



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ MİNİ BİR OTOMOBİLİN
AERODİNAMİK PERFORMANSININ
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Nurcan ZENGİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Kasım-2023
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Nurcan ZENGİN

Tarih: 16.11.2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİKLİ MİNİ BİR OTOMOBİLİN AERODİNAMİK PERFORMANSININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Nurcan ZENGİN

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Şehmus ALTUN

2023, 62 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Şehmus ALTUN

Prof. Dr. Hamit ADİN

Dr. Öğr. Üyesi Mutlu OKÇU

Günümüzde petrol türevi yakıtların çoğunlukla kullanıldığı motorlu taşıtların neden olduğu çevre ve hava kirliliğinin azaltılması kapsamında elektrikli taşıtlara olan ilgi artmıştır. Bununla beraber, içten yanmalı motor kullanılan taşıtlarda olduğu gibi elektrikli taşıtlarda da aerodinamik performans tasarım ve güvenlik açısından olduğu gibi taşıt menziline de etkileyen önemli bir faktör olmaktadır. Dolayısıyla bu araçlarda da aerodinamik performansın incelenmesi ve optimizasyonu taşıt menziline artırılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, kullanımda olan bir elektrikli taşıtın aerodinamik performansı sayısal olarak incelenmiş ve performansın artırılması için yan aynalar ile tekerleklerin optimizasyonu araştırılmıştır. Rüzgâr tünellerinde yapılan deneysel ölçümler yerine, hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile bilgisayar programları kullanarak aerodinamik performansın incelenmesi, zaman ve maliyet açısından avantaj sağlar. Çalışmada taşıtın orijinal boyutları referans alınarak basitleştirilmiş bir taşıt geometrisi 1:1 ölçekte tek boyutta SolidWorks programında oluşturulmuştur. Model ANSYS Fluent yazılımı standart duvar fonksiyonu ve k-epsilon (2 eqn) türbülans modeli şartlarında analiz edilerek sürüklenme (C_D) ve kaldırma katsayılarındaki (C_L) değişim gözlemlenmiştir. Ayrıca, taşıt yüzeyi ve çevresindeki hız ve basınç dağılımları, akım çizgileri ile vektörler incelenmiştir. Yapılan analizlerde, orijinal modele göre C_D değerindeki düşüşler, tekerleklerin optimize edilmesi ile %5,2'lik bir azalma ve yan aynaların optimize edilmesi ile %8,9'luk bir azalma sağladığı tespit edilmiştir. Bu iyileştirmeler, yakıt tasarrufu ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için etkili yöntemlerdir. Sonuç olarak, her iki yaklaşımın da aerodinamik performansı iyileştirmede potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Aerodinamik performans, ANSYS-Fluent, Elektrikli Taşıtlar, Sürüklenme katsayısı

ABSTRACT

MS THESIS

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE AERODYNAMIC PERFORMANCE OF A ELECTRIFIED MINI CAR

Nurcan ZENGİN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY**

**THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Şehmus ALTUN

2023, 62 Pages

Jury

Prof. Dr. Şehmus ALTUN

Prof. Dr. Hamit ADİN

Dr.Öğr.Üyesi Mutlu OKÇU

Today, interest in electric vehicles has increased within the scope of reducing environmental and air pollution caused by motor vehicles, in which petroleum-derived fuels are mostly used. However, as in vehicles using internal combustion engines, aerodynamic performance in electric vehicles is an important factor affecting the vehicle range as well as design and safety. Therefore, examining and optimizing the aerodynamic performance of these vehicles is of great importance in terms of increasing the vehicle range. In this study, the aerodynamic performance of an electric vehicle in use was examined numerically and the optimization of side mirrors and wheels was investigated to increase performance. Instead of experimental measurements made in wind tunnels, examining aerodynamic performance using computational fluid dynamics and computer programs provides advantages in terms of time and cost. In the study, a single-dimensional simplified vehicle geometry was formed in the SolidWorks environment at a 1:1 scale, taking the original dimensions of the vehicle as a reference. The model was analyzed in ANSYS Fluent software under standard wall function and k-epsilon (2 eqn) turbulence model conditions and the changes in drag (C_D) and lift coefficients (C_L) were observed. Additionally, velocity and pressure distributions, streamlines and vectors on the vehicle surface and its surroundings were examined. In the analysis, it was determined that the reduction in C_D value compared to the original model was achieved by optimizing the wheels, a 5,2% reduction, and by optimizing the side mirrors, a 8,9% reduction. These improvements are effective ways to achieve fuel economy and sustainability goals. The result shows that both approaches have potential in improving aerodynamic performance.

Keywords: Aerodynamic performance, ANSYS-Fluent, Electric Vehicles, Drag coefficient.

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın başlangıcından itibaren tez konusunun belirlenmesine yönelik çalışmalarımı başarıyla tamamlamama, tez sürecinin her aşamasında yol gösteren ve yardımlarını eksik etmeyen değerli hocam Prof. Dr. Şehmus ALTUN'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bu zorlu yolculukta her zaman yanımda olan, sabırla beni destekleyen sevgili aileme de minnettarlığımı ifade etmek isterim. Sizin sevgi dolu teşvikleriniz ve sürekli desteğiniz olmadan bu başarıya ulaşmak mümkün olmazdı. Bu değerli katkılarınızı asla unutmayacağım ve sizlere olan minnettarlığımı her daim taşıyacağım.

Nurcan ZENGİN
BATMAN-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER.....	x
ÇİZELGELER	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Elektrikli Araçlar	3
1.2. Aerodinamik	4
1.3. Araçlarda Aerodinamik Performans	4
1.3.1. Aerodinamiğin önemi	5
1.3.2. Otomobillerdeki kayıplar	8
1.4. Aerodinamik Değerlendirmeler: Sayısal ve Deneysel Yaklaşımlar	9
1.4.1. Matematiksel akışkan simülasyonları	9
1.4.1.1. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği.....	9
1.4.2. Aerodinamik analizde deneysel yöntemler	9
1.4.2.1. Benzerlik prensibi ve uygulamaları	10
1.4.2.2. Deneysel yöntem çeşitleri ve kullanımları.....	12
1.4.2.2.1. Kuvvet ve basınç ölçümlerinden elde edilen hesaplamalar	12
1.4.2.2.2. İz tarama metodu (momentum kaybı) ile yapılan hesaplamalar	13
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	16
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	22
3.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Model ve Özellikleri	22
3.2. Tasarımın Geometrisi	23
3.3. ANSYS Fluent İncelemesi	26
3.4. Akış Alanının Belirlenmesi (Enclosure).....	27
3.5. Ağ Yapısı ve Özellikleri (Mesh).....	28
3.6. Sınır Şartları.....	30
3.7. Hızın Aerodinamik Performansa Etkisi ve Yakıt Verimliliği Üzerindeki Rolü ..	31
3.8. Duvar Yaklaşımı	35

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	36
4.1. Ahmed Gövdesi Arka Eğim Açısının Aerodinamik Performansa Etkisi: Yeniden Tasarım ve Analiz.....	36
4.2. Tasarımın Geliştirilmesi ve Analiz Süreçleri	41
4.2.1. Tekerlek kalınlığının optimize edilmesiyle sağlanan aerodinamik iyileştirme	42
4.2.2. Yan aynaların optimize edilmesiyle sağlanan aerodinamik iyileştirme	45
4.3. Sonuçların Analizi	48
4.4. İyileştirme Sonuçlarının Analizi	51
4.4.1. Basınç dağılımları	51
4.4.2. Vektörel hız dağılımları	53
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	55
5.1. Sonuçlar	55
5.2. Öneriler	55
KAYNAKLAR	57
İNTERNET KAYNAKLARI.....	62
EKLER	62
ÖZGEÇMİŞ	63

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Modelin kesit alanı ön bakış alanı, metrekaare (m^2)
D	: Maksimum Yükseklik, metre (m)
C_D	: Sürüklenme katsayısı
C_L	: Kaldırma kuvveti katsayısı
M_y	: Yalpa Momenti, Newton-metre (Nm)
M_x	: Yuvarlanma Momenti, Newton-metre (Nm)
M_z	: Yanlama Momenti, Newton-metre (Nm)
P	: Sürüklenme Gücü, kilowatt (kW)
V	: Hız, metre/saniye (m/s), kilometre/saat (km/h)
ρ	: Hava Yoğunluğu, kilogram/metreküp (kg/m^3)
τ	: Kayma Gerilmesi
μ	: Dinamik Viskozite, kilogram/metrekare saniye (kg/ms)
F_D	: Sürüklenme Kuvveti, Newton (N)
F_L	: Kaldırma Kuvveti, Newton (N)
F_y	: Yanal Kuvvet, Newton (N)
Re	: Reynolds sayısı

ŞEKİLLER

Sayfa No

Şekil 1.1. Araç üzerinde farklı bölgelerin aerodinamik dirence etkisi	4
Şekil 1.2. Rüzgâr basıncının araç üzerindeki dağılımı ve etkileri	5
Şekil 1.3. Seyir halindeki bir taşıtın üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetler	6
Şekil 1.4. Reynolds sayısının aerodinamik direnç katsayısına etkisi	6
Şekil 1.5. Sapma açısının aerodinamik direnç katsayısına etkisi	7
Şekil 1.6. Taşıt etrafındaki hortum şeklindeki girdapların analizi.....	8
Şekil 1.7. Kinematik benzer akışların karşılaştırılması	10
Şekil 1.8. Akışkan davranışlarının incelenmesi: hava tüneli deneyi	14
Şekil 3.1. İncelemeye tabi tutulan otomobil modelinin görseli	23
Şekil 3.2. Basitleştirilmiş SolidWorks çizimi perspektif görünümü: 1/1 ölçekli model otomobil	23
Şekil 3.3. Basitleştirilmiş SolidWorks yan ve arka görünümü: 1/1 ölçekli model otomobil	24
Şekil 3.4. Modelin ANSYS Fluent programına entegrasyonu.....	25
Şekil 3.5. ANSYS Fluent kullanıcı arayüzü ve görünümü	26
Şekil 3.6. Akış alanının modellenmesi ve tanımlanması	27
Şekil 3.7. Mesh oluşturma ve ağ yapısı analizi.....	29
Şekil 3.8. Modeldeki ağ yapısının izometrik görünümü.....	29
Şekil 3.9. Modeldeki ağ yapısının dört taraftan görünümü	30
Şekil 3.10. ANSYS Fluent programında sınır şartlarının tanımlanması.....	31
Şekil 3.11. Farklı Hızlarda sürüklenme katsayısı değişimi (C_D)	33
Şekil 3.12. Hız, C_D , C_L ve drag değerlerinin değişimi.....	35
Şekil 4.1. Ahmed gövdesinin ağ yapısı.....	36
Şekil 4.2. Ahmed gövdesinin C_D ve C_L ’nin arka eğim açısı ile değişimi.....	38
Şekil 4.3. Ahmed gövdesinin arka eğim açısı modelleri	39
Şekil 4.4. Farklı arka eğim açılarında hız konturu.....	40
Şekil 4.5. Farklı arka eğim açılarında hız konturu.....	40
Şekil 4.6. Ahmed gövdesinin arka eğim açısı ve C_D - C_L değişimi.....	41
Şekil 4.7. Basitleştirilmiş orijinal (prototip) model (Model 1)	42
Şekil 4.8. Basitleştirilmiş orijinal (prototip) model (Model 1) için 100 m/sn’de C_D değişimi.....	42
Şekil 4.9. Düşük tekerlek kalınlığına sahip model (190 mm)	43
Şekil 4.10. 190 mm tekerlek kalınlığında 100 m/sn’de C_D değişimi.....	44
Şekil 4.11. 190 mm tekerlek kalınlığında 100 m/sn’de C_L değişimi	44
Şekil 4.12. Yan ayna optimizasyonu uygulaması	45
Şekil 4.13. Yan ayna optimizasyonunda 100 m/sn’de sürüklenme kuvveti	46
Şekil 4.14. Yan ayna optimizasyonunda 100 m/sn’de C_D değişimi	47
Şekil 4.15. Yan ayna optimizasyonunda 100 m/sn’de C_L değişimi.....	47
Şekil 4.16. Basitleştirilmiş orijinal model hız değerleri akış çizgileri.....	48
Şekil 4.17. Basitleştirilmiş orijinal model araç üzerindeki hız büyüklüğü	49
Şekil 4.18. Basitleştirilmiş orijinal model simetri yüzeyinde eş hız büyüklüğü dağılım eğrileri.....	49
Şekil 4.19. Basitleştirilmiş orijinal model araç üzerindeki hız büyüklüğü	50
Şekil 4.20. Basitleştirilmiş orijinal model simetri yüzeyinde eş hız büyüklüğü – araç üzerinde eş basınç büyüklüğü dağılım eğrileri	50
Şekil 4.21. Basitleştirilmiş orijinal model araç üzerinde eş statik basınç büyüklüğü dağılım eğrileri.....	51

Şekil 4.22. Basitleştirilmiş orijinal model aracın yüzeyindeki eş basınç büyüklüğü dağılım eğrileri.....	51
Şekil 4.23. Optimize edilmiş aynalar için araç yüzeyindeki eş basınç büyüklüğü dağılım eğrileri.....	52
Şekil 4.24. Optimize edilmiş tekerlek için araç yüzeyindeki eş basınç büyüklüğü dağılım eğrileri.....	53
Şekil 4.25. Optimize edilmiş aynalar için araç yüzeyindeki eş hız büyüklüğü dağılım eğrileri.....	53
Şekil 4.26. Optimize edilmiş tekerlek için araç yüzeyindeki eş hız büyüklüğü dağılım eğrileri.....	54



ÇİZELGELER

Çizelge 1.1. 1200 kg'lık benzinli motor kullanılan otomobilin 90 km/h'te yakıt ile verilen enerjinin kullanımı (%) (Anonim IV)	8
Çizelge 3.1. Otomobil modelinin fabrika teknik verileri	22
Çizelge 3.2. Eclosure-Details View değerleri	27
Çizelge 3.3. Mesh node ve element sayısı	28
Çizelge 3.4. Sınır şartları	30
Çizelge 4.1. Ahmed gövdesinin arka eğim açısının değişimi, drag ve lift katsayıları....	37
Çizelge 4.2. Ahmed gövdesinin arka eğim açısı, C_D - C_L değişimi ve iki çalışma arasındaki hata oranı.....	41



1. GİRİŞ

Günümüzde petrol kökenli yakıtlar ulaştırma ve enerji üretimi gibi alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak petrol kökenli yakıtların elde edildiği fosil enerji kaynaklarının sınırlı bir rezerve sahip ve tükeniyor olması ile birlikte coğrafi dağılımı temininde zorluklar oluşturmaktadır. Bununla beraber, bu yakıtların aşırı kullanımı çevre ve hava kirliliği başta olmak üzere günümüzde en önemli çevre sorunlarından olan küresel ısınmayı artıran sera gazı emisyonlarının da artmasına sebep olmaktadır. 2019 verilerine göre dünyadaki toplam CO₂ salınımının yaklaşık %24'ü petrol kökenli yakıtların yoğun bir şekilde kullanıldığı ulaştırma sektöründen kaynaklanmaktadır (IEA, 2020b). Türkiye’de ise 2018 yılında ulaştırma sektörü kaynaklı CO₂ salınım miktarı toplam salınan CO₂ miktarının %23,1’ini oluşturmuştur (TUIK, 2020). Dolayısıyla içten yanmalı motorların kullanıldığı ulaştırma sektöründe daha düşük emisyonlara ve daha yüksek verime sahip motorların kullanılması ile ilgili yoğun çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmalar arasında yeni yakıt ve motor teknolojilerinin kullanılması oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Biyodizel ve biyoalkol gibi biyoyakıtlar içten yanmalı motorlar için en fazla araştırılan ve kullanılan alternatif yakıtlar olmalarına karşın günümüzde hidrojen daha fazla üzerinde durulan ve gelecek vaat eden bir yakıt olarak önerilmektedir (Altun ve ark., 2022). Ayrıca atık biyokütle ve yenilenebilir elektrik enerjisi kullanılarak üretilen sentetik yakıtlar (e-yakıtlar gibi) sıfır CO₂ emisyonu için önerilmektedir (Reitz ve ark., 2020). Aynı zamanda reaktivite kontrollü sıkıştırma ile ateşleme (RCCI) gibi motor teknolojileri de içten yanmalı motorlar için yüksek termik verim ve daha düşük egzoz emisyonları vaat etmektedir (Altun ve ark., 2023). Bunların dışında günümüzde başta otomobillerde olmak üzere ulaştırma sektöründe güç kaynağı olarak içten yanmalı motorlar yerine elektrik motorlarının kullanılması giderek yaygınlaşmaktadır. Tamamen elektrikli, hibrit ve yakıt hücresel elektrikli araçlar gibi çeşitleri bulunmaktadır. Bunlardan tamamen elektrikli araçlar (Battery Electric Vehicle, BEV) sadece elektrik enerjisi kullanırken, hibrit araçlarda (HEV) ise hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoru gibi birden fazla güç kaynağı kullanılmaktadır. Yakıt hücresel elektrikli araçlarda (FCEV) da elektrik üretimi için bir yakıt hücresi sistemi kullanılmaktadır.

Elektrikli araç üretim ve kullanımı son yıllarda ivme kazanmış olmasına rağmen elektrikli araçların tarihi 19. yüzyılın başlarına kadar uzanmaktadır. Örneğin, 1828’de ilk elektrikli araç Michigan’da bir İskoç mühendis olan Robert Anderson tarafından yapılmış

olup, 1884'te ise İngiliz mucit Thomas Parker tarafından Manchester'daki Victoria Electric Car Company tarafından başka bir araç üretilmiştir (Kıyaklı ve Solmaz, 2018). 1900'lü yılların başlarında elektrikli araçların benzinli araçlardan daha popüler olmalarına, örneğin o dönemde New York City'de 100'den fazla elektrikli taksi çalışmasına karşın, benzin motorlu araçların daha uzun menzil sunması ve daha kolay dolum imkânı sağlaması nedeniyle, yaygınlaşamamıştır (Rebecca, 2014). Ancak EA'ların günümüzde yeniden popüler hale gelmesi, iklim değişikliği ve fosil yakıtların tükenme endişeleriyle birlikte gerçekleşmiştir. Çevre dostu olması, karbon salınımını azaltması ve daha az gürültü yapması gibi avantajları nedeniyle, EA'ların kullanımı hızla artmaktadır. Elektrikli araçlarda kurşun-asit, nikel-metal hibrit ve lityum-ion gibi çeşitli türler kullanılmaktadır (Chan, 2007). Bunlar arasında lityum-ion bataryalar diğerleri ile karşılaştırıldığı zaman daha yüksek enerji ve güç yoğunluğuna ve aynı zamanda daha uzun ömre sahiptirler (Li ve ark., 2017). EA'ların şarj edilmesinde iletken şarj, endüktif şarj ve batarya değiştirme gibi farklı teknolojiler kullanılmaktadır. Bunlar arasında en yaygın yöntem, kablo ve soket kullanılan iletken şarj yöntemidir. Diğer taraftan, endüktif şarjda kablo ve sokete ihtiyaç duyulmadan, manyetik alan kullanılarak güç bataryaya transfer edilir (Yılmaz ve Krein, 2012). Araç dururken sabit endüktif şarj kullanılırken, hareketli endüktif şarj ile araç hareket halindeyken bile şarj işlemi yapılabilir (Machura ve ark., 2019). Batarya değiştirme teknolojisinde ise, boş bir bataryanın tam dolu bir batarya ile değiştirildiği batarya değiştirme istasyonları (BDİ) bulunmaktadır. Diğer bir şarj seçeneği ise, özellikle elektrikli halk otobüslerinde karşılaşılan, elektrik kabloları boyunca kayan ve enerji aktaran bir pantograf cihazı kullanılarak araçların yeniden şarj edilebildiği teknolojidir (Brecher ve Arthur, 2014).

Bataryalı-Elektrikli Taşıtlar (BEV): Bataryalı-Elektrikli Taşıtlarda enerjisini bataryalardan sağlayan tahrik sistemleri kullanılmaktadır. Bu bataryaların belirli aralıklar ile şarj edilmesi gerekmekte olup taşıt ağırlığını artırmaları ile sınırlı bir ömre sahip olmaları dezavantajları olarak sıralanabilir. Bununla beraber bu taşıtların içten yanmalı motorlu taşıtlara göre daha az sayıda hareketli parçaya sahip olmaları ve daha az bakım gerektirmeleri ise önemli bir avantaj olarak belirtilebilir (Emadi ve ark., 2008b).

Yakıt-Hücreli Elektrikli Taşıtlar (FCEV): Yakıt hücrelerinde yakıt ile hava elektrokimyasal bir tepkime (ters elektroliz) ile kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilmektedirler. Bu bakımdan bataryalar ile benzerlik gösterebilirler de bataryaların enerjisi depo ettikleri ile sınırlıdır (Ezgi, 2009; Akten, 2010). Yakıt pillerinde ise yakıtın ve havanın sağlandığı sürece enerji üretebilmektedirler (Ezgi, 2009; Akten, 2010; Krawczyk ve ark., 2014). Yakıt pillerinin

verimlerinin yüksek olması ile çevresel etkilerinin düşük olması gibi özelliklerinden dolayı geleceğin teknolojisi olarak gösterilmektedir. Bu sistemlerde hidrojen, doğal gaz ve metil alkol yakıt olarak kullanılabilir (Ezgi, 2009; Akten 2010). **Hibrit Taşıtlar (HEV):** Bataryalı elektrikli taşıtların maliyetlerinin yüksek oluşu, menzillerinin kısa olması ve büyük batarya sistemlerine ihtiyaç duyulması ile bunların taşıt ağırlığını önemli ölçüde artırması gibi nedenlerden dolayı içten yanmalı motorlar ile birlikte kullanılmalarını sağlayan hibrit taşıtlar geliştirilmiştir. Bu taşıtlarda hem şarj edilebilir bataryalar hem de bir içten yanmalı motor ile birlikte kullanılmaktadır.

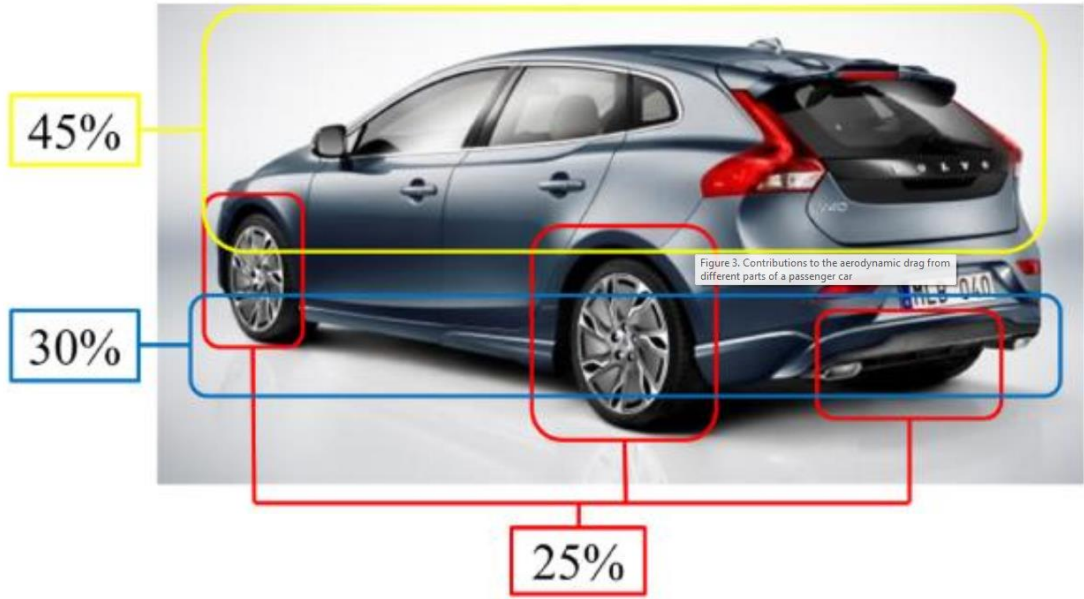
Bu çalışmada, bir elektrikli binek otomobil modelinin aerodinamik performansı ANSYS Fluent ortamında incelenmiştir. Çalışmada, Renault Zoe model seri elektrikli binek araç modelinin tasarımında, yan aynalar ve tekerlekler üzerinde tasarım değişiklikleri yapılarak aerodinamik performansın iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Sayısal çalışmalarda taşıt modeli çevresindeki akışın şekli, hız ve basınç dağılımı ile sürüklenme C_D ve kaldırma C_L katsayıları incelenmiştir.

1.1. Elektrikli Araçlar

Dünya genelinde elektrikli araçlar için ciddi bir artış gözlemleniyor. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından yayınlanan "Küresel Elektrikli Araç Görünümü" raporuna göre (Anonim I), 2022 yılında dünya çapında elektrikli araç satışları, önceki yıla göre yüzde 55 artarak 10 milyon adedi aştı. Bu, elektrikli araçların toplam araç satışları içindeki payının %14'e yükseldiği anlamına geliyor. Bu büyüme, elektrikli araçlar için ciddi bir talep olduğunu gösteriyor. Küresel elektrikli araç satışları 2017'de bir milyon adetten başlayarak 2022'de 10 milyona ulaştı. Bu, elektrikli araçların giderek daha popüler hale geldiğini gösteriyor. Ayrıca, elektrikli araçlara yönelik yapılan harcamalar da arttı. 2022 yılında elektrikli araçlara yapılan harcamalar yüzde 50 artarak 425 milyar dolara çıktı. Bu harcamaların büyük bir kısmını tüketiciler yapıyor, yani bireyler elektrikli araçlara büyük ilgi gösteriyor. Ayrıca, pazardaki elektrikli araç model sayısı da hızla artıyor. 2022'de 2018'e göre iki katına çıkarak 500'e ulaştı. Bu da çeşitli seçeneklere sahip olan tüketicilere daha fazla seçenek sunuyor. Çin, Avrupa ve ABD, elektrikli araç satışlarının en yüksek olduğu bölgeler olarak öne çıkıyor. Özellikle Çin, küresel elektrikli araç satışlarının büyük bir bölümünü gerçekleştiriyor.

1.2. Aerodinamik

Taşıt hareketi sırasında çevresindeki havanın sürekli olarak yer değiştirmesi neticesinde aerodinamik direnç veya sürüklenme olarak adlandırılan bir kuvvet meydana gelir. Modern bir taşıtın aerodinamik sürüklenme kuvveti 80 km/h hız ile hareket halindeyken toplam direncin % 75-80'ini oluşturur. Taşıt üzerinde önemli bir etkiye sahip olan aerodinamik kuvvetler deneysel ve sayısal yöntemler ile incelenmektedir. Şekil 1.1'de araç üzerinde farklı bölgelerin aerodinamik dirence etkisi gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Araç üzerinde farklı bölgelerin aerodinamik dirence etkisi (Vdovin, 2013).

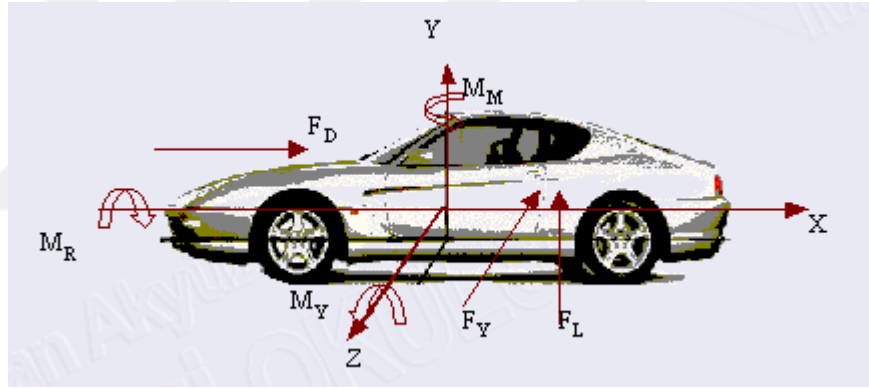
Aerodinamik sürüklenme kuvveti hızın karesi ile orantılı bir şekilde artmaktadır. Dolayısıyla çok yüksek hızlar ile hareket eden taşıtlar için sürüklenme çok daha önemli bir hale gelmektedir (Miralbes ve ark., 2012).

1.3. Araçlarda Aerodinamik Performans

Araçlarda aerodinamik, havanın kuvvetsel etkilerini inceleyen bir bilim dalıdır. Hareketsiz havada hareket eden katı cisim veya katı bir cisim etrafındaki hareketli hava düşünüldüğünde, hava aerodinamik kanunlarına uygun davranır. Sürüklenme ve taşıma kuvvetleri, hava akışından kaynaklanan kuvvetlerdir. Hava taşıtında, sürüklenme ve taşıma kuvvetleri önemli faktörlerdir; ancak kara taşıtları için belirli bir hız seviyesine kadar

sadece sürüklenme direnci önemlidir. Ancak Formula 1 arabaları gibi yüksek hızlı araçlarda, taşıma kuvveti önemli bir parametredir. Bu kuvvetler, hızın karesiyle orantılıdır (Anonim III). Aracın havanın içinden daha istikrarlı bir geçiş sağlaması, dengesinin ve yakıt ekonomisinin iyi olması için otomobillerin hava sürtünme katsayısının düşük olması önemli bir parametredir. Bu yönde rüzgâr tünel testleri aracın tasarımı C_D değeri düşük bir tasarıma ulaşmak için yön veren önemli bir testtir.

Araçların daha istikrarlı bir hava akışı sağlaması, denge ve yakıt ekonomisinin iyi olması için hava sürtünme katsayısının düşük olması önemlidir. Bu nedenle rüzgâr tüneli testleri, düşük hava sürtünme katsayısı elde etmek için önemlidir. Sürüklenme katsayısı (C_D), bir otomobilin karşılaşacağı direnci gösterir. Günümüzde, tasarım ve teknolojinin gelişmesiyle 1960'larda 0.5 olan C_D değerleri 0.3'e düşürülebilmiştir. Günümüzde tasarlanan otomobiller, düşük hava sürtünmesi sağlamak üzere şekillendirilmiştir. Şekil 1.2'de rüzgâr basıncının araç üzerindeki dağılımı ve etkileri gösterilmiştir.

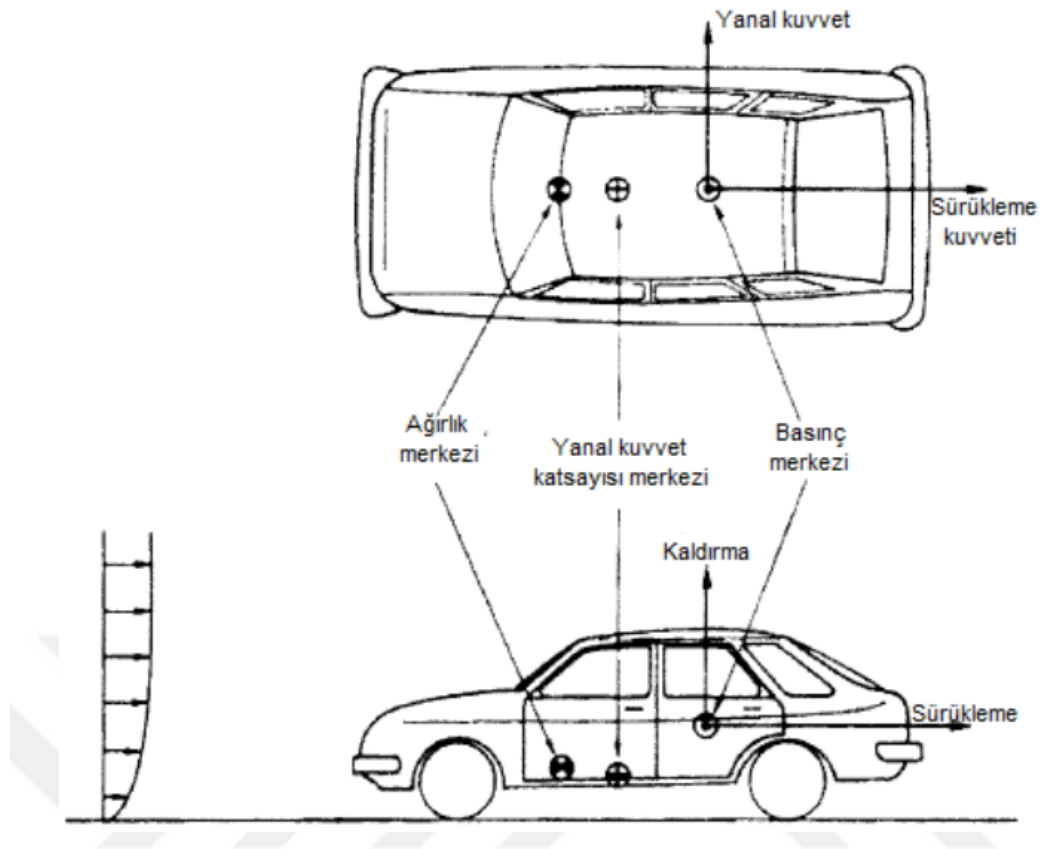


Şekil 1.2. Rüzgâr basıncının araç üzerindeki dağılımı ve etkileri (Anonim V)

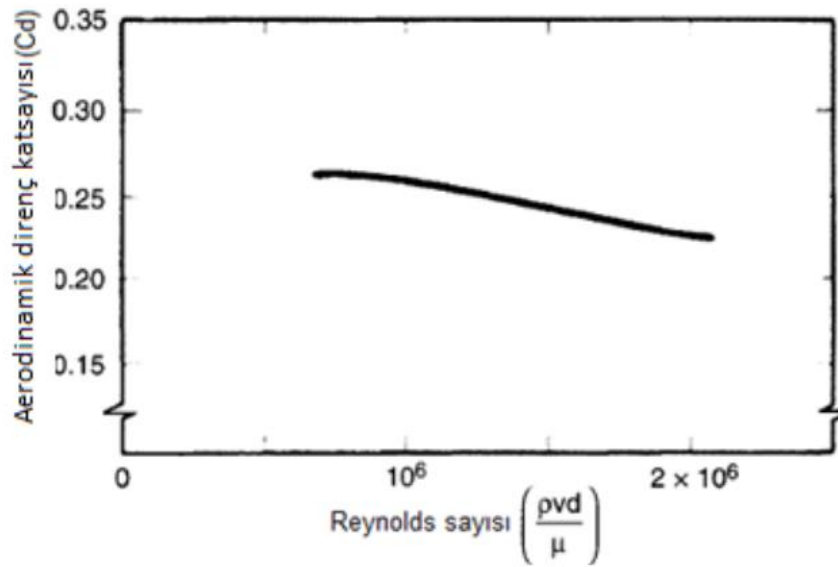
1.3.1. Aerodinamiğin Önemi

Kara taşıtlarının aerodinamik direnç katsayıları karşılaştırılırken, doğru hız ve alan tanımlamaları önemlidir. Hız, aracın hızı olabileceği gibi, alan da tekerleklerden yer ve aracın alt kısmını içerebilir. Bu nedenle, genellikle ön görüş alanı ve aerodinamik direnç katsayısının (C_D) birlikte ele alınması daha doğrudur. Şekil 1.3'te seyir halindeki bir taşıtın üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetler gösterilmiştir. Yapılan deneyler, yüksek hızlarda aerodinamik direnç katsayısının Reynolds sayısına daha az bağlı olduğunu göstermektedir. Şekil 1.4'te, Reynolds sayısının 2×10^6 'nın üzerine çıktığı noktada

aerodinamik direnç katsayısının Reynolds sayısından bağımsız hale geldiği görülmektedir (Stone ve Ball, 2004).

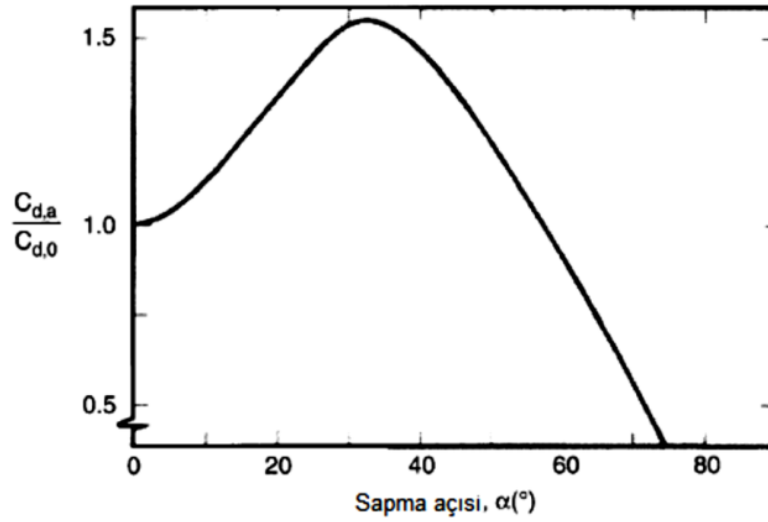


Şekil 1.3. Seyir halindeki bir taşıtın üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetler (Stone ve Ball, 2004).



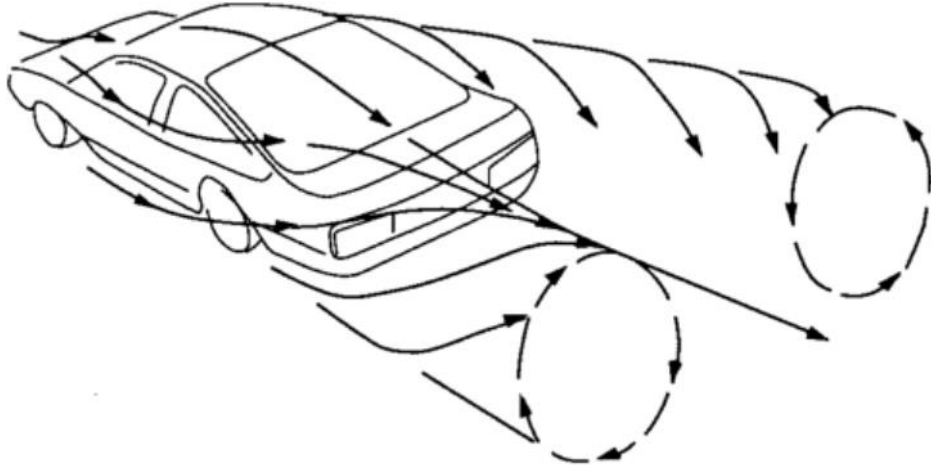
Şekil 1.4. Reynolds sayısının aerodinamik direnç katsayısına etkisi (Stone ve Ball, 2004).

Ayrıca, taşıtın sürüş kararlılığına etki eden sapma açısı da aerodinamik direnç katsayısını etkileyen bir faktördür. Şekil 1.5'te, bir taşıtın tipik sapma açısının sürüklenme katsayısı üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Sapma açısı, taşıtın hareket yönünün dışında gelen bir rüzgar nedeniyle oluştuğundan, aerodinamik direnç katsayısının saptmaya duyarlılığı önemlidir (Stone ve Ball, 2004).



Şekil 1.5. Sapma açısının aerodinamik direnç katsayısına etkisi (Stone ve Ball, 2004).

Taşıtın üst tarafında akan hava, alt bölgeden daha hızlı hareket eder ve bu, tavan üzerindeki hava basıncının alt bölgedekine göre daha düşük olmasına yol açar. Potansiyel akış teorisine göre, bu basınç farkı taşıtın yan kenarlarında hortum şeklinde girdapların meydana gelmesine ve taşıtın yukarıya iten bir kaldırma kuvvetinin oluşmasına neden olur (Şekil 1.6). Kaldırma ve sürüklenme arasında karmaşık bir ilişki vardır. Kaldırma artarken sürüklenme de artabilir veya kaldırma azalırken sürüklenme azalabilir. Minimum sürüklenme teorik olarak sıfır kaldırma durumunda gerçekleşir (Stone ve Ball, 2004).



Şekil 1.6. Taşıt etrafındaki hortum şeklindeki girdapların analizi (Gillespie, 1992)

1.3.2. Otomobillerdeki kayıplar

Otomobillerde motor gücü, sistem içi ve hava direnci kayıplarıyla denge sağlar. Bu kayıplar, yuvarlanma, ivme, termodinamik ve transmisyon kayıplarıdır.

Hava direnci düşük hızlarda diğer kayıplara göre daha düşük düzeydedir. Ancak saatte 30-40 km hıza ulaşıldığında hava direnci önem kazanır, çünkü hava direnci hızın karesiyle artar. Aracın etrafındaki hava akışına bağlı olarak, direnç katsayısı (C_D) ile birlikte aracın şekli ve boyutlarına göre hava direnci hesaplanır (Anonim III). Çizelge 1.1’de 1200 kg’lık benzinli motor kullanılan otomobilin 90 km/h’te yakıt ile verilen enerjinin kullanımı gösterilmiştir.

Çizelge 1.1. 1200 kg’lık benzinli motor kullanılan otomobilin 90 km/h’te yakıt ile verilen enerjinin kullanımı (%) (Anonim IV)

Kayıplar	Sabit hızda ve kısmi yükte	İvmelenme veya yokuşta tam yükte
Termodinamik	%78	%72
Yardımcı sistemler	%5	%5
Yuvarlanma	%4,6	%2
İvme veya yokuş	%0	%14,3
Aerodinamik	%1,6	%5,9
Transmisyon	%1,8	%0,8
Krank milinden alınan faydalı iş	%22	%28
Taşıta yakıt ile verilen enerji	%100	%100

1.4. Aerodinamik Değerlendirmeler: Sayısal ve Deneysel Yaklaşımlar

1.4.1. Matematiksel akışkan Simülasyonları

1.4.1.1. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, akışkan problemlerinin analizinde ve performans testlerinde kullanılan bir yöntemdir. Bu programlar sayesinde enerji, süreklilik ve momentum denklemleri sayısal olarak çözülerek akışla ilgili parametrelerin dağılımları elde edilir. ANSYS Fluent, hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde yaygın olarak kullanılan bir yazılımdır.

Gambit, sonlu elemanlar ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde kullanılmak üzere tasarlanmış genel bir ön işlemci programıdır. Aynı zamanda katı modelleme araçlarıyla karmaşık geometrilerin tasarımında ve diğer katı modelleme programlarıyla tasarlanan modellerin içe aktarımında kullanılabilir. ANSYS Fluent ise sonlu hacimler yöntemiyle çalışan bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımıdır ve çeşitli endüstrilerde ısı transferi ve akışkanlar mekaniği problemlerinin çözümünde kullanılır.

1.4.2. Aerodinamik analizde deneysel yöntemler

Motorlu taşıtların aerodinamik kuvvetleri, taşıtın çevresindeki akış alanının yapısına bağlıdır. Bu kuvvetleri anlamak için gerçek boyutlu modeller üzerinde rüzgâr tünellerinde deneyler yapılır. Rüzgâr tünelleri, taşıtların gerçek yol koşullarını yapay olarak simüle edebilir. Bu deneylerde, sürüklenme (hava direnci) kuvvetini optimize etmek için çalışmalar yapılabilir ve bu da yakıt ekonomisine olumlu etki etmektedir (Schlichting, 1960).

Rüzgâr tünellerinde yapılan deneyler, hızlı, kolay, ekonomik ve güvenilir oldukları için tercih edilir. Bu deneylerde taşıtların üç boyutlu karmaşık yapısını simüle etmek için açık deney odalı tüneller tercih edilir. Deneysel çalışmaların, model kullanımıyla gerçek prototipler arasında benzerlik sağlayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Geometrik, kinematik ve dinamik benzerliklerin sağlanması, modelleme çalışmalarının doğru sonuçlar vermesini sağlar (Gümüslüol ve ark., 2006).

Geometrik benzerlik, model boyutlarının prototiple aynı olması gerektiğini ifade eder. Kinematik benzerlik ise hız vektörlerinin model ve prototip arasında sabit bir oranla

olması gerektiğini belirtir. Bu benzerlikler, aerodinamik etkilerin anlaşılması için deneysel çalışmalarda önemlidir (Atlı, 1985).

1.4.2.1. Benzerlik Prensipleri ve Uygulamaları

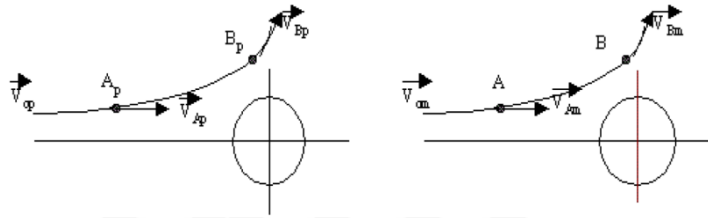
Deneysel çalışmaların gerçek prototiplerle yapılmasının zorlukları, maliyet, boyutsal büyüklük ve çalışma alanı gereksinimleri gibi nedenlerden kaynaklanır ve bu durum model kullanımının önemini vurgular. Model tabanlı çalışmaların, elde edilen sonuç verilerinin prototipe uygunluğu açısından, modelin prototipe çok yakın veya aynı özelliklere sahip olması gerekmektedir. Akışkanlar dinamiği deneylerinde, model ve prototip arasında geometrik, kinematik ve dinamik benzerliklerin sağlanması beklenir (Aka, 2003).

Geometrik benzerlik: Bu benzerlik türü için modelin boyut ölçüleri, prototip ile aynı olmalıdır. Yani modelin boyutları prototip ile birebir örtüşmelidir (Aka, 2003).

Kinematik benzerlik: Kinematik benzerlik için model ve prototip üzerindeki hız vektörleri arasındaki mutlak ve paralel değerlerinin oranı sabit olmalıdır. Bu tür benzerlik, akım çizgilerinin prototip ve model için aynı olduğu bir durumu ifade eder (Aka, 2003). Şekil 1.7’de kinematik benzer akışların karşılaştırılması grafikleri gösterilmiştir.

$$V_{Ap} / V_{Am} = V_{Bp} / V_{Bm} = V_{op} / V_{om} = C = \text{Sabit} \quad (1.1)$$

$$a_{Ap} / a_{Am} = a_{Bp} / a_{Bm} = a_{op} / a_{om} = C = \text{Sabit} \quad (1.2)$$



Şekil 1.7. Kinematik benzer akışların karşılaştırılması (Aka, 2003)

Aerodinamik deneylerde, prototip ve model için akım çizgilerinin aynı olduğu bir durum, kinematik benzerliğin sağlandığı anlamına gelir. Rüzgâr tüneli deneylerinde

kinematik benzerliğin uygulanması, aynı zamanda blokaj etkisi ile ilişkilidir. Genellikle hareketli durumdan durağan duruma geçen bir otomobilin etrafında oluşan hava hareketleri, aracın dış formunda bir sınır tabakası oluşturur. Bu sınır tabakası içindeki akışkan hızı, plaka yüzeyinden yukarı doğru gidildikçe parabolik bir oranla artar ve belli bir yükseklikte serbest akış hızına eşit olur. Bu yükseklik Prandtl tarafından "sınır tabakası kalınlığı" olarak adlandırılmıştır (Aka, 2003).

Modelin tünel kesit alanını büyük bir şekilde kaplaması durumunda, model ile tünel duvarı arasında dar bir bölge oluşur. Akışkan bu dar bölgeden geçemez ve serbest akış hızını koruyarak bloke olur. Bu durumda, sınır tabakasının üzerindeki serbest akış hızı, sınır tabakasının içindeki akış hızıyla aynı olmaz. Bu nedenle model üzerinde oluşan akım çizgileri ile gerçekte prototip üzerinde oluşan akım çizgilerinin paralelliği sağlanamaz. Bu durumda elde edilen serbest akış hızı değeri yanlış olur ve deney sonuçları gerçek verilerle uyumsuz hale gelir. Blokaj oranı, model kesit alanının rüzgâr tüneli deney odasının kesit alanına oranı olarak ifade edilir. Blokaj oranının %10 sınırının altında olması, rüzgâr tüneli deneylerinde blokaj etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu gösterir (Aka, 2003).

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (1.3)$$

Dinamik benzerlik: Dinamik benzerlik, viskoz ve atalet kuvvetlerinin boyutsuz oranlarını ifade eder. Dinamik benzerlik sağlanması için Reynolds sayılarının model ve prototip için aynı olması gereklidir. Ölçülmüş boyutsuz katsayıların model ve prototip arasında aynı olması durumunda dinamik benzerlik sağlanmış olur (Aka, 2003). Denklem (1.4) ile ifade edilir.

$$(F_p/F_v)_m = (F_p/F_v)_p = \text{sabit ve } (F_p/F_g)_m = (F_p/F_g)_p = \text{sabit olmalıdır.} \quad (1.4)$$

Burada;

F_p : basınç kuvveti

F_v : kesme kuvveti

F_g : yerçekimi kuvveti olarak ifade edilmektedir.

Akışkan hareketleri esnasında basınç, atalet, viskozite, yüzey gerilimi, yerçekimi ve sıkıştırılabilirlik gibi kuvvetler etkileşime girer. Bu kuvvetlerin oranları boyutsuz değerler oluşturur. Dinamik benzerlik için, model ve prototip arasındaki analiz sonuçlarında bulunan boyutsuz katsayılar aynı olmalıdır. Geometrik benzerlik gösteren akışlarda ise tek bir boyutsuz katsayının eşitliği yeterlidir. Araştırmanın odağında olan otomobil formundaki akışta, atalet ve viskoz kuvvetler özellikle etkili olur.

$$R_e = \frac{\text{Atalet kuvveti}}{\text{Viskoz kuvveti}} = \frac{V^2 L^2}{VL\mu} = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (1.5)$$

Viskoz ve atalet kuvvetlerinin etkili olduğu durumlarda, dinamik benzerlik için Reynolds sayılarının model ve prototip için aynı olması gerekmektedir. Ancak, model ve prototip farklı boyutlarda ise Reynolds sayılarının eşitliğini sağlamak zor olabilir. Eğer ölçülen boyutsuz katsayılar, belirli bir hız değerinin üzerindeki Reynolds sayısından etkilenmiyorsa ve Reynolds sayısı yükseldikçe değişmiyorsa, dinamik benzerlik sağlanmış sayılır. Denklem (1.5) ile R_e hesaplanır.

1.4.2.2. Deneysel yöntem çeşitleri ve kullanımı

1.4.2.2.1. Kuvvet ve basınç ölçümlerinden elde edilen hesaplamalar

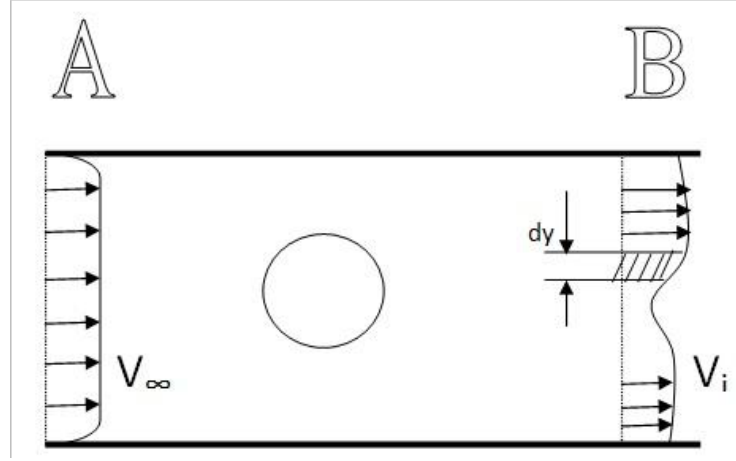
Bu deneylerde yük hücreleriyle (loadcell) tasarlanmış bir düzenek ve elektronik gösterge kullanılarak kuvvetler ölçülür. Amaç, C_D sürüklenme direnci katsayısını yüksek hassasiyetle belirlemektir. Deneyler iki aşamada yapılır: İlk aşamada basınç dağılımı için model üzerinde deliklerden basınç ölçümleri yapılır. İkinci aşamada, serbest akış hızı değiştirilerek sürüklenme kuvvetleri ölçülür. Denklem (1.6) ile C_D hesaplanır (Gökçeğöz, 2013).

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot A} \quad (1.6)$$

Deneysel çalışmalarda binek otomobil modelinin aerodinamik özellikleri, rüzgâr tüneline farklı serbest akış hızları altında çeşitli noktalarda basınç, kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri ölçülerek belirlenir. Bu ölçümler akış hızı, basınç ve kuvvet değerlerini içerir (Gökçeğöz, 2013).

1.4.2.2.2. İz tarama metodu (momentum kaybı) ile yapılan hesaplamalar

Diyelim ki bir hava tüneli deneyinde içine yerleştirilmiş bir silindir var. Bu silindirin çapı "D" ve uzunluğu "b" olarak kabul edilsin. Başlangıçta üniform dağıldığını düşündüğümüz hız profili, cismin iz akış bölgesinde değişecektir (Şekil 1.8). A ve B bölgeleri arasındaki momentum kaybı, cismin üzerine etkiyen direnç kuvvetine (F_D) eşit olacaktır. Hız değerleri, dy aralığında bir pitot tüpü aracılığıyla tespit edilebilir (Gökçeğöz, 2013).



Şekil 1.8. Akışkan davranışlarının incelenmesi: Hava tüneli deneyi (Gökçegöz, 2013)

$$\text{Birim elemandan geçen debi} = d.\dot{m} = \rho.V_i.dy.b \quad (1.7)$$

A ve B arasındaki momentum kaybından yola çıkacağız.

$$\text{A kesitinde momentum} = \rho.V_i.dy.b.V_\infty \quad (1.8)$$

$$\text{B kesitinde momentum} = \rho.V_i.dy.b.V_i \quad (1.9)$$

Sürüklenme direnç kuvveti F_D :

$$F_D = b \int_{-\infty}^{\infty} (\rho.V_i.V_\infty - \rho.V_i.V_i)dy \quad (1.10)$$

$$F_D = b.\rho \int_{-\infty}^{\infty} V_i(V_\infty - V_i)dy \quad (1.11)$$

V_∞ ve V_i hızları bir pitot statik tüpü yardımıyla tespit edilebilir.

A kesitinde;

$$P_T = P_\infty + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \quad (1.12)$$

$$V_\infty = \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_T - P_\infty)} \quad (1.13)$$

B kesitinde;

$$P_{Ti} = P_i + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_i^2 \quad (1.14)$$

$$V_i = \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_{Ti} - P_i)} \quad (1.15)$$

F_D 'de yerine yazılırsa;

$$F_D = b \cdot \rho \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_{Ti} - P_i)} \left[\sqrt{\frac{2}{\rho} (P_T - P_{\infty})} - \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_{Ti} - P_i)} \right] dy \quad (1.16)$$

Sürüklenme direnç kuvveti (düzenlenmiş):

$$F_D = 2 \cdot b \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{(P_{Ti} - P_i)} \left[\sqrt{(P_T - P_{\infty})} - \sqrt{(P_{Ti} - P_i)} \right] dy \quad (1.17)$$

elde edilir. Direnç katsayısı (C_D);

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A} = \frac{F_D}{(P_T - P_{\infty}) (D \cdot b)} \quad (1.18)$$

olduğundan;

$$C_D = \frac{2}{(P_T - P_{\infty}) D} \sum_{i=0}^n \sqrt{(P_{Ti} - P_i)} \left[\sqrt{(P_T - P_{\infty})} - \sqrt{(P_{Ti} - P_i)} \right] dy \quad (1.19)$$

A_f alanı farklı olduğundan denklem tekrar düzenlenirse;

$$C_D = \frac{2}{(P_T - P_{\infty}) A_f} \sum_{i=0}^n \sqrt{(P_{Ti} - P_i)} \left[\sqrt{(P_T - P_{\infty})} - \sqrt{(P_{Ti} - P_i)} \right] dy \quad (1.20)$$

Buradaki “ dy ” ölçüm noktaları arasındaki mesafeyi ifade eder.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde motorlu taşıtların aerodinamik performansının incelendiği çeşitli çalışmaların sonuçları sunulmuştur. Bu çalışmalar, taşıt tasarımında yapılan değişikliklerin aerodinamik özellikler üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiş ve önemli sonuçlar elde etmiştir. Bu sonuçlar, taşıt tasarımının enerji verimliliği, yakıt tasarrufu ve sürdürülebilirlik açısından ne kadar kritik olduğunu vurgulamaktadır. Bu çalışmalar, taşıtların hava direncini azaltma potansiyelini ve aerodinamik performanslarını artırma yöntemlerini göstermektedir. Özellikle ön cam açıları, kaput eğimleri ve diğer tasarım özelliklerinin taşıtın aerodinamik performansını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Bu nedenle, taşıt üreticileri ve tasarımcıları için bu tür çalışmaların büyük bir öneme sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Sarı (2007) çalışmasında, "Renault" marka "Kangoo" model aracın farklı ön cam ve kaput açılarının taşıdığı aerodinamik etkiler incelenmiştir. Çalışma, ANSYS Fluent programı ve sonlu hacimler yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, ön camın açılarının (20° , 30° , 40° , 50° ve 60°) değişimi, sırasıyla sürüklenme katsayısı değerlerini "1,150, 1,052, 0,931, 0,93 ve 0,866" olarak göstermiştir. Kaput açısının değişimi (0° , 5° , 10° , 15° ve 20°) ise sürüklenme katsayısı değerlerini "1, 0,96, 0,95, 0,93 ve 0,929" olarak ortaya çıkarmıştır. Bu sonuçlar, en düşük sürüklenme katsayısı değerinin 20° 'lik kaput eğim açısı ve 60° 'lik ön cam açısı ile elde edildiğini göstermektedir. Bu çalışma, araç tasarımında aerodinamik faktörlerin belirlenmesinde ve optimize edilmesinde önemli bir anlayış sağlamıştır.

Ambarita ve ark. (2018) çalışmalarında, enerji verimli yarışlar için tasarlanmış bir şehir konsept aracının akışkan dinamiği özellikleri incelenmiştir. Ticari FLUENT CFD kodu kullanılarak yapılan sayısal analizler öncesinde, yöntemin doğruluğu önceki deneyler ve sayısal çalışmalarla Ahmed Gövdesi üzerinde doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, bu özel aracın, bir Ford Fiesta modeline kıyasla daha az aerodinamik olduğunu göstermiştir. Yol çizgileri ve vektör hızı analizi, aracın hala zayıf bir akışa sahip olduğunu gösterirken, basınç dağılımı analizi, aracın basınç katsayısını ortaya çıkarmıştır. HMU ve Ford Fiesta'nın ortalama sürüklenme katsayıları karşılaştırıldığında, HMU'nun daha

yüksek bir sürüklenme katsayısına sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışma, bu özel aracın aerodinamik performansını artırmak için daha fazla iyileştirme potansiyelinin olduğunu vurgulamıştır.

Bayındırlı (2019) çalışmasında, otobüs modeli üzerinde pasif akış kanalları kullanarak aerodinamik iyileşme elde edilmiştir. Araştırmada, otobüsün ön yüzeyinden alınan hava akışını, 1, 3 ve 5 adet pasif hava kanalı ile taşıtın arka bölümüne yönlendirilerek %4-12 arasında aerodinamik iyileşme sağlanmıştır. Çalışmada, 1/15 ölçekli bir minibüs modeli üzerinde bagaj spoileri kullanılarak aerodinamik iyileştirme yapılmıştır. Benzerlik koşulları gözetilerek gerçekleştirilen akış analizleri sonucunda, model minibüsün aerodinamik direnç katsayısı ortalama 0,395 ve 0,393 olarak ölçülmüştür. Model minibüsün C_D katsayısı ise 0,415 olarak belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada, model otobüsünün toplam aerodinamik direnç katsayısının %88,72'sinin basınç kaynaklı, %11,28'inin ise sürtünme kaynaklı olduğu tespit edilmiştir.

Kunt (2019) çalışmasında, tamamen elektrikli bir yolcu aracının aerodinamik direnç etkisi ve batarya performansına etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, ADVISOR taşıt simülasyon programı kullanılarak binek tipli bir elektrikli aracın ECE-15 sürüş çevrimine göre 4 farklı taşıt ön iz düşüm alanı oluşturulmuş ve hava direnci değişimi, SOC durumu ve batarya geri kazanımı incelenmiştir. Ayrıca, elektrikli araçların çevresel etki ve verimlilik açısından ana avantajlarına değinilmiştir. Advisor tabanlı modellenmenin elektrikli araç tasarımında ne kadar önemli olduğu ve bu yöntemin en uygun performans, yakıt ekonomisi ve emisyon karakteristiğini sağlayan tasarımın belirlenmesinde ve boyutlandırmasında kolaylık sağladığı açıklanmıştır. Bu çalışma, elektrikli araçların gelecekteki yaygın kullanımına yönelik önemli bir adım olarak değerlendirilebilmektedir.

Günay ve ark. (2019) çalışmasında, elektrikli araçların aerodinamik özellikleri üzerine yapılan bir inceleme sunulmuştur. Araştırmacılar, parçacık görüntülemeli hız ölçüm yöntemi (PGHÖ) ve sayısal analiz kullanılarak çalışma yapılmıştır. Ahmed modeli, gerçek araç yerine ölçeklendirilerek kullanılmıştır. 24 m/s hızındaki bir rüzgâr tüneline, ölçeklendirilmiş elektrikli araç üzerinde deneyler ve sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, aracın yüzey basınç dağılımı incelenmiş ve rüzgârın aracın ön tarafında yavaşladığı ve yüksek basınç bölgelerinin olduğu görülmüştür. Aracın arkasında ise akış ayrılmaları nedeniyle hızın azaldığı tespit edilmiştir. Sayısal

analizlerde farklı hızlar için sürüklenme katsayıları (C_D) hesaplanmıştır, bu katsayılar aracın hava direncini temsil eder. Sonuçlar, farklı hızlarda aracın hava direncinin nasıl değiştiğini göstermiş, örneğin 20 m/s hızında C_D 0,133, 24 m/s hızında 0,18 ve 30 m/s hızında 0,289 olarak hesaplanmıştır. Deneyler ve sayısal analiz sonuçları karşılaştırıldığında, sayısal analizlerin gerçek deney sonuçlarına yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu çalışma, elektrikli araçların aerodinamik performansını anlamak ve optimize etmek amacıyla deneysel ve sayısal yöntemlerin kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Yarin (2019) çalışmasında, farklı taşıt modellerinin aerodinamik yapısı 2 boyutlu akış analizleri ve sürüklenme katsayısı hesaplamalarıyla incelenmiştir. Çalışma, taşıt tasarımındaki değişikliklerin taşıt aerodinamiğine etkisini anlamak amacıyla yapılmıştır. İki boyutlu yaklaşımın gerçek değerlerle tam uyumlu olmaması, üç boyutlu analizlerin daha gerçekçi sonuçlar sağlayabileceğini göstermektedir. Ancak üç boyutlu analizlerde hesaplama süreleri artabilir. Araç profilinin aerodinamiğe etkisinin genel olarak benzer sonuçlara yol açtığı gözlemlenmiştir. Beş farklı taşıt modeli için sürüklenme katsayısı ANSYS Fluent programı ile hesaplanmıştır. Keskin köşelere sahip modelde akış bozulmaları nedeniyle yüksek sürüklenme katsayısı elde edilmiştir. İyileştirmeler sonucunda elde edilen modellerde sürüklenme katsayısı düşmüştür. Sonuçlar, taşıt tasarımında dikkate alınan parametrelerin sürüklenme katsayısını etkileyebileceğini göstermektedir.

Ebrahim ve ark. (2020) çalışmalarında, araçların platon içindeki aerodinamik performansı hem pist ölçümleri hem de Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) kullanılarak incelenmiştir. Pist ölçümleri, CFD analizini doğrulamış ve platon içindeki araçların hava direnci üzerindeki etkilerini göstermiştir. Aracın önde bulunan koruma etkisi nedeniyle yanal olarak uzanan yüksek basınç bölgeleri oluşurken, araçlar arasındaki boşluk azaldıkça taban basıncı artmıştır. Bu basınç değişiklikleri, araçların platon içinde %39,1 ila %33,4 arasında güç tasarrufu sağladığını göstermiştir. Güç azalması, araçlar arasındaki boşluğa ve platon içindeki araç sayısına bağlı olarak değiştiğini belirtmektedirler.

CFD analizi, sürüklenme kaynaklarını detaylı şekilde inceleme imkânı sunmuş ve aracın gövdesinin genellikle sürüklenme kaynağının ana kaynağı olduğunu göstermiştir. Tekerlekler ve aynaların sürüklenme üzerindeki etkileri sınırlıdır. Basınç sürüklenme en

yüksek kaynak olarak kabul edilirken, kesme gerilimi aracın konumuna bağlı olarak sabit kalmaktadır. Sonuç olarak, platon içinde çalışan araçların güç tasarrufu sağladığı ve elektrikli araçların menzilinı artırabileceğini göstermişlerdir.

Nabil ve ark. (2020) çalışmalarında, bir elektrikli aracın gövdesinin aerodinamik performansını artırmak için deneysel yaklaşım ve CFD simülasyonu kullanılarak yapılmıştır. Deneysel yaklaşım, aracın gerçek boyutlu bir modelinin yapımını içermektedir ve bu modelin aerodinamik özellikleri ölçülmüştür. CFD simülasyonu, aracın aerodinamik performansını daha ayrıntılı bir şekilde analiz etmek için kullanıldı. Elde edilen veriler, aracın aerodinamik performansını artırmak için farklı tasarım değişikliklerinin yapılması gerektiğini gösterdi. Örneğin, aracın ön kısmındaki hava girişleri ve arka kısmındaki difüzörlerin tasarımı, aracın aerodinamik performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmanın sonuçları, elektrikli araçların aerodinamik performansını artırmak için tasarım değişiklikleri yapılması gerektiğini göstermektedir. Bu veriler, araçların daha verimli hale getirilmesine ve daha uzun menziller elde edilmesine yardımcı olmaktadır.

Arıkan (2020) çalışmasında, gerçek boyuttaki bir otomobil yan ayna modelinin dış yüzeyi 3 boyutlu tarayıcı kullanılarak taranmış ve farklı yan ayna formları tasarlanmıştır. Tasarlanan bu farklı formların her biri aynı iz düşüm alanına sahip olacak şekilde Solidworks yazılımında çizilmiş ve ANSYS Fluent kullanılarak sabit bir hızda (100 km/h) hava direnci katsayıları hesaplanmıştır. Çalışmanın temel amacı, yan ayna formunun değişiminin hava direnci üzerindeki etkisini incelemektir. Bu nedenle hız ve ön iz düşüm alanı sabit tutulmuş ve sadece yan ayna formunun etkisi gözlemlenmiştir.

Yapılan analizler sonucunda farklı yan ayna formlarının aerodinamik direnç değerleri ve hava direnci katsayıları hesaplanmıştır. Sonuçlar, dikdörtgen yan ayna modellerinin en yüksek hava direnci katsayısına sahip olduğunu, yamuk formundaki yan ayna modelinin ise en verimli olduğunu göstermiştir. Yamuk formundaki yan ayna modeli, diğer formlara göre daha az hava direncine neden olmuş ve yakıt tasarrufu sağlamıştır. Bu çalışma, otomobil tasarımında estetik ve yakıt verimliliği dengesini ele almış ve aerodinamik tasarımın önemini vurgulamıştır.

Kalaycı (2021) SUV binek tip bir taşıtın aerodinamik performansını sayısal olarak ANSYS Fluent ortamında incelediği çalışmada, taşıtın keskin hatların yuvarlatılması ile ön cam açısı ve tavan çizgisi eğiminin C_D ve C_L katsayıları üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışmada sürüklenme katsayısının %20 oranında düştüğünü ve 0,204 olarak hesaplandığı belirtilmiştir. Aynı zamanda C_L katsayısının da -0,218'den -0,337'ye kadar düştüğü rapor edilmiştir. Geometrik düzenlemeler ile akım çizgilerinde daha istikrarlı bir profilin elde edildiği ve ayrıca hız vektörlerinin taşıtın yüzeyinde kayba uğradığı bölgelerin de azaltıldığı belirtilmiştir.

Kamal ve ark. (2021) CFD teknikleri yoluyla çeşitli araba modeli geometrisi üzerindeki aerodinamiğin etkisine ilişkin yaptıkları incelemede, aerodinamik tasarımlı araçların yakıt verimliliğini artırmadaki önemini vurgulamaktadırlar. Ancak, alan optimizasyonunun sınırlamaları nedeniyle her tasarımın uygulanamayabileceği belirtilmektedir. Bu nedenle, makale farklı araba modellerinin dış aerodinamiğini doğru bir şekilde simüle etmek için CFD modelleme ve simülasyon stratejilerini önermektedir. Çoğu araştırmacı, düşük hesaplama maliyeti nedeniyle RANS ve çeşitli türbülans modellerini kullanarak simülasyon yapmaktadır. Farklı türbülans modellerinin ve araba modeli geometrilerinin aerodinamik kuvvetlere etkisi incelenmiştir. Basit gövde modelleri, temel aerodinamik akış özellikleri hakkında geniş bir anlayış geliştirmiştir. Bu modeller, araştırmalarda ve CFD verilerinin doğrulanmasında kullanılmıştır. Yeni modeller, mevcut geometrilere dayalı olarak geliştirilebilmekte ve farklı araba modeli geometrileri üzerinde derinlemesine çalışmalar yapılabilindiğini belirtmektedir.

Yapılan çalışmalarda, farklı taşıt modellerinin aerodinamik özellikleri üzerine kapsamlı analizler yapılmış ve çeşitli tasarım değişikliklerinin aerodinamik performans üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmalar, taşıt aerodinamiklerinin tasarımında, hava direncini azaltma ve yakıt verimliliğini artırma amacıyla önemli bilgiler sunmaktadır. İncelenen faktörler arasında taşıtın ön cam ve kaput açıları, yan ayna formu, ön iz düşüm alanı, taşıtın keskin hatlarının yuvarlatılması gibi çeşitli tasarım değişkenleri bulunmaktadır.

Çalışmaların sonuçlarına göre, aerodinamik tasarım değişikliklerinin taşıtın sürüklenme katsayısı (C_D) ve kaldırma katsayısı (C_L) üzerinde belirgin etkileri olduğu görülmüştür. Örneğin, yan ayna formunun değiştirilmesi, taşıtın hava direncini önemli

ölçüde etkilemekte, keskin hatların yuvarlatılması veya tavan çizgisi eğiminin değiştirilmesi, sürüklenme katsayısını düşürmektedir. Aynı şekilde, ön cam ve kaput açılarının ayarlanması, sürüklenme katsayısını azaltmakta ve yakıt verimliliğini artırmaktadır.

Bu çalışmalar, taşıt tasarımında aerodinamik faktörlerin belirlenmesi ve optimize edilmesi konusunda önemli bir anlayış sağlamaktadır. Aerodinamik iyileştirmelerin, taşıtların enerji verimliliğini artırarak çevresel etkiyi azaltabileceği ve yakıt tasarrufu sağlayabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, sayısal analizler ve deneysel çalışmaların bir arada kullanılması, tasarım değişikliklerinin etkilerini daha ayrıntılı bir şekilde inceleme fırsatı sunmaktadır. Bu çalışmalar, taşıt endüstrisinde aerodinamik performansın iyileştirilmesi için tasarımcılara rehberlik eder ve gelecekte daha verimli ve çevre dostu taşıtların tasarımına katkı sağlayacaktır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Model ve Özellikleri

Çalışmada kullanımda olan Renault ZOE modeli kullanılmıştır. Çalışmanın kapsamında Renault ZOE otomobilinin görseli Şekil 3.1’de, teknik özellikleri ise Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Otomobil modelinin fabrika teknik verileri

MOTOR	
Maksimum güç(bg)	108
Maksimum tork(Nm)	225
BATARYA	
Batarya tipi	Z.E.50
Batarya kapasitesi(kWh)	52
Batarya teknolojisi	LITHUM-ION
Toplam voltaj(V)	400
Modül/Hücre sayısı	12 – 192
Batarya ağırlığı(kg)	326
SÜRÜŞ MENZİLİ	
WLTP test prosedürüne göre menzil(km)*	395
ŞARJLAMA SÜRESİ (0-80%)	
DC 50 kW hızlı şarj(dk)	65
AC 22 kW şarj (dk)	135
PERFORMANS	
Maksimum hız(km/s)	135
0-100 km/s hızlanma (sn)	11,4
TÜKETİM DEĞERLERİ	
Ortalama enerji tüketim (kWh/100km)*	17,2
CO2 salımı (g/km)	0
AĞIRLIK	
Aracım yürür vaziyette ağırlığı (sürücü dahil)(kg)**	1.577
MODEL BOYUT	
Orijinal Boyutları (mm)	4087x1787x1562

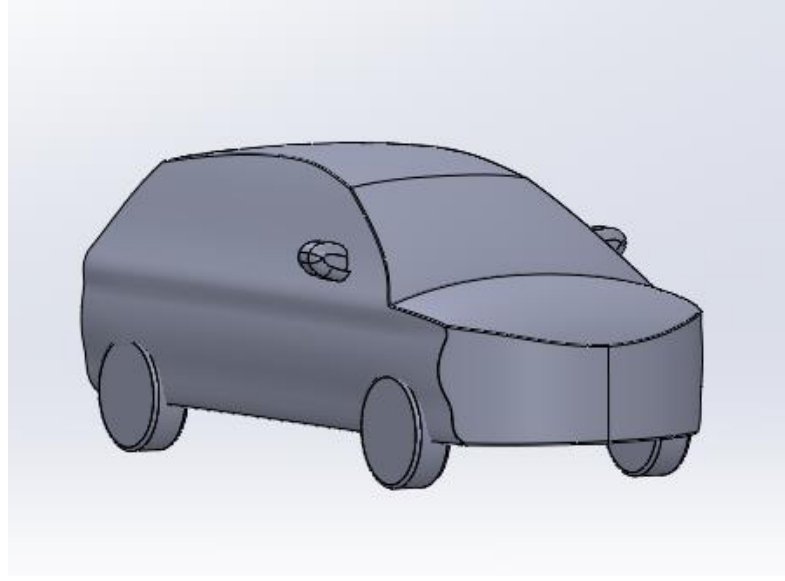


Şekil 3.1. Basitleştirilmiş otomobil modelinin görseli (Anonim IV)

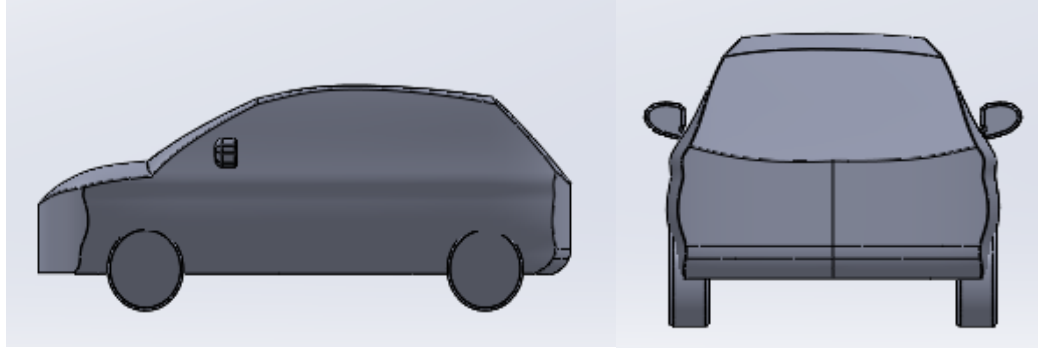
3.2. Tasarımın Geometrisi

SolidWorks, CAD programı kullanılarak ergonomik ve hızlı tasarımlar oluşturulur. Bu tasarımlar, ANSYS Fluent programında analiz için kullanılabilir. Tasarım süreci, önce tek boyutlu çizimlerin yapılmasıyla başlar ve ardından 3 boyutlu modeller oluşturulur. Bu çizimler, ölçülü teknik çizimlere dayanılarak gerçek boyutlarda çizilir. Son tasarımın malzeme türü, ANSYS Fluent'te atanacağı için SolidWorks'te belirtilmez.

Bu çalışmada kullanılan araç modelinin basitleştirilmiş geometrisi 1/1 ölçekte Solidworks programında çizilmiştir (Şekil 3.2, Şekil 3.3).



Şekil 3.2. Basitleştirilmiş SolidWorks çizimi perspektif görünümü: 1/1 ölçekli model otomobil



Şekil 3.3. Basitleştirilmiş SolidWorks yan ve arka görünümü: 1/1 ölçekli model otomobil

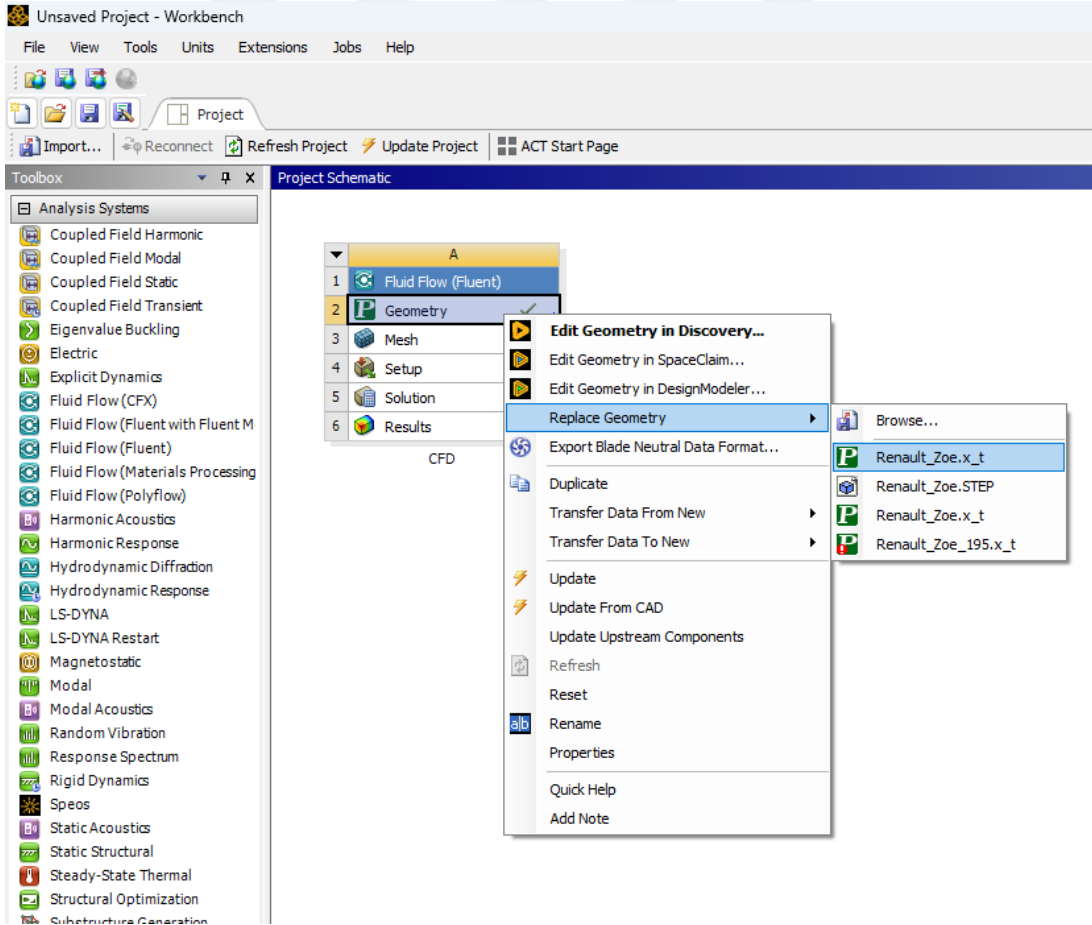
Çizilen basitleştirilmiş modelin 1/1 ölçekte tercih edilme sebebini kısaca açıklamak gerekirse: farklı ölçeklerde modellemeler yapmak, analiz sürecini etkileyen çeşitli faktörleri içerir. Her ölçek seçeneği, belirli avantajlar ve dezavantajlar sunar:

- 1/1 ölçekte modelleme, otomobilin gerçek boyutlarını kullanarak gerçek dünya koşullarına daha yakın sonuçlar elde etmenizi sağlar. Bu, tasarımın gerçek dünya uygulanabilirliği hakkında daha kesin bilgiler sunar.
- Gerçek boyutlu bir modelde yapılan analizler, kesin ölçümler ve sonuçlar elde etmenizi sağlar. Bu, aerodinamik performansın gerçek dünya koşullarına uygun olarak değerlendirilmesini sağlar.
- 1/1 ölçekte yapılan analizler, daha yüksek hassasiyet ve güvenilirlik düzeyine sahip olur. Bu da tasarım değişikliklerinin daha güvenilir bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanır.

- Gerçek boyutta modelleme, prototiplerin fiziksel olarak üretilmesine ve test edilmesine gerek duyulmadan, maliyet ve zaman tasarrufu sağlar.

Bu nedenlerle, elektrikli mini bir otomobilin aerodinamik performansının sayısal olarak incelenmesinde 1/1 ölçekte modelleme ve analiz yapmanın önemi büyüktür. Bu yaklaşım, tasarımın gerçek dünya koşullarında nasıl performans göstereceğini daha kesin bir şekilde anlamana yardımcı olur.

SolidWorks programında tasarlanmış modellerin ANSYS Fluent programına aktarılabilmesi için, çizimlerin .x_t uzantılı parasolid formatında kaydedilmesi gerekmektedir. Şekil 3.4'teki gibi, başlangıçta analiz türü olarak Fluid Flow (Fluent) seçeneği tercih edilmelidir. SolidWorks'te oluşturulan çizimin ANSYS Fluent yazılımında kullanılabilmesi için, Geometri > Import Geometri > Çizim Dosyası adımları izlenmelidir. Bu adımlar Şekil 3.4'te belirtilen şekilde gerçekleştirilmiştir.

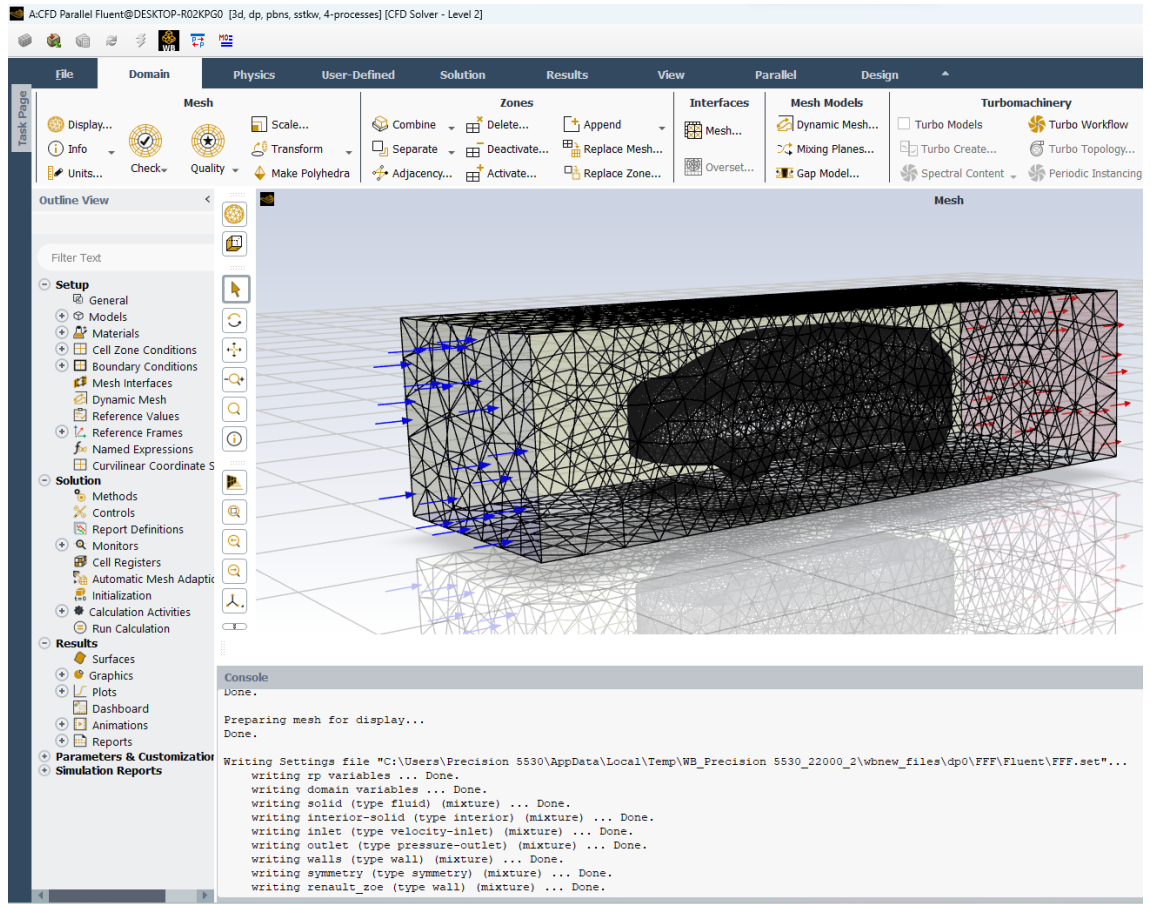


Şekil 3.4. Basitleştirilmiş modelin ANSYS Fluent programına entegrasyonu

3.3. ANSYS Fluent İncelemesi

Bu çalışmada, akış alanını sonlu hacimler yöntemi kullanarak sayısal olarak hesaplamak amacıyla ANSYS Fluent 2023 programı kullanılmıştır. Programın analizleri, akışın meydana geldiği bölgedeki ağ yapısının hassasiyetine bağlı olarak kullanılan bilgisayarın özelliklerine göre değişkenlik göstermektedir. Akışın boyutu, hücre sayısı, türbülanslı veya laminar olup olmadığı gibi etkenler de bu değişkenlikte etkilidir.

Akışın türbülanslı olduğu dikkate alınarak Standart k- ϵ modeli tercih edilmiştir ve blokaj oranı da % 9,88 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.5. ANSYS Fluent kullanıcı arayüzü ve görünümü

ANSYS Fluent, sonlu hacimler yöntemi kullanılarak yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri için kullanılan bir yazılım programıdır. 1983 yılından bu yana çeşitli endüstri dallarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. ANSYS Fluent, yüksek

teknolojiye sahip ticari bir CAD yazılımı olarak karmaşık ve zor problemlere etkili ve kolay çözümler sunarak dünya genelinde en çok tercih edilen yazılımlardan biri olmuştur.

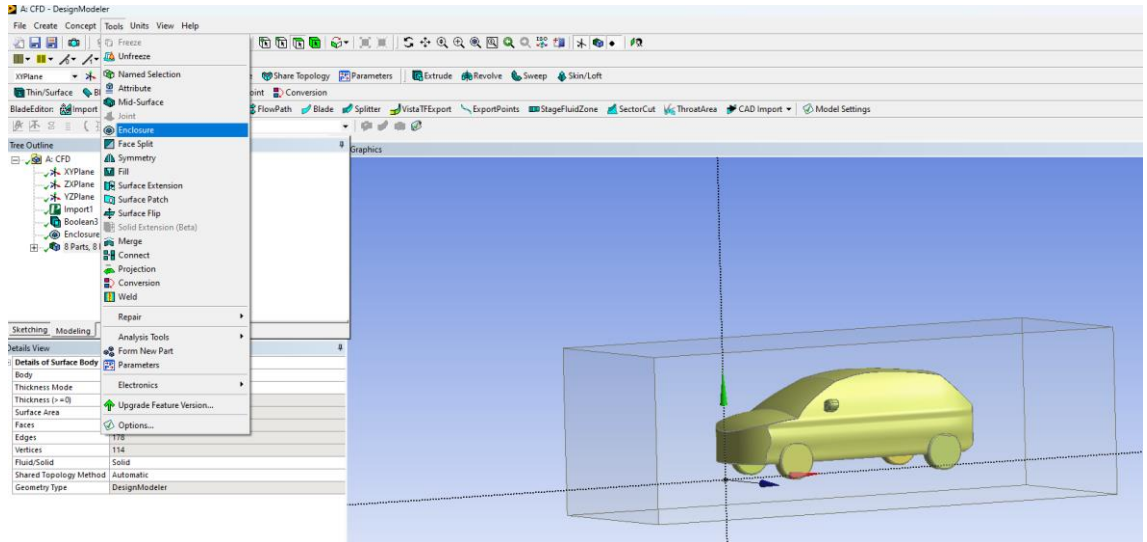
Programın kullanımında, çalışmanın seçimleri ve analizlerin yapıldığı ekran görüntüsü Şekil 3.5'te gösterilmektedir.

3.4. Akış Alanının Belirlenmesi (Enclosure)

ANSYS Fluent'e aktarılan modelin analizi için, modelin etrafında akış alanı oluşturulması gerekmektedir. Oluşturulan akış alanının modelin yüzeyine çok yakın olmaması, daha doğru analiz sonuçları elde etmek için düşük hata payı oranıyla oluşturulması önemlidir. Program arayüzünde, Şekil 3.6'da gösterildiği gibi "Tools > Enclosure" işlemi kullanılarak akış alanı oluşturulmuştur. Bu aşamada, oluşturulan tünelin boyutları "Details View" bölümünde x, y, z vektörleri için metre cinsinden değerler girilerek tanımlanmıştır. Bu değerler Çizelge 3.2'de belirtilmiştir.

Çizelge 3.2. Enclosure - Details View değerleri

Eksen	+x	-x	+y	-y	+z	-z	+x
Uzunluk	2	2	1	1	1	1	2



Şekil 3.6. Akış alanının modellenmesi ve tanımlanması

3.5. Ağ Yapısı ve Özellikleri (Mesh)

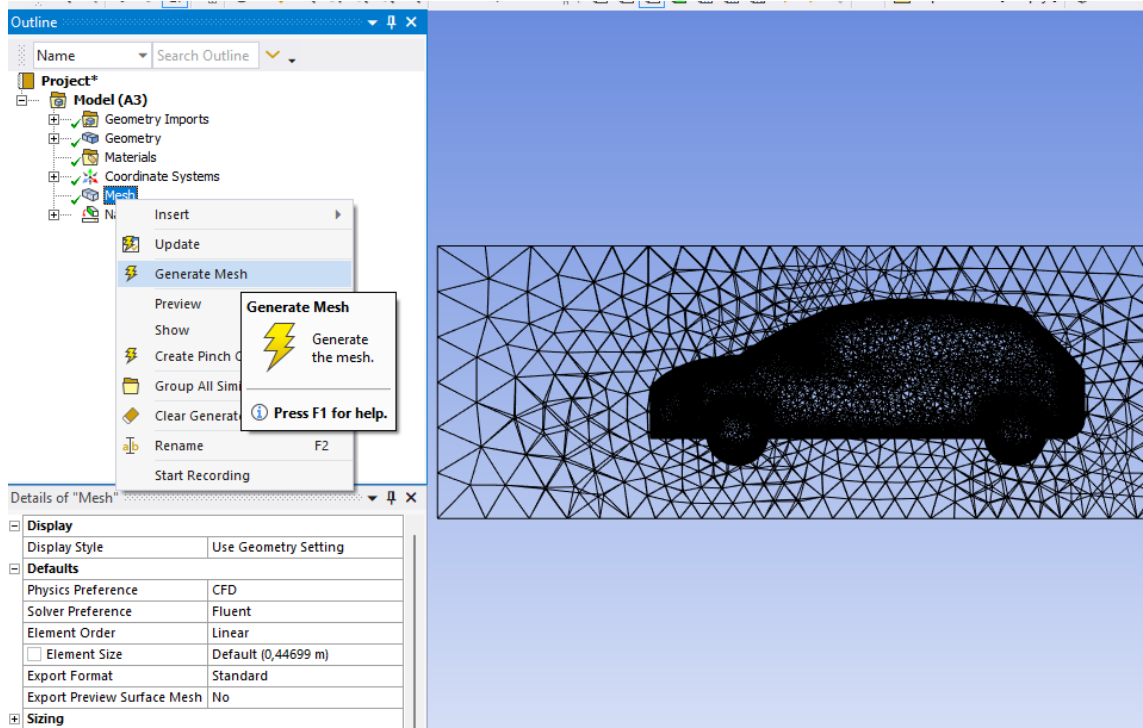
Mesh, karmaşık bir hacmi simülasyonun çalıştırabileceği küçük parçalara bölmek amacıyla kullanılan bir ağıdır ve genellikle noktalardan ve hücrelerden oluşur. Bu parçalar, analiz yapılan hacmin geometrisine ve mesh sıklığına bağlı olarak farklı boyutlara ve şekillere sahip olabilir. Hazır olan modelin mesh işlemine geçildiği görüntü Şekil 3.7’de gösterilmektedir.

Aracın yüzeyleri ve gövdesinden oluşan domain yüzeylerine hücreler yerleştirilmiştir. Özellikle aracın kıvrımlı bölgelerinde daha yoğun bir mesh uygulanması, daha detaylı analiz sonuçları elde edebilmek amacıyla tercih edilmiştir. Node ve element sayıları Çizelge 3.3’te belirtilmiştir.

Çizelge 3.3. Mesh node ve element sayısı

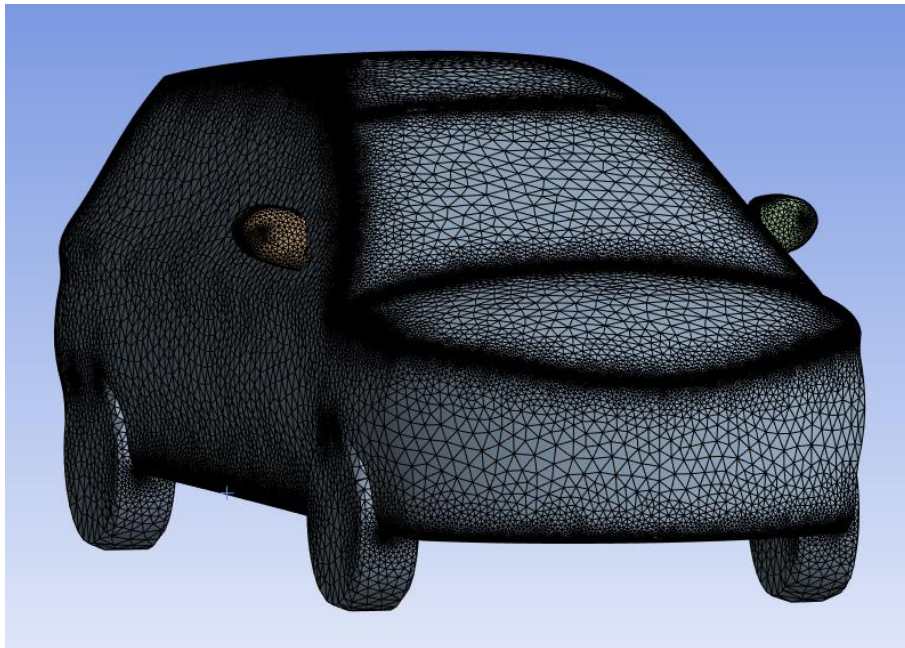
Nodes	705895
Elements	496268

Modelin program içerisine yüklenmesi ve akış alanının oluşturulmasından sonra yapılan işlemler kaydedilerek mesh işlemine geçilmiştir. Mesh işlemine başlamadan önce daha hassas sonuç elde etmek için ‘‘Details of mesh’’ araç kutusunda yer alan ‘‘Element Order = Quadrati’’ seçeneği belirlenmiştir. Ayrıca ‘‘Mesh Metric = Orthogonal Quality’’ seçeneği belirlenmiştir sebebi ise kısaca: ‘‘Orthogonal Quality’’ metriği, analizde kullanılan meshin elemanlarının birbirine dik açılarda olup olmadığını ölçer. Bu metriği seçmek, daha doğru sonuçlar elde etmeye, hızlı yakınsama sağlamaya ve analizde kararlılık sorunlarını azaltmaya yardımcı olur. Yani, analizde kullanılan meshin kalitesini değerlendirmek ve daha güvenilir sonuçlar elde etmek için ‘‘Orthogonal Quality’’ metriği tercih edilir. Bu adımlar, aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi uygulanmıştır. ”

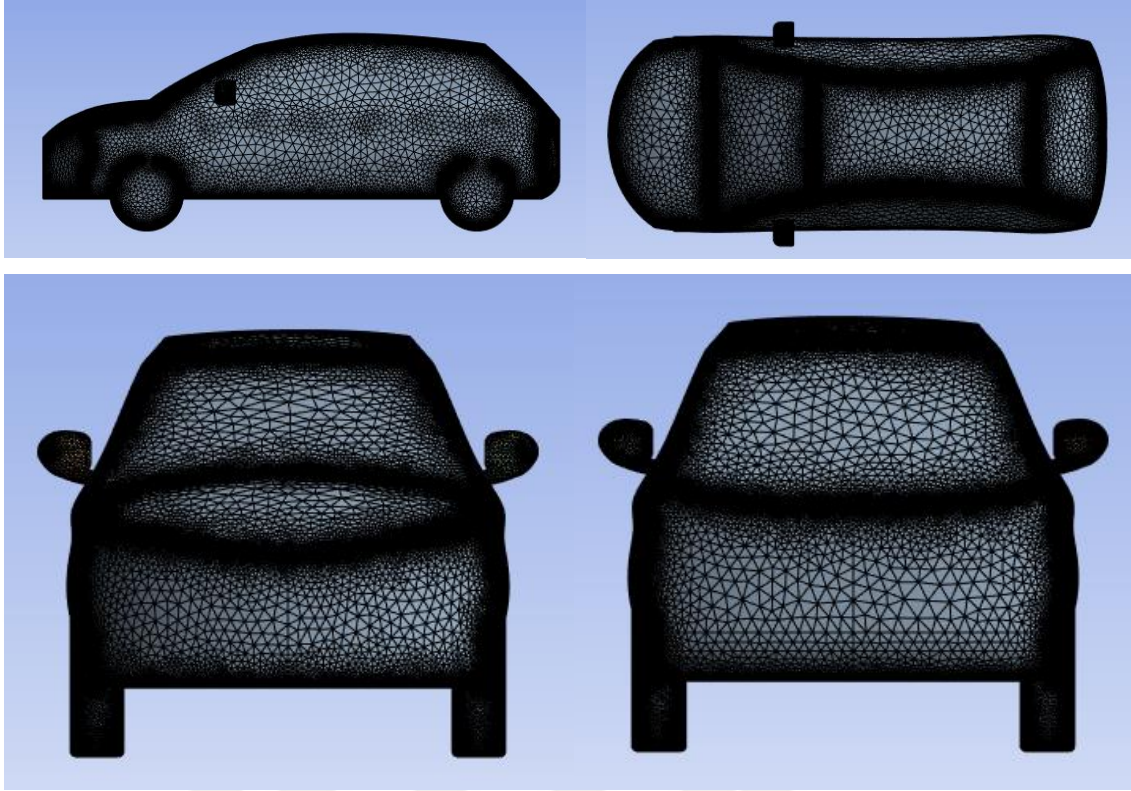


Şekil 3.7. Mesh oluşturma ve ağ yapısı analizi

Mesh işlemi, analiz sürecinde bilgisayarın en yoğun şekilde kullanıldığı adımlardan biridir. Bu yüzden, modelin geometrik boyutları, seçilen mesh yoğunluğu ve kullanılan bilgisayarın işlemci performansı gibi faktörlere bağlı olarak süre uzayabilir. Şekil 3.8 ve şekil 3.9’da farklı görünümde model ağı gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Modeldeki ağ yapısının izometrik görünümü



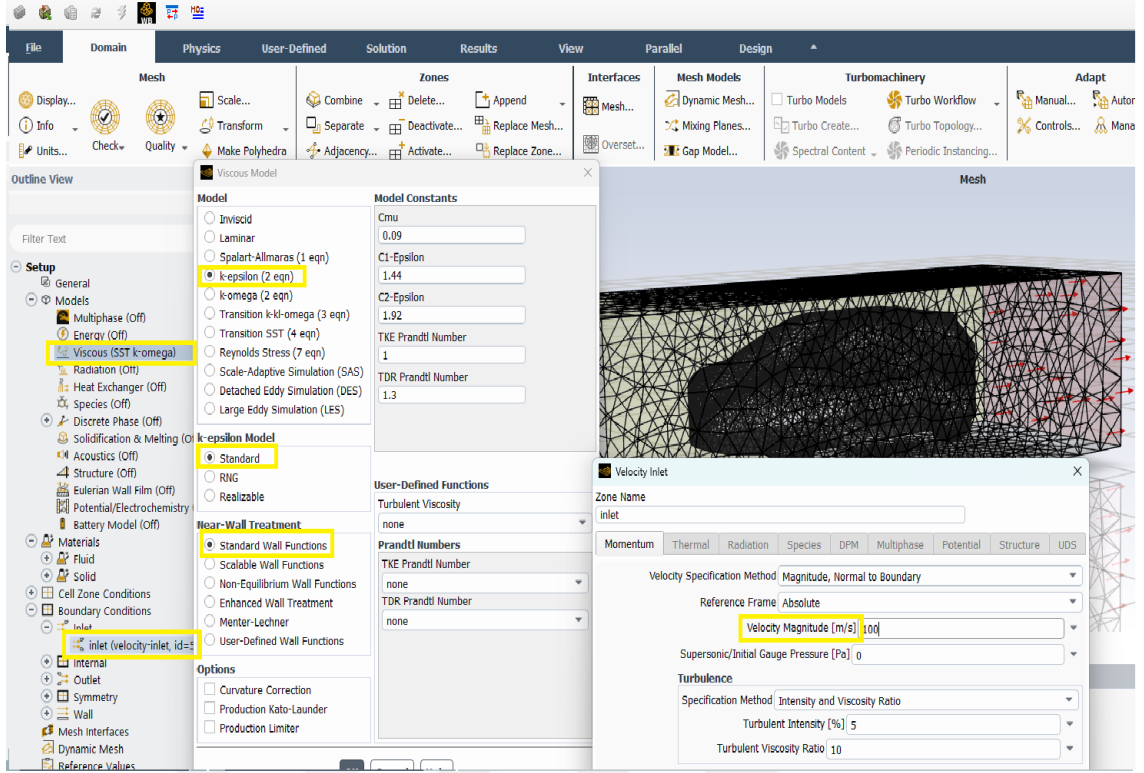
Şekil 3.9. Modeldeki ağ yapısının dört taraftan görünümü

3.6. Sınır Şartları

Ağ yapısı oluşturulduktan sonra, analiz koşullarının belirlenmesi için Şekil 3.10'daki gibi sınır şartları bilgileri girmek gerekmektedir. Sınır şartları, yapılan analiz türüne uygun olarak seçilirken, en iyi sonuçlara ulaşabilmek amacıyla önceden benzer çalışmalarda kullanılan parametreler göz önünde bulundurulmuştur. Bu sınır şartları, Çizelge 3.4'te belirtildiği şekilde tanımlanmıştır.

Çizelge 3.4. Sınır Şartları

Sınır Şartları	
Giriş (Hız)	100 km/h
Çıkış (Basınç)	0 kpa
Katı (Malzeme)	Alüminyum
Akışkan (Madde)	Hava
Türbülans Modeli	k-epsilon 2 eqn
Duvar Modeli	Standart duvar fonksiyonu
İterasyon Sayısı	200



Şekil 3.10. ANSYS Fluent programında sınır Şartlarının tanımlanması

3.7. Hızın Aerodinamik Performansa Etkisi ve Yakıt Verimliliği Üzerindeki Rolü

Hız ve sürüklenme katsayısı (C_D) arasında bir ilişki söz konusudur. Hız arttıkça hava akışı aracın yüzeyleri üzerinden daha hızlı geçer. Bu durum, Bernoulli prensibi ve akışkan dinamiği etkileri nedeniyle sürüklenme kuvvetini etkiler.

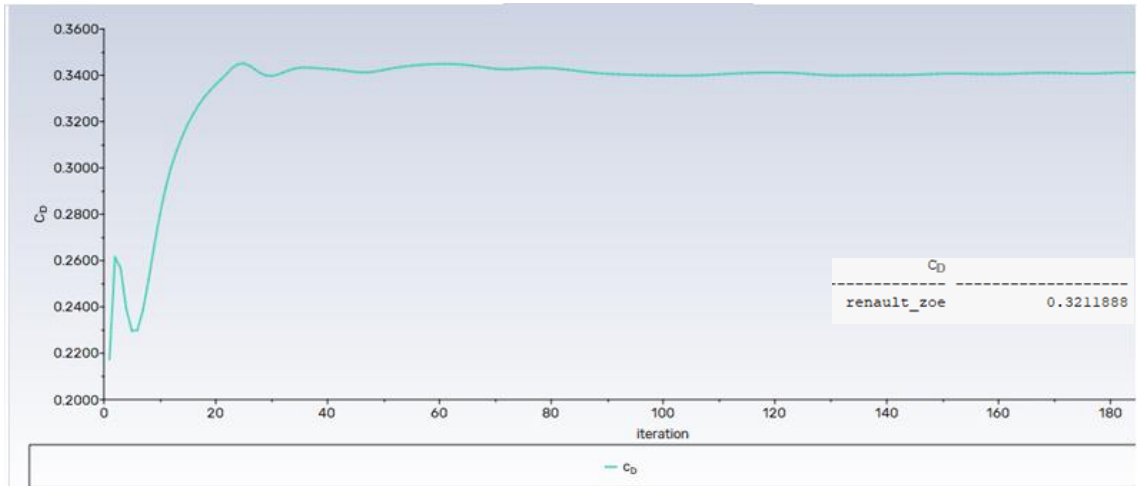
Bernoulli prensibi, akışkanın hızının arttıkça basıncın düştüğünü ifade eder. Hız arttıkça, akışkan moleküllerinin daha hızlı hareket etmesi nedeniyle aracın yüzeyi ile akışkan arasında daha düşük basınç oluşur. Bu düşük basınç, yüzeyin üst tarafından daha yüksek basınca doğru bir kuvvet oluşturur. Bu durum aracın yüzeyine yakın bir hava tabakasının oluşmasına neden olur. Bu hava tabakası, laminar akış durumunda daha düzgün ve az sürtünmeli bir akışa izin verir.

Sürüklenme kuvveti, hava akışının aracın yüzeyleri üzerinde yarattığı sürtünme ve basınç farklarının sonucunda oluşur. Hız arttıkça, akışkanın yüzeylere yapışma etkisi azalır ve akışkan daha az direnç yaratır. Aynı zamanda daha hızlı akış, sürüklenme kuvvetini azaltıcı bir etki oluşturur. Bu nedenle, hız arttıkça sürüklenme kuvveti düşer ve sürüklenme katsayısı azalır.

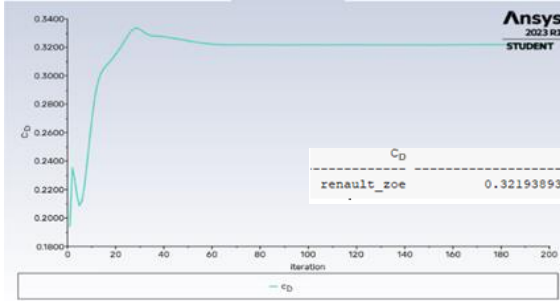
Ancak, bu durum hız arttıkça sonsuz bir şekilde devam etmez. Belirli bir hıza kadar (tipik olarak transonik hızlarda), hız arttıkça sürüklenme katsayısı düşer. Ancak, bu noktadan sonra hızın artması, şok dalgalarının oluşmasına ve sürüklenme katsayısının artmasına neden olabilir.

Genel olarak, aerodinamik prensiplerle birlikte hızın sürüklenme katsayısına etkisi karmaşık bir ilişki içerir. Hız arttıkça sürüklenme kuvveti düşer, ancak bu durum belirli hız aralıklarında geçerlidir ve bazı hızlarda tersine dönebilir.

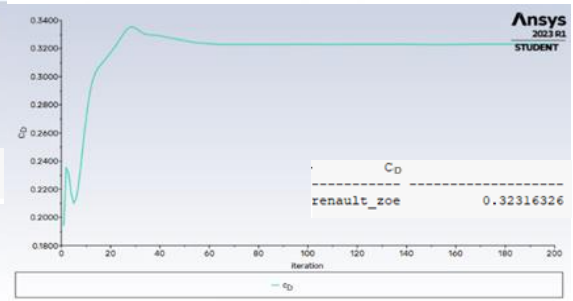
Başka bir deyişle aerodinamik tasarımın etkili olduğu durumlarda, yüksek hızlarda sürüklenme katsayısı düşer ve yakıt verimliliği artar. Bu durum, aerodinamik tasarımın ve aracın şeklinin önemini vurgular. Akıcı hatlara sahip ve düşük hava direncine sahip bir araç, yüksek hızlarda daha az enerji harcar ve daha iyi yakıt verimliliği sağlar (Şekil 3.11, Şekil 3.12). Aynı zamanda kapalı gövde tasarımı, hava akımını düzenlemek ve türbülansı azaltmak için kullanılır. Tekerlek boşluklarını kaplamak veya örtmek gibi ek önlemler de sürüklenme katsayısını düşürerek yakıt tasarrufu sağlayabilir. Tüm bu faktörler bir araya geldiğinde, araç yüksek hızlarda daha az enerji tüketir ve daha etkili bir şekilde ilerler.



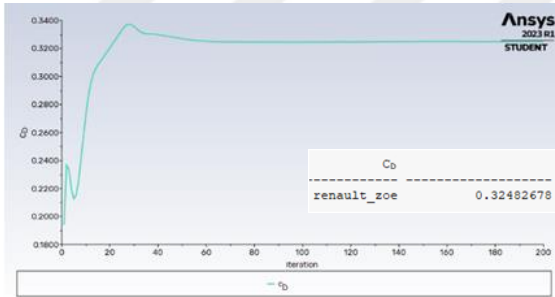
d) 100 (km/h)



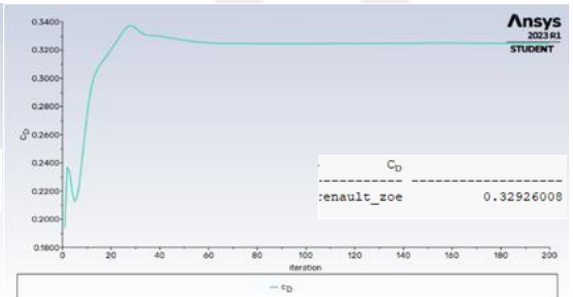
b) 80 (km/h)



c) 60 (km/h)



d) 40 (km/h)



e) 20 (km/h)

Şekil 3.11. Farklı hızlarda sürüklenme katsayısı değişimi (C_D)

Hız ve kaldırma katsayısı (C_L) arasındaki ilişki ise kaldırma katsayısı, bir cismin üretilen kaldırma kuvvetini aerodinamik olarak ifade eden bir değerdir. Denklem (3.1) ile ifade edilir.

$$C_L = \frac{L}{0.5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S} \quad (3.1)$$

Burada;

C_L : Kaldırma katsayısı

L : Üretilen kaldırma kuvveti

ρ : Hava yoğunluğu

V : Akış hızı (hız)

S : Kanat veya yüzey alanı

Bu denklem, gösteriyor ki kaldırma katsayısı hava hızının karesine doğru artar. Yani hız arttıkça kaldırma katsayısı da artar. Bu ilişki, uçakların havalanma ve seyir sırasındaki performansını etkiler.

Ancak, bu ilişki lineer değildir ve belirli bir hızdan sonra kaldırma katsayısı artışı yavaşlar. Bu nedenle daha yüksek hızlarda daha fazla kaldırma kuvveti üretmek için büyük değişikliklere ihtiyaç duyulur. Ayrıca, aşırı hızlarda kaldırma katsayısı artışı durmakta veya hatta azalmaktadır, çünkü aerodinamik etkiler değişebilmektedir.

Hız ve sürüklenme (drag) kuvveti arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Bu ilişki, aerodinamiğin temel prensiplerinden birini oluşturur. Hızın artması, sürüklenme kuvvetinin karesiyle doğru orantılı olarak artar. Denklem (3.2) ile ifade edilir.

$$D \propto V^2 \quad (3.2)$$

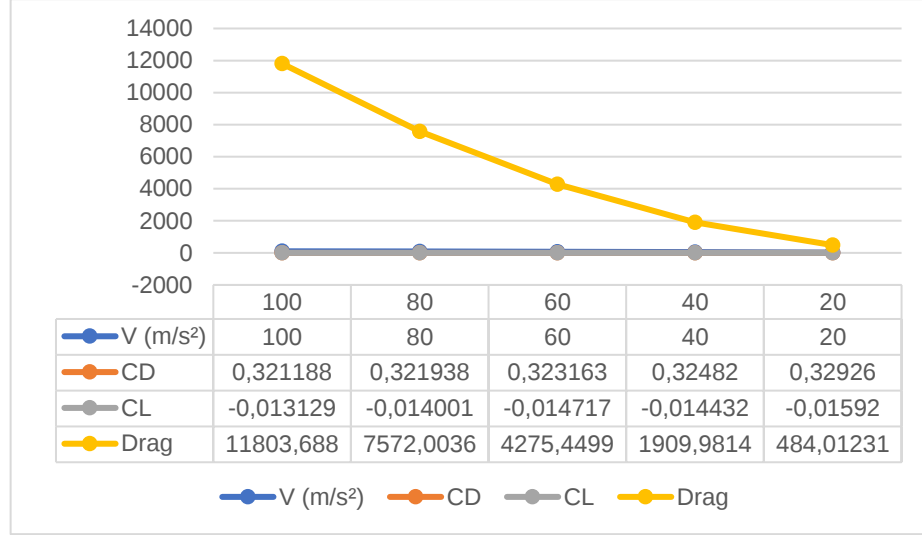
Burada;

D : Sürüklenme kuvveti

V : Hız (akışkanın göreceli hızı)

Yukarıdaki denklem, sürüklenme kuvvetinin hızın karesiyle arttığını gösterir. Bu nedenle, hız arttıkça sürüklenme kuvveti daha hızlı bir şekilde artar. Bu ilişki, yüksek hızlarda daha fazla sürüklenme kuvvetine yol açar.

Bu prensip, aerodinamik tasarımın önemini vurgular. Taşıtların aerodinamik olarak daha optimize edilmiş olmaları, yüksek hızlarda daha düşük sürüklenme kuvvetiyle sonuçlanır. Bu da daha verimli ve enerji tasarruflu taşıtların tasarımını destekler.



Şekil 3.12. Hız, CD, CL ve Drag değerlerinin değişimi

3.8. Duvar Yaklaşımı

Hız profili çözümlemesi için sınır tabakasında duvar fonksiyonları kullanılmaktadır. ANSYS Fluent programında iki tür duvar fonksiyonu bulunmaktadır: standart duvar fonksiyonları ve dengede olmayan duvar fonksiyonları. Standart duvar fonksiyonları, sınır tabakasındaki gradyanları çözmek için algoritma kullanarak akışları tam türbülanslı kabul eder. Dengede olmayan duvar fonksiyonları ise basınç gradyanlarının hassasiyetini artırarak daha yüksek performans sağlar. Bu fonksiyon, karmaşık ve tekrarlayan akış ayrılmalarının sıkça görüldüğü alanlarda daha iyi hesaplamalar yapabilme yeteneğinden dolayı tercih edilir. Bu yetenek, basınç gradyanlarının etkilerini dikkate alma kabiliyetine dayanmaktadır.

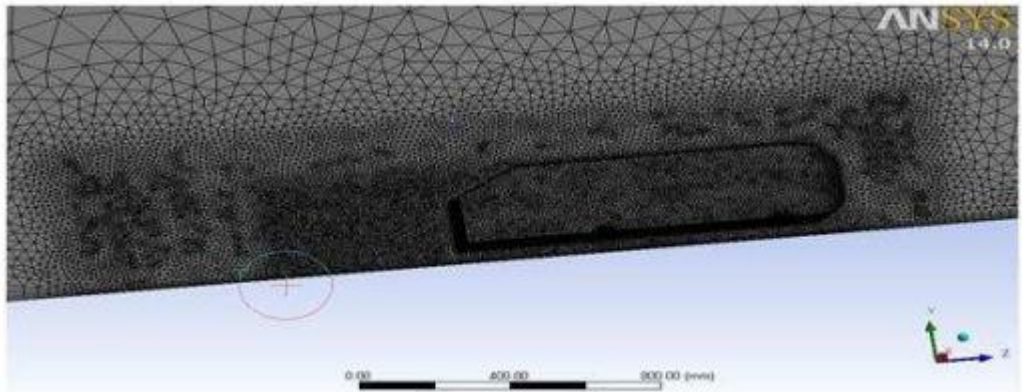
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Ahmed Gövdesi Arka Eğim Açısının Aerodinamik Performansa Etkisi: Yeniden Tasarım ve Analiz

Bu araştırma, Banga ve ark. (2015) yaptığı çalışmayı temel alarak gerçekleştirilen bir doğrulama çalışmasını sunmaktadır. Banga ve ark. çalışmasının Ahmed gövdesi modeli üzerine etkilerini incelediği belirtilen çalışma, ilgili literatürde önemli bir yer tutmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada Banga ve ark. (2015)'te kullanılan model üzerinde aynı analizler gerçekleştirilmiştir. Banga ve ark. (2015) karayolu araçlarının aerodinamik performansını artırmak için Ahmed gövdesinin arka eğim açısının etkisini araştırmışlardır. Bu amaç doğrultusunda, Ahmed Referans Modeli'nin basitleştirilmiş araç geometrisi kullanılarak, sayısal simülasyon teknikleri kullanılarak arka eğim açısının drag ve lift katsayıları üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Çalışmanın sonuçlarına göre, Ahmed gövdesinin arka eğim açısının değişimi, drag ve lift katsayıları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, araçların aerodinamik performansını artırmak için arka eğim açısının optimize edilmesi gerekmektedir. Sayısal simülasyon teknikleri kullanılarak en az drag için optimum arka eğim açısı belirlenebilir.

Çalışmanın sonuçlarına göre, en az drag için optimum arka eğim açısı 7,5 derecedir. Bu açı, Ahmed gövdesinin arka eğim açısının 0-40 derece arasında değiştiği 10 farklı manipülasyon için hesaplanmıştır. Ayrıca, çalışma, arka eğim açısının 30 dereceye kadar olan bağlı akış aralığında en az drag için optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.



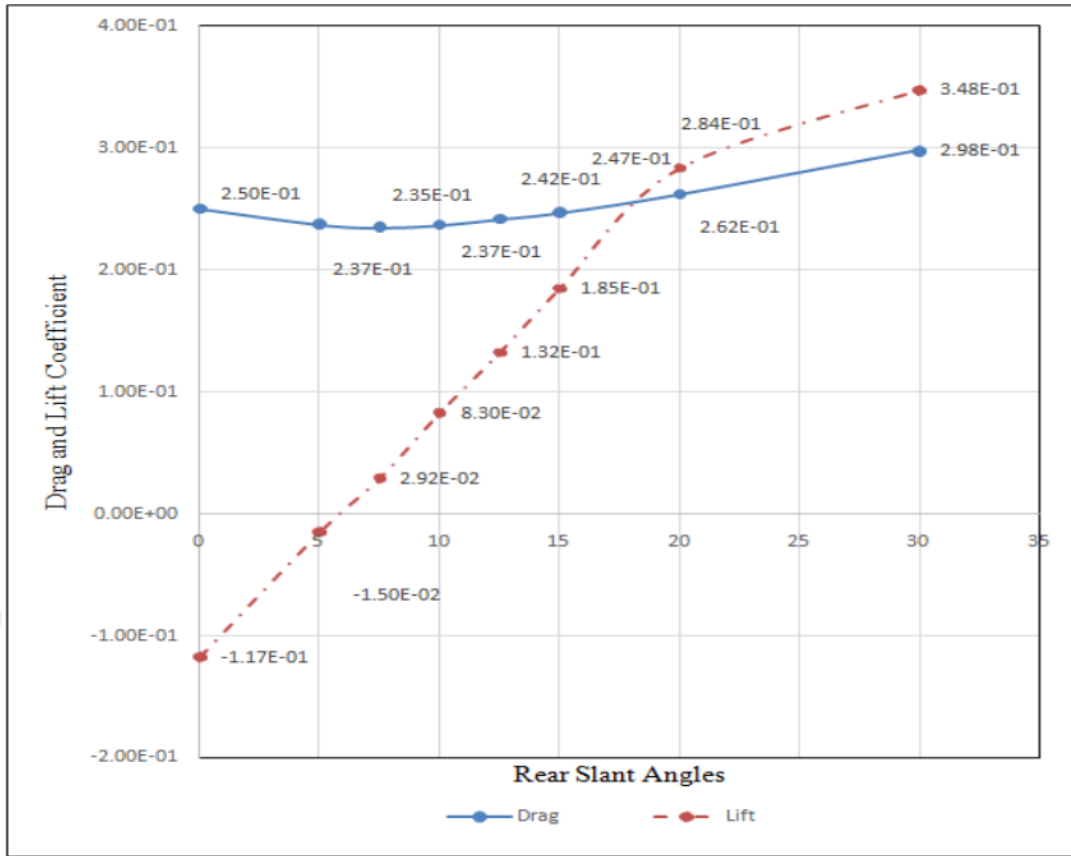
Şekil 4.1. Ahmed gövdesinin ağ yapısı (Banga ve ark., 2015)

Çizelge 4.1’de Ahmed gövdesinin arka eğim açısının 0 ile 40 derece arasında değişen 10 farklı manipülasyonu için sürüklenme ve kaldırma katsayıları hesaplanmıştır. Minimum sürüklenme, akışın 30°’ye kadar olan bağlı akış açıları aralığında bulunan $\theta = 7,5$ derece arka eğim açısında elde edilmiştir. Bundan sonra, akış arka eğimde bağlı olmamaya başlar ve buna bağlı olarak sürüklenme ve kaldırma değerleri rastgele dağılmaya başlar (Banga ve ark., 2015).

Çizelge 4.1. Ahmed Gövdesinin Arka Eğim Açısının Değişimi, Drag ve Lift Katsayıları (Banga ve ark., 2015)

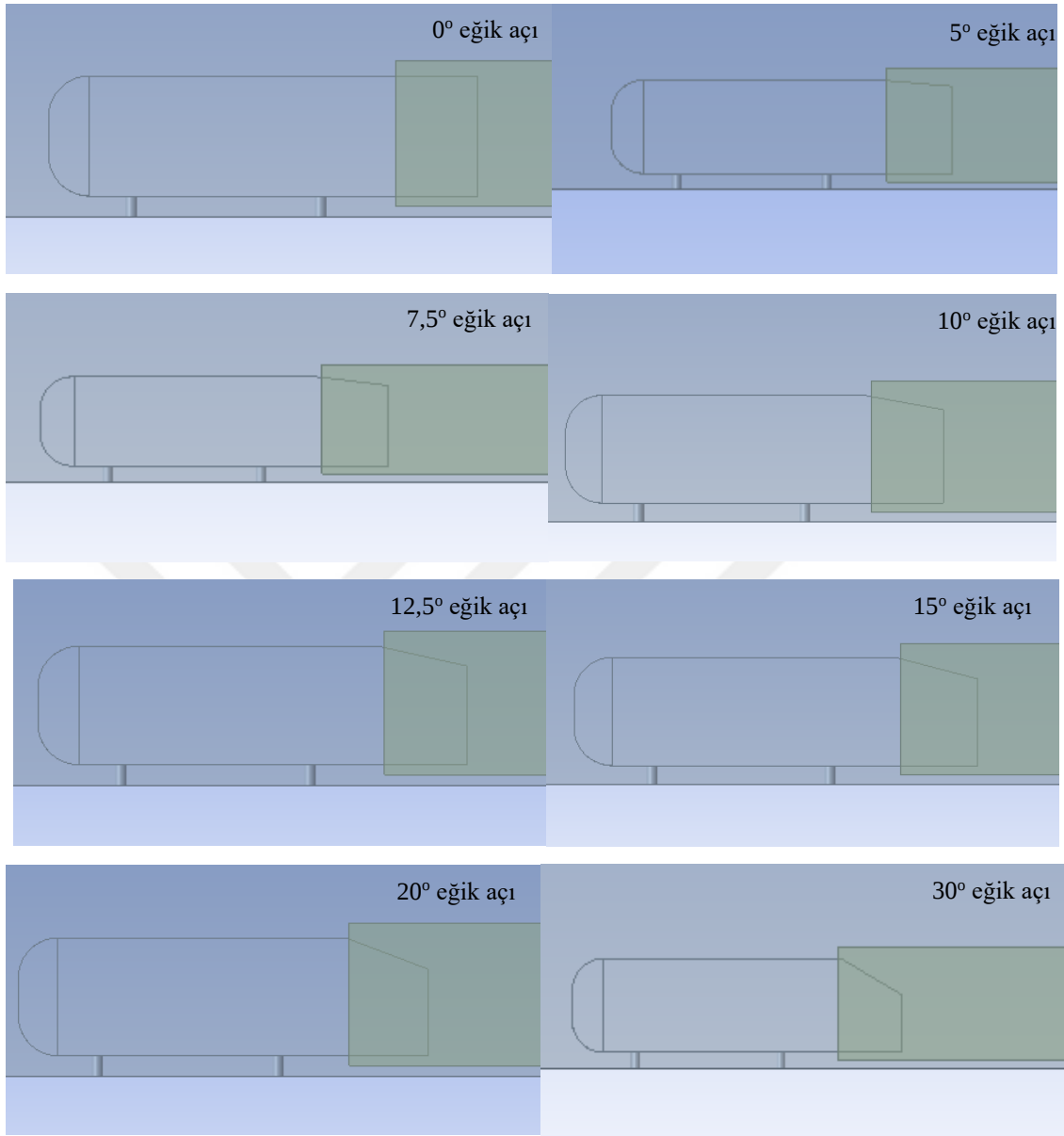
Rear slant angle (ϕ) (In degrees)	CD	CL
0	2,50031E-01	-1,17457E-01
5	2,37215E-01	-1,49709E-01
7,5	2,34631E-01	2,92149E-02
10	2,36738E-01	8,29710E-02
12,5	2,41644E-01	1,32483E-01
15	2,46833E-01	1,85001E-01
20	2,61934E-01	2,83622E-01
30	2,97872E-01	3,47783E-01
35	2,94980E-01	2,05502E-01
40	2,50360E-01	8,36791E-01

Sürüklenme ve kaldırma katsayıları bir grafik üzerine çizilmiştir (Şekil 4.2). Kaldırma katsayısının 0 ila 20 derece arasında değişen arka eğim açısı için lineer bir artış eğilimi izlediği gözlemlenmektedir. Minimum pozitif kaldırma değeri olan 0.0292, 7,5 derece arka eğim açısı için elde edilmiştir. Ayrıca, sürüklenme katsayısı 0’dan 7,5 dereceye kadar olan arka eğim açısı arttıkça azalır, burada 0,2346 minimum değerine ulaşır ve ardından 30 dereceye kadar artmaya devam eder. 30 derecenin ötesinde, akış ayrılması meydana gelir ve açıkça sürüklenme ve kaldırma katsayıları rasgele olarak dağılır.



Şekil 4.2. Ahmed gövdesinin C_D ve C_L 'nin arka eğim açısı ile değişimi (Banga ve ark., 2015)

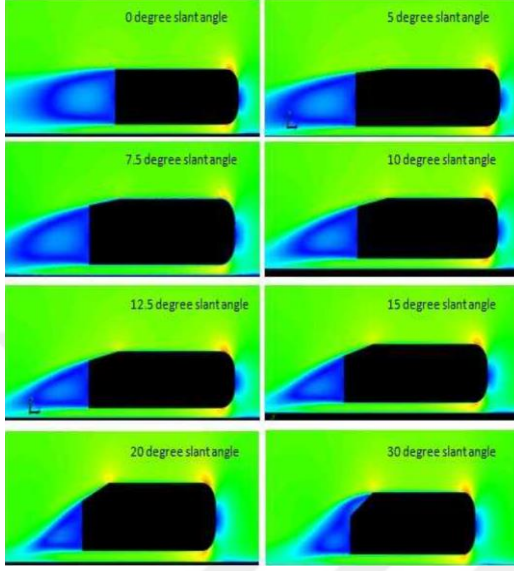
Bu çalışma, referans alınan tezde sunulan Ahmed Gövdesi geometrisini kullanıp aerodinamik analiz yapmayı amaçlayarak 0° ile 40° olarak değişen değerlerle yeniden tasarlandı ve SolidWorks programı kullanılarak çizildi. Referans çalışmadaki parametreler, ANSYS Fluent yazılımında sayısal olarak analiz edilirken kullanıldı. Hız değeri sabit olarak 40 km/h olarak ayarlandı (Şekil 4.3).



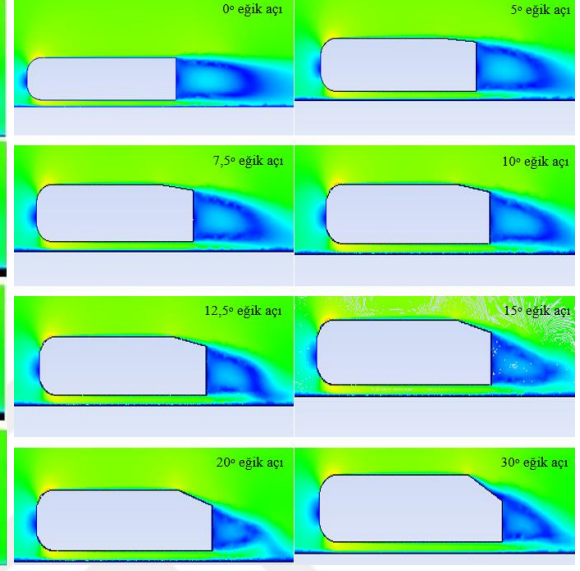
Şekil 4.3. Ahmed gövdesinin arka eğim açısı modelleri

Banga ve ark. (2015) bu çalışmada, Ahmed gövdesinin farklı kesitlerindeki hava hızının nasıl değiştiğini göstermektedirler (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5). Yeşil, mavi ve kırmızı bölgeler hızı ve basıncı temsil etmektedir. Hız konturları, aracın arkasındaki hava akışının arka eğim açısı arttıkça form sürüklemeye katsayısının azaldığını gösteriyor. Ancak aynı zamanda arka eğim açısı arttıkça kaldırma kuvvetinin de arttığı ve bunun daha fazla kaldırma kaynaklı sürüklemeye anlamına geldiği görülmektedir. Bu nedenle, minimum sürüklemeye katsayısını bulmak için bu iki sürüklemeye mekanizması arasında bir denge

sağlanmaktadır. Uyanık alanın azalması, sürüklenme oluşturan girdapların daha yakın hale gelmesine ve dolayısıyla motordan daha az enerji gerektiren bir akış oluşturulmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak bu durum da daha az form sürüklenme anlamına gelmektedir.



Şekil 4.4. Farklı arka eğim açılarında hız konturu (Banga ve ark., 2015)



Şekil 4.5. Farklı arka eğim açılarında hız konturu

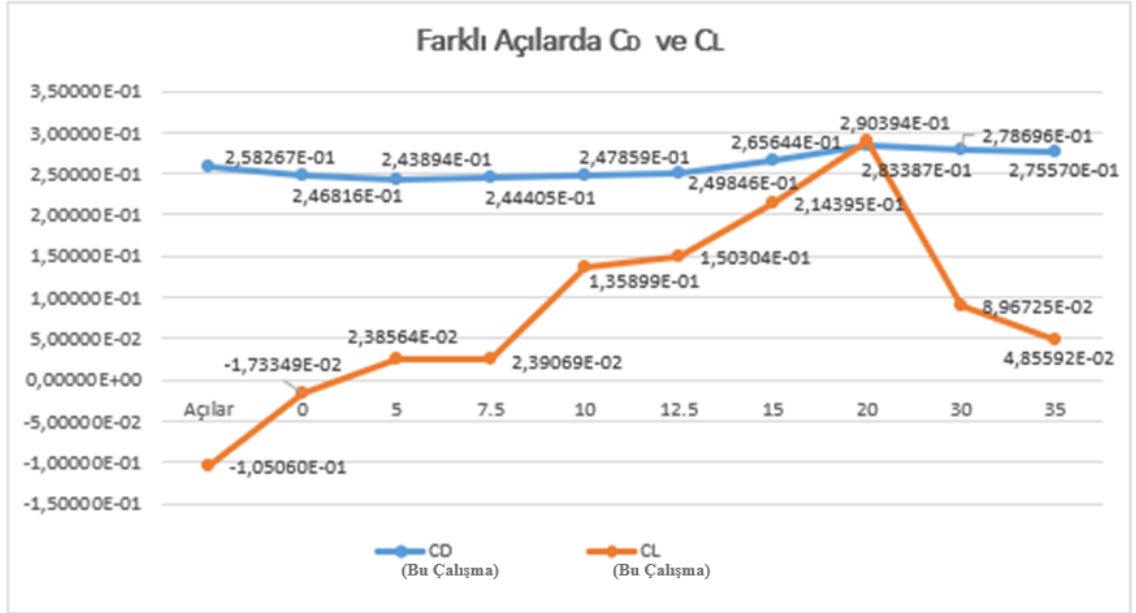
Banga ve ark. (2015) çalışmasındaki Ahmed Body konfigürasyonu için sürüklenme (C_D) ve kaldırma (C_L) katsayılarına dair verileri ele aldığımızda, 7,5 derece arka eğim açısına sahip konfigürasyonun C_D değeri 0,2346 ve C_L değeri 0,0292 olarak belirlenmiştir. Bu orijinal değerler, literatürde kabul gören ve referans olarak kullanılan değerlerdir.

Bu çalışmada, aynı 7,5 derece arka eğim açısına sahip konfigürasyon için sürüklenme ve kaldırma katsayıları tekrar belirlendi. Sonuç olarak, C_D değeri için 0,2438 ve C_L değeri için 0,0238 değerleri elde edildi. Bu sonuçlar, orijinal tezdeki değerlere oldukça yakın sonuçlar elde edildiğini göstermektedir. Şekil 4.6'da Ahmed gövdesinin arka eğim açısı ve C_D - C_L değişimi gösterilmiştir.

Çizelge 4.2'de, referans çalışma ile bu çalışmada elde edilen değerlerin bir karşılaştırılması verilmiştir. İki çalışma arasındaki farkları gösteren hata oranları hesaplanmış ayrıca sunulmuştur. Karşılaştırmalar, bu çalışmadaki analiz sonuçlarının referans çalışmanın sonuçlarına yakın olduğunu göstermektedir. Her iki çalışma arasındaki hata oranları, önemli bir doğruluk düzeyinde olduğunu göstermektedir.

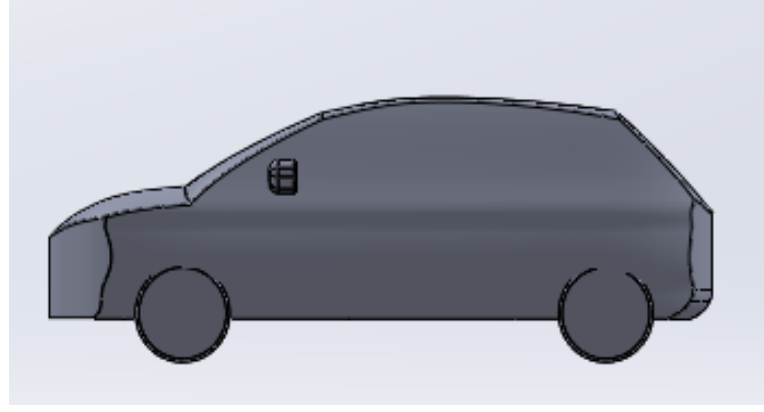
Çizelge 4.2. Ahmed gövdesinin arka eğim açısı, C_D - C_L değişimi ve iki çalışma arasındaki hata oranı

Açılar	C_D (Bu Çalışma)	C_L (Bu Çalışma)	C_D (Banga ve ark., 2015)	C_L (Banga ve ark., 2015)	Hata Oranı (C_D)
0	2,58267E-01	-1,05060E-01	2,50031E-01	-1,17457E-01	3%
5	2,46816E-01	-1,73349E-02	2,37215E-01	-1,49709E-01	4%
7,5	2,43894E-01	2,38564E-02	2,34631E-01	2,92149E-02	4%
10	2,44405E-01	2,39069E-02	2,36738E-01	8,29710E-02	3%
12,5	2,47859E-01	1,35899E-01	2,41644E-01	1,32483E-01	3%
15	2,49846E-01	1,50304E-01	2,46833E-01	1,85001E-01	1%
20	2,65644E-01	2,14395E-01	2,61934E-01	2,83622E-01	1%
30	2,83387E-01	2,90394E-01	2,97872E-01	3,47783E-01	-5%
35	2,78696E-01	8,96725E-02	2,94980E-01	2,05502E-01	-6%
40	2,75702E-01	4,85592E-02	2,50360E-01	8,36791E-01	9%

**Şekil 4.6.** Ahmed gövdesinin arka eğim açısı ve C_D - C_L değişimi

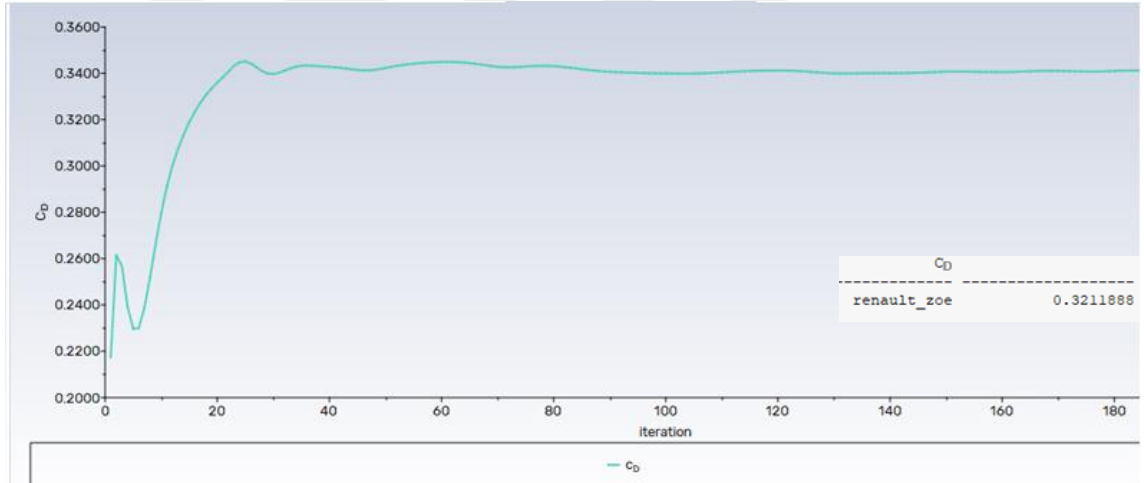
4.2. Tasarımın Geliştirilmesi ve Analiz Süreçleri

Bu çalışmada, 1/1 ölçekte basitleştirilmiş bir geometri ile çizilen taşıt modeli üzerinde çeşitli iyileştirmeler yapılmıştır. Her bir iyileştirme sonrasında elde edilen yeni prototip, aynı sınır koşulları altında ANSYS Fluent'te tekrar analiz edilerek C_D (sürüklenme katsayısı) değişiklikleri gözlemlenmiştir.



Şekil 4.7. Basitleştirilmiş orijinal (prototip) model (Model 1)

Şekil 4.7’de Model 1, herhangi bir değişiklik yapılmadan 1/1 ölçekte çizilen Basitleştirilmiş orijinal modeli temsil etmektedir. Şekil 4.8’de ise yapılan analiz sonrasında elde edilen C_D değeri grafiği görülmektedir.



Şekil 4.8. Basitleştirilmiş orijinal (prototip) model (Model 1) için 100 m/sn’de C_D değişimi

Aerodinamik incelemeler, havacılık ve taşıtların tasarımında önemli bir rol oynar. Geometrik iyileştirme ve analizler, taşıt yüzeylerinin şekillerini optimize etmek ve aerodinamik performanslarını artırmak amacıyla kullanılan kritik süreçleri kapsar. Bu çalışmalar, taşıtların hava akımına daha iyi adapte olmalarını sağlayarak enerji verimliliğini artırmakta, aerodinamik direnci azaltmakta veya yüksek hızlarda daha istikrarlı bir performans sergilemeyi hedeflemektedir.

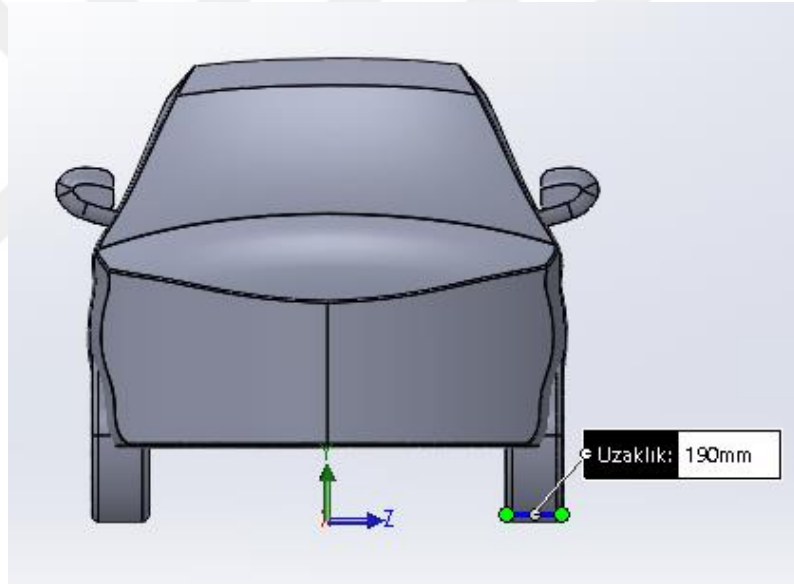
Geometrik iyileştirme ve analizler genellikle deneysel çalışmalar ve sayısal simülasyonlarla desteklenir. Sayısal simülasyonlar, farklı geometrik varyasyonların taşıtın aerodinamik davranışına etkilerini hızlı ve maliyet etkin bir şekilde

değerlendirmeye yardımcı olmaktadır. Bu yöntemler, taşıt yüzeylerinin konturları, kenar detayları ve yüzey pürüzlülükleri gibi parametrelerde yapılan değişikliklerin aerodinamik sonuçları üzerindeki etkilerini analiz etmeyi amaçlar.

Ayrıca, bu tür iyileştirme çalışmaları sadece hızlı taşıtlar için değil, aynı zamanda uçaklar, otomobiller, trenler gibi farklı taşıt türleri için de önemlidir. Bu tür analizler, taşıt tasarımında yapısal bütünlüğün korunmasını sağlayarak hem aerodinamik performansı artırır hem de güvenliği en üst düzeyde tutmayı amaçlar.

Sonuç olarak, aerodinamik incelemeler için geometrik iyileştirme ve analizler, taşıt tasarımının kritik bir parçasını oluşturur. Bu çalışmalar, gelecekte daha verimli, çevre dostu ve yüksek performanslı taşıtların geliştirilmesine katkı sağlayabilmektedir.

4.2.1. Tekerlek Kalınlığının Optimize Edilmesiyle Sağlanan Aerodinamik İyileştirme

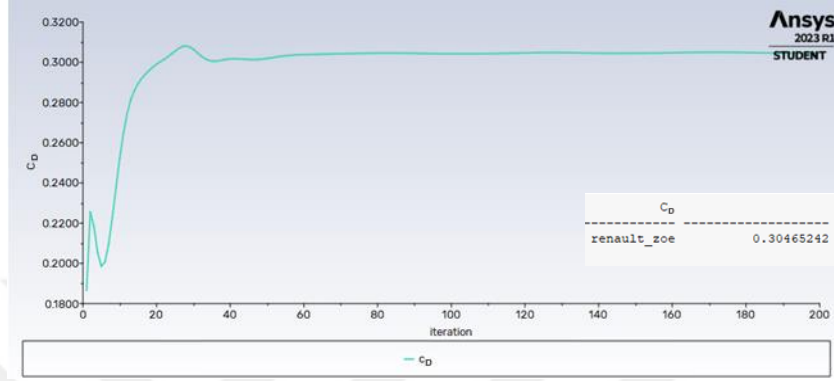


Şekil 4.9. Düşük tekerlek kalınlığına sahip model (190 mm)

Tekerlekler, bir aracın aerodinamik performansını etkileyen önemli unsurlardır. Tekerleklerin genişliği ve tasarımı, aracın hava akışıyla etkileşimini belirler. Tekerleklerin etrafındaki hava akımı, aracın gövdesiyle karşılaştırıldığında genellikle daha karmaşıktır çünkü dönme hareketi ve çevresindeki hava akışını etkiler.

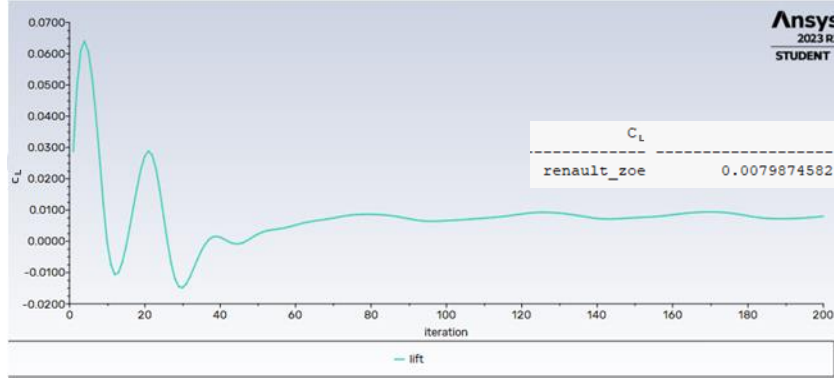
Tekerlek kalınlığını 195 mm'den 190 mm'ye düşürmek, daha ince tekerleklerin kullanılmasını içerir. Bu değişiklik, tekerleklerin aracın yüzeyine olan yaklaşımını etkiler ve aerodinamik performansı etkiler. Şekil 4.9'da düşük tekerlek kalınlığına sahip model gösterilmiştir.

Sürüklenme Katsayısı (C_D): Genel olarak, daha ince tekerleklerin daha az yüzey alanına sahip olması nedeniyle sürüklenme katsayısını düşürmektedir. Daha ince tekerlekler, daha düzgün bir hava akımı sağlayarak sürüklenme kuvvetini azaltır. Bu durum, aracın hava direncini azaltarak daha iyi bir aerodinamik performans sağlamayı amaçlar (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. 190 mm tekerlek kalınlığında 100 m/sn'de C_D değişimi

Kaldırma Katsayısı (C_L): Tekerleklerin kalınlığının azaltılması, tekerleklerin üretilen kaldırma kuvvetini etkilemektedir. Daha ince tekerleklerin altında daha az hava birikimi oluşur, bu da kaldırma katsayısını düşürür veya değiştirir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. 190 mm tekerlek kalınlığında 100 m/sn'de C_L değişimi

Yanal Kuvvetler: Daha ince tekerlekler, yanal rüzgârlara karşı daha az maruziyet göstermektedir. Bu da aracın yanal stabilitesini artırmaktadır.

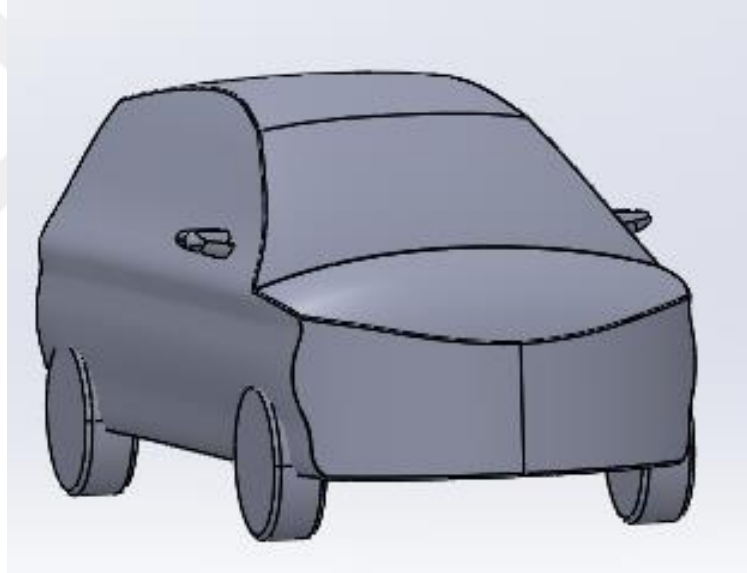
Yakıt Verimliliği: Daha iyi aerodinamik performans, genellikle daha düşük yakıt tüketimiyle sonuçlanmaktadır. Bu nedenle, daha ince tekerleklerin kullanılması yakıt verimliliğini artırmaktadır.

Ancak, bu tür bir değişiklikle birlikte dikkate alınması gereken bazı faktörler de vardır:

- Daha ince tekerleklerin yol tutuş ve fren performansını etkileyebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.
- Daha ince tekerlekler, aracın sürüş konforunu etkilemektedir.
- Tekerlek boyutunun aracın genel görünümüne ve estetiğine etkisi düşünülmelidir.

Sonuç olarak, tekerlek kalınlığını 195 mm'den 190 mm'ye düşürmek aerodinamik performansı potansiyel olarak olumlu etkilemektedir. Ancak, bu değişikliğin aracın diğer önemli özellikleri ve kullanımı üzerindeki etkilerini dikkatlice değerlendirmek önemlidir.

4.2.2. Yan Aynaların Optimize Edilmesiyle Sağlanan Aerodinamik İyileştirme



Şekil 4.12. Yan ayna optimizasyonu uygulaması

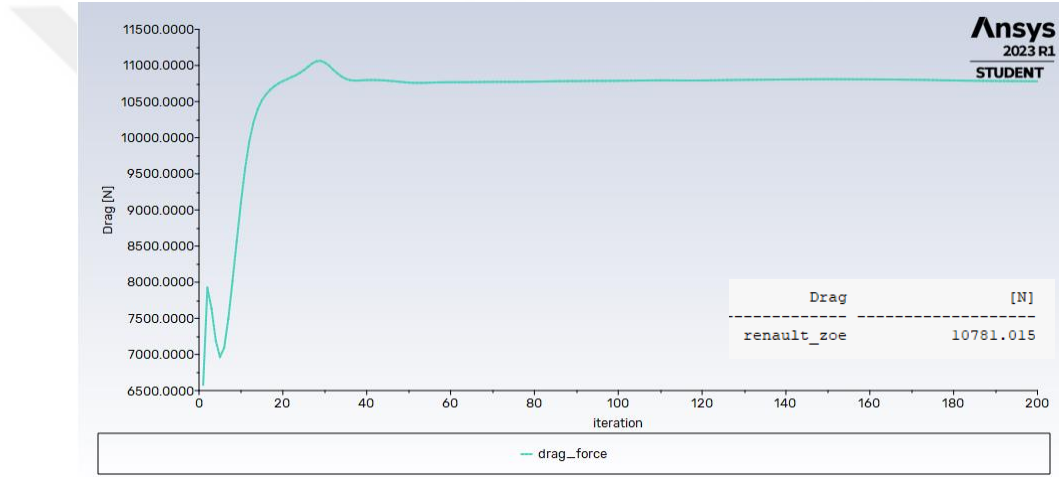
Araçların aerodinamik performansını artırmak, enerji verimliliğini artırmanın ve sürüş stabilitesini iyileştirmenin önemli bir yoludur. Bu amaçla yan aynaların aerodinamik iyileştirmeleri, sürüklenme kuvvetinin azaltılması ve bu sayede yakıt tüketiminin düşürülmesi hedeflenir. Bu çalışmalar, yan aynaların da tasarımında yapılan değişiklikler veya alternatif çözümler üzerinde yoğunlaşır (Şekil 4.12).

Birçok modern araç, yan aynaların aerodinamik profilini optimize etmek için yenilikçi yaklaşımlar kullanır. Örneğin, Honda E modeli gibi elektrikli araçlar, yan aynaların yerine yan kamera sistemini tercih etmektedirler. Bu sistemler, daha düşük bir

profil sunar ve aracın yan yüzeylerinde daha pürüzsüz bir hava akışını destekler. Bunun sonucunda, sürüklenme kuvveti azalır ve aerodinamik performans artar.

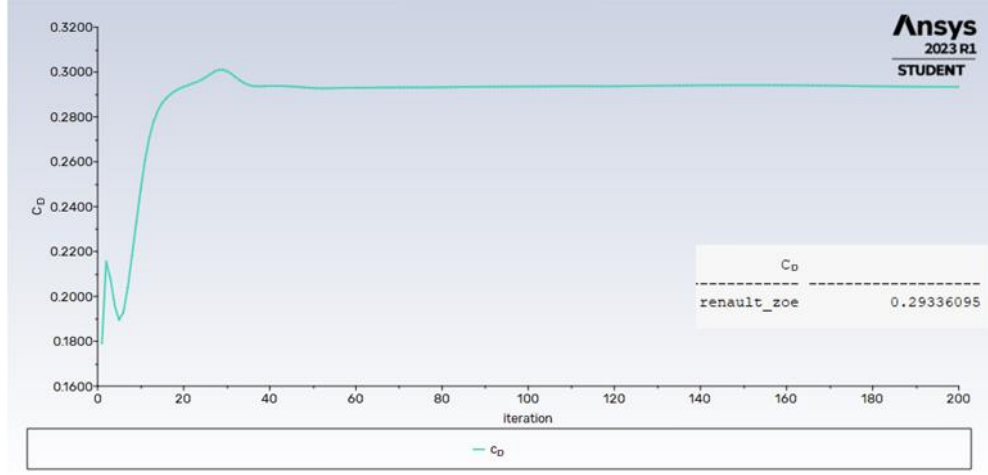
Bu aerodinamik iyileştirmelerin etkileri şunlar olabilir:

Sürüklenme Kuvveti (Drag): Yan aynaların boyutunun küçültülmesi veya aerodinamik tasarımının iyileştirilmesi, hava direncini azalmaktadır. Daha düşük hava direnci, aracın daha az enerji harcamasını ve daha iyi yakıt verimliliğini sağlar. Bunun yanı sıra, sürüklenme kuvvetinin azalmasıyla daha yüksek hızlarda daha az enerji kaybedilir (Şekil 4.13).



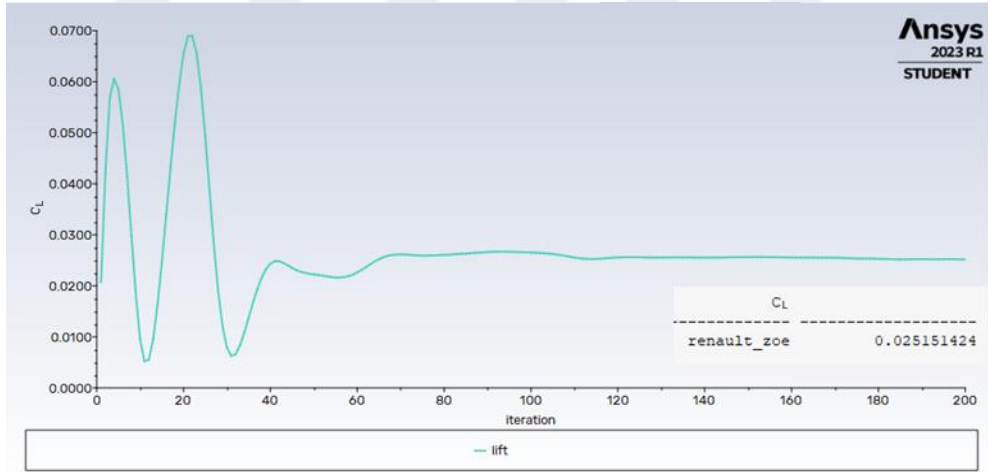
Şekil 4.13. Yan ayna optimizasyonunda 100 m/sn’de sürüklenme kuvveti

Sürüklenme Katsayısı (C_D): Yan aynaların aerodinamik iyileştirmeleri, sürüklenme katsayısını azaltmaktadır. C_D değeri düşerken, aracın hava akışına karşı direnci azalır. Bu da sürüklenme kuvvetinin azalmasına ve yakıt tasarrufuna katkıda bulunur (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. Yan ayna optimizasyonunda 100 m/sn'de C_D değişimi

Kaldırma Katsayısı (C_L): Yan aynaların aerodinamik tasarımındaki iyileştirmeler, kaldırma katsayısını etkilemez veya genellikle çok az etkiler. Çünkü yan aynaların aerodinamik etkileri, aracın genel aerodinamik profili üzerindeki etkilerine göre daha düşüktür (Şekil 4.15).

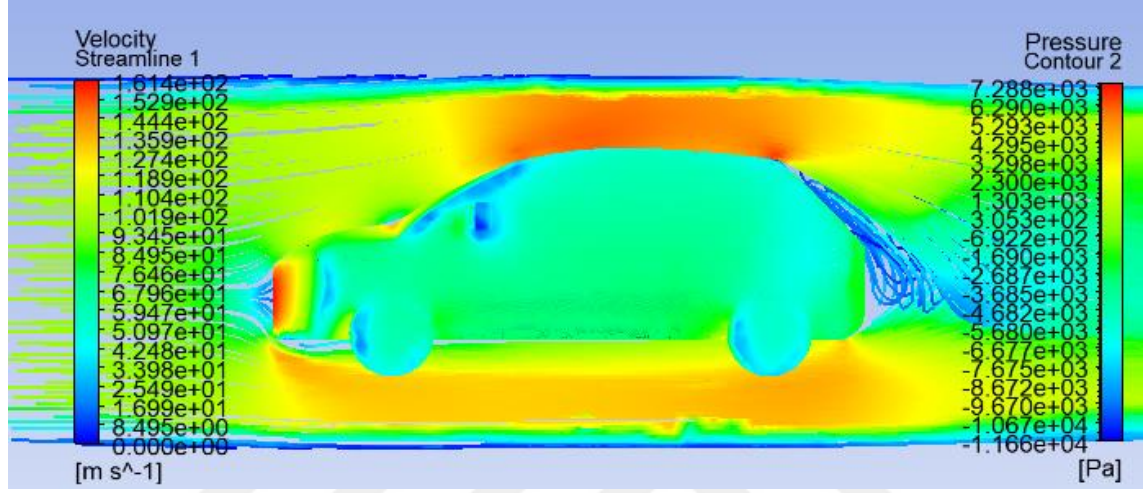


Şekil 4.15. Yan ayna optimizasyonunda 100 m/sn'de C_L değişimi

Özetle, yan aynaların aerodinamik iyileştirmeleri, aracın sürüklenme kuvvetini azaltarak enerji verimliliğini artırır. Bu tür çözümler, araç tasarımında sürdürülebilirlik ve yakıt tasarrufu hedeflerine ulaşma çabalarının bir parçası olarak yaygın bir şekilde kullanılır.

4.3. Sonuçların Analizi

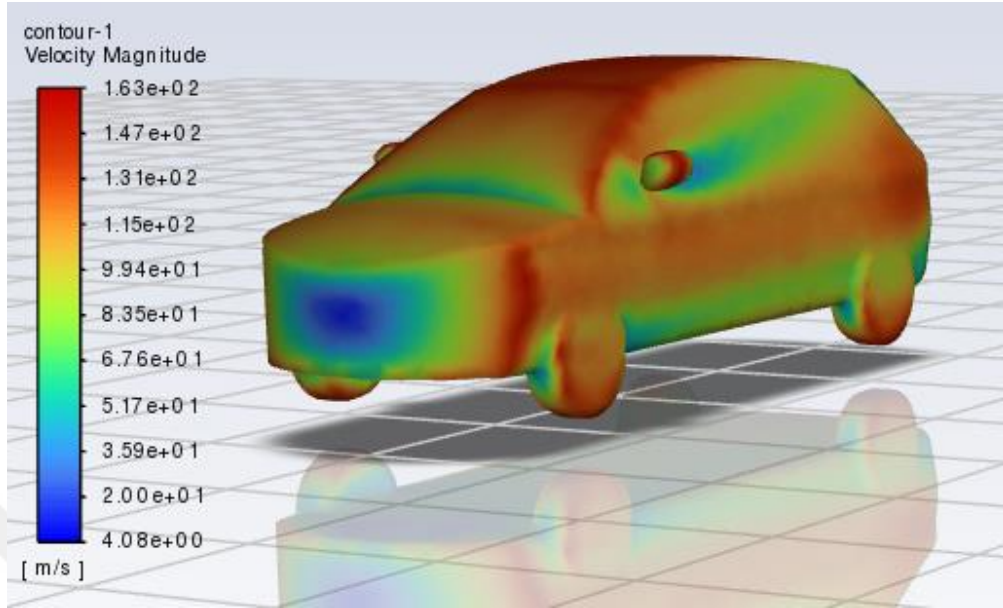
ANSYS Fluent programında çözümleme tamamlandığında, elde edilen sonuçları incelemek için Simülasyon bölümü açılır. Hız değerleri akış çizgileri ve yüzey üzerindeki akış çizgileri (streamlines), renk skalası kullanılarak görselleştirilir (Şekil 4.16).



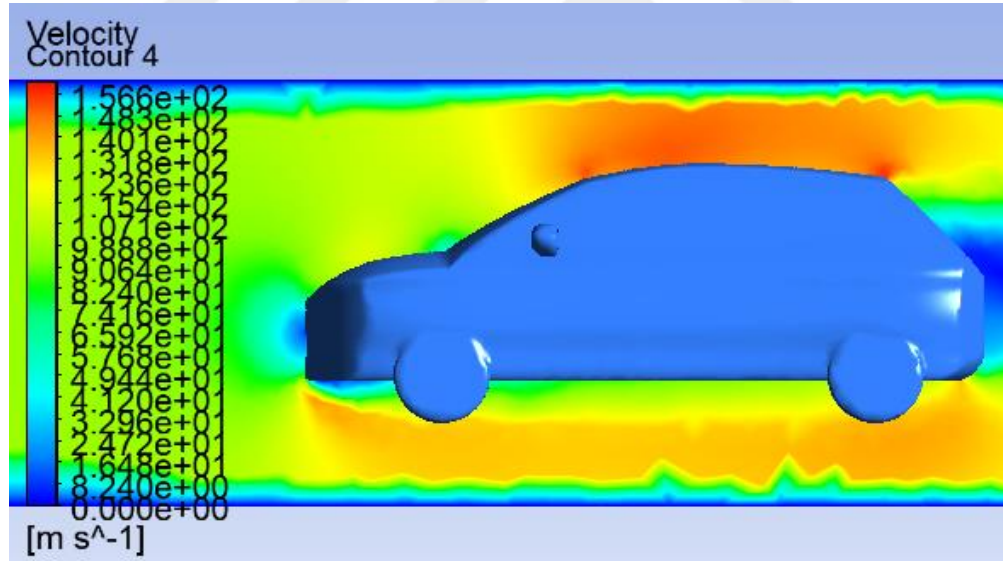
Şekil 4.16. Basitleştirilmiş orijinal model hız değerleri akış çizgileri

Şekil 4.16’da aracın orta düzlemi boyunca oluşturulan akış çizgilerinin yüzey geometrisine nasıl etki ettiğini göstermektedir. Aracın ön kısmında yüksek basınç bölgesinin oluşması nedeniyle akış çizgileri yüzeyden ayrılmaktadır. Kaput ile ön cam arasındaki alanda yüksek basınç alanı bulunduğundan, akış çizgileri yüzey geometrisini takip edemez. Bu bölgedeki hava hızı arttıkça basınç düşer, böylece hava tekrar yüzey geometrisini takip eder. Ön ve arka camın tavanla birleştiği keskin köşeler nedeniyle, bu bölgelerde hava akış çizgileri kırmızı renkte görülür. Aracın arka kısmında ise yüzey geometrisi hava moleküllerinin yüzeye yapışmasını engeller, bu da akışın tekrar ayrılmasına neden olur ve akış çizgileri yüzey geometrisini takip etmez.

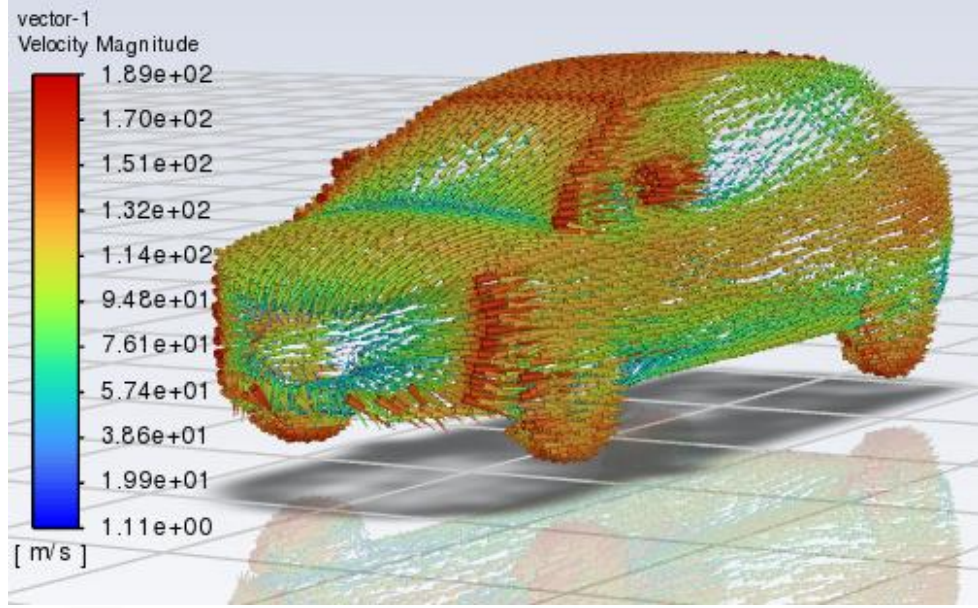
Analiz sonuçlarına göre, aracın yüzeyindeki hız kaynaklı sürtünme direnci özellikle aracın alt tampon ve tekerlek bölgelerinde artmıştır. Bu artışın nedeni, bu bölgelerdeki hava hızının artmasıdır. Özellikle bu bölgelerde araç ilerlerken, hava hızı belirgin şekilde artmaktadır (Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19). Bu sonuçlar, aracın aerodinamik performansının değerlendirilmesi ve enerji verimliliğinin artırılması amacıyla yapılan çalışmalar için önemli bilgiler sunmaktadır.



Şekil 4.17. Basitleştirilmiş orijinal model araç üzerindeki hız büyüklüğü

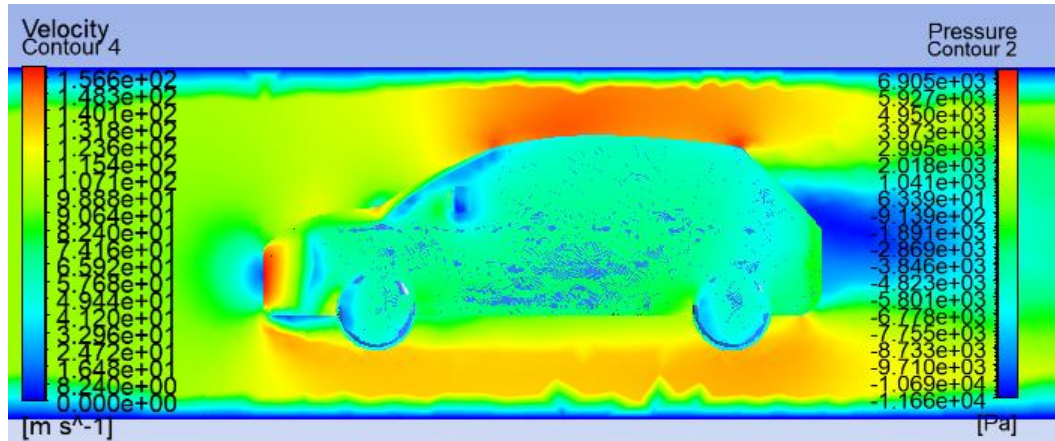


Şekil 4.18. Basitleştirilmiş orijinal model simetri yüzeyinde eş hız büyüklüğü dağılım eğrileri

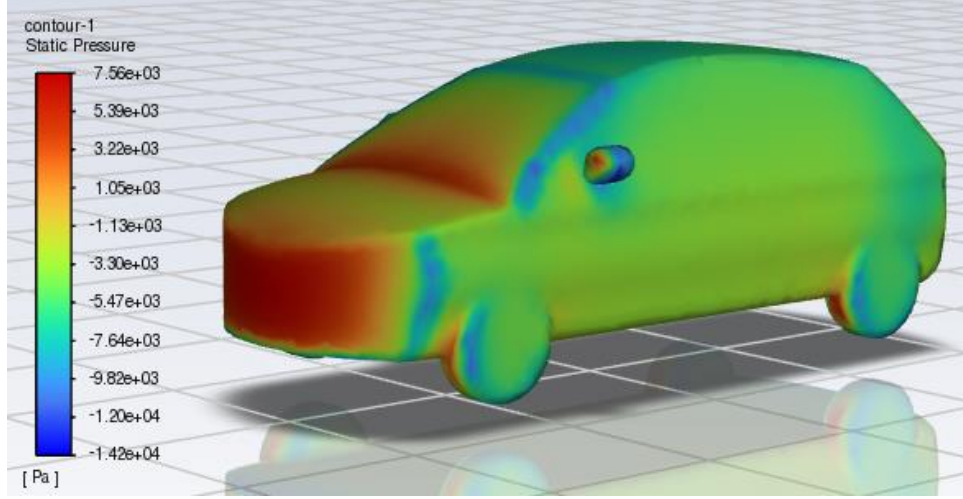


Şekil 4.19. Basitleştirilmiş orijinal model araç üzerindeki hız büyüklüğü

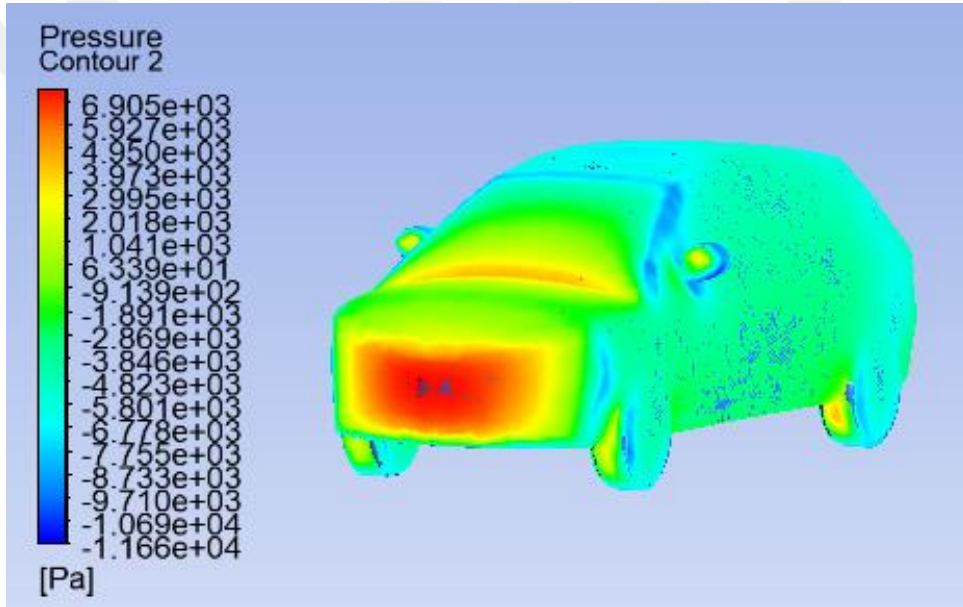
Analiz sonuçlarına göre, 3D veri kullanılarak "Contour" seçeneğiyle yapılan incelemeler neticesinde, aracın ön tampon, ön kaput üstü, ön alt cam ve teker ön bölgelerinde yüzeydeki maksimum basınç yoğunluklarının tespit edildiği görülmektedir. Bu sonuçlar, aerodinamik tasarım ve hava akışının araç yüzeyine etkisi hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Özellikle bu bölgelerdeki basınç varyasyonları, aracın performansını ve enerji verimliliğini değerlendiren akademik çalışmalar ve otomotiv endüstrisinde tasarım iyileştirmeleri açısından değer taşımaktadır (Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22).



Şekil 4.20. Basitleştirilmiş orijinal model simetri yüzeyinde eş hız büyüklüğü – araç üzerinde eş basınç büyüklüğü dağılım eğrileri



Şekil 4.21. Basitleştirilmiş orijinal model araç üzerinde eş statik basınç büyüklüğü dağılım eğrileri

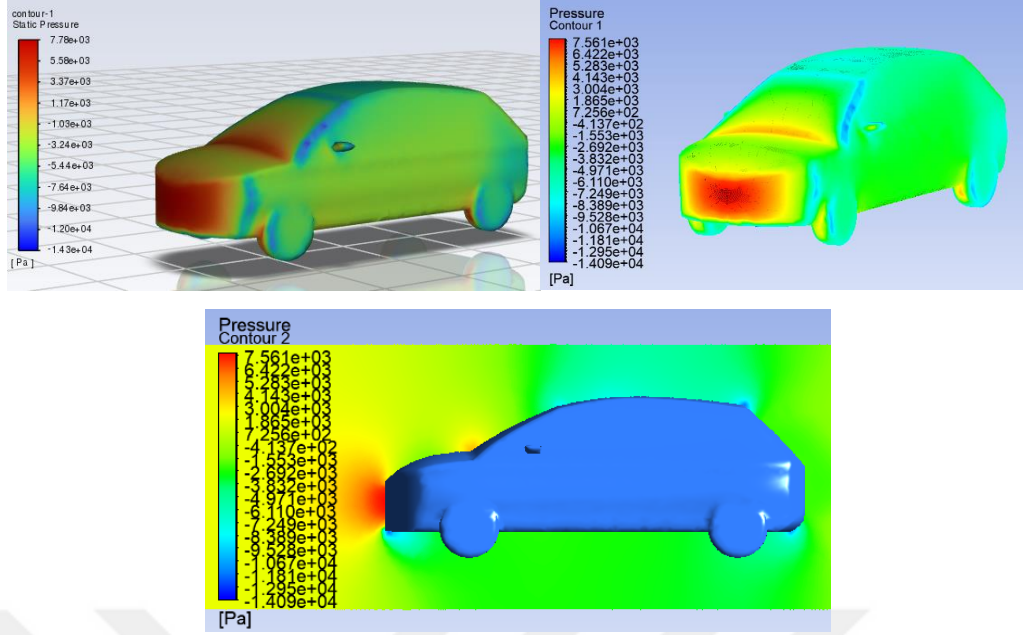


Şekil 4.22. Basitleştirilmiş orijinal model aracın yüzeyindeki eş basınç büyüklüğü dağılım eğrileri

4.4. İyileştirme Sonuçlarının Analizi

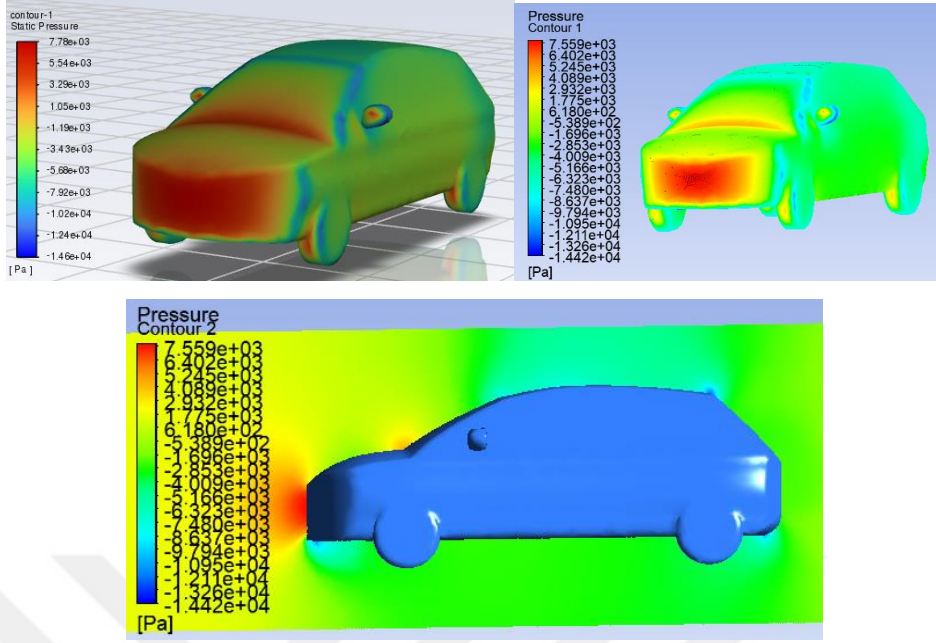
4.4.1. Basınç dağılımları

Yan aynaların boyutunun küçültülmesi veya aerodinamik tasarımının iyileştirilmesi, sürüklenme kuvvetini ve hava direncini azaltmaktadır. Şekil 4.23, yan aynaların aerodinamik iyileştirmelerinin sürüklenme katsayısı (C_D) üzerindeki etkisini gösterir. C_D değeri düşerken, aracın hava akışına karşı direnci azalır ve bu, daha düşük enerji tüketimi ve artan yakıt verimliliği anlamına gelir.



Şekil 4.23. Optimize edilmiş aynalar için araç yüzeyindeki eş basınç büyüklüğü dağılım eğrileri

Tekerleklerin genişliğini 195 mm'den 190 mm'ye düşürmek, tekerleklerin aracın yüzeyine olan yaklaşımını değiştirir. Daha ince tekerlekler, araç yüzeyine daha yakın bir şekilde bulunur ve bu da daha düzgün bir hava akışı sağlar. Sonuç olarak, bu durum sürüklenme kuvvetini azaltır ve aracın hava direncini düşürür. Şekil 4.24, bu değişikliğin sürüklenme katsayısı (C_D) üzerindeki olumlu etkisini göstermektedir. C_D değeri, daha ince tekerleklerle birlikte azalırken aracın hava direnci de azalır. Bu aracın daha az enerji harcamasını ve daha iyi yakıt verimliliğini sağlar.

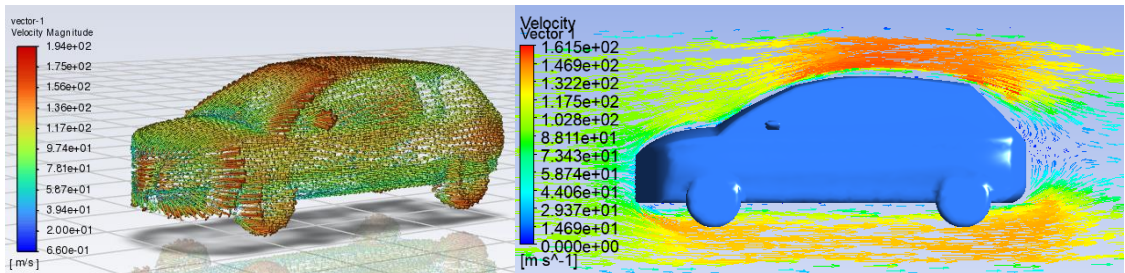


Şekil 4.24. Optimize edilmiş tekerlek için araç yüzeyindeki eş basınç büyüklüğü dağılım eğrileri

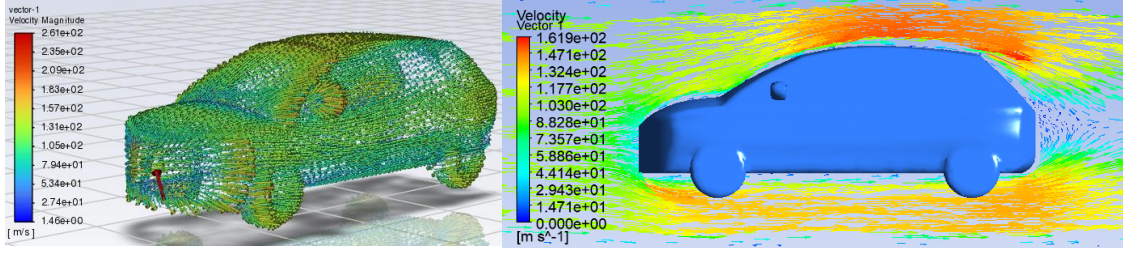
Sonuç olarak, tekerleklerin ve yan aynaların aerodinamik iyileştirmelerinin, aracın sürüklenme kuvvetini azaltarak enerji verimliliğini artırdığı görülmektedir. Bu analiz sonuçları, araç tasarımında sürdürülebilirlik ve yakıt tasarrufu hedeflerine ulaşmak için yapılan önemli adımları yansıtmaktadır.

4.4.2. Vektörel hız dağılımları

Tekerleklerin ve yan aynaların aerodinamik iyileştirmelerinin, vektörel hız dağılımını etkileyerek aracın enerji verimliliğini artırdığı görülmektedir (Şekil 4.25, Şekil 4.26). Bu analiz sonuçları, araç tasarımında enerji tasarrufu ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için yapılan önemli adımları yansıtmaktadır.



Şekil 4.25. Optimize edilmiş aynalar için araç yüzeyindeki eş hız büyüklüğü dağılım eğrileri



Şekil 4.26. Optimize edilmiş tekerlek için araç yüzeyindeki eş hız büyüklüğü dağılım eğrileri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Elde edilen sayısal verilere göre, tekerlek kalınlığının azaltılması ve yan aynaların aerodinamik iyileştirmeleri, aracın aerodinamik performansını etkileyen iki farklı yaklaşımı temsil etmektedir. Basitleştirilmiş orijinal (prototip) model (Model 1) için C_D değeri 0,3211 olarak hesaplanmıştır. Tekerlek kalınlığının optimize edilmesiyle sağlanan aerodinamik iyileştirme sonucunda C_D değeri 0,3046'ya düşmüştür. Aynı şekilde, yan aynaların optimize edilmesiyle sağlanan aerodinamik iyileştirme ile C_D değeri 0,2933 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, her iki yaklaşımın da aerodinamik performansı iyileştirmede potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Tekerlek kalınlığının azaltılması ve yan aynaların aerodinamik tasarımının iyileştirilmesi, sürüklenme katsayısını önemli ölçüde azaltarak yakıt tasarrufunu artırmaktadır. Ancak, bu iyileştirmelerin araç performansı, yol tutuş, frenleme ve sürüş konforu üzerindeki etkileri de dikkate alınmalıdır.

Sonuç olarak, her iki yaklaşım da aracın aerodinamik performansını iyileştirmek amacıyla kullanılabilecek etkili yöntemlerdir. Hangi yöntemin tercih edileceği, aracın özellikleri, kullanım amacı ve diğer etkiler göz önünde bulundurularak belirlenmelidir. Bu tür iyileştirmelerin başarısı, analiz sonuçlarına dayalı olarak değerlendirilmelidir.

5.2. Öneriler

Elde edilen sonuçlar, taşıtların aerodinamik performansını iyileştirmenin ve enerji verimliliğini artırmanın önemli yollarını vurgulamaktadır. Araçların hava direnci, tasarım özelliklerine ve aerodinamik iyileştirmelere bağlı olarak belirgin şekilde değişmektedir. Aerodinamik tasarımın, araçların sürüklenme kuvvetini azaltarak yakıt tasarrufunu artırma potansiyeli taşıdığı görülmektedir. Bu iyileştirmeler, araçların yüksek hızlarda daha etkili ve stabil bir performans sergilemesine yardımcı olmaktadır.

Özellikle yan aynaların aerodinamik tasarımı gibi detaylı incelemeler, taşıtların hava akışıyla daha iyi uyum sağlamasına ve enerji verimliliğini artırmasına olanak tanır.

Yan aynaların boyutunun küçültülmesi veya aerodinamik tasarımının iyileştirilmesi sürüklenme kuvvetini azaltmakta ve yakıt tasarrufunu desteklemektedir.

Araçların aerodinamik performansının artırılması sadece yakıt tasarrufu sağlamakla kalmaz, aynı zamanda karbon ayak izini azaltır. Bu çalışmalar, taşıt tasarımında sürdürülebilirlik ve yakıt tasarrufu hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, gelecekte daha verimli, çevre dostu ve yüksek performanslı taşıtların geliştirilmesi için aerodinamik iyileştirmelerin ve detaylı incelemelerin önemi büyük olacaktır.

Sonuç olarak, bu araştırma, taşıtların aerodinamik tasarımının enerji verimliliğine olan katkısını vurgulayarak taşıt endüstrisinin sürdürülebilirlik ve çevresel etkilerini azaltma çabalarına önemli bir katkı sunmaktadır. İleriye dönük olarak, taşıt endüstrisinde aerodinamik iyileştirmelerin ve çevre dostu tasarımın benimsenmesi daha temiz ve verimli bir ulaşım geleceği için önemli bir adım olacaktır.

KAYNAKLAR

- Altun, Ş., Fırat, M., & Okcu, M. (2023). Numerical Analysis on the Effect of Hydrogen as Low-Reactivity Fuel in a 3D Scanned Engine Model Operated on RCCI Mode. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(9), 11545-11557.
- Altun, Ş., Fırat, M., Varol, Y., & Okcu, M. (2023). Comparison of direct and port injection of methanol in a RCCI engine using diesel and biodiesel as high reactivity fuels. *Process Safety and Environmental Protection*, 174, 681-693.
- Asghari, M., & Al-e, S. M. J. M. (2021). Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review. *International Journal of Production Economics*, 231, 107899.
- Atlı, V., (1985). Kara vasıtaları aerodinamiği incelemelerinde kullanılan hava tünelleri, *I. Otomotiv ve Yan Sanayi Sempozyumu*, TMMOB, Yayın No.117.
- Ambarita, H., Siregar, M. R., & Kawai, H. (2018, March). Study on aerodynamics characteristics an urban concept car for energy-efficient race. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 343, No. 1, p. 012025). IOP Publishing.
- Aka, H. (2003). Otomobillerin aerodinamik karakteristiğinin bir rüzgar tüneline incelenmesi (Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 67-69).
- Akten, R.B. (2010). Su Üstü Gemilerde Elektrikli Tahrik Sistemi (*Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü*).
- Arıkan, M. (2020). Otomobillerdeki Yan Aynaların Dış Yüzeyinde Oluşan Hava Direnci Etkisinin Nümerik Olarak İncelenmesi (Master's thesis).
- Brecher, A., & Arthur, D. (2014). Review and evaluation of wireless power transfer (WPT) for electric transit applications.
- BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) (2020). Masterplan Ladeinfrastruktur der Bundesregierung [Master plan for charging infrastructure for the Federal Republic]. Retrieved from
- Bayındırlı, C., & Çelik, M. (2019). Bir taşıta etki eden aerodinamik direnç kuvvetinin bagaj üstü spoiler ile iyileştirilmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(2), 470-479.
- Banga, S., Zunaid, M., Ansari, N. A., Sharma, S., & Dungriyal, R. S. (2015). CFD simulation of flow around external vehicle: *Ahmed body*. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 12(4), 87-94.
- Chan, C. C. (2007). The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 704-718.

- Chan, C. C. ve Chen, K., “Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59 (2), 589-598 (2010).
- Çağan, M. (2000). Taşıt aerodinamik özelliklerinin sayısal yöntemlerle incelenmesi (*Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü*).
- Ersoy, Y. ve Mert, M., (1977). Boyut Analizi ve Fiziksel Ölçmeler, *ODTÜ Yayıncılık*, Ankara, 474 sayfa.
- Emadi, A., Lee, Y. J., & Rajashekara, K. (2008). Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 55(6), 2237-2245.
- Ezgi, C., Su Üstü Savaş Gemisinde NATO F-76 Dizel Yakıtlı Katı Oksitli Yakıt Pili Sistemi Tasarımı ve Analizi”, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir (2009).
- Ebrahim, H., Dominy, R., & Martin, N. (2021). Aerodynamics of electric cars in platoon SAGE publications. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: *Journal of Automobile Engineering*, 235(5), 1396-1408.
- Gillespie, D. T., (1992). Fundamentals of Vehicle Dynamics, Warrendale, 85– 98.
- Gökçegöz, G., (2013). Model bir otomobile etkiyen aerodinamik kuvvetlerin analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi*, Elazığ, 109 Sayfa.
- Gümüslüol, Ü., Çetinkaya, T.A., Albayrak, K., (2006). Geçiş durumundaki taşıtların aerodinamik etkileşimlerinin deneysel olarak incelenmesi, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 561: 28-35.
- Günay, C., Kumlutaş, D., Özer, Ö., & Yücekaya, U. A., (2019) Elektrikli arabaların aerodinamik karakteristiklerinin parçacık görüntülemeli hız ölçüm yöntemi (PGHÖ) ve sayısal olarak incelenmesi, İzmir, 938-951.
- IEA (2020a), World Energy Balances: Overview, *IEA, Paris*. Retrieved from <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances>
- IEA (2020b), Tracking Transport 2020, *IEA, Paris*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2020>
- IEA (2021), Global EV Outlook 2021, *IEA, Paris*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>
- İpci, D., Yılmaz, E., Aysal, F. E., & Solmaz, H. (2015). Bir Kara Taşıt Modeli Etrafındaki Akış Yapısının Sayısal Olarak İncelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2, 51-64.

- Kalaycı, C. (2021). SUV model bir motorlu taşıtın aerodinamik performansının sayısal incelenmesi ve optimizasyonu (Master's thesis, *Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*).
- Kamal, M. N. F., Ishak, I. A., Darlis, N., Maji, D. S. B., Sukiman, S. L., Abd Rashid, R., & Azizul, M. A. (2021). A review of aerodynamics influence on various car model geometry through CFD techniques. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 88(1), 109-125.
- Köksal, E., Ardiyok, S., and Ikiler, B. (2021). Elektrikli araçlar için şarj altyapısı–Türkiye için fırsatlar ve öneriler (*Charging Infrastructure for Electric Vehicles–Opportunities and Suggestions for Turkey*). Baseak CORE Papers, (11).
- Kasnatscheew, A. (2020). SAFE BW Flächendeckendes Sicherheitsladenetz für Elektrofahrzeuge in BadenWürttemberg. *e-mobil BW*, GmbH. Retrieved from <https://www.e-mobilbw.de/safe>
- Kiyakli, A. O., & Solmaz, H. (2018). Modeling of an electric vehicle with MATLAB/Simulink. *International journal of automotive science and technology*, 2(4), 9-15.
- Krawczyk, J. M., Mazur, A. M., Sasin, T., & Stoklosa, A. W. (2014). fuel cells as alternative power for unmanned aircraft systems–current situation and development trends. *Prace Instytutu Lotnictwa*, (4 (237) December 2014), 49-62.
- Kunt, M. A. (2019). Tümüyle elektrikli binek tipli bir aracın advisor tabanlı modellenmesi ve aerodinamik direnç değişiminin batarya performansına etkisi üzerine Bir çalışma. *ISASTECH 2019*, 5-6.
- Li, J., Du, Z., Ruther, R. E., An, S. J., David, L. A., Hays, K., & Wood, D. L. (2017). Toward low-cost, high-energy density, and high-power density lithium-ion batteries. *Jom*, 69, 1484-1496.
- Mierlo, J. V, Maggetto, G. ve Lataire, Ph., “Which energy source for road transport in the future? a comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles, energy conversion and management, 47: 2748–2760 (2006).
- Machura, P., & Li, Q. (2019). A critical review on wireless charging for electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 209-234.
- Nabil, T., Helmy Omar, A. B., & Mohamed Mansour, T. (2020). Experimental approach and CFD simulation of battery electric vehicle body. *Int J Fluid Mech Therm Sci*, 6(2), 36.
- Plotkin, S., Santini, D., Vyas, A., Anderson, J., Wang, M., Bharathan, D., & He, J. (2002). Hybrid electric vehicle technology assessment: methodology, analytical issues, and interim results (No. ANL/ESD/02-2). *Argonne National Lab.*, IL (US).
- Rebecca M., ABD Enerji Bakanlığı, The History of the Electric Car <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>, (2014)

- Reitz RD, Ogawa H, Payri R, et al. IJER editorial: The future of the internal combustion engine. *International Journal of Engine Research*. (2020). 21(1):3-10. doi:10.1177/1468087419877990
- Schlichting, H., (1960). Aerodynamic problems of motor cars, the institute of fluid mechanics technical university braunschweig, prepared for meeting of AGAED fluid dynamics panel on, industrial use of wind tunnels, İstanbul, 67.
- Stone, R., Ball, J.K., (2004). Automotive engineering fundamentals, Warrendale, 435-454.
- Sarı, M. (2007). F., “Hafif Ticari Taşıtlarda Taşıt Ön Formuna Etkiyen Hava Direncinin Aerodinamik Analizi ve Yakıt Sarfıyatına Etkisi”. *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir.
- Saygın, D., Tör O.B., Teimourzadeh, S., Koç, M., Hildermeier, J. And Kolokathis C. (2021). Transport sector transformation: Integrating electric vehicles into Turkey’s distribution grids. retrieved from <https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2019/12/Transport-sector-transformation.Integrating-electric-vehicles-into-Turkeys-distribution-grids.pdf>
- Song, Q. S., Aravindaraj, G. K., Sultana, H., & Chan, S. L. I. (2007). Performance improvement of pasted nickel electrodes with multi-wall carbon nanotubes for rechargeable nickel batteries. *Electrochimica Acta*, 53(4), 1890-1896.
- TEHAD (Türkiye Elektrikli ve Hibrid Araçlar Derneği) (2020). Türkiye Şarj İstasyonu Haritası, <https://www.tehad.org/2020/11/09/turkiye-sarj-istasyonu-haritasi-bolgeler-2020/>
- TEHAD (Türkiye Elektrikli ve Hibrid Araçlar Derneği) (2021). Raporlar, <https://www.tehad.org/category/raporlar/>
- TOGG (2021). Türkiye’nin Otomobili Girişim Grubu (TOGG). <https://www.togg.com.tr/>
- TÜİK (Turkish Statistical Institute) (2020). Turkish Greenhouse Gas Inventory 1990 2018, National Inventory Report for submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change, April 2020. Retrieved from <https://unfccc.int/documents/223580>
- Uyar, F. (2015). Türkiye ve dünyada elektrikli araçlar. Enerji beş temiz enerji portalı,
- Vdovin, A. (2013). *Investigation of aerodynamic resistance of rotating wheels on passenger cars*. Chalmers Tekniska Högskola (Sweden).
- Yılmaz, M. ve Krein, PT (2012). Plug-in elektrikli ve hibrit araçlar için pil şarj cihazı topolojilerinin, şarj gücü seviyelerinin ve altyapısının gözden geçirilmesi. *Güç Elektroniğinde IEEE işlemleri*, 28 (5), 2151-2169.

Yarin, T. G. (2019). Farklı taşıt modellerinin aerodinamik yapısının nümerik olarak incelenmesi (Doctoral dissertation, *Bursa Uludağ University* (Turkey))



İNTERNET KAYNAKLARI

Anonim I, <https://tr.euronews.com/next/2023/04/27/kuresel-elektrikli-arac-satislari-yuzde-55-artti>

[Erişim Tarihi: 25 Ağustos 2023]

Anonim II, <https://kronos36.news/tr/turkiyede-kac-elektrikli-arac-sarj-istasyonu-var-avrupa-ulkelerinde-durum-ne/> [Erişim Tarihi: 25 Ağustos 2023]

Anonim III, <https://www.muhendisbeyinler.net/araclarda-aerodinamik-nedir/> [Erişim Tarihi: 21 Mayıs 2022]

Anonim IV, <https://www.renault.com.tr/elektrikli-araclar/yeni-zoe.html> (otomobil)
[Erişim Tarihi: 18 Haziran 2022]

Anonim V, <http://www.metroloji-okulu.com.tr/tez/tez.htm> [Erişim Tarihi: 21 Mayıs 2022]

EKLER

EK-1