

**T. C.
CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
TERMODİNAMİK BİLİM DALI**

**CANLILARDAN ESİNLENEREK MINÜBÜS TASARIMI VE
AERODİNAMİK OLARAK İNCELENMESİ**

Erman DOĞAN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Seda KIRMACI ARABACI

MANİSA-2024

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zeka ve program kullanmadığımı beyan ederim.

Erman DOĞAN



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Canlılardan Esinlenerek Minibüs Tasarımı ve Aerodinamik Olarak İncelenmesi

Erman DOĞAN
Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Seda KIRMACI ARABACI

Bu çalışmada, kara ulaşım aracı olarak kullanılan çok sayıda minibüs modelinin akış analizi, sürüklenme kuvveti ve sürüklenme katsayıları araştırılmıştır. Sürüklenme katsayısı etkileyen en önemli unsur dış gövde tasarımıdır. Doğada yaşayan aerodinamik özellikleri yüksek olan canlılardan olan balıklar, su altında hareket ederken minimum direnç ve maksimum hız sağlayacak bir gövde yapısına sahiptir. Balıkların bu özelliklerinden ilham alınarak dış gövde tasarımları yapılmıştır. Seçilen balıklar özellikle kafa yapılarının diğer balıklara göre daha şişkin bir yapıda olduğu ve hareket kabiliyetlerinin de yüksek olması sebebiyle tercih edilmiştir. Yapılan incelemeler sonucu Napolyon balığı (humhead wrasse), Yeşil hörgüçlü papağan balığı (Hump parrot fish), Çiçek boynuz balığı (Flowerhorn fish) örnek olarak alınmış ve minibüslerin gövde tasarımı yapılmıştır. Gövde tasarımları SOLIDWORKS programında yapılmıştır. Çizimler ağ yapısı oluşturmak için ANSYS HAD programına yerleştirilmiştir. Değişik tasarımlara ait sürüklenme kuvveti ve sürüklenme katsayıları Fluent programlarıyla belirlenmiştir. Ardından rüzgar tüneline deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney verileriyle analiz verileri kıyaslanmıştır. Yeni tasarımların karşılaştırılmasının yapılması için referans alınan Mercedes Sprinter 316 (uzun şasi) modelinin benzeri tasarlanmış ve sürüklenme katsayısında yeni tasarlanan modelde % 13.94 düşüş görülmüştür. Bu düşüşün yakıt tasarrufuna katkısı % 7 olarak hesaplanmıştır. Yıllık ortalama 45000 km kullanılan bir araç için yılda yakıt tasarrufu 283.5 litre olarak hesaplanmıştır. Çevresel etkiler incelendiğinde yıllık karbon emisyonuun 737 CO₂e/kg daha az olduğu hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: sürüklenme katsayısı, aerodinamik, biyomimetik, rüzgar tüneli, napolyon balığı, yeşil hörgüçlü papağan balığı, çiçek boynuz balığı

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Design and Aerodynamic Analysis of Minibus Inspired by Living Organisms

Erman DOĞAN

**Celal Bayar University
Graduate Faculty of Engineering
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Seda KIRMACI ARABACI

in this study, the flow analysis, drag force, and drag coefficients of various minibus models used as land transportation vehicles were investigated. The most significant factor affecting the drag coefficient is the exterior body design. Fish, which are highly aerodynamic creatures living in nature, possess a body structure that minimizes resistance and maximizes speed while moving underwater. Inspired by these features of fish, exterior body designs were created. The selected fish were chosen particularly for their relatively bulky head structures compared to other fish and their high maneuverability. As a result of the examinations, the Napoleon fish (humphead wrasse), the green humphead parrotfish (hump parrotfish), and the flowerhorn fish were taken as examples, and minibus body designs were developed. These body designs were created using the SOLIDWORKS program. The designs were imported into the ANSYS CFD program to generate a mesh structure. Drag force and drag coefficients of different designs were determined using Fluent software. Subsequently, wind tunnel experiments were conducted. The experimental data were compared with the analysis results. For comparison, a model similar to the Mercedes Sprinter 316 (long wheelbase) was used as a reference. The newly designed model achieved a 13.94% reduction in the drag coefficient compared to the reference model. This reduction was calculated to contribute to a 7% fuel saving. For a vehicle used for an average of 45,000 km annually, the annual fuel savings were calculated to be 283.5 liters. From an environmental perspective, it was estimated that the annual carbon emissions would be reduced by 737 kg CO₂e/kg.

Keywords: drag coefficient, aerodynamics, biomimetic, wind tunnel, Napoleon wrasse, Green humphead parrotfish, Flowerhorn fish.

2024, 84 pages

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, kara ulaşım aracı olarak kullanılan çok sayıda minibüs modelinin akış analizi, sürüklenme kuvveti ve sürüklenme katsayıları araştırılmıştır. Doğada yaşayan aerodinamik özellikleri yüksek olan balıklardan esinlenilerek farklı dış forma sahip minibüs modelleri tasarlanmış ve aerodinamik olarak incelenmiştir. Sürüklenme katsayılarının hesaplanması amacıyla uygulanan analiz yöntemleri ve deneylerde kullanılan modellerin özellikleri Bölüm 2'de anlatılmaktadır. Bölüm 3'te gerçekleştirilen analizlerin detayları ve sonuçları ele alınmıştır. Tezin öneriler ve sonuç kısmı bölüm 4'te yer almaktadır

Bu çalışmanın yürütülmesi sırasında, önerileriyle ve bilgi birikimleri ile desteğini ve emeğini hiç esirgemeyen tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Seda KIRMACI ARABACI hocama büyük katkılarından dolayı teşekkür ederim. Bugünlere gelmemi sağlayan ve bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Erman DOĞAN
Manisa, 2024

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Cismin izdüşüm alanı (m^2)
C_d	Aerodinamik sürüklenme katsayısı
C_L	Aerodinamik kaldırma katsayısı
C_{MP}	Yunuslama momenti katsayısı
C_{MR}	Yuvarlanma momenti katsayısı
C_{MY}	Yana kayış momenti katsayısı
C_p	Statik basınç katsayısı
C_y	Aerodinamik yan kuvvet katsayısı
D	Geometrinin çapı
F_D	Sürüklenme Kuvveti (N)
F_L	Kaldırma Kuvveti (N)
F_y	Yanal Kuvvet (N)
h	Geometrinin yüksekliği (m)
L	Geometrinin karakteristik uzunluğu (m)
L_a	Aerodinamik kaldırma kuvveti
M_P	Yunuslama momenti (Nm)
M_R	Yuvarlanma momenti (Nm)
M_Y	Yana Kayış momenti (Nm)
N	Geometrinin genişliği (m)
P	Atmosferik Basınç (atm.)
Re	Boyutsuz Reynolds Sayısı
U	Ortalama hızın x bileşeni(m/s)

V	Hız (m/sn)
Y_a	Aerodinamik kuvvetin yan bileşeni (N)
W	Ortalama hızın z bileşeni (m/s)
y	HAD ağıdaki Otobüs çevresindeki ilk sınır tabakası kalınlığı (m)
x, y, z	Kartezyen koordinat sistemi indisi
q	Dinamik Basınç (Pascal)
ρ	Hava Yoğunluğu (kg/m ³)
μ	Dinamik viskozite (kg/ms)
ν	Kinematik viskozite (m ² /s)
U*	Sürtünme hızı
τ_w	Çeper kayma gerilmesi
δ*	Yer değiştirme kalınlığı
θ	Momentum kalınlığı

H.A.D Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

R.A.N.S Reynolds-Averaged Navier-Stokes

L.E. S Large Eddy Simulation (Büyük Girdap Simülasyonları)

D.E.S Detached Eddy Simulation (Bağımsız Girdap Simülasyonları-Hibrit Metot)

D.N.S Direct Numerical Simulation (Direk Sayısal Simülasyonlar)

R.S.M Reynolds Stress Modeli

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Termit yuvası ve Burj Khalifa [1]	1
Şekil 1.2.Yalıçapkını kuşundan ilham alınarak tasarlanan Shinkansen treni [3]	2
Şekil 1.3. Lotus bitkisinden esinlenerek tasarlanan dış cephe kaplama malzemesi [8]	3
Şekil 1.4. Clement Ader'in tasarımını yaptığı hava aracı [10].....	4
Şekil 1.5.Sandık balığından ilham alınarak üretilen Mercedes Benz Biyonik kavram otomobili [15].....	6
Şekil 1.6. Mako köpekbalığından esinlenerek tasarlanan araç [17].....	7
Şekil 1.7. Araçlarda yapılan aerodinamik çalışmaların tarihçesi [21]	9
Şekil 1.8. Chrysler Airflow [23]	9
Şekil 1.9. Mercedes-Benz C 111 – III [25]	10
Şekil 1.10.Orta büyüklükte bir binek taşıtı için, Cd değeri düşüşünün yakıt ekonomisine etkisi [27].....	12
Şekil 1.11. Laminer ve türbülanslı sınır tabaka [38]... ..	19
Şekil 1.12. Düz bir levha üzerindeki akışta sınır tabakanın gelişimi [39].....	20
Şekil 2.1. (a) Mercedes sprinter modelinin yan görünüşü,(b)Modelin ön görünüşü,(c)Teknik ölçüleri [43].....	30
Şekil 2.2.T1 modelinin (a)Üç boyutlu perspektif görünümü,(b)Yan görünüşü,(c) Ön görünüşü	32
Şekil 2.3. (a)Napolyon balığı (humhead wrasse) [44], (b) Balığın 3D modeli ,(c) Bu balıktan ilham alınarak tasarlanmış T2 modeli	34
Şekil 2.4.T2 modelinin (a) Üç boyutlu perspektif görüntüsü (b) Yan görünüşü ve teknik ölçüleri (c) Ön görünüşü ve teknik ölçüleri]	35
Şekil 2.5. (a) Yeşil hörgüçlü papağan balığı (Bolbometopon muricatum) [45], (b) Balığın 3D modeli, (c) Bu balıktan ilham alınarak tasarlanan T3 modeli	37
Şekil 2.6. T3 modelinin (a) Üç boyutlu perspektif görüntüsü (b) Yan görünüşü ve teknik ölçüleri (c) Ön görünüşü ve teknik ölçüleri.....	38
Şekil 2.7. (a) Flowerhorn balığı (Flowerhorn fish) [46] , (b) Balığın 3D modeli(c) Bu balıktan ilham alınarak tasarlanan T3 modeli.....	40
Şekil 2.8. T4 modelinin (a) Üç boyutlu perspektif görüntüsü (b) Yan görünüşü ve teknik ölçüleri (c) Ön görünüşü ve teknik ölçüleri.....	41
Şekil 2.9. T1 modelinin SOLIDWORKS programı kullanılarak tasarlanan üç boyutlu perspektif görünümü.....	42
Şekil 2.10. T1 modelinin ANSYS SPACECLAIM programındaki perspektif görüntüsü...43	
Şekil 2.11. T1 modelinin ANSYS SPACECLAIM programı kullanılarak oluşturulan üç boyutlu kontrol hacmi.....	44
Şekil 2.12. Ağ yapısı oluşturulurken tekerleklerin uygun hale getirilmesi	45
Şekil 2.13. T1 modelinin ağ yapısı	46
Şekil 2.14. Ağ yapısının çarpıklık oranı ve ortogonal kalitesinin sınıflandırılması [47].....	47
Şekil 2.15. Sınır şartlarının ANSYS Fluent programında tanımlanması	50
Şekil 2.16. Deneysel çalışmalarda kullanılan Rüzgar Tüneli [47]	51
Şekil 2.17. Rüzgar tünelini İnlet kesiti[47].	52
Şekil 2.18. Rüzgar Tüneli kuvvet ve dil mekanizması [47].	53
Şekil 2.19.Veritakip ve kayıt sistemi için bilgisayar [47].....	54
Şekil 2.20.Rüzgar Tüneli veri akışı İçin kullanılan LABVIEW programı[47].	55
Şekil 2.21.Rüzgar Tüneli Kuvvet ve dil mekanizması[47].	56

Şekil 3.1. T1 modeli 27.7 m/s hızında basınç gradyanı	58
Şekil 3.2. T1 modelinin 27.7 m/s hızdaki türbülans oluşumu.....	59
Şekil 3.3. T1 modelinin farklı hızlardaki sürüklenme katsayıları -Reynolds değerleri	60
Şekil 3.4. T1 Modelinin farklı hızlardaki sürüklenme kuvvetleri değerleri.....	60
Şekil 3.5. T1 dikiz aynasız modelin 27.7 m/s hızında basınç gradyanı	61
Şekil 3.6. T1 dikiz aynasız modelinin 27.7 m/s hızında türbülans oluşumu.....	62
Şekil 3.7. T2 modelin 27.7 m/s hızında basınç gradyanı	63
Şekil 3.8. T2 modelinin 27.7 m/s hızında türbülans oluşumu.....	63
Şekil 3.9. T2 modelinin farklı hızlardaki sürüklenme katsayıları değerleri.....	64
Şekil 3.10. T2 modelinin farklı hızlardaki sürüklenme kuvvetleri- Reynolds değerleri.....	64
Şekil 3.11. T3 modelin 27.7 m/s hızında basınç gradyanı	65
Şekil 3.12. T3 modelinin 27.7 m/s hızında türbülans oluşumu.....	66
Şekil 3.13. T3 minibüs modelinin farklı hızlardaki sürüklenme katsayıları değerleri.....	66
Şekil 3.14. T3 minibüs modelinin farklı hızlardaki sürüklenme kuvvetleri değerleri	67
Şekil 3.15. T4 modelin 27.7 m/s hızında basınç gradyanı	68
Şekil 3.16. T4 modelinin 27.7 m/s hızında türbülans oluşumu.....	68
Şekil 3.17. T4 minibüs modelinin farklı hızlardaki sürüklenme katsayıları değerleri.....	69
Şekil 3.18. T4 minibüs modelinin farklı hızlardaki sürüklenme kuvvetleri değerleri	69
Şekil 3.19. 16.6 m/s, hızda minibüs modellerin sürüklenme katsayıları.....	71
Şekil 3.20. 16.6 m/s hızda minibüs modellerin sürüklenme kuvvetleri,	72
Şekil 3.21. 27.7 m/s hızda minibüs modellerin sürüklenme katsayıları.....	72
Şekil 3.22. 27.7 m/s hızda minibüs modellerin sürüklenme kuvvetleri	73
Şekil 3.23. 33.3 m/s hızda minibüs modellerin sürüklenme katsayıları.....	73
Şekil 3.24. 33.3 m/s hızda minibüs modellerinin sürüklenme katsayıları.....	74
Şekil 4.1. T2 modelinin 1:28 ölçekli modeli.....	75
Şekil 4.2. ULTIMAKERS5 3D yazıcı.....	76
Şekil 4.3. T2 modelinin 1:28 ölçekli modelinin üretimi.....	76
Şekil 4.4 .T2 modelinin 1:28 ölçekli modelinin deney için uygun hale getirilmesi.....	76
Şekil 4.5. T2 modelinin 1:28 ölçekli modelinin rüzgar tüneli deneyleri.....	77

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Modellerin ölçüleri	28
Tablo 2.2. Dikiz Aynalı T1 Modelinin Ağ yakınsama değerleri	48
Tablo 2.3. Analizlerde kullanılan sınır şartları.....	49
Tablo 3.1. Modellerin izdüşüm alanları.....	56
Tablo 3.2. Analizlerde kullanılan sınır şartları ve havanın değerleri.....	57
Tablo 3.3. T1 modelinin farklı hızlarda araç yüzeyine etki eden basınç değerleri.....	61
Tablo 3.4. T2 modelinin farklı hızlarda araç yüzeyine etki eden basınç değerleri.....	65
Tablo 3.5. T3 modelinin farklı hızlarda araç yüzeyine etki eden basınç değerleri.....	67
Tablo 3.6. T4 modelinin farklı hızlarda araç yüzeyine etki eden basınç değerleri.....	70
Tablo 4.1. T2 modelinin 1m/s ve 27.7 m/s hızlarında analiz sonuçları (1:28, 1:1 ölçekli).....	77
Tablo 4.2. T2 modelinin deneysel ve analiz sonuçları (1:28 ölçekli).....	78

İÇİNDEKİLER

ÖZET	I
ABSTRACT.....	II
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER.....	III
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
TABLolar DİZİNİ.....	VIII
İÇİNDEKİLER.....	IX

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1.1. Aerodinamiğin Temelleri.....	9
1.2. Taşıt Aerodinamiği.....	9
1.3. Aerodinamik Kuvvetler.....	11
1.3.1. Aerodinamik Direnç (Sürüklenme) Kuvveti.....	11
1.3.2. Kaldırma Kuvveti.....	13
1.4. Aerodinamik Momentler.....	14
1.4.1 Yunuslama Momenti (M_p).....	14
1.4.2 Yuvarlanma Momenti (M_R).....	15
1.4.3 Yana Kayış Momenti (M_Y)	15
1.5. Sürüklenme Katsayısı İle İlgili Yapılmış Olan Çalışmalar	15
1.6 Navier Stokes Denklemleri.....	17
1.7 Sınır Tabakası.....	19
1.8 Reynolds Sayısı	22
1.9 Sayısal Çözüm Yöntemi	23
1.10 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği.....	23
1.10.1 Türbülans Modelleme	24
1.11 Rüzgar Tünelleri ve Kullanım Amacı.....	25
1.11.1 Rüzgar Tüneli Deneylerinde Aerodinamik Benzerlik ve Akış kalitesi.....	26

İKİNCİ BÖLÜM

MALZEMELER VE YÖNTEMLER

2.1. Modeller.....	29
2.1.1 Mercedes Sprinter	30
2.1.2 Mercedes Sprinter Modeli ile Aynı Ölçülerde Tasarlanan T1 Modeli	32
2.1.3 Napolyon Balığından Esinlenerek Tasarlanan T2 Modeli.....	34
2.1.4 Yeşil Hörgüçlü papağan balığından Esinlenerek Tasarlanan T3.....	36
2.1.5 Çiçek Boynuzu Balığından Esinlenerek Tasarlanan T4 Modeli.....	40
2.2 Metot.....	43
2.2.1 Minibüsün Bilgisayar Destekli Tasarımı.....	43
2.2.2 Üç Boyutlu Ağ Yapısının Oluşturulması.....	45
2.2.3 Sınır şartları	50
2.2.4 Rüzgar Tüneli Deneyleri.....	52

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

AKIŞ ANALİZİ BULGULARI VE TARTIŞMA

3.1.Minibüs Modellerinin Analizleri.....	59
3.1.1 T1 Modeli Çözümü	59
3.1.2 T1 Modelinin Dikiz Aynasız Çözümü.....	63
3.1.3 T2 Modeli Çözümü	64
3.1.4 T3 Modeli Çözümü	67
3.1.5 T4 Modeli çözümü	70
3.2 Minibüs Modellerinin Analiz Sonuçları	73

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
RÜZGAR TÜNELİ DENEY BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1 T2 modelinin 1:1 Ölçekli ve 1:28 Ölçekli Modellerinin Analiz Sonuçları.....	77
4.2 T2 Modelinin Deney Bulguları.....	79

BEŞİNCİ BÖLÜM
SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1 Sonuç ve Öneriler.....	80
KAYNAKLAR.....	82



1.GİRİŞ

Biyomimetik yaklaşım, doğadaki çeşitli organizmaların yapısal, işlevsel ve davranışsal özelliklerinden ilham alarak, insan yapımı sistemlerin ve yapıların daha verimli, sürdürülebilir ve uyumlu hale getirilmesini sağlayan bir tasarım metodolojisidir. Bu yaklaşımın temel amacı, doğadaki mükemmel uyum ve optimizasyon örneklerini izleyerek, mimari, mühendislik ve tasarım alanlarında çözümler üretmektir. Biyomimetik tasarımın uygulanmasıyla çevresel etkilerin azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması ve yapıların daha dayanıklı hale getirilmesi gibi bir dizi avantajlar elde edilir.

Birleşik Arap Emirlikleri'nin Dubai kentinde bulunan dünyadaki en yüksek yapılardan biri olan Burj Khalifa'nın yapımında biyomimetik prensiplerden faydalanılmıştır. Binanın şekli, Afrika ve Avusturya karayollarında oluşan Termit dağları incelenerek tasarlanmıştır. 3-8 m yüksekliğine sahip olan Termit dağları, termit ve insanların ölçüleri baz alınarak ölçeklendirildiğinde termit dağlarının yüksekliği 1500 m uzunluğundaki bir gökdelen ile ölçeklendirilmektedir. Bu tasarım Burj Khalifa'nın havalandırma sisteminin tasarımında da bu yapılardan esinlenilmiştir [1]. Termit yuvası ve Burj Khalifa Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1.Termit yuvası, Burç Halife [1]

Japonya'da bulunan Shinkansen hızlı trenlerinin tasarımında, Yalıçapkını kuşunun vücut yapısından esinlenilmiştir .Yalıçapkınları su yüzeyine yakın bir şekilde seyahat edebilen hayvanlardır. Bu kuşun benzersiz vücut yapısı, uçarken ve avlanırken olağanüstü performans sergilemesini sağlar. Bu kuşun gövde yapısı, aerodinamik ve kompakt bir formdadır. İnce ve uzun bir gövdesi, büyük bir başı ve uzun, sivri bir gagası vardır. Bu yapı,

kuşun uçarken hava direncini minimuma indirir ve suya dalarken avını yakalamasını kolaylaştırır. Yalıçapkını kuşunun suda hızlı ve sessiz hareket edebilme yetenekleri, trenlerin hava direncini azaltma ve daha yüksek hızlara ulaşma konusunda bir ilham kaynağı olmuştur. Bu, trenlerin daha az enerji harcayarak daha uzun mesafeler almalarını sağlamıştır [2]. Yalıçapkını kuşundan ilham alınarak tasarlanan Shinkansen treni Şekil 1.2’de gösterilmiştir



Şekil 1.2. Yalıçapkını kuşundan ilham alınarak tasarlanan Shinkansen treni [3]

1851 yılında Londra'da düzenlenen 1. Dünya Fuarı için inşa edilen Kristal Saray, yapımında cam ve demirin ağırlıklı olarak kullanıldığı yaklaşık 33 metre yüksekliğe ve 18 dönümlük bir alana sahip olan bu yapıpeyzaj mimarı Joseph Paxton tarafından tasarlanmıştır. Paxton, Victoria amazonica adlı nilüfer bitkisinin yaprak yapısını inceleyerek ilham almış , yaprağın gövde kısmını cam kullanarak yaprağın damar olan bölümlerinde ise demir kullanarak tasarlamıştır. Bu benzetisi sayesinde, hafif ve sağlam bir çatı tasarımı ortaya çıkmıştır [4].

Airbus mühendisleri, Airbus A300-600ST, "Beluga" adı verilen uçak, tasarımında balinalardan, özellikle de beluga balinasından esinlenilmiştir. Beluga balinalarının vücutları yuvarlak ve pürüzsüzdür. Bu yapı, su direncini minimuma indirerek hızlı ve verimli yüzmelerini sağlar. Pektoral yüzgeçleri (yan yüzgeçler) küçüktür, bu da su direncini azaltır. Bu yüzgeçler, balinanın yön değiştirmesi ve dengede kalması için kullanılır. Beluga balinalarının boyunları, diğer balinalara kıyasla daha hareketlidir. Bu esneklik, başlarını

yukarı ve aşağı, sağa ve sola hareket ettirmelerine olanak tanıyarak daha iyi manevra kabiliyeti sağlar. Beluga balinalarının kalın derisi ve altında bulunan blubber (yağ tabakası), onları soğuk su koşullarından korur ve aynı zamanda yüzdürme gücünü artırır. Beluga balinalarının vücut yapısı, su içinde düşük sürüklenme ile hareket etmelerini sağlar. Bu enerji verimliliğini artırır ve daha uzun mesafeleri daha az enerji harcayarak kat etmelerine olanak tanır. Tüm bu özellikler bu uçağın tasarımcılarına ilham vermiştir [5].

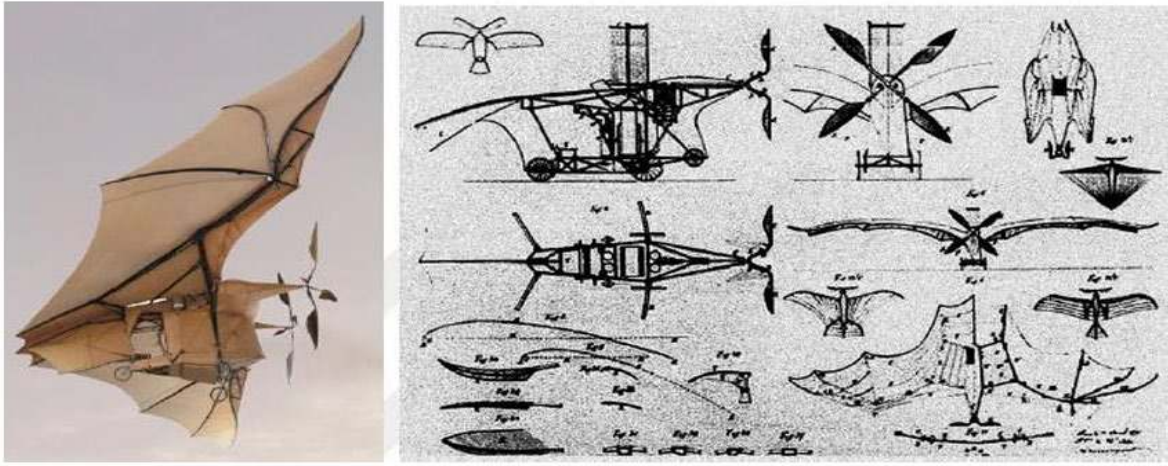
Norman Foster tarafından tasarlanan ve inşa edilen Clyde Oditoryumu, 1997 yılında İskoçya'nın Clyde Nehri yakınlarında açılmıştır. Yapının dış görünümü, zırlı bir hayvan olan Armadillo'yu andırmaktadır. Bu benzerlik nedeniyle, başlangıçta Clyde Oditoryumu olarak adlandırılan yapı, zamanla Armadillo ismiyle anılmaya başlanmıştır. Yapının strüktürü, doğadan ilham alınarak tasarlanmış ve çelik kaburgalar ile kirişlerle desteklenen bir iskelet sistemi oluşturulmuştur [6].

Lotus bitkisinin yüzey özelliklerinden esinlenerek geliştirilen dış cephe kaplama malzemeleri, suyun yüzeyde incelmesini sağlayarak kirleticilerin kolayca temizlenmesini sağlar; yağlar, toz ve diğer kirleticiler yağmur veya doğal temizlik süreçleriyle yüzeyden kolaylıkla uzaklaştırılır. Lotus bitkisinin su itici özelliğinden esinlenen bilim insanları ve mühendisler, dış cephe kaplama malzemeleri gibi çeşitli uygulamalarda kendini temizleyen yüzeyler geliştirmişlerdir; bu kaplama malzemeleri genellikle hidrofobik özelliklere sahip olup, yağlar, toz ve diğer kirleticilerin yüzeyde birikmesini önler, böylece yağmur veya diğer doğal temizlik süreçleri sırasında yüzeyler kolayca temizlenir [7]. Şekil 1.3'te Lotus bitkisinden esinlenerek tasarlanan dış cephe kaplama malzemesi gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Lotus bitkisinden esinlenerek tasarlanan dış cephe kaplama malzemesi [8]

Clement Ader, havacılığın öncülerinden biri olarak, yarasa kanatlarının aerodinamik yapısından ilham alarak ve buharın basınç etkisiyle ürettiği kuvvetten yararlanarak uçan makineler geliştirmeye çalışmıştır. Ader'in tasarımlarında buhar motorlarının gücünden faydalanarak, kanatların doğru bir şekilde hareket etmesini ve havalanmasını sağlamak amaçlanıyordu. Yarasa kanatlarına benzer yapıda kanatlara sahip olan bu araçlarla deneyler yapmıştır. Ader'in en ünlü aracı olan "Éole" adlı uçak 1890 yılında gerçekleştirdiği uçuş denemesi ile dikkat çekmiştir. Bu denemede, Éole yaklaşık 300 metre yüksekliğe kadar yükselmeyi başarmıştır. Ader'in çabaları, gelecekteki havacılık çalışmalarına önemli bir temel oluşturmuş ve bu alanda yapılan yeniliklerin önünü açmıştır [9]. Clement Ader'in tasarımı Şekil 1.4'te gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Clement Ader'in tasarımı yaptığı hava aracı [10].

Mürekkep balıkları, su altında hızlı ve sessiz hareket edebilmek için etkili bir itme mekanizması kullanırlar. Bu itme mekanizması, mürekkep balığının vücudu içindeki kaslarını kullanarak suyu vücudunun arkasına doğru hızla itmesiyle gerçekleşir. Bu sayede mürekkep balıkları, avlarını takip ederken veya avcılarından kaçarken sessiz ve hızlı bir şekilde ilerleyebilirler. Benzer şekilde, jet uçakları da jet motorlarından çıkan hava ve yanma gazlarını kullanarak bir itme hareketi üretirler. Bu itme hareketi, uçağın ileri doğru ilerlemesini sağlar ve hızını artırır. Jet motorlarının içindeki yanma süreciyle oluşan gazlar, yüksek basınç altında dışarı atılır ve bu itme gücü uçağı ileriye doğru iterek hızını artırır. Bu benzerlik, mühendislerin doğadan ilham alarak yeni teknolojiler geliştirmesine ve uygulamalar tasarlamasına örnek teşkil eder. Bu doğadan ilham alan mühendislik yaklaşımı hem su altında hem de havada etkili bir şekilde hareket etme ihtiyacı olan sistemlerin tasarımında önemli bir rol oynamaktadır [11].

Yarasaların ekolokasyon yeteneği, yüksek frekansta ses dalgaları kullanarak çevrelerini haritalamak ve avlanmak için etkili bir strateji geliştirmiş bir adaptasyon örneğidir. Bu yetenekleri, çevrelerindeki nesnelerden yansıyan ses dalgalarını algılayarak, avlarını tespit etmelerini ve engellerden kaçınmalarını sağlar. Yarasaların ağızından çıkan bu ses dalgaları, çevrelerindeki nesnelerden yansıyarak geri döner ve yarasanın kulaklarına ulaşır. Yarasalar, bu yankıları kulakları aracılığıyla algılayarak çevredeki nesnelerin konumunu, boyutunu ve hareketini belirleyebilirler. İnsanlar, yarasaların bu benzersiz yeteneğinden ilham alarak benzer bir prensibe dayanan teknolojiler geliştirmişlerdir. Bu teknolojiler arasında araçlarda kullanılan ses ve sensör teknolojileri yarasaların ekolokasyon yeteneğinden esinlenerek geliştirilmiştir [12].

Albayraklar Şirket Grubu tarafından geliştirilen Watozz, yenilikçi tasarımıyla dikkat çeken bir silahlı insansız deniz aracıdır. Bu yüksek teknoloji ürünü araç, doğadan ilham alınarak vatoz balığının aerodinamik yapısını ve hareket kabiliyetini taklit etmek üzere tasarlanmıştır. Watozz, uzaktan kumanda ile kontrol edilen bir mayın silahı olup, deniz güvenliği ve savunma alanında çığır açan özelliklere sahiptir. Watozz'un en dikkat çekici özelliklerinden biri, denizde kesintisiz olarak 12 saat boyunca hareket edebilmesidir. Bu süre zarfında çeşitli keşif ve saldırı görevlerini yerine getirebilmekte, düşman unsurlarını etkisiz hale getirebilmektedir. Ayrıca, uzun süreli operasyonlarda etkinliğini koruyabilmesi için uyku modu özelliği ile donatılmıştır. Bu mod sayesinde Watozz, 10 gün boyunca hareketsiz kalarak su altında gizlenebilir ve belirlenen hedeflere yönelik ani saldırılar gerçekleştirebilir. Test sonuçlarına göre, Watozz'un operasyonel yetenekleri ve güvenilirliği, denizlerde stratejik avantajlar sağlamaktadır. Gelişmiş sensörleri ve manevra kabiliyeti ile donatılmış olan bu araç, düşman deniz araçlarını tespit edebilir ve gerektiğinde müdahalede bulunabilir. Ayrıca, yüksek dayanıklılık ve enerji verimliliği sayesinde uzun süreli görevlerde üstün performans sergileyebilmektedir. Watozz'un geliştirilmesi, deniz güvenliği ve savunma teknolojilerinde önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Albayraklar Şirket Grubu'nun bu yenilikçi ürünü, denizlerdeki tehditlere karşı etkili bir çözüm sunarken, aynı zamanda gelecekteki insansız deniz aracı teknolojilerine de ilham vermektedir [13].

Doğadaki canlıların özellikleri incelendiğinde yine araç tasarımında da doğadan ilham alınmış ve birçok üstün aerodinamik özelliklere sahip, düşük sürtünme katsayılarına sahip canlılardan ilham alınmıştır. Sandıkbalığı, su altında hareket ederken minimal direnç sağlayan dikdörtgen benzeri bir şekle sahiptir. Bu şekil, su altında hızlı ve verimli bir şekilde ilerlemeyi sağlar. Bu özelliklerinden ilham alan tasarımcılar bu özelliği biyonic kavram

otomobilinde kullanarak sürüklenme katsayısını 0.19 seviyesine indirmiştir [14]. Sandık balığında ilham alınarak üretilen Mercedes Benz biyonik kavram otomobili Şekil 1.5'te gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Sandık balığından ilham alınarak üretilen Mercedes Benz Biyonik kavram otomobili [15]

1961 Mako Shark Corvette, Chevrolet tarafından tasarlanan efsanevi bir konsept otomobildir (Şekil 1.6). Bu araç, mako köpekbalığından esinlenerek adını almıştır ve tasarımında deniz hayvanının özelliklerine atıfta bulunur. Mako Shark Corvette, genellikle Chevrolet'in tasarım ve teknoloji konularındaki ilerlemelerini sergilemek için üretilmiş bir konsept araç olarak kabul edilir. Özellikle aracın ön kısmı, keskin hatlarıyla köpek balığı yüzgeçlerini andırmaktadır. Bu tasarım, aracın aerodinamik performansını artırmak ve agresif bir görünüm elde etmek amacıyla özenle oluşturulmuştur. Ayrıca, aracın genel hatları ve detayları, mako köpekbalığının zarif ve güçlü yapısını yansıtmak üzere özenle seçilmiştir [16].



Şekil 1.6. Mako köpekbalığından esinlenerek tasarlanan araç [17]

Bu çalışmanın amacı biyomimetikten ilham alarak yeni araç tasarımlarının yakıttan tasarrufunu sağlayarak; çevre dostu, karbon emisyonları azaltılmış, sürdürülebilir ulaşım araçlarının geliştirilmesidir. Bu çalışmada iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin azaltılması ve ulaşım sektöründe çevreye duyarlı uygulamaların teşvik edilmesi çabalarına katkı sağlayabilir. Bu yüksek lisans tezinde çeşitli balık türlerinden ilham alınarak tasarlanan minibüs modelleri üzerine yapılan çalışmalar sürüklenme katsayılarının hesaplanması amacıyla uygulanan analiz yöntemleri ve deneylerde kullanılan modeller Bölüm 2'de anlatılmaktadır. Bölüm 3'te gerçekleştirilen analizlerin detayları ve sonuçları ele alınmıştır. Rüzgar tüneli deneyleri Bölüm 4'te tezin öneriler ve sonuç kısmı Bölüm 5'te yer almaktadır

1.1 AERODİNAMİĞİN TEMELLERİ

Aerodinamik, hava (genellikle gaz) ve katı cisimler arasındaki etkileşimleri inceleyen bir bilim dalıdır. "Aero" kelimesi hava anlamına gelirken, "dynamics" ise hareket veya etki anlamına gelir. Dolayısıyla, aerodinamik, hava veya gazların katı cisimler üzerindeki etkilerini inceler. Bu bilim dalı genellikle uçaklar, arabalar, gemiler, rüzgar türbinleri gibi cisimlerin tasarımında ve performansının optimize edilmesinde önemli bir rol oynar. Hava akışı, basınç dağılımı, sürtünme kuvvetleri, yükselme ve direnç gibi konuları kapsar. Uygulamalı aerodinamik, genellikle uçuş mühendisliği, otomotiv mühendisliği, gemi mühendisliği ve rüzgar enerjisi gibi alanlarda kullanılır. Bu alanlarda aerodinamik

prensiplerinin doğru bir şekilde uygulanması, daha verimli ve güvenilir tasarımların ortaya çıkmasını sağlamıştır [18].

Aerodinamiğin kökenleri, insanlık tarihine uzanan bir geçmişe sahiptir. Ancak modern anlamda aerodinamik çalışmaları, 18. ve 19. yüzyıllarda daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Özellikle 18. yüzyılın sonlarına doğru, bilim insanları hava ve gazların hareketiyle ilgili temel prensipleri anlamaya yönelik çalışmalar yapmışlardır [18].

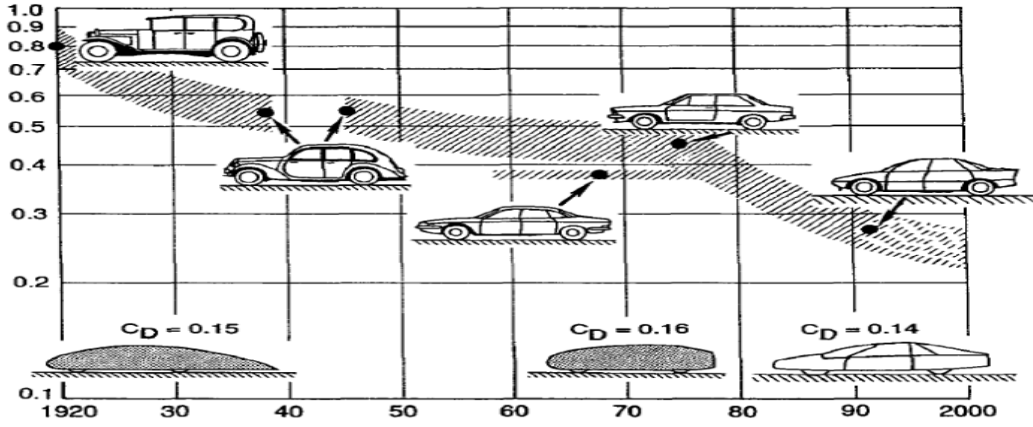
Aerodinamiğin bilimsel temelleri, Isaac Newton'un hareket yasalarının geliştirilmesi ve Bernoulli'nin akışkanlar dinamiği prensipleri gibi temel çalışmalarla şekillenmiştir. 19. yüzyıl boyunca, bilim insanları aerodinamikle ilgili deneyler gerçekleştirmiş, matematiksel modeller oluşturmuş ve hava akışı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelemişlerdir. [18].

Uçakların gelişimiyle birlikte, aerodinamik çalışmaları özellikle 20. yüzyılın başlarında hız kazanmıştır. Wright Kardeşler 'in ilk uçuşları ve bunun ardından havacılık endüstrisinin gelişimi, aerodinamiğin önemini daha da artırmıştır. Bu dönemde aerodinamik, uçak tasarımı ve performansının yanı sıra farklı alanlarda da büyük bir etkiye sahip olmuştur. [19].

1.2 Taşıt Aerodinamiği

Tasarımcılar, araç aerodinamiği üzerinde çalışmanın önemini kavramışlardır; çünkü aerodinamik tasarım, araçların performansını, verimliliğini, güvenliğini ve sürüş konforunu etkileyen hayati bir faktördür. İyi bir aerodinamik tasarım, aracın hava direncini azaltarak yakıt verimliliğini artırır. Azalan hava direnci, aracın daha az enerji harcamasını sağlar ve böylece daha düşük yakıt tüketimi ve daha uzun menzil elde edilir [20]. Günümüzde çevresel etkilerin öneminin artmasıyla, tasarımcılar için yakıt verimliliği öncelikli bir hale gelmiştir. Ayrıca aerodinamik tasarım, aracın performansını önemli ölçüde artırır. Daha az hava direnci, aracın hızlanma yeteneğini ve maksimum hızını artırır. Bu da sürücülere daha dinamik bir sürüş deneyimi sunar. İyi bir aerodinamik tasarım, aracın stabilitesini artırarak güvenliği sağlar. Özellikle yüksek hızlarda ve değişen hava koşullarında, uygun aerodinamik özellikler aracın kontrolünü sağlamak için kritiktir. Aerodinamik tasarım, araçtan kaynaklanan gürültüyü azaltabilir. Bu, iç mekânda daha sessiz bir sürüş deneyimi sağlar ve sürücülerin ve yolcuların konforunu artırır. İyi bir aerodinamik tasarım, aracın çevresel etkilerini azaltabilir. Daha az hava direnci, daha düşük karbon emisyonları ve daha az enerji tüketimi anlamına gelir. Bu da çevreye daha az zarar veren araçlar demektir.

Otomobillerde aerodinamik çalışmalar, otomobil endüstrisindeki gelişmelerle birlikte zamanla evrim geçirmiştir. 1930'lar ve 1940'lar otomobil endüstrisinde aerodinamik çalışmaların erken dönemlerinde, araç tasarımlarının daha akıcı hale getirilmesine yönelik çabalar görülmüştür [21]. Araçlarda yapılan aerodinamik çalışmaların tarihçesi Şekil 1.7' de gösterilmiştir .



Şekil 1.7. Araçlarda yapılan aerodinamik çalışmaların tarihçesi [21]

Şekil 1.8' de gösterilen Chrysler Airflow modeli aerodinamik etkileri rüzgar tüneline gözlemlenerek tasarlanan ilk otomobil olmuştur [22].



Şekil 1.8. Chrysler Airflow [23]

1950'lerde otomobil tasarımcıları, hava direncini azaltmak ve aerodinamik etkileri optimize etmek için araçların şekillerini iyileştirmeye başlamışlardır. Özellikle Avrupa'da, otomobil üreticileri daha akıcı hatlara sahip araçlar tasarlamak için çaba gösterdiler. 1960'lar ve 1970'ler bu dönemde, otomobil endüstrisinde aerodinamik çalışmalar hız kazandı. Artan hızlar ve yakıt tüketiminin önemi, araçların aerodinamik tasarımının daha fazla önem kazanmasına yol açmıştır. 1990'lar ve sonrası dönemde otomobil endüstrisi, aerodinamik performansın önemini anlaşılmış, gelişen bilgisayar teknolojisi ve simülasyon yazılımları, aerodinamik tasarımın daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesini ve optimize edilmesini sağlamıştır. Bu dönemde, daha fazla araç, daha ince detaylara sahip aerodinamik tasarımlarla piyasaya sürülmüştür. Şekil 1.9'da gösterilen Mercedes'in 1985'de ürettiği C 111 serisi o dönem sürüklenme katsayısı en düşük olan araç olmuştur. Aracın sürüklenme katsayısı 0.183 olarak belirlenmiştir [24].



Şekil 1.9. Mercedes-Benz C 111 – III [25]

Günümüzdeki teknolojik ilerlemeler ve mühendislik gelişmeleri sayesinde, daha aerodinamik araçlar üretmek mümkündür. Bilgisayar destekli tasarım, sayısal akışkanlar dinamiği simülasyonları ve gelişmiş malzeme teknolojileri gibi araçlar, araçların aerodinamik performansını optimize etmeye yardımcı olur. Bu gelişmelerin sonucunda, daha yakıt verimli, daha güvenli ve daha performanslı araçlar üretilmektedir.

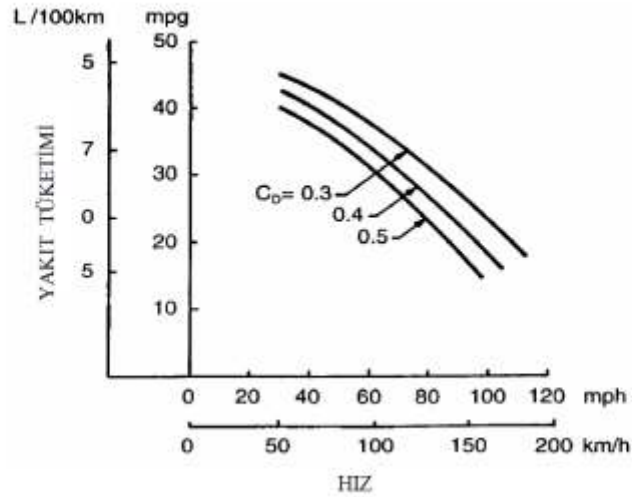
1.3 Aerodinamik Kuvvetler

Taşıtın hareketi üzerinde etkili olan kuvvetler, genellikle üç farklı eksen boyunca düşünülür. Bunlar; ileri doğru harekete karşı direnç oluşturan aerodinamik direnç kuvveti, taşıtın yükseklik veya alçalma eğilimine neden olan kaldırma kuvveti ve yalnızca yanlardan esen rüzgarın etkisiyle ortaya çıkan yanal kuvvettir. Bu kuvvetler, taşıtın dengesi ve hareketi üzerinde belirleyici bir rol oynar [26].

1.3.1 Aerodinamik Direnç (sürüklenme) Kuvveti

Aerodinamik sürtünme kuvveti, bir cismin bir akışkan içinde hareket ettiği zaman, özellikle hava gibi akışkanların cisimle etkileşimi sonucunda meydana gelen bir kuvvettir. Bu kuvvet, hareket eden cismin yüzeyine çarpan hava molekülleriyle etkileşime girerek ortaya çıkar. Hava molekülleri, cismin yüzeyine temas ederken sürtünme yaratır ve bu sürtünme kuvveti ile cismin hareket yönü birbirinin tersinedir. Özellikle araçlar gibi aerodinamik şekillere sahip nesneler için bu kuvvet hayati önem taşır çünkü aracın hızını ve yakıt tüketimini etkiler. Araç tasarımcıları, aerodinamik sürtünme kuvvetini azaltmak için araç gövdesinin şeklini optimize ederler. Bu optimizasyonlar, düzgün ve akışkan bir şekil oluşturarak hava direncini minimize etmeyi amaçlar. Böylece araç, daha az enerji harcar ve daha yüksek hızlara ulaşabilir. Bu sürecin sonucunda, daha verimli ve ekonomik bir sürüş deneyimi sağlanmış olur.

Şekil 1.10'da 1060 kg ağırlığındaki, 1,77 m² kesit alanına ve radyal lastiklere sahip bir binek taşıtının sürtünme katsayısı (C_d değeri) düşüşünün sürekli akış koşullarındaki yakıt tüketimine etkisi gösterilmektedir. Daimî 96 km/h hızında C_d değeri 0,5'ten 0,3'e düştüğünde, yakıt verimliliğinde %23'lük bir artış sağlanmaktadır. Bu durum, taşıtın hava direncinin azalmasıyla enerji verimliliğinin arttığını ve dolayısıyla yakıt tüketiminin azaldığını göstermektedir. Bu tür aerodinamik iyileştirmeler, taşıtın daha az yakıt tüketerek daha uzun mesafeler gitmesine olanak tanır ve bu da çevresel etkiyi azaltırken kullanıcıya ekonomik avantajlar sağlar [27].



Şekil 1.10. Orta boyutlu bir otomobilde Cd değerinin azalmasının yakıt tasarrufuna olan etkisi [27]

Aerodinamik sürüklenme kuvveti aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır:

$$F = 0.5 \rho V^2 A C_d \quad (2.1)$$

1.3.2 Kaldırma Kuvveti

Aerodinamik kaldırma kuvveti, bir nesnenin hava içinde hareket ettiği zaman, hava tarafından yukarı doğru uygulanan bir kuvvettir. Bu kuvvet, genellikle nesnenin yüzey şekli ya da özel olarak tasarlanmış aerodinamik yapılar aracılığıyla oluşturulur. Örneğin, bir uçak kanadı, hava akışını üst yüzeyinde düşük basınç, alt yüzeyinde ise yüksek basınç oluşturarak kaldırma kuvveti üretir. Bu kuvvet, uçağın havada kalmasını sağlar. Araçların aerodinamik dizaynı ve hızı, bu kuvvetin büyüklüğünü ve etkinliğini belirleyen önemli faktörlerdir. Kaldırma kuvveti denklem (2.2)'den hesaplanır

Aerodinamik kaldırma kuvveti hesaplamak için temelde Bernoulli prensibi ve kaldırma katsayısı kullanılır. Bernoulli prensibi, hızı artan bir akışın basıncının azaldığını belirtir; bu, kaldırma kuvvetinin oluşumunda temel bir prensiptir. Kaldırma katsayısı ise bir cismin aerodinamik performansını tanımlar ve kaldırma kuvvetinin değerini belirler. Genellikle, kaldırma kuvveti (C_L) aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$F_L = \frac{1}{2} \times C_L \times \rho \times A \times V^2 \quad (2.2)$$

Bu formülde:

- F_L , kaldırma kuvvetini (N) temsil eder.
- C_L , kaldırma katsayısını (boyutsuz) ifade eder.
- ρ , hava yoğunluğunu (kg/m^3) belirtir.
- A , cismin üst yüzey alanını (m^2) gösterir.
- V , hava hızını (m/s) ifade eder.

Bu formül, bir cismin ürettiği kaldırma kuvvetini belirler ve genellikle aerodinamik analizlerde kullanılır. Kaldırma katsayısı (C_L) genellikle deneysel çalışmalarla veya aerodinamik simülasyonlarla belirlenir.

1.4. Aerodinamik Momentler

Taşıta etkiyen aerodinamik momentler, aracın hava ile etkileşimleri sonucunda meydana gelen dönme kuvvetleridir. Bu momentler, genellikle aracın hareketi, hızı ve aerodinamik tasarımıyla yakından ilişkilidir. Araç hava akımına maruz kaldığında, çeşitli aerodinamik etkileşimler aracın üzerinde dönme momentlerine neden olur. Bu momentler aracın dönme hareketleri üzerinde etkili olabilir ve sürüş dinamiğini belirleyebilir. Ana aerodinamik momentler, aracın yunuslama, yuvarlanma ve yana kayış hareketlerini etkiler. Bu momentler, aracın aerodinamik tasarımının yanı sıra hızı ve sürüş koşulları gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Taşıtların aerodinamik momentlerinin dengelenmesi ve kontrol edilmesi, aracın sürüş stabilitesi ve güvenliği açısından önemlidir.

1.4.1 Yunuslama Momenti (M_p)

Yunuslama momenti, bir taşıtın ön ve arkasında etki eden kaldırma kuvvetlerinin dengesiz olduğu durumlarda ortaya çıkar. Bu durum, genellikle aracın aerodinamik etkileşimleri sonucunda meydana gelir. Örneğin, aracın ön kısmında daha fazla kaldırma kuvveti oluşabilirken, arka kısmında daha az kaldırma kuvveti oluşabilir. Bu farklılıklar, aracın hareketi sırasında yunuslama momentini oluşturur. Yunuslama momenti, aracın basınç merkezi ile ağırlık merkezi arasındaki ilişkiyi dikkate alarak hesaplanır. Bu moment, aracın yönünde bir dönme eğilimi yaratarak aracın dengesizliğine neden olabilir. Yunuslama momenti, aracın sürüş stabilitesi ve yönlendirilebilirliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve aerodinamik tasarımın yanı sıra aracın yükü ve dağılımı gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Bu nedenle, taşıt tasarımında yunuslama momentinin dengelenmesi ve kontrol

edilmesi önemlidir, çünkü bu, sürüş güvenliği ve performansı üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. [28].

$$M_p = F_L x_c + F_D y_c = qA(C_L x_c + C_D y_c) = qALC_{MP} \quad (2.3)$$

L , taşıtın tipik boyutunu belirtir ve genellikle binek araçlar için ön ve arka aks arasındaki uzunluğu temsil eder. C_{MP} ise taşıtın aerodinamik karakteristiğini tanımlayan birimsiz yunuslama momenti katsayısıdır.

1.4.2 Yuvarlanma Momenti (M_r)

Yuvarlanma momenti, aracın sol ve sağ taraflarına etki eden yanal kuvvetlerin dengesiz olduğu durumlarda meydana gelir. Bu durum genellikle viraj alma veya ani yönlendirme hareketleri sırasında ortaya çıkar. Bir araç bir virajı döndüğünde, iç taraf lastiklere daha fazla yanal kuvvet uygulanırken, dış taraf lastiklere daha az yanal kuvvet uygulanır. Bu dengesizlik, aracın ağırlık merkezinin iç taraftan dış tarafa doğru kaymasına neden olur. Sonuç olarak, araç yuvarlanma hareketine girer ve yuvarlanma momenti oluşur. Yuvarlanma momenti, aracın yanal stabilitesini ve dengesini etkiler ve özellikle viraj alma sırasında aracın tepkisini belirler. Bu nedenle, araç tasarımı ve süspansiyon sistemleri, yuvarlanma momentini kontrol altında tutmak için önemlidir [28]

Yuvarlanma momenti:

$$M_R = F_Y y_c = qALC_{MR} \quad (2.4)$$

Burada C_{MR} ise birimsiz yuvarlanma momenti katsayısıdır.

1.4.3 Yana Kayış Momenti (M_y)

Aerodinamik yana kayış momenti (M_Y), taşıtın ön ve arkasına eşit olmayan bir şekilde etki eden yanal rüzgarlar nedeniyle ortaya çıkar. Bu durumda, taşıtın aerodinamik dengesi bozulur ve taşıt yana doğru kayma eğilimi gösterir. M_Y genellikle, taşıtın ağırlık merkezi ile belirli bir mesafede (x_c) etkiyen aerodinamik yan kuvvetten kaynaklanır. C_{MY} ise birimsiz yana kayış momenti katsayısıdır. Bu katsayı, taşıtın aerodinamik yapılarına ve geometrisine bağlı olarak değişir. Yüksek bir C_{MY} değeri, taşıtın daha fazla aerodinamik yana kayış momentine maruz kalma eğiliminde olduğunu gösterir.

$$M_Y = F_Y x_c = qALC_{MY} \quad (2.5)$$

1.5 Sürüklenme Katsayısı İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Araçların yakıt ekonomisi ve seyir güvenliği günümüzde araç üreticilerinin rekabet üstünlüğü sağlamak için öne çıkardığı özelliklerdir. Hareket halindeki motorlu araçların özellikle yüksek hızlarda yakıt ekonomisi ve aracın stabil kalabilmesi aracın aerodinamik özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Hareket halindeki taşıtlarda özellikle yüksek hızlarda araç etrafındaki havanın sürekli yer değiştirmesi sonucu aerodinamik sürüklenme (F_D) olarak adlandırılan boyutsuz olarak temsil edilen bir aerodinamik sürüklenme kuvveti oluşturur. Bu sürüklenme kuvvetini düşürmek araçların aerodinamik özelliklerinin iyileştirilmesi açısından önemlidir.

Geçmişten günümüze Araçların aerodinamik özelliklerinin iyileştirilmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Ahmed ve Ramm (1984) tarafından geliştirilen "Ahmed Body" adlı model, araçların basitleştirilmiş şekillerine odaklanmıştır. Bu model üzerinde yapılan çalışmalarda, aracın arka kısmındaki eğim açılarının sürüklenme katsayısına etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları, arka eğim açılarının 5° , $12,5^\circ$ ve 30° olduğu durumlarda sürüklenme katsayılarının sırasıyla 0.231, 0.23 ve 0.26 olarak belirlendiğini göstermiştir [29]. Bayraktar (2002) ise "Ahmed" modeliyle gerçekleştirdiği çalışmada, aracın arka eğim açısının sürüklenme katsayısına etkisini hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle incelemiştir. Deneyler sonucunda, en düşük sürüklenme katsayısının arka eğim açısının $12,5^\circ$ olduğu durumda elde edildiği tespit edilmiştir [30]. Koike ve ekibi (2004), "Mitsubishi Lancer" model sedan bir otomobilin arka camındaki hava akışını analiz etmişlerdir. Tavan ve arka camın birleşim bölgesine kısa girdap üreticileri monte ederek akış ayrılmasını geciktirmeye çalışmışlar ve bu müdahaleler sonucunda sürüklenme ve kaldırma katsayılarında 0.006'lık bir azalma gözlemlenmiştir [31]. Henning ve King (2005), akış bozulmaları üzerine yaptıkları çalışmada, basınç kontrolü sağlayarak akış formunu incelemişlerdir. Türbülansın neden olduğu dalgalanmaları izlemek için kullanılan sensörlerle, akış hatlarını takip etmek üzere LDA (Lazer Drop Anemometri) metodunu kullanmışlardır. Sonuçlar, gerçeğe uygun modellerin kullanılmasının doğru sonuçlar elde edilmesinde önemli olduğunu vurgulamıştır [32]. Kavadar (2006), rüzgar tüneli ve sayısal analizler kullanarak bir otobüs modelinin ön kısmına yönelik mekatronik bir burun tasarlamış ve bu burunun farklı açılardaki etkilerini değerlendirmiştir. Araştırmanın sonucunda, burun açısının değiştirilmesi ile sürüklenme katsayısında %10.7 oranında bir azalma sağlanmıştır. [33]. Helgason ve Hafsteinsson (2009), aerodinamik katsayıların otomatik araç optimizasyonu ile nasıl ilişkilendirilebileceğini araştırmışlardır. "Volvo"

marka bir araç üzerinde çalışarak, modelin dış tasarımında yaptıkları değişikliklerle sürüklenme katsayısındaki değişiklikleri incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, en iyi sürüklenme katsayısı değerinin, aracın orijinal tasarımında olduğu gibi elde edildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, bulunan değerlerin deneysel sonuçlarla %5'lik bir hata payı ile uyumlu olduğu belirtilmiştir. [34]. Pujals ve ekibi (2010), "Ahmed" modeli üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada, aracın tavanına girdap üreticiler yerleştirerek arka kısımdaki akış ayrılmalarını geciktirmeyi amaçlamışlardır. Literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak, bu çalışmada çok sayıda silindirik girdap üretici yatay olarak yerleştirilmiştir. Yapılan deneyler, kullanılan girdap üreticilerin sürüklenme katsayısını %10 oranında azalttığını göstermiştir [35]. Uçar (2018) tarafından yapılan çalışmada, "Ford Fiesta" model araç için yeni bir spoiler tasarımı geliştirilmiş ve bu tasarım ANSYS Fluent kullanılarak hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir. Gerçek bir test aracı kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda, aracın yakıt tüketimi ve performans ölçümleri "Prosmer" adlı belgelendirilmiş bir kuruluş tarafından gerçekleştirilmiştir. Yeni spoiler tasarımının CFD analiz sonuçlarına göre, aracın arka kısmındaki baskı kuvvetinde %59'luk bir artış görülmüş ve arka kısımda oluşan düzensiz hava akımı daha düzenli bir akım profiline dönüşmüştür. Yetkili kuruluşun yaptığı performans testlerine göre, yeni spoiler modeliyle yakıt tüketiminde şehir içi sürüşte %1.59, şehir dışı sürüşte ise %2.79 oranında bir azalma elde edilmiştir. [36]. Yarin (2019), çalışmasında farklı dış tasarım özelliklerine sahip 5 farklı araç modelini ANSYS Fluent kullanarak sayısal olarak incelemiş ve sürüklenme katsayılarını karşılaştırmıştır. İlk model, çok keskin hatlara sahipken, her bir sonraki modelde tasarım iyileştirmeleri yaparak beşinci modele ulaşmıştır. Sırasıyla elde ettiği Cd değerleri 0.74, 0.71, 0.48, 0.27 ve 0.25 olarak bulunmuştur. Akışın bozulduğu bölgelerde keskin hatların yuvarlatılması ve damla şeklinde bir tasarım uygulanmasının, sürüklenme katsayısını düşürerek yakıt tasarrufuna olumlu katkı sağlayabileceği sonucuna varılmıştır [37].

Sürüklenme katsayısını daha düşük seviyelere indirmek için yapılan çalışmalar, aracın aerodinamik performansını artırmak amacıyla çeşitli önlemleri içerir. Bunlar arasında, aracın kaportasının çevresindeki hava akışını pürüzsüz ve kesintisiz hale getirmek için tasarım değişiklikleri yapılması, kapı kısmında bulunan camların ve farların kaporta ile aynı seviyeye getirilmesi, ön ve arka camların daha yatık bir açıyla tasarlanması, yan aynaların aerodinamik şekil alması, lastik oyuklarının genişletilmiş çamurluklarla kapatılması, ön ve arka tekerlekler arasına etekler yerleştirilmesi, ön panel altına hava barajları eklenmesi ve jant kapaklarının aerodinamik yapıda olması yer alır.

Bu önlemler sayesinde, farklı araç tiplerinde sürüklenme katsayıları önemli ölçüde azaltılmıştır. Örneğin, binek araçlarda 0.25'e, otobüslerde 0.5'e, motosikletlerde 0.4'e, ve kamyonlarda 0.65'e kadar düşürülmüştür. Ancak, gerçek trafik koşullarında elde edilen veriler, laboratuvar sonuçlarıyla tam olarak örtüşmeyebilir; çünkü yan rüzgar, yük durumu gibi faktörler sürüklenme katsayısını etkiler. Öte yandan, sürüklenme katsayısını azaltma çabalarıyla elde edilen avantajların maliyeti göz önünde bulundurulmalıdır. Ek önlemler alınmasıyla direnç kaybı azaltılabilir, hatta daha da düşürülebilir; ancak bu ek önlemlerin maliyeti, sürüklenme katsayısının azalmasından kaynaklanan avantajı aşabilir. Bu nedenle, bu tür önlemler genellikle deneme, geliştirme ve yarış gibi özel amaçlı araçlarda uygulanır. Bu araçlarda sürüklenme katsayısı 0.20'ye kadar düşürülebilir.

1.6 Navier Stokes Denklemleri

Navier-Stokes denkleminin çözümü genellikle yaklaşımlarla gerçekleştirilir. Ancak herhangi bir yaklaşımı kullanmadan önce, analiz edilen akış bölgesi için uygunluğunu doğrulamak önemlidir. Boyutsuzlaştırıldığında, Navier-Stokes denkleminde çeşitli boyutsuz parametreler ortaya çıkar, bunlar arasında Strouhal sayısı (St), Froude sayısı (Fr), Euler sayısı (Eu) ve Reynolds sayısı (Re) bulunur. Ayrıca, serbest yüzey etkileri olmayan akışlar için, yerçekiminden kaynaklanan hidrostatik basınç bileşeni, değiştirilmiş bir basınç terimi olan P' içinde ifade edilebilir. Bu sayede, Navier-Stokes denklemindeki yerçekimi terimi gizlenir ve analiz basitleştirilir. Boyutsuz Navier-Stokes denklemi, bu değiştirilmiş basınç terimi kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$[St] \frac{\partial \bar{V}^*}{\partial t^*} + (\bar{V}^* \cdot \nabla^*) \bar{V}^* = -[Eu] \nabla^* P' + \left(\frac{1}{Re} \right) \nabla^{*2} \bar{V}^* \quad (2.6)$$

Bu denklemler, bir akışkan içindeki birim kütleye etki eden momentum değişimlerinin, basınç değişimleri ve viskoz kuvvetlerin (sürtünme kayıplarına neden olan) toplamına eşit olduğunu gösterir. Viskoz kuvvetler, moleküller arası etkileşimlerden kaynaklanır ve akışkanın viskozitesini yani yapışkanlığını belirtir. Dolayısıyla, Navier-Stokes denklemleri, bir akışkanın herhangi bir bölgesindeki kuvvet dengesinin dinamik bir ifadesidir.

Navier-Stokes denklemleri, kütle, enerji, momentum ve açısal momentum korunum kanunlarından türetilir. Bu denklemlerin türetilmesi için akışkan için bir durum denklemi bağıntısı kabul edilir. Bu durum denklemi, akışkanın termodinamik durumunu ifade eder ve genellikle ideal bir gaz için Boyle veya Joule denklemi gibi bağıntılar kullanılır. Bu kabul,

Navier-Stokes denklemlerini oluşturan temel prensiplerden biridir ve akışkanın davranışını matematiksel olarak tanımlamak için önemlidir.

Reynolds sayısının çok küçük olduğu akış bölgelerinde, denklemin son terimi, denklemin sağındaki terimlere baskın gelir, bu da basınç kuvvetlerinin viskoz kuvvetler tarafından dengelenmesi gerektiği anlamına gelir. Viskoz kuvvetler tamamen göz ardı edilirse, sürünme akışı yaklaşımı kullanılır ve Navier-Stokes denklemi basitleştirilir. Bu durumda, denklem aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\bar{\nabla}P' \cong \mu \nabla^2 \bar{V} \quad (2.7)$$

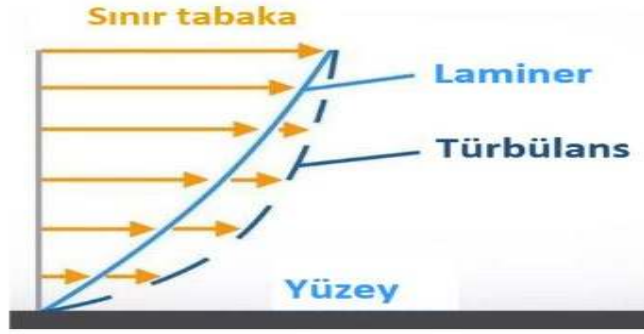
Viskoz olmayan akış bölgeleri, sürünme akışının aksine, viskoz terimlerin atalet terimlerine göre ihmal edilebildiği bölgeler olarak tanımlanır. Bu tür akışkanlarda, Navier-Stokes denklemi Euler denklemine dönüşür; yani viskoz terimler göz ardı edilir ve denklem sadece akışkanın atalet ve basınç etkilerini içerir. Navier-Stokes denklemlerinin çözümünde HAD kullanılır.

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \cdot \bar{\nabla}) \bar{V} \right) = -\bar{\nabla}P' \quad (2.8)$$

1.7 Sınır Tabaka

Akışkanların katı yüzeyler üzerinde hareketi, akışkanın viskozitesiyle doğrudan ilişkilidir. Bu viskoz etkiler, akışkanın yüzeye yapışmasına ve kaymamasına neden olur. Özellikle, yüzeye yakın bölgelerde, akışkanın hareketi hızla değişir. Bu değişim, akışkan tabakaları arasında bir sürtünme etkisi yaratır ve yüzeye yakın bir bölgede, hız gradyanı belirgin şekilde yükselir. Bu durum, sınır tabakası adı verilen bir akış bölgesinin oluşmasına yol açar. Sınır tabakası, akışkanın yüzeye en yakın bölgesidir ve burada sürtünme kuvvetleri belirgin şekilde etkindir. Yüzey ile temas halindeki bu akışkan tabakası, kendisine yakın olan akışkan tabakalarını yavaşlatır ve bu sayede yüzey üzerinde bir yapışma gerçekleşir.

Yüksek hız gradyanlarına ve sürtünme kuvvetlerinin baskın olduğu bu sınır tabakası, aerodinamik açıdan önemlidir çünkü uçağın, aracın veya herhangi bir cismin hareketi sırasında bu tabaka, aerodinamik kuvvetlerin oluşumunu etkiler. Bu nedenle, viskoz etkilerin incelenmesi, sınır tabakasının davranışının anlaşılması ve aerodinamik tasarımın optimize edilmesi için büyük önem taşır.



Şekil 1.11. Laminer ve türbülanslı sınır tabaka [38].

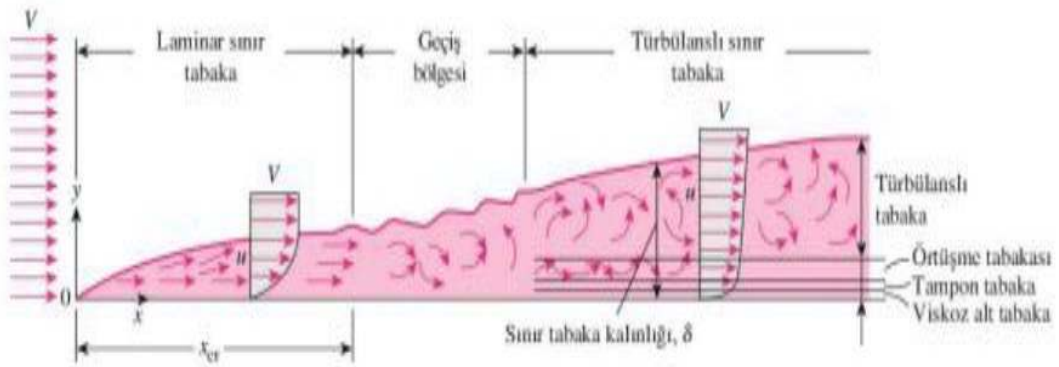
Sınır tabakası içindeki akış rejimi, diğer akış bölgelerinde olduğu gibi Reynolds sayısına bağlı olarak değişir. Levhanın giriş kenarından akış yönünde ilerledikçe Reynolds sayısı mesafe ile doğrusal olarak artar. Başlangıçta laminer olan akış, belirli bir noktadan sonra çalkantıların büyümesiyle geçiş sürecine girer ve daha sonra türbülanslı bir sınır tabakaya geçer. Şekil 1.11'de, bir levha üzerindeki akışta oluşan laminer ve türbülanslı sınır tabaka hız profilleri verilmiştir. Mühendislik uygulamalarında, sınır tabakanın hangi rejimde olduğunu belirlemek için genellikle kritik Reynolds sayısı (Re_{kritik}) kullanılır. Ayrıca, Reynolds sayısının artmasıyla belirli bir konumda sınır tabaka kalınlığının azaldığı gözlemlenir.

Düz bir levha üzerindeki akışta, sınır tabakanın gelişimi ve türbülanslı sınır tabakanın katmanları Şekil 1.12'de gösterilmiştir. Türbülanslı sınır tabakası, dört ayrı akış bölgesine ayrılabilir :

- 1. Viskoz Alt Tabaka:** Bu bölge, viskoz etkilerin baskın olduğu çok ince bir tabakadır. Akış burada neredeyse tamamen laminerdir çünkü katı yüzeyin türbülans etkilerini bastırmasıyla karakterize edilir.
- 2. Tampon Tabaka:** Viskoz etkilerin hala baskın olduğu ancak türbülans etkilerinin de belirgin hale geldiği bir tabakadır. Burada, viskoz etkilerin azaldığı ve türbülansın giderek arttığı bir geçiş bölgesi bulunur.
- 3. Örtüşme Tabakası:** Ana türbülanslı akışın neredeyse başladığı tampon tabakanın üzerindeki akış bölgesidir. Türbülansın arttığı ve viskoz etkilerin daha da azaldığı bir bölgedir.

4. Türbülanslı Tabaka: Bu tabaka, türbülans etkilerinin viskoz etkilere baskın olduğu ve çeperden en uzak olan sınır tabakasıdır. Akışın tamamen türbülanslı olduğu ve viskoz etkilerin neredeyse ihmal edilebilir düzeye indiği bir bölgedir [39].

Bu katmanlar, akışın levha üzerindeki farklı bölgelerinde türbülansın gelişimini ve etkilerini gösterir. Bu bilgi, akışın türbülanslı yapısını anlamak ve mühendislik uygulamalarında doğru analizler yapmak için önemlidir.



Şekil 1.12. Düz bir levha üzerindeki akışta sınır tabakanın gelişimi [39].

Viskoz alt tabakada, hız gradyanı neredeyse sıfıra eşittir ve çeper kayma gerilmesi aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\tau_w}{\rho} = \frac{\nu u}{y} \quad (2.9)$$

Bu bağlamda, "y" çeperden uzaklığı ifade etmektedir τ_w / ρ 'nun karekökü ise hızın boyutunu temsil etmektedir ve bu nedenle, bunu, sürtünme hızı $u_* = \sqrt{\tau_w / \rho}$ ile gösterilen hayali bir hız olarak düşünülebilir.

1.8 Reynolds Sayısı

Reynolds sayısı, bir akışın akışkanın viskozitesi ve akış hızı gibi faktörlere bağlı olarak ne kadar kararlı veya türbülanslı olacağını belirlemeye yardımcı olan bir boyutsuz sayıdır. Matematiksel olarak ifade edildiğinde, Reynolds sayısı (Re), akışkanın karakteristik boyutu (genellikle çap veya uzunluk), akışkan hızı ve akışkanın kinematik viskozitesi arasındaki ilişkiyi temsil eder. Reynolds sayısının formülü şu şekildedir

$$Re = \frac{\text{Atalet kuvvetleri}}{\text{Viskoz kuvvetler}} = \frac{V_{ort} L}{\nu} = \frac{\rho V_{ort} L}{\mu} \quad (2.10)$$

Reynolds sayısı, akışın laminar (düzenli ve düzgün) veya türbülanslı (karmaşık ve rastgele) olma eğilimini belirler. Düşük Reynolds sayıları laminar akışı, yüksek Reynolds sayıları ise türbülanslı akışı gösterir. Bu sayı, akışın davranışını analiz etmek ve özellikle akışın türbülanslı hale geçme noktasını belirlemek için önemlidir [40].

Rüzgar tüneli ve su tüneli gibi testlerde, maliyet, boyut ve zaman açısından daha uygun olduğu için gerçek prototiplerin ölçekli modelleri kullanılmaktadır. Prototip ile küçültülmüş model arasındaki akış benzerliklerinin sağlanabilmesi için hem modelin hem de prototipin Reynolds sayılarının aynı olması gerekmektedir. Bu nedenle, büyük ölçekli modellerde ve daha hızlı akış koşullarında Reynolds sayılarının eşitlenmesi sağlanabilir. Ancak, bazı durumlarda model ile prototip arasında Reynolds sayılarının tam olarak eşitlenemediği durumlar ortaya çıkabilir. Bu durumda, Reynolds sayısı bağımsızlığı kavramından yararlanılabilir. Birçok cisim için, sürüklenme katsayısı Reynolds sayısının belirli bir eşik değerinden sonra sabitlenir. Bu ifade, Reynolds sayısının bağımsızlığı olarak adlandırılır. Bu yaklaşım, model deneylerinin sonuçlarını prototip ölçekli sistemlere geçirmeyi kolaylaştırır ve tasarım sürecini optimize etmede önemli bir rol oynar. Reynolds sayısının bağımsızlığı prensibi, akış mekaniğinin anlaşılması ve mühendislik uygulamalarında kullanılması açısından önemli bir kavramdır [41].

1.9. Sayısal Çözüm Yöntemi

Aerodinamik problemlerin sayısal çözümünde başarıyı etkileyen temel faktörlerden biri doğruluk ve hassasiyettir. Aerodinamik hesaplamaların gerçek dünya olaylarını en doğru şekilde yansıtmaları, tasarım sürecinde güvenilir kararlar almayı sağlar. Kararlılık, bir diğer önemli faktördür. Sayısal çözüm yöntemlerinin zamanla sonuçlarında istikrar sağlanmalıdır. Kararsızlık, hesaplamaların doğruluğunu etkileyebilir ve yanıltıcı sonuçlara neden olabilir. Akışın tüm detaylarını doğru bir şekilde yakalayabilmek için yeterli sayıda hesaplama

noktası veya hücre kullanılmalıdır. Yöntem seçimi, problem özellikleri ve gereksinimlerine bağlı olarak dikkatlice yapılmalıdır. Probleme en uygun sayısal çözüm yönteminin seçilmesi, doğru sonuçların elde edilmesini sağlar. Aerodinamik hesaplamalarda kullanılan yazılımların ve hesaplama kaynaklarının uygun olması önemlidir. Doğru sonuçlar elde etmek için gereken hesaplama gücüne sahip olunmalı ve doğru yazılım araçları kullanılmalıdır. Son olarak, analiz edilen geometri ve uygulanan sınır koşulları da sayısal çözümün başarısını etkiler. Geometrinin doğru bir şekilde tanımlanması ve sınır koşullarının uygun bir şekilde belirlenmesi önemlidir. Bu faktörlerin dikkate alınması, aerodinamik problemlerin doğru ve güvenilir bir şekilde çözülmesini sağlar.

1.10 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD), bilgisayar simülasyonları kullanarak akışkanların hareketini sayısal olarak çözen bir alandır. Bu yöntem, akışkanların etrafındaki akışı ve etkileşimleri analiz etmek için kullanılır ve genellikle aerodinamik, hidrodinamik ve termal analizlerde yaygın olarak kullanılır. CFD'nin ana hedefi, bir akışkanın hareketini tanımlayan Navier-Stokes denklemlerini (veya türevlerini) çözmektir. Bu denklemler, bir akışkanın hızını, basıncını, sıcaklığını ve yoğunluğunu zaman ve uzay boyunca tanımlar. Ancak, bu denklemlerin analitik çözümleri genellikle karmaşıktır ve yalnızca basit akışlar için mümkündür. Bu nedenle, CFD, bu denklemlerin sayısal çözümlerini kullanarak akışkanların davranışını anlamak için kullanılır. CFD, havacılık, otomotiv, gemi yapımı, enerji ve tıp gibi birçok endüstri alanında kullanılan önemli bir araçtır. Özellikle karmaşık akış problemlerinin analiz edilmesi ve optimize edilmesi için önemlidir. CFD'nin sağladığı detaylı bilgi, mühendislerin ürün tasarımı, performans iyileştirmesi ve işletme optimizasyonunda etkili kararlar almasına yardımcı olur.

CFD analizi yapmak için takip edilen adımlar oldukça önemlidir ve genellikle beş ana aşamadan oluşur.

- 1. Problem Tanımı ve Geometri Hazırlığı:** İlk adım, analiz edilecek problemi netleştirmek ve akışkanın hareketini etkileyen geometrik detayları tanımlamaktır. Bu aşamada, analiz edilecek alanın geometrisi bilgisayar ortamına aktarılır.
- 2. Ön İşlem (Pre-processing)**
 - a. Mesh Oluşturma:** Geometri, uygun bir ağ (mesh) ile bölünür. Bu ağ, analiz edilen alandaki akışın detaylarını yakalamak için önemlidir.

b. Sınır Koşullarının Tanımlanması: Çalışmanın başlangıç ve sınır koşulları belirlenir. Bu, akışın başlangıç durumu ve çözüm alanının sınırlarındaki etkileşimlerin belirlenmesini içerir.

3. Çözüm (Solution)

a. Denklemlerin Formülasyonu: Navier-Stokes denklemleri veya bunların türevleri çözülecek problem için formüle edilir.

b. Sayısal Çözüm: Denklemler, sonlu elemanlar, sonlu hacimler veya diğer sayısal yöntemler kullanılarak çözülür. Bu adımda, çözüm algoritması başlatılır ve iteratif çözümleme işlemi gerçekleştirilir.

4. Sonuçların Analizi (Post-processing):

a. Görselleştirme: Çözüm sonuçları, grafikler, 3B görüntüler veya akışkanın davranışını gösteren diğer görsel araçlar kullanılarak görselleştirilir.

b. Analiz ve Yorumlama: Akışkanın davranışı ve performansı değerlendirilir. İstenirse, çözüm parametreleri optimize edilir veya tekrar analiz edilir.

5. Doğrulama ve Doğruluk Kontrolü: Elde edilen sonuçlar, deneysel veriler veya diğer doğrulama yöntemleriyle karşılaştırılarak doğruluk kontrol edilir. Bu adım, çözümün güvenilirliğini sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Bu adımlar, CFD analizi yaparken izlenen genel bir süreci özetler. Her bir adımın doğru bir şekilde uygulanması, doğru sonuçlar elde etmek ve problemin etkili bir şekilde analiz edilmesini sağlamak için önemlidir.

1.10.1 Türbülans Modelleme

Türbülans modellemesi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde kritik bir rol oynar. Mühendislik uygulamalarının neredeyse tamamında türbülanslı akımlarla karşılaşılır ve bu nedenle doğru bir türbülans modeline ihtiyaç duyulur. Özellikle aerodinamik çözümlerde, sınır tabakası kalınlığı ve ilk sınır tabakası kalınlığı büyük önem taşır. Fluent gibi analizlerde, duvar yakını davranışları modellemek için $k-\epsilon$ (Geliştirilmiş Duvar Tedavisi) modeli tercih edilebilir. Ancak, daha güçlü bilgisayar veya iş istasyonlarında $k-\omega$ SST modeli de tercih edilebilir. İç akışlarda, özellikle boru akışlarında $k-\epsilon$ modeli daha iyi sonuçlar verirken, dış akışlarda $k-\omega$ SST modeli daha yakınsak sonuçlar sağlar. DNS ve LES modellerinden çözüm almak için yüksek RAM kapasiteli bir bilgisayara ihtiyaç duyulur. [42].

İç akışlarda, özellikle boru akışlarında k-ε modeli daha doğru sonuçlar sağlarken, dış akışlarda k-ω SST modeli tercih edilir. DNS ve LES modellerinden veri alabilmek için yüksek kapasiteli belleğe sahip bir bilgisayar gereklidir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) alanında, türbülans modelleri çeşitlidir ve RANS Türbülans Modelleri, LES, DES Modeli, DNS Modeli, Duvara Yakın Türbülans Modelleme ve Türbülanslı Serbest Akış Koşulları gibi çeşitli türleri bulunmaktadır. RANS Türbülans Modeli ise, Doğrusal Girdap Viskozite Modeli, Doğrusal Olmayan Girdap Viskozite Modeli ve RSM olmak üzere üç ana kategoriye ayrılır.

Doğrusal Girdap Modeli, üç ana alt kategoriye ayrılır: Cebirsel modeller, bir denklemliler ve iki denklemliler. Cebirsel modeller arasında Cebeci-Smith, Baldwin-Lomax, Johnson-King ve pürüzlülüğe bağlı modeller bulunur. İki denklemliler modeller kapsamında ise k-ε ve k-ω modelleri incelenir. k-ε modelleri arasında Standart k-ε, Gerçekleştirilebilir (Realizable) k-ε, RNG k-ε ve Duvara Yakın Davranış (Enhanced-Wall Treatment) modelleri yer alırken, k-ω modelleri Wilcox'ın k-ω, Wilcox'ın geliştirilmiş k-ω, SST k-ω ve Duvara Yakın Davranış (Enhanced-Wall Treatment) modellerini içerir.

1.11 Rüzgar Tünelleri ve Kullanım Amacı

Rüzgar tünelleri, mühendislik tasarımında vazgeçilmez bir araç olarak öne çıkar. Aerodinamik ölçümlerin yapıldığı bu tesisler, havanın akışkan özelliklerini kontrol altında tutarak, farklı nesnelerin veya yapıların aerodinamik davranışlarını inceler. Bir tür benzetim aracı olarak işlev gören rüzgar tünelleri, gerçek dünya koşullarını taklit ederek, model üzerindeki hava akışını değerlendirir. Örneğin, bir aracın küçültölmüş bir versiyonu veya bir uçak kanadı gibi modeller, tünel içinde hava akımına maruz bırakılır. Bu sayede, otomobil endüstrisinden uçak tasarımına kadar geniş bir yelpazedeki alanlarda kullanım bulur. Ölçümler aracılığıyla, model üzerine etki eden kuvvetler, momentler ve akış özellikleri belirlenir. Bu veriler, ürünlerin aerodinamik performansını iyileştirmek veya tasarım değişikliklerinin etkilerini değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Sonuç olarak, rüzga tünelleri, modern mühendislik ve tasarım süreçlerinde vazgeçilmez bir role sahip olup, ürün ve yapıların performansını artırmada önemli bir araçtır.

Rüzgar tünelleri, aerodinamik ölçümler ve tasarım geliştirmeleri için önemli araçlardır. Avantajları arasında kontrollü ortam sağlaması, gerçek zamanlı gözlem imkanı sunması, maliyet ve zaman tasarrufu sağlaması, değişken hava koşullarını simüle etme yeteneği, güvenlik ve ölçüm hassasiyeti bulunur. Bu avantajlar, rüzgar tünellerinin geniş bir

endüstri yelpazesinde yaygın olarak kullanılmasını sağlar, ürünlerin ve yapıların performansını artırmak için önemli bir rol oynar.

1.11.1 Rüzgar Tüneli Deneylerinde Aerodinamik Benzerlik ve Akış Kalitesi

Rüzgar tüneli deneylerinde aerodinamik benzerlik kavramı, küçük ölçekli model deneyleriyle gerçek koşullarının doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlar. Bu kavram, model ve gerçek nesne arasındaki ilişkiyi tanımlar ve deney sonuçlarının gerçek dünya durumlarını yansıtmasını sağlar. Aerodinamik benzerlik, genellikle dört temel boyutta sağlanır:

1.Geometrik Benzerlik: Modelin, gerçek nesnenin geometrisine benzer olması önemlidir. Örneğin, araç modelinin aracın ölçekli bir kopyası olması beklenir.

2.Kinematik Benzerlik: Modelin hareketi, gerçek nesnenin hareketiyle uyumlu olmalıdır. Hava hızı ve nesnenin hareketinin benzerliği bu kategoride önem taşır.

3.Dinamik Benzerlik: Model ve gerçek nesne arasındaki aerodinamik kuvvetler ve momentlerin benzer olması gerekir. Bu, Reynolds sayısının korunmasını içerir.

4.Termal Benzerlik: Modelin ve gerçek nesnenin ısı özellikleri aynı olmalıdır. Bu, özellikle rüzgar tüneli deneylerinde dikkate alınır. Termal benzerlik, rüzgar tüneli deneylerinde gerçek dünya koşullarını doğru bir şekilde yansıtmak için önemlidir çünkü hava akışı, sıcaklık değişimleriyle birlikte farklı yoğunluklara ve viskoziteye sahip olabilir. Bu, akışın gerçek koşullarını daha iyi simüle etmek için model ve gerçek nesnenin ısı özelliklerinin benzer olmasının önemini vurgular. Reynolds sayısı ve Mach sayısı gibi diğer aerodinamik benzerlik kriterleri, termal benzerlikle birlikte değerlendirilir. Reynolds sayısı, akışın viskoz etkilerine oranını belirlerken, Mach sayısı akışın hızının sese oranını ifade eder. Bu parametreler, model ve gerçek nesne arasındaki benzerliği sağlamak ve aerodinamik deneylerin doğru bir şekilde yapılmasını sağlamak için önemlidir. Özetle, termal benzerlik kavramı, rüzgar tüneli deneylerinin güvenilir sonuçlar üretmesi için önemli bir rol oynar. Bu benzerlik, model ve gerçek nesne arasındaki ısı özelliklerin uyumlu olmasıyla sağlanır ve aerodinamik deneylerin gerçek koşullara daha yakın olmasını sağlar.

Aerodinamik benzerlik prensibi, rüzgar tüneli deneylerinin güvenilir sonuçlar üretmesini sağlar.

Deney setinde, model sabitken ve hava hareketliken, akış kalitesi ve aerodinamik benzerlik için Reynolds Sayısı (Re) ve Mach Sayısı (Ma) en kritik parametrelerdir. Aynı Re

ve Ma değerlerine ulaşıldığında, model ve tam ölçekli akış dinamik olarak benzer kabul edilir. Bu durum, akışkanın hız bileşenleri, basınç sabiti, yoğunluğu, akışkanlık ve sıcaklık gibi faktörlerin çarpanları için benzerlik sağlar; bu da birimsiz fonksiyonların aynı olması anlamına gelir. Reynolds Sayısı eşitlenirken, pratikte hem Re hem de Ma sayılarını aynı anda eşitlemek pek mümkün değildir, genellikle ikisi bir arada eşitlenemez. Düşük hızlı uygulamalarda Ma sayısı çok kritik değildir. Re sayısı ise akış karakterini, sınır tabakasının türünü ve akışın kopma noktalarını belirler. Yapısal aerodinamik incelemelerde, genellikle bu kriter çok ciddi bir önem taşımaz. Re değeri 10.000'in üzerinde olduğunda, akışın bozulması veya bulanması önemsiz hale gelir.



2. MALZEMELER VE YÖNTEMLER

Bu bölümde Napolyon balığı (humhead wrasse), Yeşil hörgüçlü papağan balığı (Hump parrot fish), Çiçek boynuz balığı (Flowerhorn fish) balıklarından esinlenilerek yeni minibüs dış gövde tasarımları yapılarak sürüklenme kuvvetlerinin azaltılması hedeflenmiştir. Yeni modeller ile mevcut Mercedes markasının Sprinter modeline benzer olarak tasarlanan model ile sürüklenme katsayıları kıyaslanmıştır.

Çeşitli minibüs modelleri, 3D bilgisayar programları kullanılarak tasarlanmış ve ANSYS WORKBENCH'e aktarılmıştır. Ardından, geometrilere uygun ağlar oluşturulmuş ve Fluent programında akış analizleri gerçekleştirilmiştir. CFD kullanılarak, modellerin sürüklenme katsayıları hesaplanmıştır. İlk olarak, minibüs geometrisi SOLIDWORKS programında üç boyutlu olarak tasarlanmış. Hesaplamalar için sonlu elemanlarla ağ yapıları oluşturulmuş ve gerekli sınır şartları tanımlanarak çözümler elde edilmiştir. Akışkan olarak hava kabul edilmiş ve sıkıştırılmaz akış varsayımı altında yoğunluk ve viskozite gibi akışkan özellikleri sabitlenmiştir. Süreklilik denklemi, momentum korunumu ve türbülans modelleri kullanılarak taşıtın yüzeyi ve üzerindeki havanın hız ve basınç dağılımları detaylı bir şekilde elde edilmiştir. Taşıtın alanı hesaplanırken, akış yönüne dik en büyük kesitlerinin izdüşümleri alınmıştır.

Modern mühendislik uygulamalarında, aerodinamik hesaplamaların önemi giderek artmaktadır. Bu hesaplamalar, çeşitli endüstriyel ve bilimsel alanlarda geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Örneğin, otomobil ve uçak tasarımı, gemi yapıları, bina inşaatları, rüzgar türbinleri, spor ekipmanları gibi birçok alanda aerodinamik hesaplamalara başvurulmaktadır.

Aerodinamik hesaplamaların temelinde, akışkanlar mekaniği prensipleri ve matematiksel denklemler yatar. Bu hesaplamalar, bilgisayar destekli tasarım ve analiz araçlarıyla gerçekleştirilir. Bu amaçla, Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (CFD) yazılımları kullanılır. Bu yazılımlar, akışkanların hareketini ve etkileşimini simüle ederek, karmaşık akışkan problemlerinin analizini sağlarlar. Bu alandaki en yaygın kullanılan CFD yazılımları arasında ANSYS Fluent, CFX, OpenFOAM, STAR-CCM+ ve XFlow bulunmaktadır. Bu yazılımlar, farklı endüstriyel ve akademik gereksinimlere uygun çözümler sunarlar. Örneğin, ANSYS Fluent ve CFX, genellikle karmaşık endüstriyel akışkan problemleri için tercih edilirken, OpenFOAM daha çok akademik araştırmalarda ve açık kaynaklı projelerde

kullanılmaktadır. STAR-CCM+ ise geniş bir endüstriyel kullanıcı kitlesine sahiptir ve çok çeşitli akışkan dinamiği ve ısı transferi problemlerini çözebilir.

Bu yazılımlar, mühendislerin aerodinamik performansı iyileştirmek, tasarım süreçlerini optimize etmek ve ürünlerin güvenilirliğini artırmak için kritik bir araç haline gelmiştir. Ayrıca, bu yazılımların kullanımı, enerji verimliliğini artırmak, çevresel etkileri azaltmak ve daha sürdürülebilir tasarımlar geliştirmek gibi önemli hedeflere ulaşmada da önemli bir rol oynamaktadır.

Mercedes Sprinter ve Balık modelleri, öncelikle SOLIDWORKS programında üç boyutlu olarak tasarlanmış. Ardından, bu modellerin ANSYS WORKBENCH programında yapılacak olan analizler için gerekli kontrol hacimleri oluşturulmuştur. SOLIDWORKS programında tasarlanan minibüs modelleri, belirlenen kontrol hacimlerine yerleştirilerek, akışkan ortamda maruz kalacakları sürüklenme kuvvetleri hesaplanmıştır. Bu analizler, araçların aerodinamik performansının değerlendirilmesi ve tasarımının iyileştirilmesi için önemli bir adımdır

2.1. Modeller

Çalışmada Mercedes Sprinter modelinin benzeri model ile Napolyon balığı (humhead wrasse), Yeşil hörgüçlü papağan balığı (Hump parrot fish), Çiçek boynuz balığı (Flowerhorn fish) balıklarından esinlenerek oluşturulan yeni minibüs modellerinin sürüklenme katsayıları kıyaslanmıştır. Tasarlanan bu yeni minibüs modelleri T1,T2,T3,T4 olacak şekilde adlandırılmıştır. Modellerin ölçüleri Tablo 3.1’de gösterilmiştir;

Tablo 2.1. Modellerin ölçüleri

Modeller	Genişlik (mm)	Uzunluk (mm)	Yükseklik(mm)
T1	2426	6961	2610
T2	2426	6961	2610
T3	2426	6961	2610
T4	2426	6961	2610

Tasarım aşamasında araçların aerodinamik özelliklerinin günümüzde kullanılan mevcut bir modelin benzeri ile yapılan tasarımların karşılaştırılması için modeller eşit boyutlarda tasarlanmıştır. Bu nedenle tasarımların geometrik benzerliği (boyut ve şekilleri gibi), kinematik benzerliği (pozisyon, hız, ivme gibi), dinamik benzerlikleri (kuvvet-ivme ilişkileri gibi) sağlanmıştır.

Tasarlanan modeller için referans model olarak Mercedes sprinter 316 uzun şasi modelinin benzeri olarak tasarlanan model kullanılmıştır. Referans model ile ilgili teknik bilgiler ve araç ölçüleri internet sayfasından temin edilmiştir [43].

2.1.1 Mercedes Sprinter

Mercedes Sprinter, Mercedes-Benz tarafından üretilen ve ticari taşımacılık alanında önemli bir konuma sahip olan bir hafif ticari araç ve minibüs serisidir. İlk olarak 1995 yılında piyasaya sürülen Sprinter, o zamandan bu yana geniş bir kullanım alanına yayılarak dünya çapında büyük popülerlik kazanmıştır.

Sprinter, çeşitli gövde tiplerinde sunulmaktadır ve bu çeşitlilik arasında panel van, minibüs, kamyonet ve çekici gibi seçenekler bulunmaktadır. Farklı dingil mesafesi ve yükseklik seçenekleri sayesinde, çeşitli ticari ihtiyaçlara uygun olarak özelleştirilebilmektedir. Bu araç serisinin güç aktarma organı seçenekleri arasında dizel ve benzinli motorlar bulunmaktadır. Güçlü ve verimli motorları, yüksek taşıma kapasitesi ve yakıt verimliliği ile dikkat çekerken, otomatik ve manuel şanzıman seçenekleri de sunulmaktadır.

Sprinter'ın iç mekanı geniş ve kullanışlıdır, yolculara ve yük taşımacılığına yönelik çeşitli konfigürasyon seçenekleri sunar. Ayrıca, modern teknolojilerle donatılmış olan Sprinter, sürücü destek sistemleri, güvenlik özellikleri ve multimedya sistemleri gibi çeşitli opsiyonlarla donatılabilir. Mercedes Sprinter, sağladığı dayanıklılık, güvenilirlik ve çok yönlülük ile ticari taşımacılıkta ve işletmelerde geniş bir kullanıcı kitlesine hitap etmektedir. Bu özellikleri sayesinde, Sprinter ticari faaliyetlerde kullanılan birçok işletme için vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir.

Mercedes Sprinter'ın gövde tasarımı, mühendislik açısından dikkatlice planlanmış ve özenle uygulanmış bir sürecin ürünüdür. Bu araç, ticari taşımacılık alanında geniş bir kullanıcı kitlesine hitap eden ve çeşitli ticari ihtiyaçları karşılayan çok yönlü bir hafif ticari araç serisidir. Sprinter'ın gövde yapısı, yüksek mukavemetli çelik ve alüminyum alaşımları gibi dayanıklı malzemelerden üretilir. Bu malzemeler, aracın dayanıklılığını ve çarpışma

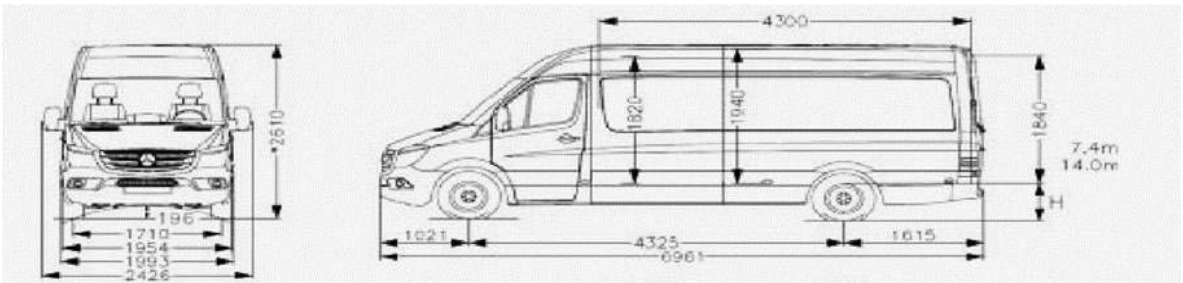
güvenliğini artırmak için tasarlanmıştır. Ayrıca, gövde tasarımı, aerodinamik performansı optimize etmek ve yakıt verimliliğini artırmak için özel olarak şekillendirilmiştir.



(a)



(b)



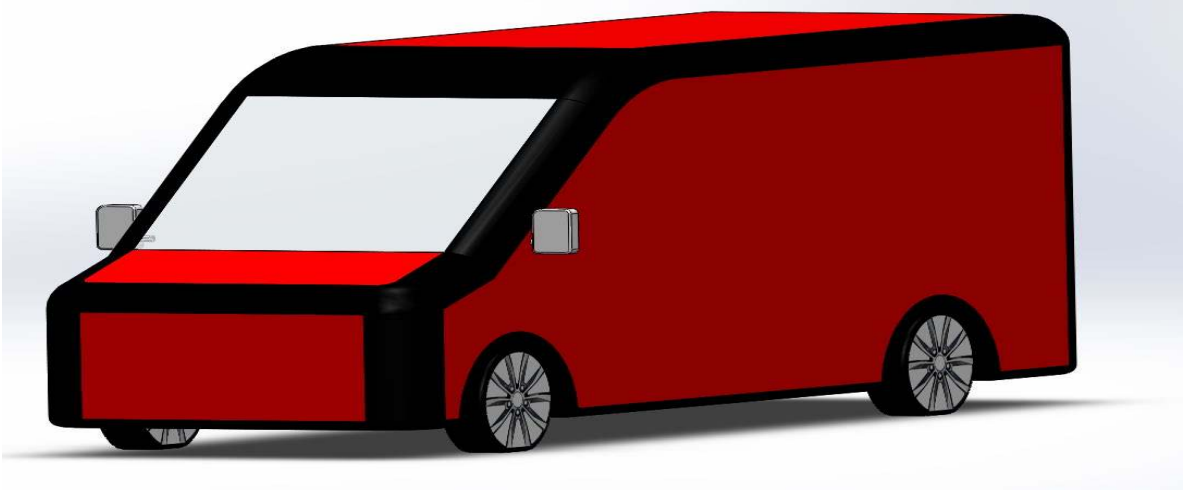
(c)

Şekil 2.2. (a) Mercedes sprinter modelinin yan görünüşü (b) modelin ön görünüşü (c) Teknik ölçüleri [43]

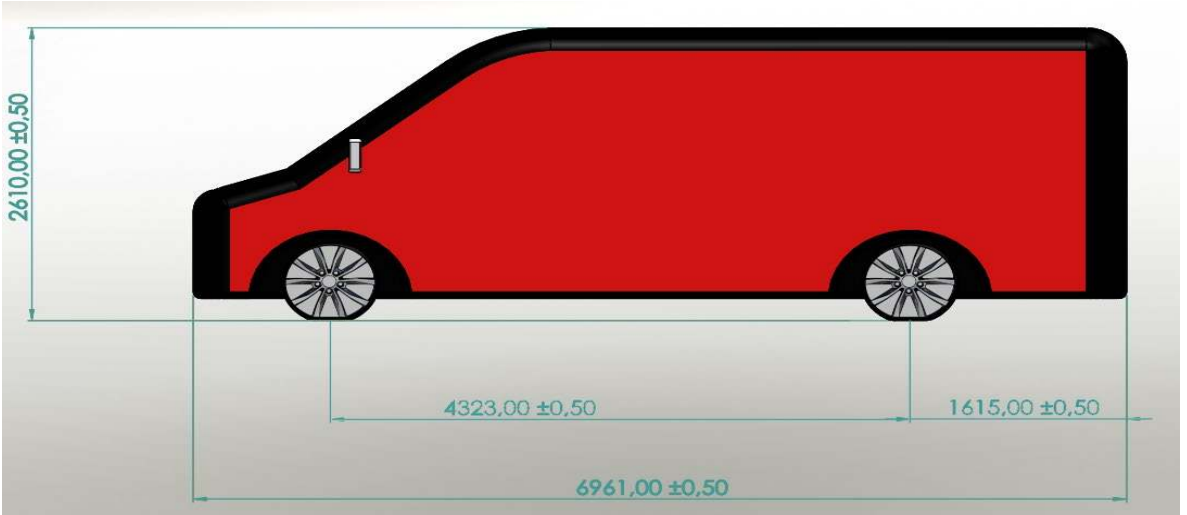
Mercedes Sprinter modelinin ön görünüşü, yan görünüşü ve teknik ölçüleri Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Mercedes firmasından edinilen bilgilere göre mercedes sprinterın sürüklenme katsayısı 0.32 dir [43].

2.1.2 T1 Modeli

Seçilen balıklardan ilham alınarak tasarlanan modellerin sürüklenme kuvvetlerini ve katsayılarını karşılaştırmak için tasarlanan ilk model T1 olarak adlandırılan model Mercedes Sprinter 316 (uzun şasi) modelinin katalogda verilen teknik ölçüleri referans alınarak SOLIDWORKS programında üç boyutlu olarak çizilmiştir. Bu model sprinter 316 modelinin (Şekil 2.1) eş hacimli, eşit boyut ölçüleriyle benzer katı modeli olarak tasarlanmıştır. Aracın lastik ve dikiz aynaları yine katalogda verilen ölçüler referans alınarak çizilmiş ve araca SOLIDWORKS programı ‘‘montaj’’ kısmı kullanılarak araca montajı yapılmıştır. Tasarlanan bu lastikler ve dikiz aynaları diğer modellerde de kullanılmıştır. Bu modelin tasarımı yapılırken katalogda verilen ölçüler referans alınmış olsa da aracın tam olarak ölçü ve detay bilgilerine sahip olunamadığından tasarlanan T1 modelinin sürüklenme katsayısının Mercedes Sprinter modeli ile aynı çıkması beklenmez. Mercedes sprinter modeline benzer olarak tasarlanan T1 modelinin üç boyutlu perspektif görünümü ,yan görünüşü, ön görünüşü şekil 2.2 de gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.2.T1 modelinin, (a) üç boyutlu perspektif görünümü, (b) yan görünüşü, (c) ön görünüşü

2.1.3 T2 Modeli

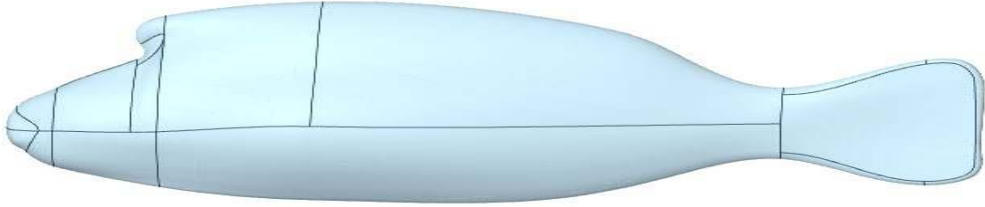
Hacmi ve boyut ölçüleri T1 modeli ile eş olarak tasarlanan T2 modelini Napolyon balığı (humhead wrasse) balığından ilham alınarak boyut ölçüleri aynı zamanda Mercedes sprinter 316 (Uzun şasi) modeli ile aynı olacak şekilde tasarlanmıştır .

Tasarımda ilham alınan Napolyon balığı (humhead wrasse), Labridae familyasının günümüze ulaşan en büyük üyesi olarak bilinen bir türdür. Erkekler genellikle dişilerden daha büyük olup 2 metreye kadar uzayabilir ve 180 kg'a kadar ağırlığa sahip olabilirler. Ortalama olarak, erkeklerin uzunluğu bir metreden biraz daha azdır. Dişiler ise nadiren bir metreden fazla büyüyebilirler. Bu tür, kalın dudakları, gözlerinin arkasındaki iki siyah çizgi ve daha büyük yetişkinlerin alınlarındaki tümsek gibi belirgin özellikleriyle kolayca tanınır. Renkleri, donuk mavi-yeşilden daha canlı yeşil ve morumsu mavi tonlarına kadar değişebilir[44].Bu balık türünün şekli , UNIGRAPHICS programı kullanılarak çizilen üç boyutlu tasarımı Şekil.2.3'de gösterilmiştir.

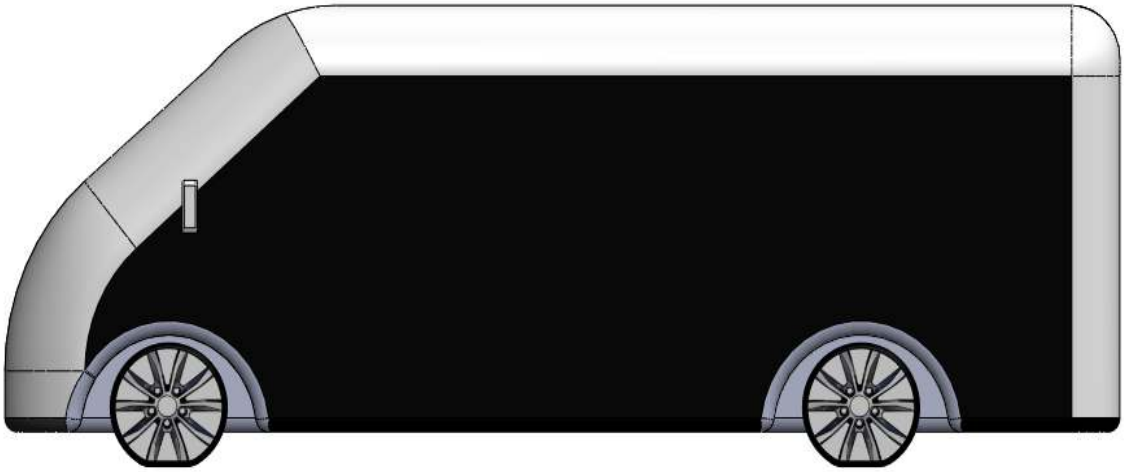
Balığın üç boyutlu tasarımı yapılırken balığın kafasının şekli referans alınarak, T2 modeli elde edilmiştir. Bu modelde yükseklik/genişlik (h/N) oranı Sprinter'in h/N oranına eşitlenmiştir. Daha sonra bu balıktan esinlenilerek T2 modeli SOLIDWORKS programı kullanılarak uzunluğu 6.961m yüksekliği 2.610m genişliği 2.426 m araç tabanının yerden yüksekliği 1.96m olacak şekilde üç boyutlu tasarımı yapılmıştır . Modelin üç boyutlu perspektif görünümü,ön görünüşü,yan görünüşü ve teknik ölçüleri şekil 2.4'te gösterilmiştir.



(a)

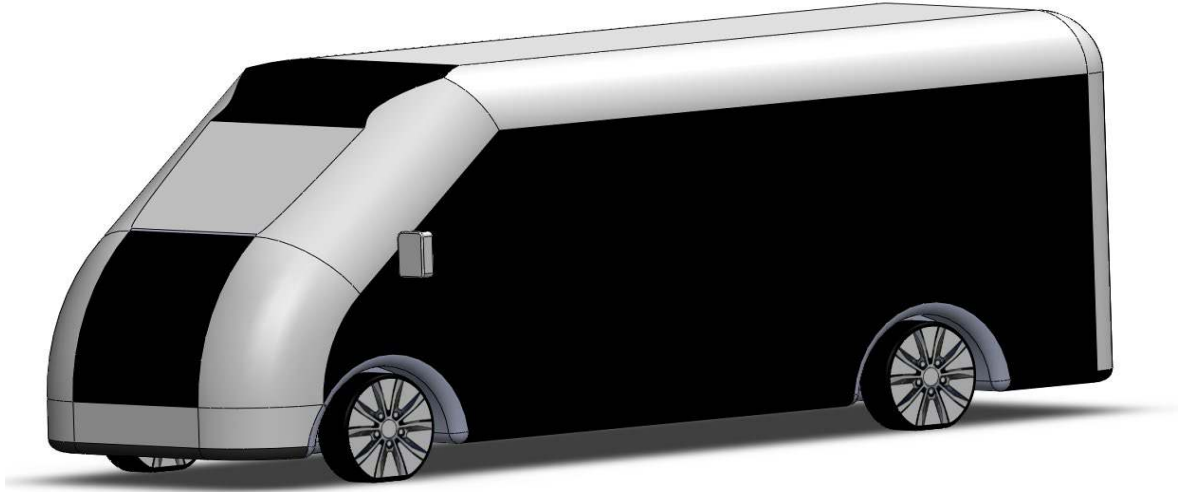


(b)

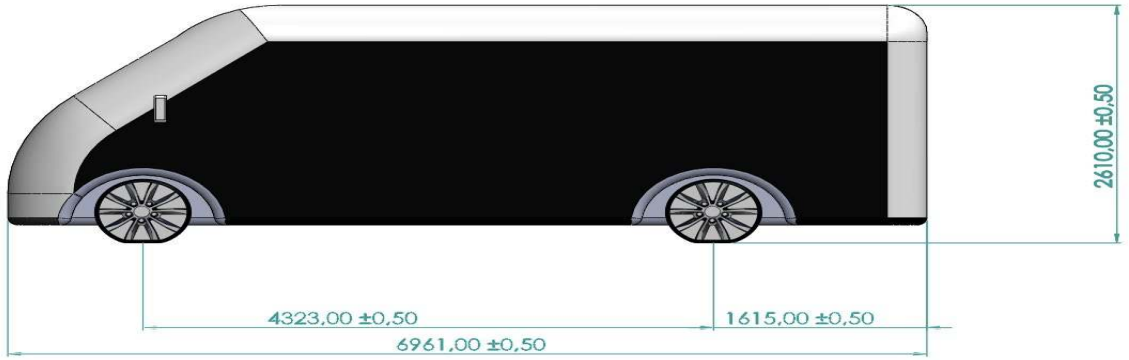


(c)

Şekil 2.3.(a)Napolyon balığı (humhead wrasse) [44], (b) Balığın 3D modeli ,(c) bu balıktan ilham alınarak tasarlanmış T2 modeli



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.4. T2 modelinin (a) Üç boyutlu perspektif görüntüsü (b) Yan görünüşü ve teknik ölçüleri (c) Ön görünüşü ve teknik ölçüleri

2.1.4 T3 Modeli

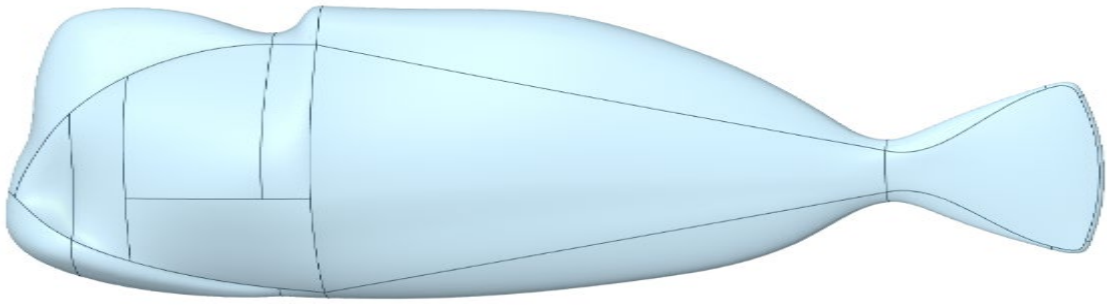
Bir başka balık modeli olan Yeşil hörgüçlü papağan balığı (Bolbometopon muricatum), balığından ilham alınarak tasarlanan T3 modeli sürüklenme katsayılarının karşılaştırılması amacıyla T1 ve T2 modelleriyle eşit hacimde ve eşit yüzey alanında tasarlanmıştır .

T3 modelinin tasarımında ilham alınan Yeşil kambur kafalı papağan balığı (Bolbometopon muricatum), papağan balığının en büyük türüdür (Şekil 2.5 (a)) ; 1,5m uzunluğa ve 75 kg'a kadar ağırlığa kadar büyür .Batıda Kızıldeniz'den doğuda Samoa'ya , kuzeyde Yaeyama Adaları'ndan güneyde Avustralya'nın Büyük Bariyer Resifi'ne kadar Hint ve Pasifik Okyanuslarındaki resiflerde bulunur[45]. Bu balığın üç boyutlu tasarımı UNIGRAPHICS programında yapılmıştır (Şekil 2.5 (b)) . Daha sonra bu modelin üç boyutlu detaylı tasarımı SOLIDWORK programında çizilmiştir (Şekil 2.5 (c)).

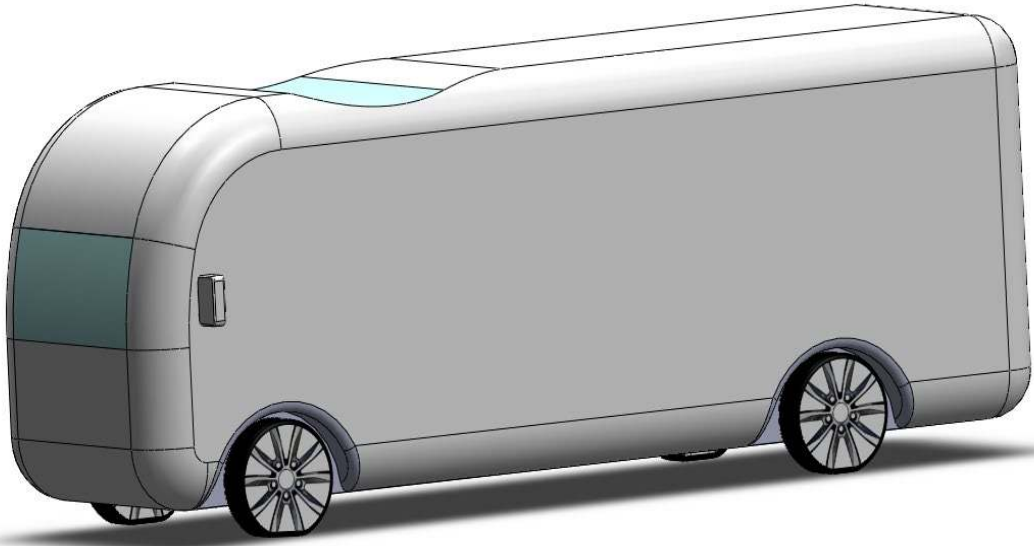
SOLIDWORKS programında üç boyutlu bir model oluşturulurken, baş ve gövde kısımlarından ilham alınarak detaylı bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Balığın anatomisinden esinlenilerek yapılan bu model, ölçüleri diğer modellerle aynı olacak şekilde belirlenmiştir.Bunun amacı analiz sonuçlarını daha doğru yorumlamak, diğer modellerle kıyaslarken daha doğru sonuçlara ulaşmaktır.Tasarlanan T3 modelinin üç boyutlu perspektif görünüşü, ön görünüşü ve teknik ölçüleri , yan görünüşü ve teknik resim ölçüleri Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



(a)

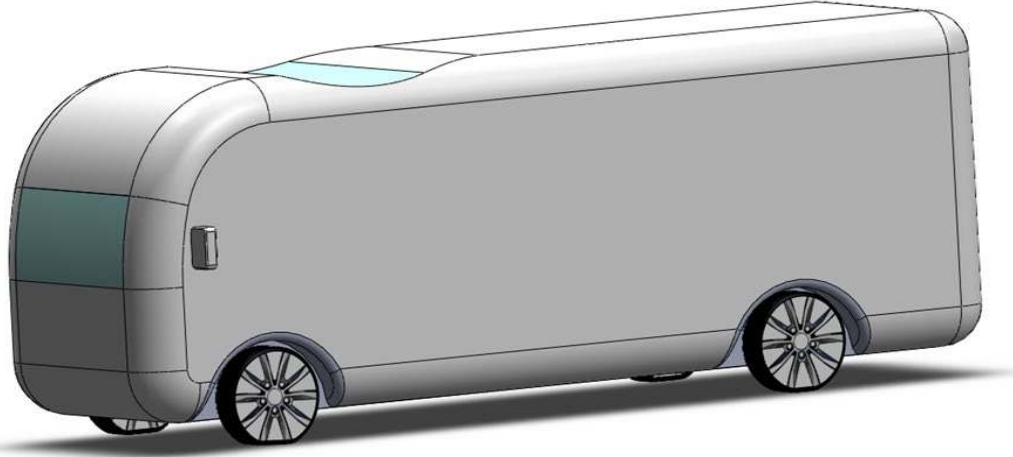


(b)

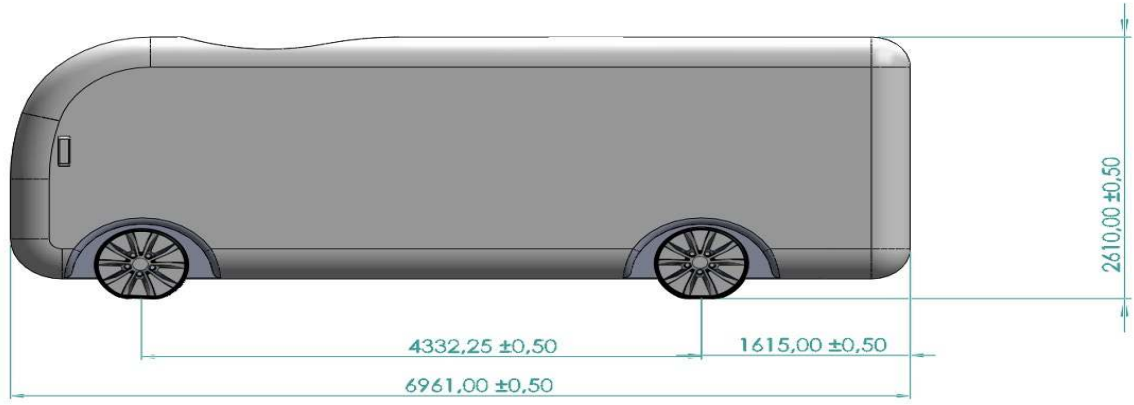


(c)

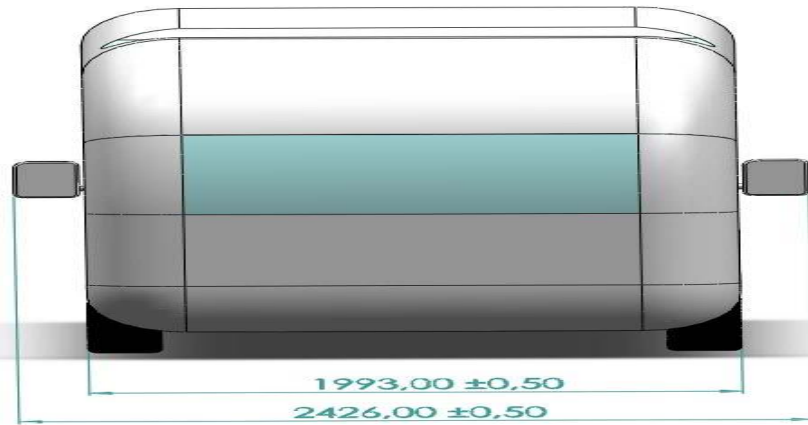
Şekil 2.5. (a) Yeşil hörgüçlü papağan balığı (*Bolbometopon muricatum*) [45], **(b)** Balığın 3D modeli, **(c)** Bu balıktan ilham alınarak tasarlanan T3 modeli



(a)



(b)



(c)

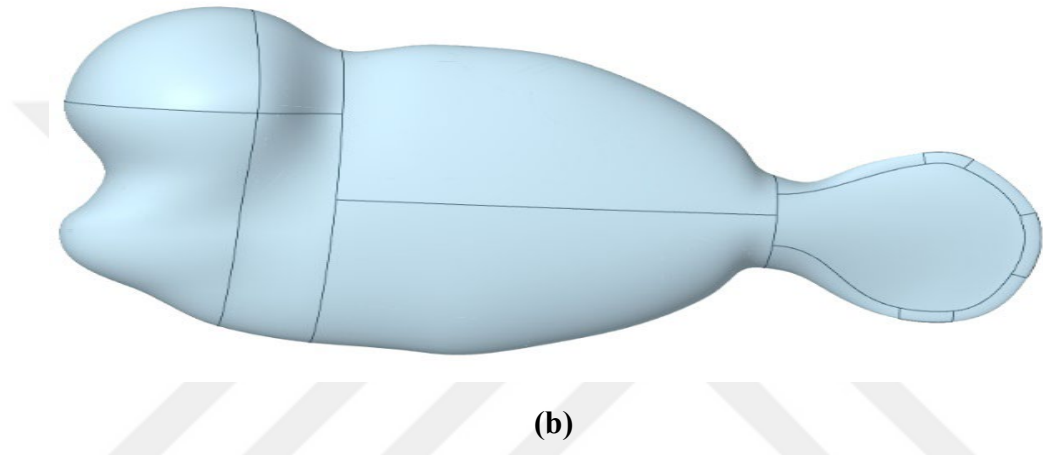
Şekil 2.6. T3 modelinin (a) Üç boyutlu perspektif görüntüsü (b) Yan görünüşü ve teknik ölçüleri (c) Ön görünüşü ve teknik ölçüleri

2.1.5 T4 Modeli

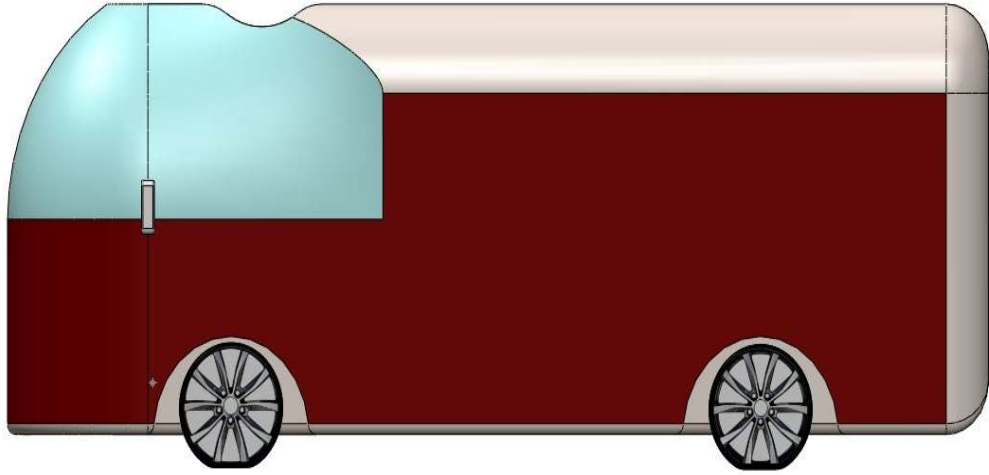
T4 adı verdiğimiz modelin tasarımında ise başka bir balık türü olan Flowerhorn balığı (Flowerhorn fish) kullanılmıştır (Şekil 2.7 (a)). Flowerhorn balığı, özellikle akvaryum hobileri için popüler olan büyük ve renkli bir türdür. Bu balıkların karakteristik özellikleri, geniş kafaları ve canlı renkleriyle dikkat çeker. Aslen Güney Amerika'daki cichlid familyasından gelirler ve 1990'larda Malezya ve Tayland'da yetiştirilmeye başlanmışlardır. Flowerhorn balıklarının vücut yapıları oldukça büyüktür ve belirgin bir kafa bölgesine sahiptirler. Flowerhorn fish balıkları 40 cm boy'a kadar uzayabilirler [46]. UNIGRAPHICS programında 3D modeli çizilen bu balıktan ilham alınarak tasarlanan T4 modeli diğer modellerle eşit hacim ve ölçülerde SOLIDWORKS programında çizilmiştir. Şekil 2.7. de balığın üç boyutlu tasarımı ve modelin tasarımı gösterilmiştir. Ayrıca şekil 2.8'de modelin perpektif görünüşü, yan görünüşü ve teknik ölçüleri, üst görünüşü ve teknik ölçüleri gösterilmiştir.



(a)

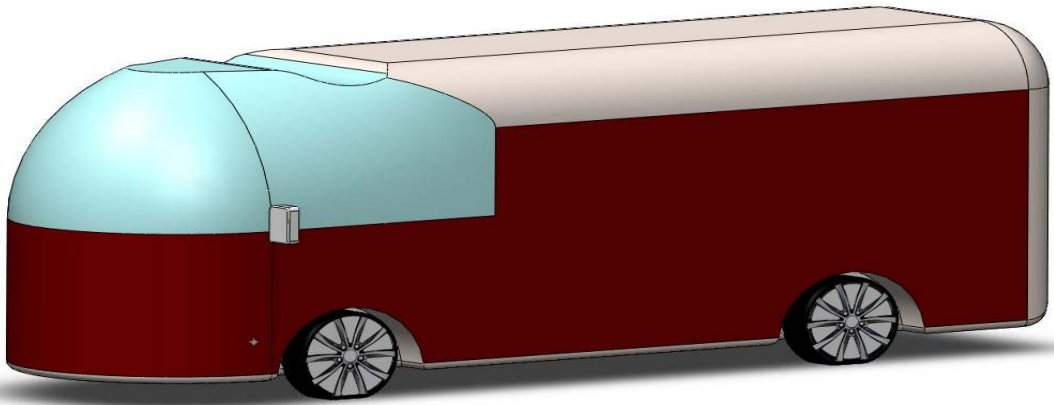
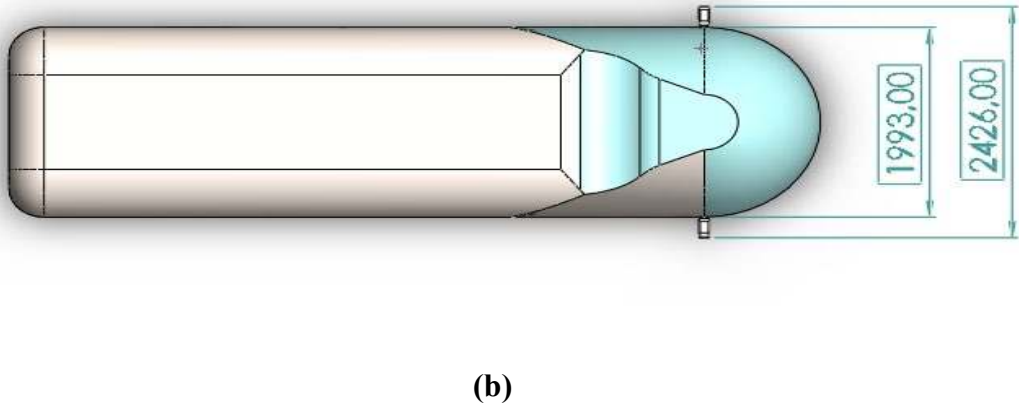
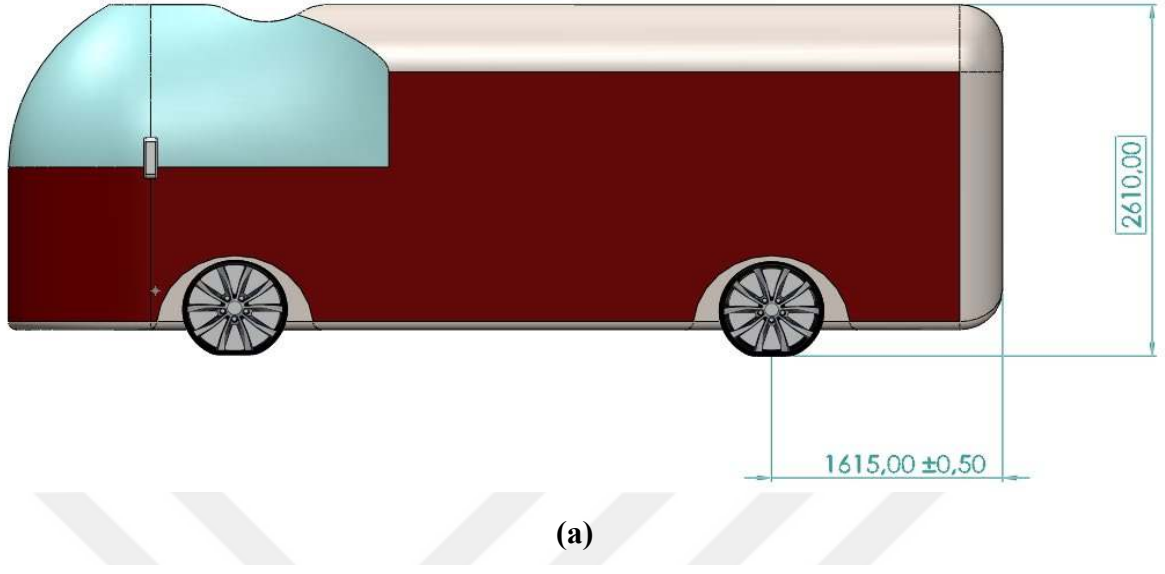


(b)



(c)

Şekil 2.7. (a) Flowerhorn balığı (Flowerhorn fish) [46] , **(b)** Balığın 3D modeli
(c) Bu balıktan ilham alınarak tasarlanan T3 modeli

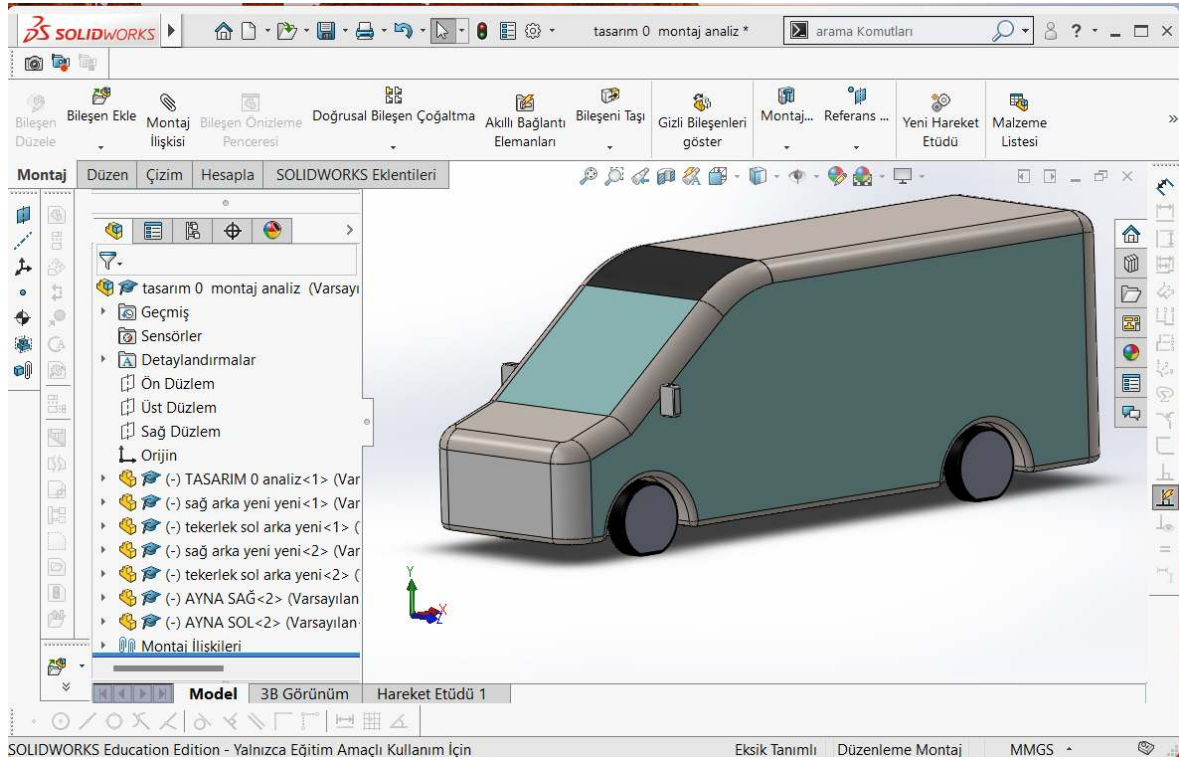


Şekil 2.8. T4 modelinin (a) Üç boyutlu perspektif görüntüsü (b) Yan görünüşü ve teknik ölçüleri (c) Ön görünüşü ve teknik ölçüleri

2.2 METOT

2.2.1 Aracın Bilgisayar Destekli Tasarımı

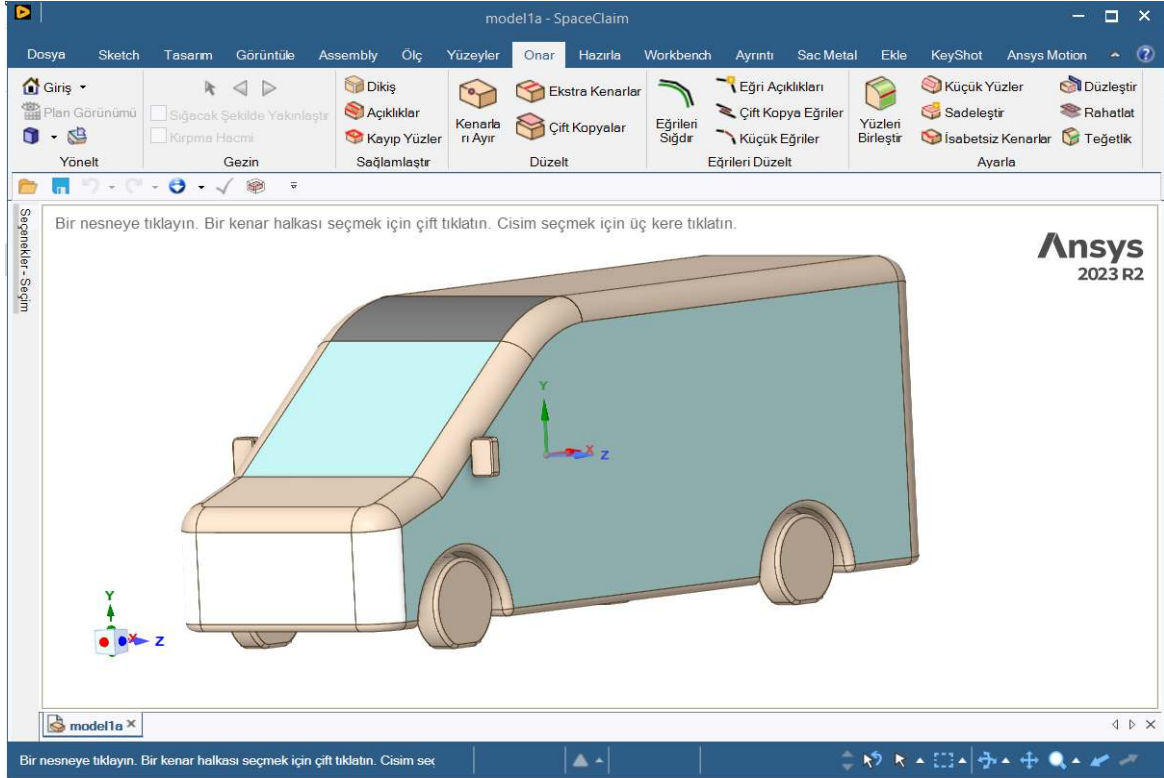
Bu çalışmada modellerin üç boyutlu tasarımını SOLIDWORK ve UNIGRAPHICS programında yapılmıştır. Şekil 2.9’ da Mercedes Sprinter modeline benzer olarak tasarlanan T1 modelinin SOLIDWORK programı kullanılarak tasarlanan üç boyutlu perspektif görünümü gösterilmiştir.



Şekil 2.9. T1 modelinin SOLIDWORKS programı kullanılarak tasarlanan üç boyutlu perspektif görünümü

Tasarımı yapılan modelin 1:1 oranında ANSYS WORKBENCH GEOMETRY kısmında “Geometry” sekmesi altında bulunan “Space claim ” kısmında geometri hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonu için hazır hale getirilmesi gereklidir.SpaceClaim, ANSYS'in sunduğu bir CAD yazılımı olarak, özellikle ANSYS Fluent gibi CFD analizlerine hazırlık sürecinde önemli bir rol oynar. Space claim öncelikle, CFD analizi için oluşturulan geometriyi analize uygun geometrik yapıyı oluşturmayı veya mevcut geometriyi programa aktarmayı sağlar. SpaceClaim,bu işlemleri hızlı ve etkili bir şekilde gerçekleştirmek için uygun özelliklere sahiptir. Bu programla geometri yapılmadan önce geometri de bulunan hasarlı yüzeyler, ağ yapısı oluşturulurken sorun çıkaracak yüzeyler, sivri kenarlar vs gibi geometri üzerinde gerekli işlemleri yapmaya olanak sağlar. Tasarımı yapılan arac geometrisi üzerinde düzeltmeler yapmak ,delikleri kapatmak,

yüzeyler arasındaki boşlukları doldurmak veya gereksiz detayları temizlemek gibi işlemler SpaceClaim kısmında yapılmıştır. Şekil 2.10' da T1 modelinin ANSYS SPACECLAIM programındaki perspektif görüntüsü gösterilmiştir.



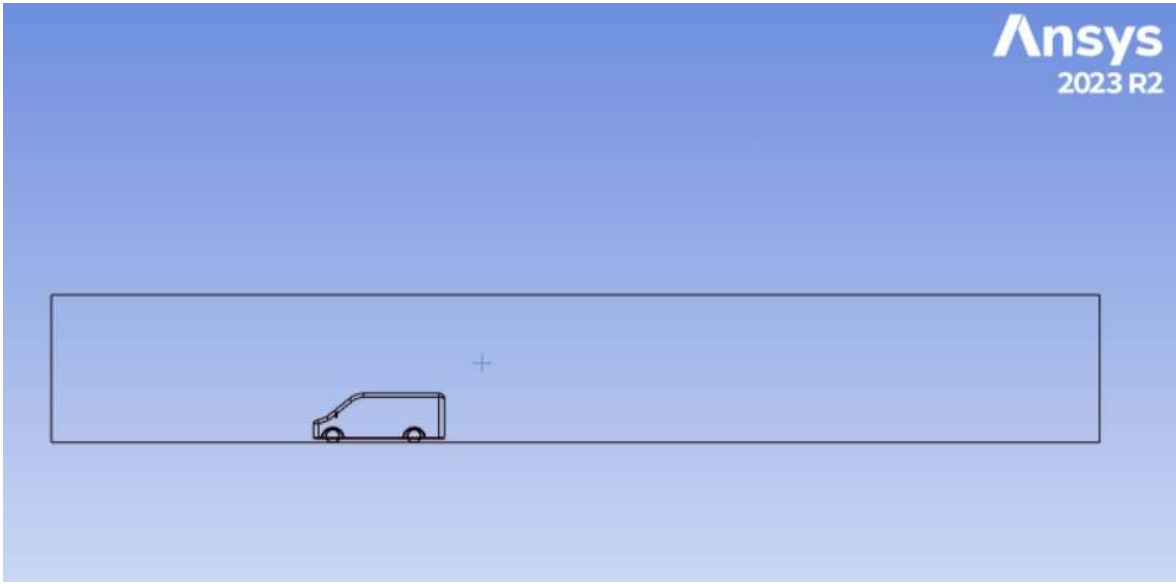
Şekil 2.10.T1 modelinin ANSYS SPACECLAIM programındaki perspektif görüntüsü

Daha sonra model önden 2 minibüs arkadan 5 minibüs üst kısmından 2 minibüs yan kısımlardan 2 minibüs ölçüsünde boşluk olacak şekilde simetri formunda kontrol hacmi oluşturularak bu ölçülerde kontrol hacmine yerleştirilmiştir. Şekil 2.11'de oluşturulan kontrol hacmi gösterilmiştir. Kontrol hacminin yüksekliği, genişliği ve boyu sırasıyla 5.22, 4.852 m, 55.6 m'dir. Analizler esnasında kontrol hacmi tasarlanırken, blokajın etkileri dikkatle ele alınmıştır. Blokaj oranı aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır:

$$B = A_v / A_t \quad (3.1)$$

Bir aracın blokaj oranı (B), aracın projeksiyon alanı (A_v) ile hava akışının dik olduğu yöndeki tünelin kesit alanı (A_t) arasındaki oranı temsil eder. Blokaj oranı genellikle düşük tutulmaya çalışılır ve ideal olarak %7,5'ten az olmalıdır. Bu oran, aracın aerodinamik

performansını ve direncini belirlemede kritik bir faktördür. Düşük bir blokaj oranı, aracın hava akışını daha etkili bir şekilde yönlendirmesine ve direncini azaltmasına yardımcı olabilir. Bu nedenle, araç tasarımında blokaj oranının düşük tutulması, daha iyi aerodinamik özellikler ve daha iyi performans için önemlidir. Yapılan çalışmada, blokaj oranı %7.5'in altında tutularak, akışın istenmeyen yönere sapmasının önüne geçilmiştir. Bu önlem, analizlerin güvenilirliğini artırmak ve sonuçların doğruluğunu sağlamak için alınmıştır. Bu titiz yaklaşım, analiz sürecinin sağlam temellere dayanmasını ve etkili sonuçların elde edilmesini sağlar[47]. Yapılan çalışmada blokaj oranı % 7 olarak hesaplanmıştır.

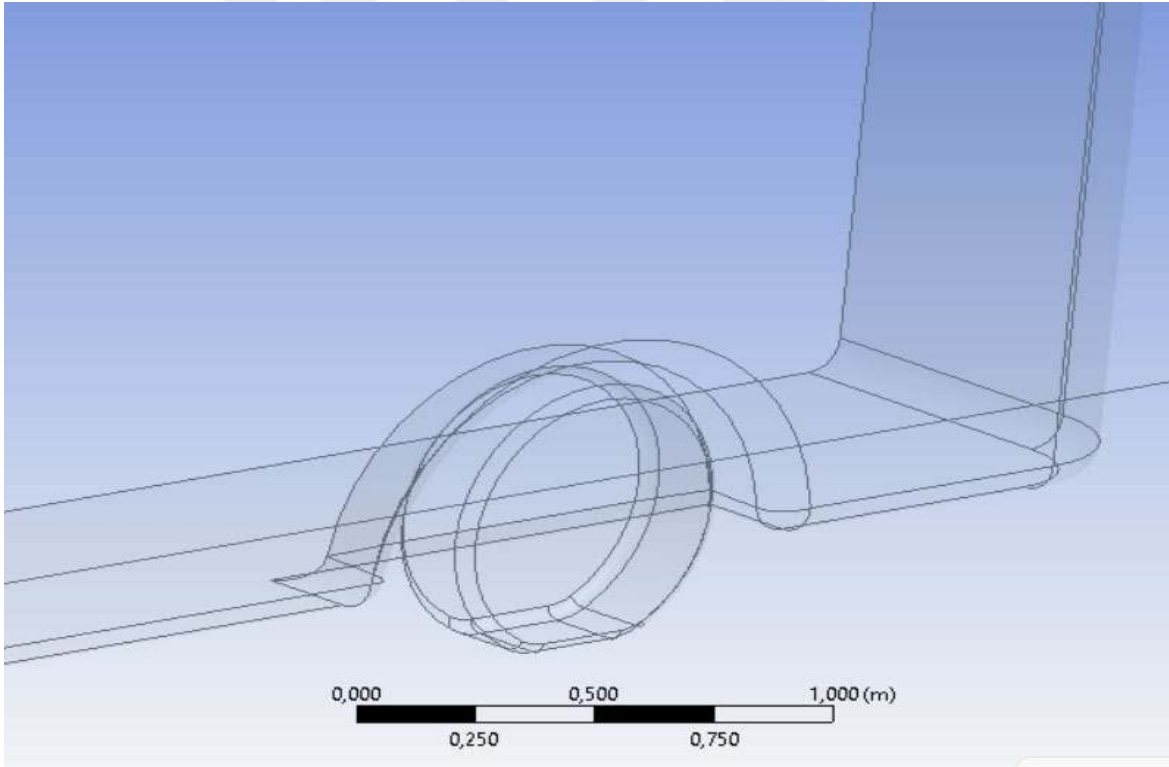


Şekil 2.11 T1 modelinin Space claim programı kullanılarak oluşturulan üç boyutlu kontrol hacmi

2.2.2 Üç Boyutlu Ağ Yapısının Oluşturulması

CFD hesaplamasına başlamadan önce, en kritik adımlardan biri uygun bir ağ yapısı (grid veya mesh) hazırlamaktır. Bu ağ veya ızgara, küçük parçacıklardan oluşan bir yapıdır ve akışkanın içinden geçeceği boşluğu doldurur. Ağ yapısının oluşturulması, özellikle aerodinamikle ilgili olmayıp, akış çözümlemesi sırasında kullanılacak olan geometrik bilgileri içerir. Bu ağ, analizde kullanılacak olan alanın geometrisini detaylı bir şekilde temsil etmelidir. Akışın karmaşıklığına bağlı olarak, ağın çözünürlüğü ve detayı da değişebilir. Doğru bir ağ yapısının oluşturulması, sonuçların doğruluğunu ve hesaplama sürecinin güvenilirliğini doğrudan etkiler. Bu nedenle, ağ yapısının titizlikle hazırlanması ve gerektiğinde optimize edilmesi önemlidir. Ayrıca, analizde kullanılacak olan CFD yazılımının gereksinimlerine ve hesaplama yöntemine uygun bir ağ yapısı seçilmelidir.

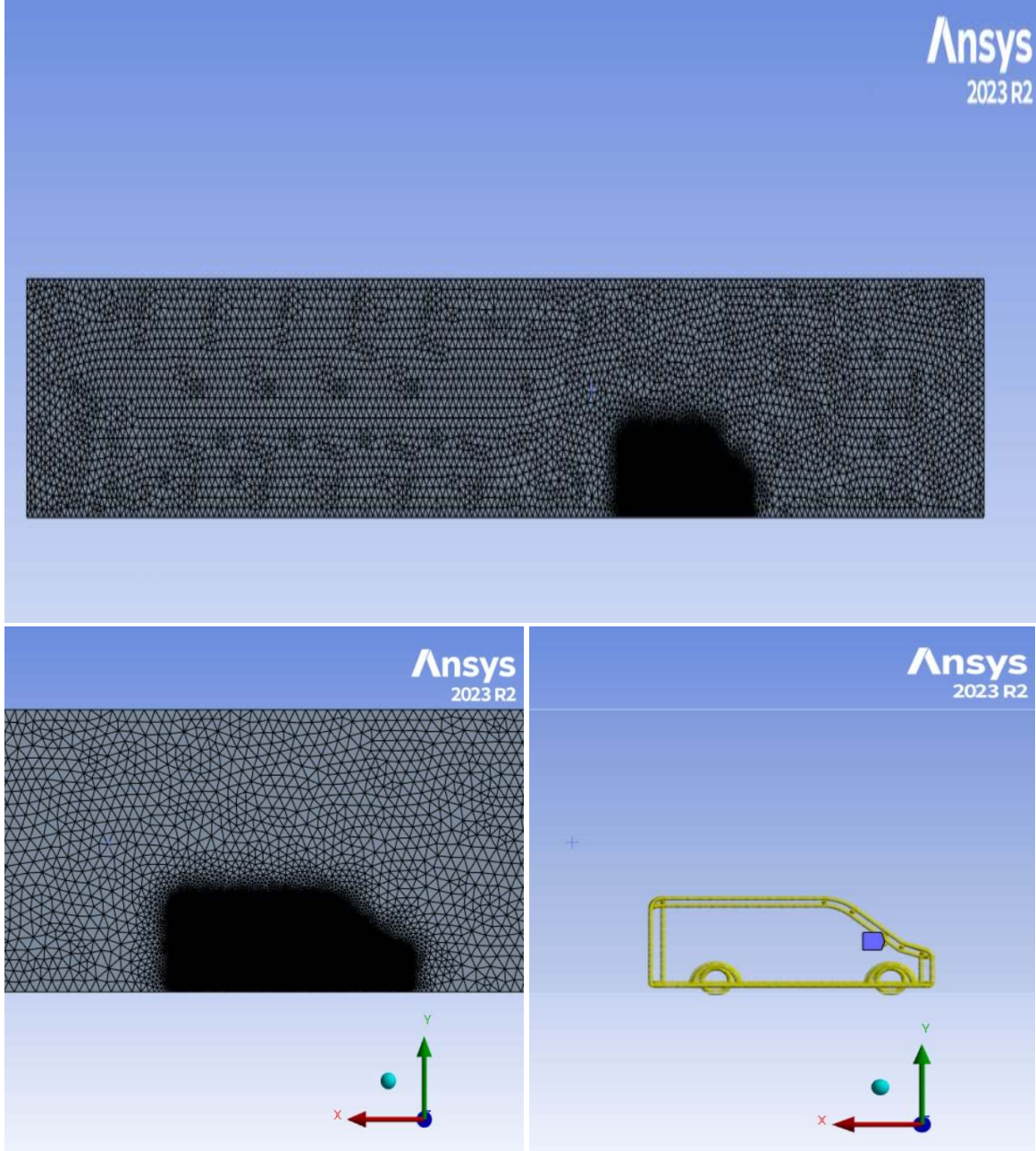
Geometrisi düzenlenmiş model ANSYS WORKBENCH MESH kısmına analiz sürelerini kısaltmak ve donanımları verimli kullanmak için simetrik forma aktarılmıştır . Araç gövdesi, tekerlekler ve tekerleklerin yerle temas ettiği bölgelerde yüzey sayıları artırılarak ve bu bölgelerdeki yüzeyler yoğunlaştırılarak daha detaylı bir mesh oluşturulmuştur. Özellikle tekerleklerin yerle temas ettiği bölgelerde ağ kalitesini arttırmak amacıyla bu bölge revize edilmiştir. Bu revizyonlar, analizde hassas sonuçlar elde etmek için önemlidir. Tekerleklerin yerle temas ettiği bölgelerde daha yüksek bir mesh çözünürlüğü, temas kuvvetlerinin ve sürtünmenin daha doğru bir şekilde hesaplanmasını sağlar. Ayrıca, aracın aerodinamik etkisinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi için gövde ve tekerleklerin detaylı bir şekilde modellenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada tekerlekler ana gövdeden ayrı olarak tasarlanıp ana gövdeye monte edilmiştir. Daha kaliteli bir ağ yapısı elde etmek için tekerlekler yüzeye temas eden bölgelerinde revizyon yapılmıştır bu revizyon yapılırken aracın yükseklik ölçüsü dikkate alınmış her model için aynı tekerlekler kullanılmıştır. Şekil 2.12’de aracın tekerlek kısmında yapılan revizyon gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Ağ yapısı oluştururken tekerleklerin uygun hale getirilmesi

Modelin simetrisi alındıktan sonra, giriş bölgesine "Inlet", çıkış bölgesine "Outlet", minibüs simetrisine "car", yola "Road", simetri karşısındaki bölgeye ve üst yüzeye "Wall" adı verilmiştir. Tüm akışkan hacmi "Fluid" olarak adlandırılmıştır. Sprinter modeli ile

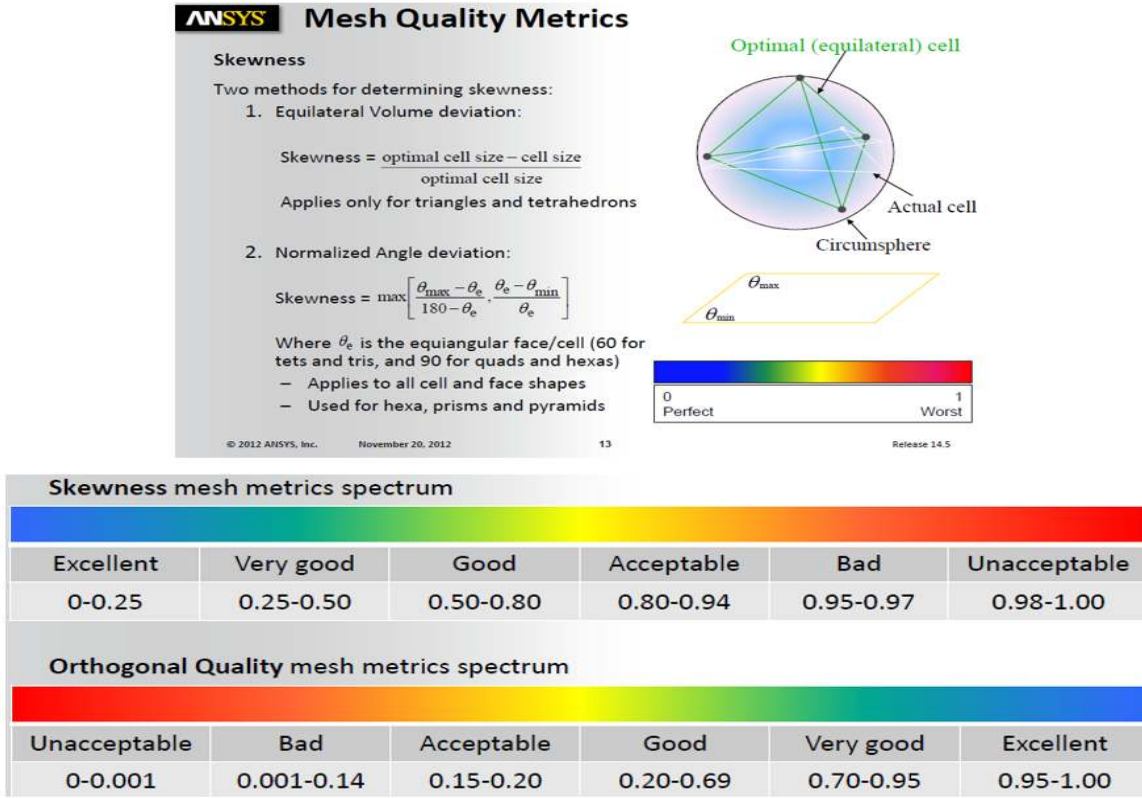
benzer olan T1 modeline en uygun olan 0.075 m aralıklı ağ oluşturulmuş, dikiz aynasına ise 0.024 m aralıklı ağ atılarak Linear Tetrahedron ve Linear Wedge (Prism) karışımı şeklinde toplamda 623.825 düğüm ve 3.329.970 eleman içeren bir ağ oluşturulmuştur. Ağ yapısı oluştururken özellikle aracın bulunduğu kısımlara ANSYS WORKBENCH MESH kısmında sizing seceneği kullanılarak aracın yüzey kısmında ve kenar kısımlarında daha iyi bir ağ yapısı oluşturmak için daha küçük ölçülerde ağ yapısı tanımlanmıştır. Şekil 2.13'te T1 modelinin ağ yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.13. T1 modelinin ağ yapısı

Yapılan mesh çalışmasının carpicklık oranı ortogonal kalitesinin analiz için uygun olan değer aralığında olması analizde doğru sonuçları almak için son derece önemlidir. Şekil

2.14’ de ağ yapısının çarpıklık ve ortogonal kalitesinin sınıflandırılması gösterilmiştir. Bunun kontrolü şekil 2.14’ den yapılmıştır [47]. Ortalama çarpıklık değeri 0.20 ortogonal kalite değeri 0.79 bulunmuştur bu değerler kabul edilebilir değerler arasındadır.



Şekil 2.14. Ağ yapısının çarpıklık oranı ve ortogonal kalitesinin sınıflandırılması [47].

Aerodinamik analizlerde, uygun mesh sayısını belirlemek sonuçların doğruluğunu ve hesaplama verimliliğini doğrudan etkiler. Mesh, analizde kullanılan geometrinin küçük parçalara bölünmüş hali olarak tanımlanır ve her bir parçanın özellikleri ayrı ayrı hesaplanır. Uygun mesh sayısını tespit etmek için genellikle deneme-yanılma yöntemi kullanılır ve çeşitli faktörler göz önünde bulundurulur bu faktörler şunlardır :

1.Geometri ve Akış Koşulları: Analizdeki geometrinin karmaşıklığı ve akış koşulları, uygun mesh sayısını belirlemede kilit bir rol oynar. Daha karmaşık geometriler, genellikle daha yüksek bir mesh sayısını gerektirir.

2.Çözüm Hassasiyeti: Analizden elde edilmek istenen sonuçların hassasiyeti, mesh sayısının belirlenmesinde belirleyici bir faktördür. Daha hassas sonuçlar elde etmek için genellikle daha yüksek çözünürlükte bir mesh kullanılması gerekebilir.

3.Hesaplama Kaynakları: Daha yüksek çözünürlükteki bir mesh, daha fazla hesaplama kaynağı gerektirir. Bu nedenle, uygun mesh sayısını belirlerken mevcut hesaplama kaynaklarının da dikkate alınması önemlidir.

4.Yakınsama Testleri: Mesh sayısını belirlemek için yakınsama testleri yapılabilir. Bu testlerde, farklı mesh çözünürlüklerinde analizler gerçekleştirilir ve sonuçların karşılaştırılmasıyla uygun mesh sayısı belirlenir.

Bu çalışmada uygun mesh sayısını bulmak için mesh yakınsama testleri yapılmıştır. Mesh yakınsama testleri için mercedes sprinter modeline benzer ölçülerde çizilen T1 modeli ile 100km/sa hızında farklı mesh sayılarında analizler yapılmıştır.Yapılan analizler sonucunda 3.329.970 ağda yakınsama elde edilmiştir. Tablo 2.2’de T1 modelinin ağ yakınsama değerleri gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Dikiz Aynalı T1 Modelinin Ağ yakınsama değerleri

k-ω modeli	1.ağ	2.ağ	3.ağ	4.ağ	5.ağ
Eleman sayısı	868465	1491385	2350565	3296391	5256383
Sürüklenme katsayısı Cd	0.425	0.420	0.407	0.403	0.405

2.2.3 Sınır şartları

Uygun ağ yapısı oluşturulduktan sonra, analiz için doğru sınır şartlarının belirlenmesi gerekmektedir. Sınır şartlarının belirlenmesi sürecinde, yapılan analiz türüne göre en doğru verilerin programa girilmesi kritik bir önem taşır. Analize başlanmadan önce, doğru iterasyon sayısı, türbülans modeli, giriş hızı, basınç, sıcaklık, yoğunluk, viskozite ve duvar fonksiyonları gibi parametrelerin dikkatlice girilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, sınır şartları Tablo 2.3 'de belirtilen şekilde tanımlanmıştır. Şekil 2.15’de Sınır şartlarının ANSYS Fluent programında tanımlanması gösterilmiştir.

Tablo 2.3. Analizlerde tanımlanan sınır şartları

Sınır	Şart
Road	Kaymama şartı
Car	Kaymama şartı
inlet	27.7 m/s
outlet	0 kPa
Yoğunluk ρ	1.225 kg/m ³
Akışkan türü	Hava
Türbülans modeli	k-omega 2 eqn (SST)
İterasyon Sayısı	1200
Sıcaklık T	15.5 °C
Viskozite μ	1.79 x 10 ⁻⁵ kg/ms

Sınır şartlarının belirlenmesi aşamasında, akış ile teması olan yüzeylerde kaymama şartı tanımlanmıştır. Bu bağlamda, minibüsler ve tekerleklerin temas ettiği yolda kaymama şartı tanımlanmış, ancak kontrol hacminin çevresindeki bölgede kayma şartı dikkate alınmıştır. Tüm modellerde, giriş kısmına 100 km/sa hızında bir hız atanmış ve çıkış

kısımındaki basınç ise 0 Pa atmosfer basıncı olarak belirlenmiştir. Ayrıca, türbülans yoğunluğu yapılan hesaplamalarda %2 ve türbülans viskozite oranı 5 girilerek ayarlanmıştır. Türbülans yüzdesinin hesaplaması denklem (3.2)'de belirtilmiştir.

$$I = 0,16.(Re)^{-1/8} \quad (3.2)$$

I= Intensity

Re= Reynold sayısı

$V_{Hava} = 27.7$ m/sn

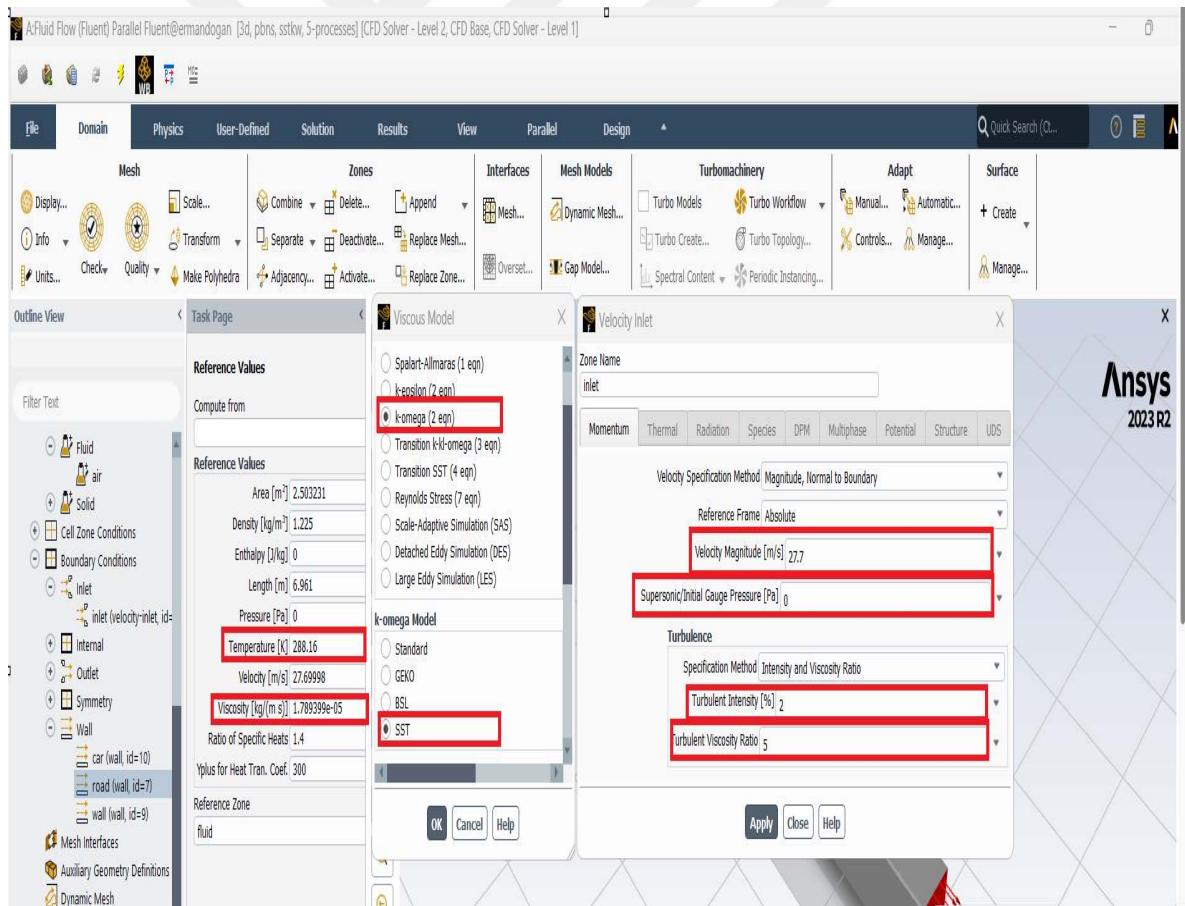
$L_{Taşıt} = 6.961$ m ve $\nu_{hava} = 1.789 \cdot 10^{-5}$ kg/m-sn

$Re = 1.051E+07$

Bulunan bu değerleri kullanarak I değerini buluruz.

$$I = 0,16.(10326758)^{-1/8}$$

I= % 2 değeri elde edilir. Tüm modellerde değerler bu şekilde hesaplanmış ve analiz edilmiştir.



Şekil 2.15. Sınır şartlarının ANSYS Fluent programında tanımlanması

2.2.4 Rüzgar Tüneli Deneyleri

Tasarlanan ve üretimi yapılan modellerin deneysen çalışmaları Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümün’de yer alan rüzgar tüneli deney setinde yapılmıştır. Bu tünel, maksimum 70 m/sn hızında hava akımı sağlayabilmekte, deney odasının ölçüleri 300 x 300 mm² ölçülerindedir ve uzunluğu 1000 mm’dir. Rüzgar tünelinin toplam uzunluğu 6400 mm, ağırlığı ise 400 kg’dır. Ayrıca, tünelin daralma oranı 11.1 olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan rüzgar tüneli Şekil 2.16’da gösterilmiştir.



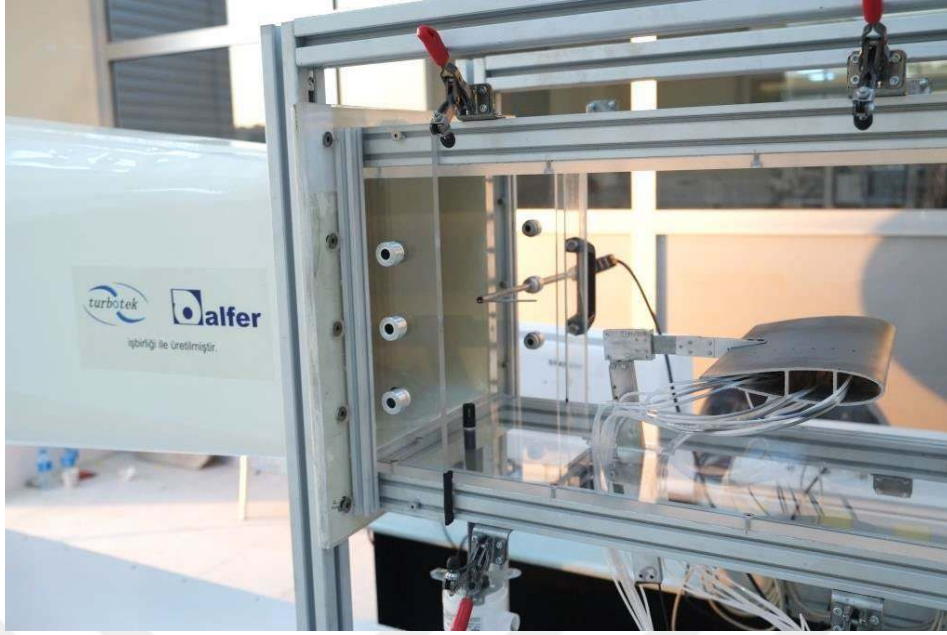
Şekil 2.16. Deneysel çalışmalarda kullanılan rüzgar Tüneli [47].

Rüzgar tünelinin 2 metrelik difüzörü tek parça cam elyaftan üretilmiştir. Yaklaşık 1 metre uzunluğundaki daralma konisi de yine cam elyaftan tek parça olarak tasarlanmıştır. Bu daralma konisi, özel bir kaset sistemi ile donatılmış olup, petek ve ağılar kolayca değiştirilebilir yapıdadır. Kaset sisteminin çerçevesi sac malzemeden yapılmıştır. İnlet kesiti 1000 x 1000 mm boyutlarındadır ve Şekil 2.17'de gösterilmektedir.



Şekil 2.17. Rüzgar tünelinin inlet kesiti [47].

Test alanı deney sırasında daha iyi gözlem yapabilmek amacıyla saydam malzemelerden imal edilmiştir (Şekil 2.18).



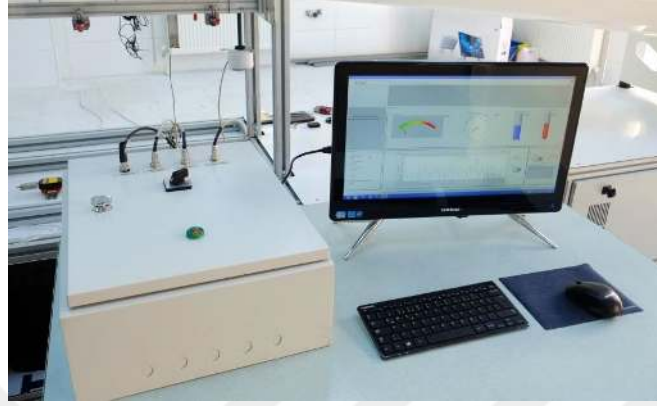
Şekil 2.18. Rüzgar tüneli kuvvet ve dil mekanizması [47].

Rüzgar tünelinin hem ön hem de arka yüzeyleri açılabilir şeffaf panellerle donatılmıştır. Alt yüzeydeki, akış eksenine paralel olan yarı, kuvvet sensörleri ve diğer ekipmanların tünel içine kolayca yerleştirilmesini sağlar. Test odasının giriş ve çıkış kesitlerinde toplamda 18 adet delik bulunur; giriş kesitinde 12 ve çıkış kesitinde ise 6 delik mevcuttur. Bu delikler, giriş kesitinde her kenarda 3'er tane ve çıkış kesitinde ön ve arka yüzeylerde 3'er tane olacak şekilde yerleştirilmiştir ve çeşitli fonksiyonel tapalarla kapatılabilirler.

Fanı destekleyen sac taşıyıcı ayaklar hariç, tüm taşıyıcı sistemler alüminyum profillerden yapılmıştır. Tünelin alt tablası, çeşitli boyutlardaki ekipmanların rahatça yerleştirilmesi için kesintisiz ve geniş bir alan olarak tasarlanmıştır. Ayrıca, yaklaşık 100 mm kalınlığında ve 8 mm çapında gözlere sahip alüminyum petek, kaset sistemi sayesinde kolayca çıkarılabilir. Tünelde, kasetli çelik ağların yerleştirilebileceği bir bölüm de mevcuttur.

Fan kanatları, açılarının ayarlanabilir olması sayesinde tüneldeki akışın karakteristikleri gerektiğinde değiştirilebilir. Daralma konisinin oranı 11.1 olup, difüzörün genişleme açısı 7 dereceyi aşmamaktadır. Test odasının giriş ve çıkış kesitlerinde, statik basınç ölçümleri için prizler yerleştirilebilir. Bu delikler ayrıca, pitot tüpü kullanılarak toplam ve dinamik basınç ölçümleri için de kullanılabilir; ölçüm yapılmadığı zamanlarda ise sızdırmaz contalarla kapatılabilir.

Tünelde, 15 kW gücünde bir elektrik motoru ve 0,8 m çapında bir fan bulunur. Bu fan, 800 Pascal basınç altında saatte 30.000 m³ debi üretebilir. Elektronik sistemlerin güç ve kontrolünü sağlayan bir pano kutusu ile veri izleme ve kayıt işlemleri için bir Samsung dokunmatik bilgisayar mevcuttur (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Rüzgar tünelinden veri takibi ve kayıt etmek için bilgisayar [47].

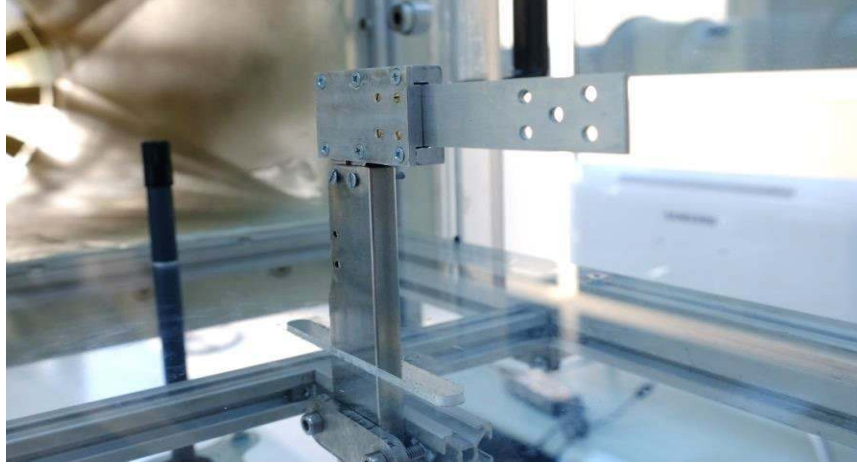
Bu bilgisayarda elde edilen tüm verilerin bilgisayarda görüntülenip kaydedilebilmesine olanak sağlayan bir kontrol yazılım programı (LABVIEW) bulunmaktadır (Şekil 3.20).



Şekil 2.20. Rüzgar tüneli veri akışı için kullanılan LABVIEW programı[47].

Rüzgar tünelinde verileri elde etmeye yarayan tek Eksenli Kuvvet Ölçüm Sistemi vardır bu sistem aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- Kullanıcının belirlediği tek bir eksenle kuvvet ölçülüp kaydedilebilir.
- Sistemin maksimum ölçüm kapasitesi 44.5 N'dir.
- Vidalı sensör sabitleme mekanizması bulunmaktadır.



Şekil 2.21. Rüzgar tünelinin kuvvet ve dil mekanizması [47].

Rüzgar tüneline çalıştırmak için hazırlık yapılırken, tünelin elektrik beslemesi üç fazlı fişle sağlanır. Elektrik prizindeki şalter açılır. Fanın frekans kontrol panelinde iki düğme ve bir çevirmeli kademe düğmesi (potansiyometre) bulunur. İlk olarak, potansiyometrenin 0 pozisyonunda olup olmadığı kontrol edilir ve gerekiyorsa 0 pozisyonuna getirilir. Ardından, "Başlat" düğmesine basarak sürücü ve fan motorunun çalışmaya başlaması sağlanır. Deney için gerekli fan devri ayarlanır ve potansiyometre uygun seviyeye getirilir. Fan devri deney sırasında değiştirilebilir, ancak ani değişikliklerden kaçınılmalı ve devir kademeli olarak ayarlanmalıdır. Deney tamamlandığında veya fanın durdurulması gerektiğinde, potansiyometre önce 0 pozisyonuna getirilmelidir. Fan yavaşça durdurulmalı, ani hız değişimlerinden kaçınılmalıdır. Fan tamamen durduktan sonra, "Dur" düğmesine basılarak işlem sonlandırılır ve elektrik şalteri kapatılır.

3. AKIŞ ANALİZ BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada Balıklardan esinlenilerek tasarlanan T1,T2, T3, T4 adı verilen modellerin gerçek boyutları kullanılarak simetri formda CFD analizleri yapılmıştır. Eşit hacimde tasarlanan 4 farklı minibüs modelinin tasarımları SOLIDWORKS programı ile yapılmıştır. Araç modellerinin dış yüzey formunun değişikliği ile Sürüklenme katsayısı (C_d) arasındaki ilişkiyi incelemek ve bu sonuçları Mercedes sprinter 316 (uzun şasi) modelinin benzeri ile kıyaslamak için Mercedes sprinter modelinin ölçüleri referans alınmış ve tüm modeller eşit izdüşüm alanına sahip olarak tasarlanmış (Tablo 4.1) ve analizlerde aynı sınır şartları değerleri kullanılmıştır. Analizler sonucunda sürüklenme katsayısı,aerodinamik direnç kuvvetinin büyüklüğü, aracın yüzeyine etki eden basınç gibi değerler elde edilmiş ve birbirleri ile kıyaslama yapılmıştır .Ayrıca analiz sonuçları Manisa Celal Bayar Üniversitesi'nde bulunan rüzgar tüneli kullanılarak üretilen modellerle rüzgar tüneli deneyleri yapılmış analiz sonuçları ve rüzgar tüneli deneyi sonuçları birbirleri ile mukayese edilmiştir.Modeller ve izdüşüm alanları Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Modellerin izdüşüm alanları

MODELLER	İzdüşüm Alanı (m ²)
T1	2.441
T2	2.421
T3	2.433
T4	2.446

Dış akış analizi yapıldığı ve bu akış için sınır tabakası önemli olduğu için en iyi sonuçları veren yöntem olarak düşünülen. k- ω SST kullanımıyla yapılan çözümde, $y^+ = 1$ için elde edilen sonuçlar daha iyi yakınsama sağladığından, $y^+ = 1$ değeri tercih edilmiştir.

Deneyisel çalışmalarda rüzgar tünelinin özellikleri göz önüne alınarak prototip ve modelin benzerlik oranı hesaplanmış araçların 1:28 oranında küçültülmüş modelleri kullanılmıştır.

Öncelikle eşit hacimde tasarlanan bu minibüs modellerinin 100 km/sa'da (27.7 m/s) sürüklenme katsayıları hesaplanmıştır.Tüm eşit hacimli minibüs modellerinin sürüklenme katsayıları hesaplanmıştır.Sürüklenme kuvveti hesaplanırken analiz sonucunda bulunan

kuvvet değeri denklem 3.3' te yerine konularak hesaplanmıştır. Diğer modeller içinde aynı hesaplama yöntemi kullanılmıştır.

$$F = 0.5 \rho V^2 A C_d \quad (3.3)$$

Mercedes sprinter 316 (uzun şasi) modeli ile birebir aynı ölçülerde tasarlanan T1 modelinin hem dikiz aynalı hemde dikiz aynasız olarak analizi yapılmış ve sürüklenme katsayıları kıyaslanmıştır.

3.1 Minibüs Modellerinin Analizleri

Eşit en, boy ve yükseklik ölçüleriyle tasarlanan T1,T2,T3, ve T4 modellerinin 60 km/h 100 km/h ve 120km/h hızında analizleri eşit reynold sayıları ile ANSYS Fluent progamı ile yapılmış ve farklı hızlarda sürüklenme katsayıları bulunarak birbirleri ile kıyaslama yapılmıştır.

3.1.1 Minibüs Modellerinin Çözümleri

Tablo 3.2. Analizlerde kullanılan sınır şartları ve havanın değerleri

Sıcaklık T	15.5°C
Yoğunluk ρ	1.225 kg/m ³
Viskozite μ	1.79 x 10 ⁻⁵ kg/ms
Giriş (inlet)	(16.6 m/s , 27.7 m/s, 33.3 m/s)
Çıkış (Outlet)	0 Pa
Road (Yol)	Hareketli yol + Kaymama şartı
Wall (Kenar)	Kayma şartı
Car (Araç)	Kaymama şartı

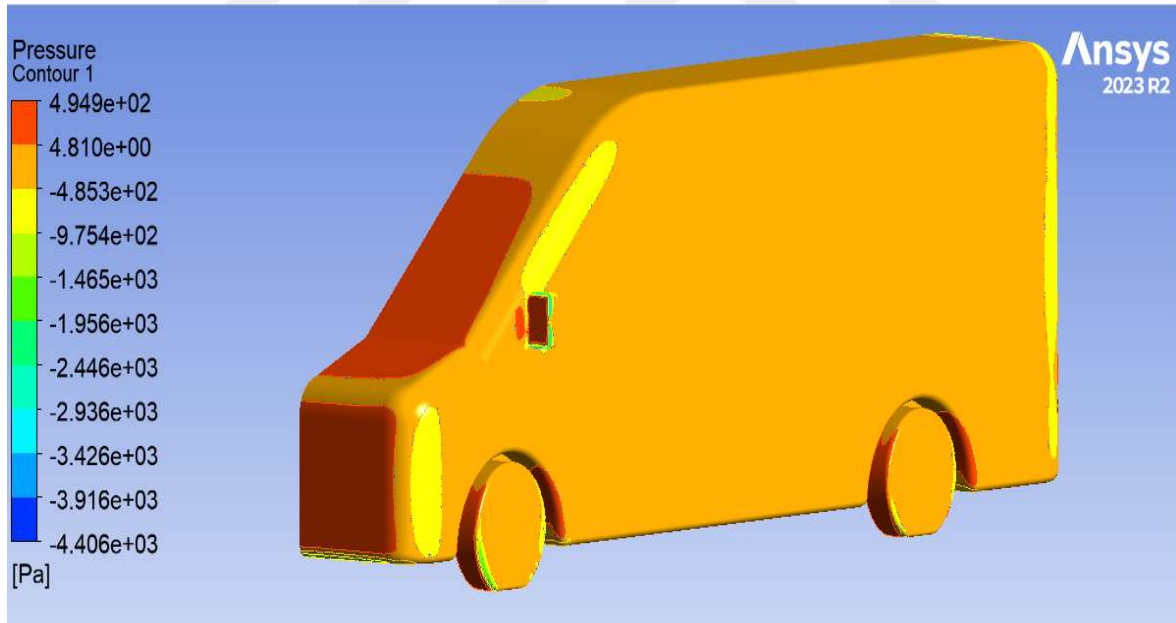
Tüm modellerde Sıcaklık 15.5°C, yoğunluk 1.225 kg/m³ , Viskozite 1.79 x 10⁻⁵ kg/ms, havanın giriş hızı sırasıyla 16.6 m/s , 27.7 m/s, 33.3 m/s çıkış basıncı 0 Pa, minibüslerde ve aracın tekerleklerinin temas ettiği yolda kaymama şartı olacak şekilde

ayarlanmıştır. Bu veriler Tablo 3.2’de gösterilmiştir. Belirlenen sınır şartları ile türbülans yoğunluğu %2 vizkozite oranı 5 girilerek çözümleri yapılmıştır.

3.1.1.1 T1 Modelinin Çözümü

T1 modelinin çözümünde Tablo 3.2’ de belirtilen sınır şartları esas alınmıştır. Analiz ilk önce 27.7 m/s hızında yapılmış daha sonra 16.6 m/s ve 33.3 m/s hızlarında analizler yapılmış ve aracın aerodinamik sürüklenme katsayısı ve aerodinamik direnc kuvvetleri hesaplanmıştır. Aracın üzerindeki akışların kontrol edilebilmesi amacıyla sınır tabaka kalınlıkları hesaplanmıştır. Maksimum katman sayısı ise 10 olarak ayarlanmıştır. Ayrıca "Sizing" seceneği ile kontrol hacmine 320 mm aracın yüzeyine 20 mm aracın köşe kısımları secilerek bu yüzeylere 30 mm ölçülerinde toplam 636201 nodes ve 3596391 eleman sayısına sahip ağ oluşturulmuştur.

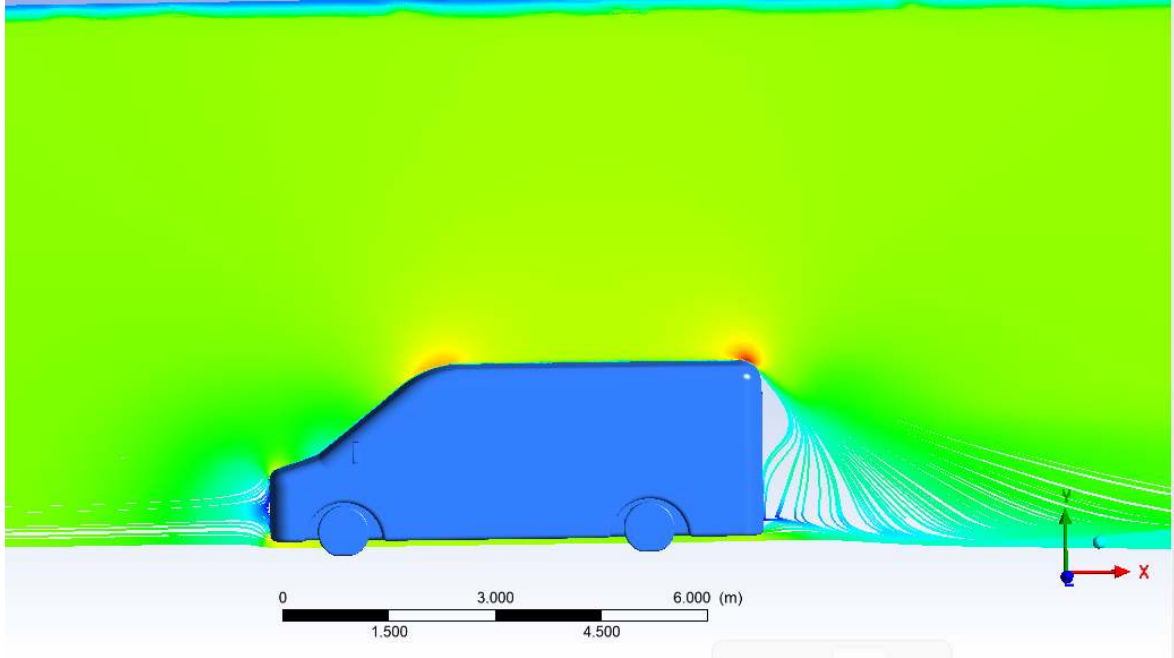
Analiz sonuçları incelendiğinde “Contour” seceneğiyle xy düzleminde yüzeydeki basınç değerlerine bakıldığında Şekil 3.1.’de aracın ön kaput, ön kaput üstü, ön cam, tekerlekler ve dikiz aynası kısmında maksimum basınç olduğu görülmektedir. Minibüs yüzeyine etki eden en yüksek basınç aracın ön tampon ve cam kısmında 494.9 Pa’dır.



Şekil 3.1. T1 modeli 27.7 m/s hızında basınç gradyanı

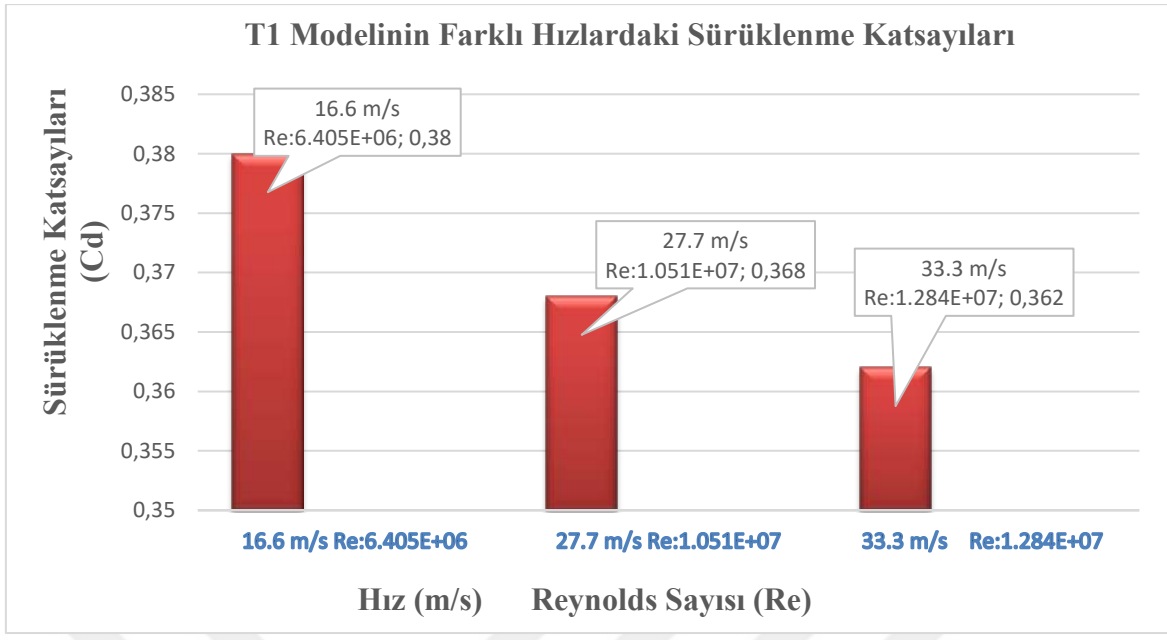
Analiz programında aracın aerodinamik analizinde, akım çizgileri aracın etrafındaki hava akışını görselleştirirken, girdap oluşumu (vortex) ise akışın dönüş hareketlerini ve türbülansını simgeler. Akım çizgileri, havanın aracın yüzeyinden nasıl geçtiğini ve hangi yolları izlediğini gösterirken, girdaplar özellikle aerodinamik verimliliği etkileyen alanlarda,

hava akışının kararsız hale geldiği bölgelerde görülür. Bu görselleştirmeler, aracın aerodinamik performansını anlamak ve optimize etmek için önemli veriler sunar. Şekil 3.2’de aracın akım çizgilerinin görüntüsü ve girdap oluşumu görülmektedir. Aracın ön tampon bölgesi ve arka kısmında girdapların oluştuğu görülmektedir.

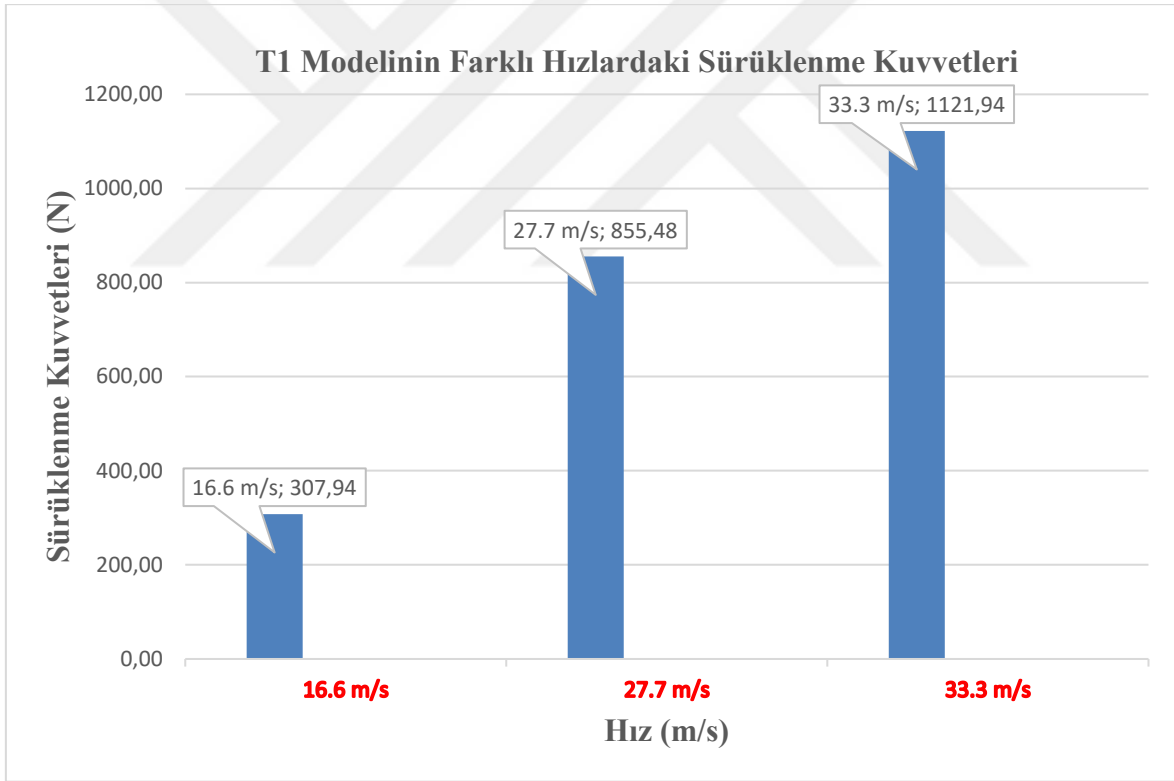


Şekil 3.2. T1 modelinin 27.7 m/s hızdaki türbülans oluşumu

Mercedes sprinter 316 uzun şasi modeli ile benzer olarak tasarlanan ve diğer modellerle eşit hacimde tasarlanan T1 modeli için yapılan analizlerde 27.7 m/s hızda simetri model için sürüklenme kuvveti 475.08 N tüm model için 55.48 N olarak tespit edilmiştir. Sürüklenme katsayısı ise T1 modeli için 0.403 olarak tespit edilmiştir. Aracın farklı hızlarda sürüklenme katsayısı değerleri Şekil 3.3’de sürüklenme kuvveti değerleri Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Aracın yüzeyine etki eden en yüksek basınç değerlerinin farkı hızlardaki değişimi Tablo 3.3’te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. T1 modelinin farklı hızlardaki sürüklenme katsayıları-Reynolds Sayısı değerleri



Şekil 3.4. T1 Modelinin farklı hızlardaki sürüklenme kuvvetleri değerleri

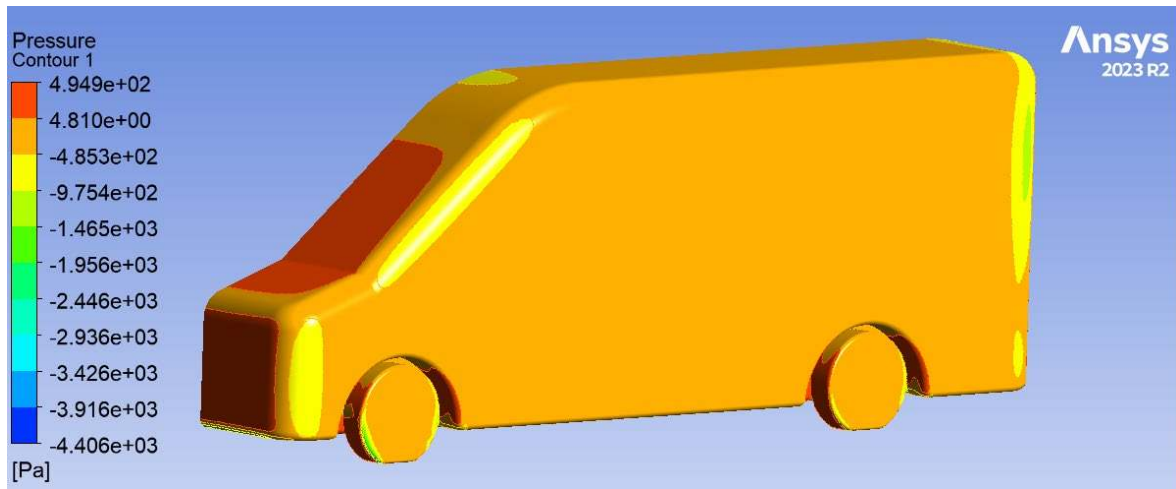
Tablo 3.3. T1 modelinin farklı hızlarda araç yüzeyine etki eden basınç değerleri

Model	Hızlar (m/s)	Araç yüzeyine etki eden maksimum basınç (Pa)
T1	16.6	173.0
	27.7	494.9
	33.3	695.7

3.1.1.2 T1 Modelinin Dikiz Aynasız Çözümü

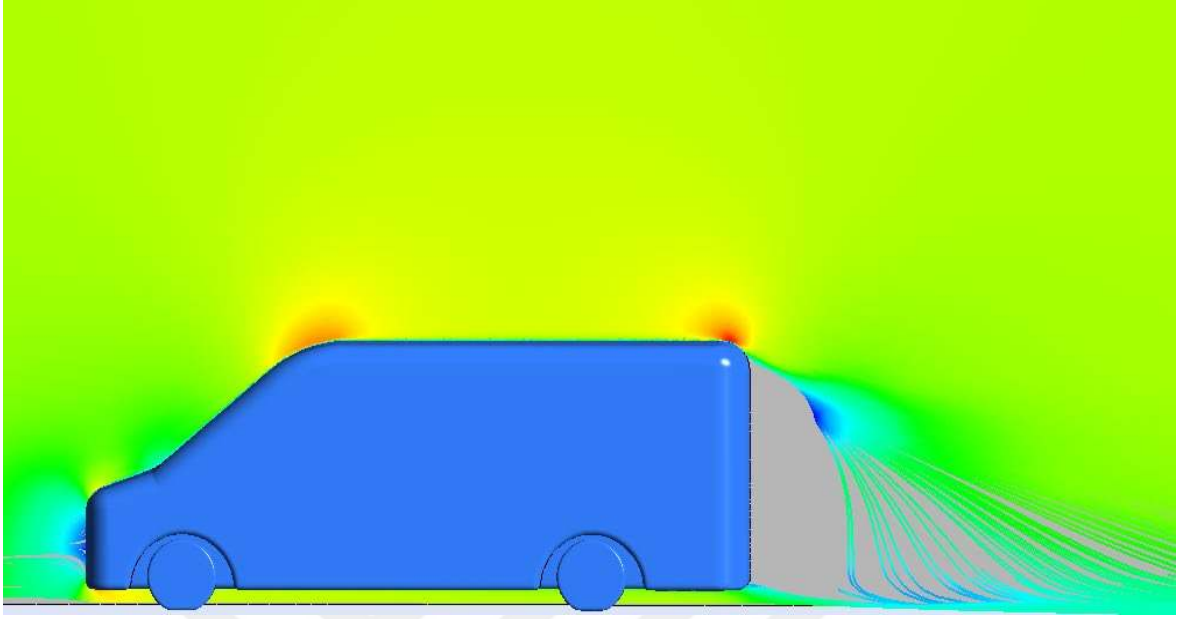
T1 modelinin dikiz aynası ihmal edilerek yapılan çözümünde kullanılan ağ yapısı toplam 626573 nodes ve 3342779 eleman sayısına sahip olarak oluşturulmuş ve analizi yapılmıştır. T1 modelinin dikiz aynası ihmal edilerek 27.7 m/s hızında yapılan analizde sürüklenme kuvveti simetri model için 427.74 N tüm modelde 855.48 N olarak ölçülmüş ve arada dikiz aynalı model ile 47.34 N bir fark oluşmuştur. Ayrıca sürüklenme katsayısı 0.368 olarak ölçülmüştür. T1 modelinin dikiz aynalı modeli ile dikiz aynasız modeli arasında sürüklenme katsayısı açısından 0.032 kadar bir fark tespit edilmiştir. Aradaki fark % 8.7 olarak hesaplanmıştır.

T1 dikiz aynasız modelin analizinde Minibüs yüzeyine etki eden en yüksek basıncın aracın ön tampon ve cam kısmında 480.8 Pa olduğu görülmüştür (Şekil 3.5). T1 modeli ile aynasız model arasında 14.1 Pa basınç farkı oluşmuştur.



Şekil 3.5. T1 dikiz aynasız modelin 27.7 m/s hızında basınç gradyanı

T1 dikiz aynasız modelinin akım çizgilerinin görüntüsü ve girdap oluşumu Şekil 3.6’da görülmektedir.

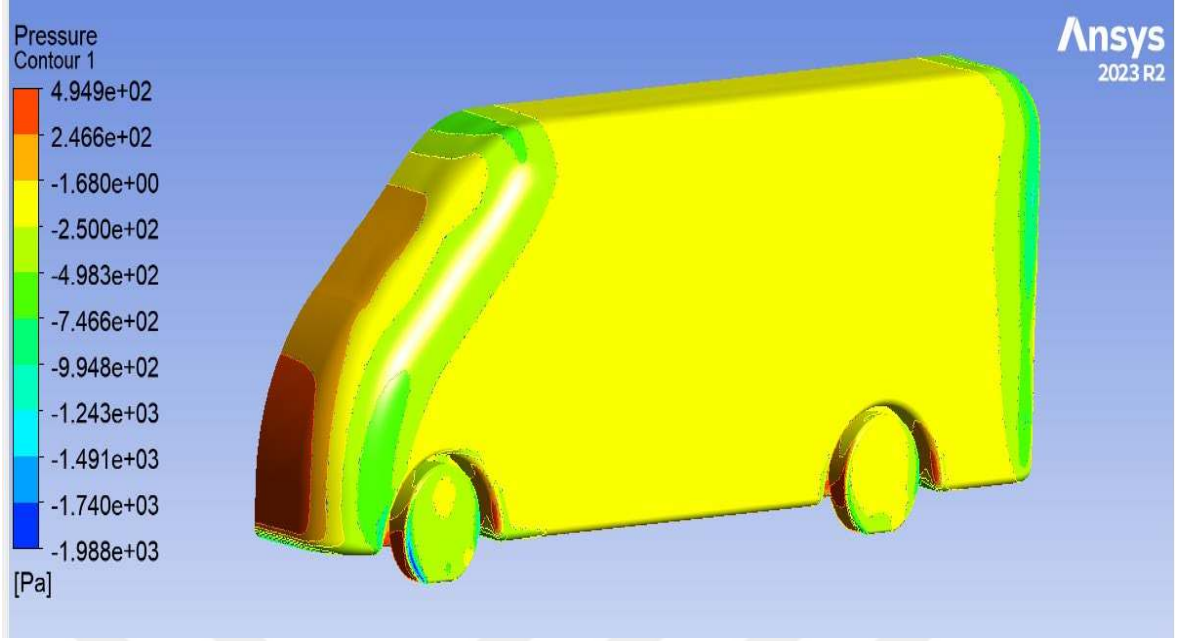


Şekil 3.6. T1 dikiz aynasız modelinin 27.7 m/s hızında türbülans oluşumu

3.1.1.3 T2 Modelinin Çözümü

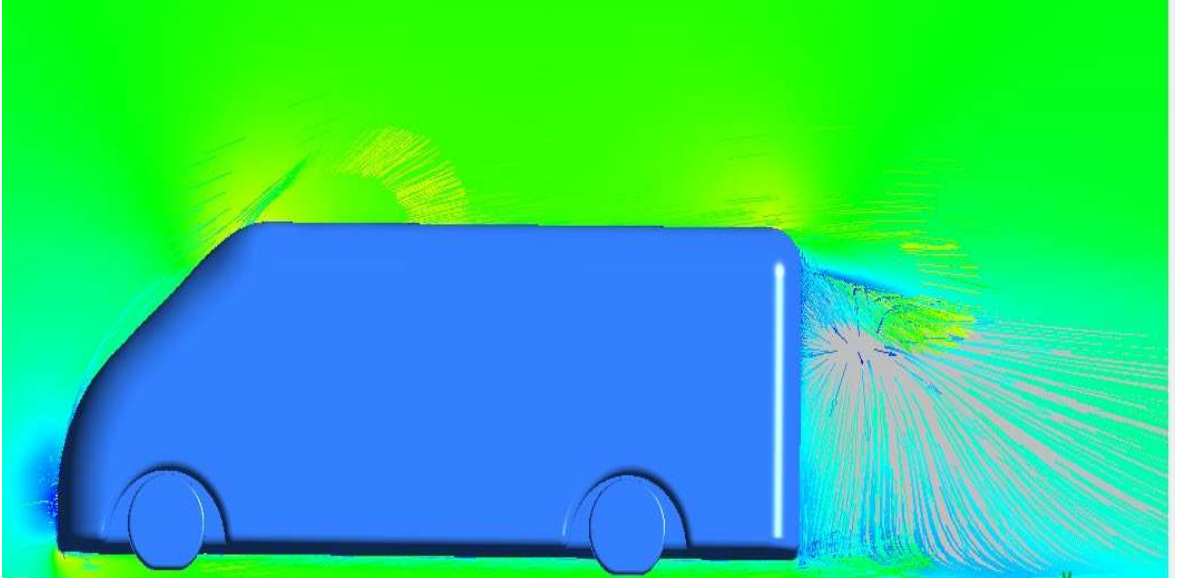
T1 modeli ile eşit hacimde tasarlanan T1modelinin ağ yapısı oluşturulurken T1 modelinde olduğu gibi "Sizing" seçeneği ile kontrol hacmine 400 mm aracın yüzey kısmı seçilerek buralara 20 mm aracın köse kısımları seçilerek bu yüzeylere 30 mm ölçülerinde ağ yapısı oluşturulmuş ve toplamda 623825 nodes ve 3329970 eleman sayısı ile oluşturulan ağ yapısıyla analiz edilmiştir.

T2 modelinin basınç gradyanı incelendiğinde model yüzeyine etki eden basınç 27.7 m/s için 482 Pa olduğu görülmüştür. En yüksek basınç değerlerinin ön tampon ve tekerlek kısımlarında olduğu görülmüştür (Şekil 3.7).



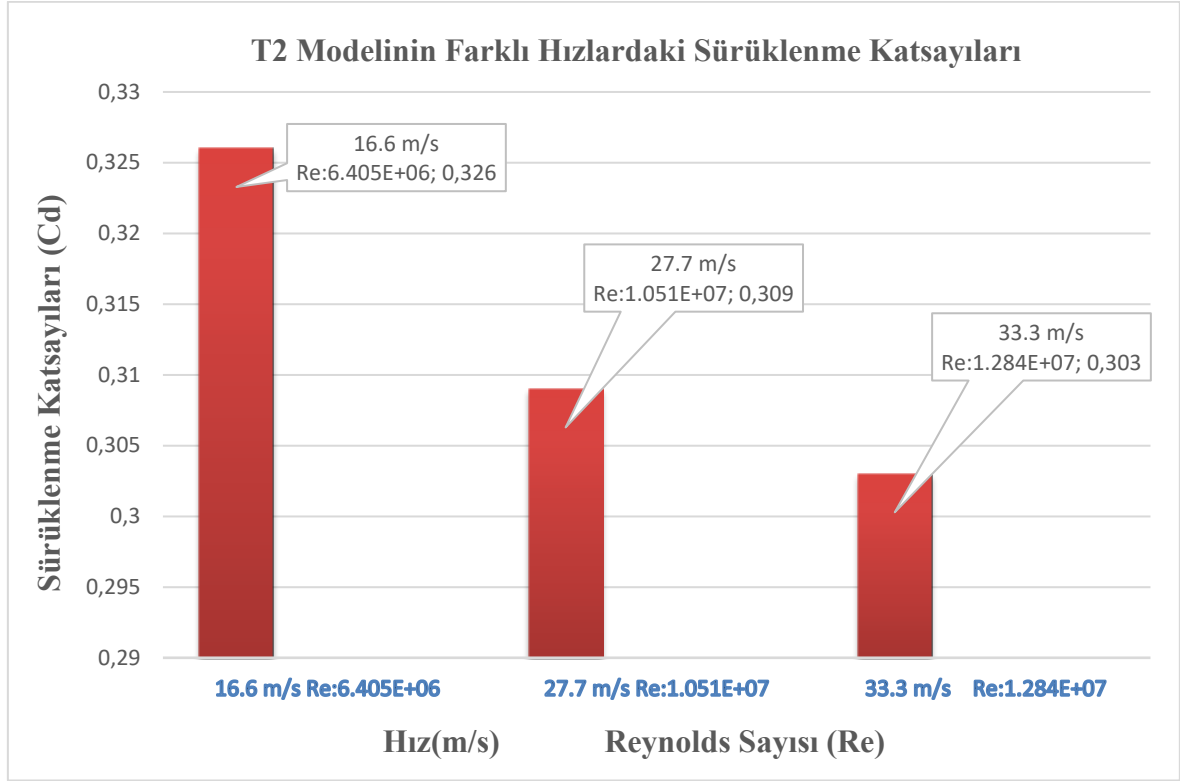
Şekil 3.7. T2 modelin 27.7 m/s hızında basınç gradyanı

Tablo 4.2’ de belirtilen sınır şartları ile 27.7 m/s hız değeri için analiz edilen T2 modelinde sürüklenme kuvveti simetri model için 360.61N tam model için 721.22 N olarak hesaplanmış ve sürüklenme katsayısı 0.303 olarak hesaplanmıştır. T2 modelinin girdap oluşumu ve akım çizgilerinin görüntüsü Şekil 3.8’de gösterilmiştir

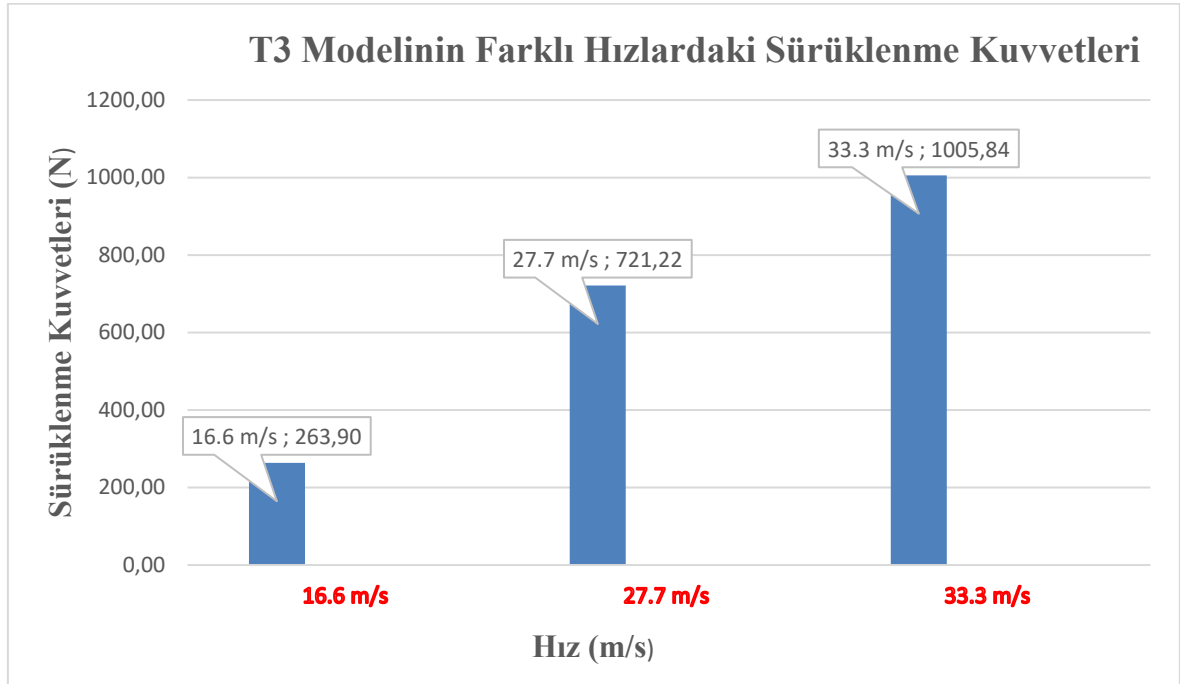


Şekil 3.8. T2 modelinin 27.7 m/s hızında türbülans oluşumu

T2 modelinin farklı hızlarda sürüklenme katsayısı ve Reynolds sayısı değerleri Şekil 3.9, sürüklenme kuvveti değerleri Şekil 3.10 ve araç yüzeyine etki eden maksimum basınç değerlerinin farklı hızlardaki değişimi Tablo 3.4’te gösterilmiştir.



Şekil 3.9. T2 modelinin farklı hızlardaki sürüklenme katsayıları-Reynolds Sayısı değerleri



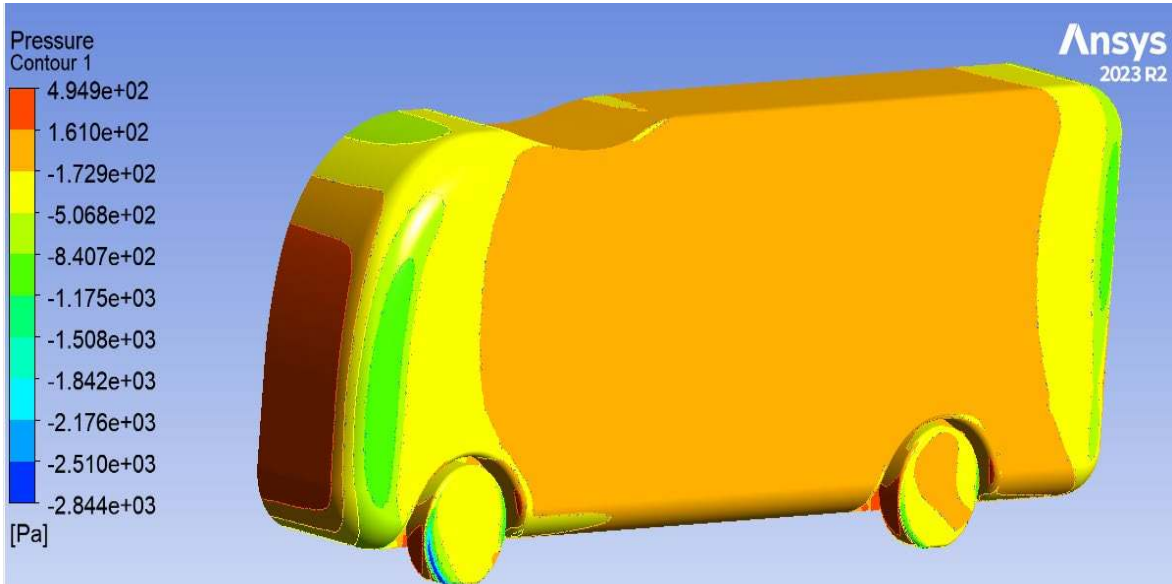
Şekil 3.10. T2 modelinin farklı hızlardaki sürüklenme kuvvetleri değerleri

Tablo 3.4. T2 modelinin farklı hızlarda araç yüzeyine etki eden basınç değerleri

Model	Hızlar (m/s)	Araç yüzeyine etki eden maksimum basınç (Pa)
T2	16.6	173.2
	27.7	482.0
	33.3	695.2

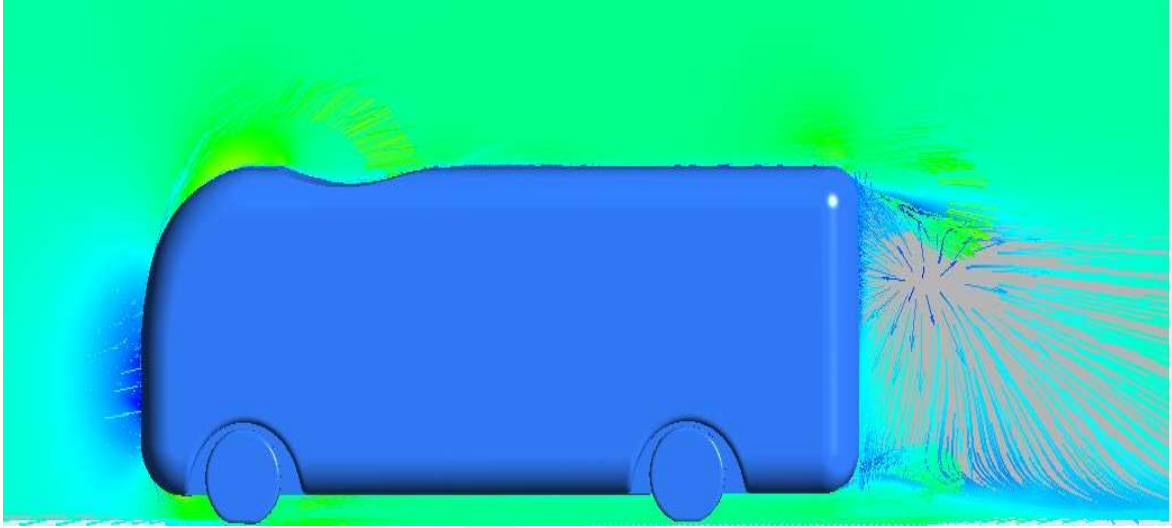
3.1.1.4 T3 Modelinin Çözümü

T1, T2 modelleriyle eşit ölçülerde tasarlanan T3 modeli 646392 nodes ve 3449711 eleman sayısı ile oluşturulan ağ yapısı ile diğer modellerle aynı sınır Şarlarında analiz edilmiştir. T3 modelinin basınç gradyanı incelendiğinde araç yüzeyine etki eden maksimum basıncın 27.7 m/s hız için 484.6 Pa olduğu görülmektedir. Maksimum basınç aracın ön tampon ve tekerlek kısmına etki ettiği görülmektedir (Şekil 3.11)



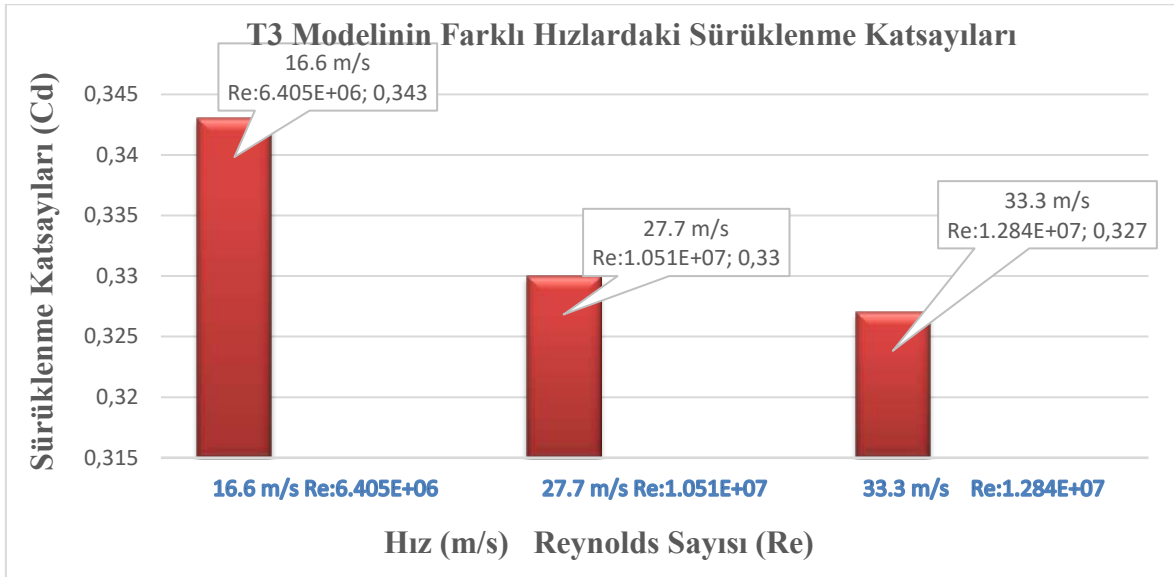
Şekil 3.11. T3 modelin 27.7 m/s hızında basınç gradyanı

T3 modelinin akım çizgileri ve girdap oluşumu şekil 3.12’de görülmektedir. Aracın yapılan analizlerinde sürüklenme kuvveti 27.7 m/s hız için simetri modelde 391.95 N tüm model için 783.9 N sürüklenme katsayısı ise 0.330 olarak bulunmuştur.

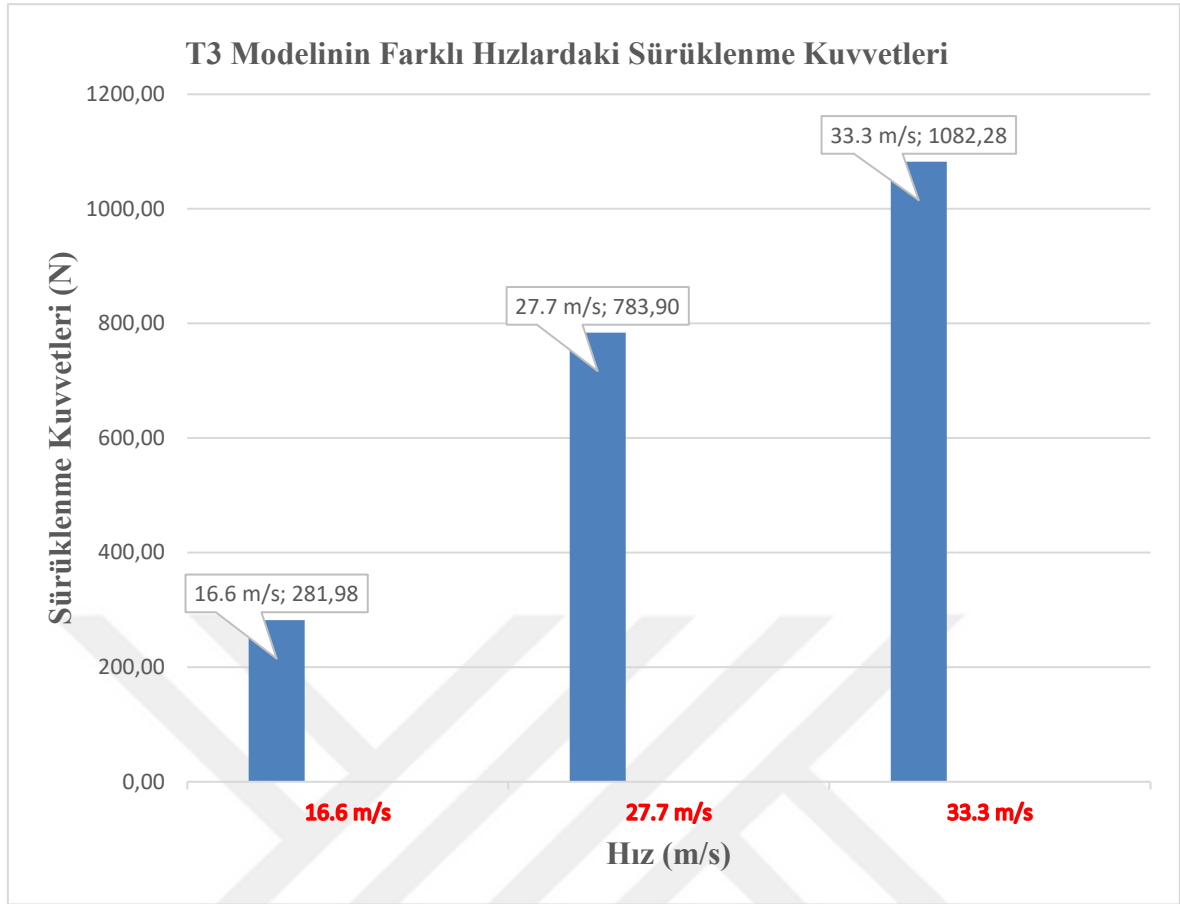


Şekil 3.12. T3 modelinin 27.7 m/s hızında türbülans oluşumu

T3 modelinin farklı hızlarda sürüklenme katsayısı değerleri Şekil 3.13 sürüklenme kuvveti değerleri Şekil 3.14 ve araç yüzeyine etki eden maksimum basınç değerlerinin farklı hızlardaki değişimi Tablo 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.13. T3 modelinin farklı hızlardaki sürüklenme katsayıları-Reynolds sayısı değerleri



Şekil 3.14. T3 minibüs modelinin farklı hızlardaki sürüklenme kuvvetleri değerleri

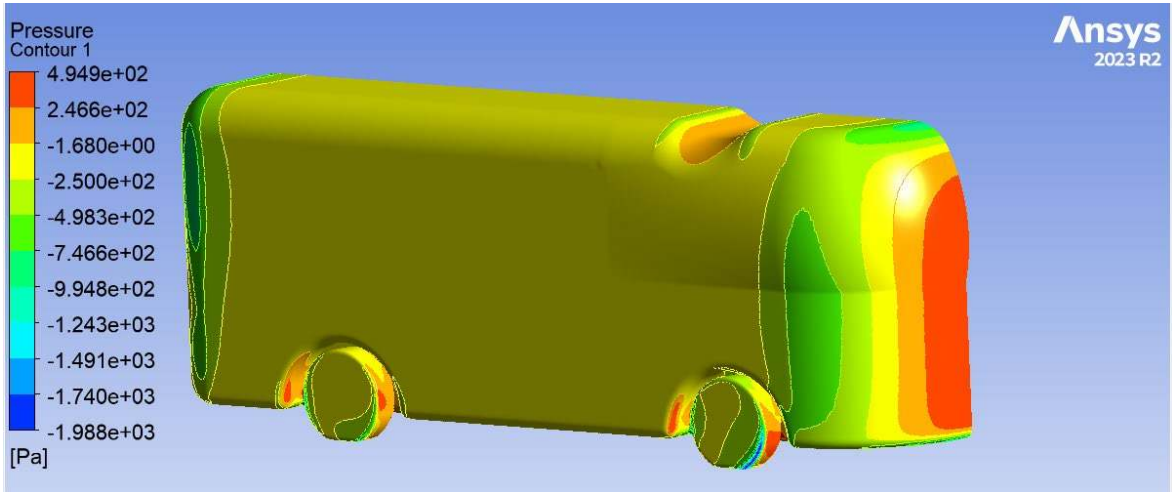
Tablo 3.5. T3 modelinin farklı hızlarda araç yüzeyine etki eden basınç değerleri

Model	Hızlar (m/s)	Araç yüzeyine etki eden maksimum basınç (Pa)
T3	16.6	173.9
	27.7	484.6
	33.3	699.4

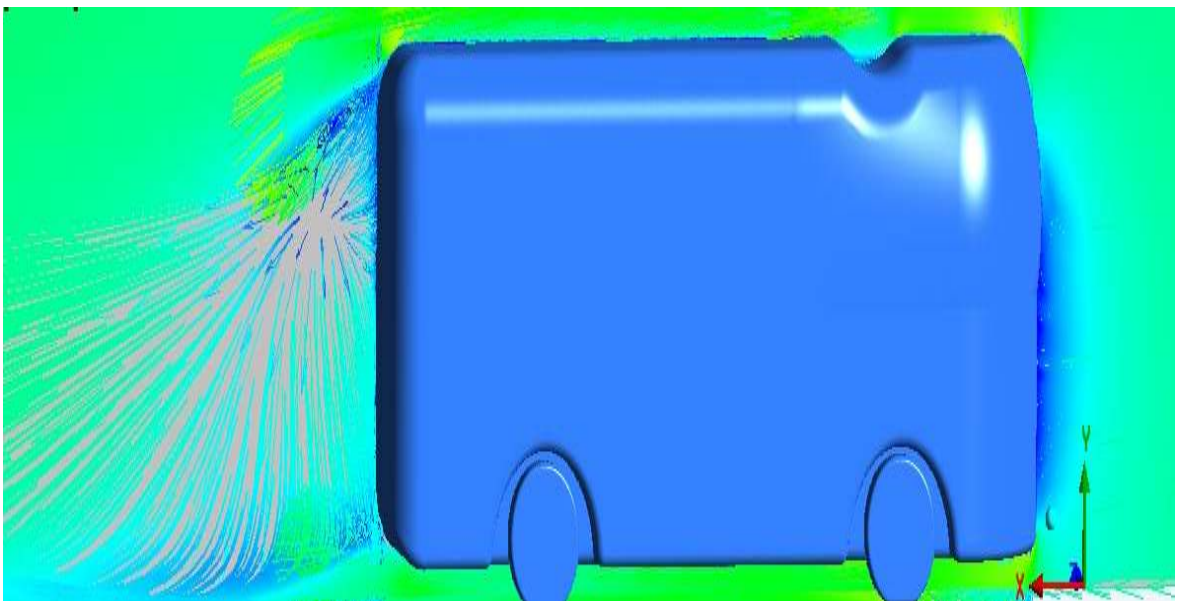
3.1.1.5 T4 Modelinin Çözümü

Diğer modellerle yine eşit ölçülerde tasarlanan T4 modeli 617366 nodes ve 3279175 eleman sayısı ile oluşturulan ağ yapısı ile diğer modellerle aynı sınır şartları kullanılarak analiz edilmiştir.

T4 modelinin basınç Şekil 3.15’de basınç gradyanı incelendiğinde en yüksek basıncın ön kısma ve tekerleklerle etki ettiği görülmektedir. Araç yüzeyine etki eden en yüksek basın değeri 483.7 Pa olduğu hesaplanmıştır. Yapılan analizler neticesinde aracın 27.7 m/s hız değerinde simetri modeli için aerodinamik direnç kuvveti 410.33 N tüm model için sürüklenme kuvveti 820.66 N ve sürüklenme katsayısı ise 0.356 olarak hesaplanmıştır. Aracın akım çizgileri ve girdap oluşumun görüntüsü Şekil 3.16’da görülmektedir

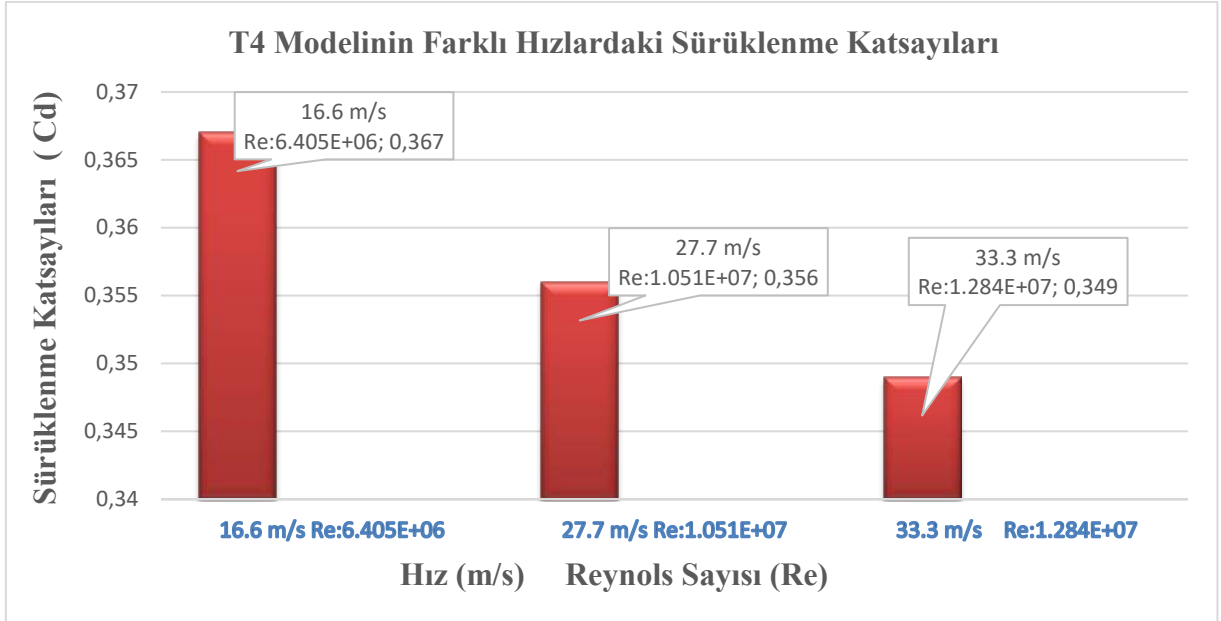


Şekil 3.15. T4 modelin 27.7 m/s hızında basınç gradyanı

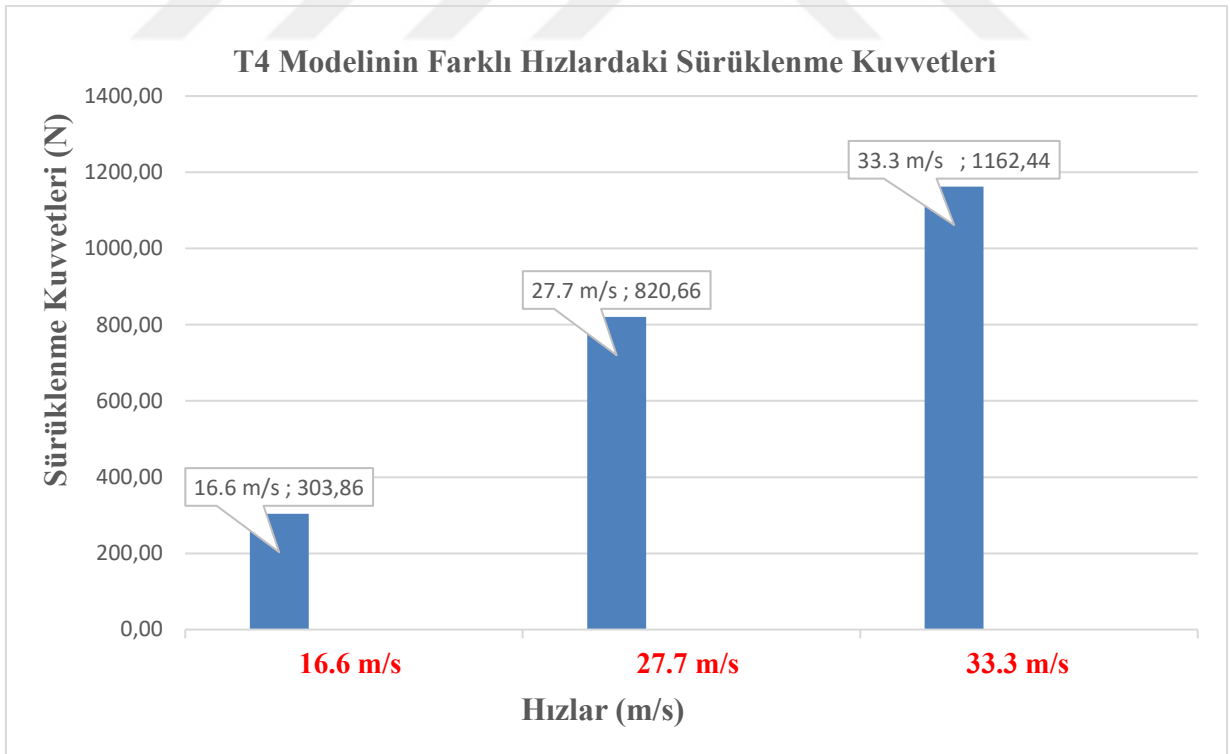


Şekil 3.16. T4 modelinin 27.7 m/s hızında türbülans oluşumu

T4 modelinin farklı hızlarda sürüklenme katsayısı değerleri Şekil 3.17 sürüklenme kuvveti değerleri şekil 3.18 ve araç yüzeyine etki eden maksimum basınç değerlerinin farklı hızlardaki değişimi tablo 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.17. T4 minibüs modelinin farklı hızlardaki sürüklenme katsayıları değerleri



Şekil 3.18. T4 minibüs modelinin farklı hızlardaki sürüklenme kuvvetleri değerler

Tablo 3.6. T4 modelinin araç yüzeyine etki eden basınç değerleri

Model	Hızlar (m/s)	Araç yüzeyine etki eden maksimum basınç (Pa)
T4	16.6	174.2
	27.7	483.7
	33.3	699.8

3.1.2 Minibüs Modellerinin Analiz Sonuçları

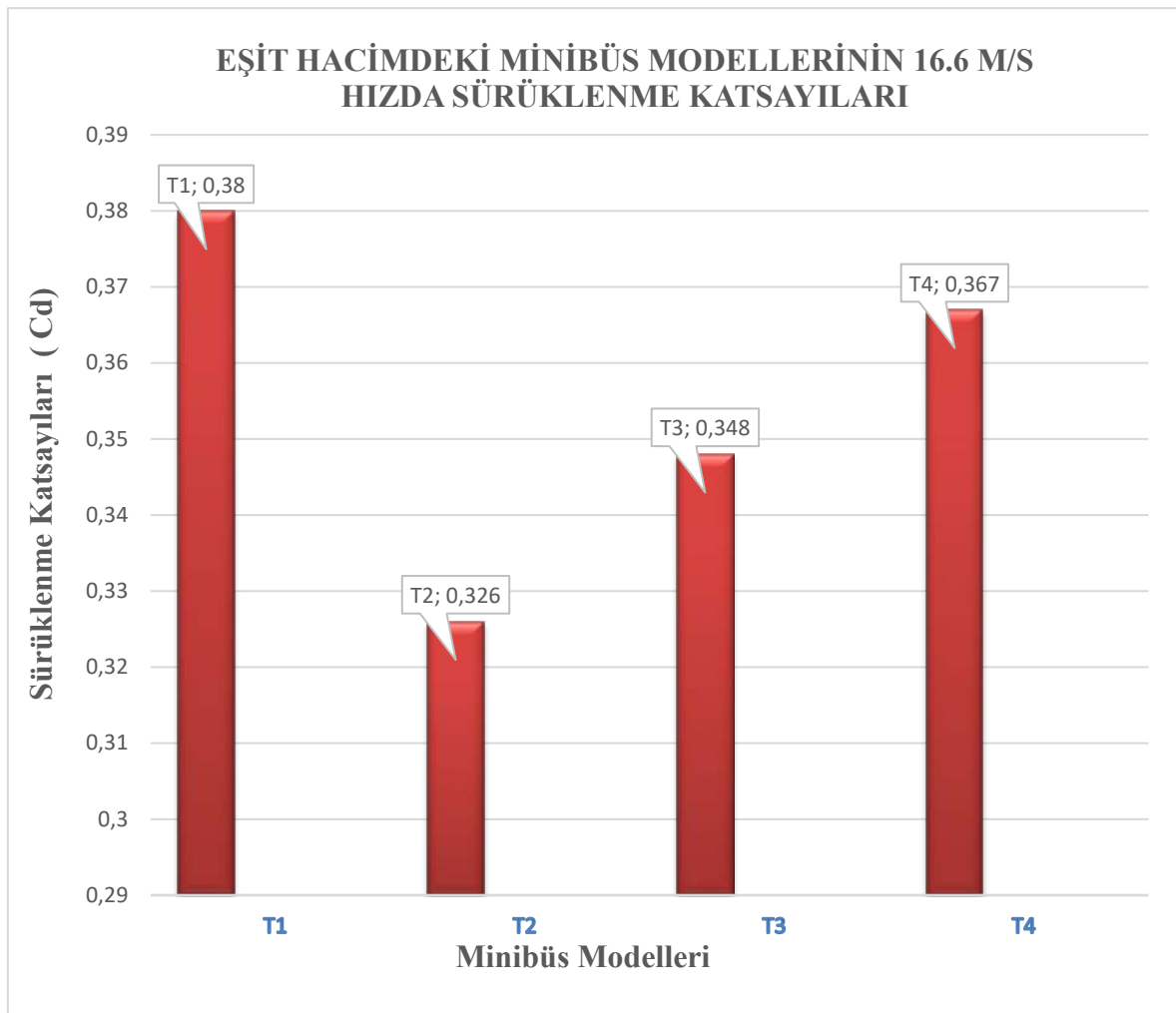
Balıklardan ilham alınarak tasarlanmış T1, T2, T3 ve T4 minibüs modellerinin analiz sonuçları, aerodinamik sürüklenme katsayıları, ve sürüklenme kuvvetleri hesaplanmıştır. Farklı hız değişimleri ile birlikte bu değerlerin nasıl değiştiği incelenmiştir. Çalışmada 16.6, 27.7 ve 33.3 m/s hız değerleri ile analizler yapılmıştır. Bu analizler incelendiğinde 16.6 m/s hızda sürüklenme katsayısı incelendiğinde 0.380 ile en yüksek olan model T1 modeli iken en düşük olan model 0.326 sürüklenme katsayısı ile T2 modelinin olduğu Şekil 3.19' da görülmektedir yine Şekil 3.20'de 16.6 m/s hızda sürüklenme kuvvetleri gösterilmiştir. 27.7 m/s hızda sürüklenme katsayıları Şekil 3.21 sürüklenme kuvvetleri Şekil 3.22'de gösterilmiştir. Yine 33.3 m/s hızdaki sürüklenme katsayıları ve sürüklenme kuvvetleri sırasıyla Şekil 3.23 ve Şekil 3.24'de gösterilmiştir.

Bu analizler sonucunda hızın ve reynolds sayısının arttıkça sürüklenme katsayılarının azaldığı, ancak sürüklenme kuvvetlerinin arttığı saptanmıştır. Bu durum, hızın sürüklenme kuvvetleri üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Yapılan ölçümlerde, 16.66 m/s (60 km/h) hızında en yüksek sürüklenme katsayısı T1 modelinde 0.380 olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, 33.33 m/s (120 km/h) hızında sürüklenme katsayısı yine aynı model için 0.362 olarak kaydedilmiştir. Bu veriler, hız ve reynolds sayısının arttıkça aracın sürüklenme katsayısının düştüğünü göstermektedir.

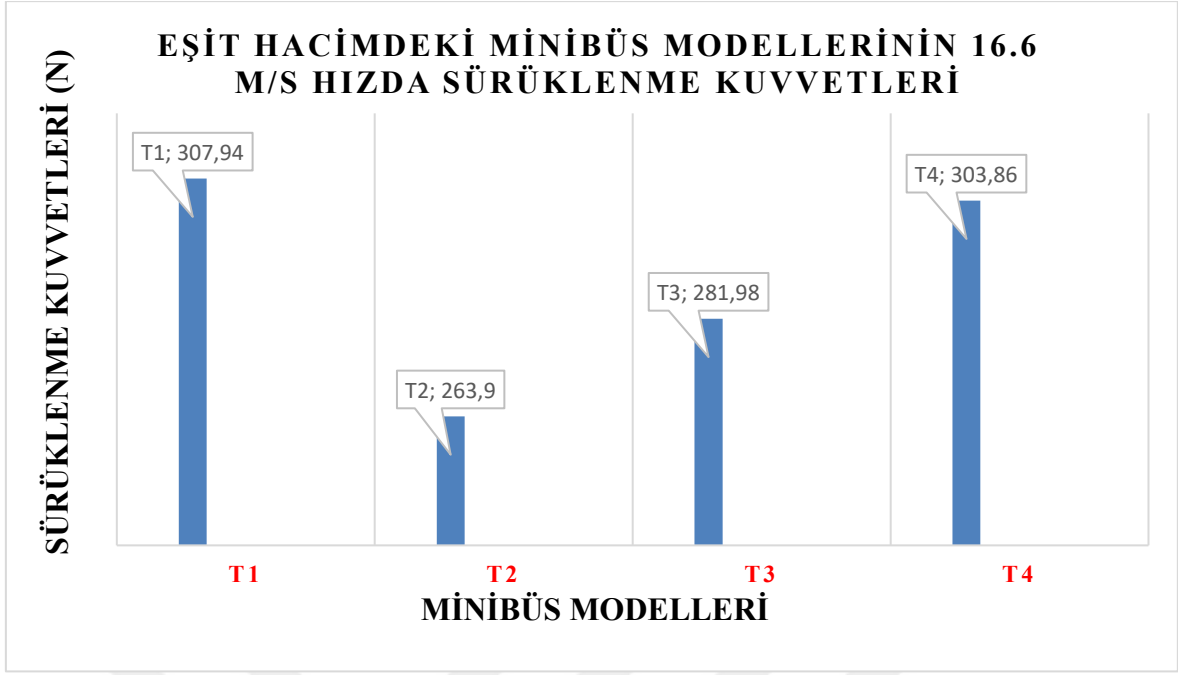
Ancak sürüklenme kuvvetleri incelendiğinde, hızın artışıyla bu kuvvetlerin arttığı gözlemlenmiştir. T2 modeli için bakıldığında en yüksek sürüklenme kuvveti 33.33 m/s

hızında 1005.84 N olarak ölçülürken, (Şekil 3.24) aynı model için en düşük sürüklenme kuvveti 16.66 m/s hızında 263.9 N olarak belirlenmiştir (Şekil 3.20). Bu sonuçlar, hız arttıkça aracın karşılaştığı hava direncinin, dolayısıyla sürüklenme kuvvetinin de arttığını ortaya koymaktadır.

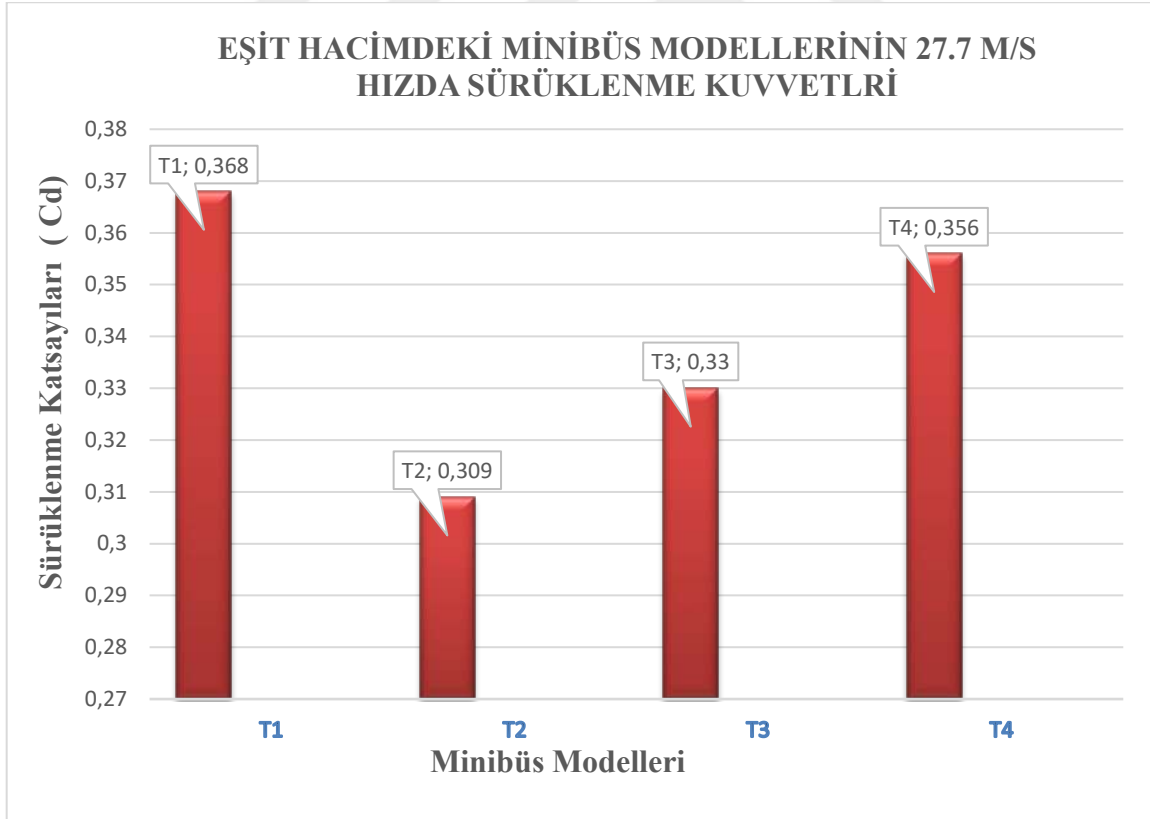
Bu bulgular, farklı hızlarda aracın aerodinamik performansını ve enerji verimliliğini optimize etmek için önemli veriler sağlamaktadır. Hızın artışıyla birlikte sürüklenme katsayısının azalması, ancak sürüklenme kuvvetlerinin artması, tasarım ve mühendislik süreçlerinde göz önünde bulundurulması gereken kritik bir faktördür.



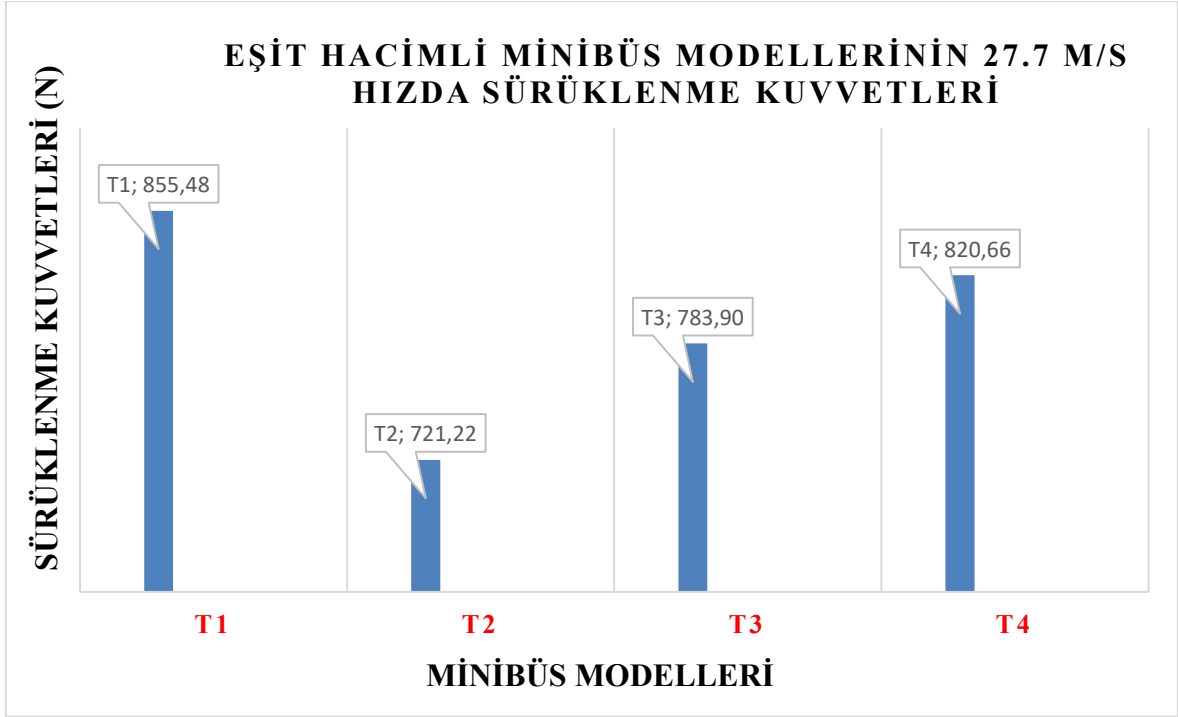
Şekil 3.19. 16.6 m/s, hızda minibüs modellerin sürüklenme katsayıları



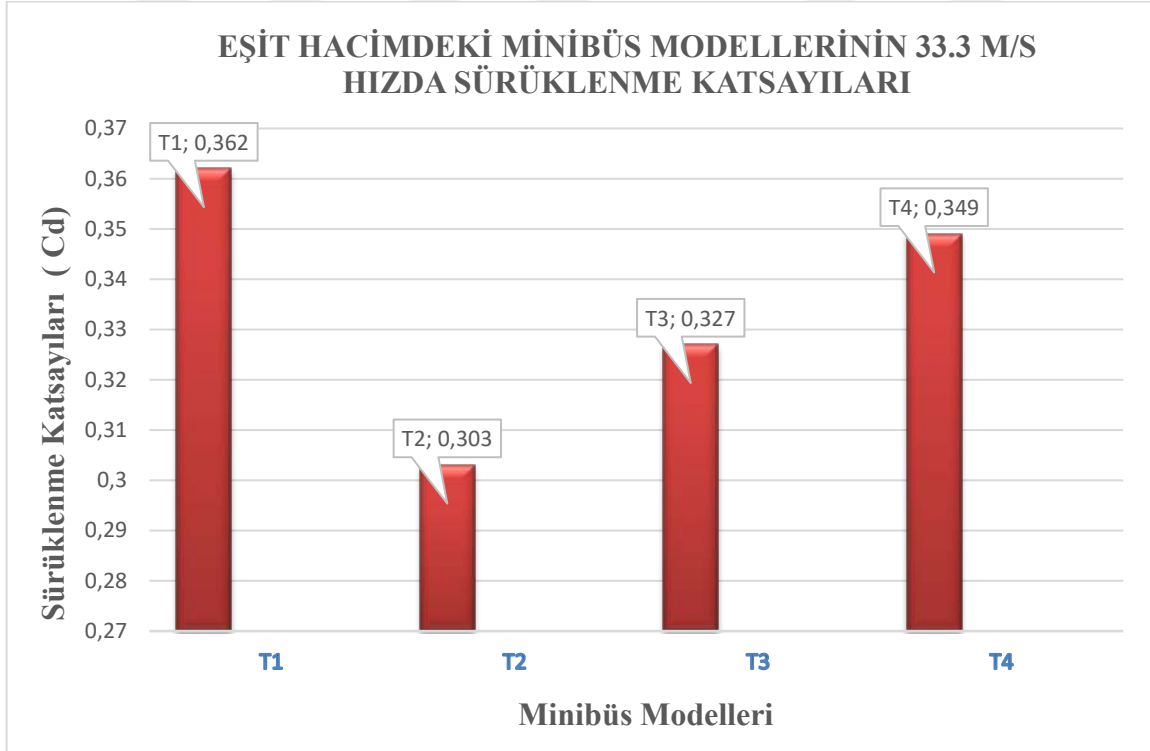
Şekil 3.20. 16.6 m/s hızda minibüs modellerin sürüklenme kuvvetleri



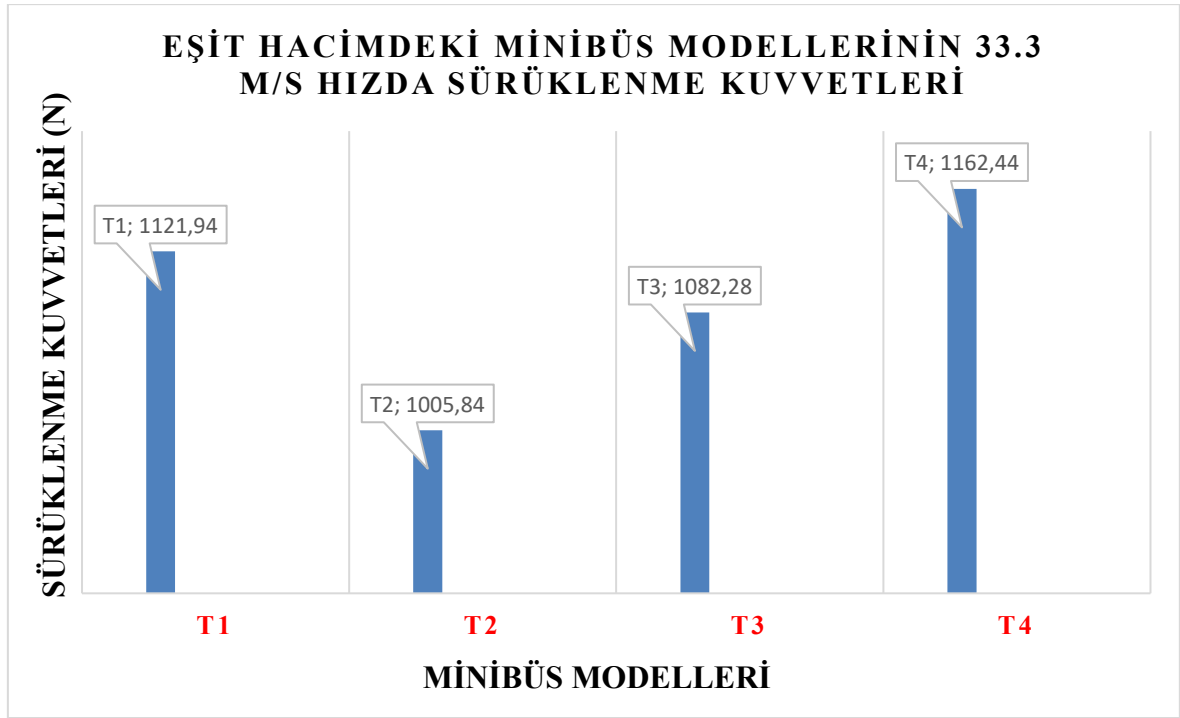
Şekil 3.21. 27.7 m/s hızda minibüs modellerin sürüklenme katsayıları



Şekil 3.22. 27.7 m/s hızda minibüs modellerin sürüklenme kuvvetleri



Şekil 3.23. 33.3 m/s hızda minibüs modellerin sürüklenme katsayıları



Şekil 3.24. 33.3 m/s hızda minibüs modellerin sürüklenme katsayıları

4.RÜZGAR TÜNELİ DENEY BULGULARI VE TARTIŞMA

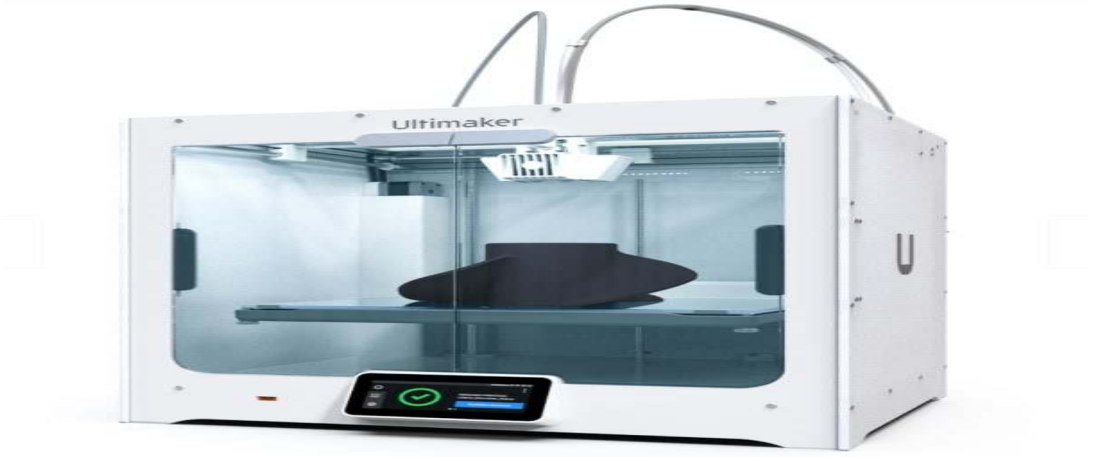
Yapılan analiz sonuçlarına göre sürüklenme katsayısı değerini en iyi olan T2 modelinin küçültülmüş modeli geometrik ve kinematik benzerlikle birlikte eşit Reynolds ve Mach sayılar dikkate alınarak dinamik benzerlik yöntemi dikkate alınarak üretilmiştir . Dinamik benzerlik denkleminde $V_m \times L_m = V_p \times L_p$ şartının sağlanması gerekir. Burada 1:1 ölçekli modelimizde L_m ölçüsü 6961 mm iken 1:28 ölçekli modelimizde L_p uzunluğu 248.61 mm olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 T2 modelinin 1:28 ölçekli modeli

Analizlerde $V_p=27.7$ m/s değeri için , V_m hızının 1 olduğu bulunmuştur. Bu durumda, akışa dik olan yüzey alanları farklı ölçeklerde değerlendirilmiştir. 1:1 T2 modelinde yüzey alanı 4.8 m^2 iken, 1:28 ölçeğindeki T2 modelinde bu alan 0.006 m^2 'ye düşmektedir. Sınır koşulları, yola hareketli bir yol ve kontrol hacmi duvarlarında kayma şartı olacak şekilde tanımlanmıştır. Bu sayede, modelin aerodinamik özelliklerinin doğru bir şekilde analiz edilmesi sağlanmıştır.

1:28 ölçekli T2 modelinin üretimi ULTIMAKER S5 model 3D yazıcı (Şekil 4.2) kullanılarak PLA hammaddesi kullanılarak üretilmiştir. PLA, "Polylactic Acid" (Polilaktik Asit) anlamına gelir ve biyolojik olarak parçalanabilen bir plastik türüdür. PLA, özellikle 3D yazıcılar için hammadde malzemesi olarak kullanılır [48]. Modelin üretimi yapıldıktan sonra (Şekil 4.3) rüzgar tüneli deneyleri için yüzey zımparalama ve boyama işlemleri gerçekleştirilmiş ve model yüzeyi uygun hale getirilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.2. ULTIMAKER S5 3D yazıcı

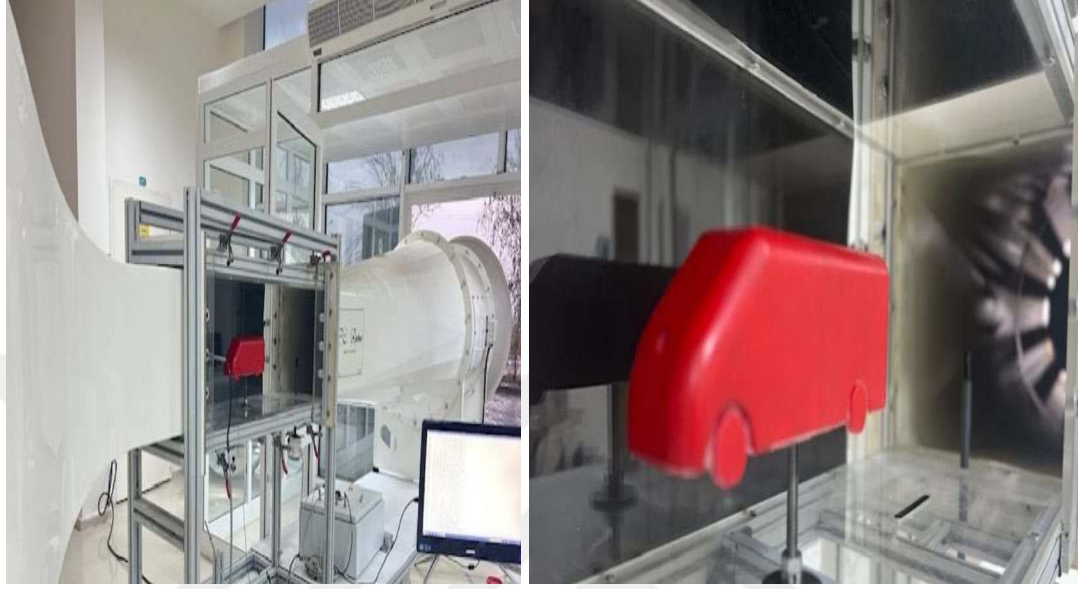


Şekil 4.3. T2 modelinin 1:28 ölçekli modelinin üretimi



Şekil 4.4. T2 modelinin 1:28 ölçekli modelinin deney için uygun hale getirilmesi

Manisa Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde rüzgar tüneli içinde, zemine temas etmeyecek şekilde yapılan bu deneyler, Şekil 4.5 'de gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.5. T2 modelinin 1:28 ölçekli modelinin rüzgar tüneli deneyleri

4.1.T2 modelinin 1:1 Ölçekli ve 1:28 Ölçekli Modellerinin Analiz Sonuçları

Reynolds sayıları eşit olan ve dinamik benzerliği olan T2 modelinin 1:1 ölçekli ve 1:28 ölçekli modellerinin sürüklenme katsayıları eşit olduğu yapılan analizlerle ispatı gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. T2 modelinin 1 m/s ve 27.7 m/s deki analiz sonuçları (1:28 ve 1:1 ölçekli)

Modeller	Re	Hızlar (m/s)	Cd (Sürüklenme katsayısı)	Tüm otobüsün F kuvveti (N)
T2 1:1	3.85E+05	1	0.346	1.028
T2 1:28	3.85E+05	27.7	0.356	1.004

4.2.T2 Modelinin Deney Bulguları

T2 modelinin 1:28 ölçekli modelinde 27.7 m/s hızında yapılan rüzgar tüneli deneylerinde sürüklenme katsayıları ve sürüklenme kuvvetlerini tayin etmek için 3 farklı deney yapılmış olup, elde edilen değerler Tablo 4.2' de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. T2 modelinin deneysel ve analiz sonuçları (1:28 ölçekli)

V (m/s)	Deney No	F(N) Deneysel	F(N) Analiz	Cd Deneysel	Cd Analiz
27.7	1.deneyin ortalaması	1.12	1.004	0.396	0.356
27.7	2.deneyin ortalaması	1.14	1.004	0.405	0.356
27.7	3.deneyin ortalaması	1.12	1.004	0.396	0.356
27.7	Yapılan 3 deneyin ortalaması	1.12	1.004	0.399	0.356

Yapılan deney ve analizlerde eşit reynold sayısı ve dinamik benzerliği yapılmış T2 1:1 ölçekli ölçekli ve 1:28 ölçekli modellerinin analiz ve rüzgar tüneli deney sonuçları incelendiğinde yakın sonuçlar elde edilmiştir . Sürüklenme katsayıları incelendiğinde aradaki fark % 11.4 olarak hesaplanmıştır. Deney ortamında analiz ortamıyla aynı koşullar sağlanamadığından aradaki fark anlamlıdır .

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1 Sonuç ve Öneriler

Araçlarda enerji kullanımı, günümüz teknolojinin gelişimi ve sürdürülebilirlik hedeflerinin hayata geçirilmesi açısından hayati bir öneme sahiptir. Aerodinamik araçlar, enerji kullanımı açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Araç tasarımında aerodinamik prensiplerin kullanılması, hava direncini azaltarak yakıt verimliliğini artırır. Düzgün hatlar, düşük sürüklenme katsayısı ve optimize edilmiş gövde yapısı, araçların daha az enerji ile daha uzun mesafeler kat etmesini sağlar. Bu sayede, hem fosil yakıt tüketimi azalır hem de elektrikli araçların batarya ömrü uzar, menzilleri artar. Aerodinamik iyileştirmeler, ayrıca yüksek hızlarda daha stabil ve sessiz bir sürüş deneyimi sunar. Enerji verimliliğini maksimize eden bu tasarım yaklaşımları, sürdürülebilir ulaşım hedeflerine katkıda bulunarak çevresel etkileri minimize eder ve ekonomik tasarruf sağlar. Bu nedenle, aerodinamik tasarım, modern araçların geliştirilmesinde ve enerji kullanımında kilit bir rol oynamaktadır.

Bu çalışmada enerjide tasarruf etmek amacı ile balıklardan esinlenilerek tasarlanmış modeller incelenmiş ve araçların dış formundaki değişim ile sürüklenme katsayısı arasındaki ilişki CFD analiz yöntemi ile gözlemlenmiştir. Aracın sürüklenme katsayısı azaldığında özellikle uzun yol şartlarında azımsanmayacak derecede yakıt tasarrufu sağlamaktadır.

Çalışmada Mercedes Sprinter 314 uzun şasi modelinin ölçüleri referans alınarak 3 farklı balık türünden 3 farklı minibüs modeli SOLIDWORKS programında eşit hacimlerde ve eşit iz düşüm alanları aynı olarak tasarlanmış ve ANSYS FLUENT programı ile farklı hızlarda sürüklenme katsayısı (Cd) ve sürüklenme kuvvetleri hesaplanmıştır. Minibüs modellerinin sadece dış formu farklı olup aynı işlemlerle analiz yapılmıştır.

Yapılan analizler sonucunda Mercedes Sprinter 314 uzun şasi modelinin benzeri olarak çizilen T1 modelinin sürüklenme katsayısı 16 m/s için 0.373, 27.7 m/s için 0.372, 33.3 m/s için 0.368 olarak hesaplanmıştır. Aerodinamik açıdan en verimli minibüs modeli ise 16.6 m/s hızda 0.321, 27.7 m/s hızda 0.316, 33.3 m/s hızda 0.308 sürüklenme katsayısına sahip olan minibüs modelinin T2 modeli olduğu görülmüştür. Sonuçlar bize eşit ön iz düşüm alanı ve eşit hacimde olmasına rağmen araç dış formunun sürüklenme katsayısı üzerinde etkili olduğunu göstermiştir.

Deneyler ve analizlerde, dinamik benzerlik sağlanarak eşit Reynolds sayısında T2'nin 1:1 ve 1:28 ölçekli modelleri incelenmiştir. Analizler ve rüzgar tüneli deney sonuçları

arasında benzerlik gözlemlenmiştir. Sürüklenme katsayılarının karşılaştırılmasında, aradaki farkın %11.4 olduğu hesaplanmıştır.

Otomobil üreticileri, hem performans hem de görsel açıdan aerodinamik prensiplere önem verir. Estetik açıdan da aerodinamik tasarımlar, modern görünüm sunar. Minibüs daha çok toplu ulaşım ve taşıma amaçlı kullanıldığından yakıt tüketiminin çok daha önemli olduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak, aerodinamik tasarım, araçların genel performansını, enerji verimliliğini ve çevresel sürdürülebilirliğini artırarak otomotiv endüstrisinde kritik bir faktör haline gelmiştir. Mercedes Sprinter 314 uzun şasi modeliyle benzer dış formda üretilen T1 modeli ile balıklardan esinlenilerek üretilen T2 arasında sürüklenme katsayısı açısından 27.7 m/s (100 km/sa) hızında yaklaşık yüzde 17.43'lük bir farkın uzun yol şartlarında araca etkileyen toplam direncin büyük bir kısmı aerodinamik direnç olduğu göz önüne alındığında ciddi bir yakıt tasarrufu sağlayacağı düşünülmektedir.

Sürüklenme katsayısı dikkate alındığında Mercedes Sprinter modelinin benzeri olarak tasarlanmış ve sürüklenme katsayısında yeni tasarlanan modelde % 17.43 düşüş görülmüştür. Bu düşüşün yakıt tasarrufuna katkısı düz yolda yaklaşık olarak % 8 oranında hesaplanmıştır [49]. Aracın 100 km/sa' de ortalama 9 litre yakıt tükettiği araç kataloğundan alınmıştır dolayısıyla yeni tasarımda bu değer 100 km/sa'de yaklaşık 8.28 litre olacaktır. Yıllık ortalama 45000 km kullanılan bir araç için yıllık yakıt tasarrufu 324 litre olarak hesaplanmıştır. Çevresel etkiler incelendiğinde T2 modelinin, Mercedes Sprinter benzeri olan T1 modeline göre yıllık karbon emisyonu oranı 748.44 CO₂e/kg daha az olduğu hesaplanmıştır.

Bu çalışmaya ek olarak farklı türdeki balıklardan veya aerodinamik açıdan üstün özellikleri bulunan diğer canlılardan ilham alınarak minibüs haricinde uçak , kamyon , binek araçlar içinde benzer çalışmalar yapılabilir. Canlılardan ilham alınarak tasarlanan araçların günümüzde kullanılan araçlardan aerodinamik açıdan daha verimli ve estetik açıdan da daha ilgi çekici araçların üretilmesini destekleyecektir.

Bu çalışmada elde edilen önemli sonuç canlılarının aerodinamik özelliklerinden esinlenerek minibüs tasarımlarını daha iyi hale getirilebileceği, minibüslerin sürüklenme katsayılarını ve sürüklenme kuvvetlerini yeni tasarımlarla düşürülebileceği, daha az yakıt tüketmelerini dolayısıyla çevreye daha az zararlı, karbon emisyonları düşürülmüş ve sürdürülebilir yeni minibüsler tasarlayarak bu sayede, ulaşım endüstrisinde çevre dostu

uygulamaların teşvik edilmesi ve iklim değışikliğinin olumsuz etkilerinin azaltılması sağlanabilecektir.



KAYNAKLAR

1. Ekosistem Mühendisleri Termitler. (2016). *Mimaride, mühendislikte bir tasarım stratejisi olan biyomimikri*. 01 Ocak 2024 tarihinde erişildi. Termodinamik Dergisi. Alındığı adres: <http://www.termodinamik.info/dosya/ekosistemmuhendisleri-termitler>
2. Hargroves, K., & Smith, M. (2006). Innovation inspired by nature: Biomimicry. *ECOS*, 129, 27-29. <https://doi.org/10.1071/EC129p27>
3. AskNature. (n.d.).(2024,10 Mayıs). *High-speed train inspired by the kingfisher*. Alındığı adres: <https://asknature.org/innovation/high-speed-train-inspired-by-the-kingfisher/>
4. Meadows, R. (1999). Designs from life. *Zooger*, 28(4).
5. Airbus. (n.d.). *Airbus*. Alındığı adres: <https://www.airbus.com>
6. Türkçü, Ç. (2009). *Çağdaş taşıyıcı sistemler*. Birsen Yayın Evi.
7. Vincent, J. F. V., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A., & Pahl, A. (2006). Biomimetics: Its practice and theory. *Journal of the Royal Society Interface*, 3, 471-482.
8. (2024, 10 Mayıs). *Biyomimetik biliminden 24 örnek: Teknoloji ve doğa*. Alındığı adres: http://www.bilgininanahtari.net/teknolojinin-dogadan-ilham-alarak-ilerledigi-biyomimetik-biliminden-24-ornek/17-teknoloji-ve-doga/#google_vignette
9. Vincent, J. F. V. (2009). Biomimetic patterns in architectural design. *Architectural Design*, 79, 75-81.
10. Wings, H. (2012, 10 Mayıs). *Clement Ader and the Éole*. Alındığı adres: <http://fly.historicwings.com/2012/10/clement-ader-and-the-eole/>
11. Hypermach. (2024, 10 Mayıs). *The science*. Alındığı adres: <http://hypermach.com/the-science>
12. Yahya, H. (2006). *Biomimetics: Technology imitates nature*. Global Publishing.
13. Albayraklar Şirketler Grubu. (2024, 5 Ekim). *Wattozz silahlı insansız deniz aracı*. Alındığı adres: <http://www.albayraklar.com>
14. Polatöz, S. (2003). *Tabiatta mühendislik* (Kaynak Yayınları Yayın No: 81, ISBN 975-7388-94-7). Kaynak Yayınları.
15. The Scientist. (2024, 10 Mayıs). *Mercedes and the boxfish*. Alındığı adres: <http://www.the-scientist.com/?articles.view/articleNo/24272/title/Mercedes-and-the-boxfish/>
16. Holt, D. (Ed.). (2005). *The Chevrolet Corvette*. SAE International. s. 15.
17. Cars Motorbikes. (2024, 5 Ekim). *Chevrolet Corvette Mako Shark I*. Alındığı adres: <https://carsmotorbikes.com/2018/01/02/chevrolet-corvette-mako-shark-1/>
18. Wikipedia. (2024, 10 Mayıs). *Aerodinamik*. Alındığı adres: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Aerodinamik>
19. Hansen, J. R. (2003). *The wind and beyond: Journey into the history of aerodynamics in America* (Vol. 1, The ascent of the airplane). NASA History Office.
20. Heisler, H. (2002). *Advanced vehicle technology* (2nd ed.). Reed Educational and Professional Publishing Ltd.

21. Hucho, W.H., Aerodynamics of Road Vehicles. Fourth Edition, SAE Inc., Harbound, 1998.
22. Kaymak, M. E. (2009). 20. yüzyılda alternatif enerji kaynaklarının gelişimi ve buna paralel olarak otomobil tasarımına etkileri (Master's thesis, Anadolu University (Turkey)).
23. Revs Institute. (2024, 5 Ekim). 1934 Chrysler Airflow CV-8. Alındığı adres: <https://museum.revsinstitute.org/the-collection/1934-chrysler-airflow-cv-8/>
24. Demircioğlu, T. K. (2007). *Bir araç modelinin aerodinamik analizi ve sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonu* (Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
25. Mercedes-Benz. (1978). *C 111, III Diesel record setting car*.
26. Julian, H.-S. (2002). *An introduction to modern vehicle design*. Butterworth Heinemann.
27. Çağan, M. (2000). *Taşıt aerodinamik özelliklerinin sayısal yöntemlerle incelenmesi* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilimdalı).
28. Demircioğlu, T. K. (2007). *Bir araç modelinin aerodinamik analizi ve sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonu* (Tez No. 177988) [Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniversitesi].
29. Ahmed, S. R., Ramm, G., & Faltin, G. (1984). Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. *SAE Transactions*, 473-503.
30. Bayraktar, İ. (2002). *Ağır kara araçlarının dış aerodinamiği: Hesaplamalar ve rüzgar tüneli testi* (Doktora tezi, Old Dominion University, Havacılık ve Uzay Mühendisliği).
31. Koike, M., Nagayoshi, T., & Hamamoto, N. (2004). Research on aerodynamic drag reduction by vortex generators. *Mitsubishi Motors Technical Review*, 16.
32. Henning, L., & King, R. (2005). Drag reduction by closed-loop of a separated flow over a bluff body with a blunt trailing edge. In *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control* (p. 15 December 2005). Seville.
33. Kavadar, G. (2006). *Design and prototyping of a mechatronic system as a drag reduction device for buses* (Yüksek lisans tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir).
34. Helgason, E., & Hafsteinsson, H. E. (2009). *Automatic shape optimization of aerodynamic properties of cars* (Master's thesis, Chalmers University of Technology, Department of Applied Mechanics, Göteborg).
35. Pujals, G., Depardon, S., & Cossu, C. (2010). Drag reduction of a 3D bluff body using coherent streamwise streaks. *Experiments in Fluids*, 49, 1085-1094.
36. Uçar, M. F. (2018). *Yeni bir arka spoiler tasarımı, araç dinamiğine etkisi ve araç üzerine uygulanması* (Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük).
37. Yarin, T. G. (2019). *Farklı taşıt modellerinin aerodinamik yapısının nümerik olarak incelenmesi* (Yüksek lisans tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa).
38. Physics Forums. (2024, 10 Mayıs). *Laminer ve türbülanslı akışlarda sınır katmanı ayrılma*. Alındığı adres: <https://www.physicsforums.com/threads/boundary-layer-separation-in-laminar-and-turbulent-flows.886658/>
39. Engin, T. (Ed.). (2018). *Akışkanlar mekaniği temelleri ve uygulamaları* (3. baskı). Palme Yayınevi.
40. Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Fluid mechanics*. McGraw Hill.

41. Milliken, W. F., & Milliken, D. L. (1995). *Race car vehicle dynamics* (pp. 83-110, 489-570). Society of Automotive Engineers International.
42. ANSYS Inc. (n.d.). *ANSYS Fluent 14.5, User's Guide*. Alındığı adres: <https://www.fluent.com>
43. Mercedes-Benz. (2024, 10 Mayıs). *Sprinter minibüs*. Alındığı adres: <https://www.mercedes-benz.com.tr/vans/tr/sprinter/minibus>
44. Wikipedia. (2024, 10 Mayıs). *Humphead wrasse*. Alındığı adres: https://en.wikipedia.org/wiki/Humphead_wrasse
45. Wikipedia. (2024, 10 Mayıs). *Green humphead parrotfish*. Alındığı adres: https://en.wikipedia.org/wiki/Green_humphead_parrotfish
46. Wikipedia. (2024, 10 Mayıs). *Flowerhorn cichlid*. Alındığı adres: https://en.wikipedia.org/wiki/Flowerhorn_cichlid
47. Arabacı, S. (2016). *Canlılardan esinlenerek kara taşıtlarının aerodinamik tasarımlarının iyileştirilmesi* (Tez No. 430963) (Doktora tezi, Celal Bayar Üniversitesi).
48. Wikipedia. (2024, 20 Kasım). *Polilaktik asit*. Alındığı adres: https://tr.wikipedia.org/wiki/Polilaktik_asit
49. Arslan, M. Ö. (2005). *Ticari taşıt aerodinamiğinin temelleri ve sayısal yöntemlerle incelenmesi* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul).