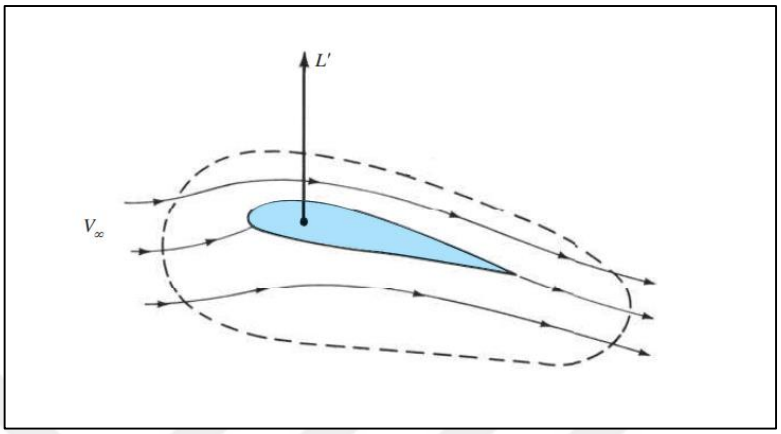
Şekil 3.19'daki akış çizgilerinden; kanat profilinin alt yüzeyindeki akışın, firar kenarından sonra yukarı doğru yol alıp kıvrıldığı görülmektedir. Ancak bu şekilde bir akış davranışı fiziksel yasalara ters düşmesiyle birlikte kaldırma kuvvetini oluşturan kanat profillerinde görülen akış çizgilerine de uymamaktadır. Bu durumun oluşmaması için akışın, geçici durumları içeren bir gelişim sürecine tabi olması gerekir. Şekil 3.20'de görülen bu gelişim sürecindeki geçici durumlar; durma noktasının arka üst yüzeyde kaldığı, kaldırmanın olmadığı (a), keskin firar kenarının akışta ayrılmayı indüklemesiyle başlangıç çevirisinin oluşması (b), başlangıç çevirisinin kopmasıyla akım çizgilerinin firar kenarından düzgün bir şekilde akması (c) ve başlangıç çevrisinin epey arkada sıyrılmış durumda olması ile firar kenarından akışın çok düzgün hale gelmesi ve kaldırmanın %100 gelişmiş olması (d) durumlarıdır (Anderson, 2011).



Şekil 3.20. Kaldırmanın gelişmesindeki geçici durumlar (Collicott ve ark., 2016)

Tam gelişmiş kaldırma durumunda akışın sirkilasyonu sonucu oluşan bu dolaşım, kanat profilinin üst yüzeyinde akışı ivmelendirirken, alt yüzeyinde ise akışı geciktirmektedir. Bu da Eşitlik 3.10'da ifade edildiği gibi üst tarafta basıncı azaltırken alt tarafta basıncı artırıyor ve kaldırma kuvvetine sebep oluyor. Kutta koşulundan dolayı oluşan bu dolaşım

ve oluşturduğu basınç dağılımından dolayı sebep olduğu kaldırma kuvveti Şekil 3.21'de verilmiştir. Ayrıca Kutta-Joukowski teoremi bize, Eşitlik 3.11'deki kanat boyu başına kaldırma kuvvetini (L') vermektedir.



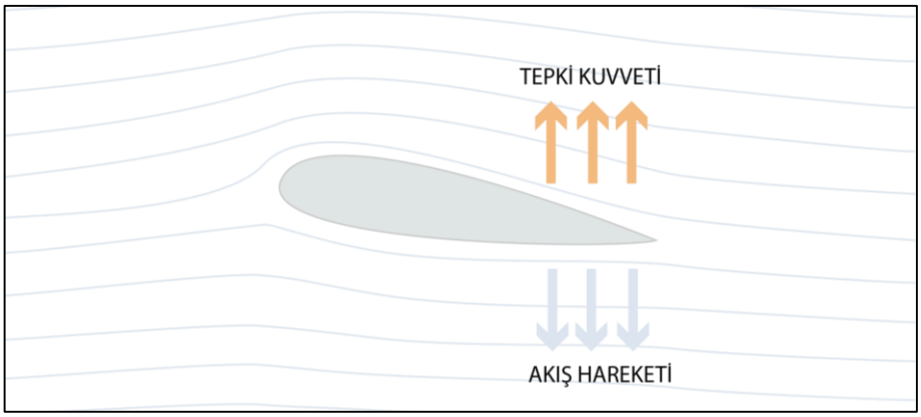
Şekil 3.21. Kutta – Joukowski koşulu ve oluşturduğu kaldırma (Anderson, 2011)

$$L' = \rho V_\infty \Gamma \tag{3.11}$$

Bernoulli prensiplerinden kaynaklı kaldırma teorilerini inceledik. Bu prensibin dışında Newton'un üçüncü yasası da, üzerinden akan akışkandan dolayı kanat profilinin etrafında oluşan basınç dağılımını açıklamaya yardımcı olmaktadır.

Newton'un üçüncü yasası; her etki kuvvetine karşı eşit bir şekilde tepki kuvveti oluşacağından bahseder. Bu prensip, kanat profilinde oluşan kaldırma kuvvetini, Bernouilli prensibinin aksine, kanat profilinin alt ve üst yüzeyleriyle alakalı olmayıp akışın genel davranışı ile alakalıdır.

Şekil 3.22'de de görüldüğü üzere pozitif hücum açılı kanat profili üzerinden akan yüksek bir hava hacmini, kanat profilindeki veter hattının eğriliğinden dolayı firar kenarına yakın bölgeden aşağıya doğru yönlendirmektedir. Dolayısıyla bu bölgede, yüksek bir hava hacminin yönlenmesiyle, aşağıya doğru bir etki kuvveti oluşuyor. Newton'un üçüncü yasası gereği bu etki kuvvetine karşı tersi yönde yani yukarı yönlü bir tepki kuvveti oluşmaktadır. Bu tepki kuvveti kaldırma kuvveti olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 3.22. Newton'un üçüncü yasasına dayanan kaldırma teorisi

Hem Bernoulli prensiplerinin hem de Newton'un üçüncü yasasının kaldırma teorisini nasıl oluşturduğuna dair yapılan incelemeler sonrası, aslında bu prensiplerin tek başına kaldırma kuvvetine etki etmediği, bütün prensiplerin birbirinin sebep sonuç ilişkisi içinde kaldırmaya etki ettiği çıkarımı yapılabilir. Zira kaldırma kuvvetinin kanat profili yüzeyinde oluşan basınç dağılımından olduğu düşünüldüğünden bütün bu prensiplerin oluşan bu dağılıma nasıl katkı sağladığı açıklanmıştır.

Sürükleme Kuvveti Teorisi

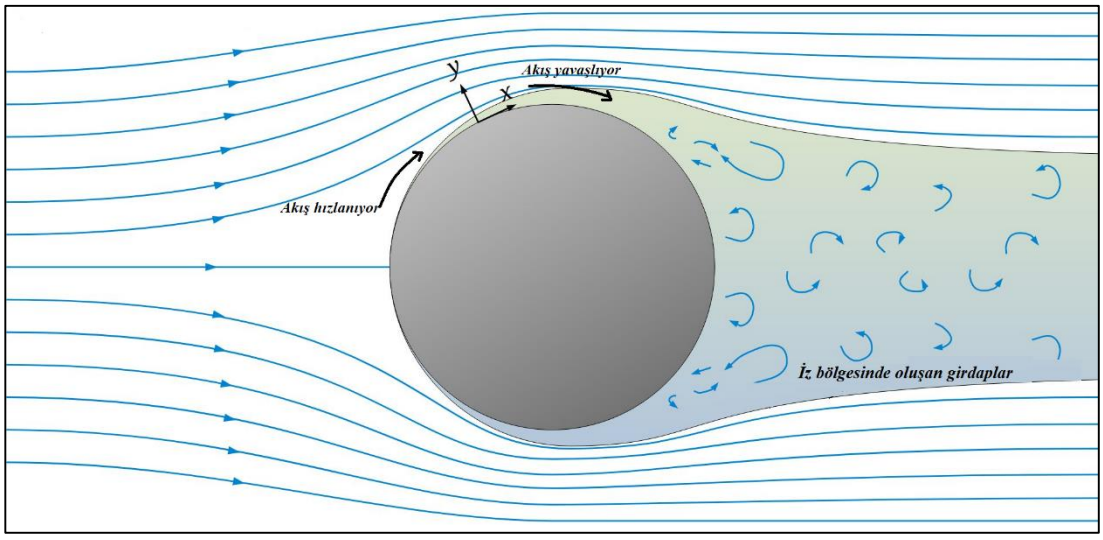
Sürükleme kuvveti, serbest akım içerisindeki bir cisme, serbest akış çizgisine paralel olacak şekilde etki eden kuvvettir. Bu kuvvet cisme akış yönünde etki ettiği için özellikle belli bir yöne hareket etmeye çalışan araçlar ve yapılar için (örneğin araba, uçak, golf topları, kaldırma temelli rüzgâr türbinleri vb.) sorun teşkil etmektedir. Sürüklemeden güç alan sistemler (örneğin sürükleme temelli rüzgâr türbinleri) dışında, sürükleme kuvveti, kanatlarda, olabildiğince azaltılmaya çalışılmaktadır.

Bir önceki bölümde açıklandığı üzere kaldırma ve sürükleme kuvvetini oluşturan iki temel kaynak olan kayma gerilmesi ve basınç dağılımı, kaldırma kuvvetini oluşturduğu gibi sürükleme kuvvetini de oluşturmaktadır. Eşitlik 3.12'de bu etki, kanat profilleri için D sürükleme kuvveti olarak verilmiştir.

$$D = \int_{HK}^{FK} (-pcos\theta + \tau sin\theta)\, dS \qquad (3.12)$$

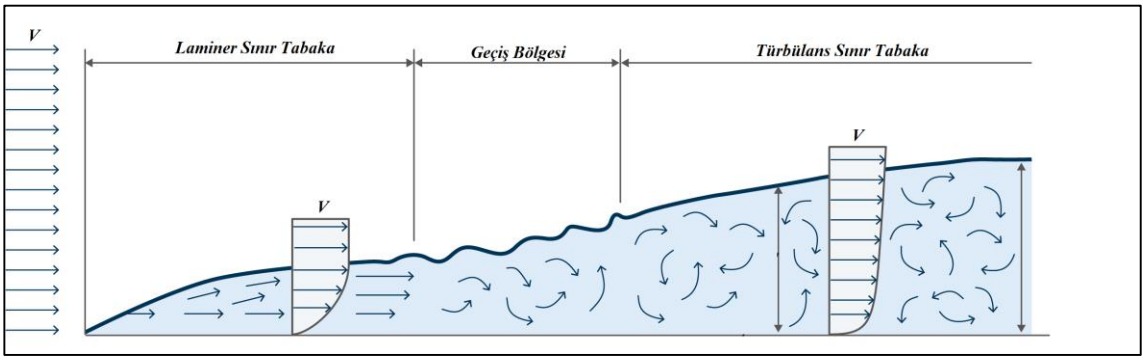
Eşitlik 3.12'de de görüldüğü gibi, sürüklemeyi etkileyen iki temel etmenden bahsedebiliriz. Bunlar; basınç dağılımından dolayı oluşan basınç sürüklemesi ve sürtünmeden dolayı oluşan kayma sürüklemesidir. Bu iki etmeni daha iyi anlayabilmek için bunları oluşturan olayların incelenmesi gerekmektedir.

Basınç dağılımından dolayı oluşan basınç dağılımı sürüklemesi, temel olarak akım içerisinde bulunan cismin üzerinden akışkanın ayrılmasını ifade eden "akış ayrılması" olayından kaynaklanmaktadır. Keskin olmayan oval şekilli cisimlerin üzerinden akan akışkan, sürtünmenin ihmal edilmediği bir akışta, cismin bombeli yapısından dolayı yüzeyi takip edemeyip yüzeyden ayrılmaya başlar. Daha detaylı açıklamak gerekirse; cismin akışla temas ettiği yüzeyde akış, basınç gradayanının sıfırdan küçük olması nedeniyle ($\frac{dP}{dx} < 0$) Bernouilli prensibine göre hızlanırken, cismin arka tarafında basınç gradyanının sıfırdan büyük olması ($\frac{dP}{dx} > 0$) nedeniyle akışı yavaşlatmaktadır. Bu basınç gradyanı yeterince yükselirse sınır tabakadaki akış geri döner ve akışta ayrılma olayı gerçekleşir. Akışta ayrılmadan dolayı cismin akış yönüne göre arkasında kalan "iz bölgesinde" girdaplar oluşur ve bu girdaplar düşük basınç, titreşim ve istikrarsızlığa sebebiyet verir ve nihayetinde sürükleme kuvvetini artırır. Akış ayrılması, bir kürenin üzerinden akışta Şekil 3.23'te gösterilmiştir.



Şekil 3.23. Bir küre üzerinden laminer akışta ayrılma (Tec-Science, 2020)

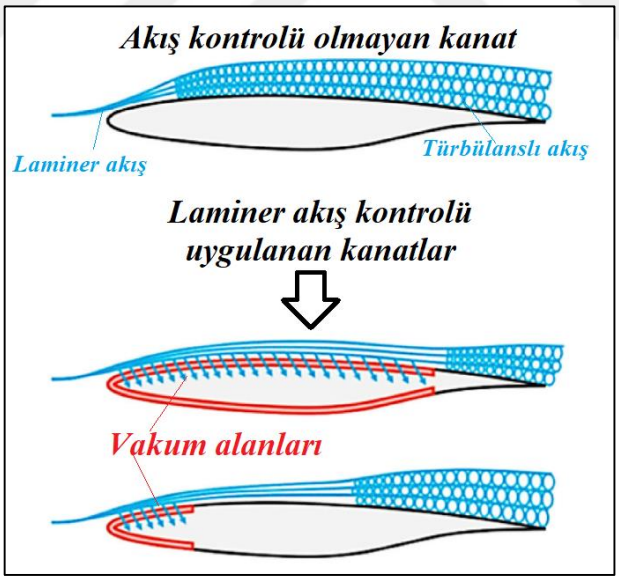
Akış ayrılması, akış çizgilerinin akış yönünden paralel düz çizgiler halinde aktığı "laminer akış" ve akışkanın düzensiz, çapraz ve girdaplar halinde akarak hız katmanları arasında enerji geçişini sağladığı "türbülanslı akış" için farklılık gösterir. Şekil 3.24'ten görüldüğü üzere laminer akışta, yüzeye doğru hız gradyanından ötürü akışkan hızı hızla düşerken, türbülanslı akışta hız katmanları arasında enerji geçişlerinden dolayı yüzeyde hızın azalması gecikmektedir. Bundan dolayı türbülanslı akışın, akış ayrılmasını geciktirmesi beklenir.



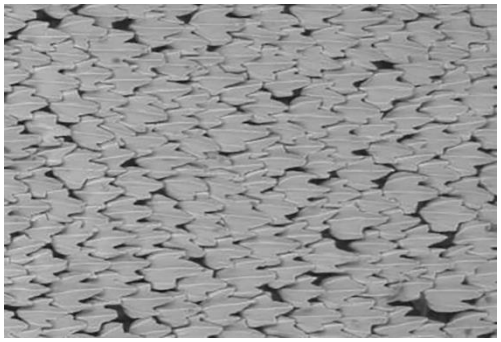
Şekil 3.24. Laminer ve türbülans sınır tabaka akışları (Boldt, 2022)

Deneysel çalışmalar da göstermiştir ki, laminer akışta, artan basınç gradyanı nedeniyle akış ayrılmasına daha fazla eğilim olur ve ayrılma noktasındaki düşük basınç, sürükleme katsayısının artmasına sebebiyet verir (Umur, 2009).

Kanat profili gibi keskin kenarlı kalınlığı az olan cisimlerde ise küçük hücum açılarında akışta ayrılma görülmez. O yüzden kayma gerilmesi burada sürükleme kuvveti için en büyük rolü oynamaktadır. Kayma gerilmesi yüzeyde sürtünme kuvveti oluşturur. Türbülans ise basınç sürüklenmesinin aksine sürtünmeden dolayı oluşan sürüklemeyi artırır. Çünkü Şekil 3.24'te görüldüğü üzere, türbülanslı akışta katmanlar arasındaki hız, genel itibariyle daha büyüktür ve bu daha büyük kayma gerilmelerine neden olur. Dolayısıyla kanat profillerinde sürükleme kuvvetini minimize etmek için laminer akış, olabildiğince kanat yüzeyinde devam etmeli ve türbülans geciktirilmelidir. Bu türbülans geciktirme çalışmalarına; Şekil 3.25'te görülen, kanattaki vakumla havayı çeken küçük deliklerle hibrit laminer akış kontrol sistemlerinin oluşturulması (Krishinan ve ark., 2017) veya Şekil 3.26'da görülen, köpek balıklarından ilham alınarak, kanat yüzeyinde mikroskobik çıkıntılar oluşturulması (Bechert ve ark., 1985) gibi çalışmalar örnek verilebilir. Bu sistemler, yüzeyde türbülanslı sınır tabakayı modifiye ederek türbülansı geciktirmektedirler.



Şekil 3.25. Laminer akış kontrolü ile türbülansın geciktirilmesi (Krishinan ve ark., 2017)



Şekil 3.26. Köpek balıklarının derilerindeki mikroskobik çıkıntılar (New Atlas, 2018)

Şekil 3.27'de gösterildiği üzere, akım içerisindeki kanat profilinin hücum açısının belli bir noktadan sonra artması akışta ayrılmayı oluşturacağı için hücum açısının artırılması sürükleme kuvvetini artırmaktadır. Daha sonra detaylarından bahsedilecek bu noktaya "stol noktası" (stall) denir. Dolayısıyla hücum açısı da sürükleme kuıvveti için önemli bir parametredir.



Şekil 3.27. Yüksek hücum açısında kanat üzerinden akışta ayrılma ("Flow Separation," 2017)

Sürükleme kuvvetini etkileyen temel parametreler, basınç dağılımı ve kayma gerilmesi üzerinden incelenmiş ve sürüklemeyi nasıl oluşturdukları açıklanmıştır. Daha kapsamlı olarak, özellikle üç boyutlu (3D) kanat modelleri incelendiğinde, havacılıkta bu etmenlere ek olarak, sürükleme kuvvetine etki eden 3 önemli kaynak da göze çarpmaktadır. Bunlardan ilki; "indüklenmiş sürükleme"dir (induced drag).

Daha önceki bölümde açıklandığı üzere; kaldırma kuvvetini oluşturan etmen kanadın üst yüzeyindeki basıncın alt yüzeyindeki basınçtan daha düşük olmasıydı. Bu durum kanat profili üzerinden akan akışkandan dolayı oluştuğundan akış çizgileri kanat profili üzerinden daha önce belirtildiği gibi akmaktadır. Ancak kanat profilinin üç boyutlu hali olan kanatların, kanat ucunda, bu basınç farkından dolayı hava, girdaplar (vortex) oluşturarak yukarı yönlenir. Uç kısmında oluşan bu girdaplar, kanadın firar kenarından gelen serbest akışın hızını ve yönünü değiştirir. Bu uç etkilerden dolayı aşağı yönlenen serbest akış hattı, kaldırma kuvvetini de etkiler. Çünkü daha önce açıklandığı üzere; kaldırma kuvveti her zaman serbest akıma dik olacak şekilde oluşur. Bu şekilde, ekseni eğilen kaldırma kuvvetinin akışa paralel yönde de bir vektörü oluşur ve ilave bir sürükleme kuvveti etki etmesine neden olur (Boldmethod, 2021). Bu indüklenmiş sürükleme olayı, Şekil 3.28'te verilen bir hava aracında gösterilmiştir.



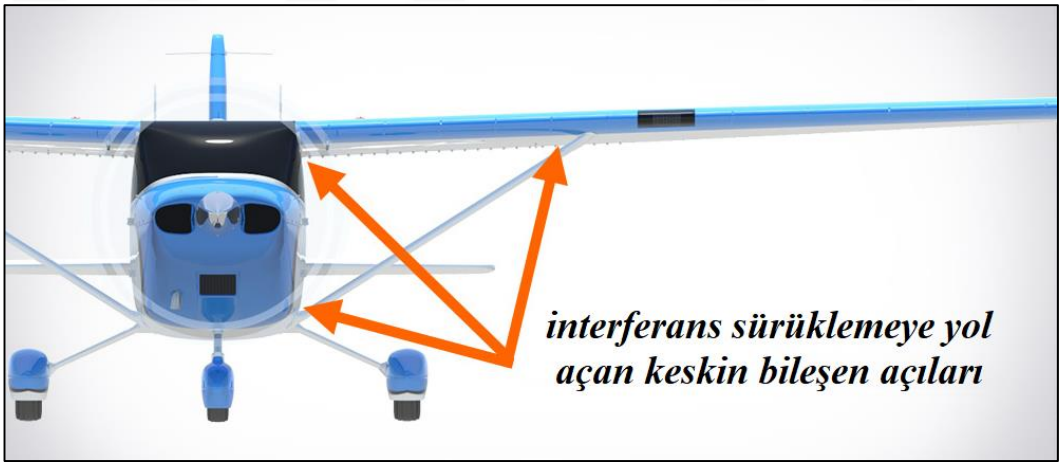
Şekil 3.28. İndüklenmiş sürükleme (Boldmethod, 2021)

Bir diğer sürükleme kaynağı ise, ses hızına yakın ya da ses üstü akış hızlarında gerçekleşen "dalga sürüklemesi"dir (wave drag). Hava, şok dalgasının önündeki süpersonik bölgeden, şok dalgasının arkasındaki ses altı bölgeye akarken, ayrılır ve türbülanslı hale gelir. Bu da şok dalgasını daha güçlü hale getirir ve akış ayrılmalarını artırır (Şekil 3.29). Böylece şok dalgalarından ötürü ilave bir dalga sürükleme kuvveti oluşur (Boldmethod, 2021).



Şekil 3.29. Dalga sürüklemesi (Boldmethod, 2021)

İlave sürükleme kuvvetlerine son bir kaynak olarak; taşıtın gövde bileşenleri arasındaki hava akışı karışımından kaynaklanan "interferans sürükleme" (interference drag) verilebilir. Hava, taşıt gövdesinin farklı bileşenlerinin etrafında akarken ve karışırken, bileşenlerin kendi başına sahip olacağı sürüklemeden daha büyük bir sürükleme toplamı yaratan bir şok dalgası oluşturabilir (Şekil 3.30). Bu da interferans (karşılıklı etkileşimli) bir sürüklemeye neden olur (Boldmethod, 2021).



Şekil 3.30. İnterferans sürüklemesi (Boldmethod, 2021)

Bu kısımda, gerek kanat profili üzerinde, gerekse 3D kanat yapısında sürükleme kuvvetini oluşturabilecek etkiler incelenmiştir. Daha sonraki bölümlerde matematiksel ifadesi üzerinde de durulacak sürükleme kuvvetinin, nasıl oluştuğu ve nasıl engellenebileceği ile ilgili temel bilgiler sunulmuştur.

Momentler

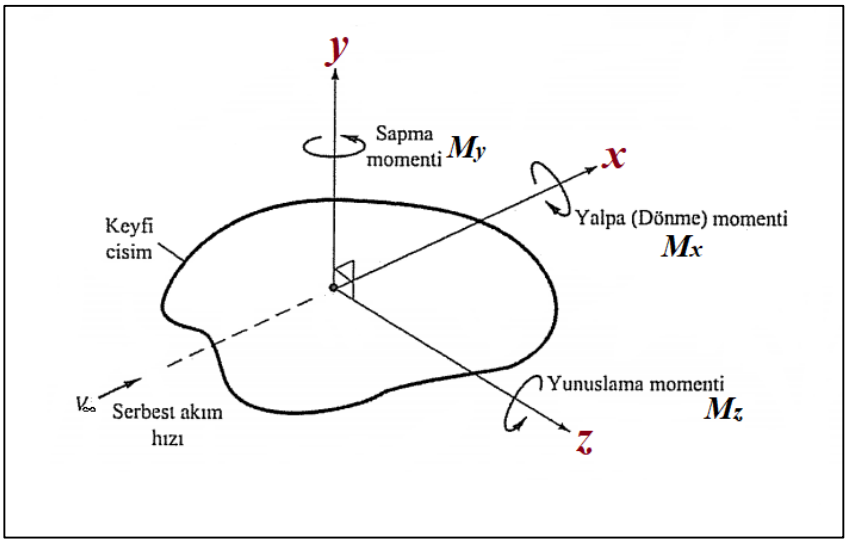
Kaldırma ve sürükleme kuvvetleri teorileri kısmında da bahsedilen, kanat profili üzerinde etki eden basınç dağılımı ve kayma gerilmesi, kanat profili üzerinde, bazı noktalara göre baz alınan momentler de oluşturmaktadır.

Belli bir referans uzunluğa (l) göre üzerine gelen kuvvetin döndürme etkisini ifade eden moment, kaldırma ve sürükleme kuvvetlerinde olduğu gibi Eşitlik 3.13'teki gibi boyutsuz bir ifade olan "moment katsayısı"na (coefficient of moment) dönüştürülebilir.

$$C_M = \frac{M}{0{,}5\rho {V_\infty}^2 S l} \tag{3.13}$$

Buradaki l referans uzunluğu yerine, kanat profilleri için veter uzunluğu c alınabilir.

Akışkan içerisindeki bir cisimde, üzerine gelen akıştan dolayı oluşan basınç dağılımı ve kayma gerilmelerinden ötürü, her eksende bir moment oluşmaktadır. Bunlar; serbest akış vektörüne paralel olan "x" eksenindeki "yalpa momenti, M_x" (Rolling moment), serbest akış vektörüne dik olan "y" eksenindeki "sapma momenti, M_y" (yawing moment) ve "x" ve "y" ekseninde dik, üçüncü eksen olan "z" esenindeki "yunuslama momenti, M_z" (pitching moment). Bu momentler Şekil 3.31'deki akışa maruz kalan keyfi bir cisim üzerinde gösterilmiştir.

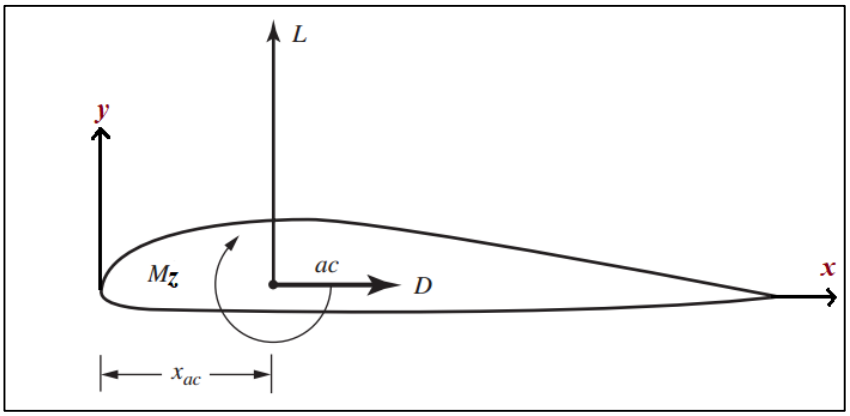


Şekil 3.31. Akışkan içerisindeki bir cisme etki eden momentler (White, 2004)

Yalpa momenti; kanadı, hareket doğrultusundaki x ekseni etrafında aşağı yukarı hareket etmesine neden olan momenttir. Uçaklar için düşünürsek, bu momente maruz kalan bir uçak, bir kanadı aşağı diğeri yuları gidecek şekilde yalpa hareketi yapacaktır.

Sapma momenti; kanadı, y ekseni etrafında döndürmeye zorlayan bir momenttir. Uçaklar için düşünürsek, bu momente maruz kalan bir uçağın burnu sağa ya da sola doğru dönmeye çalışacaktır.

Yunuslama momenti; kanadı, z ekseni etrafında döndürmeye zorlayan bir momenttir. Kaldırma ve sürükleme kuvvetleri düzlemi içerisinde etkiyen bir momenttir. Uçaklar için düşünürsek, uçağın burnunu yukarı kaldırmaya ve ya aşağıya indirmeye çalışır. Bu momentin kanat profili üzerinde gösterimi Şekil 3.32'de verilmiştir.



Şekil 3.32. Yunuslama momentinin kanat profili üzerinde gösterimi (Anderson, 2011)

Burada; momentin ve kuvvetlerin etki ettiği, firar kenarından x_{ac} kadar uzaklıktaki nokta, kanat profilinin aerodinamik merkezidir. "Aerodinamik merkez", momentin, hücum açısının değişmesine karşın sabit kaldığı noktadır. Yani aerodinamik merkezin etrafındaki moment ölçülürken, hücum açısının değiştirilmesi bu moment ölçümünü etkilemeyecektir. Aerodinamik merkezin, kanat profilinde belirlenmesi, özellikle yunuslama momentinin ölçümünde hücum açısından bağımsız değerler elde edebilmek için önemlidir. Yapılan çalışmalara bakıldığında; "ince kanat profili teorisi" (thin airfoil theory), aerodinamik merkezin, veter uzunluğunun 4'te 1'i olduğunu $(c/4)$ belirtmektedir. Bu teori ile ilgili detaylı bilgi, Anderson'un (2011) "Fundemantal of Aerodynamics" adlı kitabında, "Bölüm 4.7" ve "4.8 " kısımlarında bulunabilir.

Aerodinamik merkezin, firar kenarından, veter uzunluğunun çeyrek uzunluğunda bir uzaklıkta bulunduğu çoğu geleneksel kanatlar için geçerli olsa da aslında tam olarak $c/4$ uzaklıkta değildir. Eğer bir kanatta, belli hücum açılarında, kaldırma kuvveti katsayıları ve firar kenarından $c/4$ uzaklıkta noktadan, yine bu hücum açılarında, $C_{m,c/4}$ moment katsayısıları hesaplanırsa, Eşitlik 3.14'ten aerodinamik merkez (x_{ac}) hesaplanabilir.

$$\frac{dC_L}{d\alpha}(x_{ac} - 0{,}25) + \frac{dC_{m,c/4}}{d\alpha} = 0 \tag{3.14}$$

Aerodinamik merkez "basınç merkezi" (center of pressure) ile karıştırılmamalıdır. Basınç merkezi (x_{cp}), kanat üzerinde oluşan yayılı yükleri temsil eden kuvvetin etki ettiği

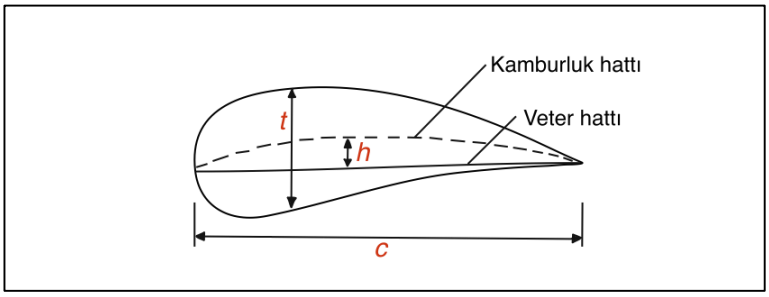
noktadır. Daha önceki kısımlarda bahsedilen, kanatta, üzerinden akan akışkandan dolayı oluşan gerilmelerin oluşturduğu normal (N) ve aksiyal (A) kuvvetler, bireysel olarak, yayılı yüklerin tek bir kuvvet halindeki temsiliydi. Bu kuvvetlerin kanat profili üzerindeki bir basınç merkezinden alınacak olması, basınç merkezinin etrafındaki momentin (M_{LE}) sıfır "0" olacağı anlamına gelir. Dolayısıyla basınç merkezine, aerodinamik momentin sıfır olduğu nokta da diyebiliriz. Veter hattı üzerinde basınç merkezinin firar kenarından uzaklığını (x_{cp}), Eşitlik 3.15 ile ifade edebiliriz.

$$x_{cp} = -\frac{M_{LE}}{N} \tag{3.15}$$

Kanat profili üzerinde, toplam kuvvet temsillerini ve aerodinamik momenti istenilen noktadan verilebilir ancak verilen noktada momentin o noktadan gösterilmesi gerekir. Belirlenen basınç merkezine göre elde edilecek aerodinamik moment de değişecektir.

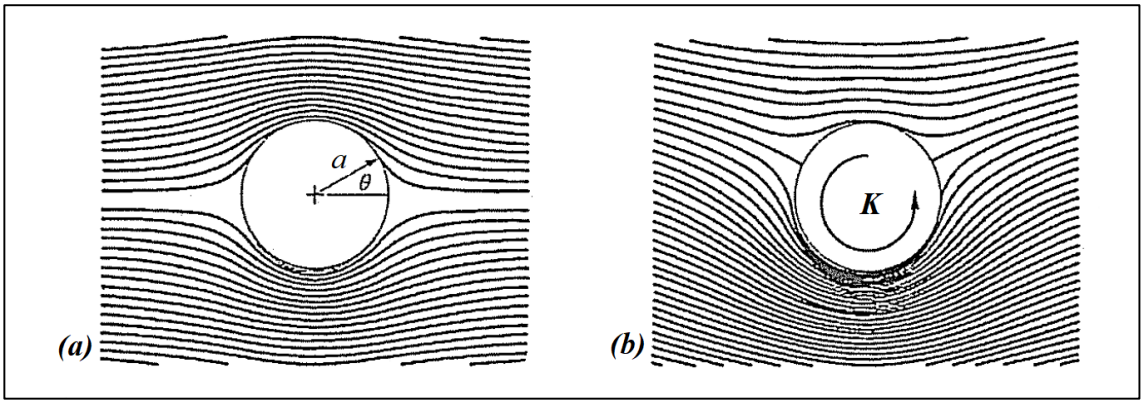
Sonsuz Kanat Teorisi

Kaldırma ve sürükleme teorisi kısmında, bu kuvvetlerin nasıl oluştuğunu ve hangi parametre ya da olayların etkileri olduğunu incelenmişti. Bu kısımda bu kuvvetlerin teorik olarak Şekil 3.33'teki gibi sonsuz kanat üzerinde nasıl hesaplanabileceği araştırılacaktır.



Şekil 3.33. Sonsuz kanat profili

Akışkan içine dalmış bir cismin etrafında bir akış dolanımı olduğundan bahsedilmişti. Bu akış olayını, Şekil 3.34'te gösterilen, yarıçapı a olan θ açısında bir yüzey genişliğinde bir silindirik cisimde, birimi m^2/s olan K şiddetinde bir Γ net dolanımı ile görebiliriz.



Şekil 3.34. Akış içerisindeki cismin, $\boldsymbol{K = 0}$ (a) ve $\boldsymbol{K \neq 0}$ anında (b) görüntüsü (White, 2004)

Buna göre; K dolanım şiddetinin tüm cisim için toplamını ifade eden net dolanım (Γ) Eşitlik 3.16'ya göre ifade edilebilir.

$$\Gamma = \int_0^{2\pi} \frac{K}{a} a \, d\theta = 2\pi K \tag{3.16}$$

Bu cismin üzerinden akan havanın basıncı P_∞ ve cismin yüzeyindeki basınç P_s ile gösterilirse, sonsuz boydaki bir cismin üzerine etkiyen sürükleme ve kaldırma kuvvetleri, sırasıyla Eşitlik 3.17 ve 3.18'deki gibi olur.

$$D' = -\int_0^{2\pi} (P_s - P_\infty) cos\theta \; a \, d\theta \tag{3.17}$$

$$L' = -\int_0^{2\pi} (P_s - P_\infty) sin\theta \; a \, d\theta \tag{3.18}$$

Bu cismin yüzeyi üzerindeki hız (V_s), detayları White (2004) "Akışkanlar Mekaniği" kitabının 8. Bölümünde bulunabilecek Ψ akım fonksiyonundan türetilir ve ifadesi Eşitlik 3.19'daki gibidir.

$$V_s = -2V_\infty sin\theta + \frac{K}{a} \tag{3.19}$$

Cismin yüzeyi ile serbest akım arasında Bernoulli eşitliği kurulursa, yüzey basıncı P_s Eşitlik 3.20'deki gibi çıkarılabilir.

$$P_\infty + \frac{1}{2}\rho {V_\infty}^2 = P_s + \frac{1}{2}\rho(-2V_\infty sin\theta + \frac{K}{a})^2 \tag{3.20}$$

Eşitlik 3.20'den elde edilen P_s yüzey basıncı, Eşitlik 3.17'deki sürükleme kuvveti eşitliğine yazılırsa ve gerekli integrasyon işlemi yapılırsa; $D' = 0$ bulunmaktadır. Bu durum sürtünme etkilerini içeren kayma gerilmesini, eşitlikte hesaba katmamamızdan kaynaklanmaktadır. Yani; sürtünmesiz koşulda, bir uniform akışın içine daldırılmış herhangi bir cismin direnci sıfırdır. Bu duruma "d'Alembert Paradoksu" denmektedir (White, 2004). Bu paradoks; Fransız matematikçi Jean le Rond d'Alembert tarafından 1752 yılında ortaya atılmıştır. Sürükleme kuvveti teorisi kısmında; hem kayma gerilmesinin hem de basınç dağılımının sürükleme kuvvetine etkisi tartışılmıştı. Buradaki hesapta kayma gerilmesi ihmal edilse dahi yine de sürükleme kuvvetinin teorik olarak sıfır çıkmasının sebebi; aynı zamanda akış ayrılmalarından kaynaklanan cismin iz bölgesindeki düşük basınç alanı etkisi de bu teorik hesapta hesaba katılamamıştır. Dolayısıyla, sürükleme kuvveti teorisi kısmında bu kuvvete etki eden parametreler Eşitlik 3.17'de yazılamadığı için teorik olarak sürüklenme kuvveti sıfır bulunmuştur.

Sonsuz boydaki bir kanadın, kaldırma kuvvetinin teorik hesabında ise; kaldırma kuvveti teorisinde de bahsedilen kayma gerilmesinin kaldırma kuvvetine etkisi olmaması durumu göz önüne alındığında eşitlikte basınç dağılımının hesabının, teorik olarak kaldırma kuvvetinin hesabında yeterli olması beklenir. Bu durumda; sürükleme kuvvetinin hesabında olduğu gibi, Eşitlik 3.20'de elde edilen yüzey basıncı, Eşitlik 3.18'de yerine yazılırsa, Eşitlik 3.21'deki kanat profili için kaldırma kuvveti (L'), elde edilir.

$$L' = -\frac{1}{2}\rho {V_\infty}^2 \frac{4K}{aV_\infty} a \int_0^{2\pi} sin^2\theta \, d\theta = -\rho V_\infty 2\pi K \tag{3.21}$$

Buradan; Eşitlik 3.11'dekine benzer şekilde, sonsuz kanat için kaldırma kuvveti $L' = -\rho V_\infty 2\pi K$ olarak bulunmuştur. Eşitlik 3.16'dan dolanım şiddeti K yerine net dolanım ifadesi yazılırsa Eşitlik 3.22'deki ifade elde edilir.

$$L' = \rho V_\infty \Gamma \tag{3.22}$$

Daha önceki kısımlarda bahsedilen; dalmış cisimler etrafında "Kutta-Joukowski" koşulundan dolayı oluşan akışkan dolanımı olan Γ_{kutta}, Eşitlik 3.23'teki gibi bir denkleme sahiptir. Buradaki β açısı, azami kamburluk ve veter uzunluğu arasında, $tan\beta = \frac{2h}{c}$ ifadesini vermektedir. Eşitlik 3.23'teki ifade, tam çevrim koşulu gereği $\Gamma = \Gamma_{kutta}$ olarak kabul edildiğinde ve kalınlığın kaldırma kuvvetine etkisi ihmal edilebilir olduğu düşünüldüğünde (White, 2004), $t = 0$ için, kaldırma kuvveti teorik olarak Eşitlik 3.24 gibi olmaktadır.

$$\Gamma_{kutta} = \pi b c V_\infty \left(1 + 0{,}77\frac{t}{c}\right)\sin(\alpha + \beta) \tag{3.23}$$

$$L' = \rho {V_\infty}^2 \pi b c \sin(\alpha + \beta) \tag{3.24}$$

Kaldırma kuvveti L, daha önce verilen Eşitlik 3.1 vasıtasıyla, sonsuz kanat için kaldırma kuvveti katsayısına $C_{L\infty}$'ye dönüştürülürse Eşitlik 3.25'teki gibi olur.

$$C_{L\infty} \cong 2\pi \sin(\alpha + \beta) \tag{3.25}$$

Eğer kanat kamburlu değil, simetrik ise ve α, sin ifadesinden kurtarılırsa, simetrik sonlu bir kanat için kaldırma kuvveti katsayısı Eşitlik 3.26'daki gibi olur.

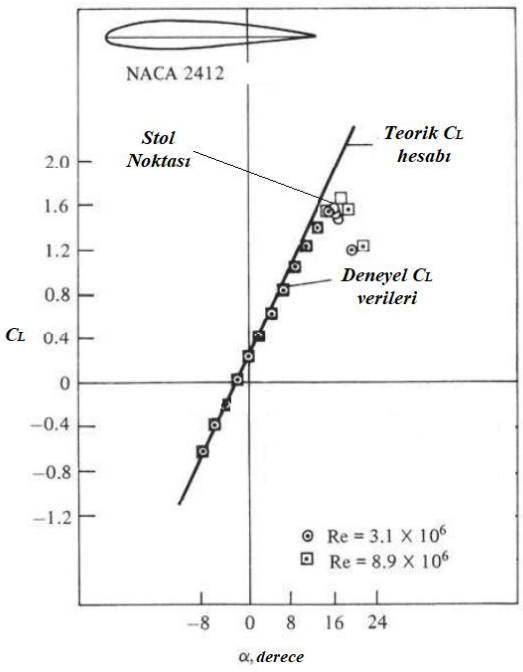
$$C_{L\infty} = 0{,}11\alpha \tag{3.26}$$

Bu eşitlikte de görüldüğü üzere; hücum açısının artmasıyla kaldırma kuvveti katsayısı da düzenli olarak artmaktadır. Ancak gerçek bir kanat üzeri akışta; hücum açısının belli bir noktadan sonra daha da artırılması, akışın kanat yüzeyinden ayrılmalarına sebep olacaktır.

Bu ayrılmaların sebep olduğu ters basınç gradyanın bütünüyle üst yüzeyi kapsamasıyla, C_L'nin aniden düşmesine, C_D'nin ise yükselmesine sebep olur. Bu kritik noktaya ya da açıya "stol noktası" (stall) denir.

Şekil 3.27'de, daha önce akış çizgilerinin gösterilmiş olduğu stol durumu istenmeyen bir olaydır. Çünkü bu açıdan sonra C_L'deki ani düşüş bir anda kanadın sağladığı kaldırma kuvvetini azaltacaktır. Bu da özellikle uçaklar gibi taşıma sağlayan araçlar için tehlikeli bir durumdur.

Stol durumu Eşitlik 3.26'da hesaba katılmadığı için bir kanat profilinin kaldırma kuvveti hücum açısı ile teorik olarak sürekli artması gerekir. Ama gerçek durumda, stol noktasından sonra teorik kaldırma kuvveti hesabı geçersiz olur. Bu durum Şekil 3.35'te NACA 2412 kanat profili için gösterilmiştir. Buradaki grafikte; Abbott ve von Doenhoff (1959)'un yaptıkları deneysel çalışmanın verileri ile teroik hesap karşılaştırılmış ve stol noktası gösterilmiştir.



Şekil 3.35. NACA 2412 kanat profili için $\boldsymbol{C_L}$'nin $\boldsymbol{\alpha}$'ya karşı değişiminin teorik ve deneysel verileri (Abbott ve von Doenhoff, 1959)

Sonlu Kanat Teorisi

Sonsuz kanattan farklı olarak gerçek boya sahip sonlu bir kanatta, kanat boyu b'den dolayı kanat ucu etkileri, kanat üzerinde oluşan gerilmeleri etkilemektedir. Bu kanat ucu etkilerinin nasıl bir etkiye sahip olduğu daha önceki kısımlarda ele alınmıştı.

Şekil 3.9'da daha önce verilen sonlu boyda bir kanatta, Eşitlik 3.27'de verilen bir AR genişlik oranı mevcuttur.

$$AR = \frac{b^2}{S} = \frac{b}{c} \tag{3.27}$$

Sonlu bir kanat için kaldırma kuvveti katsayısı C_L, kanat ucu girdaplarından etkilenerek, o anki hücum açısında düşmeye başlar. Bu durumda istenilen C_L için kanadın hücum açısının $\Delta\alpha$ kadar artırılması gerekiyor. Etkin hücum açısı olarak da ifade edilen $\Delta\alpha$, yapılan teorik ve deneysel çalışmalarca (Stewart, 1977) Eşitlik 3.28'deki gibi bulunmuştur (Umur, 2009).

$$\Delta\alpha \approx \frac{C_L}{\pi AR} \tag{3.28}$$

Buradaki ifade, Eşitlik 3.25 ile uygulanırsa, Eşitlik 3.29'daki sonlu kanat için kaldırma kuvveti katsayısı elde edilir.

$$C_L = \frac{2\pi \sin(\alpha + \beta)}{1 + 2/AR} \tag{3.29}$$

Kanat ucu etkileri sebebiyle C_D sürükleme katsayısında ise indüklenen sürüklemeden dolayı bir artış söz konusu olur. Bu artış daha önce de bahsedildiği gibi kaldırma kuvvetinden kaynaklandığı için Eşitlik 3.30'daki gibi ifade edilebilir.

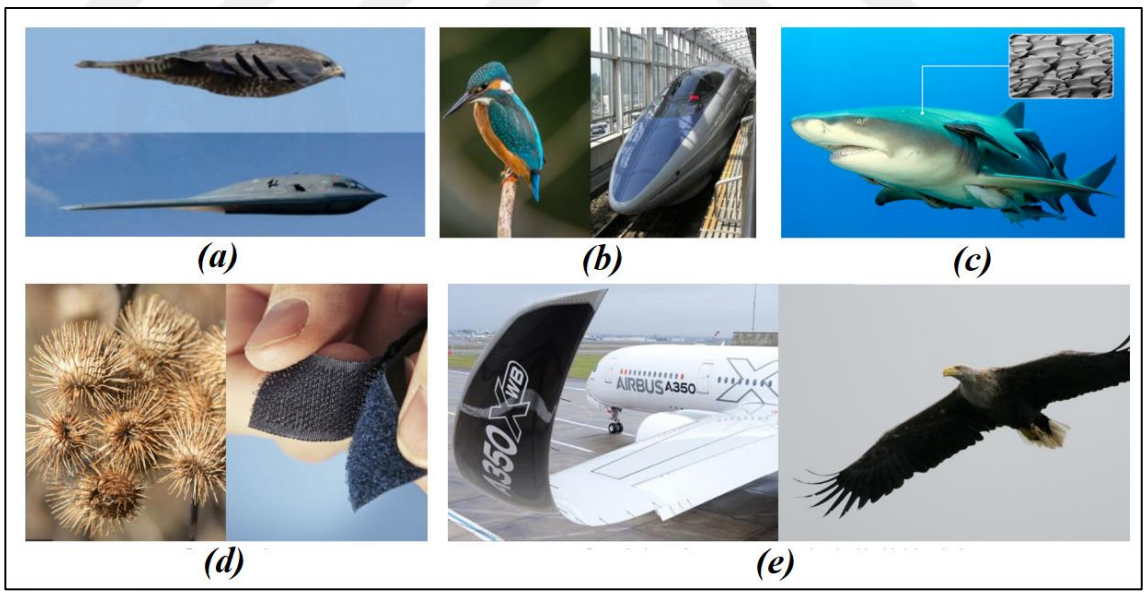
$$\Delta C_D = C_L \Delta\alpha = \frac{{C_L}^2}{\pi AR} \tag{3.30}$$

Nihayetinde, sonlu bir kanat için sürükleme katsayısı C_D, Eşitlik 3.31'deki gibi yazılabilir.

$$C_D = C_{D\infty} + \frac{{C_L}^2}{\pi AR} \tag{3.31}$$

3.3. Biyomimikri Bilimi

Biyomimikri (biomimicry) bilimi, en geniş anlamda, doğada bulunan herhangi bir tasarımı, sistemi veya anlayışı herhangi bir teknolojik tasarıma ya da sisteme taklit ederek, esinlenerek aktaran çalışmaları kapsayan bilim dalıdır. Biyomimikri, tarih boyunca tasarımcıların ve mühendislerin bilerek veya bilmeyerek kullandığı bir metodoloji olmuştur. Çünkü insanlık, teknolojik bir tasarım fikri aradığında gözünü ilk olarak doğaya çevirmiştir. Bunun örneklerini kullandığımız teknoloji aletlerinde görmek mümkündür (Şekil 3.36).



Şekil 3.36. Biyomimikri örnekleri: Stealth B2 Bomber – şahin (a), SHINKANSEN yüksek hızlı tren – yalıçapkını kuşu (b), yüksek hızlı yüzme sağlayan köpek balığı derisi (c), bardane bitkisi – cırt cırt (d), Kuşların kıvrık uçlu kanatları – uçakların kanat uçlarının kıvrılması (e) (Mibelle Biochemistry, 2021)

Bu alan, yapılan ilk çalışmalardan beri git gide büyümekte ve içerisinde çeşitli alanlara ayrılmaktadır. 2013'te yapılan bir araştırmaya göre; 1990'ların ortalarından günümüze kadar biyomimetik üzerine yayınların hızla artmış ve her 2-3 yılda bir ikiye katlanarak yılda yaklaşık 3000 makalelik olgun bir alana ulaşmıştır. Ayrıca araştırmacılar, alanın hala genişlediğini ve bu nedenle daha fazla büyüme beklediklerini ifade etmişlerdir. Bu hızlı büyüme ile biyomimetiğin bölümlere ayrılabileceği, robotik ve kontrol, etoloji tabanlı robotik, biyomimetik aktüatörler ve biyomalzeme bilimi ve yapısal biyomühendislik olarak tanımladığımız bir dizi farklı tema olduğundan bahsetmektedirler (Lepora ve ark., 2013).

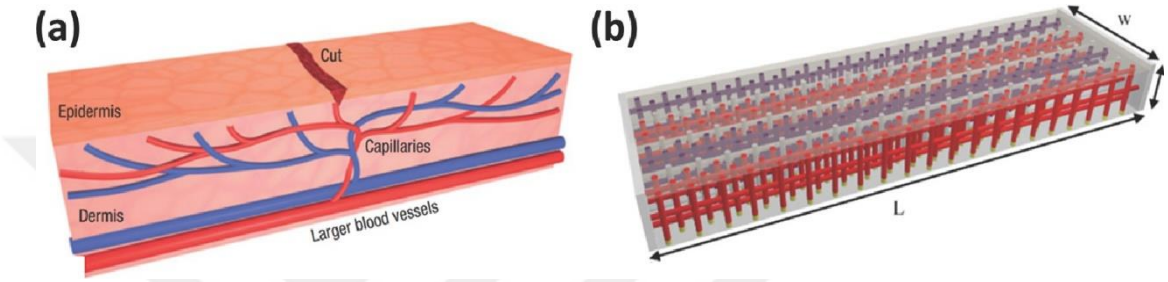
3.3.1 Terminoloji

Biyomimikri alanı içerisinde, sıkça karıştırılan, birbirine benzer terimler bulunmaktadır. Bu terimler, bu bilim dalının temelini oluşturan unsurlar olmuştur. Bilimin ismini oluşturan ve 3 tane yardımcı terimi gibi düşünülebilecek, toplamda 4 adet olan bu terimler, ISO 18458 (2015) biyomimetik komitesi tarafından, aşağıdaki gibi açıklanmıştır:

- Biyomimkri (Biomimicry): Sürdürülebilir kalkınmanın gerekliliklerini karşılamak için doğayı bir model olarak alan felsefe ve disiplinler arası yaklaşımdır.
- Biyoesinlenme (Bioinspiration): Biyolojik sistemlerin gözlemlenmesine dayalı yaratıcı yaklaşımların aktarılması.
- Biyomimetik (Biomimetics): Biyolojik sistemlerin analiz edilerek, mühendislik vb. alanlardaki modellere aktarılması ve bu modellerin bir problemi çözmek amacıyla uygulanması.
- Biyonik (Bionic): Biyolojik işlevleri, elektronik ve/veya mekanik eşdeğerleri ile kopyalamayı, değiştirmeyi amaçlayan disiplin.

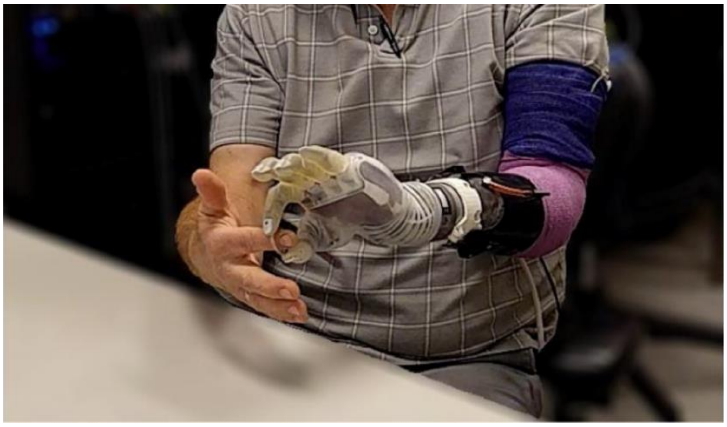
Bu tanımlamaları daha iyi açıklamak açısından terimlerle ilgili örnekler verilebilir:

Şekil 3.37'de biyoesinlenmeli bir sistem görülmektedir. Bu sistemde; esinlenme kaynağı olarak, insan epidermi ve kemiklerinin, bir yaralanmadan sonra kendini kan damarlarının yardımıyla iyileştirebilmesi olmuştur. Bu biyolojik sistemden esinlenilerek oluşturulan sensetik mikrovasküler ağ, biyolojik sistemdeki gibi kendi kendini iyileştirme özelliğine sahiptir. Bu damar yapılarının çatlak düzleminde kırılması, aktif maddelerin bu kanallara sızmasına ve taşınmasına neden olur ve ardından kendi kendine onarım gerçekleşir (Toohey ve ark., 2007).



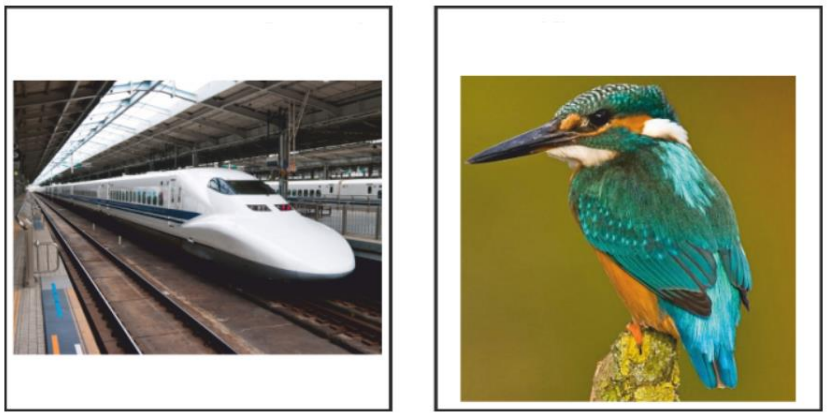
Şekil 3.37. Kan damarları yardımıyla kendi kendini iyileştiren insan epidermi sistemi (*a*), biyoesinlenmeli sensetik mikrovasküler ağ (*b*) (Zhao ve ark., 2014)

Şekil 3.38'de George ve ark., (2020)'nın çalışmalarındaki, 6 serbestlik derecesini aktif olarak kontrol edebilen bir biyonik kol görülmektedir. Biyolojik bir uzvun yerini alan bu kol günlük yaşam aktivitelerini bir kolun yaptığına yakın şekilde yapabilen bir biyonik tasarım olmuştur. Biyonik terimi, ABD Hava Kuvvetleri'nden Jack Steele tarafından doğadan fikir almak ve kopyalamak anlamına gelmek üzere 1960 yılında kullanılmıştır (Halacy, 1965).



Şekil 3.38. Günlük aktiviteleri gerçekleştirebilen bir biyonik kol örneği (George ve ark., 2022)

Şekil 3.39'da ise biyomimetik bir tasarım örneği olan bir tren verilmiştir. Yalıçapkını kuşundan ilham alınarak tasarlanan tren burnu, yalıçapkını kuşuna sağladığı gibi, sürükleme katsayısını düşürerek trenin hızını artırmaktadır.



Şekil 3.39. Biyomimetik tasarım örneği (Ryan, 2014)

Verilen bu örnekler biyomimikri biliminin farklı yaklaşımlarını göstermektedir. Tez kapsamında yapılan çalışmada, "biyomimetik tasarım" anlayışı benimsenmiştir. Dolayısıyla tanımı verilen biyomimetik terimi sıkça kullanılacaktır.

Biyomimetik tasarım süreci işlerken, doğadan yapılan kopyalama veya esinlenme sürecinde, biyomimetik tasarım olacak olan mühendislik ürününün komponentleri ve esinlenilen biyolojik yapının uzuvları arasında, Bar-Cohen (2006), yayınladığı makalesinde Çizelge 3.1'deki gibi bir bağlantı kumuştur.

Çizelge 3.1. Mühendislik ürününün komponentleri ve esinlenilen biyolojik yapının uzuvları arasında kurulan ilişki (Bar-Cohen, 2006)

Biyoloji	**Mühendislik**	**Biyomimikri Bilimi Bağlantısı**
Gövde	Sistem	Çok işlevli malzeme ve yapılara sahip sistemler, biyolojik sistemlerin yeteneklerini taklit ederek geliştirilmiştir.
İskelet ve Kemikler	Yapı ve Destek Ayakları	Destek yapıları, insan yapımı her sistemin bir parçasıdır
Zeka	Yapay Zeka	Artırılmış gerçeklik, otonom sistemler, hesaplamalı zeka, uzman sistemler, bulanık mantık vb. dahil olmak üzere biyolojiden ilham alan yapay zekanın çok sayıda yönü vardır.
Beyin	Bilgisayar	Bilgisayarlardaki ilerlemeler, insan beyninin işleyişini taklit ederek yapılıyor.
His	Sensör	Bilgisayar görüşü, yapay görüş, radar ve diğer yakınlık detektörlerinin hepsinin doğrudan biyolojik analojileri vardır. Bununla birlikte, en iyi ihtimalle, insan yapımı sensörlerin kapasitesi, biyosensörler kadar iyi değildir.
Kas	Aktüatör	Elektroaktif polimerler, doğal kaslara işlevsel benzerliği olan aktüatörlerdir.
Hücresel Güç Üretimi	Şarj Edilebilir Bataryalar	Güç üretmek için biyolojik malzemelerin yapılarına bakılması mekanik sistemler için büyük avantaj sunacaktır.

Bu çizelgedeki uzuv-komponent karşılaştırmalarından da anlaşılacağı gibi, biyolojik yapıların uzuvlarının doğada onlara kattığı avantajlar, bir mühendislik yapısında taklit edildiğinde, bu teknolojik yapının da işleyişinde aynı avantajları katabilir. Doğadaki mükemmel işleyiş göz önünde bulundurulduğunda, biyolojik yapılarda, inovatif birçok potansiyel olduğunu söylemek mümkündür.

3.3.2 Biyomimetik tasarım yaklaşımları

Biyomimetik tasarım açısından 2 çeşit yaklaşım benimsenmektedir (Fayemi ve ark., 2017):

Çözüm Odaklı Tasarım (Solution-Based)

Çözüm odaklı yaklaşımda; ilgilenilen biyolojik sistemin teknolojide taklit edilebilecek bir işlevi yerine getirmesi potansiyelinin araştırılmasına dayanır. Biyolojik sistemle ilgili gerekli soyutlamalar yapıldıktan sonra biyolojik ilkeler teknolojide uygulanabilir.

Problem Odaklı Tasarım (Problem-Driven)

Problem odaklı yaklaşımda; sürecin başlangıcı olarak bir problem tanımlanır. Bu problemin çözümü için belirli bir işlevi ya da mekanizmayı yerine getiren biyolojik sistemler belirlenir. Daha sonra uygun olan biyolojik sistem soyutlanarak teknolojiye aktarılır.

Tasarım yaklaşımlarını ikiye ayıran temel nokta; biyomimetik tasarım çalışmasına başlangıçta, elimizde çözülmesi gereken bir sorunla giriş yapmak ya da doğada üstün özellikler sergileyen biyolojik bir yapının, çalışmayı yapan kişi tarafından potansiyel uygulamalarının düşünüldüğü bir durum. Bu konunun önemi, biyomimetik tasarımı oluştururken, tasarımın nasıl yapıldığını ve sürecin nereye doğru evirileceğini de etkilemektedir. Yine de tasarım sürecinde bu iki çeşit yaklaşımın benzeşebilecek aşamaları da mevcuttur. Bu 2 yaklaşım ile ilgili literatürde çeşitli uygulamalar bulunmaktadır (Helms ve ark., 2008; Badarnah ve Kadri, 2015; Vattam ve ark., 2007; Helms ve ark., 2009; Speck ve ark., 2008).

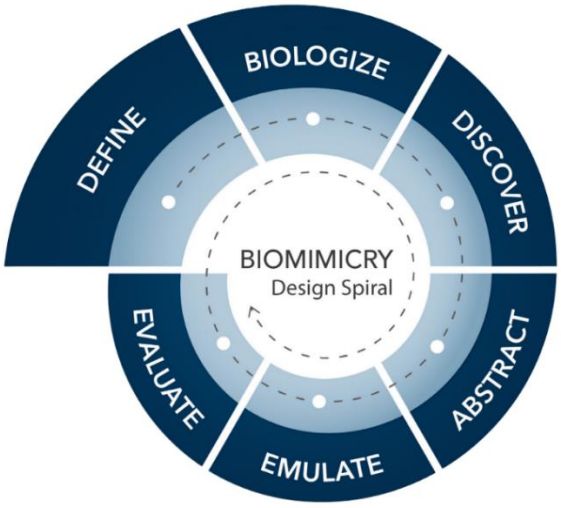
3.3.3 Biyomimetik tasarım sürecinde görev modeli

Biyomimetik tasarım süreci için kabul görmüş 2 temel, bilinen “görev modeli” (task model) vardır. Bunlardan ilki Biyomimikri Enstitüsü’nün (Biomimicry Institute)

“Tasarım Sarmalı” (Design Spiral). Bu enstitü, 2006 yılında, biyolog Janine Benyus ve Bryony Schwan tarafından, biyolojiyi tasarım sürecinin doğal bir parçası haline getirmeye adanmış, kar amacı gütmeyen bir yapı olarak kurulmuştur.

Biyomimikri Tasarım Spirali, başarılı bir biyomimetik tasarım için kritik olan adımları öğrenmek için yararlı bir araç olarak oluşturulmuş. Belirli bir teknolojik sorunu çözmek için veya doğadan bir tasarım fırsatı görüldüğünde ve ilham almak için biyolojik modellere bakıldığında bu görev modeli faydalı olabilir (Biomimicry Institue, 2017).

Biyomimikri tasarım sarmalının şeması Şekil 3.40’ta verilmiştir.



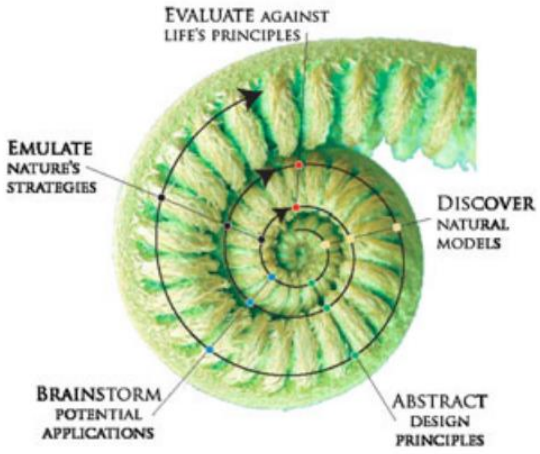
Şekil 3.40. Biyomimimkri Tasarım Sarmalı (Biomimicry Design Spiral) (Biomimicry Institue, 2017)

Bu görev şemasındaki görevleri tek tek incelemek gerekirse:

- Define (Tanımlama): Tasarımın sahip olması istenen etkiyi, kriterleri ve başarıyı belirleyecek kısıtlamaların yapılacağı tanımlamalar.
- Biologize (Biyolojikleştirme): Tasarım çözümünün ele alması gereken temel işlevlerin ve bağlamın ele alındığı, biyolojik terimlerle bağdaştırılarak, doğadan esinlenme işleminin gerçekleştirildiği görev kısmı.

- Discover (Keşfetme): Belirli hedefleri ulaşması amaçlanan tasarım için doğadaki örneklerinin araştırılması aşaması. Hedefteki biyolojik modellerin hayatta kalma ve yaşamlarını sürdürebilme yetkinliklerine göre çeşitlendirilmesi ve belirlenmesi de bu aşama da olabilir.
- Abstract (Soyutlama): Biyolojik stratejileri başarılı kılan temel özelliklerin veya mekanizmaların dikkatlice incelenmesi. Doğru kavrayışı sağlamak için modelin özelliklerinin nasıl çalıştığına dair anlayışların belirlendiği kısım.
- Emulate (Benzerleştirme): Bulunan stratejiler arasındaki kalıpların ve ilişkilerin arandığı ve çözümü şekillendirecek temel derslere odaklanıldığı kısım. Stratejilere dayalı tasarım konseptleri de bu aşamada geliştirilebilir.
- Evaluate (Değerlendirme): Tasarım kavramının/konseptlerinin, tasarım zorluğunun kriterlerini ve kısıtlamalarını ne kadar iyi karşıladıklarını ve doğanın sistemine ne kadar uyduğunun değerlendirildiği görev kısmı. Teknik ve iş modeli fizibilitesini göz önünde bulundurmak bu bölümde faydalı olabilir. Uygulanabilir bir çözüm üretmek için gerekirse önceki adımları gerektiği gibi iyileştirmek ve yeniden gözden geçirmek uygun olabilir.

Bu tasarım sarmalı görev aşamalarından da anlaşılacağı üzere, "problem odaklı" bir biyomimetik tasarım için oluşturulmuştur. Ancak daha önce de belirtildiği üzere bu görev aşamaları arasında "problem odaklı" ve çözüm odaklı" tasarım anlayışları için benzerlik kurulup gerekirse görev sıraları değiştirilebilir veya benzerleri eklenebilir. Örneğin; Goel ve ark., (2014) yayınladıkları makalelerinde, Biyomimikri Enstitüsü'nün tasarım sarmalının "çözüm odaklı" halini Şekil 3.41'deki gibi vermişlerdir.



Şekil 3.41. Çözüm odaklı yaklaşım için biyomimikri tasarım sarmalı (Goel ve ark., 2014)

Şekil 3.41'de görüldüğü üzere; çözüm odaklı bir yaklaşımda, tasarımcının elinde ilham alınacak biyolojik yapı olduğu için bu sarmal "keşfetme" (Discover) aşamasından başlıyor. "Soyutlama" (Abstract) ve "Benzeştirme" (Emulate) aşamaları arasında ise ilham alınan biyolojik modelin uygulanabileceği teknolojik alan için "Beyin Fırtınası" (Brainstorm) kısmı eklenmiştir.

Bir diğer bilinen görev modeli ise; Vincent ve ark., (2006) tarafından aktarılan "BioTRIZ" modelidir. Bu görev modelinin temeli, icatları bir mühendislik alanından diğerine başarılı şekilde aktarması ile bilinen TRIZ (Theory of Inventive Problem Solving) modelidir (Atshuller, 1984). TRIZ matrislerini kullanarak ve uyarlayarak oluşturulan BioTRIZ modeli, biomimetik tasarım için şu görev aşamalarının yapılmasını önermektedir (Vincent ve ark., 2006):

- Sorunu en genel ama kesin şekilde tanımlayın. Belirli düşünce yönlerinden veya sorunun erken çözümünden kaçınmak önemlidir. Özel terminolojiden de kaçınılmalıdır çünkü bu, düşünme alanını kaçınılmaz olarak mevcut (yani geleneksel) alanla sınırlar. Ardından istenen ve istenmeyen özellikleri ve işlevleri listeleyin.
- Sorunu analiz edip anlayın ve böylece ana çatışmaları veya çelişkileri ortaya çıkarın. Biyolojide işlevsel analojiyi bulun (PRIZM'e bakın) veya biyolojik çatışma matrisine gidin.

- Biyoloji ve TRIZ tarafından önerilen çözümleri karşılaştırın. Biyoloji ve mühendislik alanları için ortak çözümler bulun. Bu şekilde önerilen teknik ve biyolojik ilkeleri listeleyin.
- Bu ortak çözümlere dayanarak, doğal tasarımdan teknik tasarıma bir köprü kurun. Teknik ve biyolojik sistemleri uyumlu hale getirmek için genel önerilen bileşimlerinin bir listesini yapın.
- Tamamen yeni bir teknoloji yaratmak için, temel TRIZ ilkelerine bazı saf teknik veya saf biyolojik olanları ekleyin.

TRIZ matrislerini baz alan bu model, görev aşamalarından da anlaşılacağı gibi, "problem odaklı" bir tasarım yaklaşımı için kullanışlı görünmektedir.

Biyomimetik tasarım süreci için bu 2 temel görev modeli dışında, araştırmacılar kendi modellerini bu modellerden ilham alarak veya çalışmalarına göre revize ederek geliştirmişlerdir. Örneğin; Goel ve ark., (2014) kendi geliştirdikleri görev modelini, Tasarım Sarmalı ve BioTRIZ modeli ile kıyaslamış, hem çözüm hem de problem odaklı tasarım için kullanılabilecek modellerinin avantajlarından bahsetmişlerdir. Yine benzer şekilde geliştirilen veya ortaya atılan görev modellerini, tasarım süreçlerini literatürde bulmak mümkündür (Bogatyrev ve Vincent, 2008; Lenau, 2009; Nagel ve ark., 2010; Cheong ve ark., 2011; Baumeister ve ark., 2013).

3.4. Biyomimetik Tasarımın Oluşturulması

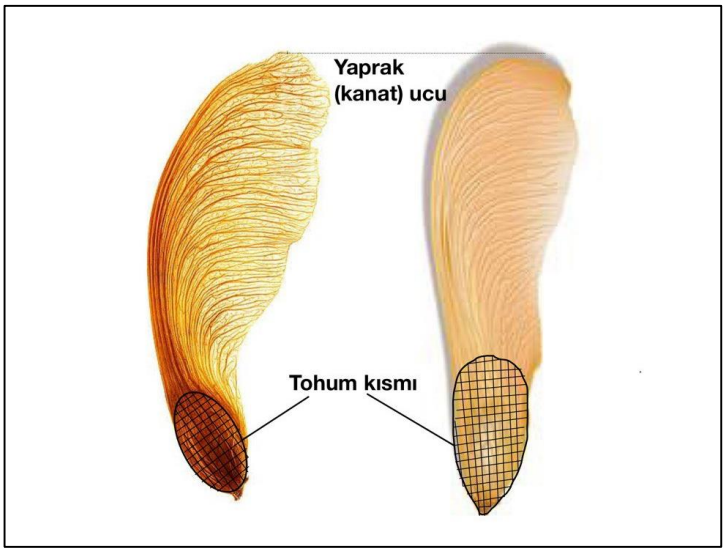
Tez çalışması kapsamında; biyomimetik bir kanat yapısı oluşturulup bunun geleneksel kanatlar gibi aerodinamik performansının incelenmesi ve kanat yapısının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Biyomimetik kanat tasarımı için ise, doğada gösterdiği üstün aerodinamik performansıyla bilinen akçaağaç tohumu (maple seed), esinlenme kaynağı olmuştur. Dolayısıyla bu biyolojik tohum modeli, çalışmanın başlangıcı olarak fikri oluşturduğu için çözüm odaklı tasarım yaklaşımı seçilmiştir ve buna uygun olacak şekilde bir görev modeli, çalışmanın akışına göre ve literatürde sıkça kullanılan görev modellerinden esinlenilerek oluşturulmuştur.

3.4.1. Akçaağaç tohumunun modellenmesi (biyomimetik tasarım)

Akçaağaç tohumunun kanat yapısı incelenmek üzere Bursa/Nilüfer bölgesinden toplam 25-30 adet akçaağaç tohumu toplanmıştır (Şekil 3.42). Toplanan numuneler akçaağaç tohumunun, tohum şekline bağlı olarak temelde 2 farklı kanat yapısının olduğunu göstermektedir. Eğer akçaağaç tohum yapısını tohum ve yaprak olmak üzere iki kısma ayırırsak; Şekil 3.43'te gösterildiği gibi bu kanat yapılarının birinde tohum kısmı daha şişkin ve yaprağın uç kısmına daha uzakken, diğer çeşidinde tohum kısmı genel yapıya daha fazla yayılmış ve yaprak ucuna daha yakındır.



Şekil 3.42. Toplanan akçaağaç tohumu numuneleri



Şekil 3.43. Akçaağaç tohumunun tohum kısmı çeşitleri

Geleneksel kanat yapılarına daha benzer olduğu ve sistemlere entegresi daha kolay olacağı düşünüldüğünden, tohumun yaprağın üzerinde daha fazla yaygın olduğu akçaağaç tohumu için bir tasarım modeli planlanmıştır.

Akçaağaç tohumundan biyomimetik bir kanat yapısı oluştururken, tohumun birebir modelinin aktarılacağı 3D tarayıcı gibi seçeneklerden ziyade, bir CAD programında, toplanan numunelerden elde edilecek geometrik özelliklere göre modellenmesi tercih edilmiştir. Bu sayede tasarlanan biyomimetik kanadın geometrik özellikleri analitik olarak ifade edilip gerektiğinde bu özellikler değiştirilerek modelin yapısının iyileştirilebilmesi hedeflenmiştir.

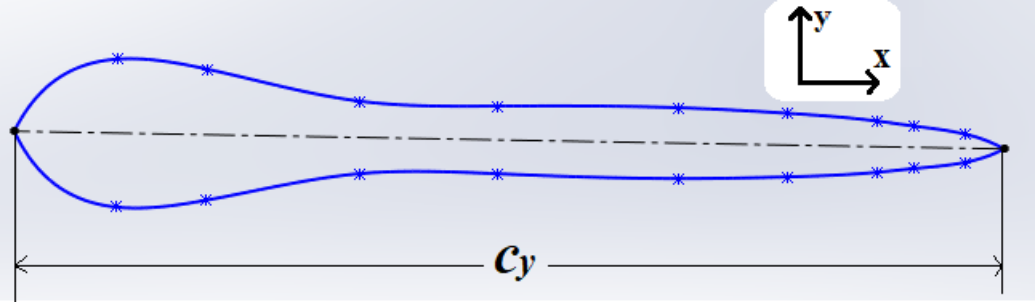
Toplanan numuneler arasında ortalama büyüklükte olan, yaklaşık 35 mm uzunluğundaki bir numune, geometrik özellikleri incelenmek üzere seçilmiştir. Seçilen numune üzerinde tohum kısmında yatay, yaprak kısmında damar yapısına uygun olacak şekilde rastgele 42 tane çizgi oluşturulmuştur (Şekil 3.44a). Oluşturulan bu çizgilerden yola çıkılarak Solidworks tasarım programında, çizim alanında 42 tane düzlem oluşturulmuştur. Bu düzlemlerin uzunluğunu x doğrultusunda belirlemek için program üzerinde akçaağaç tohumunun resminden yararlanılarak bir ana hat oluşturulmuştur. Böylece tohum modelini oluşturacak düzlemler bu ana hattın şeklinde sıralanmış olup numunenin ana hatlarından oluşan şekli yüksek oranda aktarılmıştır (Şekil 3.44b).



Şekil 3.44. Numune üzerinde kesilmek üzere oluşturulan rastgele çizgiler (a) ve tasarım programında bu çizgilere denk şekilde oluşturulan çizim düzlemleri (b)

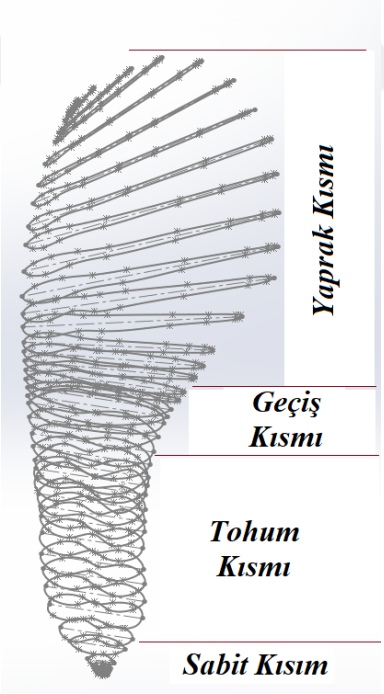
Nave ve ark., (2021) da yaptıkları çalışmada, akçaağaç tohumunun otorotasyon yeteneklerini kazandıran morfolojisini incelemek için, tohumu Şekil 3.44'tekine benzer bir şekilde, tohumu, uzun ekseni boyunca kısımlara ayırıp kesmişlerdir.

Akçaağaç tohumunun yüzey şeklinin de tasarıma aktarılıp, modelin 3 boyutlu haline getirilmesi için oluşturulan şekiller üzerinden numune kesilmiş ve her bir kesilen kısımdan kalınlık (yükseklik) ölçümleri alınmıştır. Alınan bu ölçümler çizgi boyunca rastgele yerlerden 0,01mm hassasiyetle gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler tasarım programında oluşturulan düzlemlerde tek tek eğri olarak çizilirken, modelin alt ve üst yüzeylerinin simetrik olmasına dikkat edilmiştir. Bu yüzden ölçülen kalınlıklar, Şekil 3.45'de verilen örnekteki gibi, y ekseninde eşit olarak dağıtılmış ve modelin sabit bir veter uzunluğu olamayacağından dolayı, her bir eğride ayrı bir değeri olacak, her bir eğriye ait, yerel veter uzunlukları (c_y) belirlenmiştir.



Şekil 3.45. Ölçülen kalınlıklardan elde edilen eğrinin, çizim düzlemlerine aktarılmasına bir örnek

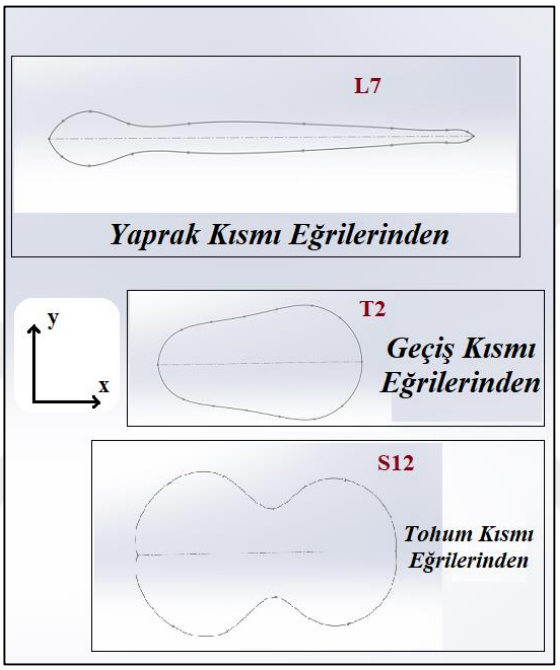
Aktarılan ölçümlerden çizilen eğrilere bakıldığında; akçaağaç tohumunu oluşturan 4 farklı eğri yapısını temsil eden, 4 farklı kısım dikkat çekmiştir. Bunlar; akçaağaç tohumunun baş kısmında bulunan küçük kısmı oluşturan sabit kısım (constant section), tohum kısmını oluşturan tohum kısmı (seed section), tohum ile yaprak kısmı arasını oluşturan geçiş kısmı (transition section) ve son olarak yaprak kısmını oluşturan yaprak kısmı (leaf section) (Şekil 3.46).



Şekil 3.46. Eğrilerin şekil yapısına göre oluşturulan modelin kesitleri

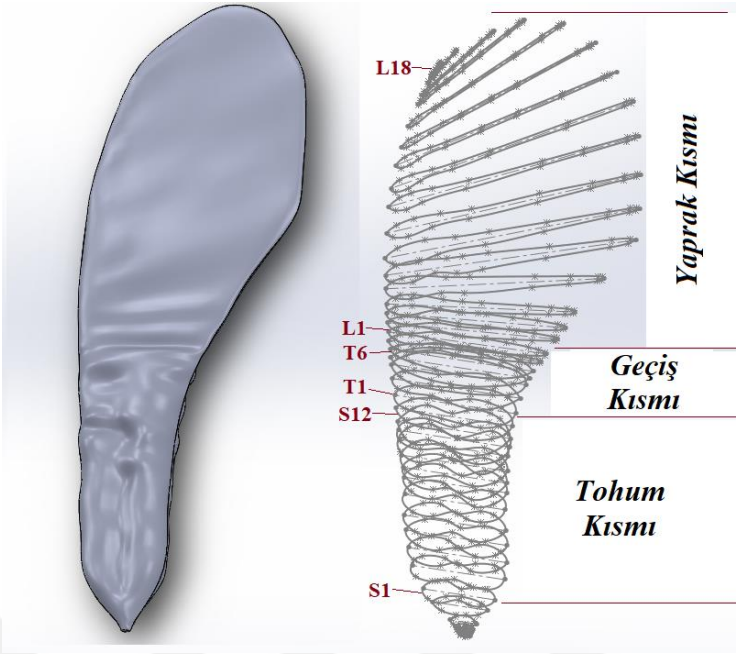
Genel yapıya göre, çok az bir kısmı kaplayan sabit kısmı temsil eden 6 tane eğri bulunmaktadır. Göz ardı edilebilecek bu küçük kısım dışında, diğer kısımlar için; tohum

kısmını oluşturan eğriler S1'den S12'ye kadar olmak üzere 12 tane kodla, geçiş kısmı T1'den T6'ya kadar olmak üzere 6 tane kodla, yaprak kısmı ise L1'den L18'e kadar olmak üzere 18 tane kodla isimlendirilmiştir. Bu kod isimleri; akçaağaç tohumunun kısımlarının İngilizce adlarının baş harfi, ilk kodu, sırasını oluşturacak sayı, ikinci kodu olmak üzere oluşturulmuştur. Şekil 3.47'de, bu kısımlara ait eğrilerin birer örnekleri verilmiştir.



Şekil 3.47. Tohum modelinin her bir kısmına ait eğrilerden birer örnek

Her bir düzlemde oluşturulan bu eğriler iskelet yapı olarak kullanılıp, üzerine tasarım programında yüzey örülerek, akçaağaç tohumunun biyomimetik modeli 3 boyutlu hale getirilmiştir (Şekil 3.48).



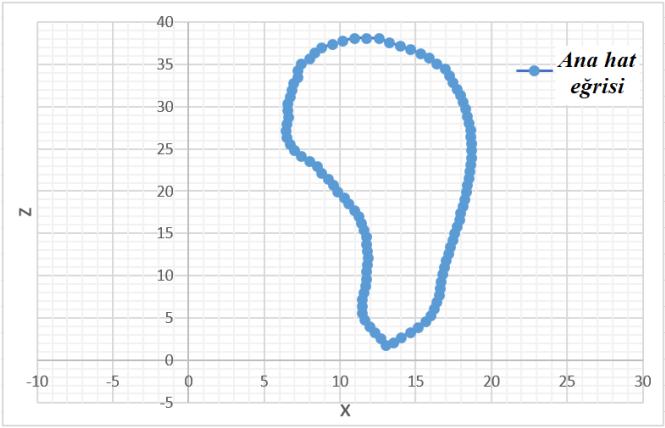
Şekil 3.48. Akçaağaç tohumunun biyomimetik modelinin tasarım programında oluşturulmuş 3D hali

Şekil 3.48'de, tohum modelinin kısımlarındaki ilk ve son eğrilerin yerleri de belirtilmiştir. Diğer eğriler de sırasıyla bu eğrilerin arasında bulunmaktadır.

3.4.2. Biyomimetik tasarımın analitik ifadesi

Bu kısımda; akçaağaç tohumunun biyomimetik modelinin analitik ve matematiksel ifadelerinden bahsedilecektir. Böylece tasarlanan bu model istenilen bir çalışmada kullanılabilecek şekilde belirli matematiksel parametrelerle sunulmuş olacaktır.

İlk olarak "y" ekseninden, yani üstten bakıldığında modelin dış hatlarını oluşturan "ana hat" (outline) çizgisinin koordinatlarına bakılmıştır. Bu dış hat her ne kadar akçaağaç tohumu modelinin resminden direkt çizilmiş olsa da, bu çalışmada kullanılan modeli tam anlamıyla vermek için bu ana hat üzerinde eşit aralıklarla 100 tane nokta oluşturulmuştur (Şekil 3.49). Bu noktalara karşılık gelen "x" ve "z" eksenindeki noktalar belirlenmiştir. Bu noktalar tezin son kısımlarındaki Ek 1'de sunulmuştur.



Şekil 3.49. Tasarlanan akçaağaç tohumunun ana hat eğrisi

Biyomimetik tasarımı oluşturan iskelet yapı, eğrilerle oluşturulduğu için bu eğrilerin matematiksel ifadesi, tasarımdan elde edilmek istenmiştir. İlk olarak rastgele çizilen eğrilerin her kısımda (tohum, geçiş, yaprak) kendi arasındaki ortalama mesafelerine bakılmıştır. Buna göre, 36 mm toplam uzunluğa sahip akçaağaç tohumu modelinde; Çizelge 3.2'de eğriler arası ortalama uzunluk ve her bir kısımdaki eğrilerin, toplam uzunluğa oranı verilmiştir.

Çizelge 3.2. Tasarlanan akçaağaç tohumu modelinin kısımlarının bazı özellikleri

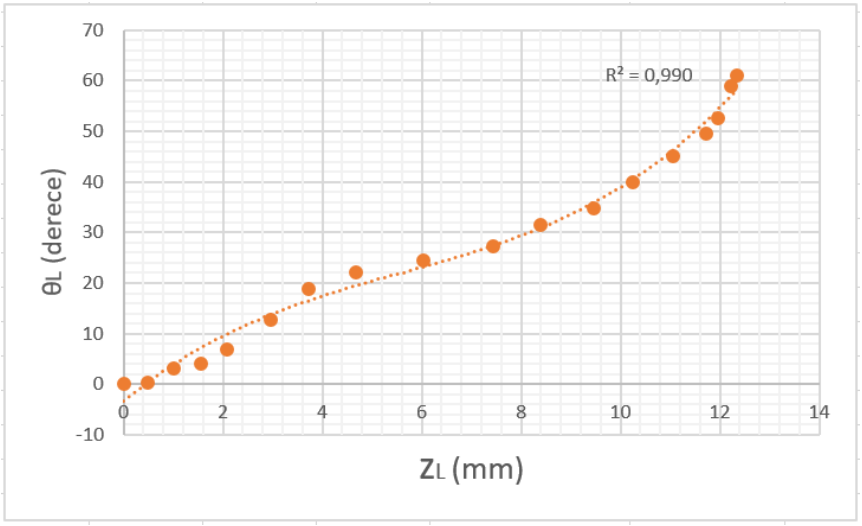
Kısımlar	Eğrilerin adeti	Her eğri arasındaki ortalama uzaklık (mm)	Kısımların toplam uzunluğa oranı
Sabit	6	1,63	%4,53
Tohum (S1…S12)	12	9,47	%26,31
Geçiş (T1…T6)	6	3,35	%9,31
Yaprak (L1…L18)	18	15,67	%43,53
Toplam	42	36	%100

Eğriler yaprak kısmı dışındaki diğer kısımlarda "x" doğrultusunda yatayda paralelken, yaprak kısmındaki eğriler yaprağın üzerinde bulunan damarların yönünde olduğu için "x" yönünde yatayda belli bir açıyla (θ_L) konumlanmışlardır. Bu kısımdaki eğrilerin yatayla olan açıları ve her bir eğrinin başlangıç eğrisine olan mesafesi (z_L) Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Yaprak kısmındaki eğrilerin yatay düzlemle olan açıları (θ_L) ve başlangıç eğrilerine olan uzaklıkları (z_L)

Yaprak Kısmı Eğrileri	Yatayla (x) Yaptığı Açı ($\boldsymbol{\theta_L}$)	L1 Eğrisine Olan Uzaklık ($\boldsymbol{z_L}$)
L1	0°	0mm
L2	0,19°	0,49mm
L3	3,15°	1mm
L4	4,14°	1,55mm
L5	6,77°	2,08mm
L6	12,75°	2,95mm
L7	18,81°	3,72mm
L8	22,2°	4,68mm
L9	24,36°	6,04mm
L10	27,33°	7,44mm
L11	31,51°	8,38mm
L12	34,77°	9,46mm
L13	40,02°	10,25mm
L14	45,12°	11,06mm
L15	49,65°	11,73mm
L16	52,71°	11,97mm
L17	58,88°	12,22mm
L18	60,95°	12,33mm

Çizelge 3.3'de yer alan açı ve mesafe değerlerine bakıldığında; bu iki parametre arasında Şekil 3.50'de verilen bir korelasyon bulunmuştur. Bu korelasyon Eşitlik 3.32 ile de tanımlanmıştır. Böylece bu denklem ile yaprak kısmında başlangıç eğrisine belli bir mesafede (z_L) çizilecek olan herhangi bir eğrinin, x doğrultusunda yatay ile açısı (θ_L) bu eşitlik ile bulunabilir.



Şekil 3.50. z_L ve θ_L arasındaki korelasyon

$$\theta_L = 0{,}0577757811873347{z_L}^3 - 0{,}969569103525316{z_L}^2 + 8{,}1529558557304z_L - 3{,}37852618831062 \quad (3.32)$$

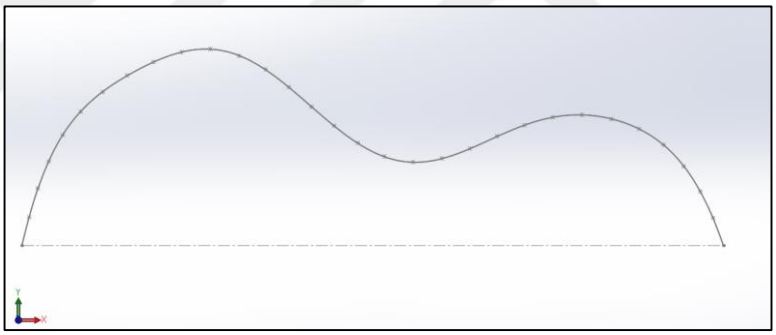
Eğrilerin, model içerisindeki konumları matematiksel ifadelerle belirlendikten sonra eğrilerin şekillerinin analitik ifadesi yapılmaya çalışılmıştır.

Analitik ifade sürecinde; modeli oluşturan eğriler üzerinden bir analiz yapılırsa; modeli geleneksel kanatlar gibi standardize etmek mümkün olabilir. Bu yüzden, modelin yüzeyini oluşturan eğriler belirli bir denklem ile ifade edilmek istenilmiştir. Raja ve Radhakrishnan (1977), yayınladıkları makalelerinde, Fourier serilerinin yüzey profillerini tanımlamada iyi bir yaklaşım olacağını belirtmişlerdir ve serideki terimlerin artmasıyla, bu yaklaşım oranının daha fazla olacağını da vurgulamışlardır. Buna ek olarak; sonlu fourier serileri, gezegen yörüngelerinin uygun bir biçimde tanımlanmasında (Taheri ve Abdelkhalik, 2012), kardiyovasküler ve solunum sistemleri gibi biyolojik sistemlerin analizinde (Attinger et all, 1966) ve resim işlemede sahnelerin sınıflandırılmasında şekil ayrımı yapmak (Persoon ve Fu, 1977) gibi farklı alanlarda benzer şekilde kullanılmıştır.

Biyomimetik tasarımı oluşturan tüm kısımların eğrileri genel bir Fourier serisi denklemi ile tanımlanıp, serinin terimleri, bu eğrileri en iyi şekilde tanımlayacak kadar eklenmiştir.

$$y(x) = \boldsymbol{a_0} + \boldsymbol{a_1}cos(x\boldsymbol{w}) + \boldsymbol{b_1}sin(x\boldsymbol{w}) + \boldsymbol{a_2}cos(2x\boldsymbol{w}) + \boldsymbol{b_2}sin(2x\boldsymbol{w}) + \boldsymbol{a_3}cos(3x\boldsymbol{w}) + \boldsymbol{b_3}sin(3x\boldsymbol{w}) + \cdots + \boldsymbol{a_n}cos(nx\boldsymbol{w}) + \boldsymbol{b_n}sin(nx\boldsymbol{w}) \quad (3.33)$$

Eşitlik 3.33'de verilen "sin" ve "cos" terimlerini içeren n terimli, sonlu trigonometrik polinom ve serisi Fourier açılımı (Tolstov, 2012) ile tohum, geçiş ve yaprak kısmında bulunan eğriler, denklem katsayıları değiştirilerek tanımlanabilmektedir. Denklemde x değerleri radyan olup eğrinin üzerinde oluşturulan noktaları temsil ediyor ve denklemden bulunan $y(x)$ fonksiyonu sayesinde ise eğri çizilebilmektedir. Denklemde "koyu" ile gösterilmiş katsayıların bulunabilmesi amacıyla, her bir eğrinin simetrik olan yarısı üzerinde "x" koordinatında 30 tane nokta oluşturulmuştur ve tasarım programından bu noktalara karşılık gelen "y" noktaları tespit edilmiştir (Şekil 3.51). Bu "y" noktalarını Solidworks programından almak için, program içerisinde bir makro kod kullanılmış ve "y" noktaları bu makro kod sayesinde bir excel dosyasına yazdırılmıştır.



Şekil 3.51. Örnek bir eğri üzerinde oluşturulan 30 nokta

Oluşturulan noktaların koordinatları "Excel" programına aktarılmıştır. Burada "Excel Solver" kullanılarak her eğriye ait Eşitlik 3.33'de verilen denklemin katsayıları bulunmak istenmiştir.

Excel solverda koordinat noktalarına göre çözüm yapılırken, regresyon modelleri için tahmin performansını temsil eden ölçüt olan R^2 değerinin 0,995'ten büyük olmasına dikkat edilmiştir. R^2 değeri, 0,9'dan büyük olduğunda tanımlama yapılacak eğri için doğruluk payı oldukça iyi olduğundan (Haaland, 2020), 0,995'ten büyük bir R^2 değeri ile eğriler oldukça düşük bir hata payı ile temsil edilmiştir. Ez az 0,995 R^2 değeri için her bir kısma ait eğrilerin, fourier serisi açılımları, farklı sayıda terimlerle gerçekleşmiştir.

Şekil 3.52'de; örnek oluşturması açısından, S1 eğrisinin fourier serisi denkleminin katsayılarının çözülmesi için excelde oluşturulan tablonun ekran görüntüsü verilmiştir.

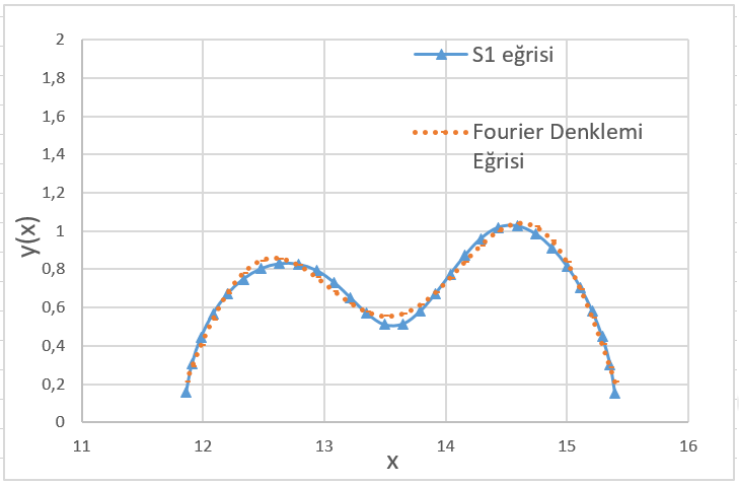
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	x	y	Eşitlik 3.27 y(x)	residual	residual^2	SSR	y^2	SSY	R^2
2	15,3932468	0,15411093	0,212242398	-0,05813147	0,00337927	0,0327713168446733	0,04504684	14,85987047	0,997794643
3	15,3545578	0,30323964	0,285533904	0,017705735	0,00031349		0,08152961		
4	15,2896099	0,44744232	0,404702077	0,042740242	0,00182673		0,16378377		
5	15,2065498	0,58203613	0,547259065	0,034777064	0,00120944		0,29949248		
6	15,1094252	0,70528239	0,695506153	0,00977624	9,5575E-05		0,48372881	Fourier Denklem Katsayıları	
7	14,9989655	0,81632824	0,834643852	-0,01831562	0,00033546		0,69663036	w	0,373265067
8	14,8756282	0,91153648	0,94817535	-0,03663887	0,00134241		0,8990365	a0	-0,006778916
9	14,7382218	0,98530613	1,020463842	-0,03515771	0,00123606		1,04134645	a1	0,003877285
10	14,5874289	1,02635755	1,037302207	-0,01094466	0,00011979		1,07599587	b1	-1,348389927
11	14,4325941	1,0187744	0,997133575	0,021640821	0,00046833		0,99427537	a2	0,350753466
12	14,2884493	0,9599927	0,922063143	0,037929559	0,00143865		0,85020044	b2	-0,192611114
13	14,1581896	0,87262451	0,836802754	0,035821756	0,0012832		0,70023885	a3	2,911867252
14	14,0361125	0,77369304	0,753315981	0,020377054	0,00041522		0,56748497	b3	-1,495405367
15	13,9155018	0,67327598	0,67700518	-0,0037292	1,3907E-05		0,45833601	a4	0,661882699
16	13,7899112	0,58161793	0,612541588	-0,03092365	0,00095627		0,3752072	b4	5,637603793
17	13,6494154	0,51520188	0,566445772	-0,05124389	0,00262594		0,32086081	a5	-2,882963261
18	13,4944602	0,51112092	0,552958438	-0,04183752	0,00175038		0,30576303	b5	-0,698323128
19	13,3505747	0,57025918	0,57528215	-0,00502297	2,523E-05		0,33094955	a6	0
20	13,216354	0,65081071	0,621351274	0,029459437	0,00086786		0,38607741	b6	0
21	13,0816202	0,73086497	0,683595801	0,047269173	0,00223437		0,46730322	a7	0
22	12,9374995	0,79356571	0,755303503	0,038262204	0,001464		0,57048338	b7	0
23	12,7848576	0,82668209	0,820063748	0,006618337	4,3802E-05		0,67250455	a8	0
24	12,6297577	0,82933964	0,855241054	-0,02590142	0,00067088		0,73143726	b8	0
25	12,4766553	0,80261761	0,843147308	-0,0405297	0,00164266		0,71089738		
26	12,3319681	0,74877909	0,778551723	-0,02977263	0,00088641		0,60614279		
27	12,1988431	0,66976855	0,669935837	-0,00016729	2,7986E-08		0,44881403		
28	12,0812016	0,56760625	0,536211373	0,031394876	0,00098564		0,28752264		
29	11,9834372	0,44523497	0,401575273	0,043659697	0,00190617		0,1612627		
30	11,909413	0,3067998	0,288241037	0,018558761	0,00034443		0,0830829		
31	11,8614275	0,15704069	0,210796832	-0,05375615	0,00288972		0,0444353		

Şekil 3.52. S1 eğrisinin fourier serisi denkleminin çözülmesi için oluşturulmuş örnek tablonun ekran görüntüsü

Excelde oluşturulan bu tabloda; "A" ve "B" sütunundaki "x" ve "y" değerleri, Solidworks programından makro kod ile çekildiği belirtilmişti. C sütununda ise, Eşitlik 3.33'deki Fourier denklemine göre elde edilen fonksiyon değeri bulunmaktadır. Buradaki amaç; Fourier serisi denkleminin katsayılarını değiştirerek "B" ve "C" sütunundaki değerleri olabildiğince eşitlemek. Bunun için bazı istatistiki terimler de tabloda görülmektedir. "D" sütunundaki "residual" (fark) ifadesi "B" ve "C" sütunundaki değerlerin farkını her satır için göstermektedir. "E" sütunundaki ifade "D" sütunundaki değerlerin her bir satırdaki karelerinin değerini, "F" sütunundaki "SSR" ifadesi ise bu değerlerin toplamını göstermektedir. "G" sütununda, her bir satırdaki "C" sütununa ait değerlerin kareleri ifade edilirken, "H" sütunundaki "SSY" ifadesi ise bu değerlerin toplamını göstermektedir. Son olarak; "I" sütunundaki R^2değeri ise Eşitlik 3.34'e göre hesaplanmıştır.

$$R^2 = 1 - \frac{SSR}{SSY} \tag{3.34}$$

Excelin solver kısmında; "hedef" kısmında, en küçük olması gerekçesi ile tanımlanan "SSR" değeri, Fourier denklem katsayılarının değişken olarak kabul edildiği çözümde, 10^{-4} yakınsama ile çözülmüştür. Şekil 3.43'ten de görüldüğü gibi; bu çözümlerle $R^2 = 0{,}9977$ çıkmıştır. Bu çözümün sonucunda; tasarımda oluşturulan S1 eğrisinin ve denklemden gelen eğrinin uyumu Şekil 3.53'ten de görülmektedir.



Şekil 3.53. S1 eğrisi için belirlenen denklemin eğri ile uyumu

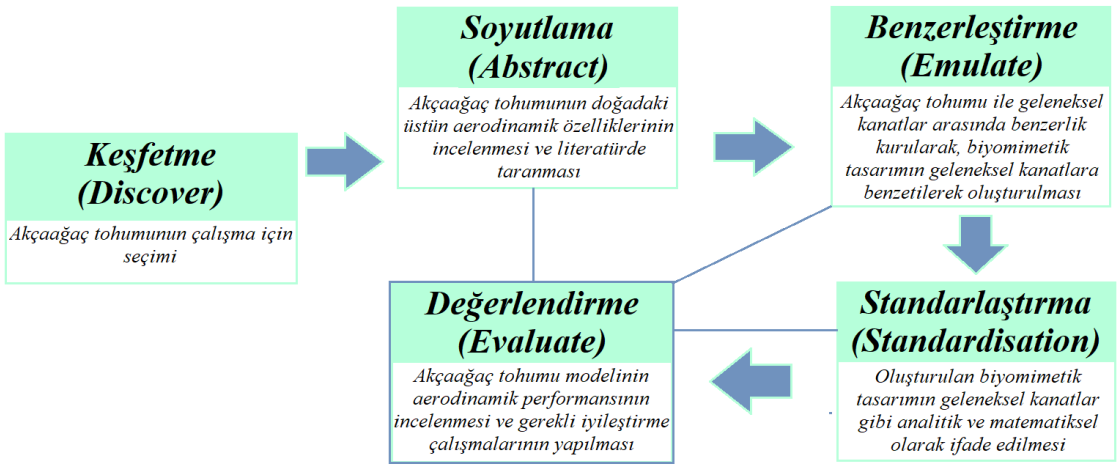
Tasarlanan akçaağaç tohumu modelinin, farklı kısımlarındaki eğriler ile uyumlu olacak Fourier serisi denklemlerinin en fazla kaç tane teriminin olacağına, R^2 değerinin 0,995'ten büyük olmasına göre karar verilmiştir. Dolayısıyla, Şekil 3.52'dekine benzer şekilde excel solverda çözümü yapılan diğer kısımlardaki denklemler de göz önünde bulundurulursa; tohum kısmında (S1…S12) 5 terim, geçiş kısmında (T1...T6) 3 terim, yaprak kısmında (L1…L18) ise 8 terimli fourier serisi açılımı denklemleri kullanılması uygun olmuştur.

Sonuç olarak; biyomimetik modelin iskeletini oluşturan eğriler, verilen "x" koordinatı aralığında, katsayısı belirlenen fourier serisi denklemleri ile çok yüksek oranda tanımlanmıştır. Her bir eğrinin, denkleminin içerisindeki hesaplanan bu katsayılar, bu

denklemlere ait “x” koordinat aralıkları ve yerel veter uzunlukları Ek 2’de verilmiştir. Verilen bu parametrelerle akçaağaç tohumunun oluşturulan biyomimetik tasarımının analitik olarak ifadesi gerçekleştirilmiştir. Herhangi bir tasarımcı Ek 1 ve 2’de sunulan bu değerler ile tasarım programlarında bu modeli 3D olarak oluşturulabilecektir. Ayrıca verilen değerlerde yapılacak değişikliklerle, yeniden oluşturacağı eğriler sayesinde, model üzerinde geliştirme veya deneme amaçlı değişimler yapabilme imkânına sahip olabilecektir.

Akçaağaç tohumundan birebir olarak geliştirilmeye çalışılan, alt ve üst yüzeyleri simetrik olan bu temel modele “M0” ismi (kodu) verilmiştir.

Bu kısımda; akçaağaç tohumunun doğada gösterdiği üstün aerodinamik özelliklerin geleneksel bir kanada uyarlaması için “çözüm odaklı” bir yaklaşım ile biyomimetik bir tasarım yapılmıştır. Tasarım sürecinde; daha önceki bölümlerde belirtilen, biyomimetik bir tasarım için araştırmacılar tarafından öne sürülen “görev aşamasına” benzer bir süreç izlenmiştir. Bu çalışmada; biyomimetik tasarım için oluşturulan görev aşaması grafiği Şekil 3.54’te verilmiştir. Bu görev aşaması, daha önce literatürde yapılan görev aşamalarına benzer şekilde oluşturulmuştur.



Şekil 3.54. Akçaağaç tohumunun biyomimetik tasarımı için oluşturulan görev modeli

3.5. Deneysel Çalışmalar

Akçaağaç tohumu üzerinden ölçüler alınarak tasarlanan biyomimetik kanat olan “M0” ve 4. bölümde detaylıca üzerinde durulacak olan, onun üzerinden geliştirilecek varyasyonlarının (M5, M5C) aerodinamik performansları, deneysel çalışma ile ölçülmesi planlanmıştır.

Bu deneysel çalışmalar Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde gerçekleştirilmiştir.

Bu kısımda; deneysel çalışmaların, nasıl ve hangi koşullarda yapıldığı üzerinde durulacak, deney sistemleri tanıtılacaktır.

3.5.1. Deney modellerinin üretimi

Tasarlanan kanat modellerinin yüzeyi, klasik kanatlardaki gibi düz olmayıp girintili çıkıntılı olduğu için model üretilirken, yüzey topografyasının kaliteli bir şekilde verilebilmesi için, “Stereolitografi” (SLA) baskı mantığı ile çalışan bir 3D yazıcı kullanılmıştır. Bu yazıcı Şekil 3.55’te gösterilen; Bursa Uludağ Üniversitesi Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında bulunan Creality 3D LD-006 ultraviole reçineli yazıcıdır. Bu yazıcıya ait bazı teknik özellikler de Çizelge 3.4’te verilmiştir.



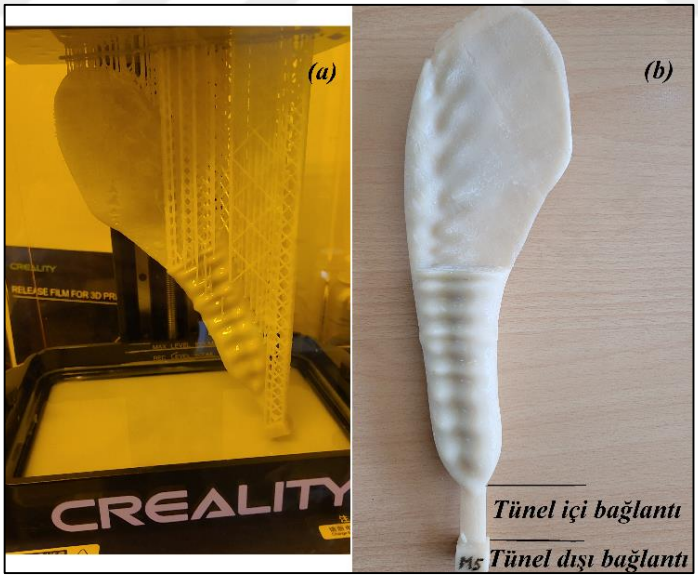
Şekil 3.55. Creality 3D LD-006 yazıcı

Çizelge 3.4. Creality 3D LD-006 yazıcının bazı teknik özellikleri

x, y Ekseni Çözünürlük	0,05 $\boldsymbol{mm}$
z Ekseni hassasiyet	0,01 mm
Baskı Alanı	192*120*250 mm

Modellerin yüzeylerindeki girintili çıkıntılı yapının, deneysel çalışmada etkisinin daha iyi görülebilmesi için, doğadan alınan akçaağaç tohumundan modellenen yapı, tasarım programında toplamda 7,14 katına büyütülmüştür. Modellerin karşılaştırması yapılırken boyutsuz sayılar kullanılacağı için bu durum nümerik ve deneysel çalışmalardaki kıyaslamaları etkilememektedir.

Deneysel çalışma için tasarlanan biyomimetik modellerden birinin, yazıcıdan üretim sonu çıkışı ve modelin temizlenip, deneye hazır hale getirildikten sonraki hali Şekil 3.56'da verilmiştir.



Şekil 3.56. Baskı sonu model (a) ve deneye hazır, temizlenmiş hali (b)

Şekil 3.56'da da görüldüğü üzere; baskısı alınan modelde tünel içi ve tünel dışı olmak üzere biyomimetik tasarıma ek kısımlar görünmektedir. Tünel içi bağlantı kısmı deney

alanında kalmasına karşın, ince olması sebebiyle akıştan dolayı modele göre üzerinde kayda değer bir gerilme oluşturmayacağı için, deney modeline bir etkisi olmayacaktır. Tünel dışı bağlantı kısmı ise; aerodinamik performans ölçer sisteme, modelin bağlantısını sağlayıp test alanında olmayacaktır.

3.5.2. Parametrelerin belirlenmesi

Biyomimetik kanat modellerinin hem deneysel hem de nümerik çalışması için ortak parametreler belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca bu parametreler literatürdeki çalışmalarda kullanılan parametrelerle de uyum sağlaması, verilerin karşılaştırılması açısından önem taşımaktadır. Her bir parametrenin değişiminin, herhangi bir aerodinamik performansa etkisi de etkili bir şekilde incelenebilmesi için bu parametrelerin aralıkları başka bir önemli husus olmuştur.

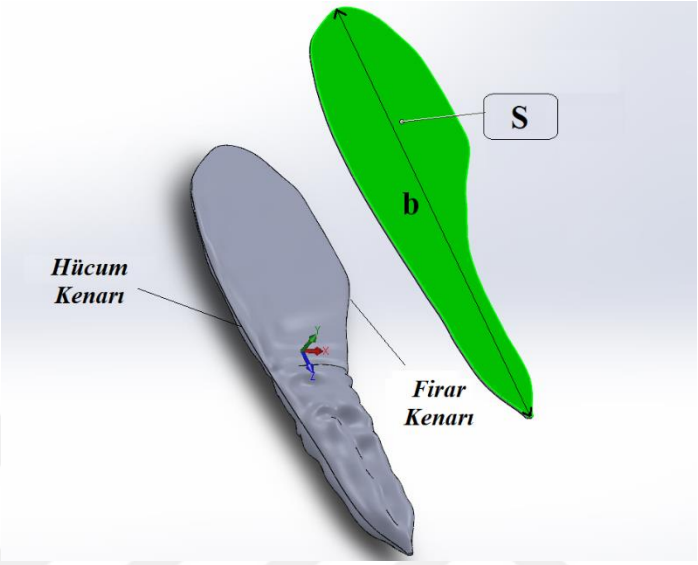
Buna göre; akçaağaç tohumunda kaldırmadan sorumlu tutulan LEV yapısı (Rezgui ve ark., 2020), doğada düşük rüzgâr hızları ile süzülen böceklerin kanat yapısında var olduğu (Maxworthy, 1979) düşünüldüğünde; çalışmada kullanılacak havanın (rüzgârın) serbest akış hızları (V_∞): 6 m/s, 10 m/s ve 12 m/s olarak belirlenmiştir. Bu serbest akış hızlarına karşılık gelen Reynolds (Re) sayıları, $Re = \frac{V_\infty c}{\nu}$ eşitliğinden her model için hesalanabilmektedir. Bu eşitlikte, υ, havanın kinematik viskozitesini temsil eder ve ortam şartları gereği bu değer: ν: $1{,}48x10^{-5}\, m^2/s$ olarak alınmıştır.

Akçaağaç tohumunun geç stol olduğu ile ilgili çalışmalardan yola çıkarak (Hsu ve ark., 2017); deneyler boyunca her bir hızda, oluşturulan modellerin hücum açıları 45° aralıkta olmasına karar verilmiştir.

Oluşturulan her bir model için bu parametrelerin (V_∞ ve α) konfigürasyonlarında yapılacak olan deneysel çalışmalarda; modellerin kaldırma kuvveti (L) ve sürükleme kuvveti (D) ölçülecektir.

Tasarlanan akçaağaç tohumu modellerinin deneyleri, geleneksel bir kanadın aerodinamik performans ölçümü gibi yapılacağından, biyomimetik model üzerindeki ölçülerin de

geleneksel bir kanattaki ölçülere benzetilmesi gerekmektedir. Buna göre; daha önce Şekil 3.9'da verilen geleneksel kanattaki parametreler, Şekil 3.57'deki gibi biyomimetik kanada benzetilmiştir.



Şekil 3.57. Biyomimetik model üzerindeki tanımlanan parametreler

Burada; yeşil ile gösterilen alan (S), akçaağaç tohumu modelinin planform (referans) alanıdır. Bu alan klasik şekiller gibi olmadığı için Solidworks programı üzerinden oluşturulan planform alan ile programın içerisindeki ölçü hesaplama yöntemi ile hesaplanmaktadır. Dolayısıyla, biyomimetik modellerin veter (kord) uzunlukları Eşitlik 3.35'de gösterildiği gibi, planform alanın kanat boyuna bölünmesiyle hesaplanmıştır.

$$c = \frac{S}{b} \tag{3.35}$$

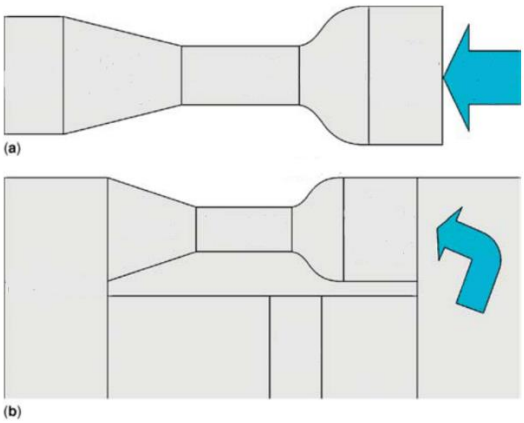
3.5.3. Rüzgâr tünelinin özellikleri

Rüzgâr tünelleri, içerisindeki cisme, belirli şartlarda hava akışı sağlayan ve bu havanın etkilerinin incelendiği sistemlerdir. Tam veya model ölçekli bileşenlerin rüzgâr tüneli testi, termal akışkan sistemlerinde ayrıntılı tasarım kararlarına rehberlik eden ve akışkan fenomeninin temel araştırmasına izin veren, yaygın olarak kullanılan bir tekniktir (Cattafesta ve ark., 2010).

Rüzgâr tünellerini sınıflandırmak için sahip olduğu çeşitli özellikler kullanılabilir. Bunlardan birisi; rüzgâr tünelinin içindeki serbest akış hızı ve bu hıza bağlı sahip olduğu boyutlar. Rüzgâr tünelleri için; serbest akış hızının, ses hızına oranını ifade eden Mach sayısı ($M = \frac{V_\infty}{a_\infty}$) 0,3'ten küçük olursa ($M < 0{,}3$), bu tip rüzgâr tünellerine düşük hızlı rüzgâr tünelleri denir. Bu durum, aynı zamanda, akışkanın sıkıştırılamaz akışkan bölgesinde olduğunu da gösterir. Mach sayısının 0,3'ten büyük olduğu, yüksek hızlı, transonik veya süpersonik akışlı rüzgâr tünellerinin boyutları, daha düşük hızlara sahip olan tünellere nazaran daha küçük ölçülere sahiptir. Çünkü hızı artırmak için tünel kesit alanının da küçük olması gerekir.

Çalışmamızda kullanacağımız serbest akış hızlarının en büyüğü 12 m/s olduğundan, Mach sayısı $M = 0{,}035$ çıkmaktadır. Bu da bize düşük hızlı rüzgâr tünellerinin yeterli olacağını göstermektedir.

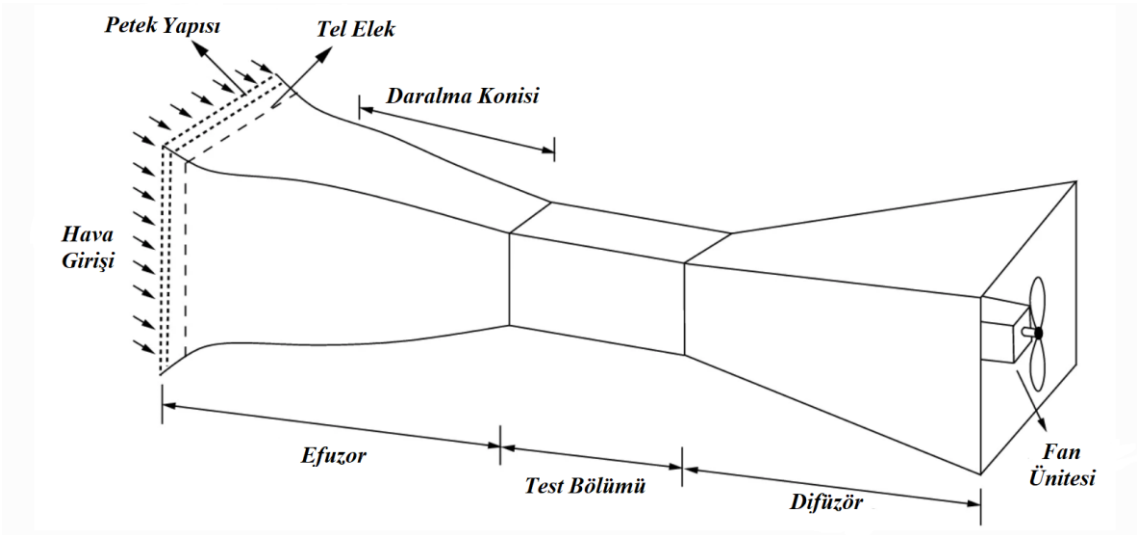
Rüzgâr tünellerini sınıflandıran bir diğer özelliği ise, açık veya kapalı döngüye sahip bir sisteminin olmasıdır. Açık döngülü rüzgâr tünelleri; havayı bir tarafından alıp sistemin tamamından geçirdikten sonra diğer tarafından ortama atmaktadır. Kapalı döngüye sahip tüneller ise; havanın debisini sabitleyip, sistemden havanın çıkmasına izin vermeden bir döngü boyunca havayı sürekli sistemde dolaştırır. Bu sistemler Şekil 3.58'de gösterilmiştir.



Şekil 3.58. Açık (***a***) ve kapalı (***b***) döngüye sahip rüzgar tünelleri (Cattafesta ve ark., 2010)

Şekil 3.59'da verilen, emiş tipli, açık döngülü bir rüzgâr tünelinin bölümleri şu şekildedir:

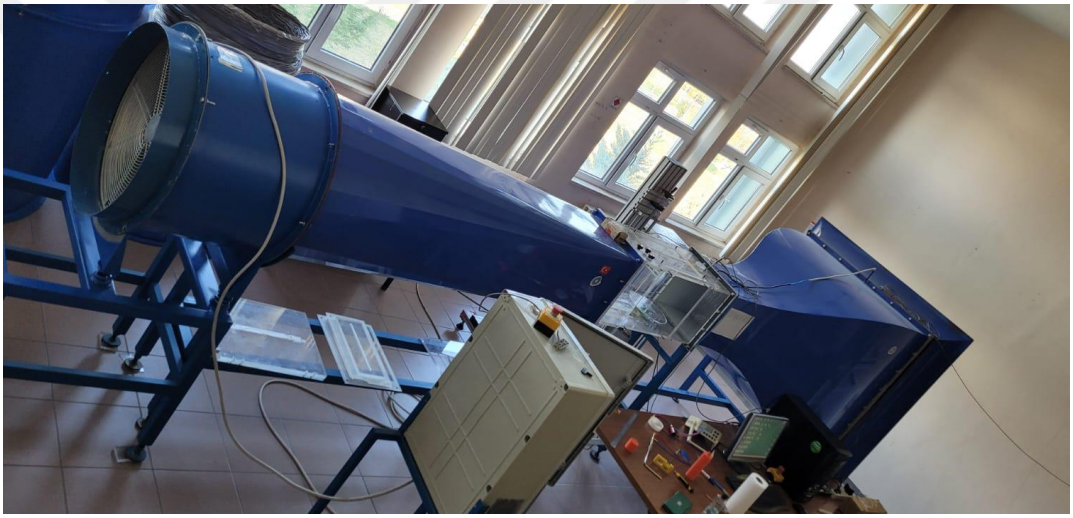
- Petek Yapısı ve Tel Elek: Bu komponentlerden petek yapısı, tünele giriş sırasındaki hava akımındaki girdap hareketlerinin neden olduğu türbülansı en aza indirmek için kullanılır. Tel elek ise, eşit hava akımı dağılımını sağlar ve bir yönde sürekli bir akışı destekler.
- Efuzor – Daralma Konisi -: Efuzor akışı emip test bölümüne gönderen kısımdır. Bu bölümde bulunan daralma konisi, akışı geliştirerek hızlandırır ve gerekli serbest akış hızının elde edilmesini sağlar.
- Test Bölümü: Bu bölüm, aerodinamik performansı test edilecek modelin bulunduğu bölümdür. Giriş ve çıkış kesitleri neredeyse eşit olan bu bölümde test modelinin bağlanacağı ekipmanlar bulunabilir.
- Difüzör: Bu bölüm, test alanından gelen havayı nazik şekilde yavaşlatarak ortama gönderir.
- Fan Ünitesi: Bu ünitede fanı tahrik eden bir motor bulunur. Fan havayı harekete geçirerek sistemden akmasını sağlamaktadır. Test bölümündeki serbest akış hızı, fanın çalışma frekansı değiştirilerek ayarlanabilmektedir.



Şekil 3.59. Emiş tipli, açık döngülü bir rüzgâr tünelinin bölümleri (Kaushik, 2019)

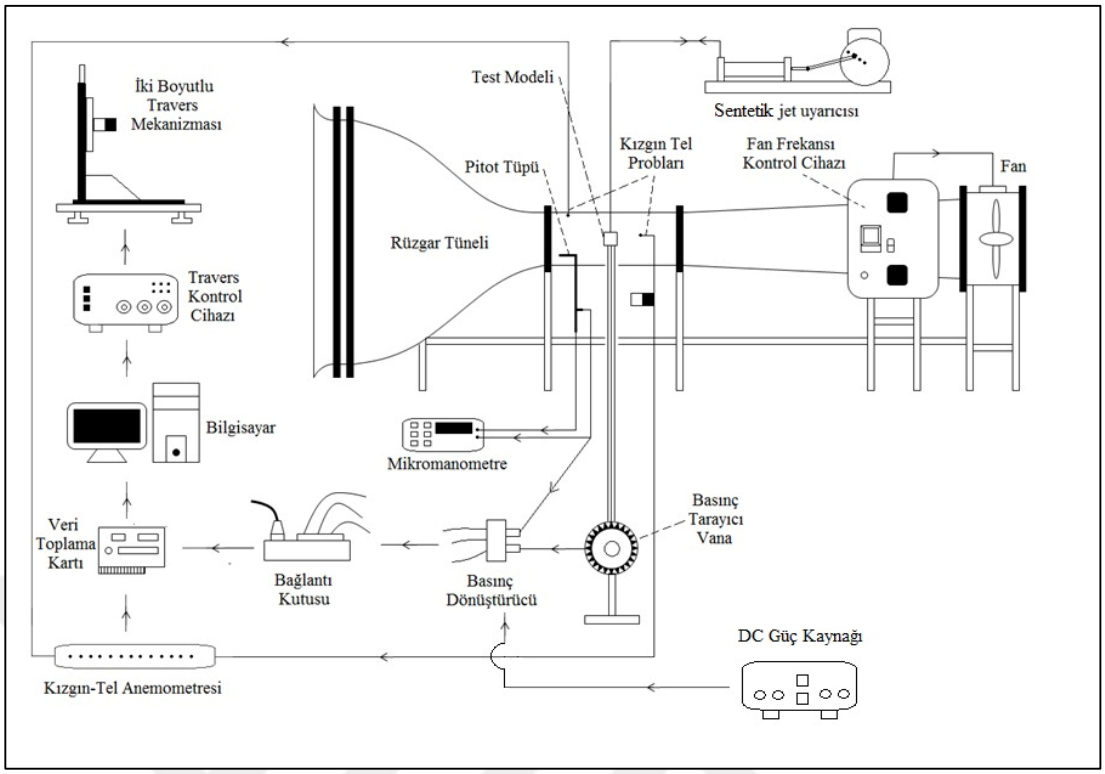
Şekil 3.59’de verilen rüzgâr tünelinin fan kısmı çıkışta bulunup, havayı emdiğinden dolayı bu tip rüzgâr tünellerine “emmeli tip rüzgâr tüneli” denir. Fan kısmı çıkışta değil de girişte olup, havayı üfleyerek hareketlendiriyorsa, bu tip rüzgâr tünellerine “üflemeli tip rüzgâr tüneli” denir.

Bu çalışmada; aerodinamik performans testleri gerçekleştirilen modeller, Şekil 3.60’da gösterilen, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, aerodinamik laboratuvarında bulunan hava tünelinde gerçekleştirilmiştir. Bu tünel 4kW motor gücü olan fana, 40*40*100 cm boyutlarında test alanına sahip, açık çevrim, emmeli tip bir rüzgâr tünelidir. Tünelin türbülans yoğunluğu %1’den küçük olup daralma oranı 9:1’dir.



Şekil 3.60. Çalışmanın gerçekleştirildiği açık çevrim, emmeli tip rüzgâr tüneli

Bu rüzgar tüneli ve daha sonra detayları açıklanacak olan, tünele entegre çalışan diğer ekipmanların şematik görünümü ise Şekil 3.61’de verilmiştir.



Şekil 3.61. Rüzgar tüneli ve entegre ekipmanların şematik görünümü

3.5.4. Aerodinamik performans ölçer sistemi ve diğer ekipmanlar

Rüzgâr tünelinde, bir cismin aerodinamik kuvvet ve momentlerini ölçmek için test bölümünün dışında, cismin bağlanacağı aerodinamik performans ölçer sistemler bulunur. Araştırmacılar lieteratürde, kuvvet-dengeye dayalı (Mueller, 2000) veya basınç ölçümüne dayalı (Mcghee ve ark., 1988) veya her ikisinin de kullanıldığı (Maughmer ve Bramesfeld, 2008) aerodinamik performans ölçer sistemlerle deneylerini gerçekleştirmişlerdir.

Bu sistemlerden; basınç ölçümüne dayalı sistem, kanadın üst ve alt yüzeylerindeki basıncı ölçüp aradaki farktan kuvvetleri elde etmeyi sağlarken, kuvvet denge sistemleri ise, gerinim ölçerleri (strain gauge) üzerinde barındıran yük hücreleri (load cell) ile kanadın üzerine gelen kuvvetleri, gerinimlerden ölçerek aktarmaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalarda; içerisinde yük hücreleri barındıran bir sistem olan, "ATI Gamma" model dönüştürücü cihaz kullanılmıştır. 6 komponentte ölçüm yapabilen, bu aerodinamik performans ölçer cihaz sayesinde, modellerin 6 eksende kuvvet ve momentleri $(X(L), (Y)D, (Z)Y, M_x, M_y, M_z)$ ölçülebilmektedir.

Şekil 3.62'de görünümü verilen "ATI Gamma" dönüştürücü cihazının ölçüm özellikleri ise Çizelge 3.5'te verilmiştir.

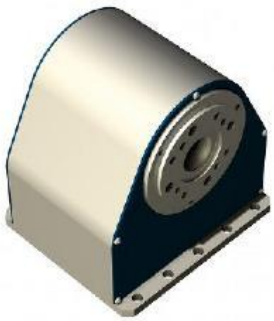


Şekil 3.62. ATI Gamma model dönüştürücü ölçüm cihazı (ATI Industrial Automation, 2022)

Çizelge 3.5. ATI Gamma model dönüştürücü cihazın ölçüm özellikleri

Kalibrasyon	$\boldsymbol{X, Y}$	$\boldsymbol{Z}$	$\boldsymbol{M_x,\ M_y,\ M_z}$	$\boldsymbol{X, Y}$	$\boldsymbol{Z}$	$\boldsymbol{M_x,\ M_y, M_z}$
SI-32-2,5	32 N	100 N	2,5 Nm	1/160 N	1/80 N	1/2000 Nm
	Ölçüm Aralığı			Çözünürlük		

Yük hücreli dönüştürücü cihaz, belli açılarda döndürülmek üzere Şekil 3.63'te verilen "Isel" marka, "ZD30" model bir açısal döndürme aparatına bağlıdır.



Şekil 3.63. Isel ZD30 açısal döndürme aparatı (Isel USA, 2022)

Bu açısal döndürme aparatı, bünyesindeki adım motoru ile 2,5 $arcmin$ pozisyon doğruluğu sağlayarak, bağlı olan modeli döndürebiliyor. Böylece, kanat modeli, tünelin test bölümünün içerisinde istenilen hücum açısında konumlandırılabilmektedir.

Test modellerine etkiyen serbest akış hızı ise, tünelin test bölümünde, Şekil 3.64'te verilen "Mano Air 500" mikromanometre ile ölçülmektedir.



Şekil 3.64. Mano Air 500 mikromanometre

Saniyede 2 ölçüm verisi elde eden bu mikromanometrenin sıcaklık ve nem probu ile akışkanın sıcaklık değerleri (T_∞) de ölçülebilmektedir. Cihazın ölçüm özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Mano Air 500 mikromanometrenin ölçüm özellikleri

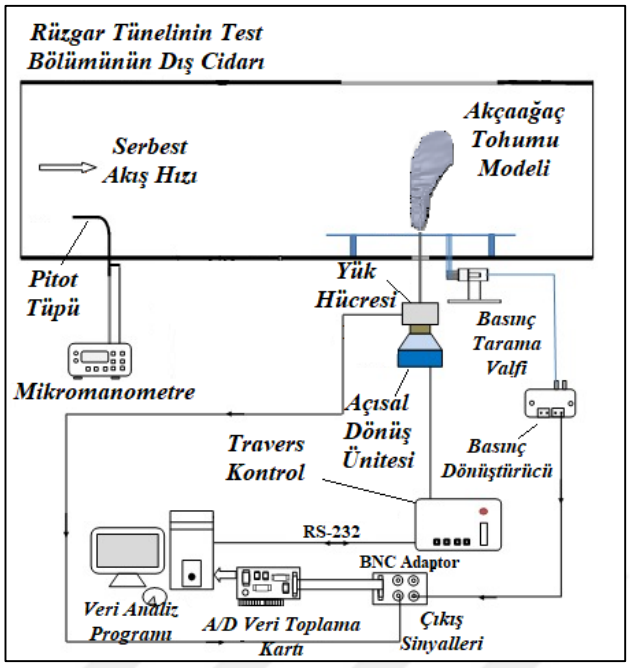
Mano Air 500	Ölçüm Aralığı	Çözünürlük	Doğruluk
Dinamik Basınç (P_{din})	+/- 2000 Pa	1,00 Pa	+/- 2,00 Pa
	+/- 200 Pa	0,10 Pa	+/- 0,50 Pa
Statik Basınç (P)	0…400 kPa	1 kPa	+/- 1kPa
Sıcaklık (T_∞)	-20…60 °C	0,1 °C	+/- 0,5 °C

Rüzgâr tünelinin fan ünitesinden frekansı değiştirilerek test bölümündeki havanın hızı, dolayısıyla dinamik basıncı da değiştirilebilir. Deneysel çalışmada istenilen serbest akış hızı için mikromanometre ile dinamik basınç ölçülerek, Eşitlik 3.36'daki gibi, hızı, cihaz otomatik olarak vermektedir. Böylece fan frekansı değiştirilerek serbest akış hızı ayarlanabilmektedir.

$$P_{din} = \frac{1}{2}\rho {V_\infty}^2 \tag{3.36}$$

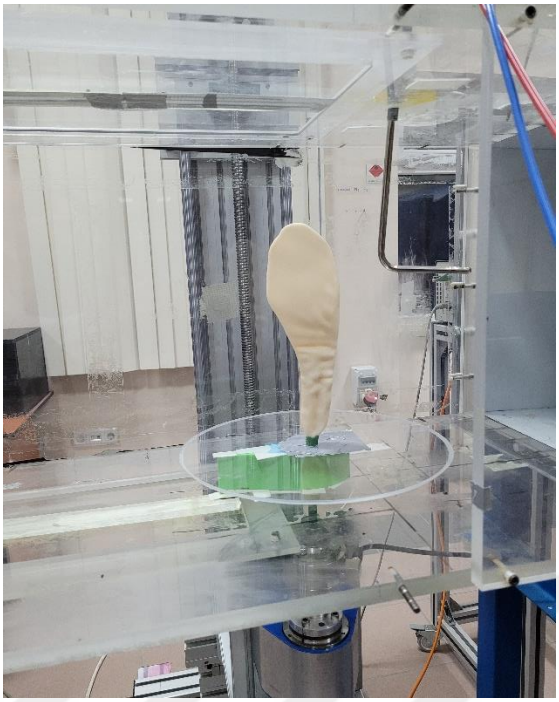
Farklı zamanlarda yapılan deneylerde ölçülen hava sıcaklıkları göz önüne alındığında, deneyler boyunca ortalama hava sıcaklığı $T_\infty = 20\ °C$ olmuştur. Bu sıcaklık değerine göre havanın yoğunluğu ise $\rho = 1{,}204\ kg/m^3$ olarak belirlenmiştir.

Aerodinamik performans ölçer sistem ve bu bahsedilen ölçüm cihazlarının, rüzgâr tüneline ve dolayısıyla test modeline olan bağlantıları Şekil 3.65'de şema üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.65. Aerodinamik performans ölçer sistem ve diğer ekipmanlar

Deney modelleri, tünelin test bölümü içerisinde yer alan; 30 cm çapında, 0,5 cm kalınlığında, dairesel bir plakanın üzerine, akışı bozmayacak olan ince kısmı 1 cm tünelin içerisinde kalacak ve aerodinamik performans ölçer sisteme bağlantısı rijit olacak şekilde konumlandırılmıştır. Şekil 3.66'da deney öncesinde pitot tüpüyle hız ölçümü yapılırken, sisteme bağlı bir akçaağaç tohumu modelinin örneği verilmiştir.



Şekil 3.66. Test bölümü içerisinde bir akçaağaç tohumu modelinin konumlandırılması

3.5.5. Deney verilerinin toplanması

Modellerin deneyleri yapılırken; elde edilen veri sinyallerinin işlenmesi ve toplanması önemli bir konudur. Yeterli sayıda veri sinyali ve doğru bir depolama, araştırılan performans özelliği hakkında daha iyi bilgi sahibi olmamızı sağlar. Bu çalışmada elde edilen veri sinyallerinin toplanması için; "National Instruments" markasının "PCI-6220" model veri toplama kartı (data acquisition card) kullanılmıştır. Bu karta ait teknik özellikler Çizelge 3.7'de verilmiştir.

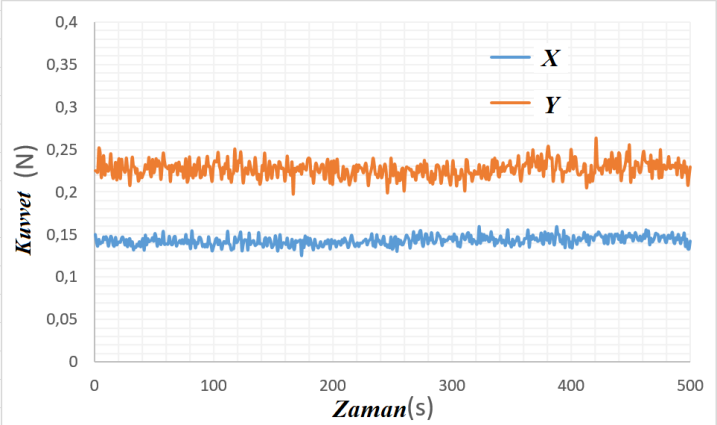
Çizelge 3.7. National Instruments PCI-6220 veri toplama kartı teknik özellikleri

Model	PCI-6220
Anolog Giriş Kanalları	16 tek uçlu veya 8 farklı
ADC hassasiyet	16 bits
Maximum Frekans	250 kHz

Şekil 3.65'deki şemadaki gösterildiği gibi veri toplama kartına gelen sinyaller, "ATI DAQ F/T" programı ile belli ayar ve konfigürasyonlarda toplanıyor. Bu program

vasıtasıyla; hangi hücum açısında kuvvetlerin nasıl hesap yapması gerektiği gibi bilgilerin girilebildiği gibi veri toplama süresi ve frekansı da ayarlanabilmektedir.

Bu çalışmada; deneyler sırasında veriler, 100 Hz frekansta elde edilmiştir. Deneysel çalışması yapılan modele ait "x" ve "y" yönündeki kuvvetlere (X, Y) ait elde edilen verilerin 100 Hz için değişimi Şekil 3.67'de örnek olarak verilmiştir.



Şekil 3.67. 100 Hz frekansta "x" ve "y" yönündeki verilerin elde edilmesi

Deneylerde her bir konfigürasyon için (bir hücum açısı ve bir hız değeriyle yapılan deney) veriler, 5 saniye boyunca toplanmıştır ve bu işlem yine her bir konfigürasyon için 2 defa tekrarlanmıştır. Dolayısıyla 100 Hz frekansta 5 saniye sonunda 500 veri elde edilmiştir. Deneylerin 2 defa tekrarlandığı düşünülürse, her bir konfigürasyon için toplamda "x" ve "y" yönünde ölçülen 1000 adet verinin ortalaması alınmıştır.

3.5.6. Hata (belirsizlik) analizi

Deneyler ve yapılan ölçümlerle tayin edilen sayısal değerler, belli bir hata (belirsizlik) içerirler. Ölçüm aletlerine bağlı olarak ölçülen değerler, belli bir doğruluğa ve hassasiyete sahip olurlar. Doğruluk (accuracy), ölçüm değerlerinin gerçek değere ne kadar yakın olduğunun ifadesidir. Hassasiyet (precision), belli bir fiziksel büyüklüğün tekrarlanan ölçümlerinin birbirine ne kadar yakın olduğunu veya ölçüm cihazının en küçük skala ölçeğini ifade eder. Bir cihazın ölçtüğü bir değerdeki hata veya belirsizlik, cihazın katalog değerinde belirtilen doğruluk değerine eşit veya daha büyüktür. Bu değer bilinmiyorsa

ölçme hatası kabaca, ölçüm cihazının en küçük skala ölçeğine göre alınabilir (Karagöz, 2017).

Ölçüm cihazlarından elde edilen değerler bir fonksiyonun içerisinde kullanılıp, bu ölçüm değerlerine bağlı yeni bir değer elde ediliyorsa bu fonksiyonun da toplam bir hatası söz konusu olacaktır. İçerisinde; Δk_i değerinde hatalara sahip, n tane bağıl değişken (k_i) bulunan f_n fonksiyonu için, $i = 1'den\ n'$ye kadar toplam hata (Δf_n); Karagöz (2017)'ün "Sayısal Analiz ve Mühendislik Uygulamaları" adlı kitabında Eşitlik 3.37'deki gibi verilmiştir.

$$\Delta f_n = \sqrt{\left(\frac{\partial f_n}{\partial k_1}\Delta k_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f_n}{\partial k_2}\Delta k_2\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial f_n}{\partial k_n}\Delta k_n\right)^2} \tag{3.37}$$

Tez çalışmasında; aerodinamik performans kriteri olarak alınan, Eşitlik 3.1 ve 3.2'de verilen kaldırma kuvveti katsayısı (C_L) ve sürükleme katsayısının (C_D), içerisinde bulunan terimlerin hatasından kaynaklı bir toplam fonksiyon hatası payı bulunmaktadır. Bu eşitliliklerin içinde bulunan; kaldırma kuvveti L'nin ΔL, sürükleme kuvveti D'nin ΔD, serbet akış hızı V_∞'nin ΔV_∞, planform alan S'nin ΔS kadar hatası olduğu düşünülürse, kaldırma ve sürükleme kuvveti katsayılarının hataları; ΔC_L ve ΔC_D sırasıyla Eşitlik 3.38 ve 3.39'a göre hesaplanabilir.

$$\Delta C_L = \sqrt{\left(\frac{\partial C_L}{\partial L}\Delta L\right)^2 + \left(\frac{\partial C_L}{\partial S}\Delta S\right)^2 + \left(\frac{\partial C_L}{\partial V_\infty}\Delta V_\infty\right)^2} \tag{3.38}$$

$$\Delta C_D = \sqrt{\left(\frac{\partial C_D}{\partial L}\Delta L\right)^2 + \left(\frac{\partial C_D}{\partial S}\Delta S\right)^2 + \left(\frac{\partial C_D}{\partial V_\infty}\Delta V_\infty\right)^2} \tag{3.39}$$

Bu eşitliklerdeki gerekli türevler alınırsa; ΔC_L ve ΔC_D sırasıyla Eşitlik 3.40 ve 3.41'den yola çıkılarak bulunabilir.

$$\Delta C_L = \sqrt{\left(\frac{1}{0{,}5\rho {V_\infty}^2 S}\Delta L\right)^2 + \left(\frac{-L}{0{,}5\rho {V_\infty}^2 S^2}\Delta S\right)^2 + \left(\frac{-2L}{0{,}5\rho {V_\infty}^3 S}\Delta V_\infty\right)^2} \quad (3.40)$$

$$\Delta C_D = \sqrt{\left(\frac{1}{0{,}5\rho {V_\infty}^2 S}\Delta D\right)^2 + \left(\frac{-D}{0{,}5\rho {V_\infty}^2 S^2}\Delta S\right)^2 + \left(\frac{-2D}{0{,}5\rho {V_\infty}^3 S}\Delta V_\infty\right)^2} \quad (3.41)$$

Burada; ΔS için, modelleri ürettiğimiz 3D yazıcının en yüksek hatası olan 0,05 mm değeri göz önüne alınarak, alan hesabından dolayı bu değerin karesi olan 0,025 mm alınmıştır (Çizelge 3.4).

Kaldırma ve sürükleme kuvvetlerinin hataları olan ΔL ve ΔD için, 100 Hz'de elde ettiğimiz verilerin standart sapmaları kullanılmıştır. Bunun için her konfigürasyonda elde edilen verilerin standart sapmalarının hesabı yapılması gerekmektedir. Bu standart sapmalar, verilerin aktarıldığı bir Excel dosyasında hesaplanmıştır.

Tünel içindeki dinamik basınç P_{din} mikromanometre ile ölçülüp Eşitlik 3.36 ile serbest akış hızına dönüştürüldüğünden, serbest akış hızının hatasının ΔV_∞, hesaplanması için ilk önce dinamik basınç hatasının ΔP_{din} bilinmesi gerekmektedir. Dinamik basınç hatası için ΔP_{din}, Çizelge 3.6'daki ölçümün toplam hatasını ifade eden, doğruluk payı değeri 2 Pa (0,002 kPa) alınmıştır. ΔV_∞ değeri için Eşitlik 3.36 ve 3.71 kullanılarak, Eşitlik 3.42 hesaplanmalıdır.

$$\Delta V_\infty = \frac{1}{\rho\sqrt{\frac{2P_{din}}{\rho}}} \quad (3.42)$$

Deneyler sırasında her hız değeri (V_∞) için dinamik basınçlar P_{din} kaydedilmiştir. Dolayısıyla Eşitlik 3.36'ya göre hesaplanan ΔV_∞ değerleri Çizelge 3.8'de verilmiştir. Bu değerler daha sonra her bir konfigürasyondaki deneyler için toplam ΔC_L ve ΔC_D değerleri için kullanılmıştır.

Çizelge 3.8. P_{din} değerlerine göre her hız için hesaplanan ΔV_∞ değerleri

$V_\infty\ (m/s)$	$P_{din}\ (kPa)$	$\Delta V_\infty\ (m/s)$
6	18,4	0,149
10	50,7	0,0897
12	74,3	0,074

3.6. Nümerik Çalışmalar

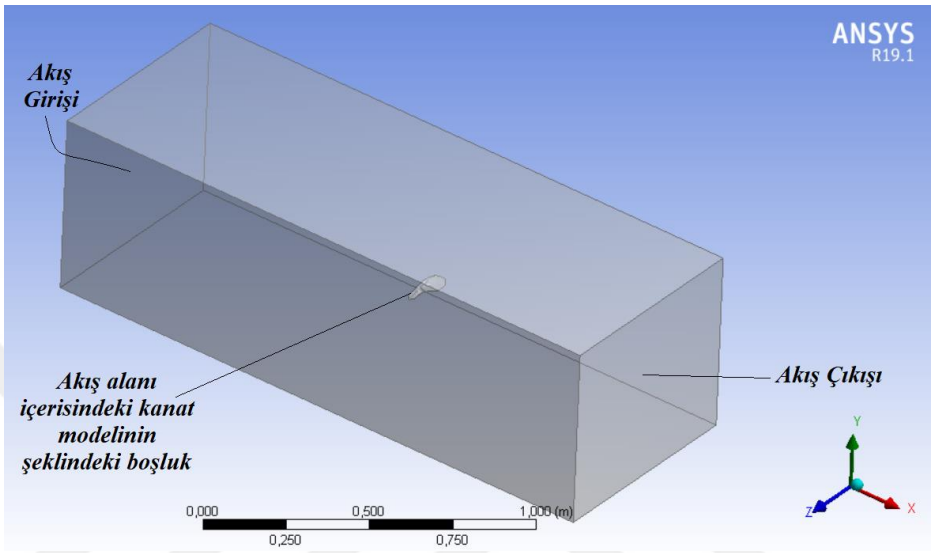
Nümerik analiz, girilen verilerden ve matematik modelden hareketle, hedeflenen sayısal parametrelerin hesaplanmasıdır. Bu hesaplama, analitik çözüm olarak yapılabildiği gibi sayısal yöntemler kullanılarak hazırlanmış bilgisayar programlarıyla da yapılabilmektedir. Bu gibi paket programlar ile çözüm çok daha kısa sürede gerçekleştirildiği için belli bir mühendislik probleminin bilgisayar ile analizi, analitik çözümden daha kısa sürecektir. Ayrıca nümerik yöntemler, bir problemin çözümünde deneysel veya teorik çözüm için iyi bir karşılaştırma verisidir. Nümerik sonuçlarla gerçek sonuçların tutarlı olması durumunda, nümerik çalışma ile zaman ve ekonomik olarak tasarruf etmek mümkündür (Karagöz, 2017).

Bu çalışmada; deneysel olarak da hesabı yapılan, tasarlanan kanat modellerinin aerodinamik performanslarını ifade eden C_L ve C_D değerleri, aynı konfigürasyonlarda nümerik analiz yöntemi ile de hesaplanmak istenmiştir. Olabildiğince deneysel ortamın simüle edilip çözümün doğruluğunun yüksek oranda sağlanması için, nümerik çalışma için yapılacak modelleme, nümerik çalışma için sonlu elemanlara ayırma, başlangıç ve sınır şartlarının girilmesi, türbülans modellerinin seçilmesi gibi süreçler önemlidir. Detayları açıklanacak tüm bu süreçleri içeren nümerik çalışma, "Ansys 19.1 Fluent" yazılımı ile bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışma için doğadan alınan tohumun 7,14 kat büyütüldüğünden bahsedilmişti. Nümerik çalışma için ise bu oran 4,57 olmuştur.

3.6.1. Geometri modelleme ve sonlu elemanlara ayırma

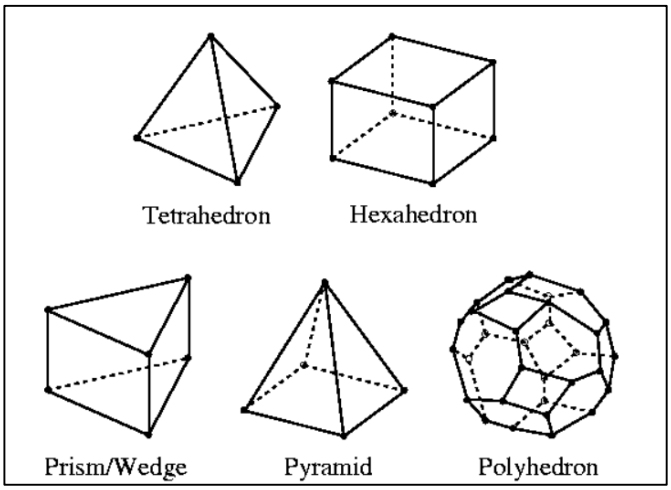
Nümerik çalışmada; 3 boyutlu bir analiz yapılacağından, deneysel çalışmada modelin bulunduğu rüzgâr tünelinin test alanı, Şekil 3.68'de gösterildiği gibi akış alanı olarak modellenmiştir.



Şekil 3.68. Modellenen akış alanı

Bu modellenen akış alanı, Ansys Fluent'in önerdiği gibi (Ansys Inc, 2013), giriş ve cidarlara en az 10 veter $(10c)$ uzunlukta, çıkışa ise en az 20 veter $(20c)$ uzunluktadır.

Akış alanı, programın uygun bir çözüm yöntemi ile istenilen parametreleri çözebilmesi için, sonlu elemanlara ayrılmıştır. Bu işlem için akış alanında, ağ yapısı (mesh) oluşturmak gereklidir. Ansys Fluentte, 3D analizler için oluşturulabilecek ağ yapısı çeşitleri Şekil 3.69'da verilmiştir.



Şekil 3.69. Ansys programındaki 3D ağ yapısı tipleri

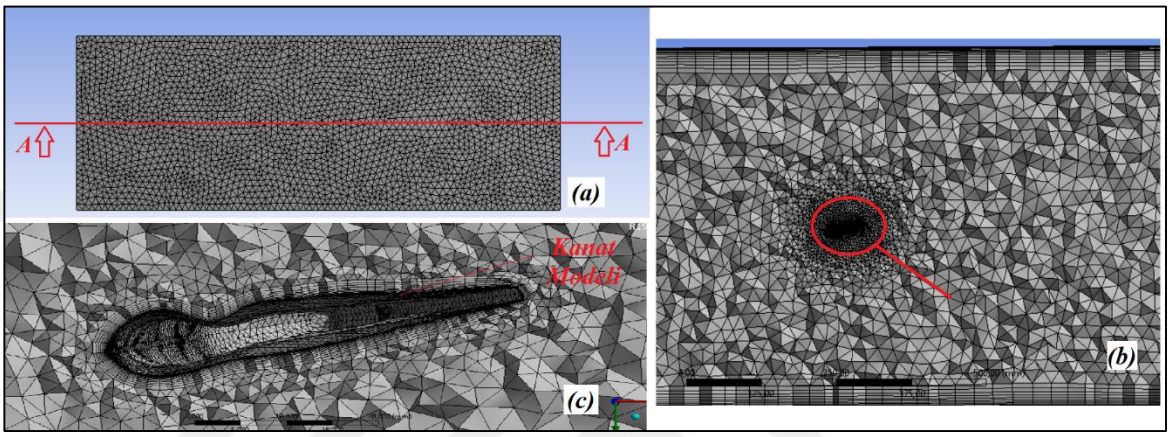
Nümerik çalışmada, akış alanındaki modelin şeklinin en iyi şekilde verilebilmesi için tetrahedron ağ yapısı kullanılmıştır. Akış alanının kaç tane tetrahedron ağ yapısı elemanı ile bölüneceğinin bulunması için ise bir "ağdan bağımsızlık" (independence of mesh) çalışması yapılmıştır. Ağdan bağımsızlık çalışması, en düşük sayıda ağ ile oluşturulan akış alanının doğru parametreleri verecek şekilde çözüme tabi tutulmasını sağlamaktadır. Oluşturulan ağ yapısının içerdiği eleman sayısı, çözüm yapılan süreyi ve çözümün yapıldığı bilgisayarın işlemcisini etkilediği için bu sayı olabildiğince küçük tutulmalıdır. Bu yüzden ağdan bağımsızlık çalışması için belli sayıda oluşturulan eleman sayısı ve bu eleman sayıları ile yapılan analizlerden elde edilen aerodinamik parametreler (C_L, $C_D, C_L/C_D$), rastgele seçilen bir konfigürasyon için (α: 10°, V_∞: 10 m/s) Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Ağdan bağımsızlık çalışması

α: 10°, V_∞: 10 m/s				
Ağ Yapısı	Eleman Sayısı	C_L	C_D	C_L/C_D
Kaba	850000	0,36	0,2	1,8
Orta	*1400000*	*0,342*	*0,198*	*1,727273*
Sık	2400000	0,345	0,2	1,725
Çok Sık	5500000	0,345	0,2	1,725

Ağdan bağımsızlık çalışmasından görüldüğü üzere 1400000 ve 2400000 eleman sayısı ile oluşturulan ağ yapısının oluşturduğu akış alanı için elde edilen değerler arasında çok fark olmadığından dolayı, çalışma için uygun eleman sayısı 1400000 seçilmiştir.

Belirlenen eleman sayısı ile oluşturulan ağ yapısı, Şekil 3.70'de detayları ile birlikte verilmiştir.



Şekil 3.70. Oluşturulan ağ yapısının genel *(a)*, Kesit A-A'ya göre *(b)* ve kanat modeline yakınlaştırılmış *(c)* görünümü

Şekil 3.70/c'de de görüldüğü üzere; kanat modelinin yakınlarındaki ağ yapısı, modelin yüzey topografyasının en iyi şekilde verilebilmesi için, modele doğru iyice sıklaşmaktadır. Nümerik çalışma için oluşturulan bu ağ yapısının temel özellikleri ise Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10. Nümerik çalışma için oluşturulan ağ yapısının temel özellikleri

Ağ Yapısının Bazı Temel özellikler			
Eleman Boyutu	25 mm (Kaba gövde)	5 mm (Etki gövdesi)	1 mm (Model yüzeyi)
Model etrafında ağ yapısının genişlemesi (Inflation)	Katman: 12	Büyüme oranı: 1,2	Maximum kalınlık: 2 mm
Elemanlardaki çarpıklık	Max: 0,84886	Ortalama: 0,22251	
İstatistik Sayıları	Eleman: 1376597	Bağlantı Noktası: 415969	

3.6.2. Akışın modellenmesi

Bir kanat üzerinden akışta, 3D akış modellemesi ile kanadın bazı aerodinamik parametrelerinin analiz edilmesi mümkündür. Bu parametrelerin, Ansys Fluent'te doğru bir şekilde ölçülebilmesi için seçilecek olan türbülans modeli ve nümerik şemalar, hem literatürdeki çalışmalardan hem de programın akış modeline göre önerilerinden belirlenebilir.

Türbülans Modeli

Ansys Fluent programının kullandığı türbülans modellerinin teorik bir arka planı mevcuttur. Bu modeller, Navier Stokes denklemlerinin Reynolds ayrışımına dayalı olan, Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) denklemlerini kullanmaktadır. Bu denklemlerde, türbülanslı akış, ortalama bir değer etrafında rastgele bir varyasyon olarak tanımlanır.

RANS için, anlık Navier-Stokes denklemlerindeki çözüm değişkenleri, ortalama ve dalgalanan bileşen olmak üzere ayrıştırılır. Örnek olarak: hız bileşenleri için: $u_i = \bar{u}_i + \acute{u}_i$ ile belirtilen ifadede; $\bar{u}_i$ ortalama hızı, $\acute{u}_i$ dalgalanan hızı belirtir ve her bileşen için bu ifade oluşturulursa, RANS denklemi Kartezyen tensör formunda Eşitlik 3.43 ve 3.44'teki gibi ifade edilebilir (Ansys Inc, 2013). Bu denklemlerdeki i, j x ve y yönündeki parametreleri, μ ise dinamik viskoziteyi ifade etmektedir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{3.43}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_i u_j\right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\overline{\acute{u}_i\acute{u}_j}\right) \tag{3.44}$$

RANS denklemleri temel alınarak, Ansys Fluent'in içerisinde yer alan bazı türbülans modellerinin özellikleri ve kullanım alanları şu şekilde verilmiştir (Ansys Inc, 2013):

- Spalart Almaras Modeli: 1 denklemli bir RANS modelidir. Büyük ağ yapıları için ekonomik olan bu model, turbomakineler ve özellikle kanat üzerinden akışlardaki aerodinamik uygulamalarda kullanılır. Ancak 3D analizler için düşük performans gösterir.
- $k-\epsilon$ Modeli: 2 denklemli bu modelin üç çeşidi mevcuttur. Standart $k-\epsilon$ Modeli güçlü ayrılma, büyük akış çizgileri eğrileri, yüksek basınç gradayanı içeren akışlar için uygundur. Parametrik çalışmalar için önerilen model, endüstriyel uygulamalar için en yaygın kullanılan modellerden birisidir. Realizable $k-\epsilon$ modeli aksimetrik jetler ile akışta iyi performasn sağlarken, $k-\epsilon$ modelleri arasında daha kolay yakınsama sağlar. RNG $k-\epsilon$ modeli, daha karmaşık kayma gerilmeli akışlarda, yüksek gerilme oranlarında, yüksek girdap ve ayırmada standart modele göre daha iyi performans gösterir.
- $k-w$ Modeli: 2 denklemli bir RANS modeli olan bu türbülans modeli, basınç gradyanı ile geniş bir sınır tabaka akışı için, genellikle düşük Re sayılı akışlarda, genellikle turbomakine ve havacılık alanlarında kullanılır. İki çeşidi bulunan modelin; standart $k-w$ olanı karmaşık, dış akışlar için daha üstünken, SST $k-w$ modeli cidarla sınırlandırılmış akışlar için daha uygun olmaktadır.
- Reynolds Gerilme Modeli (RSM): RANS denklemiyle birleştirilmiş altı bağımsız denklem sistemi içeren bu model, daha fazla modellemeye ihtiyaç duyar ve yakınsaması daha zordur. Güçlü akış çizgisi eğrileri, girdap ve rotasyon içeren karmaşık 3D akışlar için uygundur.
- Large Eddy Simulation (LES): Bu modelde; türbülanslı akışlar, çok çeşitli uzunluk ve zaman ölçeklerine sahip girdaplarla karakterize edilir. En büyük girdaplar tipik olarak boyut olarak ortalama akışın karakteristik uzunluğuyla karşılaştırılabilir. Türbülans kinetik enerjisinin dağılmasından en küçük ölçekler sorumludur. LES'de büyük girdaplar doğrudan çözümlenirken küçük girdaplar modellenir. Bu nedenle büyük girdap simülasyonu (LES), çözümlenen ölçeklerin oranı açısından DNS ve RANS arasında yer alır. LES ile ilgili hesaplama maliyeti, bellek (RAM) ve çözüm zamanı açısından sabit RANS hesaplamalarına göre çok daha yüksektir.

– Detached Eddy Simulation (DES): DES yaklaşımında, sınır tabakasında kararsız RANS modelleri kullanılırken, ayrılan bölgelere LES işlemi uygulanmaktadır. LES bölgesi normalde, büyük kararsız türbülans ölçeklerinin baskın bir rol oynadığı çekirdek türbülanslı bölge ile ilişkilidir. Genellikle hibrit LES/RANS modelleri olarak adlandırılan DES modelleri, yüksek Re harici aerodinamik simülasyonları gibi uygulamalar için RANS modellemesini LES ile birleştirir. DES modellerini kullanırken hesaplama maliyetleri, LES hesaplama maliyetlerinden daha düşük, ancak RANS'tan daha yüksektir.

Yapılan çalışmalarda ortaya konulan performanslara bakıldığında, sınırlandırılmış alan içerisinde, sınır tabaka akışlarında deneysel verilerle uyumu daha yüksek olan (Menter, 1993) türbülans modeli olan SST $k-w$ modeli bu çalışma için kullanılacak türbülans modeli olarak seçilmiştir.

Menter (2009) tarafından geliştirilen SST $k-w$ modeli, Eşitlik 3.45 ve 3.46'daki türetilen denklemleri kullanmaktadır.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right)+G_k-Y_k+S_k \tag{3.45}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho k u_j\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_w \frac{\partial w}{\partial x_j}\right)+G_w-Y_w+D_w+S_w \tag{3.46}$$

Bu denklemlerde; G_k türbülans kinetik enerjisi üretimini, G_w w üretimini, Γ_k ve Γ_w ise k ve w'nın etkili difüzyon gücünü temsil ediyor. Y_k ve Y_w terimleri, türbülanstan dolayı k ve w'nın yayılmasını, D_w çapraz difüzyonu, S_k ve S_w ise kullanıcı tarafından belirlenen kaynak terimleridir (Ansys Inc, 2013).

Nümerik Şema

Nümerik analizin çözüm metotlarında kullanılan bazı çözüm şemaları mevcuttur. Bu şemaları program üzerinden seçerken, çözüm denklemindeki parametrelerin nasıl hesaplanacağı ile ilgili seçimler yapılabilmektedir.

"Birinci Mertebe Upwind" şeması hesaplanan herhangi bir parametrenin ortalama değerini, ağ elemanının merkezindeki değer olarak alıp, bu elemanın diğer noktalarında da bu değeri kullanırken, "İkinci Mertebe Upwind" şemasında, noktalardaki değerler Taylor serisinin eleman merkezi civarında yüksek mertebeden açılarak çözülmesiyle elde edilir. Böylece; ikinci mertebe şemada daha fazla hassasiyet elde edilir ve bu şema karmaşık ve yüksek hassasiyet istenen çalışmalar için uygundur.

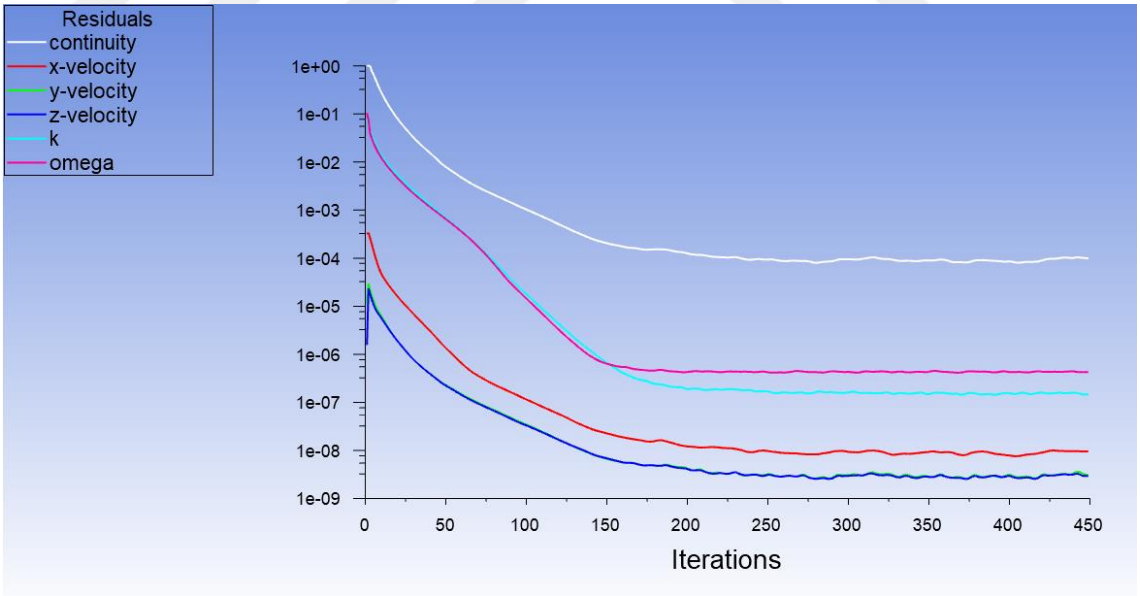
Çözüm metodu için şema seçiminde karşımıza şu seçenekler çıkmaktadır (Ansys Inc, 2013):

- SIMPLE ve SIMPLEC: SIMPLE şeması, sürekli rejimde süreklilik denklemini kullanarak hız ve basınç ilişkisi ile basınç alanının hesaplanması mantığını benimser. SIMPLEC ise aynı mantığı kullanır ama daha çabuk yakınsama sağlamak için basınç düzeltme katsayısını daha yüksek alır (1). Ancak bu bazen ağ yapısındaki yüksek çarpıklık değeri ile birlikte istikrarsızlık sağlayabilir.
- PISO: Yüksek zaman adımlı geçici rejimlerde kullanılması önerilir. Ancak ağ yapısındaki çarpıklık değeri yüksek olursa, uygun bir çarpıklık düzeltme katsayısı ile sürekli rejimde de kullanılması fayda sağlayabilir.
- Coupled: Basınca dayalı birleştirilmiş bir algoritma kullanır. Bu algoritma ile sürekli rejim akışlarında daha güçlü ve verimli bir tek fazlı uygulama elde eder. SIMPLE ve SIMPLEC gibi ayrıştırılmış algoritmalar, momentum ve basınç denklemlerini ayrı ayrı çözerken, Coupled birlikte çözer ve bu yüzden yavaş bir yakınsama sergiler. Kötü kalitedeki çarpık meshlerde veya yüksek zaman adımlı geçici rejimde kullanılması önerilir.

Tez çalışmasındaki nümerik çalışmada yüksek hassasiyet oluşturması için "İkinci Mertebe Upwind" ile sürekli rejimde basınç alanlarının hız ile bağlantılı hesabı için "SIMPLE" şeması seçilmiştir. Ancak bazı konfigürasyonlarda bir sonraki kısımda bahsedilecek yakınsama kriterlerini sağlaması açısından "Coupled" şeması "SIMPLE" şeması yerine kullanılmıştır.

3.6.3. Nümerik sonuçların elde edilmesi

Önceki kısımlarda verilen çözüm ayarlarında yapılan nümerik analizler için sonuçların doğru bir şekilde elde edilmesi yakınsama kriterine bağlıdır. Bir analizde devam eden iterasyon çözümlerinin, her parametrenin birbirini takip eden iki iterasyon arasındaki farkının oluşturduğu yakınsama değeri, analizin hassasiyetini ifade eder. Bu çalışmada yakınsama parametreleri: SST $k-w$ modelinden gelen k ve w değerleri, süreklilik ve x, y ve z yönündeki hız parametrelerdir. Şekil 3.71'de bir konfigürasyona ait çözümden verilen yakınsama eğrilerinden de görülebileceği gibi, nümerik analizlerde yakınsama kriteri olarak 10^{-4} alınmıştır.



Şekil 3.71. Örnek bir konfigürasyon çözümünden yakınsama eğrileri

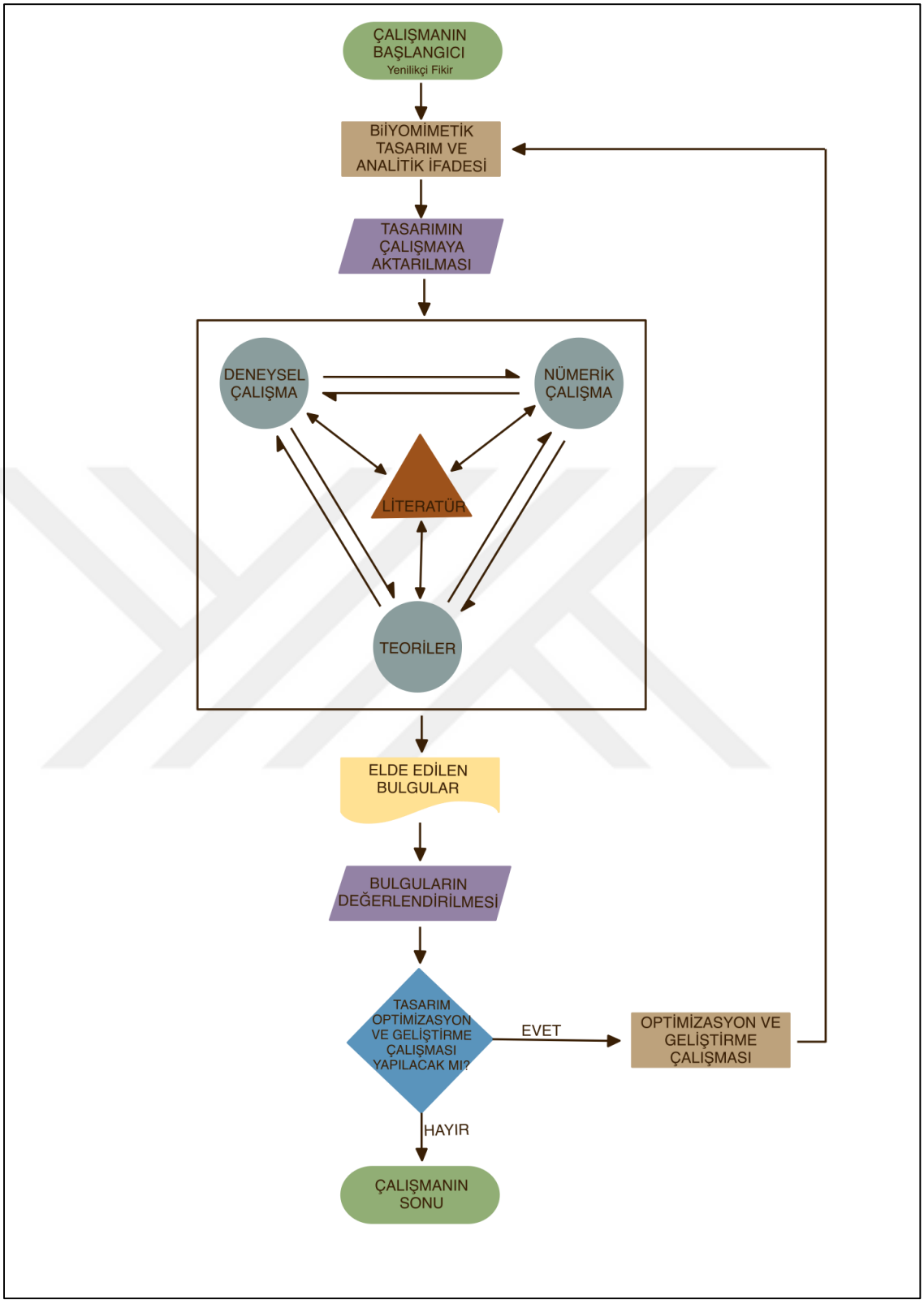
Nümerik çalışmalardan elde edilen C_L ve C_D değerlerinin yanı sıra, her bir modele ait ilgili konfigürasyonda yapılan çözümlerden, akış alanındaki havanın model üzerindeki

hareketleri de nicel ve nitel olarak elde edilebilmiştir. Bölüm 4'te her bir çözüm için irdelenecek olan bu akış görselleri, özellikle çalışmanın içerisinde yer alacak olan geliştirme ve optimizasyon çalışması için faydalı olacaktır. Bu görsellerden elde edilecek akış davranışları, kanat modellerinin üzerinden akan havanın oluşturduğu etkilerin ardında yatan temeller konusunda fikir sahibi olmamızı sağlarken, iyi bir karşılaştırma aracı olarak kullanmamızı da sağlayacaktır.

3.7. Tez Şeması

Çalışmanın çıkış fikrinden itibaren yapılan, araştırmalar, biyomimetik tasarım, Bölüm 2'de verilen literatür taraması ve Bölüm 3'te verilen, çalışmanın temellerini oluşturan teoriler ve materyal ve yöntemlerle ve Bölüm 4'te verilecek, içerisinde optimizasyon ve geliştirme çalışmasının da bulunacağı bulgular ve tartışma tez çalışmasını oluşturmaktadır.

Bu kısımda tez çalışmasını oluşturan tüm bu süreçler daha anlaşılabilir olabilmesi için Şekil 3.72'de verilen bir çalışma algoritması ile ifade edilmeye çalışılmıştır. Bu algoritmada görüldüğü üzere; teori ve literatür göz önüne alınarak yapılan deneysel ve nümerik çalışmanın sonucunda elde edilen bulguların değerlendirilmesi ile akçaağaç tohumundan elde edilen biyomimetik tasarım, bir performans geliştirme çalışmasına tabi tutulabilecektir. Burada uygulanacak geliştirme çalışması tasarımın geometrisi üzerinde yapılacak değişikliklerle gerçekleştirilecek olup, tasarım yenileceği için geliştirme çalışmasından sonra algoritmada tasarım kısmına geri dönülmüş olacaktır. Akçaağaçtan elde edilen ilk tasarım modeli olan M0 modeli ile çalışmaya başlanacağından geliştirme çalışmalarının ardından bu model isimleri uygun şekilde tekrar verilip, sonuçlar bu model isimleriyle beraber sunulacaktır. Böylece; bu kısımda verilen tez çalışması algoritmasının yol göstermesi ile her tasarım modelinin değerlendirilmesi ve karşılaştırılması sağlıklı bir şekilde yapılmış olması planlanmaktadır.



Şekil 3.72. Tez çalışması algoritması

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Giriş

Bu bölümde; akçaağaç tohumundan oluşturulan ilk biyomimetik kanat olan "M0" modelinin deneysel ve nümerik aerodinamik performansı, nicel ve nitel olarak sunulacaktır. M0 modelinde; aerodinamik performans kriteri olarak adlandıracağımız, kaldırma kuvveti katsayısının sürükleme kuvveti katsayısına oranının (C_L/C_D), en yüksek seviyede olmasını sağlayan geometrik etkiler incelenecektir. Bu etkilerin kanat modeli üzerinde daha fazla rol oynayıp, aerodinamik performansı daha fazla artırması adına, M0 modelini temsil eden eğriler vasıtasıyla yapılacak olan geometrik değişiklerle, kanat performansı geliştirme çalışması yapılacaktır. İki adımda yapılacak olan bu geliştirme çalışmaların sonucunda elde edilen diğer biyomimetik kanat modellerinin de (M5, M5C) aerodinamik performansı yine bu bölümde sunulacaktır.

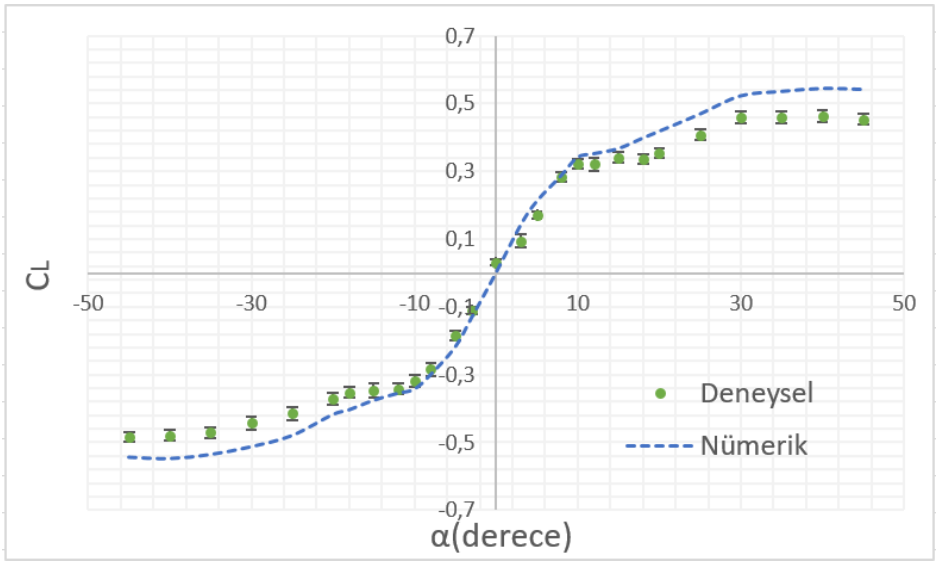
4.2. M0 Modelinin Bulguları

4.2.1. M0 Modelinin aerodinamik performansı

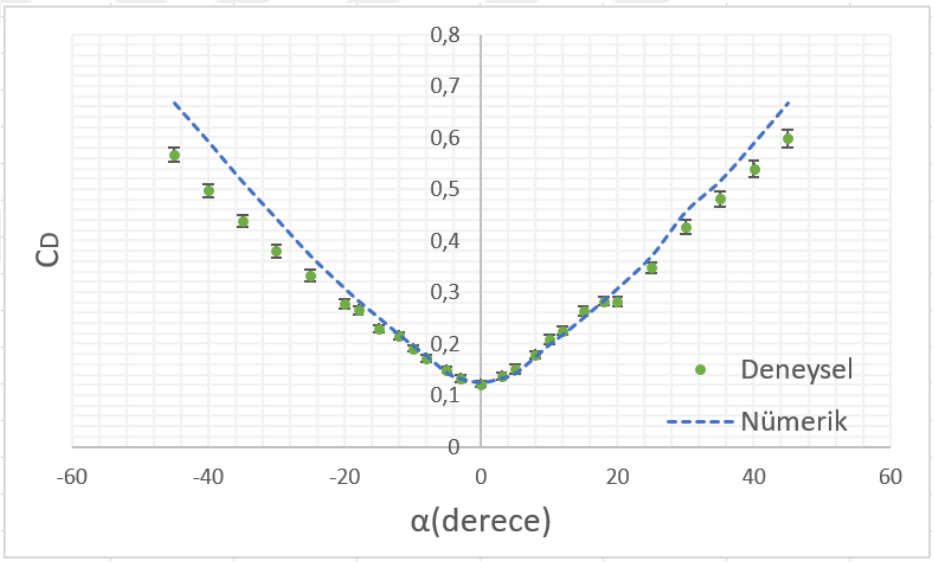
Çalışmanın esinlenme kaynağı olan akçaağaç tohumunun geometrisini en iyi yansıtan, ilk tasarım olan M0 modelinin aerodinamik performansı, geleneksel bir kanada uygulanan performans ölçüm işlemleriyle aynı şekilde ölçülmüştür.

Yapılan deneysel çalımada; serbest akış hızları olan 6, 10 ve 12 m/s değerlerine karşılık yaklaşık Re değerleri sırasıyla: 22000, 36000 ve 43500 olmuştur.

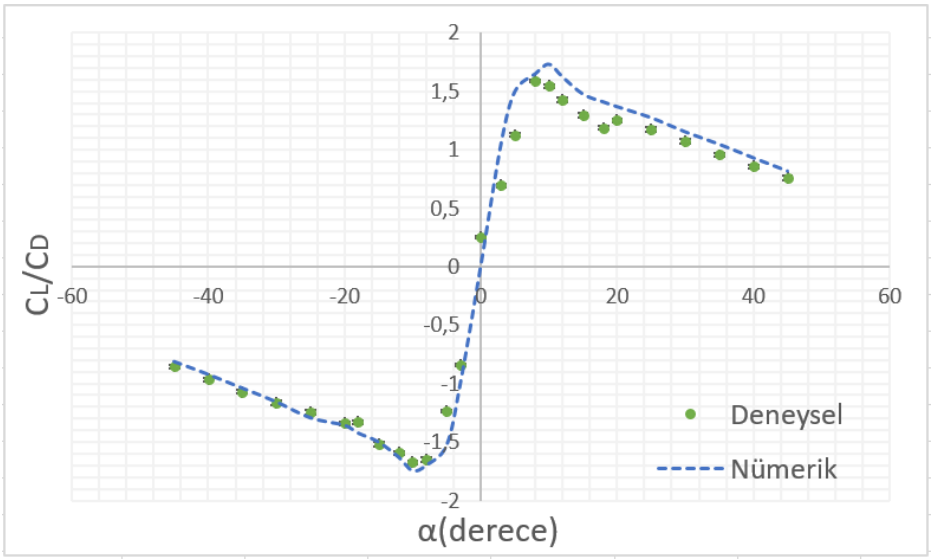
M0 modelinin 10 m/s serbest akış hızında, hücum açısının değişimine göre, C_L değişimi Şekil 4.1'de, C_D değişimi Şekil 4.2'de, C_L/C_D değişimi Şekil 4.3'te verilmiştir. Bu grafiklerdeki deneysel verilerdeki hata çubukları, Bölüm 3.5.6'da detayları verilen "hata (belirsizlik) analizi" kullanılarak hesaplanmıştır. C_L/C_D değişimini veren grafik için hesaplanan hatada, ΔC_L ve ΔC_D arasında yüksek olan hata değeri kullanılmıştır.



Şekil 4.1. M0 modelinin, 10 m/s'de, $\boldsymbol{\alpha}$'ya göre $\boldsymbol{C_L}$ değişimi



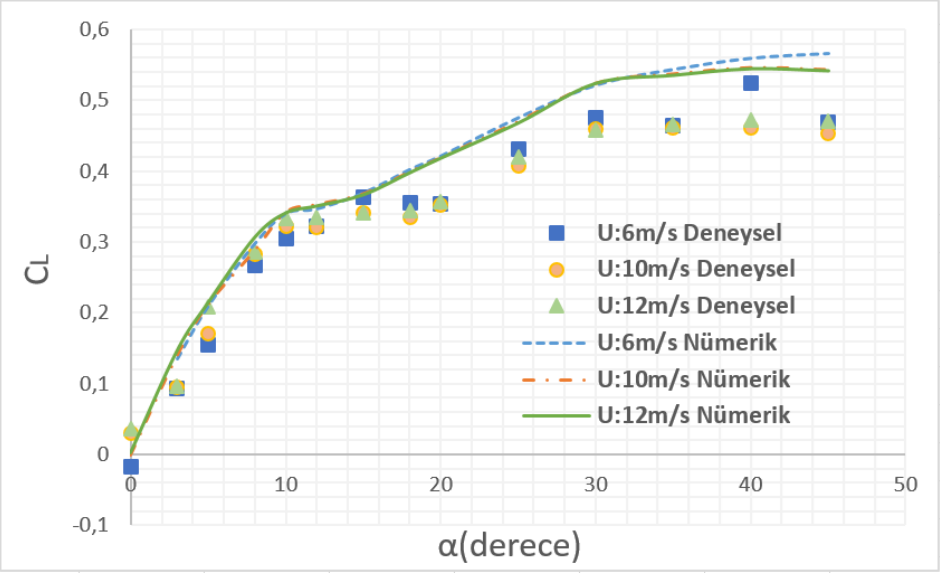
Şekil 4.2. M0 modelinin, 10 m/s'de, $\boldsymbol{\alpha}$'ya göre $\boldsymbol{C_D}$ değişimi



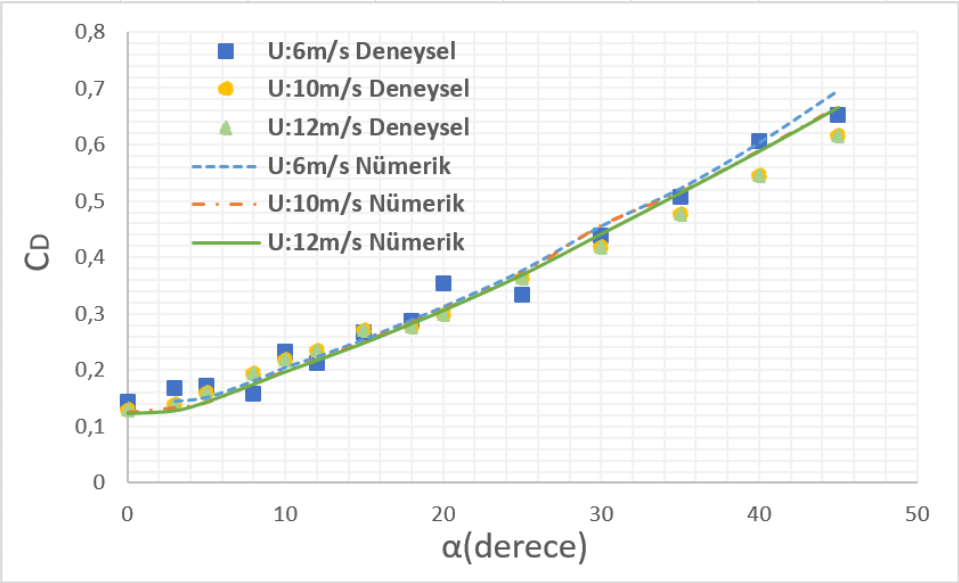
Şekil 4.3. M0 modelinin, 10 m/s'de, $\boldsymbol{\alpha}$'ya göre $\boldsymbol{C_L/C_D}$ değişimi

Bu şekillere bakıldığında negatif ve pozitif hücum açılarına göre değişimlerin, hem nümerik hem de deneysel verilerde simetrik olduğu görülmektedir. Bunların yanında, deneysel ve nümerik sonuçların birbiriyle uyumu da grafikler de görülmektedir.

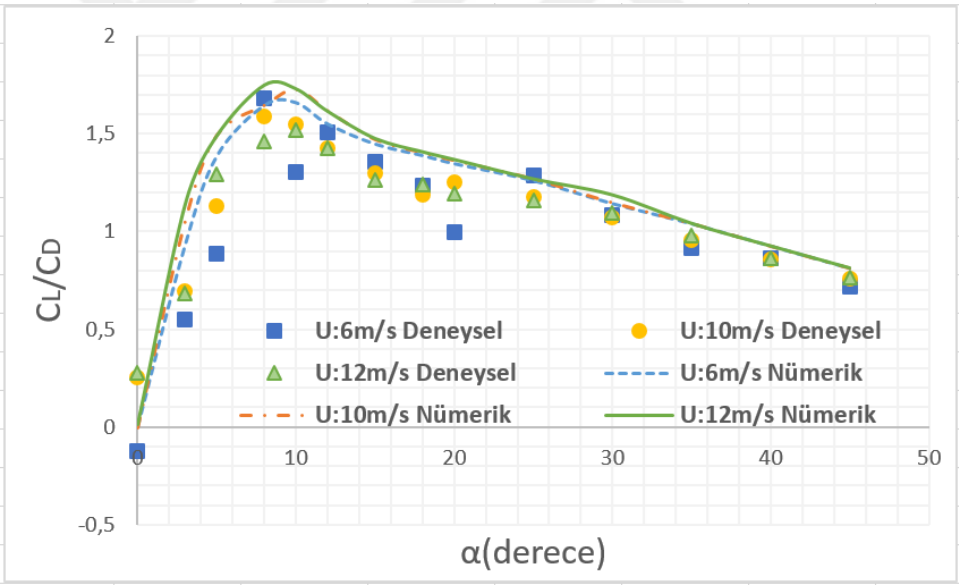
Çalışmada kullanılan her bir serbest akış hızındaki, pozitif hücum açılarına bağlı kaldırma kuvveti katsayısı değişimi Şekil 4.4'te, sürükleme kuvveti katsayısı değişimi Şekil 4.5'te, bu iki katsayının birbirine oranı ise Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.4. M0 modelinin, farklı serbest akış hızlarında, $\boldsymbol{\alpha}$'ya göre $\boldsymbol{C_L}$ değişimi



Şekil 4.5. M0 modelinin, farklı serbest akış hızlarında, $\boldsymbol{\alpha}$'ya göre $\boldsymbol{C_D}$ değişimi

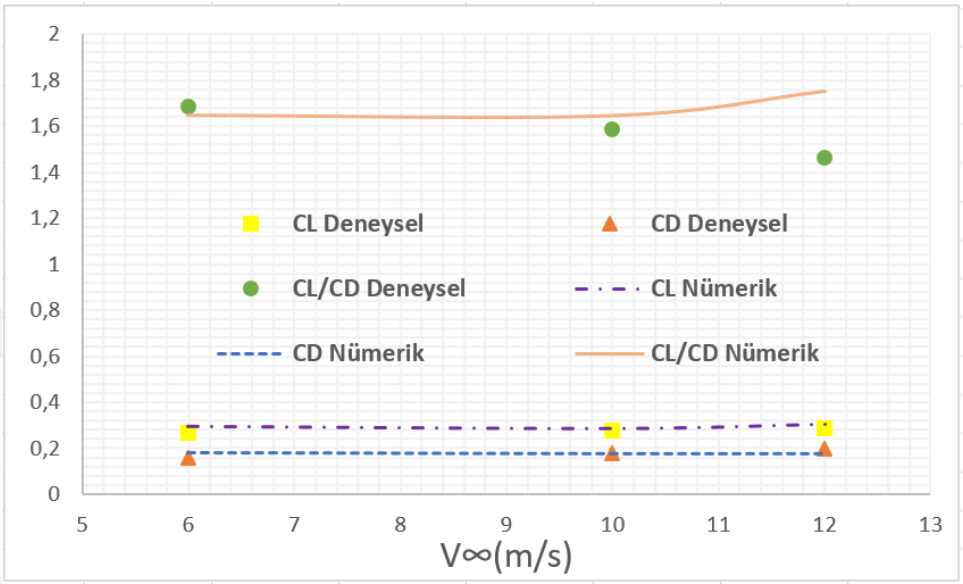


Şekil 4.6. M0 modelinin, farklı serbest akış hızlarında, $\boldsymbol{\alpha}$'ya göre $\boldsymbol{C_L/C_D}$ değişimi

Şekil 4.3'e bakıldığında; hücum açısı artarken kaldırma kuvvetinin düşmeye başladığı açı olan stol açısı, genellikle 40°- 45° arasında belirlenebilmektedir. Hsu ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada, benzer şekilde, akçaağaç tohumu modelinin 45° hücum açısına kadar kaldırma kuvvetinin artmaya devam ettiğini raporlamışlardır.

Aerodinamik performans kriteri olarak, C_L/C_D oranı, tüm hızlarda α:8° hücum açısında görülmektedir.

Hız değişimine bağlı olarak, M0 modelinin, 8° hücum açısında aerodinamik performanslarındaki değişim ise Şekil 4.7'de verilmiştir.

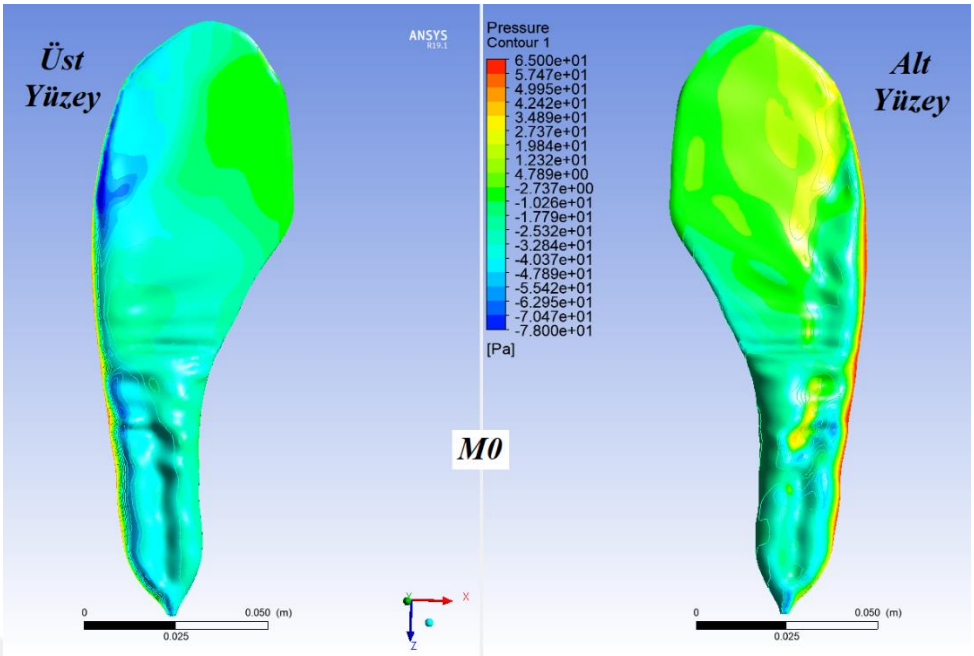


Şekil 4.7. M0 modelinin, 8° hücum açısında, hız değişimine bağlı olarak aerodinamik performanslarındaki değişim

Şekil 4.7'de ise, aerodinamik performans parametrelerinin hız değişimine bağlı olarak çok değişmediği dikkat çekmektedir.

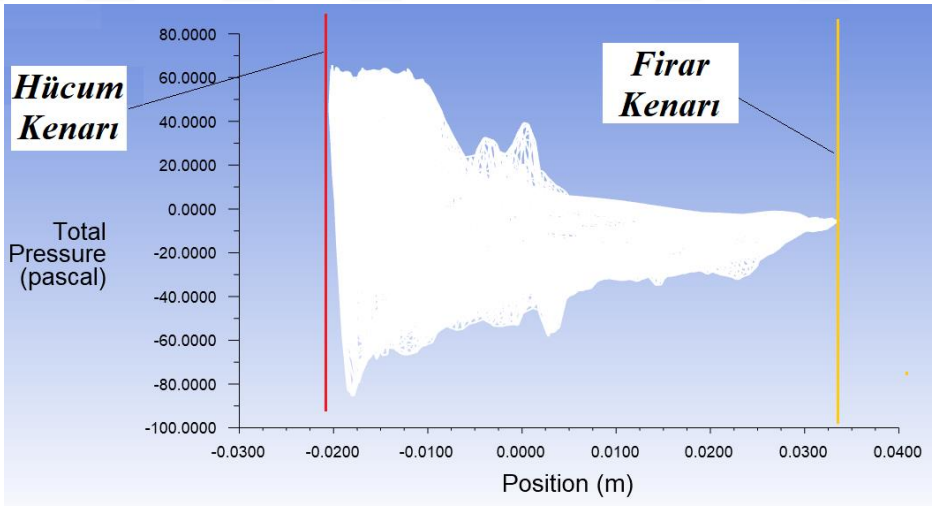
4.2.2. M0 Modelinin nümerik akış görselleri

M0 modelinin, nümerik çalışmasından elde edilen alt ve üst yüzeylerine ait basınç konturları, maximum C_L/C_D oranını veren 8° hücum açısı ve ortalama hız olan 10 m/s serbest hava hızı için Şekil 4.8'de sunulmuştur. Bu konturlarda sarı ve kırmızı renklerin olduğu yerler yüksek, mavi alanlar düşük basınç bölgelerini temsil etmekte ve kontur aralığı -78 ile 65 Pa arasında sabitlenmiş durumdadır.



Şekil 4.8. M0 modelinin, $\boldsymbol{\alpha}$:8° ve $\boldsymbol{V_\infty}$:10 $\boldsymbol{m/s}$'deki basınç konturları

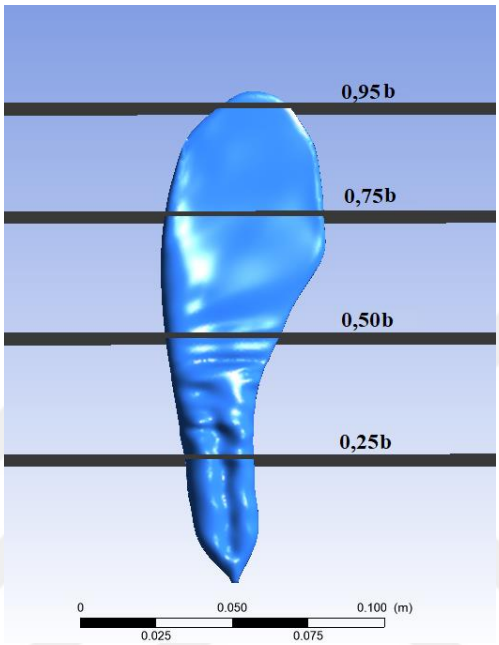
Yine aynı şartlarda Şekil 4.8'deki konturları oluşturan, hücum kenarından firar kenarına kadar basınç dağılımı da Şekil 4.9'da verilmiştir.



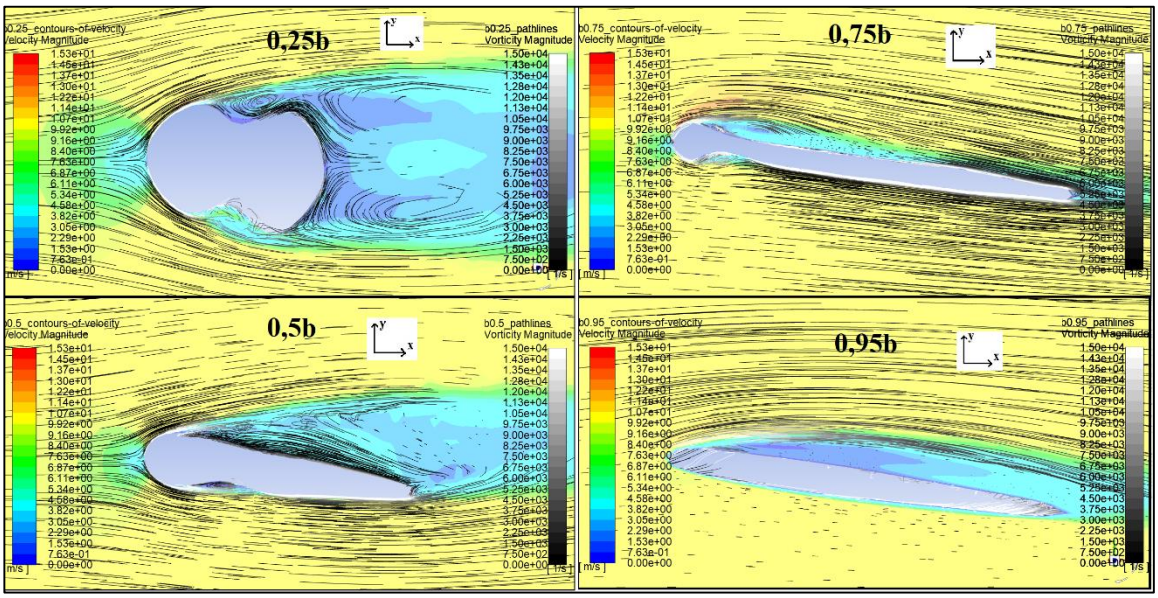
Şekil 4.9. M0 modelinin, $\boldsymbol{\alpha}$:8° ve $\boldsymbol{V_\infty}$:10 $\boldsymbol{m/s}$'deki hücum kenarından firar kenarına kadar olan basınç dağılımı

Şekil 4.8 ve 4.9'da; kaldırma kuvvetini oluşturan basınç farkı bölgelerinin biyomimetik model üzerinde, hücum kenarında yüksek olmak kaydıyla sırasıyla tepe çukur yapıları üzerinde oluştuğu görülmüştür. Bu basınç farkını oluşturan akışı, modelin farklı

bölgelerinde incelemek üzere; modelin Şekil 4.10'da gösterildiği gibi kanat uzunluğu (b) doğrultusunda dört farklı yerinden kesiti alınmıştır. Bu kesitlerde; akış çizgileri, girdap eğilimi (vortex) değerleriyle ($1/s$) ve hız konturları, 10 m/s serbest akış hızı ve 8° hücum açısı için Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.10. Kanat uzunluğu boyunca alınan dört kesit



Şekil 4.11. M0 modelinin, $\boldsymbol{\alpha}$:8° ve $\boldsymbol{V_\infty}$:10 $\boldsymbol{m/s}$'deki belli kesitlerindeki hız konturları ve girdap eğilimi değerleriyle akış çizgileri

Kesit görüntülerindeki akışa bakıldığında; modelin tohum kısımlarında yoğun olmak üzere, birbirini takip eden tepe çukur yapılarının, çukur kısmında küçük girdapların oluştuğu dikkat çekmektedir. Ayrıca hücum kenarı kısmında basınç farkını oluşturan LEV yapısı da, Lentink ve ark. (2009), akçaağaç tohumu gibi tohumlarla yaptıkları çalışmada gördükleri kaldırma kuvvetini artıran oluşumdur.

4.2.3. M0 Modelinin değerlendirmesi

Akçaağaç tohumundan esinlenilerek oluşturulan M0 modelinin sunulan aerodinamik performanslarına bakıldığında; literatürde sunulan çalışmalarla benzer özelliklerin (LEV yapısı, geç stol), bu modelde de görüldüğü tespit edilmiştir.

M0 modelinde kaldırma kuvvetinden sorumlu olduğu düşünülen LEV yapısı, model üzerinde belli kısımlarda, girdaplarla görülmektedir. Biyomimetik tasarım oluşturulurken, yüzey topografyası, belirlenen Fourier serisi denklemleriyle ifade edildiği için, LEV oluşumunu sağlayan denklem kümeleri de belirlenebilir. Dolayısıyla, kanat performansı geliştirme çalışması için biyomimetik tasarım üzerinde değişim yapmak mümkündür.

4.3. Kanat Geliştirme ve Optimizasyon Çalışması

Bu kısımda; nümerik analizler üzerinden, iki faklı kanat geliştirme ve optimizasyon çalışması planlanmaktadır. Bunlardan ilki; M0 modelinin tohum kısmında yüksek basınç bölgesini oluşturan denklem kümelerinin, modelin genel yapısına uygulandığı "topografya optimizasyonu". İkincisi ise; ilk geliştirme çalışmasından elde edilen modeldeki denklemlerin yüksekliklerinin ve genişliklerinin değiştirilmesi ile yapılan "şekil optimizasyonu". Bu çalışmalardaki amaç; kanat modelinin aerodinamik performans kriterini (C_L/C_D) en yüksek düzeye getirmek ve modeli tanımlamada kullanılan denklemleri olabildiğince en aza indirmektir.

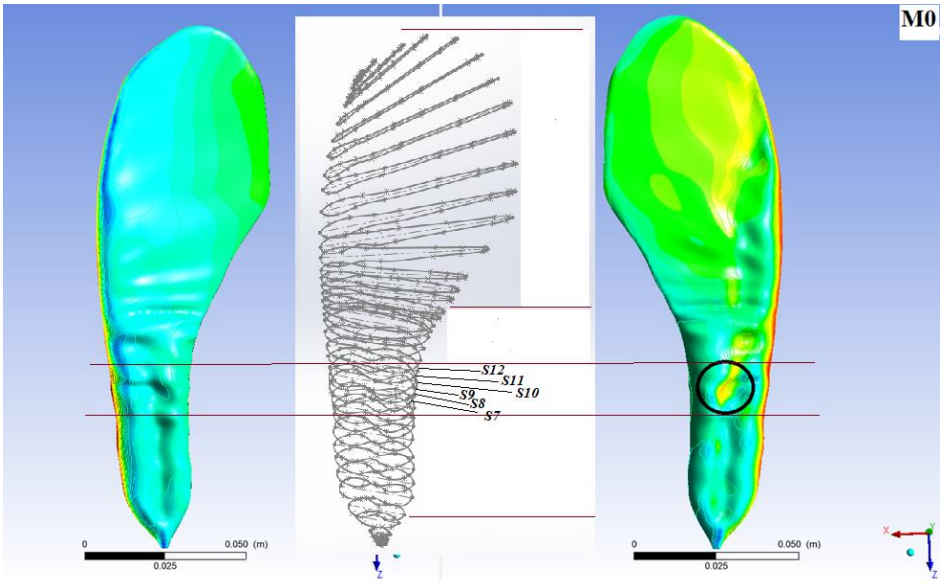
4.3.1 Topografya optimizasyonu

Topografya optimizasyonu, bir cisim üzerindeki şekli oluşturan girinti çıkıntı gibi yapıların değiştirilmesiyle cismin istenen performansının artırılmasıdır. Bu çalışmadaki topografya optimizasyonunda da M0 modelinin planform alanını sabit tutup, modelin iskelet yapısını oluşturan, Fourier serisi denklemleriyle ifade edilen eğrilerin yerleri değiştirilecektir. Bu yapılacak değişimlerle; M0 modeli kullanılarak, sırasıyla 5 tane farklı model (M1, M2, M3, M4, M5) geliştirilecektir.

Bu çalışma için seçilen konfigürasyon: orta serbest akış hızı olan V_∞:10 m/s ve en iyi performans gösteren hücum açılarından birisi olan α: 10° kombinasyonudur. Geliştirme çalışması bu konfigürasyonda elde edilen verilere göre yorumlanacaktır.

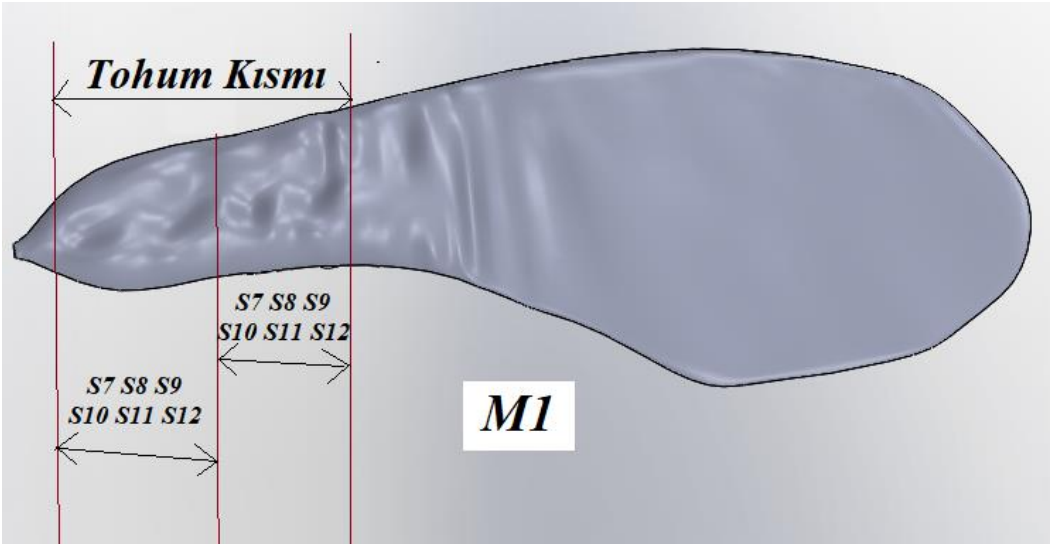
M1 Modelinin Oluşturulması

M0 modelinde; kaldırma kuvvetinin, kanat yüzeyinde en fazla oluşan alanı, Şekil 4.12'de de görüldüğü üzere, tohum kısmının ikinci yarısının bulunduğu alandır. Yine bu şekilde verildiği üzere, bu alanı temsil eden denklemlere bakıldığında; bu denklemlerin sırasıyla: S7, S8, S9, S10, S11 ve S12 isimli 6 tane eğri olduğu bulunmuştur.



Şekil 4.12. M0 modelinin, $\boldsymbol{\alpha}$:10° ve $\boldsymbol{V_\infty}$:10 $\boldsymbol{m/s}$'deki basınç konturlarındaki; en yüksek basınç farkını oluşturan 6 eğri

M0 modelinin tohum kısmı, 12 tane eğri ile temsil edilmişti (S1…S12). Burada, en yüksek basınç farkını oluşturan tohumun ikinci yarısındaki eğriler olan; S7, S8, S9, S10, S11, S12 eğrileri, tohumun diğer yarısındaki S1, S2, S3, S4, S5, S6 eğrilerinin yerine sırasıyla koyularak, Şekil 4.13'teki "M1" modeli elde edilmiştir. Buradaki amaç; yüksek basınç farkını oluşturan yüzey özelliklerini tohumun tamamına yaymaktır.

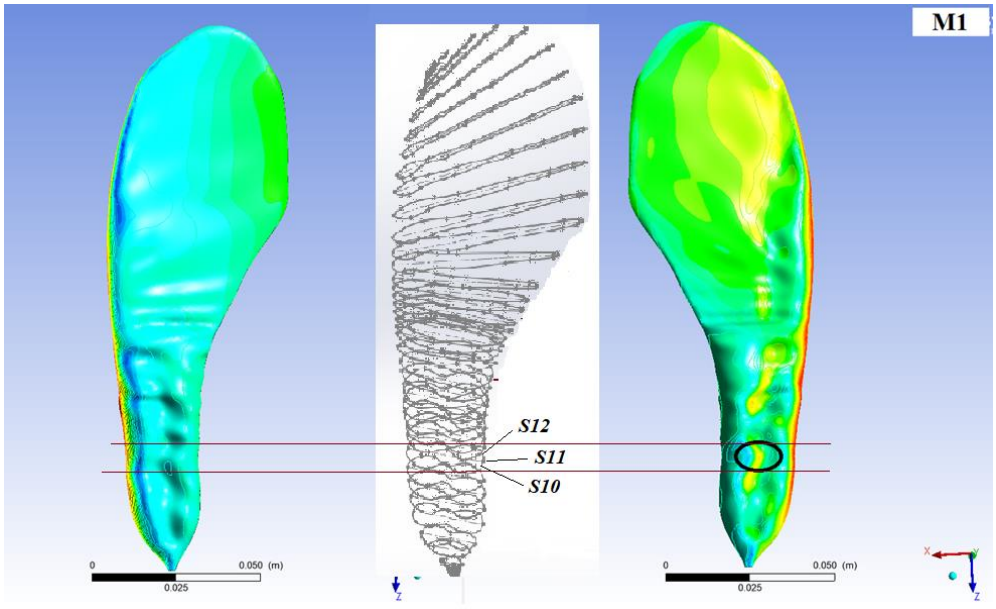


Şekil 4.13. M1 modeli

Modelin üzerinde eğriler yerine başka bir eğri konulurken, eğrilerin her birinin sahip olduğu Fourier denklemi, x koordinat aralıkları ve iki eğrinin lokal veter uzunlukları, Ek 2'den dikkatli bir şekilde elde edilip, tasarım programı üzerinde doğru bir şekilde uygulanması gerekiyor. Örneğin; model üzerinde, S1 eğrisinin yerine S7 eğrisi entegre edilirken; tasarım programı üzerinde, S1 eğrisinin olduğu düzleme girilip S1 eğrisi silindikten sonra, S7 eğrisinin Fourier denklemi ve x koordinat aralığı kullanılarak, o düzleme S7 eğrisi program tarafından çizdiriliyor. Daha sonra, çizilen S7 eğrisinin, S1 eğrisinin lokal veter uzunluğundaki yerine tam yerleştirilebilmesi için, iki eğri arasındaki lokal veter uzunlukları oranınca S7 eğrisi ölçeklendiriliyor. Böylece, modelde herhangi bir planform alan değişikliği yapılmadan S1 eğrisi yerine S7 eğrisi konularak yüzey topografyası değiştirilmiş olunuyor. Bu işlem değiştirilecek her bir eğri için tekrarlanmıştır.

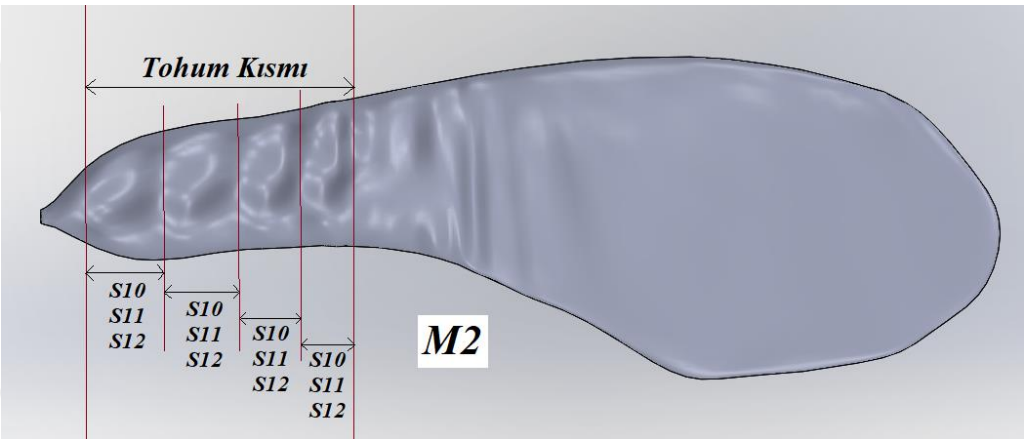
M2 Modelinin Oluşturulması

M1 modelinde, tıpkı M0 modelinde yapıldığı gibi; α:10° ve V_∞:10 m/s'de nümerik analiz yapılmıştır. Bu analiz sonucunda, Şekil 4.14'teki basınç konturları elde edilmiştir.



Şekil 4.14. M1 modelinin, $\boldsymbol{\alpha}$:10° ve $\boldsymbol{V_\infty}$:10 $\boldsymbol{m/s}$'deki basınç konturlarındaki; en yüksek basınç farkını oluşturan 3 eğri

Şekil 4.14'te; M1 modelinin tohum kısmındaki yarı yarıya oluşan eşit kontur dağılımları, tohumun yarısının, diğer yarısına uyarlanması işleminin başarılı olduğunu göstermektedir. Böylece; benzer basınç farklarının, yüzey üzerinde, topografik özelliğin benzetilerek sağlanabileceği de görülmüş oldu. Bir önceki adıma benzer şekilde; yuvarlak içinde gösterilen, etrafına göre daha yüksek basınç farkını oluşturan küçük kısım, çizgiler arasında kalan: S10, S11, S12 eğrisinin olduğu alandadır. Benzer mantıkla, bu 3 eğri, tohum kısmındaki 12 eğrinin yerine sırasıyla entegre edilince, Şekil 4.15'teki "M2" modeli meydana gelmiştir. Böylece M2 modelinde tohum kısmı, 3 eğri ile tanımlanmıştır ((S10, S11, S12)×4).

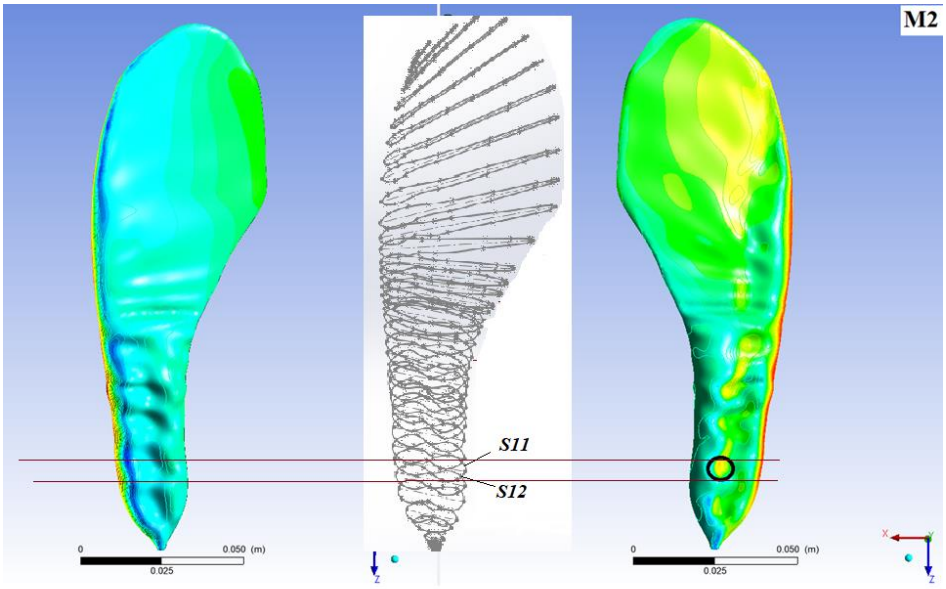


Şekil 4.15. M2 modeli

Eğrileri değiştirme ile yenilerini entegre etme işlemi M1 modelinde açıklandığı gibi yapılmıştır.

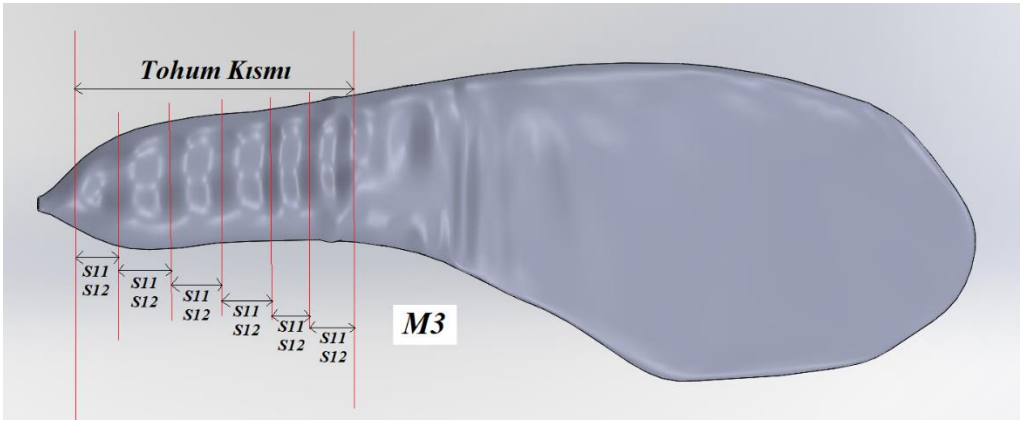
M3 Modelinin Oluşturulması

Oluşturulan M2 modeli ile aynı şartlarda (α:10° ve V_∞:10 m/s) yapılan nümerik analizden sonra, modelin alt ve üst yüzeyinde elde edilen basınç konturları Şekil 4.16'da verilmiştir.



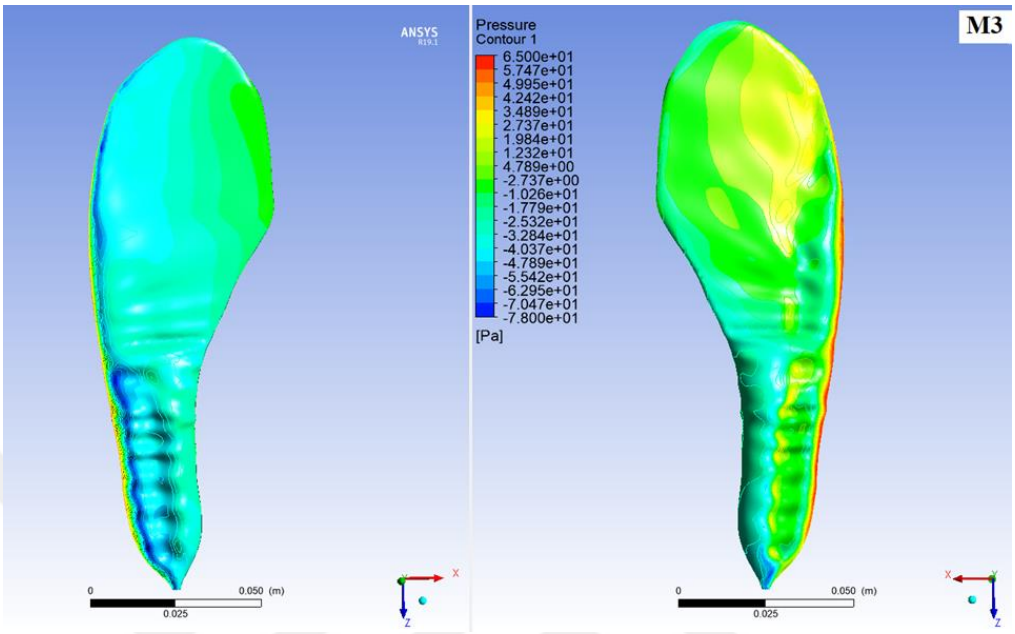
Şekil 4.16. M2 modelinin, $\boldsymbol{\alpha}$:10° ve $\boldsymbol{V_\infty}$:10 $\boldsymbol{m/s}$'deki basınç konturlarındaki; en yüksek basınç farkını oluşturan 2 eğri

Şekil 4.16'da bir önceki modelde uygulanan, eğri entegresinden sonra yüksek basınç farkı alanlarının arttığı görülmektedir. Bir kez daha aynı mantıkla en yüksek basınç farkının oluştuğu alan, bu sefer daha da daraltılırsa, Şekil 4.16'da gösterildiği gibi; S11 ve S12 eğrileri bu çok küçük alanı temsil etmektedir. M2 modelinin tohum kısmındaki 12 eğriye, bu S11ve S12 eğrileri sırasıyla entegre edilerek, Şekil 4.17'deki "M3" modeli oluşturulmuştur. Bu modelin tohum kısmı 2 eğri ile temsil edilebilmektedir ((S11, S12)×6).



Şekil 4.17. M3 modeli

M3 modeli ile α:10° ve V_∞:10 m/s'de yapılan nümerik analizden sonra, modelin alt ve üst yüzeyinde elde edilen basınç konturları da Şekil 4.18'de verilmiştir.

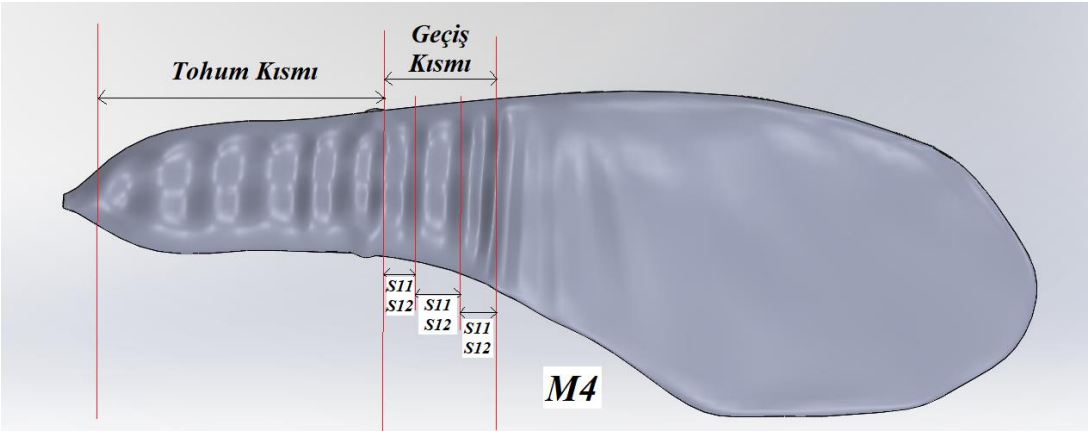


Şekil 4.18. M3 modelinin, $\boldsymbol{\alpha}$:10° ve $\boldsymbol{V_\infty}$:10 $\boldsymbol{m/s}$'deki basınç konturları

M3 modeli ile birlikte, tohum kısmında eğri uyarlama, entegre işlemi de bitmiştir. Çünkü; basınç farklarını oluşturan çukur yapılar, en az iki eğrinin ardı ardına sıralanmasıyla oluştuğu için S11 ve S12 eğrileri en yüksek basınç farkını oluşturan eğriler olarak, sayıları daha azaltılamamaktadır. Bundan sonra akçaağaç tohumu modelinin diğer kısımlarında eğri uyarlama çalışmaları yapılacaktır.

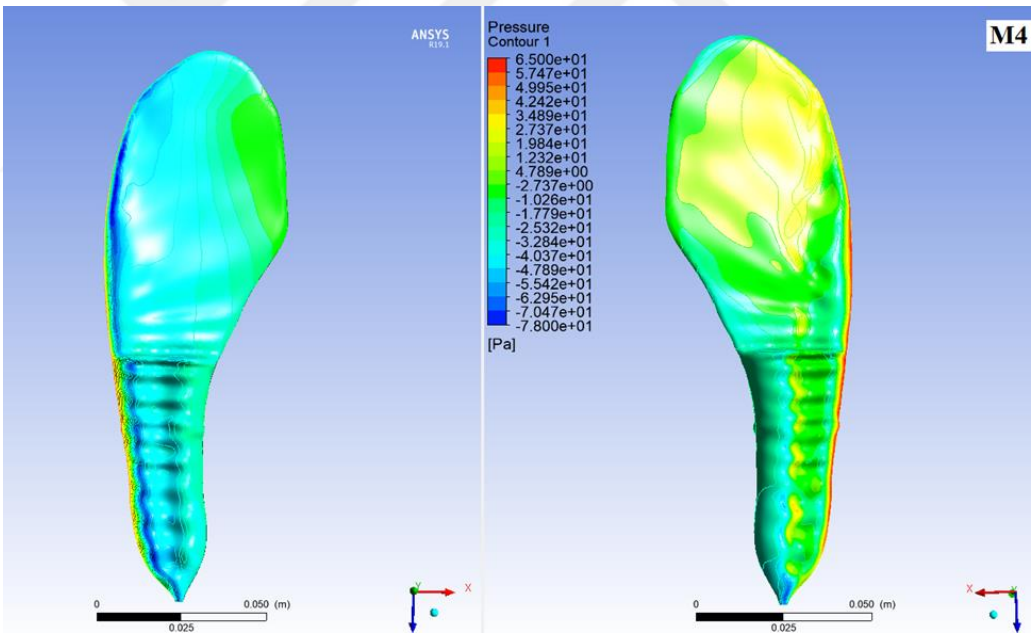
M4 Modelinin Oluşturulması

M3 modeli ile birlikte tohum kısmındaki topografik optimizasyon sonlandığı için, modelin geçiş ve yaprak kısımlarında değişikliklerle, hem en yüksek aerodinamik performans hem de en az denklemle ifade amaçları, yine gerçekleştirilmek istenmiştir. Bunun için etkisini M1, M2 ve M3 modelinde başarı ile gösteren S11 ve S12 eğri çifti, modelin geçiş kısmındaki 6 eğriye sırasıyla entegre edilmiş ve Şekil 4.19'da verilen "M4" modeli ortaya çıkarılmıştır. Bu modelde tohum ve geçiş kısımları 2 adet eğri denklemi ile tanımlanabilmektedir ((S11, S12)×6 + (S11, S12)×3).



Şekil 4.19. M4 modeli

M4 modeli ile α:10° ve V_∞:10 m/s'de yapılan nümerik analizden sonra, modelin alt ve üst yüzeyinde elde edilen basınç konturları da Şekil 4.20'de verilmiştir.



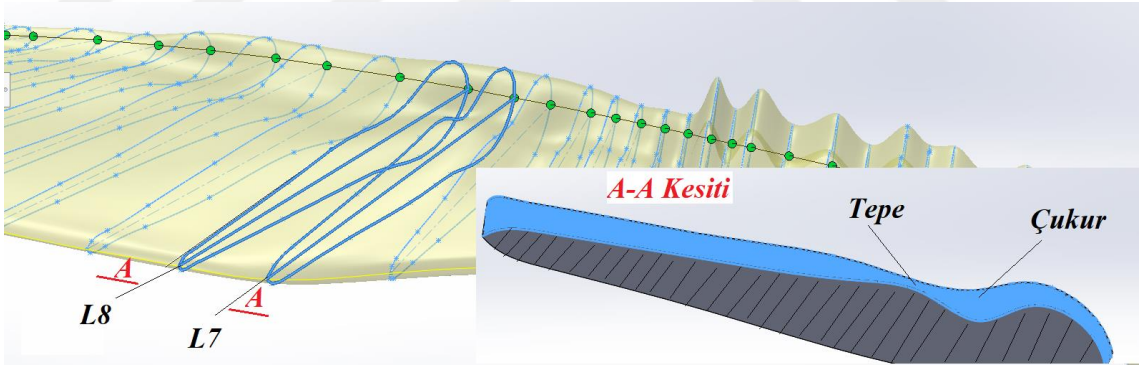
Şekil 4.20. M4 modelinin, $\boldsymbol{\alpha}$:10° ve $\boldsymbol{V_\infty}$:10 $\boldsymbol{m/s}$'deki basınç konturları

M5 Modelinin Oluşturulması

Bu kısma kadar yapılan geliştirme ve optimizasyon çalışmaları, bize, biyomimetik kanat modelimiz üzerindeki yüksek basınç farkını oluşturan eğri çiftlerinin, diğer alanlara

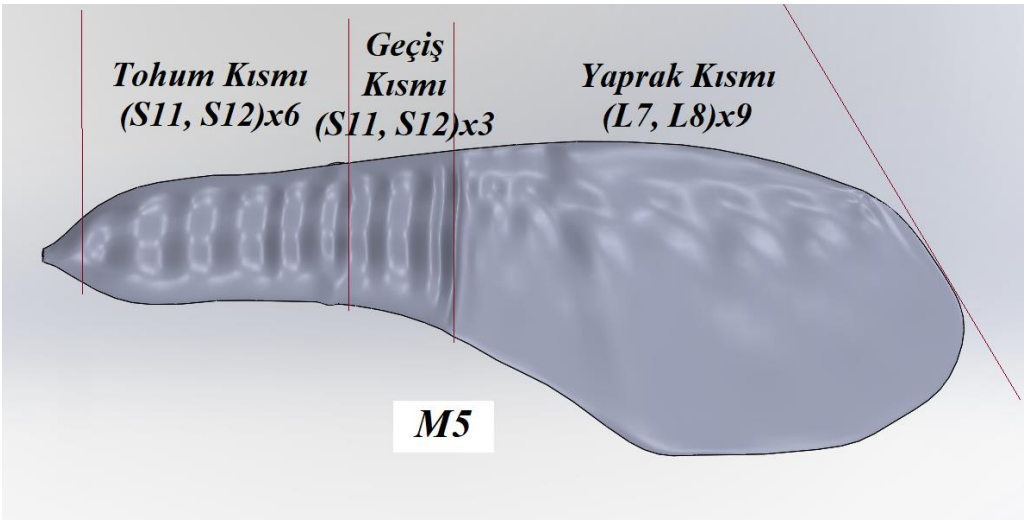
uygulanmasının başarılı sonuçlar verebileceğini göstermiştir. Söz konusu eğrilerin model üzerinde sırasıyla tepe çukur yapılarını artırdığı ve bunun basınç farklarında bir artışa sebep olduğu, 4 model için verilen basınç konturlarından anlaşılabilmektedir.

M4 modeliyle beraber, tohum ve geçiş kısmı artık 18 eğri yerine 2 eğri ile tanımlanabilmektedir. Ancak M4 modelinin yaprak kısmında hala 18 eğri bulunmaktadır. Daha önce, Şekil 3.38'de verilen eğri şekillerinden de görülebildiği gibi; tohum ve geçiş kısmındaki eğriler birbirine benzerken yaprak kısmındaki eğriler çok daha ince ve keskin hatlıdır. Bu yüzden yaprak kısmında yapılacak olan geliştirme işlemi için daha önce etkisi ispatlanan S11 ve S12 eğrileri kullanılmak istenmemiştir. Onun yerine, bu iki eğrinin, model yüzeyinde oluşturduğu topografik etkiye bakılmıştır. Bu topografik etki M1, M2, M3 ve en net M4'te görüldüğü gibi tepe-çukur yapısıdır. Yaprak kısmı için bu yapı oluşumu geometri üzerinde birkaç yerde tespit edilmiştir. Ancak en net tepe-çukur topografyasını verecek eğriler, Şekil 4.21'de gösterildiği gibi L7 ve L8 yaprak eğrileri arasında olmuştur. Yaprak kısmında en fazla tepe çukur yapı bu iki eğrinin sıralanmasıyla oluşmaktadır.



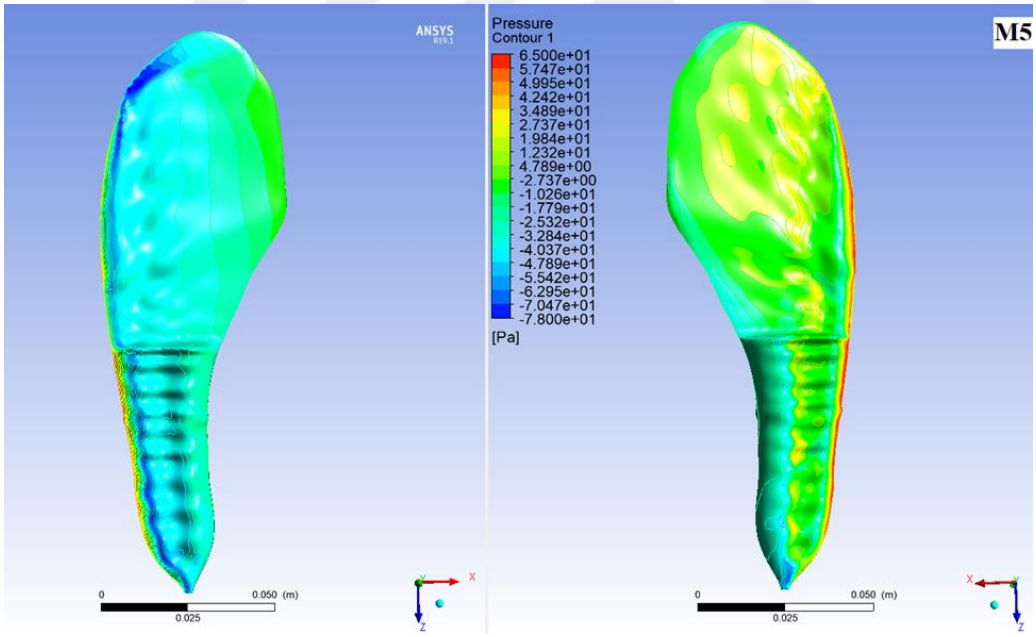
Şekil 4.21. L7 ve L8 eğrilerinin oluşturduğu tepe-çukur yapı

Bütün yaprak kısmında sıralandığında, daha yüksek basınç farkları vermesi umulan L7 ve L8 eğrileri, M4 modelinin yaprak kısmında bulunan 18 eğri yerine sırasıyla entegre edilerek Şekil 4.22'de verilen "M5" modeli oluşturulmuştur.



Şekil 4.22. M5 modeli

M5 modeli ile α:10° ve V_∞:10 m/s'de yapılan nümerik analizden sonra, modelin alt ve üst yüzeyinde elde edilen basınç konturları da Şekil 4.23'te verilmiştir.



Şekil 4.23. M5 modelinin, $\boldsymbol{\alpha}$:10° ve $\boldsymbol{V_\infty}$:10 $\boldsymbol{m/s}$'deki basınç konturları

Değerlendirme

Topografya çalışması ile geliştirilen 5 modelin, bir konfigürasyonda nümerik analizinden elde edilen basınç konturları verilip aradaki farklara dikkat çekilmişti. Bu konturlar aynı basınç aralığı ve ölçekte alındığı için M5 modeline doğru giderek artan sarı ve kırmızı alanlar, bize çalışmanın, modelin alt ve üst yüzeyindeki basınç farklarını artırdığını göstermektedir. Bu artan basınç farkları kaldırma kuvveti katsayısını da dolayısıyla kanadın aerodinamik performansını da artırmaktadır. Bu artışı daha net görmek açısından; Çizelge 4.1'de; M0 modeline göre oluşturulan diğer 5 modelin aerodinamik performans parametreleri ve istatistiki gelişim oranları verilmiştir.

Çizelge 4.1. Topografya optimizasyonundan elde edilen modellerin, α:10° ve V_∞:10 m/s'deki aerodinamik performansı ve M0'a göre kıyaslaması

	Topografya Optimizasyonu			**M0'a göre**	
Model	C_L	C_D	C_L/C_D	C_L **artış**	C_L/C_D **artış**
M0	0,342	0,198	1,727273	%0	%0
M1	0,37485	0,20194	1,856244	%9,605	%7,467
M2	0,38219	0,19939	1,916796	%11,751	%10,972
M3	0,39441	0,19239	2,05	%15,324	%18,688
M4	0,40881	0,20296	2,02	%19,535	%16,96
M5	0,43005	0,19436	2,212647	%25,746	%28,1

Çizelge 4.1'den de görülüyor ki; yapılan topografya çalışması, C_L'de ve C_L/C_D'de genel anlamda sürekli bir artışa sebep olurken, C_D'de hemen hemen hiç artış olmamış hatta M5 modelinde, M0'a göre daha düşük bir C_D elde edilmiştir. Sonuç olarak; aerodinamik performanslara bakıldığında, M5 modelinde M0'a göre %25,746'lık bir C_L artışı, %28,1'lik bir C_L/C_D artışı elde edilmiştir.

Topografya optimizasyonunun amacı; biyomimetik kanat modelinin aerodinamik performansını artırmasının yanı sıra, modeli temsil eden eğrileri, dolayısıyla denklemleri de en aza indirmekti. Optimizasyonun başlangıcında; M0 modelinde, kanat dibindeki çok

küçük bir kısım olan "sabit kısımda"ki eğriler göz ardı edildiğinde, model 36 eğri ile tanımlanıyordu. Çalışmanın sonunda elde edilen M5 modelinde ise bu sayı 4'e kadar düşürülmüştür. Bu değişimi, her bir modelde ayrıntılı olarak Çizelge 4.2'den görebiliriz.

Çizelge 4.2. Topografya optimizasyonundan elde edilen modelleri tanımlayan eğriler

Model-Kısım	Tohum	Geçiş	Yaprak	Toplam
M0	12 eğri	6 eğri	18 eğri	36 eğri
	S1…S12	T1…T6	L1…L18	S1…L18
M1	6 eğri	6 eğri	18 eğri	30 eğri
	2×(S7…S12)	T1…T6	L1…L18	S7…L18
M2	3 eğri	6 eğri	18 eğri	27 eğri
	4×(S10…S12)	T1…T6	L1…L18	S10…L18
M3	2 eğri	6 eğri	18 eğri	26 eğri
	6×(S11-S12)	T1…T6	L1…L18	S11…L18
M4	2 eğri		18 eğri	20 eğri
	6×(S11-S12)	3×(S11-S12)	L1…L18	S11…L18
M5	2 eğri		2 eğri	4 eğri
	6×(S11-S12)	3×(S11-S12)	9×(L7-L8)	S11-S12-L7-L8

Topografya çalışmasından elde edilen nicel ve nitel bulgular, geliştirilen M5 modelinin aerodinamik performansının incelenmeye değer olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla bir sonraki başlıkta M5 modelinin deneysel ve nümerik çalışmasına ilişkin bulgular verilecektir. Ayrıca bir sonraki optimizasyon çalışması da M5 modeli üzerinden yapılacaktır.

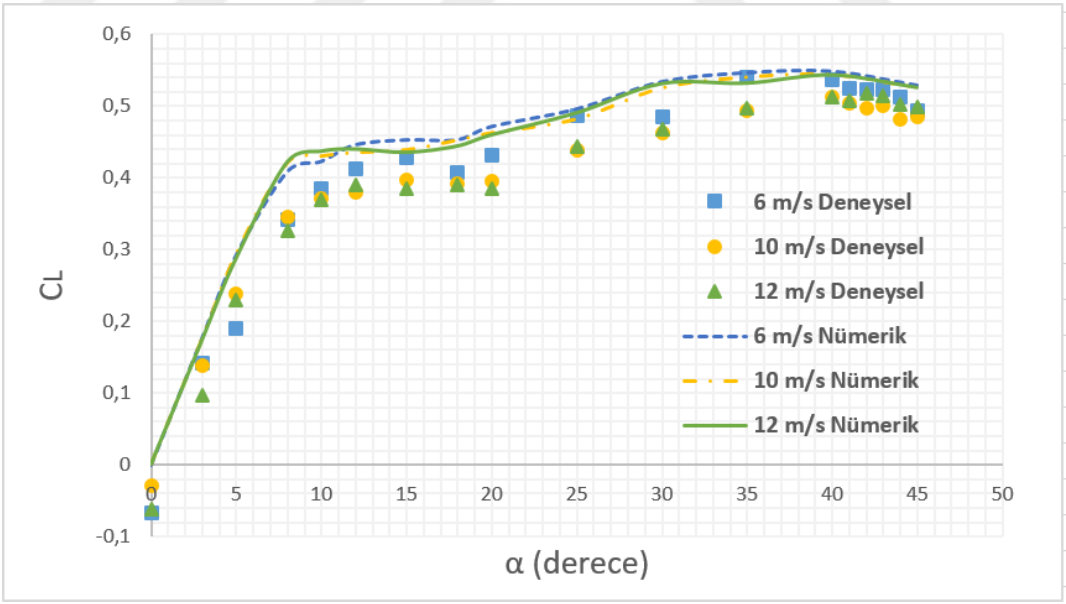
M5 Modelinin Bulguları

M5 modeli, deneysel çalışmasının gerçekleştirilebilmesi için daha önce detaylıca özelliklerinden bahsedilen 3D yazıcı vasıtasıyla üretilmiştir. Şekil 4.24'te gösterilen, üretilen bu modelin boyutları (b, c) M0 ile aynıdır.

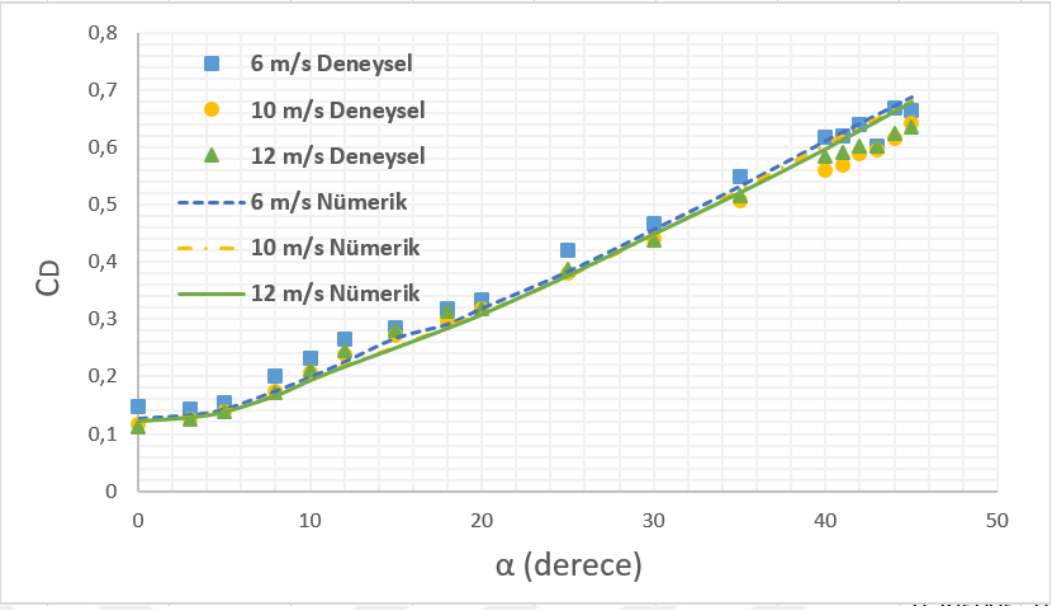


Şekil 4.24. M5 modelinin deneysel çalışma için 3D yazıcıdan alınan baskısı

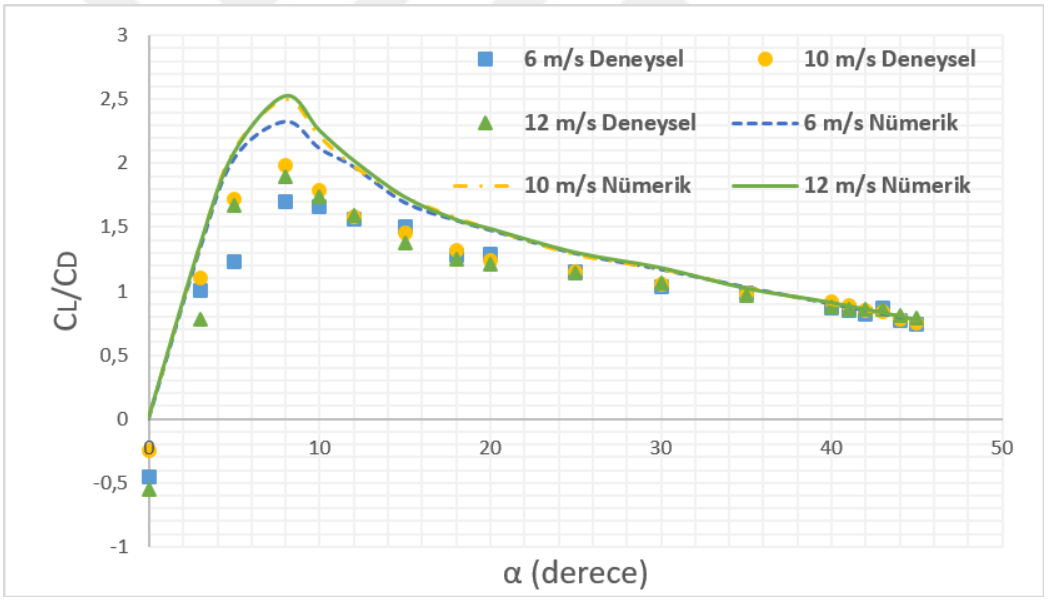
M5 modeli de, M0 modeli gibi aynı şartlarda deneysel ve nümerik çalışmaya tabi tutulmuş, aynı parametreler bu model için de kullanılmıştır. Buna göre; M5 modelinin, her bir serbest akış hızındaki, pozitif hücum açılarına bağlı kaldırma kuvveti katsayısı değişimi Şekil 4.25'te, sürükleme kuvveti katsayısı değişimi Şekil 4.26'da, bu iki katsayının birbirine oranı ise Şekil 4.27'de verilmiştir.



Şekil 4.25. M5 modelinin, farklı serbest akış hızlarında, $\boldsymbol{\alpha}$'ya göre $\boldsymbol{C_L}$ değişimi



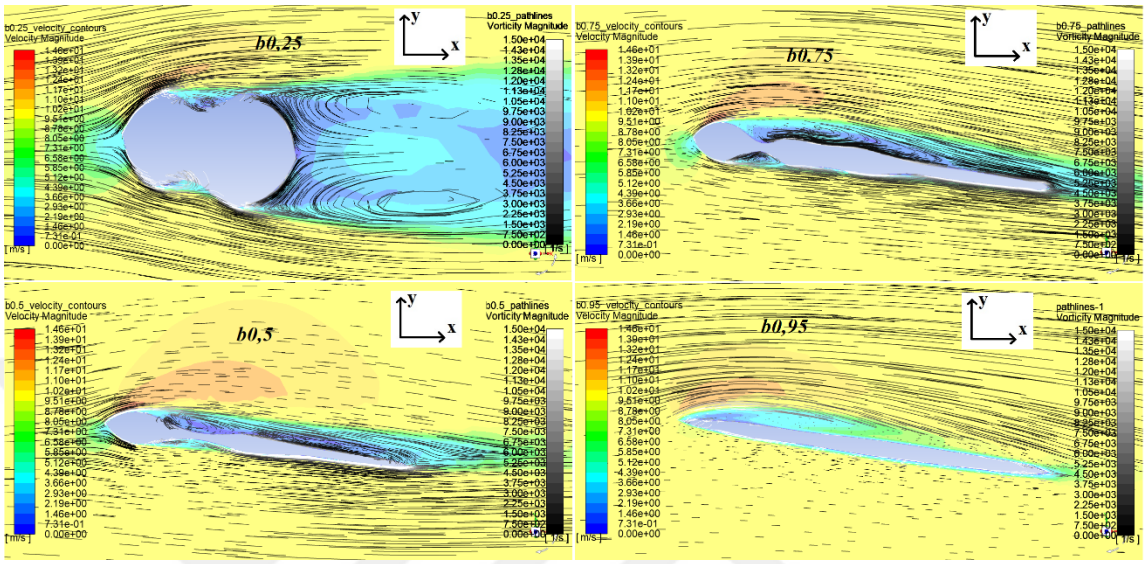
Şekil 4.26. M5 modelinin, farklı serbest akış hızlarında, $\boldsymbol{\alpha}$'ya göre $\boldsymbol{C_D}$ değişimi



Şekil 4.27. M5 modelinin, farklı serbest akış hızlarında, $\boldsymbol{\alpha}$'ya göre $\boldsymbol{C_L/C_D}$ değişimi

M5 modelinin aerodinamik performanslarını veren bu grafiklere bakıldığında; nümerik ve deneysel sonuçların uyum içinde olduğu ve değişen serbest akış hızlarına karşın, aerodinamik parametrelerin verilerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. M5 modelinin stol açısının ise, M0 modeli gibi, 44° civarında olduğu belirlenmiştir.

M5 modelinin, daha önce Şekil 4.10'da verilen kanat boyu oranlarından alınan kesitlerde: akış çizgileri, girdap (vortex) eğilimi değerleriyle ve hız konturları 10 m/s serbest akış hızı ve 8° hücum açısında Şekil 4.28'de verilmiştir.



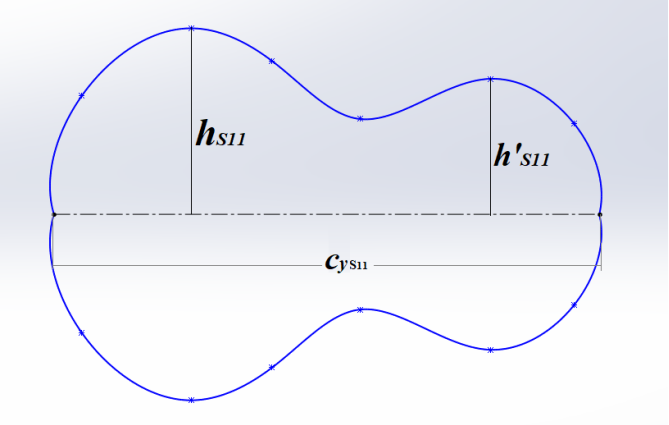
Şekil 4.28. M5 modelinin, $\boldsymbol{\alpha}$:8° ve $\boldsymbol{V_\infty}$:10 $\boldsymbol{m/s}$'deki belli kesitlerindeki hız konturları ve girdap eğilimi değerleriyle akış çizgileri

M5 modelinde, M0 modeline göre, kanat üst yüzeyindeki daha geniş LEV oluşumları dikkat çekmektedir.

4.3.2 Şekil optimizasyonu

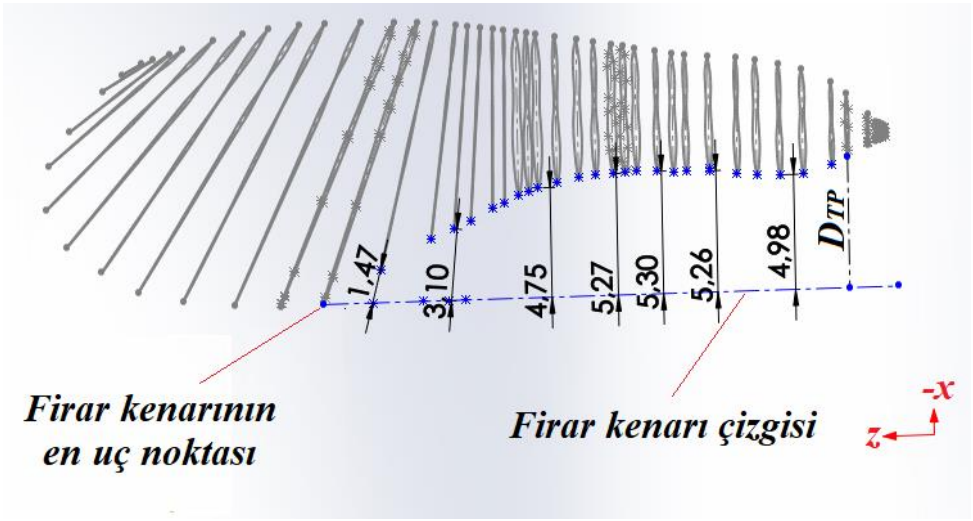
Şekil optimizasyonu, bir tasarımda istenilen amaç fonksiyonu için kısıtlara bağlı olarak optimum boyutların bulunmasıdır.

Bu çalışmada; topografya optimizasyonundan elde edilen M5 modelinde, aynı denklemlerle oluşturulan, S11 ve S12 eğrileriyle tanımlanan tohum ve geçiş kısmının, yaprak kısmına göre yükseklikleri oransal olarak fazla kalmaktadır. S11 ve S12 eğrisinde bahsedilen bu yükseklikler (h) ve yerel veter uzunluğu (c_y), S11 eğrisi üzerinde Şekil 4.29'da gösterilmiştir.



Şekil 4.29. S11 eğrisine ait $\boldsymbol{h}$ ve $\boldsymbol{c_y}$ uzunlukları

M5 modelinin, akçaağaç tohumunun dış hatlarını oluşturan yapısı, iskelet sisteminde yer alan eğrilerin yerel veter uzunlukları sayesinde olmaktadır. Şekil 4.30'da; modelin firar kenarının en uç noktasından dik şekilde çekilen bir çizgiden, yerel veter çizgisine kadar olan mesafeye D_{TP} (Distance to Trailing Edge Point) denmiştir. Şekil 4.30 üzerinde; bazı eğrilerin bu D_{TP} uzunluklarına ait bazı örnekleri de verilmiştir. Bu uzunluklar, her zaman eğrinin doğrultusunda olmuştur. Dolayısıyla tohum ve geçiş kısmında "x" doğrultusuna paralel iken, yaprak kısmında damar yapılarının doğrultusundadır.



Şekil 4.30. M5 modelinin üzerinde $\boldsymbol{D_{TP}}$ uzunluklarının gösterimi

Şekil optimizasyonunda, topografya optimizasyonunda olduğu gibi, α:10° ve V_∞:10 m/s'deki nümerik analiz bulguları, oluşturulan modeller için karşılaştırılacaktır.

Amaç ve Değişken Parametrelerin Belirlenmesi

Şekil optimizasyonu kapsamında amaç; tohumu oluşturan S11 ve S12 eğrilerinin, yükseklikleri ve firar kenarının en uç noktasından çekilen dik çizgiye olan uzaklıkları değiştirilerek, en iyi aerodinamik performans kriterinin elde edilmesini sağlamaktır. Buna göre; amaç fonksiyonu olarak, aerodinamik performans kriteri olan C_L/C_D oranı belirlenirken, değişken parametreler olarak ise; h/c_y ve D_{TP} değerleri belirlenmiştir. Değişken parametrelerden de anlaşılacağı gibi modelin bu optimizasyon çalışmasında planform alanı S, değişecektir. O yüzden, sonraki kısımlarda yapılacak olan C_L ve C_D hesaplamaları yapılırken değişen planform alanlar dikkate alınmıştır.

Kanat kalınlıklarının C_D üzerinde artırıcı bir etkisi olduğu literatürde yapılan çalışmalarca ispatlanmıştır. Ashraf ve ark. (2011), yayınladıkları makalede; kalın kanat profilinin daha yuvarlak olan ön kenarı, emme tepe noktasını zayıflattığından dolayı ince kanat profillerinin kalın kanat profillerine göre daha yüksek performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca çalışmalarında; kanat kalınlığının azaldıkça, LEV yapısının daha yüksek bir pik yaptığından da bahsetmektedirler. Sharma ve Visbal (2019)'da farklı kalınlıktaki NACA profilleri ile yaptıkları çalışmada, en ince kanat profilinin (NACA 0009), kesit kaldırma katsayısında en büyük artışı yaşadığını belirtmişlerdir.

Ne var ki, kanat kalınlığını sürekli düşürmek, aerodinamik performansa her zaman olumlu katkı sağlamamaktadır. Daha önce kanat profillerinin tarihçesinden bahsedildiği kısımda; ince kanat profillerinin sürüklemeyi azaltırken yeterli kaldırma kuvveti veremediğinden de bahsetmiştik (Anderson, 2011). Buna ek olarak; Mattos ve ark. (2016)'da yaptıkları çalışmada; kanat profilinin çok incelmesiyle, Re artışıyla, aerodinamik performansın düşeceğinden bahsetmişlerdir. Tüm bu etkiler göz önüne alındığında, modelimize tohum kısmındaki kalınlığını veren, eğri yüksekliği h veya h' parametresinin optimum şekilde azaltılması gerekmektedir.

Bir diğer optimize edilmesi gereken parametre ise D_{TP} uzunluklarıdır. Bu uzunluklar kanadın planform alanını etkilediği için, D_{TP} uzunluğu azaltıldığında, planform alan

artacağı için, basınç farkını oluşturan alan da artmış olacak. Ancak bu alan artarken yüzey topografyasında LEV oluşumlarını destekleyen tepe-çukur yapılarının formunun değişeceği de göz önünde bulundurulursa, D_{TP} uzunluğunu optimum şekilde azaltmak gerekmektedir. Bu azaltma işlemi için D_{TP} uzunlukları 0,8; 0,6; 0,4; 0,2 değişken değerleriyle çarpılıp, eğriler bir anlamda belli oranda ölçeklendirilecektir. Bu işleme örnek vermek gerekirse; "0,8xD_{TP}" faktörünü ele alalım. Modelin herhangi bir yerindeki eğrinin D_{TP} uzunluğu 0,8 oranında ölçeklendirilmek isteniyor (başka bir deyişle 0,2 oranında küçültülmek). Bunun için, ilgili eğrinin D_{TP} uzunluğu, 0,2 ile çarpılıyor ve eğrinin yerel veter uzunluğuna bu değer eklenerek yeni bir veter uzunluğu elde ediliyor. Bu yeni veter uzunluğu, eski veter uzunluğuna bölünerek eğrinin ölçeklendirme katsayısı bulunuyor. Tasarım programı üzerinden, eğri bu değer ile ölçeklendirildiğinde, D_{TP} 0,8 oranında ölçeklendirilmiş oluyor ve "0,8xD_{TP}" faktörü gerçekleştirilmiş oluyor. Şekil 4.31'de bu işlem, yine bir örnek olması amacıyla, Excel ekran görüntüsü olarak verilmiştir. D_{TP} uzunluğu değiştirilecek eğriler ise; Şekil 4.30'da gösterilen, firar kenarının en uç noktasına kadar olan eğrilerdir.

							Eğri Ölçekleri	
Eğri	DTP	+Cy(0,4)	+Cy(0,2)	Cy	Cy(0,4)	Cy(0,2)	DTPx0,4	DTPx0,2
1(S11)	5,38	3,228	4,304	3,55	6,778	7,854	1,9093	2,21239
2(S12)	4,98	2,988	3,984	4,54	7,528	8,524	1,65815	1,87753
3(S11)	4,98	2,988	3,984	4,86	7,848	8,844	1,61481	1,81975
4(S12)	5	3	4	4,98	7,98	8,98	1,60241	1,80321
5(S11)	5,12	3,072	4,096	5	8,072	9,096	1,6144	1,8192
							1,63887	1,85182
							1,	492
							1,	505
							1,61154	1,81538
10(S12)							1,59888	1,7985
11(S11)	5,31	3,186	4,248	5,45			1,58459	1,77945
12(S12)	5,27	3,162	4,216	5,58	8,742	9,796	1,56667	1,75556

Tasarım programından ölçülen DTP uzunluğu

0,4xDTP için yerel veterdeki artış: 4,98x0,6

0,2xDTP için yerel veterdeki artış: 4,98x0,8

Eğrinin yerel veter uzunluğu (Ek2'den)

0,4xDTP için yeni yerel veter uzunluğu: 4,86+2,988

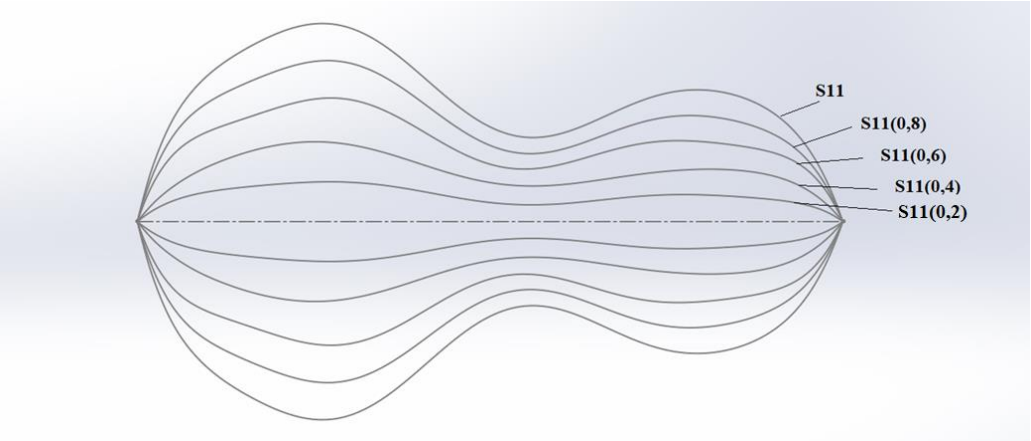
0,2xDTP için yeni yerel veter uzunluğu: 4,86+3,984

İlgili faktörler için eğri ölçekleri

Şekil 4.31. 0,4xD_{TP} ve 0,2xD_{TP} değişken faktörleri için örnek hesaplama

Eğri yüksekliklerinin azaltma işlemi için ise; her bir eğrinin yerel veter uzunlukları "xD_{TP}" faktöründe değişeceğinden dolayı h/c_y oranı değişken faktör olarak seçilmiştir. Benzer biçimde toplamda 4 tane ölçeklendirme katsayısı belirlenmiştir. Bunlar; her bir eğri için h/c_y oranını verecek olan 0,8, 0,6, 0,4, 0,2 ölçeklendirme değerleridir. Yani;

örnek olarak, 0,8 ölçeklendirme katsayısında, eğri yüksekliğinin, yerel veter uzunluğuna oranı %20 oranında azaltılmış olacaktır. Bu ölçeklendirmeye göre oluşturulacak olan eğrilerin, S11 için örneği Şekil 4.32'de verilmiştir.



Şekil 4.32. S11 eğrisinin şekil optimizasyonu için ölçeklendirilmiş eğrileri

Taguchi Metodu

Taguchi metodu, ürün imalatı ve birçok alanda kalite geliştirimi için kullanılan, Genici Taguchi tarafından önerilmiş bir istatistiksel metottur. Bu yöntemdeki temel amaç, değişken koşullara karşın sağlam sistemler tasarlamaktır. Taguchi yöntemi, en iyi ürün kalitesi, sağlam bir süreç ve sonuç elde etmek için sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı gibi süreçler içerir (Taguchi, 1978). Taguchi metodunun "deney tasarımı" (DoE) yaklaşımı, sınırlı istatistiki bilgiyle bile uygulanabildiği için mühendislik ve bilim camiasında popülerlik kazanmıştır (Karna ve Sahai, 2012).

Bu çalışmada şekil optimizasyonu için Taguchi metodunun seçilmesinin sebebi; değişken faktörlerin, bir amaç fonksiyonu için olabildiğince az deneyle optimize edilmek istenmesidir. M5 modeli için yapılacak şekil optimizasyonu çalışması için belirlenen parametreler Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Taguchi metodu için belirlenen amaç ve faktörler

Amaç Parametresi	Faktörler		Seviye Sayısı	Değerler
C_L/C_D	**1.** (S11)	$x\left(h_{11}/c_{y_{11}}\right)$	4	0,8;0,6;0,4;0,2
	2. (S12)	$x\left(h_{12}/c_{y_{12}}\right)$	4	0,8;0,6;0,4;0,2
	3. (S11, S12, L7, L8)	xD_{TP}	4	0,8;0,6;0,4;0,2

Çizelge 4.3'ten de görüldüğü üzere; M5 modelinin tohum ve geçiş kısmında bulunan S11 ve S12 eğrisi için ölçeklendirme oranları ilk 2 faktörü oluşturmuştur. Ayrıca modeli temsil eden tüm eğriler için xD_{TP} ölçeklendirmeleri de 3. bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.

Normal şartlarda, bu faktörlerin hepsinin bir araya gelerek oluşturacağı kombinasyon, yani deney sayısı 64 (4x4x4) iken, Taguchi metodu ile bu deney sayısını azaltmak mümkündür.

Taguchi metodunda; faktörlerin optimum ayarlamalarını veren "ortogonal dizi", en iyi sonuçların verilebilmesi için önerilen ve deney sayısını oldukça azaltan bir sistemdir. Ortogonal Diziler, bir dizi iyi dengelenmiş deney ve istenen çıktıyı sağlar, veri analizinde ve optimum sonuçların tahmininde yardımcı olur (Karna ve Sahai, 2012).

Taguchi metodunda faktörlere ve faktörlerin seviyelerine göre oluşturulacak ortogonal dizi, hazırlanmış çeşitli tablolardan (Karna ve Sahai, 2012) veya Taguchi metodunu uygulayabilen bilgisayar programları aracılığıyla seçilebilir.

Şekil optimizasyonu çalışması için kullanılacak Taguchi metodu, "Minitab 19" programı ile yapılmıştır. Çizelge 4.3'teki parametrelerin programdaki Taguchi çözümüne ilişkin kısmına tanımlandığında, program, "L16" ortogonal dizisini önermektedir. Bu da, C_L/C_D oranınını en çok etkileyen faktörleri ölçmek için 64 deney yerine, Taguchi metodu ile 16

deney yapılabilmesi anlamına gelmektedir. Program tarafından oluşturulan bu L16 ortogonal dizisi içerdiği faktör değerleriyle birlikte Çizelge 4.4'te verilmiştir.

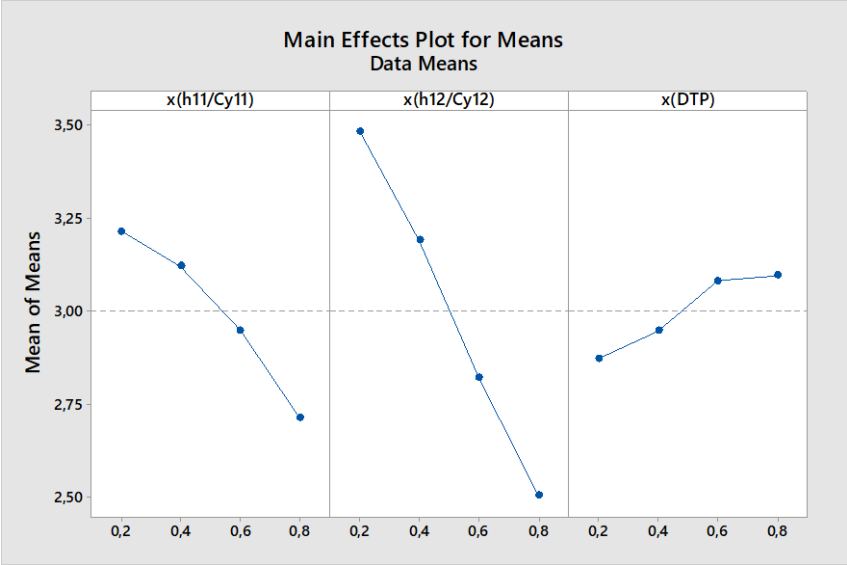
Çizelge 4.4. Taguchi metodu için oluşturulan L16 ortogonal dizisi

L16	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
$x\left(h_{11}/c_{y_{11}}\right)$	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6
$x\left(h_{12}/c_{y_{12}}\right)$	0,8	0,6	0,4	0,2	0,8	0,6	0,4	0,2
$\mathbf{x}D_{TP}$	0,8	0,6	0,4	0,2	0,6	0,8	0,2	0,4
C_L/C_D	2,401	2,599	2,843	3,012	2,475	2,859	3,062	3,399
	9	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**
$x\left(h_{11}/c_{y_{11}}\right)$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2
$x\left(h_{12}/c_{y_{12}}\right)$	0,8	0,6	0,4	0,2	0,8	0,6	0,4	0,2
$\mathbf{x}D_{TP}$	0,4	0,2	0,8	0,6	0,2	0,4	0,6	0,8
C_L/C_D	2,566	2,838	3,343	3,738	2,579	2,981	3,515	3,782

Çizelge 4.4'te verilen ortogonal tabloya göre, M5 modelinden 16 farklı tasarım kombinasyonu yapılıp; α:10° ve V_∞:10 m/s'de, bu kombinasyon tasarımların nümerik analizleri yapılmıştır. Nümerik analizlerden elde edilen, Çizelge 4.4'te renkli kısmda da verilen C_L/C_D değerleri amaç fonksiyonu olarak Minitab 19 programında girilmiştir ve bu değerin en büyük olması, amaç olarak işaretlenmiştir.

Minitab 19 programı aracılığıyla yapılan Taguchi analizine göre, Şekil 4.33'teki değişkenler için ana etki grafiği elde edilmiştir.

Faktörlerin etkilerinin göreli gücünü karşılaştırmak için kullanılan ana etki grafiği, bir tasarım parametresinin veya süreç değişkeninin her seviyesindeki ortalama yanıt değerlerinin bir grafiğidir (Antony, 2014)



Şekil 4.33. Taguchi analizinden elde edilen, değişkenler için ana etki grafiği

Taguchi metodundan elde edilen bu grafiğe bakıldığında; S12 eğrisinin ölçeklendirme faktörü olan, $x\left(h_{12}/c_{y_{12}}\right)$ faktörünün, C_L/C_D amaç fonksiyonuna etkisi geniş bir aralıkta olmakla beraber, S11 eğrisine ait, $x\left(h_{11}/c_{y_{11}}\right)$ faktörü o kadar geniş aralıkta olmamıştır. Ancak bu iki eğrinin de en optimize seviyesi 0,2 olarak görülmektedir. xD_{TP} faktörünün etkisi ise çok geniş aralıkta olmazken, en uygun seviyeleri 0,6;0,8 olarak çıkmaktadır.

Bu gibi deneysel tasarım çalışmalarında; "Varyans Analizi " yani ANOVA (Analysis of Variance), deneyin toplam varyasyonunu, ana ve etkileşim faktörleriyle ilişkili bileşenlere ve rastlantısallıkla ilişkili varyasyona ayırmak için kullanılır (Logothetis, 1992).

Şekil optimizasyonu için, aynı bilgisayar programı üzerinden yapılan ANOVA'dan elde edilen bilgiler Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Şekil optimizasyonu için ANOVA ile elde edilen bilgiler

ANOVA

Kaynak	DF	Seq SS	Katkı Oranı	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
x(h11/Cy11)	3	0,58033	19,79%	0,58033	0,193442	44,14	0,000175
x(h12/Cy12)	3	2,18676	74,56%	2,18676	0,728919	166,32	0,000004
x(DTP)	3	0,13942	4,75%	0,13942	0,046475	10,60	0,008202
Hata	6	0,02630	0,90%	0,02630	0,004383		
Toplam	15	2,93280	100,00%				

Model Özeti

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
0,0662020	99,10%	97,76%	0,186995	93,62%

ANOVA ile elde edilen bilgilerden de görüldüğü üzere; ana etki grafiğine benzer şekilde, $x\left(h_{12}/c_{y_{12}}\right)$ faktörünün, sonuca %74,65'lik büyük bir katkısı bulunmaktadır. İkinci sıradaki katkı payı %19,79 ile $x\left(h_{11}/c_{y_{11}}\right)$ faktörü olurken, xD_{TP} faktörünün etkisi %4,75'te kalmıştır. Bu da; bu çalışmada, modellerin kanat planform alanlarını artırmanın, C_L/C_D oranına çok bir etkisi olmadığını göstermiştir. Yüzey topografyasını direkt etkileyen eğrileri küçültecek ölçeklendirmenin, aerodinamik performansa fazlaca katkı verdiği görülürken, bu topografyayı daha geniş alana yaymak görece daha zayıf bir etki sağlamıştır. Yine Çizelge 4.5'ten bu faktör etkilerinin hata payı, %0,9 gibi çok düşük bir oran çıkarken, bağlantılı olarak, R^2 değerinin de %99,1 çıktığı görülmüştür. Bu da çalışmanın hata payının çok düşük olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.5'te görülen başka bir değer olan, istatistikte incelenen faktörlerin sonuçlarının aslında test edilen durumla hiçbir alakası olmaması olasılığını ifade eden P-Value (olasılık) değerlerinin, hata payının maksimum kabul edilebilir düzeyi olan 0,05'ten (Kul, 2014) küçük olması, faktörler arasında anlamlı farklılıklar olduğunu göstermektedir. Bu da bize çalışma için belirlenen, faktör seviye değerlerinin, çalışma için anlamlı sonuçlar verebildiğini gösterir.

Şekil optimizasyonu için gerçekleştirilen Taguchi optimizasyonunun doğruluk payının yüksek sonuçlar sunması, bu metottan elde edilen bilgilerin, M5 modelinin tasarımının

yeniden şekillendirilmesi için kullanılabileceğini göstermektedir. Ancak amaç fonksiyonu olarak alınan, aerodinamik performans kriteri C_L/C_D değeri, bu optimizasyon çalışmasında yalnızca bir konfigürasyonda (α:10° ve V_∞:10 m/s) gerçekleştirildiği için, diğer serbest akış hızı ve hücum açılarında gerçekleştirilecek nümerik analizlerde bu modellerin genel anlamda nasıl performans göstereceği, optimum tasarıma karar verme aşamasında önemli bir gerçektir. Bu yüzden Taguchi metodundan elde edilen en iyi 4 kombinasyon tasarım için daha kapsamlı bir analiz yapılmasına karar verilmiştir.

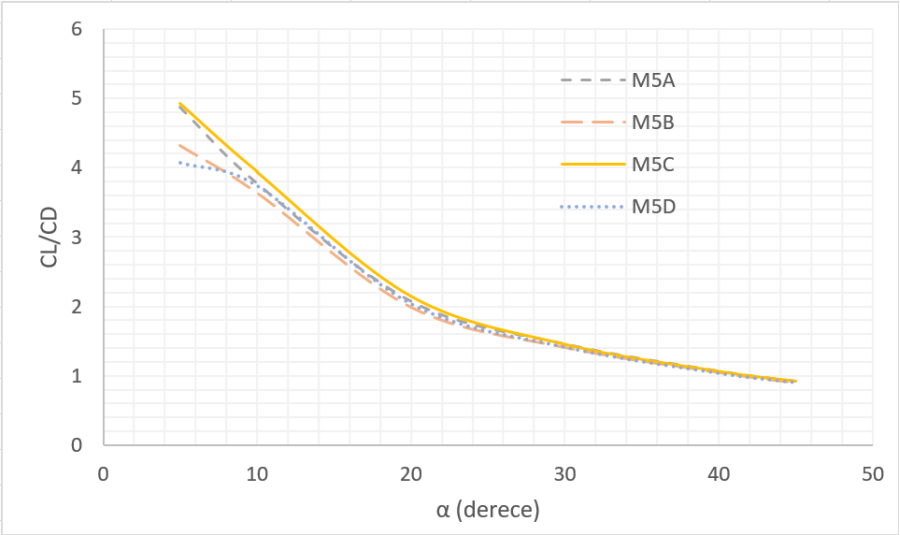
M5A, M5B, M5C ve M5D Modelleri

Taguchi optimizasyonu; S12 eğrisine ait olan, $x\left(h_{12}/c_{y_{12}}\right)$ faktörünün optimum ölçeğinin "0,2" değeri olduğunu net bir şekilde ifade ederken, S11 eğrisine ait olan, $x\left(h_{11}/c_{y_{11}}\right)$ faktörünün ölçeğinin, 0,2 veya 0,4 değerlerinin incelemeye değer olduğunu göstermektedir. Yine xD_{TP} faktörün ölçeği için de, 0,8 ve 0,6 değerlerinin incelemeye değer olabileceği düşünülmektedir. Bu yüzden Çizelge 4.6'da bu faktör seviyelerinin kombinasyonları ile oluşturulmuş 4 farklı model (M5A, M5B, M5C, M5D) sunulmuştur.

Çizelge 4.6. M5 modelinden oluşturulan 4 farklı model

Modeller	$\boldsymbol{x\left(h_{11}/c_{y_{11}}\right)}$	$\boldsymbol{x\left(h_{12}/c_{y_{12}}\right)}$	$\boldsymbol{xD_{TP}}$
M5A	0,2	0,2	0,8
M5B	0,4	0,2	0,8
M5C	0,2	0,2	0,6
M5D	0,4	0,2	0,6

Bu oluşturulan 5 farklı modelin V_∞:10 m/s'de, α:5° ile α:45° hücum açıları arasındaki yapılan nümerik analizlerinden elde edilen sonuçlardan oluşturulan grafik Şekil 4.34'te sunulmuştur.



Şekil 4.34. M5A, M5B, M5C ve M5D modellerinin, $\boldsymbol{V_\infty}$:10 $\boldsymbol{m/s}$'de $\boldsymbol{\alpha}$'ya göre $\boldsymbol{C_L/C_D}$ değişimleri

Oluşturulan 4 modelin içerisinde, Şekil 4.34'te, değişen hücum açılarına göre verdikleri aerodinamik performans kriteri olan C_L/C_D değerlerine bakıldığında, özellikle düşük hücum açılarında gösterdiği daha iyi performans ile "M5C" modeli, daha iyi performans değerleri sunmuştur.

Değerlendirme

Şekil optimizasyonu kapsamında; Taguchi metodundan edinilen etki faktörü bilgilerinden yola çıkılarak oluşturulan 4 farklı model arasından, en yüksek performansı gösteren, M5 modelindeki S1 ve S2 eğrilerinin 0,2 kat ölçeklendirilmiş ve firar noktasına kadar olan eğrilerin D_{TP} uzunluklarının 0,6 kat ölçeklendirilmiş hali olan M5C modelidir.

Tohum kısmındaki eğrilerin ölçeklendirmesi için optimum aerodinamik parametreyi veren 0,2 değeri, Taguchi metodunda eğrilere uygulanacak en düşük ölçeklendirme parametresi olarak belirlenmişti. Analizin sonucunda, bu en düşük parametrenin en uygun, optime sonucu vermesi, kanat modeli profillerinin olabildiğince inceltileceği anlamına gelmektedir. Ashraf ve ark. (2011) da, kanat kalınlığının azaldıkça LEV yapısının daha fazla pik yaptığını ve bundan dolayı ince kanat profillerinin daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdi. Tüm bunların yanı sıra, bu kanat profili inceltme

çalışması için, eğri ölçeklendirme değeri için 0,2'nin altına inilmemiştir. Çünkü bu değerin altına inildiğinde, oluşturlan biyomimetik modelin akçaaağaç tohumunun geometrik özelliklerinden uzaklaşacağı düşünülmektedir. Zira Yasuda ve Azuma (1997), akçaağaç tohumundaki kanat geometrisi özelliklerinin LEV'de büyük rol oynadığını ifade etmişlerdir. Ayrıca Mattos ve ark. (2016), dalgalı hücum kenarına sahip kanatlarda, kanat profilinin incelmesiyle, Re artışına karşın, aerodinamik performansın azalacağından bahsetmektedirler. Tüm bunlar göz önüne alınlığında; şekil optimizasyonundan M5C modelinin en uygun kanat modeli olarak karşımıza çıktığı düşünülmektedir.

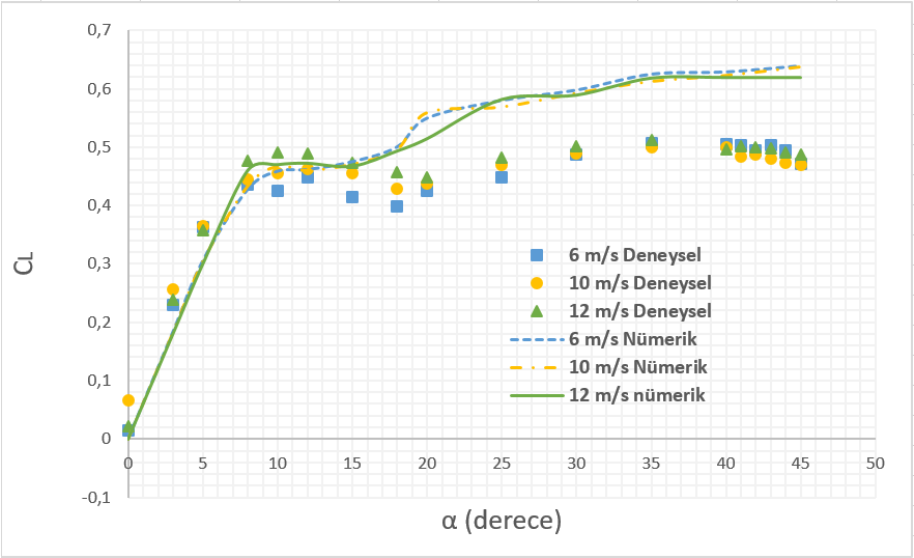
M5C modeli iki farklı kanat performansı geliştirme çalışması sonucunda elde edilen en iyi performanslı kanat modeli olduğu için, tez kapsamında yapılan çalışmanın nihai biyomimetik kanat tasarımı M5C modeli olmuştur. M5C kanat modelinin dış hatlarını oluşturan, iskelet yapısındaki eğrileri sınırlandıran eğriyi oluşturan koordinat noktalaları, Ek 3'te, L7 ve L8 eğrilerinin dışında, iskelet yapısını oluşturan S11(0,2) ve S12(0,2) eğrilerinin Fourier serisi denklem katsayıları da Ek 4'te verilmiştir.

4.4. M5C Modelinin Bulguları

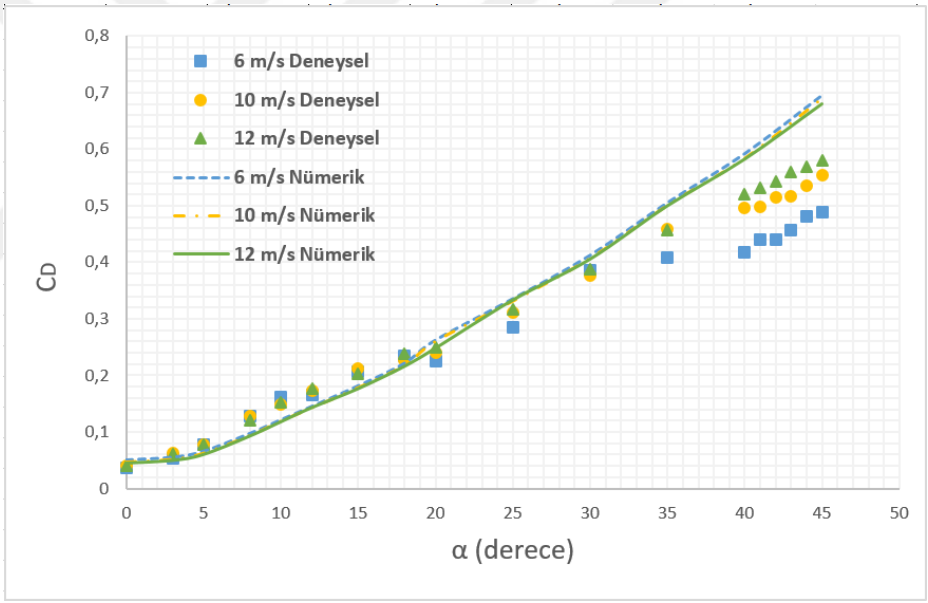
Kanat geliştirme çalışmalarından nihai kanat olarak çıkan M5C modelinin aerodinamik performansı detaylı olarak incelenmek istenmiştir. Bunun için M0 ve M5 modelinde gerçekleştirilen deneysel ve nümerik çalışmalar, aynı şartlarda, M5C modeli için de gerçekleştirilmiş ve elde edilen bulgular, bu kısımda sunulmuştur.

4.4.1. M5C Modelinin aerodinamik performansı

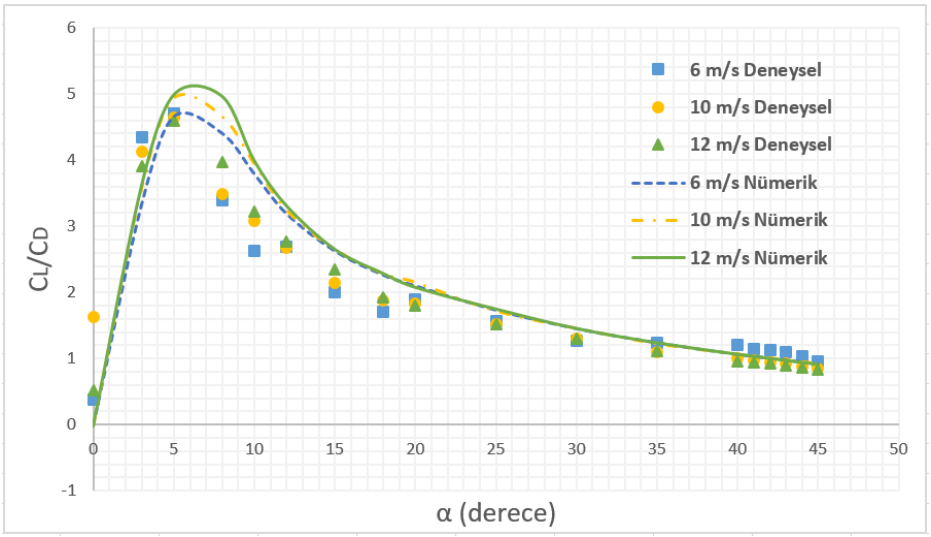
M5C modelinin; deneysel çalışma kapsamında, her bir serbest akış hızındaki, pozitif hücum açılarına bağlı kaldırma kuvveti katsayısı değişimi, Şekil 4.35'te, sürükleme kuvveti katsayısı değişimi, Şekil 4.36'da, bu iki katsayının birbirine oranı ise Şekil 4.37'de verilmiştir.



Şekil 4.35. M5C modelinin, farklı serbest akış hızlarında, $\boldsymbol{\alpha}$'ya göre $\boldsymbol{C_L}$ değişimi



Şekil 4.36. M5C modelinin, farklı serbest akış hızlarında, $\boldsymbol{\alpha}$'ya göre $\boldsymbol{C_D}$ değişimi



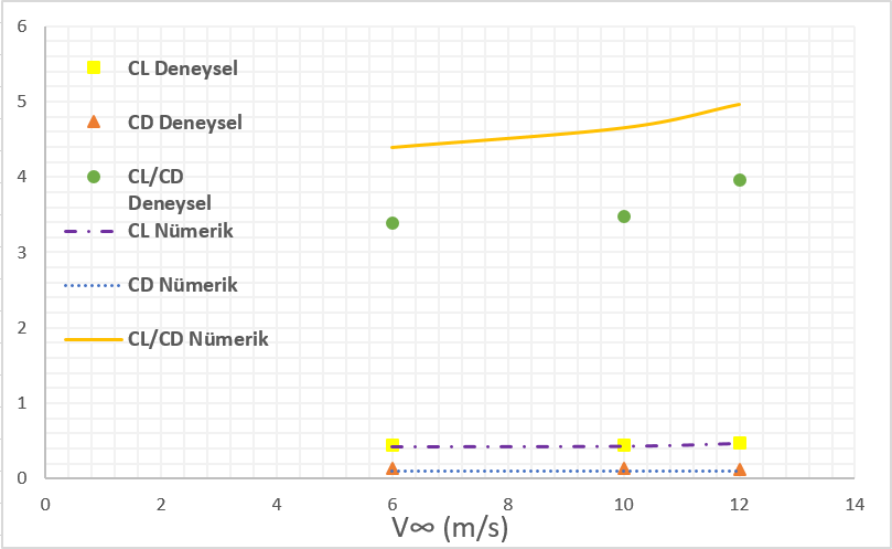
Şekil 4.37. M5C modelinin, farklı serbest akış hızlarında, $\boldsymbol{\alpha}$'ya göre $\boldsymbol{C_L/C_D}$ değişimi

Deneysel çalışmalarda; stol açısının net tayini için 40 ile 45° hücum açısı aralığında 1'er derece artırılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla, Şekil 4.35'ten de görüleceği üzere; M5C modelinin stol açısı, tüm serbest akış hızlarında, 44° olarak belirlenmiştir.

M5C modelinde uygulanan şekil optimizasyonu sonrasında C_D katsayısının diğer modellere göre düştüğü de Şekil 4.36'dan görülmektedir.

Şekil 4.37'den M5C modelinin C_L/C_D oranına bakıldığında; bu ifadenin en büyük değeri, tüm hızlarda, 5° hücum açısında görülmüştür.

M0 ve M5 modelinde verildiği gibi, Şekil 4.38'de; 8° hücum açısında, serbest akış hızlarına göre M5C modelinin aerodinamik performans parametreleri verilmiştir.

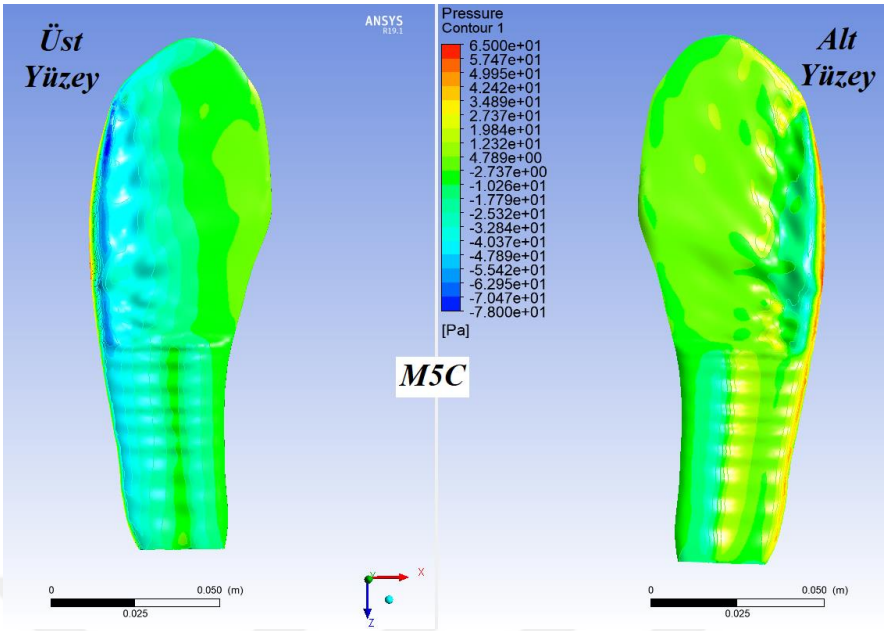


Şekil 4.38. M5C modelinin, farklı serbest akış hızlarında, $\boldsymbol{\alpha}$'ya göre $\boldsymbol{C_L/C_D}$ değişimi

M5C modelinde de, diğer modellerde olduğu gibi, serbest akış hızlarındaki değişime göre aerodinamik performans parametrelerinde kayda değer değişimler gerçekleşmemiştir.

4.4.2. M5C Modelinin nümerik akış görselleri

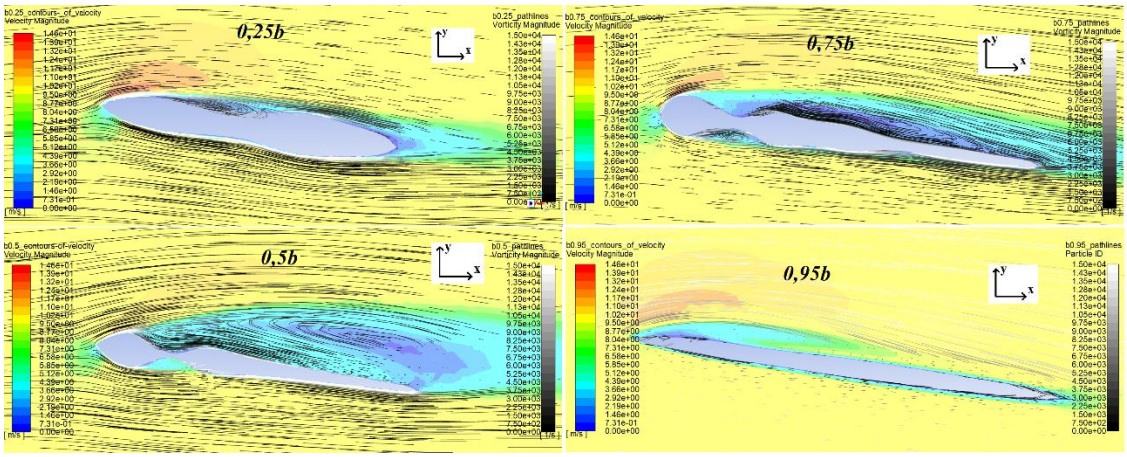
M5C modelinin en yüksek C_L/C_D oranını veren hücum açısı olan 5°'de ve 10 m/s hızdaki basınç konturları, Şekil 4.39'da verilmiştir.



Şekil 4.39. M5C modelinin, $\boldsymbol{\alpha}$:5° ve $\boldsymbol{V_\infty}$:10 $\boldsymbol{m/s}$'deki basınç konturları

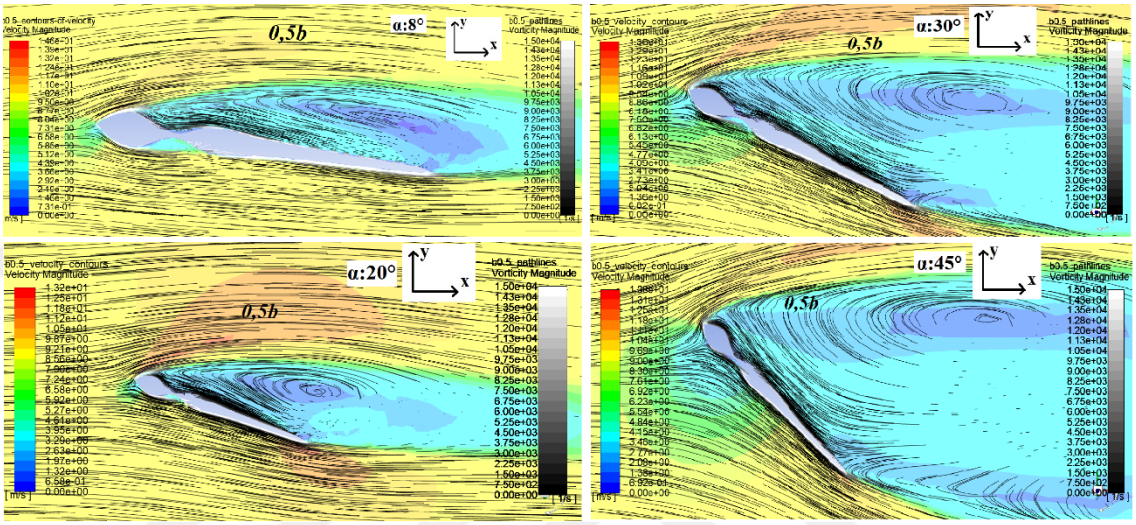
Basınç konturlarına bakıldığında; M5C modelinin hücum kenarındaki basınç farklarının yoğunluğu dikkat çekmektedir. Ayrıca yüzey topografyasında elde edilen sırasıyla tepe-çukur yapıların, çukur kısımlarında oluşan yüksek basınç farkları da, geliştirme çalışmasından beklenen etkinin kanıtı niteliğinde olmuştur.

M5C modelinin Şekil 4.10'da kanat boyu kesitlerinden verilen akış çizgileri ise; α:8° ve V_∞:10 m/s için, Şekil 4.40'da verilmiştir.



Şekil 4.40. M5C modelinin, $\boldsymbol{\alpha}$:8° ve $\boldsymbol{V_\infty}$:10 $\boldsymbol{m/s}$'deki belli kesitlerindeki hız konturları ve girdap eğilimi değerleriyle akış çizgileri

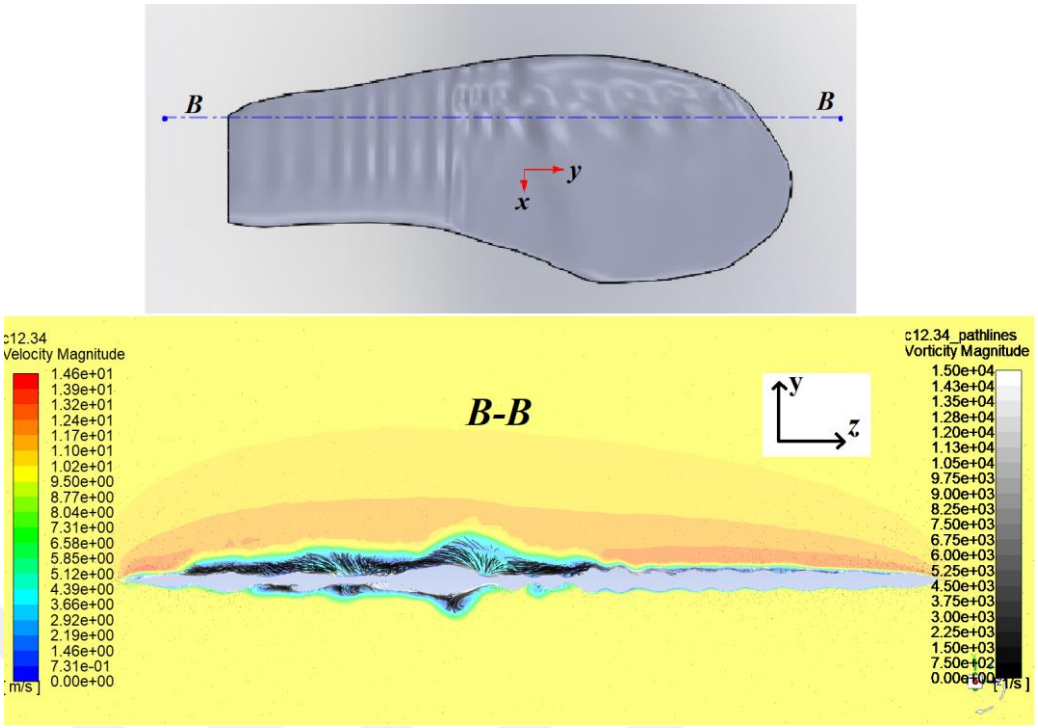
M5C modelinin, M0 ve M5 modeli gibi, stol açısının 40° ile 45° arasında olduğu tespit edilmişti. Stol oluşumunu sağlayan akış ayrılmalarını incelemek üzere; M5C modelinin orta kesitinden alınan akış çizgileri ve girdap eğilimi görselleri, Şekil 4.41'de, 8°, 20°, 30° ve stol durumundaki 45° hücum açılarında, 10 m/s serbest akış hızı için sunulmuştur.



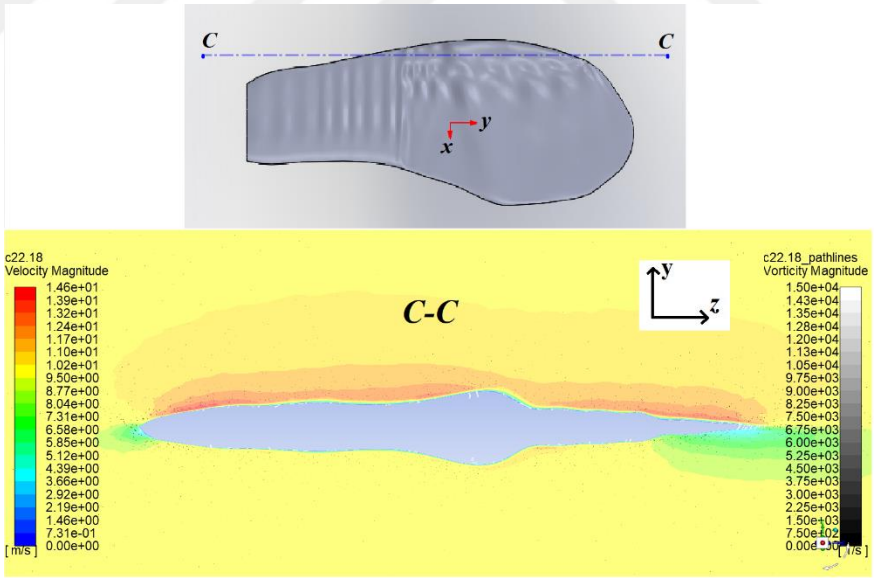
Şekil 4.41. M5C modelinin, $\boldsymbol{\alpha}$:8°, 20°, 30°, 45° ve $\boldsymbol{V_\infty}$:10 $\boldsymbol{m/s}$'deki 0,5b kesitindeki hız konturları ve girdap eğilimi değerleriyle akış çizgileri

Bu şekilden; stol açısı olan 44°'ye doğru gidildikçe, akış ayrılmalarının büyüdüğü dikkat çekmekte ve stol olduktan sonra kanadın iz bölgesinde akış ayrılmalarından kaynaklı büyük girdaplar dikkat çekmektedir. Akçaağaç tohumundan esinlenilen bu modellerin yüksek hücum açılarında, geleneksel kanatlara nazaran, akış ayrılmalarını geciktirdiği bu görsellerden anlaşılmaktadır. Hsu ve ark. (2017)'da, akçaağaç tohumundan esinlenilen biyomimetik kanat modellerinde stol açısının çok yüksek değerlerde olduğunu belirtmişlerdi.

Nümerik analizden elde edilen akış çizgilerine bakıldığında; özellikle kanadın orta kısımlarında oluşan büyük girdap ve girdabın içindeki hız konturları dikkat çekmiştir. Bu girdap yapılarını inceleme amaçlı; Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'te hücum kenarına yakın bir bölgeden akış çizgileri, girdap eğilimi değerleriyle ve hız konturlarıyla birlikte verilmiştir.



Şekil 4.42. M5C modelinin, $\boldsymbol{\alpha}$:8° ve $\boldsymbol{V_\infty}$:10 $\boldsymbol{m/s}$'deki B-B kesitindeki, hız konturları ve girdap eğilimi değerleriyle akış çizgileri



Şekil 4.43. M5C modelinin, $\boldsymbol{\alpha}$:8° ve $\boldsymbol{V_\infty}$:10 $\boldsymbol{m/s}$'deki C-C kesitindeki, hız konturları ve girdap eğilimi değerleriyle akış çizgileri

Kanat boyu kesit görüntülerindeki akış çizgilerine bakıldığında; hücum kenarına doğru gidildiğinde basınç farkını oluşturan etkiler, alt ve üst yüzeydeki akış hızı farkları olurken, tepe-çukur yapılarının etrafında girdaplar olmuştur.

4.4.3. M5C Modelinin değerlendirmesi

Akçaağaç tohumundan esinlenilerek oluşturulan M0 modelinin, kanat geliştirme çalışmasına tabi tutulmasıyla elde edilen son kanat model olan M5C kanat modelinin sunulan aerodinamik performanslarına bakıldığında; akçaağaç tohumunun literatürde sunulan aerodinamik özelliklerine benzer, ancak ilk modellere göre bu özelliklerine etki eden olguların geliştirilmiş olarak karşımıza çıktığını gördük. Ayrıca bu modeli temsil eden eğriler ve dolayısıyla Fourier denklemleri de sadece 4 tane olmuştur. Bu eğriler, eklerde özellikleri verilen S11(0,2), S12(0,2), L7, L8 eğrileridir.

4.5. Oluşturulan Biyomimetik Modellerin Kıyaslanması ve Tartışma

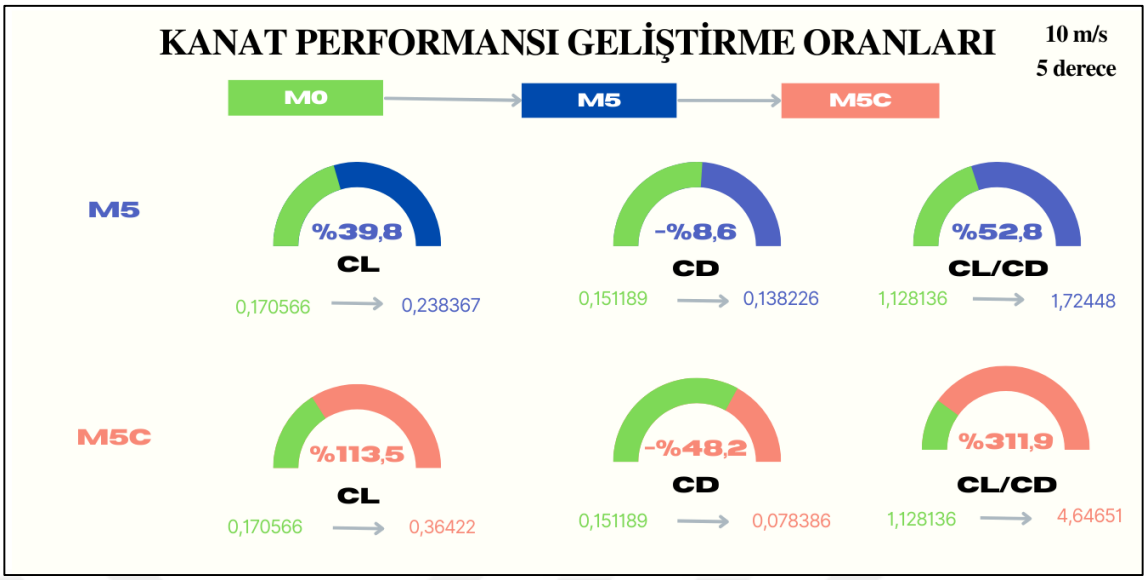
Bu kısımda, tez çalışması kapsamında oluşturulan M0, M5 ve M5C biyomimetik kanat modellerinin aerodinamik performansları kıyaslanacaktır. Yapılan kıyaslamada; deneysel ve nümerik çalışmalardan elde edilen sayısal veriler ve nümerik çalışmadan elde edilen akış görselleri kullanılacaktır.

Akçaağaç tohumundan esinlenilerek ve kanat geliştirme çalışmasıyla oluşturulan 3 modelin, 10 m/s'de aerodinamik performanslarının sayısal değerleri, 5°, 8° ve 10° hücum açılarında Çizelge 4.7'de verilmiştir.

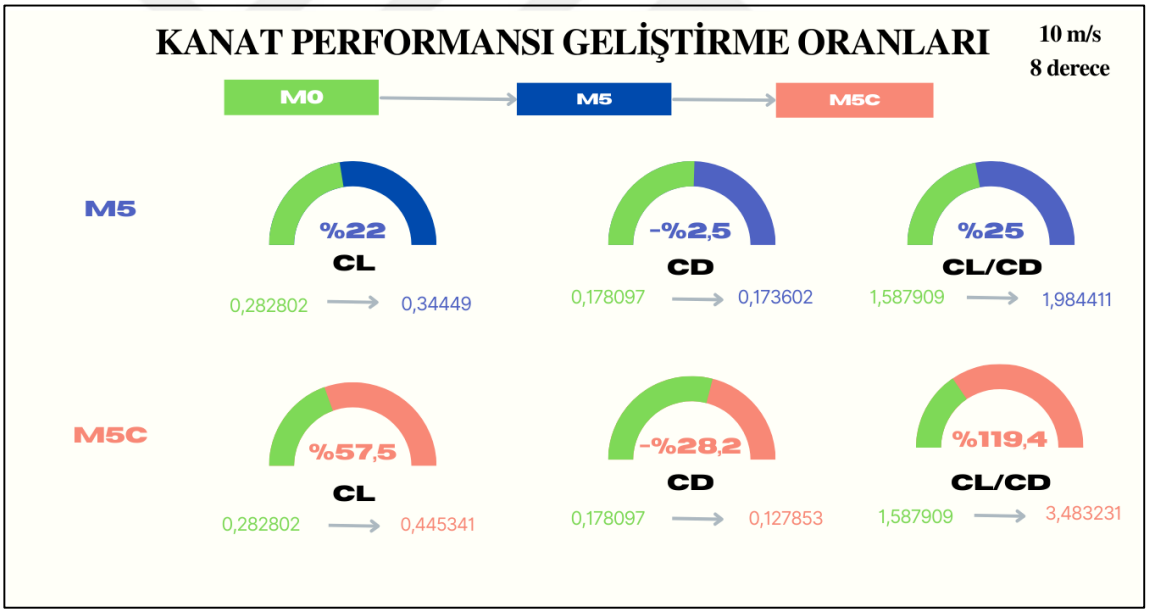
Çizelge 4.7. M0, M5 ve M5C modellerinin 10 m/s'de, bazı hücum açılarında aerodinamik performanslarının sayısal ifadesi

Performans	α	Çalışma	M0	M5	M5C
C_L	5°	Deneysel	0,170562	0,238367	0,364222
		Nümerik	0,212	0,29359	0,30316
	8°	Deneysel	0,282802	0,344497	0,445341
		Nümerik	0,288	0,42053	0,43233
	10°	Deneysel	0,322363	0,371749	0,455297
		Nümerik	0,342	0,207468	0,46671
C_D	5°	Deneysel	0,151189	0,138226	0,078386
		Nümerik	0,142	0,13961	0,06147
	8°	Deneysel	0,178097	0,173602	0,127853
		Nümerik	0,175	0,16814	0,09282
	10°	Deneysel	0,20845	0,207468	0,147841
		Nümerik	0,198	0,19436	0,11838
C_L/C_D	5°	Deneysel	1,128136	1,72448	4,646505
		Nümerik	1,492958	2,10293	4,931837
	8°	Deneysel	1,587909	1,984411	3,483231
		Nümerik	1,645714	2,501071	4,657725
	10°	Deneysel	1,546479	1,791836	3,079636
		Nümerik	1,727273	2,212647	3,942473

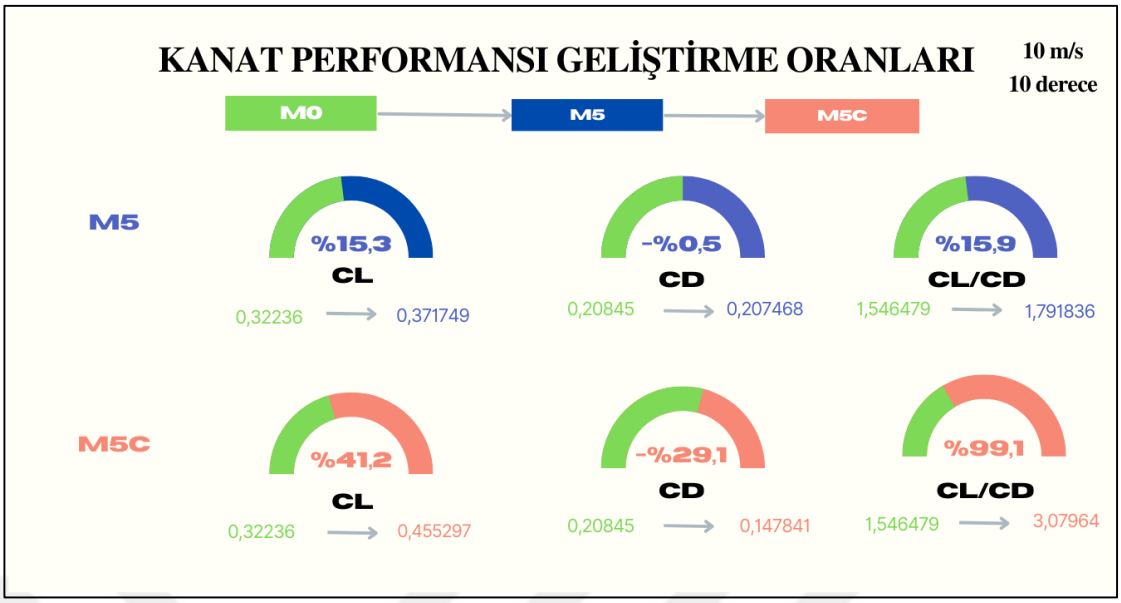
Buradaki deneysel veriler ışığında; kanat geliştirme çalışmasının fayda oranlarını anlamak için, 10 m/s serbest akış hızında, M5 ve M5C modellerinin, M0 modeline göre aerodinamik performanslarının gelişim oranları, 5° hücum açısında Şekil 4.44, 8° hücum açısında Şekil 4.45, 10° hücum açısında Şekil 4.46'da oransal grafikler verilmiştir.



Şekil 4.44. M5 ve M5C modellerinin, M0 modeline göre $\boldsymbol{\alpha}$:5° ve $\boldsymbol{V_\infty}$:10 $\boldsymbol{m/s}$'deki, aerodinamik performanslarının kıyaslanması



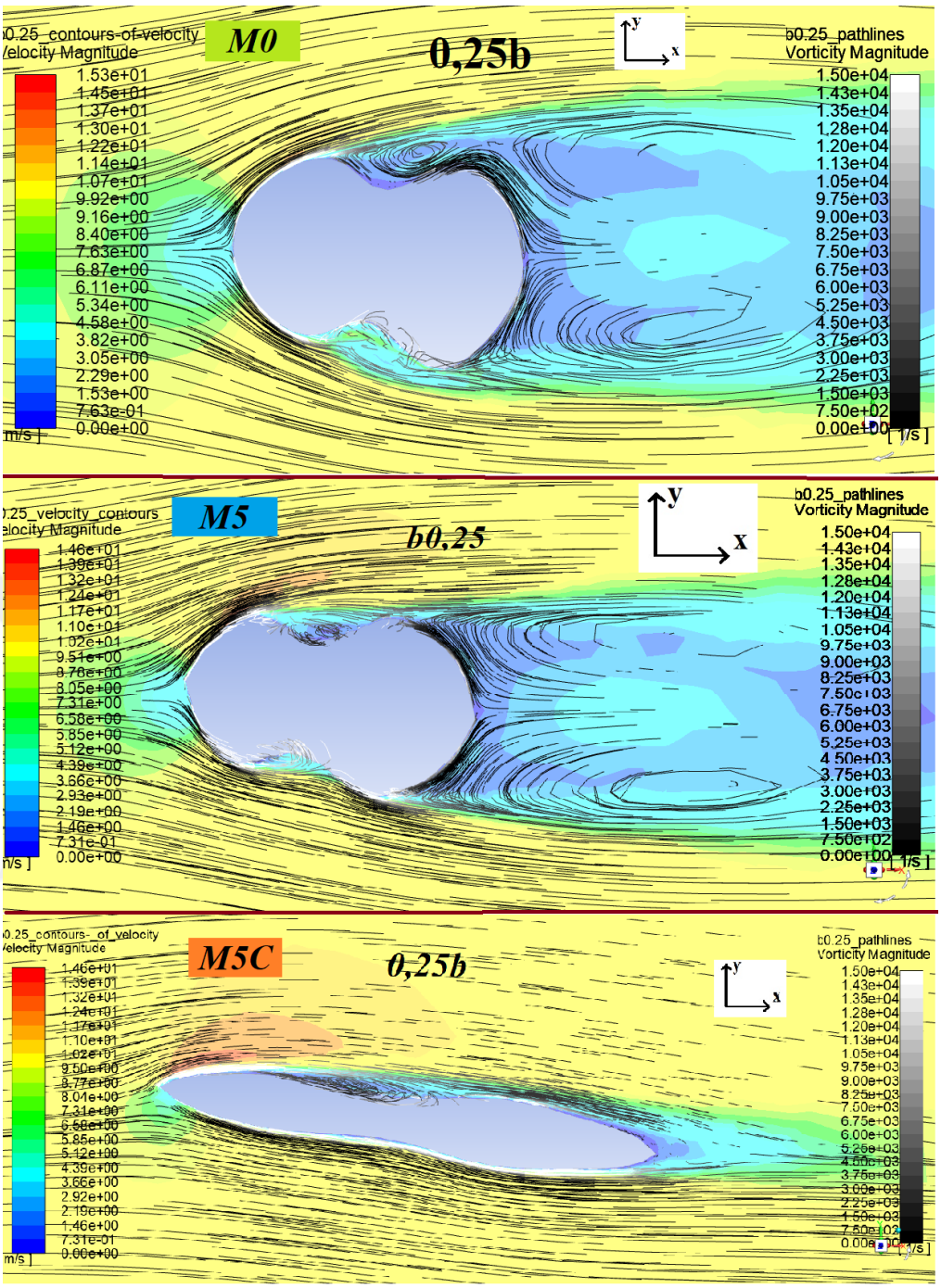
Şekil 4.45. M5 ve M5C modellerinin, M0 modeline göre $\boldsymbol{\alpha}$:8° ve $\boldsymbol{V_\infty}$:10 $\boldsymbol{m/s}$'deki, aerodinamik performanslarının kıyaslanması



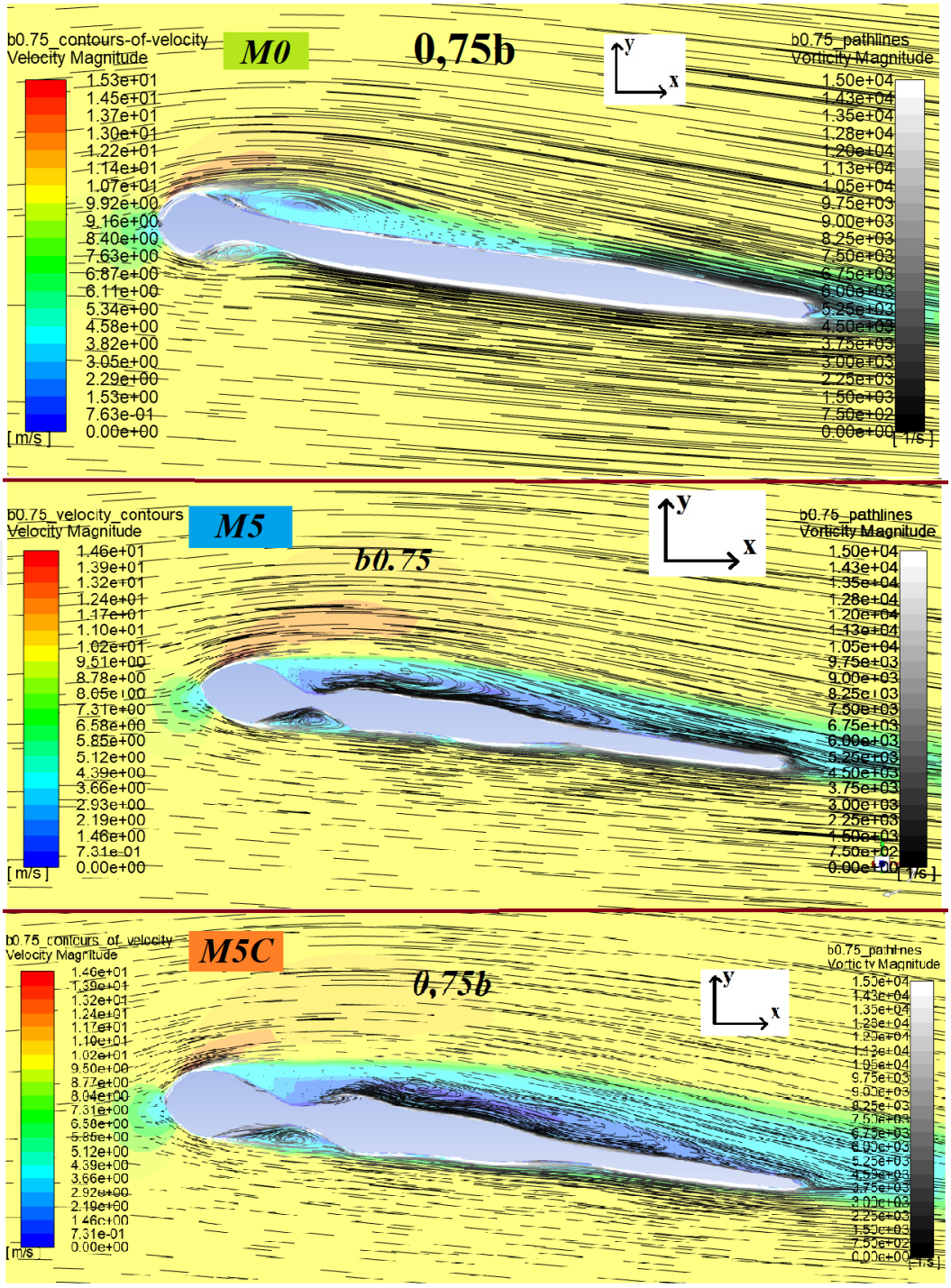
Şekil 4.46. M5 ve M5C modellerinin, M0 modeline göre $\boldsymbol{\alpha}$:10° ve $\boldsymbol{V_\infty}$:10 $\boldsymbol{m/s}$'deki, aerodinamik performanslarının kıyaslanması

M5 ve M5C modellerinin gelişim oranları, verilen hücum açıları için incelendiğinde; özellikle M5C modelinin en yüksek C_L/C_D oranını veren hücum açısı olan 5° için yaklaşık %311'lik performans artışı dikkat çekerken, M5 modeli ile M5C modeli arasındaki gelişim farkı da yine dikkat çeken unsurlardan olmuştur.

Kanat modellerinin tohum kısımlarında (0,25b) ve yaprak kısımlarından (0,75b) olmak üzere, akıştan dolayı girdap oluşumlarını ve hız konturlarını incelemek için, üç kanada ait, α:8° ve V_∞:10 m/s'deki akış görselleri sırasıyla Şekil 4.47 ve Şekil 4.48'de sunulmuştur.



Şekil 4.47. Üç kanada ait, tohum kısmındaki kesitte, $\boldsymbol{\alpha}$:8° ve $\boldsymbol{V_\infty}$:10 $\boldsymbol{m/s}$'deki hız konturları ve girdap eğilimi değerleriyle akış çizgileri



Şekil 4.48. Üç kanada ait, yaprak kısmındaki kesitte, $\boldsymbol{\alpha}$:8° ve $\boldsymbol{V_\infty}$:10 $\boldsymbol{m/s}$'deki hız konturları ve girdap eğilimi değerleriyle akış çizgileri

Şekil 4.47'de görüldüğü üzere; tohum kısmında, M5C modeli ile yapılan kanat kalınlığındaki azaltma işlemi bazı etkilere sebep olmuştur. M5C modelinde hücum kenarından itibaren, üst yüzeyde, akış hızında biraz artış olsa da asıl etki; M0 ve M5

modellerinde iz bölgesindeki, sürtünmeyi artırarak aerodinamik performansı kötü etkileyebilecek girdaplar, M5C modelinde görülmemiştir. İnce ve tepe çukur yapılı bir kanat yüzeyinde, akış, kanat yüzeyini düzgün bir şekilde takip edebilmiştir.

Yaprak kısmındaki kesite (0,75b) bakıldığında ise; M5 ve M5C modelleriyle oluşturulan tepe çukur yapıların etkisini görmek mümkündür. Hücum kenarından itibaren tepe çukur yapılarıyla, o kısımdaki girdapların boyutları kanat yüzeyine yayılarak büyümüştür. Bunun da LEV etkisi ile kaldırma kuvvetini artırarak kaldırma kuvvetine katkı sağladığı düşünülmektedir.

Son olarak; deneysel ve nümerik çalışmada kullanılan, akçaağaç tohumundan oluşturulan 3 ana biyomimetik kanat modelinin geometrik özellikleri Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Çalışmada kullanılan M0, M5 ve M5C modellerinin bazı geometrik özellikleri

Modeller	**Çalışma**	**Planform alan S (m^2)**	**Ortalama veter uzunluğu c (m)**	**Kanat boyu b (m)**
M0	Deneysel	0,013391	0,053564	0,25
	Nümerik	0,005485	0,03428	0,16
M5	Deneysel	0,013391	0,053564	0,25
	Nümerik	0,005485	0,03428	0,16
M5C	Deneysel	0,016547	0,066187	0,25
	Nümerik	0,00607	0,040467	0,15

5. SONUÇ VE YORUMLAR

5.1. Giriş

Bu bölümde; akçaağaç tohumunun geometrik analizi ile oluşturulan M0 modeli, bu modelden yapılan topografya optimizasyonu sonucu oluşturulan M5 modeli ve bu modelden, şekil optimizasyonu ile oluşturulan M5C modeliyle gerçekleştirilen deneysel ve nümerik çalışmalardan çıkarılan sonuç ve yorumlar sunulacaktır. Ayrıca bu tez çalışmasından sonra gelecekte yapılabilecek çalışmalar için de fikirler verilecektir.

5.2. Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalar sonucu elde edilen verilerden çıkarılan sonuçlar şu şekilde olmuştur:

Biyomimetik bir model tasarımı yaparken; bu çalışmada olduğu gibi, alt ve üst yüzeyden simetrik olması gibi bazı özelliklerle tasarımın yapılması mümkün görünmektedir. Bu istenen özelliklerle tasarım aktarma işlemi, biyomimetik tasarım şemalarına bağlı kalınarak, biyolojik model üzerinden üzerinden alınan doğru ölçümlerle etkili kılınabilir.

Biyolojik bir yapı olan akçaağaç tohumunun, biyomimetik bir kanat olarak aktarımı, bu çalışmada sunulan yöntemle mümkün olduğu gibi, biyolojik modelin doğada sergilediği özellikler de bu yöntemlerle aktarılabilir. Ayrıca aktarılan biyolojik modelin ölçeklendirme ile bu özelliklerinin değişmediği de görülmüştür.

Bu çalışmada yapılan analitik ifade ile biyomimetik bir kanat tasarımının tasarım parametreleri, geleneksel bir kanat yapısının tasarım parametreleri gibi çıkarılabilir. Bu çıkarım için, geleneksel kanatlarda olduğu gibi, üç boyutlu kanat modelinin kesit eğrilerinin özellikleri kullanılabilir ve bu eğrilerin temsili, çok düşük bir hata payı ile Fourier serisi denklemleri ile yapılabilir.

Seçilen akçaağaç tohumu numunesinden çıkarılan ilk biyomimetik tasarım olan M0 modelinde; en yüksek C_L/C_D oranı, değişen serbest akış hızlarında, 8° ve 10° civarlarında

görülmüştür. Bu değer: 1,52 ve 1,68 arasında değişmektedir. Bu modeldeki stol açısı ise 45°'ye yakın hücum açılarında belirlenmiştir.

Nümerik akış görselleri, tez çalışmasında, optimizasyon çalışmalarını yapmak için önemli referans bilgiler sağlamıştır. Özellikle LEV oluşumlarının incelenmesi ve basınç konturları, kanat geliştirme çalışmaları için elde edilecek daha iyi nicel veriler için optimizasyon çalışmalarının yönünü belirlemiştir.

Biyomimetik modelin, her bir tasarım parametresinin analitik olarak ifade edilip tasarlanmasından dolayı model şekli üzerinde istenildiği gibi değişim veya performans geliştirme çalışması yapmak mümkün olmuştur.

Bundan yola çıkılarak, ilk yapılan kanat performansı geliştirme çalışması için; M0 modelinin yüzey topografyasının üzerinde belirlenen yüksek basınç farkı barındıran bölgeler olumlu bir etki sunmuştur. Topografya optimizasyonunun amacı olan; bu bölgelerin genel model yapısına yayılmasıyla oluşturulan M5 modeli, M0 modeline göre %15 ile %50 arasında, hücum açısına bağlı değişen performans artışı sağlamıştır. Ayrıca, M0 modeli 36 denklem ile tanımlanırken, M5 modeli sadece 4 denklem ile tanımlanabilmiştir.

M5 modelinde; en yüksek C_L/C_D oranı, değişen serbest akış hızlarında, 8° hücum açısında görülmüştür. Bu değer: 1,7 ve 1,98 arasında değişmektedir. Bu modeldeki stol açısı ise 44°'ye yakın hücum açılarında belirlenmiştir.

Topografya optimizasyonu ile oluşturulan tepe-çukur yapılar, kanadın alt yüzeyindeki akış hızını düşürürken, üst kısmında ise LEV oluşumlarına destek vermiştir. Böylece kanadın kaldırma kuvveti katsayısında artış elde edilmiştir. Genel anlamda biyomimetik kanatların alt kısmında LEV yapıları görülmemiştir. Sacedo ve ark. (2013),'da maun ağacı tohumu ile yaptıkları çalışmada; kanat tabanında LEV oluşmadığını rapor etmişlerdi.

İkinci kanat geliştirme çalışması olan, şekil optimizasyonunda; M5 modelininin tohum kısmını oluşturan eğrilerin kalınlığının azaltılacağı ve planform alanın sınırlı şekilde genişletileceği optimum değerleri, Taguchi metodu başarılı şekilde belirlemiştir. Bu şekil optimizasyonu, Taguchi metodu gibi istatistiki metotların biyomimetik bir kanadın performans geliştirme çalışmasına uygulanabilirliğini kanıtlamıştır.

Şekil optimizasyonu sonucu daha ince bir kanat profilinin oluşturduğu M5C modeli elde edilmiştir. Daha ince kanat profillerinin sürükleme kuvvetini düşürücü bir etkiye sahip olduğu ancak aerodinamik perfromanstan taviz verebileceği bilinmekteydi (Anderson, 2011). Ancak, bu optimizasyon ile kanat profilleri inceltilirken, tepe çukur yapısının genel kanat yapısında oluşturduğu daha geniş LEV etkileri kaldırma kuvvetinin artmasına bile sebep olmuştur. Böylece hem sürükleme düşürülmüş hem de kaldırma kuvveti artırılmıştır. Bu artış ve düşüş oranları her hücum açısında farklı şekilde karşımıza çıkmaktadır.

Şekil optimizasyonu sonucunda, tohum yapısındaki eğrilerin %80 oranında azaltılmasının en yüksek performans kriterini sağladığı görülmüştür. Bu değer, çalışma için belirlenen en yüksek küçültme parametresidir. Şekil optimizasyonu sonucu yapılan diğer bir iyileştirme ise; modelin planform alanının, firar kenarı çizgisine kadar %40 oranına artırılmasıdır. Bu oran, Taguchi metotu için belirlenen ölçeklendirme parametrelerinin arasında bir değerdir.

Şekil optimizasyonu ile oluşturulan M5C modelindeki, M0 modeline göre aerodinamik performans artışı, değişen hücum açılarında %100 ile %300 arasında değişmektedir.

M5C modelinde; en yüksek C_L/C_D oranı, değişen serbest akış hızlarında, 5° ve 8° civarındaki hücum açısında görülmüştür. Bu değer: 4,6 ve 4,93 arasında değişmektedir. Bu modeldeki stol açısı ise 44°'ye yakın hücum açılarında belirlenmiştir.

M0, M5 ve M5C tasarımlarında, akçaağaç tohumu ile daha önce yapılan çalışmalar gibi geç stol olma özelliği, kaldırma kuvvetine LEV'lerin katkısı gibi aerodinamik performans özellikleri görülmüştür. Oluşturulan modellerdeki ölçeklendirmeler de bu özellikleri

değiştirmemiştir. Ayrıca 22000-44000 Re aralığına denk gelen, 6, 10 ve 12 m/s serbest akış hızlarında yapılan deneylerde modellerin aerodinamik performansının hıza bağlı olarak çok değişmediği, stabil bir yapı sergilediği görülmüştür. C_L/C_D oranları genel olarak 30°-35° hücum açılarına kadar 1'den büyük kalırken, M0 ve M5 modellerinde, değişen hücum açılarına göre M5C modeline göre daha stabil kalmıştır.

Kanat geliştirme çalışmalarının sonunda elde edilen M5C modeli, çalışmanın nihai tasarımı olmuştur. Bu model, özellikle 3° ile 12° hücum açılarında gösterdiği yüksek performans ve hız değişimlerine karşı gösterdiği stabilite ile dikkat çekmiştir. M5C modeli, 4 eğri ve dış hat koordinatları ile kolayca tasarımı aktarılabildiği gibi, geometrik özellikleri de geleneksel kanatların uygulandığı alanlara uygun bir şekil yapısı vermiştir.

Özellikle M5C modeli olmak üzere, tez çalışmaları kapsamında oluşturulan tüm biyomimetik modeller, rüzgâr enerjisi alanı için önemli potansiyeller barındırmaktadır. Geç stol olma, düşük rüzgâr hızlarında yüksek C_L/C_D dğerlerinin elde edilmesi gibi aerodinamik özellikler, M5C modeli için rüzgârdan güç elde eden sistemlere uygulanabilecek yeni bir kanat yapısı olma ihtimali vermektedir. Ayrıca rüzgâr enerjisini kullanarak, kaldırma kuvvetinden yararlanan hava taşıtları için de, bu biyomimetik modeller, geleneksel kanatlara göre üstün özellikler sağlayablirler.

Sonuç olarak; yenilenebilir enerji türlerinden olan rüzgâr enerjisi için, biyomimetik model tasarımı, akçaağaç toumunun doğada sahip olduğu aerodinamik özelliklerin bu çalışmada olduğu gibi aktarılarak oluşturlduğu ve geliştirildiği M5C modeli gibi yapılabilir. Potansiyel faydalar yapılacak yeni çalışmalar ile araştırılabilir.

5.3. Tavsiye ve Gelecek Çalışmaları

Bu çalışmada yapılan deneysel ve nümerik çalışmalar için; akçaağaç tohumunun doğada düşük rüzgâr hızlarına maruz kalmasından dolayı, görece düşük serbest akış hızları seçilmiştir. Oluşturlan biyomimetik modeller, düşük serbest akış hızlarında, 2 katına kadar değişen hızlarda stabil bir aerodinamik performans yapısı sergilemiştir ancak daha yüksek hızlar için hatta subsonik hızlar için bu modellerin aerodinamik performansları

incelenebilir. Ayrıca modellerin moment ölçümleri ile geleneksel kanatlarla kıyaslamaları da, yapılabiliecek diğer bir performans ölçümü çalışmasıdır. Gelecekte daha kapsamlı hız parametreleri ile bu deneylerin tekrarlanması düşünülmektedir.

Çalşımada tasarım parametreleri bulunan M0, M5 ve M5C modelleri için başka kanat geliştirme çalışmaları uygulanabilir veya daha detaylı analizlerle bu çalışmada sunulan geliştirme adımları tekrarlanabilir. Örneğin şekil optimizasyonu kımındaki Taguchi metodu için belirlenen ölçeklendirme faktörleri genişletilebilir veya daha sık bir aralıkta gerçekleştirilebilir. Tezin ekler kısmında sunulan tasarım parametreleri, herhangi bir araştırmacıya bu çalışmalar için imkân vermektedir.

Çalışmanın nihai tasarımı olan M5C tasarımı, rüzgâr enerjisi alanında, biyomimikri biliminin bir uygulaması olarak bazı sistemlerde yer alabilir. Örneğin; rüzgâr enerjisini elektirik enerjisine dönüştüren rüzgâr türbinleri bu uygulamalar için uygun olabilir. M5C modeli, kaldırma kuvveti etkisine dayalı bir rüzgâr türbini kanadı için geleneksel kanatlar yerine uygulandığında etkili sonuçlar verebilir. Çünkü bu model, düşük rüzgar hızlarında kullanabilecek olup, aynı zamanda, değişen rüzgar hızlarında da stabil aerodinamik performans göstermektedir. Bu da, rüzgâr türbinleri için; düşük rüzgâr hızlarında da enerji üretebilecek, aynı zamanda rüzgâr hızı değişse de dönme hızında kayda değer değişimler oluşturmayacak bir kanat demektir.

M5C modelinin, yenilenebilir enerji türlerinden olan rüzgâr enerjisi için potansiyeli, geleneksel kanatlarla kıyaslanıp incelenebilir. Bunun için; bu modeli oluşturan eğrilerin benzerleri olan, rüzgâr türbinleri için günümüzde kullanılan kanat profilleri araştırılabilir. Bu kanat profilleri ile yapılacak aerodinamik performans kıyaslamalarından sonra M5C modeli, bir rüzgar türbinine entegre edilip, bu sistem için sağlayacağı etkiye bakılabilir. Seidel ve ark. (2017), Holden ve ark. (2015) ve Hsu ve ark. (2017), akçaağaç tohumundan esinlenerek oluşturdukları kanat modellerini, rüzgar türbinlerine entegre ederek yaptıkları çalışmalarında; bu biyomimetik kanadın geleneksel kanatlara nazaran, rüzgar türbininin aerodinamik ve mukavemet performansına daha fazla katkı verdiğini rapor etmişlerdir. Bu tez çalışması ile oluşturulan kanat modelinin, rüzgar türbini gibi sistemlere entegre

edilerek yapılacak çalışmalar, doktora sonrası yapılması planlanan gelecek çalışmaları arasında yer almaktadır.

KAYNAKLAR

Abbott, I. H., Von Doenhoff, A. E., & Stivers Jr, L. (1945). *Summary of airfoil data* (No. NACA-TR-824).

Abbott, I. H., & Von Doenhoff, A. E. (1959). *Theory of wing sections: including a summary of airfoil* data. Dover publıcatıons,

Altshuller, G.S. (1984) Creativity as an Exact Science: The Theory of the Solution of Inventive Problems. CRC Press, London. https://doi.org/10.1201/9781466593442

Anderson, J. (2011). *Fundamentals of Aerodynamics (SI units)*. McGraw-Hill Higher Education.

Anderson Jr, J. D., & Anderson, J. D. (1998). *A history of aerodynamics: and its impact on flying machines* (No. 8). Cambridge university press.

Anderson, J. D., & Bowden, M. L. (2005). *Introduction to flight* (Vol. 582). McGraw-Hill Higher Education.

ANSYS, I. (2013). *ANSYS Fluent Theory Guide* (Release 15.0).

Antony, J. (2014). *Design of experiments for engineers and scientists*. Elsevier.

Ashraf, M. A., Young, J., & Lai, J. C. S. (2011). Reynolds number, thickness and camber effects on flapping airfoil propulsion. *Journal of Fluids and structures*, *27*(2), 145-160.

Aslam, D. M., Abu-Ageel, A., Alfatlawi, M., Varney, M. W., Thompson, C. M., & Aslam, S. K. (2014). Passive Maple-Seed Robotic Fliers for Education, Research and Entrepreneurship. *Journal of Education and Training Studies*, *2*(2), 206-216.

ATI Industrial Automation. (2022). *F/T Sensor: gamma*. https://www.ati-ia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=gamma

Attinger, E. O., Anne, A., & McDonald, D. A. (1966). Use of Fourier series for the analysis of biological systems. *Biophysical journal*, *6*(3), 291-304.

Azuma, A., & Yasuda, K. (1989). Flight performance of rotary seeds. *Journal of Theoretical Biology*, *138*(1), 23-53.

Badarnah, L., & Kadri, U. (2015). A methodology for the generation of biomimetic design concepts. *Architectural Science Review*, *58*(2), 120-133.

Bar-Cohen, Y. (2005). *Biomimetics: biologically inspired Technologies*. CRC press.

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

Bar-Cohen, Y. (2006). Biomimetics—using nature to inspire human innovation. *Bioinspiration & biomimetics*, *1*(1), 1-12.

Baumeister D, Tocke R, Dwyer J, Ritter S, Benyus J. (2013). *The Biomimicry Resource Handbook: A Seed Bank of Best Practices*. Biomimicry 3.8.

Bechert, D., & Reif, W. (1985). On the drag reduction of the shark skin. In *23rd Aerospace sciences meeting*.

Biomimicry Institue. (2017). *Biomimicry Design Spiral*. https://toolbox.biomimicry.org/wp-content/uploads/2017/10/Design.Spiral-Diagram_10.17.pdf

Birch, J. M., Dickson, W. B., & Dickinson, M. H. (2004). Force production and flow structure of the leading edge vortex on flapping wings at high and low Reynolds numbers. *Journal of Experimental Biology*, *207*(7), 1063-1072.

Bogatyrev, N. R., & Vincent, J. F. (2008, December). *Microfluidic actuation in living organisms: a biomimetic catalogue* [Conference paper]. Proceedings of the 1st European Conference on Microfluidics, Bologna.

Boldt, K. (2022, 3 March). *Aerodynamic measurements: Boundary layer components*. https://www.grasacoustics.com/blog/aerodynamic-measurements-components-of-the-boundary-layer

Bomphrey, R. J., Lawson, N. J., Taylor, G. K., & Thomas, A. L. (2006). Application of digital particle image velocimetry to insect aerodynamics: measurement of the leading-edge vortex and near wake of a Hawkmoth. *Experiments in Fluids*, *40*(4), 546-554.

Bowman, J., Sanders, B., & Weisshaar, T. (2002, April). *Evaluating the impact of morphing technologies on aircraft performance* [Conference paper]. 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics, and materials conference, Denver.

Carlson, J., Ghaey, S., Moran, S., Tran, C. A., & Kaplan, D. L. (2005). Biological materials in engineering mechanisms. In Bar-Cohen (Eds.), *Biomimetics* (pp. 383-398). CRC Press.

Cattafesta, L., Bahr, C., & Mathew, J. (2010). Fundamentals of wind-tunnel design. *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, 1-10.

Cheong, H., Chiu, I., Shu, L. H., Stone, R. B., & McAdams, D. A. (2011). Biologically meaningful keywords for functional terms of the functional basis. *Journal of Mechanical Design*, *133*(2).

Chu, Y. J. (2016). A new biomimicry marine current turbine: Study of hydrodynamic performance and wake using software OpenFOAM. *Journal of Hydrodynamics*, *28*(1), 125-141.

Chu, Y. J., & Chong, W. T. (2017). A biomimetic wind turbine inspired by Dryobalanops aromatica seed: Numerical prediction of rigid rotor blade performance with OpenFOAM®. *Computers & Fluids*, *159*, 295-315.

Clark, J. E., Cham, J. G., Bailey, S. A., Froehlich, E. M., Nahata, P. K., Full, R. J., & Cutkosky, M. R. (2001, May). *Biomimetic design and fabrication of a hexapedal running robot* [Conference paper]. Proceedings 2001 ICRA, Seoul.

Dickinson, M. H., & Gotz, K. G. (1993). Unsteady aerodynamic performance of model wings at low Reynolds numbers. *Journal of experimental biology*, *174*(1), 45-64.

Ellington, C. P., Van Den Berg, C., Willmott, A. P., & Thomas, A. L. (1996). Leading-edge vortices in insect flight. *Nature*, *384*(6610), 626-630.

El-Zeiny, R. M. A. (2012). Biomimicry as a problem solving methodology in interior architecture. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, *50*, 502-512.

Fayemi, P. E., Wanieck, K., Zollfrank, C., Maranzana, N., & Aoussat, A. (2017). Biomimetics: Process, tools and practice. *Bioinspiration & biomimetics*, *12*(1), 011002.

Flow Separation. (2017, July 16). In *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Flow_separation

Galantai, V. P., Sofla, A. Y. N., Meguid, S. A., Tan, K. T., & Yeo, W. K. (2012). Bio-inspired wing morphing for unmanned aerial vehicles using intelligent materials. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, *8*(1), 71-79.

George, J. A., Davis, T. S., Brinton, M. R., & Clark, G. A. (2020). Intuitive neuromyoelectric control of a dexterous bionic arm using a modified Kalman filter. *Journal of Neuroscience Methods*, *330*, 108462.

Goel, A. K., Vattam, S., Wiltgen, B., & Helms, M. (2014). Information-processing theories of biologically inspired design. In *Biologically Inspired Design* (pp. 127-152). Springer, London.

Haaland, P. D. (2020). *Experimental design in biotechnology*. CRC press.

Halacy, D. S. (1965). *Bionics, the Science of" living" Machines*. Holiday House.

Heinzmann, C., Weder, C., & de Espinosa, L. M. (2016). Supramolecular polymer adhesives: advanced materials inspired by nature. *Chemical Society Reviews*, *45*(2), 342-358.

Helms ME, Vattam SS, Goel AK, Yen J & Weissburg M (2008). *Problem-driven and solution-based design: Twin processes of biologically inspired design* [Conference paper]. In: Silicon + Skin: Biological Processes and Computation, Proceedings of the 28th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), Minneapolis.

Helms, M., Vattam, S. S., & Goel, A. K. (2009). Biologically inspired design: process and products. *Design studies*, *30*(5), 606-622.

Holden, J. R., Caley, T. M., & Turner, M. G. (2015, January). *Maple seed performance as a wind türbine* [Conference paper]. In 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, Kissimmee, Florida.

Houghton, E. L., Carpenter, P. W., Collicott, S. H. & Valentine, D. T. (2016). *Aerodynamics for Engineering Students*. Butterworth-Heinemann.

Hsu, C. H., Chen, J. L., Chang, C. C., Dang, H. S., & Tsai, W. F. (2017, May). Bionic design of winged seed's aerodynamic force characteristics apply to wind turbine blades [Conference paper]. In 2017 International Conference on Applied System Innovation (ICASI), Sapporo, Japan.

Ikeda, T., Tanaka, H., Yoshimura, R., Noda, R., Fujii, T., & Liu, H. (2018). A robust biomimetic blade design for micro wind turbines. *Renewable Energy*, *125*, 155-165.
Isel USA. (2022). *Rotary Stage.* https://www.isel-us.com/rotary-stages/zd-30-rotary-stage

ISO 18458 (2015). *Biomimetics—Terminology, concepts and methodology.* BSI Standards Publication: London, UK.

Karagöz, İ. (2017). *Sayısal Analiz ve Mühendislik Uygulamaları.* Dora Yayıncılık.

Kanat Profili. (2012, 21 Ekim). In *Wikipedia*. https://tr.wikipedia.org/wiki/Kanat_profili

Karna, S. K., & Sahai, R. (2012). An overview on Taguchi method. *International journal of engineering and mathematical sciences*, *1*(1), 1-7.

Kaushik, M. (2019). *Theoretical and experimental aerodynamics*. Springer.

Kul, S. (2014). Istatıstık Sonuçlarının Yorumu: P Degerı Ve Güven Aralıgı Nedır? *Plevra Bülteni*, *8*(1), 11.

Krishnan, K. S. G., Bertram, O., & Seibel, O. (2017). Review of hybrid laminar flow control systems. *Progress in Aerospace Sciences*, *93*, 24-52.

Larsen, P., & Von Ins, M. (2010). The rate of growth in scientific publication and the decline in coverage provided by Science Citation Index. *Scientometrics*, *84*(3), 575-603.

Lee, I., & Choi, H. (2018). Scaling law for the lift force of autorotating falling seeds at terminal velocity. *Journal of Fluid Mechanics*, *835*, 406-420.

Lenau, T. A. (2009, AUGUST). *Biomimetics as a design methodology-possibilities and challenges* [Conference paper]. In International Conference on Engineering Design, STANFORD, CA, USA.

Lentink, D., Dickson, W. B., Van Leeuwen, J. L., & Dickinson, M. H. (2009). Leading-edge vortices elevate lift of autorotating plant seeds. *Science*, *324*(5933), 1438-1440.

Lepora, N. F., Verschure, P., & Prescott, T. J. (2013). The state of the art in biomimetics. *Bioinspiration & biomimetics*, *8*(1), 013001.

Logothetis, N. (1992). *Managing for total quality: from Deming to Taguchi and SPC*. Prentice Hall.

Lu, Y., & Shen, G. X. (2008). Three-dimensional flow structures and evolution of the leading-edge vortices on a flapping wing. *Journal of Experimental Biology*, *211*(8), 1221-1230.

Mattos, B. D., Meneghini, J., Padilha, B. R., & de Paula, A. A. (2016). *The airfoil thickness effect on wavy leading edge performance* [Conference paper]. In 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting (p. 1306), San Diego, California, USA.

Maughmer, M. D., & Bramesfeld, G. (2008). Experimental investigation of Gurney flaps. *Journal of Aircraft*, *45*(6), 2062-2067.

Mazzolai, B., Margheri, L., Cianchetti, M., Dario, P., & Laschi, C. (2012). Soft-robotic arm inspired by the octopus: II. From artificial requirements to innovative technological solutions. *Bioinspiration & biomimetics*, *7*(2), 025005.

McGhee, R. J. (1988). *Experimental results for the Eppler 387 airfoil at low Reynolds numbers in the Langley low-turbulence pressure tunnel* (Vol. 4062). National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical Information Division.

Menter, F. (1993, July). *Zonal two equation kw turbulence models for aerodynamic flows* [Conference paper]. In 23rd fluid dynamics, plasmadynamics, and lasers conference, Orlando, U.S.A.

Menter, F. R. (2009). Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective. *International journal of computational fluid dynamics*, *23*(4), 305-316.

Meredith, P., Bettinger, C. J., Irimia-Vladu, M., Mostert, A. B., & Schwenn, P. E. (2013). Electronic and optoelectronic materials and devices inspired by nature. *Reports on Progress in Physics*, *76*(3), 034501.

Mibelle Biocemistry. (2021, 14 June). *Biomimicry: a concept for more sustainable innovations.* https://mibellebiochemistry.com/biomimicry-concept-more-sustainable-innovations

Mueller, T. J. (2000). *Aerodynamic measurements at low raynolds numbers for fixed wing micro-air vehicles*. Notre dame univ in dept of aerospace and mechanical engineering.

Nagel, J. K., Nagel, R. L., Stone, R. B., & McAdams, D. A. (2010). Function-based, biologically inspired concept generation. *Ai Edam*, *24*(4), 521-535.

Nathan, R., Katul, G. G., Horn, H. S., Thomas, S. M., Oren, R., Avissar, R., ... & Levin, S. A. (2002). Mechanisms of long-distance dispersal of seeds by wind. *Nature*, *418*(6896), 409-413.

Nave Jr, G. K., Hall, N., Somers, K., Davis, B., Gruszewski, H., Powers, C., ... & Ross, S. D. (2021). Wind dispersal of natural and biomimetic maple samaras. *Biomimetics*, *6*(2), 23.

New Atlas. (2018, 8 February). *Shark skin study promises lift in airplane and turbine design*. https://newatlas.com/shark-skin-aerodynamics/53295/

Nkandu, M. I., & Alibaba, H. Z. (2018). Biomimicry as an alternative approach to sustainability. *Architecture Research*, *8*(1), 1-11.

Raja, J., & Radhakrishnan, V. (1977). Analysis and synthesis of surface profiles using Fourier series. *International journal of machine tool design and research*, *17*(4), 245-251.

Norberg, R. Å. (1973). Autorotation, self-stability, and structure of single-winged fruits and seeds (samaras) with comparative remarks on animal flight. *Biological Reviews*, *48*(4), 561-596.

Ozen, C. A., & Rockwell, D. (2012). Flow structure on a rotating plate. *Experiments in fluids*, *52*(1), 207-223.

Park, J. H., & Yoon, K. J. (2008). Designing a biomimetic ornithopter capable of sustained and controlled flight. *Journal of Bionic Engineering*, *5*(1), 39-47.

Persoon, E., & Fu, K. S. (1977). Shape discrimination using Fourier descriptors. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, *7*(3), 170-179.

Rezgui, D., Arroyo, I. H., & Theunissen, R. (2020). Model for sectional leading-edge vortex lift for the prediction of rotating samara seeds performance. *The Aeronautical Journal*, *124*(1278), 1236-1261.

Polhamus, E. C. (1971). Predictions of vortex-lift characteristics by a leading-edge suctionanalogy. *Journal of aircraft*, *8*(4), 193-199.

Pounds, P., & Singh, S. (2015). Samara: Biologically inspired self-deploying sensor networks. *IEEE Potentials*, *34*(2), 10-14.

Royal Aeronautical Society. (2021, January 19). *Engineering nature.* https://www.aerosociety.com/news/engineering-nature/

Ryan, V. (2014). *Biomimetic Design (Biomimicry).* https://technologystudent.com/prddes1/biomimetic1.html

Salcedo, E., Treviño, C., Vargas, R. O., & Martínez-Suástegui, L. (2013). Stereoscopic particle image velocimetry measurements of the three-dimensional flow field of a descending autorotating mahogany seed (Swietenia macrophylla). *Journal of Experimental Biology*, *216*(11), 2017-2030.

Sane, S. P. (2003). The aerodynamics of insect flight. *Journal of experimental biology*, *206*(23), 4191-4208.

Seidel, C., Jayaram, S., Kunkel, L., & Mackowski, A. (2017). Structural analysis of biologically inspired small wind turbine blades. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, *12*(1), 1-9.

Seter, D., and Rosen, A. (1992). Stability of the Vertical Autorotation of a Single-Winged Samara. *J. Appl. Mech*, 59(4), 1000–1008.

Sharma, A., & Visbal, M. (2019). Numerical investigation of the effect of airfoil thickness on onset of dynamic stall. *Journal of Fluid Mechanics*, *870*, 870-900.

Shelton, N. (2021). *How induced drag works.* https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/aerodynamics/how-induced-drag-works/

Shyy, W., & Liu, H. (2007). Flapping wings and aerodynamic lift: the role of leading-edge vortices. *AIAA journal*, *45*(12), 2817-2819.

Speck, T., Speck, O., Beheshti, N., & McIntosh, A. C. (2008). Process sequences in biomimetic research. *Design and nature IV*, *114*, 3-11.

Srygley, R. B., & Thomas, A. L. R. (2002). Unconventional lift-generating mechanisms in free-flying butterflies. *Nature*, *420*(6916), 660-664.

Stahlberg, R., & Taya, M. (2005). Nastic structures: The enacting and mimicking of plant movements. In Bar-Cohen (Eds.), *Biomimetics* (pp. 491-512). CRC Press.

Steele, J. (1960). *How Do We get There? Bionics Symposium: Living Prototypes: The Key to New Technology* (No. 60-600). WADD Technical Report.

Stewart, H.L. (1977) *Pumps.* Sams, Indianapolis.

Sun, T., Qing, G., Su, B., & Jiang, L. (2011). Functional biointerface materials inspired from nature. *Chemical Society Reviews*, *40*(5), 2909-2921.

Taguchi, G. (1978, October). *Off-line and on-line quality control systems* [Conference paper]. In Proceedings of the international conference on quality control, Tokyo, Japan.

Taheri, E., & Abdelkhalik, O. (2012). Shape based approximation of constrained low-thrust space trajectories using Fourier series. *Journal of Spacecraft and Rockets*, *49*(3), 535-546.

Tanürün, H. E., & Adem, A. C. I. R. (2019). Modifiye edilmiş NACA-0015 kanat yapısında tüberkül etkisinin sayısal analizi. *Politeknik Dergisi*, *22*(1), 185-195.

Taylor Buck, N. (2017). The art of imitating life: The potential contribution of biomimicry in shaping the future of our cities. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, *44*(1), 120-140.

Tec-Science (2020, 24 May). *Flow Seperation (boundary layer seperation).* https://www.tec-science.com/mechanics/gases-and-liquids/flow-separation-boundary-layer-separation/

Tennakone, K. (2017). Aerodynamics and right-left symmetry in wind dispersal of maple, dipterocarps, conifers and some genera of apocyanaceae and magnoliaceae. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*, *45*(3), 201-217.

Tolstov, G. P. (2012). *Fourier series*. Courier Corporation.

Toohey, K. S., Sottos, N. R., Lewis, J. A., Moore, J. S., & White, S. R. (2007). Self-healing materials with microvascular networks. *Nature materials*, *6*(8), 581-585.

Tucker, V. A. (1987). Gliding birds: the effect of variable wing span. *Journal of Experimental Biology*, *133*(1), 33-58.

Ulrich, E. R., Faruque, I., Grauer, J., Pines, D. J., Humbert, J. S., & Hubbard Jr, J. E. (2010). Control model for robotic samara: Dynamics about a coordinated helical turn. *Journal of guidance, control, and dynamics*, *33*(6), 1921-1927.

Umur, H. (2009). *Akışkanlar mekaniği.* Dora Yayıncılık.

Varshney, K., Chang, S., & Wang, Z. J. (2011). The kinematics of falling maple seeds and the initial transition to a helical motion. *Nonlinearity*, *25*(1), C1.

Vattam, S., Helms, M. E., & Goel, A. K. (2007). *Biologically-inspired innovation in engineering design: a cognitive study*. Georgia Institute of Technology.

Vincent, J. F. (2001). Stealing ideas from nature. In Pellegrino S (Eds.), *Deployable structures* (pp. 51-58). Springer, Vienna.

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.

White, F. M. (2004). *Akışkanlar mekaniği*. (K. Kırkköprü, K., & E. Ayder, Çev.). Literatür Yayıncılık (Orijinal eserin basım tarihi 1999).

Wu, J. H., & Sun, M. (2004). Unsteady aerodynamic forces of a flapping wing. *Journal of Experimental Biology*, *207*(7), 1137-1150.

Yan, H., Su, X., Zhang, H., Hang, J., Zhou, L., Liu, Z., & Wang, Z. (2020). Design approach and hydrodynamic characteristics of a novel bionic airfoil. *Ocean Engineering*, *216*, 108076.

Yasuda, K., & Azuma, A. (1997). The autorotation boundary in the flight of samaras. *Journal of Theoretical Biology*, *185*(3), 313-320.

Zhao, N., Wang, Z., Cai, C., Shen, H., Liang, F., Wang, D., ... & Xu, J. (2014). Bioinspired materials: from low to high dimensional structure. *Advanced Materials*, *26*(41), 6994-7017.

Zhonghua, H. A. N., Zhenghong, G. A. O., Wenping, S. O. N. G., & Lu, X. I. A. (2021). On airfoil research and development: history, current status, and future directions. *Acta Aerodynamica Sinica*, *39*(6), 1-36.

Zhu, H., Guo, Z., & Liu, W. (2016). Biomimetic water-collecting materials inspired by nature. *Chemical Communications*, *52*(20), 3863-3879.

EKLER

EK 1 M0 modelini oluşturan dış hattın “x” ve “y” koordinatları:

“x”	“y”	“x”	“y”
10,17543347	37,83578603	18,56211076	22,36302697
10,93045896	38,12068599	18,50295036	21,54225174
11,73218768	38,1695871	18,40742948	20,72527796
12,54886123	38,07212187	18,32374603	19,90685321
13,225769	37,65752212	18,21528037	19,09123856
13,94423842	37,26115499	18,09845585	18,27682938
14,63366364	36,8170671	17,95611185	17,46646064
15,29893599	36,33760386	17,85541083	16,65004687
15,88796415	35,76308894	17,71382265	15,83962289
16,39532631	35,11709632	17,57383948	15,02867318
16,90790288	34,47589753	17,43813922	14,21712673
17,20839678	33,71213243	17,29430753	13,40702115
17,45785723	32,92804738	17,1532712	12,59638257
17,68882845	32,13833362	17,00550229	11,78701003
17,92778491	31,35103886	16,85575408	10,97800953
18,10602824	30,54807878	16,7452091	10,16259713
18,25831406	29,73939788	16,66737154	9,343793277
18,39527557	28,92806883	16,61666664	8,52253048
18,51595651	28,1141824	16,51566799	7,707702256
18,588365	27,29472897	16,36633021	6,897911312
18,63139192	26,47400372	16,19793122	6,090234624
18,65251246	25,65158168	15,96219671	5,302929995
18,65510956	24,82875445	15,62090072	4,557435734
18,64949503	24,006035	15,16034182	3,876983135
18,62020769	23,18378904	14,63839824	3,241064066

“x”	“y”	“x”	“y”
14,02640452	2,691473804	9,830942193	19,97389334
13,5014798	2,063272471	9,51740314	20,73209322
13,00553859	1,787446572	9,208079395	21,49261471
12,69726427	2,534962858	8,754092469	22,17532497
12,27348055	3,23970785	8,459405772	22,93541015
11,92572732	3,985374569	7,9937006	23,60988078
11,63908511	4,756086645	7,391055337	24,14352255
11,4526081	5,555431232	6,955217122	24,83762062
11,4214556	6,375917781	6,688795072	25,60613963
11,46146534	7,199401412	6,469982982	26,38993771
11,56871765	8,01578087	6,412163417	27,19105269
11,66126054	8,833574635	6,442066462	28,00921459
11,74370907	9,65141101	6,570628786	28,81102718
11,7475586	10,47376779	6,519322044	29,59612171
11,76661674	11,29626168	6,501062201	30,41103548
11,81228321	12,11790671	6,676128716	31,18967746
11,80797291	12,94031299	6,78986331	31,96692342
11,753366	13,76132147	6,917544688	32,77450343
11,70697673	14,5830294	7,176258566	33,52606201
11,57696857	15,39458053	7,21900767	34,33029098
11,41836544	16,20057113	7,426013173	35,08357638
11,20343394	16,9941029	7,996610274	35,67297885
10,92707196	17,76864012	8,292692678	36,39274156
10,5513491	18,49998821	8,756835458	37,02320405
10,24516269	19,26382811	9,502420622	37,36721321

EK 2 M0 modelini oluşturan eğrileri temsil eden Fourier serisi denklemlerinin katsayıları ve eğrileri oluşturan özellikler:

Eğriler	S1	S2	S3
"x" aralıkları	11,861427513074000	11,478449637010400	11,449250690920200
	15,393246750134900	16,035503685904400	16,275952537218500
Yerel Veter (mm)	3,550	4,540	4,860
w	0,373265067042524	0,372070211842837	0,402018978970829
a0	-0,006778915942278	-0,006908714130689	0,022577575883559
a1	0,003877284566548	0,003843451451255	0,004321521008334
b1	-1,348389926729720	-0,042871777639850	-0,989228176292963
a2	0,350753465548377	0,089664479955473	-1,930303260119780
b2	-0,192611113898782	-0,152972748957169	-1,026181925747370
a3	2,911867251542500	-3,158672196460990	4,314038193685380
b3	-1,495405366518430	1,383308284606320	-2,407077180509070
a4	0,661882698577731	0,134072920381353	-1,165929160906680
b4	5,637603793238020	-3,644521346433720	3,702268144665700
a5	-2,882963260821600	0,735901417861971	-0,118558248506923
b5	-0,698323128364033	0,385231406902852	-1,267667244955570

Eğriler	S4	S5	S6
"x" aralıkları	11,487532387112700	11,639916273461400	11,725580237168500
	16,437327489821600	16,609340040489600	16,719359559179900
Yerel Veter (mm)	4,980	5,000	4,940
w	0,399780453356771	0,391657954915780	0,377656686347424
a0	0,022404514579471	0,019419112791121	-0,255445612882042
a1	0,004332274654832	0,004234193978540	-0,002848029271651
b1	-0,603582673488960	-0,680273745232156	61,153636458250200
a2	-0,438921294678144	-0,947382248532999	-78,001136147205800
b2	-1,586791413550530	-1,483532343255190	-108,070252581964000
a3	2,021254046422970	2,582871337965860	124,263366578692000
b3	-0,638791964531264	-1,131696770547310	16,566535137800600
a4	-0,311896887644134	-0,471998644446522	-44,644300275191700
b4	1,835793592013830	2,094940632047700	40,395440468311700
a5	-0,126218056180268	-0,036851891151456	-0,751052325842742
b5	-0,704867029686439	-0,795788079813027	-12,806323549658800

Eğriler	S7	S8	S9
"x" aralıkları	11,732740014769100	11,784406625015400	11,803785074836800
	16,778507340214000	16,858893189437100	17,000545064354000
Yerel Veter (mm)	5,040	5,110	5,200
w	0,377593517702004	0,373545468744686	0,366921478763686
a0	-0,255279793584020	-0,255585016289724	-0,256056354278132
a1	-0,002847983697563	-0,002847979693653	-0,002848095929930
b1	50,402065679129400	42,939412474716800	14,865216560922700
a2	-64,560235338072100	-56,117959647129700	-22,231837167226900
b2	-90,231111104244700	-77,311548797817000	-27,661279099465300
a3	104,270133461656000	89,407410731496000	31,674703128546900
b3	14,327716514950800	11,151188181863100	0,494808835347940
a4	-38,115427826773700	-31,990599871914700	-8,864448077459020
b4	34,485173623098800	29,796443461502900	10,764844005593700
a5	-0,714740404039444	-0,662665983965071	-0,462875104901860
b5	-11,337210541282600	-9,559209525830420	-2,892303563389320

Eğriler	S10	S11	S12
"x" aralıkları	11,829181828676700	11,765984990356200	11,823233094279200
	17,198837262977400	17,269195438682400	17,259041960577200
Yerel Veter (mm)	5,340	5,450	5,580
w	0,366900243010665	0,363915269161611	0,355008143042198
a0	-0,238307790206423	-0,240053130035065	-0,239737143499908
a1	-0,002842982948445	-0,002842239864400	-0,002842564629700
b1	23,357714728982300	28,852594312190100	10,543099577273800
a2	-34,011729345584800	-42,695193909820300	-17,340492527488200
b2	-42,415128416235000	-51,883075606066600	-21,169952704227700
a3	50,795173165280800	64,008144268374000	25,259434438206200
b3	0,756488042652254	0,819809128529543	0,759052343596030
a4	-14,252991490595900	-19,146387248743800	-8,505108451678460
b4	19,061611361254200	24,282555066577100	8,908649640923890
a5	-1,710418309398870	-1,596507306364890	-0,262967703771999
b5	-4,988988657913860	-6,570076379783270	-3,168455347431310

Eğriler	T1	T2	T3
"x" aralıkları	11,744612931858400	11,634522622468500	11,574719116445100
	17,386913341102200	17,548428333084900	17,724503589820900
Yerel Veter (mm)	5,750	5,970	6,300
w	0,256586377743888	0,379772741561324	0,347258234191100
a0	2,094778648852190	-0,199831365045118	0,325449494952366
a1	-0,011478559279549	-0,002837354386390	-0,002841583007575
b1	13,562636702112800	-1,748227554395620	-0,061363840801969
a2	-5,361450109570570	1,325201120321900	-1,227570069608350
b2	14,488313194195000	-1,276861345382720	-1,348797551876700
a3	-4,384376771702050	0,076009948521793	1,004550556600310
b3	3,588158022714040	1,150393199174500	-0,050709809102317

Eğriler	T4	T5	T6
"x" aralıkları	11,268134593491900	11,221029670789000	11,077255093706500
	17,795304787787100	17,814395447115700	17,862884008182300
Yerel Veter (mm)	6,650	6,850	7,060
w	0,311357766249410	0,310430768203372	0,308311238253758
a0	0,015846023523890	0,228191034110713	0,214400364972611
a1	-0,002656733585769	-0,000106447823581	-0,000214924248762
b1	-0,431166560601062	-0,168199321467579	-0,160318522458091
a2	-1,976546915148790	-1,718132022234410	-1,317705126159570
b2	0,937242570847886	0,754249040759572	0,768777326607412
a3	-0,723454124379315	-0,490861989619512	-0,423562227268373
b3	-0,853405679826558	-0,618279181135536	-0,545592618560933
a4	0	0	0
b4	0	0	0
a5	0	0	0
b5	0	0	0

Eğriler	L1	L2	L3
"x" aralıkları	10,522295755111900	10,232143016618800	8,725814901967870
	17,775311325252900	17,744504116859000	16,765665385599600
Yerel Veter (mm)	7,480	7,760	8,340
w	0,404921178016371	0,402416305723609	0,425770531343222
a0	0,352228522057230	0,429632362752208	0,326641858999786
a1	-0,123694509945048	-0,221322092595681	0,218275817370553
b1	-0,076605325577657	-0,357130749758895	-0,086676589898127
a2	0,253476577707101	0,473330543631448	-0,034662441633759
b2	-0,009654552243982	-0,011335646791298	-0,005763807586213
a3	0,020275165003409	0,039956450751265	0,086957779641698
b3	-0,008953436270290	-0,006976846054304	-0,004676598486974
a4	-0,005243565879566	-0,003814053371423	-0,004800339035299
b4	0,407819679277046	0,609652708016463	0,179854998462572
a5	-0,313150010145128	-0,427440916108840	-0,132395829899646
b5	-0,227577713231682	-0,334001559312873	0,014921894731766
a6	0,098552433331539	0,201930842887493	0,008048855570775
b6	0,001052647267589	0,001143025749092	0,000830496643303
a7	-0,011607355651441	-0,012546379774250	-0,035086040132557
b7	-0,028045812798894	0,044684899060285	0,004876635413959
a8	-0,006267062175240	-0,028726761833499	0,011199623697556
b8	0,029641443043830	0,015497401121228	-0,012105652430512

Eğriler	L4	L5	L6
“x” aralıkları	7,973791086336540	6,459928600718720	2,395877758691720
	16,470372795508500	15,478826283575900	12,901059871665000
Yerel Veter (mm)	8,760	9,280	10,860
w	0,421391801220258	0,442541705277288	0,490212611366684
a0	0,144835998152080	0,135904853351709	0,480853756839654
a1	0,288878822904500	-0,028287305049783	-0,117824165484573
b1	-0,539646518076868	-0,549973317612020	-0,335778448178768
a2	0,091556407088458	0,447935202185087	0,003817890182826
b2	-0,009733347552751	-0,265825484028251	-0,213172520230333
a3	0,322341255717916	0,394867729771586	0,022074489843024
b3	-0,005399329713885	0,243696072676255	-0,241221874668379
a4	-0,000973894650665	0,006466569211792	0,007307550962504
b4	0,392801767695518	0,288553577922894	-0,136364303482288
a5	-0,163157507943197	-0,062415772782576	0,026604496680481
b5	-0,013789439378997	0,063810412624118	-0,049770373510634
a6	0,025553323175668	-0,030724670011282	0,034328163845698
b6	0,000614014260680	-0,001944387057976	-0,002855048851831
a7	-0,023344862144464	-0,009779690136634	0,021507632096492
b7	-0,018303167801221	-0,043356781531100	0,000496634440305
a8	0,027932507463411	0,022585229427868	0,008301182983366
b8	-0,007433390706626	-0,018061711496175	0,005179330869049

Eğriler	L7	L8	L9
“x” aralıkları	-2,303739219587150	-4,637110011071070	-6,436249789503460
	9,965893649231580	7,976870128497470	6,285109675201470
Yerel Veter (mm)	12,790	13,200	13,360
w	0,343081924128781	0,180551538615013	0,111762136271790
a0	-5,364467341265620	-5,552596017692880	-27,906199375590900
a1	3,121926058864570	3,261731106254020	13,279755658567200
b1	10,810260633869600	10,179869217979100	0,465320273226600
a2	7,822518288736980	8,237964989318990	37,018527994595700
b2	-5,290432859974800	-4,692479954244420	-6,267439428508090
a3	-5,555247515383120	-6,135072453534570	-21,460221247752200
b3	-4,417114839493360	-4,449947007703940	1,334853286937560
a4	-1,604402895614980	-1,469715370035370	-4,343931967722840
b4	4,352179253267760	4,203140648134790	6,329979109439730
a5	2,564072288898400	2,784166861304920	2,556143456293100
b5	0,168365217006388	0,171723526777389	0,140188706053512
a6	-0,268512470072922	-0,293132448310600	0,555061411694449
b6	-1,248682500875180	-1,085961560206190	-6,200231955648020
a7	-0,416468618941180	-0,539846676822571	1,898952582711000
b7	0,299137543211212	0,268748848818967	2,562713110888390
a8	0,106714248795356	0,101348140722163	-1,132741192717660
b8	0,041822013222858	0,040534355895150	0,221850939986086

Eğriler	L10	L11	L12
“x” aralıkları	-8,799259153213820	-11,817585032907900	-13,748119057777700
	3,989653304926270	1,119096485590460	-1,686875273819070
Yerel Veter (mm)	13,420	13,470	12,670
w	0,249614850036128	0,190795939203207	0,208806631917523
a0	-0,548081668958226	-3,637898785043690	0,218903402048950
a1	0,652428288242361	1,163903336820430	-2,450809744014090
b1	-1,046941406137380	-5,261779336437920	0,813362978012293
a2	0,751160881355178	1,916484674023640	-1,363850533964510
b2	0,132508641186943	-0,100700677281242	-1,867296291453530
a3	-0,057095482149387	0,001673490168086	-0,472161679203023
b3	1,162561516512280	0,800157086135288	0,344392595543395
a4	-0,983457380155474	0,480995570331854	-2,513771172573880
b4	-0,704097466265225	-1,911036006047210	-1,211327011784260
a5	0,685790125587320	2,033683387426120	0,163014493531515
b5	-0,145073284479555	1,596395631753000	-2,356758547411620
a6	-0,185036075020331	-0,857521752710991	0,569915038193759
b6	0,108917900242981	0,956944741634610	-0,530066170553735
a7	0,105450815035453	-0,462133098808192	0,245083806846331
b7	-0,025165367148205	0,129987556500185	-0,429836383325308
a8	-0,028605987627992	-0,152780416495251	0,241821995744480
b8	0,032116739700286	-0,205376391261233	-0,028949487501902

Eğriler	L13	L14	L15
"x" aralıkları	-16,953706052639800	-19,442494721764000	-20,865986255751600
	-5,688276729761220	-9,749747272508620	-13,637808777713800
Yerel Veter (mm)	11,890	10,210	7,600
w	0,176117858329535	0,171353820752847	0,218683635793959
a0	-0,253749624795581	-0,561430362220769	-0,054951920227373
a1	-5,295736878258070	-12,742367800043000	6,232111434952470
b1	3,376345894987110	16,872486193806800	-0,339729165946042
a2	-5,122254790430400	-12,979782404268900	2,412208382610300
b2	-1,186034555691780	4,539355293690610	-8,103557290339430
a3	-0,792481465318251	1,574448142936050	-0,916090114400339
b3	0,468042311336779	-0,173078179501760	0,582296094053809
a4	-1,915102528778500	1,727604758146950	6,698860920239740
b4	1,396459606592440	1,294140874999450	-0,520498427013262
a5	0,025627183206173	0,024060155078268	0,226885385295061
b5	-0,296078209549297	-0,798901273055264	-5,848503776720990
a6	1,128097908376710	-0,584680947968683	-3,323376772517700
b6	1,532857963749390	2,148831628208410	0,256063734597338
a7	-0,464946014519548	-2,777010283476820	0,303057146230207
b7	1,290150450025080	2,314424463836080	1,303100956793390
a8	-0,324018275960202	-1,315131355955580	0,319071084462878
b8	0,085360432306961	0,181232639480026	-0,129258989582379

Eğriler	L16	L17	L18
“x” aralıkları	-21,118544750728500	-22,607871151391300	-22,714342608218900
	-15,906102115183400	-20,160209229028300	-21,755044824579900
Yerel Veter (mm)	5,410	2,530	0,970
w	0,221356769916799	1,000000000000000	1,000000000000000
a0	-0,052193407857963	0,002008955842506	-3,083357876237200
a1	11,379482098152100	-0,030783830525956	-2,978525996097900
b1	-0,224359523798423	-0,316164717876920	0,572720765168742
a2	-2,119711122489020	0,002415711255721	0,301115914997898
b2	-10,346603607113700	-0,063879457669985	-0,003593664919507
a3	-2,730908906766300	-0,377359891210965	-0,414875365933573
b3	0,625644805316112	0,312525896074633	-0,114011828485203
a4	-2,780973562039700	-0,891110187298499	-0,006198600921046
b4	-1,386784704240190	0,649865090126496	-0,325693661825500
a5	0,316776630597923	-1,498915507844940	0,087849336965228
b5	5,291414246605150	0,639247328256709	-0,197669479403945
a6	3,842573670949280	-1,545207559473340	-0,275992033329371
b6	0,233799615721855	0,049149763178087	0,349931299136037
a7	0,577023355987453	-0,792361492927203	-0,254949778932193
b7	0,579896591454154	-0,322630259318195	-0,532217874881114
a8	0,844653707254493	-0,152329880167226	-0,272877726359013
b8	0,270119903977212	-0,151266865262474	-0,485870947014667

EK 3 M5C modelini oluşturan dış hattın “x” ve “y” koordinatları:

“x”	“y”	“x”	“y”
0,01259689550628730	-0,07934827688428920	-0,02481032616407120	-0,01716923873877880
0,00907043164379518	-0,07940780478857320	-0,02527886453554180	-0,01363487564475500
0,00550470261597047	-0,07940780478857320	-0,02576311235670630	-0,01010290200407040
0,00193897357476945	-0,07940780478857320	-0,02616225403262710	-0,00655944708831472
-0,00162675527000336	-0,07940780478857320	-0,02656313053489800	-0,00301646702419956
-0,00519248384253938	-0,07940780478857320	-0,02685405264213340	0,00053738368204095
-0,00875821254111477	-0,07940780478857320	-0,02712829900458150	0,00409246632484165
-0,01232394836485430	-0,07940780478857320	-0,02727703019500610	0,00765455131086546
-0,01430598771267110	-0,07670172493342480	-0,02732930844888640	0,01121962612671090
-0,01570088439886470	-0,07342301811381740	-0,02732016356484040	0,01478575082495170
-0,01661620796694750	-0,06998019716289540	-0,02728833083135520	0,01835167422779120
-0,01728440836035560	-0,06647699308781830	-0,02718102710337270	0,02191510627806200
-0,01792450505464180	-0,06296908104915250	-0,02687083582664710	0,02546685282237260
-0,01833485414484750	-0,05943015270055430	-0,02642255580303750	0,02900411605944790
-0,01851644013756810	-0,05586841649487130	-0,02585651016298190	0,03252466516463400
-0,01889208820207930	-0,05232332692165630	-0,02526820758244210	0,03604181851927430
-0,01938038688883270	-0,04879132486188830	-0,02452755170785040	0,03952863908246140
-0,02004158759045810	-0,04528735192222520	-0,02360034398841370	0,04297162813763240
-0,02068069071726850	-0,04177935476188070	-0,02261209869143050	0,04639776990513620
-0,02129184395602380	-0,03826639000330180	-0,02156658748316480	0,04980655505121720
-0,02190920852501600	-0,03475450937944330	-0,02045302792390050	0,05318902500508410
-0,02250080769912390	-0,03123822409750830	-0,01876197097208090	0,05632951123788650
-0,02310852567637800	-0,02772465819764200	-0,01672446785172030	0,05924558088894860
-0,02371867906461600	-0,02421127737634560	-0,01424297406109510	0,06180291488577280
-0,02416769564223240	-0,02067473945835420	-0,01153976940522320	0,06412760514664180

“x”	“y”	“x”	“y”
-0,00871328033063037	0,06630152573103510	0,02308190561418660	0,00828500862319849
-0,00583701972978884	0,06840965026904350	0,02175772765978140	0,00497272511416365
-0,00283713703331520	0,07033905025390760	0,02056781697352260	0,00161142980437658
0,00044362191679968	0,07170317160996870	0,01958160647620050	-0,00181255192499755
0,00397321323204307	0,07206560469017570	0,01877668752256680	-0,00528641918669039
0,00749026128986730	0,07149364842006720	0,01786854898369050	-0,00873348046761994
0,01083854679289600	0,07028406841131120	0,01685323229032750	-0,01215164685242220
0,01383669418566120	0,06837176095307660	0,01593108112339880	-0,01559570486558720
0,01627471870970290	0,06577993430338750	0,01494858614670380	-0,01902263109377300
0,01831443157543680	0,06285676831041230	0,01421006792516460	-0,02251102516365880
0,02030630706520540	0,05989807806353070	0,01363347583197410	-0,02602827922812280
0,02228070660417780	0,05693075116155220	0,01321540055064270	-0,02956940480955770
0,02376767910687120	0,05369782227367040	0,01289330743531310	-0,03312048593899660
0,02464482060869690	0,05024450246376980	0,01276322004497070	-0,03668338358871440
0,02522558092241940	0,04672620240876770	0,01262201583893790	-0,04024621575179950
0,02571791596841210	0,04319459980757670	0,01261409982104160	-0,04381161743186800
0,02616225293787210	0,03965670741570880	0,01271018948284720	-0,04737609621227170
0,02649812121289220	0,03610709287191060	0,01277518870543520	-0,05094106293253930
0,02669481453403100	0,03254702726058610	0,01280683876715180	-0,05450672894430890
0,02684947820416350	0,02898457860026590	0,01293361959258100	-0,05806988006486040
0,02706676968595390	0,02542551869295750	0,01318015876648620	-0,06162694484712920
0,02715290885965070	0,02186060771485210	0,01348728707217270	-0,06517970719960190
0,02672315097891540	0,01832770393300300	0,01370382512192880	-0,06873817019168290
0,02573147825344720	0,01490581613752190	0,01364656558759200	-0,07230224679453220
0,02445408894296600	0,01157627373590750	0,01326282826069230	-0,07584568880641920

EK 4 S11 (0,2) ve S12 (0,2) eğrilerini temsil eden Fourier serisi denklemlerinin katsayıları:

Eğriler	S11 (0,2)	S12 (0,2)
"x" aralıkları	11,7659849903562	11,8232330942792
	17,2691954386824	17,2590419605772
w	0,34500705815394	0,363549633458436
a0	15,6194296882243	-0,228732823789294
a1	-45,8680221887327	-0,00284101843776341
b1	24,5013674766774	9,23578725629241
a2	-9,17952004516865	-13,3910811774099
b2	-62,0865236444024	-16,9279171362934
a3	44,3937719321508	20,6580350356223
b3	3,88139821640883	0,915588438759491
a4	-5,65236025560128	-6,65222484677836
b4	17,3395386429869	7,60090095142609
a5	-2,96619567449332	-0,365187429228885
b5	-1,82531680038676	-2,16912604634946