



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

**SUV MODEL BİR MOTORLU TAŞITIN
AERODİNAMİK PERFORMANSININ SAYISAL
İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU**

Cüneyt KALAYCI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Haziran-2021
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Cüneyt KALAYCI tarafından hazırlanan “SUV BİR MOTORLU TAŞITIN AERODİNAMİK PERFORMANSININ SAYISAL İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

Prof. Dr. Şehmus ALTUN

.....

Üye

Doç. Dr. Müjdat FIRAT

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Hasan OKTAY

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü
Doç. Dr. Ömer Faruk ERTUĞRUL

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.

İmza

Cüneyt KALAYCI

Tarih: 14.06.2021

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SUV MODEL BİR MOTORLU TAŞITIN AERODİNAMİK PERFORMANSININ SAYISAL İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Cüneyt KALAYCI

BATMAN ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Prof. Dr. Şehmus ALTUN

2021, 63 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Şehmus ALTUN

Doç. Dr. Müjdat FIRAT

Dr. Öğr. Üyesi Hasan OKTAY

Hareket halindeki motorlu taşıtların etrafında havanın sürekli olarak yer değiştirmesiyle taşıtın tasarım, performans ve yakıt ekonomisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olan aerodinamik direnç kuvvetleri oluşmaktadır. Taşıtın hızı arttıkça aerodinamik kuvvetlerin etkinliği de artmaktadır. Bu nedenle özellikle otomobiller gibi binek tip motorlu taşıtların dış tasarımlarının optimize edilmesi performans, güvenlik ve yakıt ekonomisi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, J segmenti ve Premium SUV kategorisinde yer alan binek tipi bir motorlu taşıt modelinin aerodinamik performansı sayısal olarak ANSYS Fluent kullanarak incelenmiştir. Taşıtın orijinal boyutları referans alınarak taşıtın 1:1 ölçekte ve tek boyutta modeli SolidWorks'te çizilmiştir. Taşıt modeli üzerinde keskin hatların yuvarlatılması, ön cam açısı ile tavan çizgisi eğiminin azaltılmasının sürüklenme (C_D) ve kaldırma (C_L) katsayısı değerleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre yapılan değişiklikler sonucunda modelin 0,255 olan C_D katsayısı %20 oranında (0,204) düşürülmüştür. Bununla beraber -0,218 olan C_L katsayısı -0,337'ye kadar düşürülmüştür. Taşıt yüzeyine etkiyen 559,2 Pa maksimum basınç değeri %4,05 oranında düşürülerek 536,5 Pa'a indirilmiştir. Yapılan geometrik revizeler neticesinde akım çizgilerinde daha stabil bir profil elde edilmiş ve hız vektörlerinin taşıt yüzeyinde hız kaybına uğradığı bölgeler azaltılmıştır. Böylece modelin aerodinamik etkinliği artırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aerodinamik, ANSYS, Kaldırma Katsayısı, Sürüklenme Katsayısı

ABSTRACT

MS THESIS

NUMERICAL INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF AERODYNAMIC PERFORMANCE OF AN SUV MODEL MOTOR VEHICLE

Cüneyt KALAYCI

**INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES OF BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. PhD. Şehmus ALTUN

2021, 63 Pages

Jury

Prof. PhD. Şehmus ALTUN

Assoc. Prof. PhD. Müjdat FIRAT

Asst. Prof. PhD. Hasan OKTAY

With the continuous displacement of air around moving motor vehicles, aerodynamic resistance forces are formed, which have a significant impact on the vehicle's design, performance and fuel economy. As the speed of the vehicle increases, the impact of the aerodynamic forces also increases. For this reason, optimizing the exterior designs of passenger-type motor vehicles, especially automobiles, is of great importance in terms of performance, safety and fuel economy. In this study, the aerodynamic performance of a passenger type motor vehicle model in the category of J segment and Premium SUV was numerically investigated using ANSYS Fluent software. A 1:1 scale and one-dimensional model of the vehicle was drawn in SolidWorks, with reference to the original dimensions of the vehicle. The effects of rounding sharp lines on the vehicle model, reducing the windshield angle and roofline slope on the drag (C_D) and lift (C_L) coefficients were investigated. As a result of the changes made according to the analysis results, the C_D coefficient of the model, which was 0.255, was reduced by 20% (0.204). However, the C_L coefficient, which was -0.218, was reduced to -0.337. The maximum pressure value of 559.2 Pa acting on the vehicle surface was reduced by 4.05% to 536.5 Pa. As a result of the geometric revisions, a more stable profile was obtained in the streamlines and the areas where the speed vectors lost speed on the vehicle surface were reduced. Thus, the aerodynamic efficiency of the model is increased.

Keywords: Aerodynamics, ANSYS, Drag Coefficient, Lift Coefficient

ÖNSÖZ

Motorlu taşıtlarda aerodinamik dirençler uzun bir zamandan beri üzerinde çalışılan ve özellikle yüksek taşıt hızlarında konfor ve sürüş güvenliği, performans ve yakıt ekonomisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olan parametrelerdir. Taşıtın aerodinamik yapısının geliştirilmesi ile hava direncinin azalacağından dolayı taşıt aerodinamiği ile ilgili yapılan çalışmalar çoğunlukla bu yönde yoğunlaşmaktadır. Öte yandan aerodinamik ile ilgili çalışmalar maliyetin yüksek oluşu nedeniyle deneysel yöntemler yerine son zamanlarda sayısal analizler ile yürütülmesi çoğunlukla tercih edilmeye başlanmıştır. Bu şekilde daha az maliyet ile ve daha kısa süreleri içerisinde çalışmalar tamamlanmaktadır. Bu çalışmada, binek tipi bir motorlu taşıtın bazı dış tasarım özelliklerinin aerodinamik performans üzerindeki etkileri ANSYS Fluent aracılığıyla sayısal olarak incelenmiştir.

Bu tez çalışmasının planlanmasından sonuçlandırılmasına kadar olan süreçte bilgi birikimi ve tecrübesiyle beni yönlendiren ve her aşamada destek olan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Şehmus ALTUN'a teşekkürü borç bilirim. Ayrıca bu süreçte desteklerini eksik etmeyen değerli aileme sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Cüneyt KALAYCI

BATMAN-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER.....	ix
ŞEKİLLER.....	x
ÇİZELGELER.....	xii
1. GİRİŞ	0
1.1. Aerodinamik.....	2
1.2. Aerodinamiğe Etki Eden Atmosferik Şartlar	5
1.3. Araçlarda Aerodinamik	5
1.3.1. Aerodinamiğin önemi	7
1.3.2. Otomobildeki kayıplar	10
1.3.3. Aerodinamik kuvvetler.....	13
1.4. Aerodinamik Etkilerin Hesaplamaları	17
1.4.1. Sayısal analiz yöntemi	18
1.4.1.1. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği	18
1.4.2. Deneyisel yöntemler	18
1.4.2.1. Benzerlik.....	19
1.4.2.2. Deneyisel yöntem türleri	25
1.4.2.2.1. Kuvvet ve basınç ölçümü yardımı ile yapılan hesaplamalar	25
1.4.2.2.2. İz tarama metodu (momentum kaybı) ile yapılan hesaplamalar	26
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	29
3. MATERYAL VE METOT.....	34
3.1. Deneyisel Çalışmada Kullanılan Modelin Özellikleri.....	34
3.2. Geometri	35

3.3.	ANSYS Fluent Analizi	37
3.4.	Akış Alanının Oluşturulması (Enclosure)	38
3.5.	Ağ Yapısı (Mesh).....	39
3.6.	Sınır Şartları.....	41
3.7.	Duvar Fonksiyonu.....	43
3.8.	Geometrik İyileştirme ve Analizleri	44
4.	ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	47
4.1.	Basınç Dağılımı	54
4.2.	Akım Çizgileri	55
4.3.	Hız Vektörleri.....	56
4.4.	CD ve CL Katsayıları.....	58
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	61
5.1.	Sonuçlar	61
5.2.	Öneriler.....	62
	KAYNAKLAR	64
	ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

SİMGELER

A	: Ön bakış alanı, m ²
b	: Aracın maksimum genişliği, m
C _D	: Sürüklenme katsayısı
C _L	: Kaldırma kuvveti katsayısı
D	: Aracın maksimum yüksekliği, m
F _D	: Sürüklenme kuvveti, N
F _L	: Kaldırma kuvveti, N
F _y	: Yanlama kuvveti, N
M _y	: Yunuslama momenti, Nm
M _x	: Yuvarlanma momenti, Nm
M _z	: Yanlama momenti, Nm
P	: Sürüklenme gücü, kW
Re	: Reynolds sayısı
V	: Aracın hızı, m/sn, km/h
ρ	: Havanın yoğunluğu, kg/m ³
τ	: Kayma gerilmesi
μ	: Dinamik viskozite, kg/msn

ŞEKİLLER

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Uçak ve F1 aracı aerodinamik görseli	2
Şekil 1.2. Araçların aerodinamik direnç katsayısının tarihçesi	3
Şekil 1.3 Mercedes-Benz aracın akım çizgileri	4
Şekil 1.4. Rüzgâr basıncının araç üzerinde dağılımı	6
Şekil 1.5. Tesla Cybertruck aerodinamik analiz görüntüsü	7
Şekil 1.6. Seyir halindeki bir taşıt üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetler	8
Şekil 1.7. Reynolds sayısının aerodinamik direnç katsayısına etkisi	9
Şekil 1.8. Sapma açısının aerodinamik direnç katsayısı üzerindeki etkisi	9
Şekil 1.9. Taşıt etrafında oluşan hortum şeklindeki girdaplar	10
Şekil 1.10. Orta büyüklükte bir binek taşıtı için, C_D değeri düşüşünün yakıt ekonomisine olan etkisi	13
Şekil 1.11. Bir kamyon (çekici ve yarı römork) için C_D değerindeki düşüşün yakıt kazancına olan etkisi	14
Şekil 1.12. Düz plaka üzerine etki eden direnç kuvvetinin sadece duvar kayma gerilmesine bağlı olması durumu	14
Şekil 1.13. Akışa dik yerleştirilen düz plakaya etki eden direnç kuvvetinin sadece basınca bağlı olması durumu	15
Şekil 1.14. Yüzey üzerindeki basınç ve hız dağılımlarının sürüklemeye etkisi	16
Şekil 1.15. Kanatın kaldırma kuvveti etkisi altında olması durumu	17
Şekil 1.16. İki boyutlu bir cisim üzerine etki eden basınç kuvveti ve viskoz kuvvet ile bileşke, kaldırma ve direnç kuvvetleri	17
Şekil 1.17. Kinematik benzer akışlar	20
Şekil 1.18. Hava tüneli deneyi, akış içerisine yerleştirilmiş silindir üzerindeki hız dağılımı	26
Şekil 3.1. Analizi yapılan otomobil modelinin görseli	35
Şekil 3.2. Model otomobilin SolidWorks perspektif görünümü	36
Şekil 3.3. Model otomobilin +Z eksenı görünümü	37
Şekil 3.4. Modelin ANSYS Fluent'e yüklenmesi	37
Şekil 3.5. ANSYS Fluent program ara yüz görüntüsü	38
Şekil 3.6. ANSYS Fluent program ara yüz görüntüsü	39
Şekil 3.7. Akış alanının oluşturulması	40
Şekil 3.8. Mesh işleminin yapılması	41
Şekil 3.9. Ağ yapısı görünümü	41
Şekil 3.10. Ağ yapısı yan görünümü	42
Şekil 3.11. Ağ yapısı üst görünümü	42
Şekil 3.12. ANSYS Fluent'te sınır şartlarının tanımlanması	43
Şekil 3.13. 1 Numaralı model (Orijinal tasarım)	45
Şekil 3.14. 2 Numaralı model	46
Şekil 3.15. 3 Numaralı model	46
Şekil 3.16. 4 Numaralı model	47

Şekil 4.1. C_D 'nin ön cam açısı ile değişimi	48
Şekil 4.2. Ön cam açısı 20° olan model	49
Şekil 4.3. Ön cam açısı 30° olan model	49
Şekil 4.4. Ön cam açısı 40° olan model	49
Şekil 4.5. Ön cam açısı 50° olan model	49
Şekil 4.6. Ön cam açısı 60° olan model	49
Şekil 4.7. Renault-Kangoo C_D 'nin ön cam açısı ile değişimi	50
Şekil 4.8. Arka cam açısı 30° olan model	51
Şekil 4.9. Arka cam açısı 35° olan model	51
Şekil 4.10. Arka cam açısı 40° olan model	51
Şekil 4.11. Arka cam açısı 45° olan model	51
Şekil 4.12. Arka cam açısı 50° olan model	52
Şekil 4.13. Arka cam açısı 55° olan model	52
Şekil 4.14. Arka cam açısı 60° olan model	52
Şekil 4.15. Arka cam açısının C_D 'ye etkisi	52
Şekil 4.16. Arka cam açısı 30° olan model	52
Şekil 4.17. Arka cam açısı 35° olan model	52
Şekil 4.18. Arka cam açısı 40° olan model	53
Şekil 4.19. Arka cam açısı 45° olan model	53
Şekil 4.20. Arka cam açısı 50° olan model	53
Şekil 4.21. Arka cam açısı 55° olan model	53
Şekil 4.22. Arka cam açısı 60° olan model	53
Şekil 4.23. Arka cam açısı ile C_D 'nin değişimi	54
Şekil 4.24. Model basınç dağılımı	55
Şekil 4.25. 2. Model basınç dağılımı	55
Şekil 4.26. 3. Model basınç dağılımı	55
Şekil 4.27. 4. Model basınç dağılımı	55
Şekil 4.28. 1. Model akım çizgileri	57
Şekil 4.29. 2. Model akım çizgileri	57
Şekil 4.30. 3. Model akım çizgileri	57
Şekil 4.31. 4. Model akım çizgileri	57
Şekil 4.32. 1. Model hız vektörleri	58
Şekil 4.33. 2. Model hız vektörleri	58
Şekil 4.34. 3. Model hız vektörleri	58
Şekil 4.35. 4. Model hız vektörleri	58
Şekil 4.36. Modellerin C_D katsayısı değişimi	60
Şekil 4.37. Modellerin C_L katsayısı değişimi	61

ÇİZELGELER

Sayfa No

Çizelge 1. 1200 kg'lık benzinli bir motor kullanılan otomobilin 90 km/h'te yakıt ile verilen enerjinin kullanımı (%)	12
Çizelge 2. Temel mühendislik büyüklüklerinin bir kısmının temel boyutlar cinsinden ifadesi	23
Çizelge 3. Otomobil modelinin fabrika teknik verileri	35
Çizelge 4. Eclousure- Details View değerleri	38
Çizelge 5. Mesh nokta ve element sayısı	42
Çizelge 6. Sınır şartları	43
Çizelge 7. Taşıt modeli üzerinde yapılan değişiklikler	47
Çizelge 8. Renault-Kangoo ön cam eğim açısı ile direnç kuvveti değişimi ve C_D	48
Çizelge 9. Renault-Kangoo ön cam açısı ve C_D değişimi	50
Çizelge 10. Arka cam açısı ile C_D 'nin değişimi	53
Çizelge 11. Maksimum ve minimum basınç değerleri (Pa)	56
Çizelge 12. Araç modellerinin C_D ve C_L değerleri	60

1. GİRİŞ

Günümüzde artan nüfus ile birlikte enerji talebinde ve tüketiminde de önemli artışlar yaşanmaktadır. Bu bağlamda birincil enerji kaynakları arasında bulunan petrol ve türevi yakıtlarının da kullanımı giderek artmaktadır. Nitekim yapılan projeksiyonlarda 2025 yılına kadar petrol ve ürünleri tüketiminin artacağı belirtilmektedir. Ülkemiz de gelişen ekonomik durumu ile dünyadaki önemli enerji tüketen ülkeler arasındadır ve ayrıca toplam birincil enerji arzı içerisinde petrol birinci sırada yer almaktadır (Anonim 1). Yine ülkemizde 2018 yılı için birincil enerjinin %20'sinin ulaşırmada kullanıldığı ve motorlu kara taşıtı sayılarının giderek arttığı belirtilmektedir. 2019 sonu itibariyle motorlu taşıtlar arasında otomobiller %54,1 gibi en büyük orana sahip olmakta ve bu otomobillerin %37,3'ü LPG, %38,1'ü dizel, %24,2'unun benzin yakıtlı olduğu belirtilmiştir (Anonim 2). Bu sonuçlardan da anlaşılacağı üzere giderek artan taşıt kullanımına paralel olarak petrol ve ürünlerinin tüketiminde de artış olmaktadır. Bununla beraber 2019'da ülkemizde ortalama 60 000 varil/gün ham petrol üretimi; buna karşılık yaklaşık 684 000 varil/gün ham petrol tüketimi; 624 000 varil/gün ham petrol ithalatı, 273 000 varil/gün ise işlenmiş ürün ithalatı olmuştur (Anonymous 1). Bu verilerden de anlaşılacağı üzere son zamanlarda sınırlı bir rezerve sahip olan ve giderek azalan petrolün daha verimli kullanılması ile ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Bununla beraber petrol ürünlerinin kullanımından kaynaklanan çevre ve hava kirliliğinden dolayı da petrol kullanımının azaltılması ve daha verimli bir şekilde kullanılması ile ilgili yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Bu bağlamda bu yakıtların daha verimli yakılması ile ilgili geliştirilen motor teknolojilerinin (Altun ve Rodríguez-Fernández, 2016) araştırılması başta olmak üzere taşıtlarda yakıt tüketimine etki eden güç aktarma organları (Köylü, 2017), tekerlekler ve taşıtın aerodinamik yapısı (Ertekin, 2011) araştırılmaktadır.

Motorlarda uzun bir zamandan beri alternatif yakıtların kullanılması, aşırı doldurma sistemleri ile egzoz gazı resirkülasyonu (EGR), değişken supap zamanlama sistemleri, silindir deaktivasyonu, partikül filtreleri, oksidasyon katalizörleri ile SCR gibi egzoz sistemleri, mekanik parçalarda ağırlık ve sürtünmenin azaltılması için farklı malzeme çeşitlerinin kullanılması ile yanma odası parçalarının kaplanması ve daha birçok çalışma yapılmıştır (Lapuerta ve ark, 2014 - Çağlayan, 2020). Son zamanlarda

ise başta homojen dolgulu sıkıştırmayla ateşleme (HCCI) ve reaktivite kontrollü sıkıştırmayla ateşleme (RCCI) gibi uygulamaları bulunan düşük sıcaklıkta yanma stratejileri (Uyumaz ve Solmaz, 2016 – Aka, 2003) yüksek termik verim ve daha düşük egzoz emisyonlarının sağlanması için yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Taşıtlarda aerodinamik dirençler de uzun bir zamandan beri çalışılan ve özellikle yüksek taşıt hızlarında yakıt tüketimine önemli bir şekilde etki eden parametrelerdendir. Taşıtın hareketi sırasında çevresinde bulunan hava, taşıtın ön ve arka yüzeyleri arasında basınç farkı oluşturur ve aynı zamanda taşıt yüzeyinde oluşan bir hava sürtünmesi nedeniyle de harekete bir direnç oluşmaktadır (Hacıbekir, 2006). Dolayısıyla taşıtın aerodinamik yapısının geliştirilmesi ile hava direncinin azalacağından dolayı taşıt aerodinamiği ile ilgili yapılan çalışmalar çoğunlukla hava direncini azaltacak tasarım ve modifikasyonlar üzerinde yoğunlaşmaktadır (Solmaz, 2010 – Bayındırlı ve Çelik, 2019). Öte yandan taşıt aerodinamiğinin, performans ve yakıt tüketimi üzerindeki etkisinin yanında aynı zamanda seyir halindeki taşıtın konfor ve sürüş güvenliği ile dış görünümünü de önemli bir şekilde etkilenmektedir.

Hareket halinde araç etrafındaki havanın sürekli yer değiştirmesiyle araç etrafında aerodinamik direnç ya da aerodinamik sürüklenme (C_D) olarak adlandırılan boyutsuz olarak temsil edilen bir aerodinamik sürüklenme kuvveti oluşturur. Motorlu araçlarda yakıt tüketiminin azaltılması için yapılan çalışmalarda C_D 'nin azaltılması büyük önem arz etmektedir. Araç hızı artması ile aerodinamik kuvvetlerin diğer kuvvetlerden daha baskın olduğu bilinmektedir. Bu nedenle özellikle otomobillerin dış tasarımlarının optimize edilmesi yakıt tüketimi açısından önemli bir yer tutmaktadır.

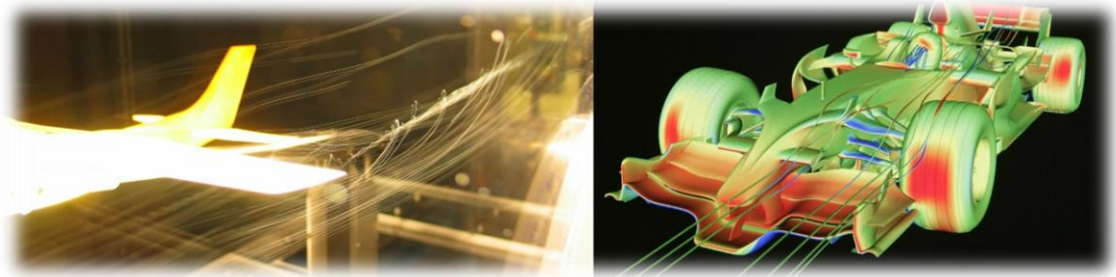
Aerodinamikte sadece aerodinamik direnç kuvvetinin azaltılması söz konusu olmayıp, taşıt etrafında meydana gelen hava akışı, taşıtın yol tutuşu ve sürüş kararlılığı üzerinde önemli bir etkiye sahip olan kaldırma kuvvetini ve basınç merkezinin konumunu da etkiler. Taşıtın alt gövdesiyle yol arasındaki etkileşim nedeniyle meydana gelen yer etkisi taşıtın hareketine karşı koyan aerodinamik direnç kuvveti üzerinde çok düşük bir etkiye sahip olmasına karşın, taşıtın yol tutuşunu etkileyen kaldırma kuvveti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu çalışmada model taşıtın tasarımda yapılan değişiklikler sayesinde C_L (Kaldırma Kuvveti) değerinde iyileştirmeye gidilerek aracın yol tutuşuna yönelik olumlu bir kazanım elde edilmesi amaçlanmıştır.

Bir otomobilin aerodinamik açıdan tasarımı yapılırken taşıt etrafındaki hava akışının taşıtın far ve cam yüzeyleri üzerinde su ve kir birikintileri oluşturduğu faktörü göz önünde bulundurulmalıdır. Buna ilaveten, taşıtın hareketinden dolayı taşıt etrafında meydana gelen rüzgâr sesi seviyesinin azaltılması ile motor, yolcu bölümü, fren diskleri veya kampanaları ve şanzımanın soğutulması için gerekli olan havalandırma akışlarının dikkate alınması taşıtın dış gövde tasarımı için önemlidir.

Bu çalışmada SolidWorks aracılığıyla modellemesi yapılan binek bir otomobil modelinin ANSYS Fluent aracılığıyla aerodinamik performansı sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada “J segmenti” ve “Premium SUV” kategorisinde yer alan bir binek tipi motorlu taşıt modelinin tasarımında i) ön cam-kaput, cam-tavan, tavan-arka cam birleşim yüzeylerinde ve ön tamponun alt kısmındaki keskin hatlar yuvarlatılmış, ii) 40° olan ön cam açısı 34°’ye daraltılmış ve son olarak iii) 359° olan tavan çizgisi eğimi 2° azaltılarak 357° olarak yeniden çalışılmıştır. Çalışmada taşıt etrafında oluşan akışın şekli, hız profilleri ve basınç dağılımları C_D ve C_L değerleri incelenmiştir.

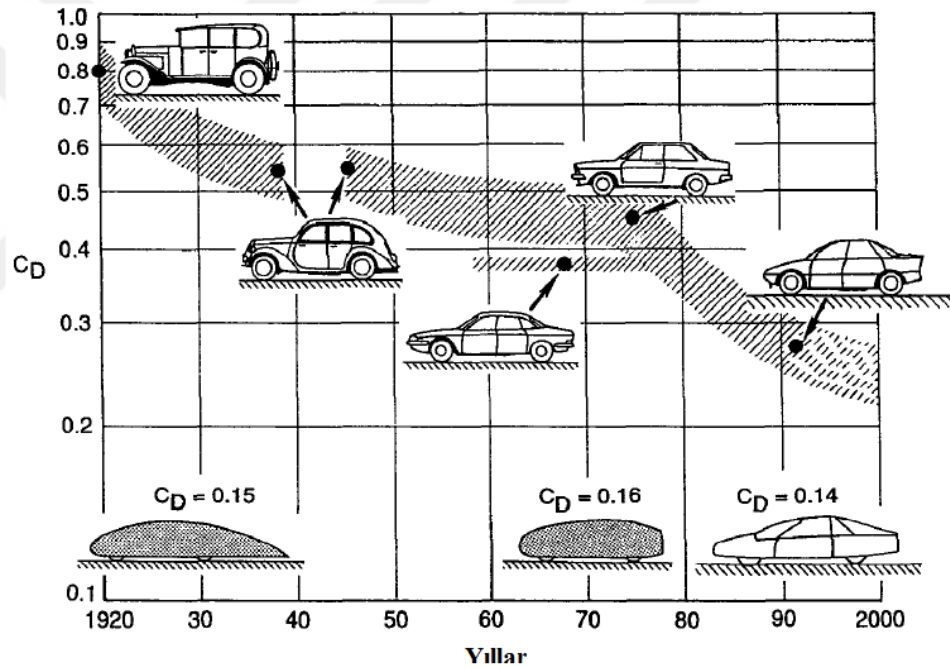
1.1. Aerodinamik

Aerodinamik; hareketli katı kütlelerin hava ile etkileşimlerini inceleyen bilim dalıdır. Şekil 1.1’de gösterildiği gibi havanın hareketi ve uçağın kanadı, havanın katı bir cisim ile etkileşime geçmiş olması durumuna örnek gösterilebilir. Gaz dinamiği ve akışkan dinamiğinin bir alt dalı olarak nitelendirilen aerodinamiğin birçok bakış açısı teorisi bu alanlarda ortak yapıya sahiptir. Genel itibarıyla gaz dinamiği için kullanılan aerodinamiğin, gaz dinamiğinden farkı; gaz dinamiği tüm gazlar için çalışırken, aerodinamiğin yalnızca hava ile ilgili çalışmasıdır (Anonim 4).



Şekil 1.1. Uçak ve F1 aracı aerodinamik görseli (Anonymous 2).

100 yıl öncesine kadar, içten yanmalı motorlar yük taşımak için kullanılan atların yerini aldığı zaman taşıt aerodinamiğiyle ilgili bilimsel çalışmalar bulunmamaktaydı. O yıllarda, yük taşıma amacıyla kullanılan araçlara dış gövde ilave edilmesinin nedeni önceden olduğu gibi sürücü ve yolcuları rüzgâr, yağmur ve çamur gibi dış etkenlerden korumak için olduğu bilinmektedir. Bu tip araçların dış gövde tasarımını aerodinamik açıdan değerlendirme fikri, aradan uzun yıllar geçtikten sonra hava araçları teknolojisinde önemli derecede ilerlemeler kaydedildiğinde gündeme gelmiştir. Uçaklar ve diğer hava araçlarında motordan elde edilen güçle daha yüksek seyir hızlarına çıkılabilmek için aerodinamik direnç kuvvetinin önemli derecede azaltılması, geliştirilen akım çizgili gövde tasarımları sayesinde mümkün olmuştur (Özen, 2015).

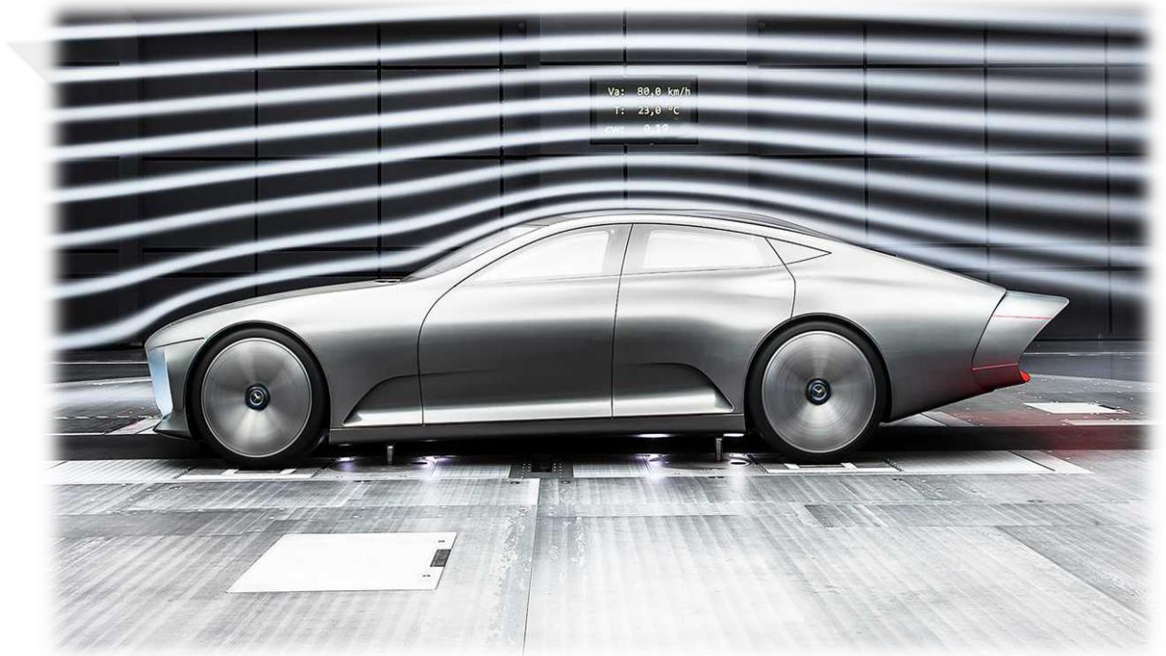


Şekil 1.2. Araçların aerodinamik direnç katsayısının tarihçesi (Hucho, 1993).

Taşıtların dış gövde tasarımları yıllar geçtikçe ciddi derecede değişime uğramış olduğu Şekil 1.2'de görülmektedir. 1970'li yıllarda ortaya çıkan petrol krizi, yakıt ekonomisini önemli ölçüde arttırmak için üretici firmalar üzerinde büyük baskı oluşturmuş ve bu baskıyla beraber taşıt aerodinamiği için yeni bir dönem açılmıştır. O yıllardan beri taşıtların yakıt ekonomisiyle doğrudan bağlantılı olan aerodinamik direnç Taşıtların dış gövde tasarımları yıllar geçtikçe ciddi derecede değişime uğramış olduğu Şekil 1.2'de görülmektedir. 1970'li yıllarda ortaya çıkan petrol krizi, yakıt ekonomisini önemli ölçüde arttırmak için üretici firmalar üzerinde büyük baskı oluşturmuş ve bu

baskıyla beraber taşıt aerodinamiği için yeni bir dönem açılmıştır. O yıllardan beri taşıtların yakıt ekonomisiyle doğrudan bağlantılı olan aerodinamik direnç katsayısı yüksek oranlarda düşürülmüştür (Hucho, 1993).

Aerodinamik özellikle uçakların, füzelerin ve roketlerin hava ile arasındaki hareketlerini belirleyen ilkeleri ortaya koyar. Aerodinamik aynı zamanda gemi, otomobil, hızlı tren tasarımlarının yanı sıra yüksek yapıların, köprülerin ve şiddetli rüzgârların oluşturduğu kuvvetlere karşı dayanabilecek şekilde tasarlatılmasıyla ilgili çalışır. Şekil 1.3'te bir araç üzerindeki akım çizgileri gösterilmiştir.



Şekil 1.3 Mercedes-Benz aracın akım çizgileri (Anonymous 3).

Aerodinamik çalışmalar uzay mühendisliğinde büyük öneme sahiptir. Otomobilleri tasarımlarını da içine alan birçok önemli faktörde etkiye sahiptir. Gemicilik sektöründe ise gemiye etki eden moment ve kuvvetlerin önceden belirlenmesi büyük öneme sahiptir. İnşaat sektöründe binalar ve köprü gibi yapılarda rüzgâr birikmesinin tespiti için aeroelastiklik ve aerodinamikten faydalanılır. Şehir planlamacılar da aerodinamik bilim dalından faydalanır ve dış mekân tasarımında aerodinamik ilkelerine dayanarak yaptıkları tasarımlarla konforu artırır (Anonim 4).

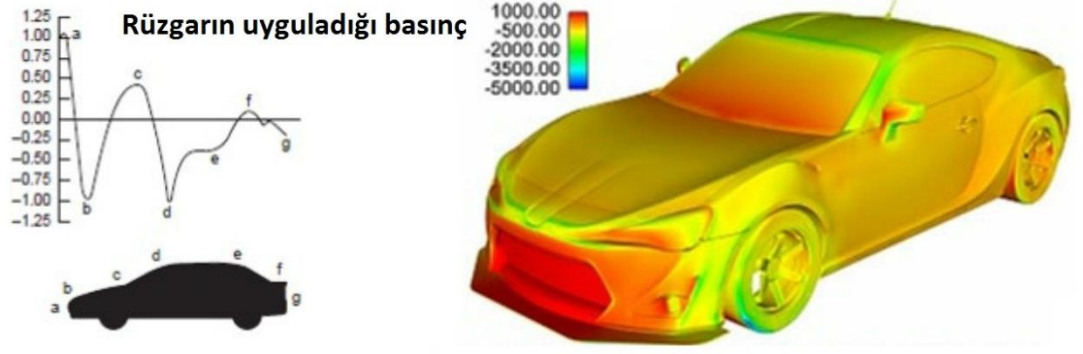
1.2. Aerodinamiğe Etki Eden Atmosferik Şartlar

Aerodinamiği etkileyen atmosferik şartlar, aerodinamik ve hematolojik karakter olarak iki grupta incelenebilir. Hematolojik karakter içerisinde yoğunluğun basınç ile doğru sıcaklık ile ise ters orantılı olduğu, bununla beraber deniz seviyesinde havanın ağırlığının 1,29 kg olduğu gibi parametrelerin yer aldığı havanın ağırlığı, standart atmosfer, havanın basıncı, havanın sühneti ve havanın rutubeti yer almaktadır. Aerodinamik karakter içerisinde ise havanın sıkıştırılabilir olması, elastikiyeti, direnci ve enerjisi gibi faktörler yer almaktadır (Anonim 4).

1.3. Araçlarda Aerodinamik

Genel anlamıyla araçlarda aerodinamik, havanın kuvvetsel etkilerini inceleyen bilim dalıdır. Hareketsiz bir halde duran hava içinde hareket eden katı cisim veya katı bir cisim etrafında akan hava göz önüne alındığında, hava aerodinamik kanunlarına elverişli davranır. Sürüklenme ve taşıma kuvvetleri hava akımından doğan kuvvetlerdir. Hava araçlarında, söz konusu sürüklenme ve taşıma kuvvetleri önemli faktörler iken, kara nakil araçları için belirli bir hız seviyesine kadar sadece direnç sürüklenme kuvveti önemlidir. Fakat Formula 1 arabaları gibi söz konusu çok hızlı araçlarda, taşıma kuvveti dikkate alınması gereken önemli bir parametre olmaktadır. Bu kuvvetler hızın karesi ile orantılıdır (Anonim 4).

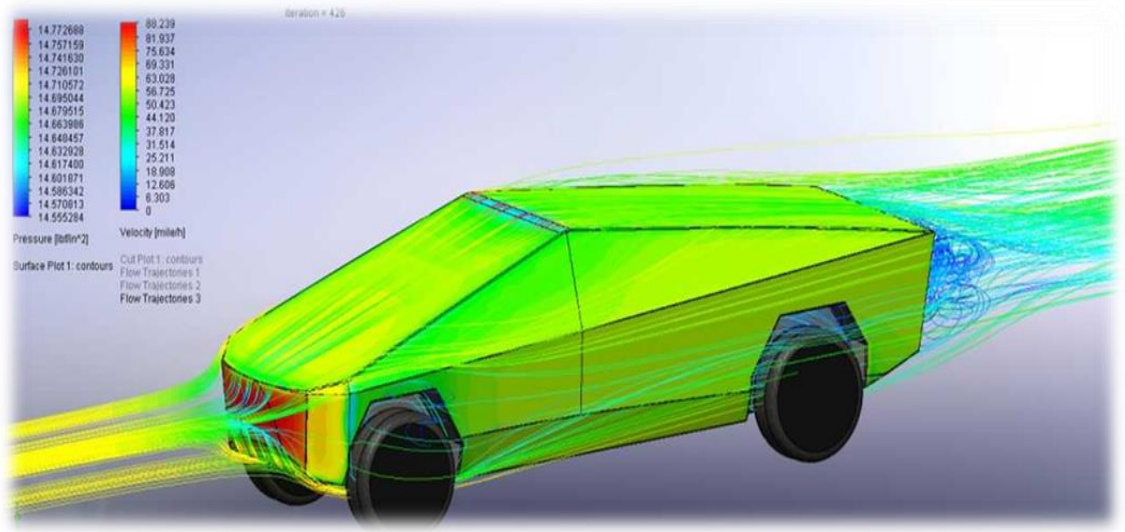
Aracın havanın içinden daha stabil bir geçiş sağlaması, dengesinin ve yakıt ekonomisinin iyi olması için otomobillerin hava sürtünme katsayısının düşük olması önemli bir parametredir. Bu yönde rüzgâr tünel testleri aracın tasarımda C_D değeri düşük bir tasarıma ulaşmak için yön veren önemli bir testtir. Sürüklenme katsayısı (C_D), bir otomobilin ne kadar dirençle karşılaşacağını gösterir. 1960 yılı şartlarında 0.5 C_D olan değerler, günümüz teknolojisiyle birlikte 0.3'lü seviyelere düşürülebilmektedir. Bunun temel sebebi de günümüz otomobil tasarımlarının önceki modellere göre daha düşük hava sürtünmesi oluşacak şekilde tasarlanmasıdır. Şekil 1.4'te günümüzde tasarlanmış bir otomobilin basınç dağılımı analizi gösterilmiştir (Anonim 3).



Şekil 1.4. Rüzgâr basıncının araç üzerinde dağılımı (Anonim 6).

Araç yüzeyiyle hava arasındaki sürtünme kesintisiz ve pürüzsüz olması başarılı sonuçlar almak için önemli bir etkendir. Buna yönelik:

1. Camların, aracın kaportasıyla birleşim yüzeylerinin arasında yükseklik farkı olmayacak şekilde dizayn edilmesi.
2. Çamurlukların örtülmesi.
3. Araç altında yer alan girintilerin ve çıkıntının örtülerek düzleştirilmesi.
4. Yan aynaların aerodinamik bir tasarıma sahip olması.
5. Ön ve arka camların dik bir tasarımdan ziyade daha yatık olarak tasarlanması.
6. Ön ve arka tekerleklerin arasına etekler monte edilmesi.
7. Ön panelin altında hava kesici kullanılması gibi çalışmalar yapılmaktadır.
8. Lastik oyuklarının genişletilmesi sayesinde jant çıkıntılarının önlenmesi (Anonim 4).

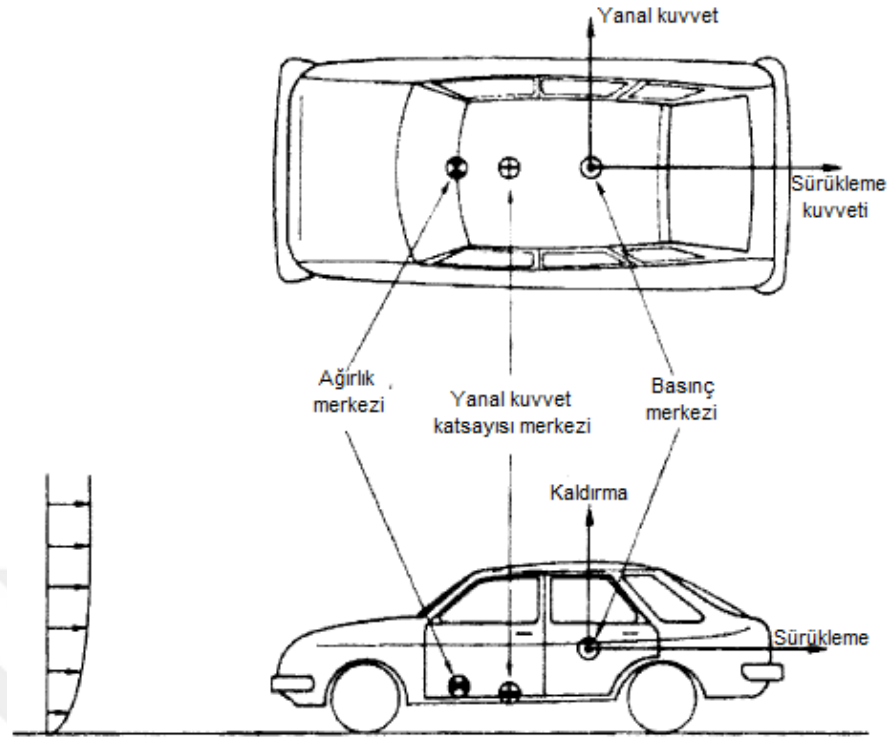


Şekil 1.5. Tesla Cybertruck aerodinamik analiz görüntüsü (Anonymous 1).

Aerodinamik tasarımlarda günümüzde damla formuna yakın tasarımlar etkinliğini arttırmışken Tesla şirketi tarafından tasarlanan “Cybertruck” model isimli otomobilin tasarımı keskin hatları sebebiyle aerodinamiği eleştirilen bir model olarak gündeme gelmiştir. Aracın aerodinamik akım çizgileri Şekil 1.5’te gösterilmiştir.

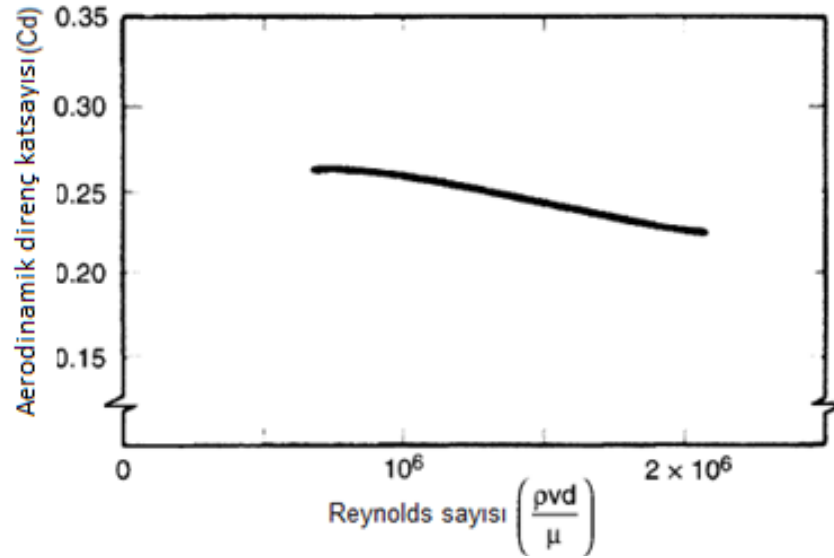
1.3.1. Aerodinamiğin önemi

Tüm seyir hızlarında kararlı bir sürüş, yanal kuvvet katsayısı merkezi ağırlık merkezinin arkasında olmasıyla mümkündür. Şekil 1.6’te yanal kuvvet katsayısı merkezi gösterilmiştir. Basınç merkeziyle yanal kuvvet katsayısının merkezi aynı yerde değildir, fakat yanal kuvvet katsayısının merkezi, ön ve arka yük transfer karakteristiklerine ve tahrik edilen akstaki tahrik kuvvetinin etkilerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Basınç merkezi, yanal kuvvet katsayısı merkezinin arkasında olursa taşıtın sürüş kararlılığı iyi olur. Taşıtlarda basınç merkezinin ağırlık merkezinin önünde olması durumunda taşıtın sürüş kararlılığında bozulma olur ve istenen sürüş konumunda meydana gelen sapma ağırlık merkezi etrafında bir dönme momenti oluşturur. Bu dönme etkisi yanal kuvvet katsayısı konumuyla ilgili olan tekerlek kayma açılarının değiştirilmesiyle azaltılabilmektedir (Stone ve Ball, 2004).



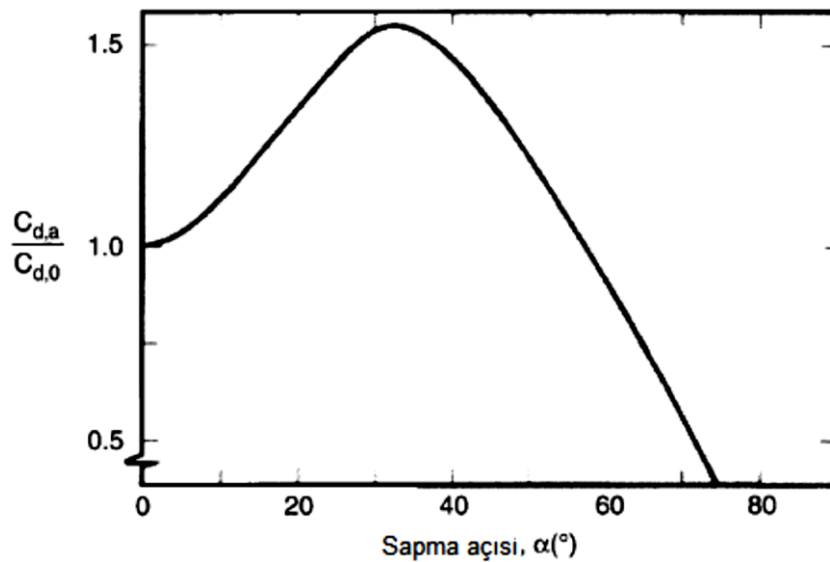
Şekil 1.6. Seyir halindeki bir taşıt üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetler (Stone ve Ball, 2004).

Taşıtların aerodinamik direnç katsayıları karşılaştırılırken hız ve alanın iyi bir şekilde tanımlanması önemlidir. Hız taşıt hızı olabilir, alan ise tekerlekler, yer ve taşıtın alt tarafı olan sınırlandırılmış bölgeyi içine almayabilir. Bu nedenle, ön bakış alanı ve aerodinamik direnç katsayısının bir arada ($A.C_D$) yazılması daha doğrudur. Aerodinamik direnç katsayısının yüksek akış hızlarında Reynolds sayısına daha az bağımlı olduğu önceden yapılan deneysel çalışmalarla görülmüştür. Şekil 1.7’de Reynolds sayısı 2×10^6 ’nın üzerinde olduğu zaman aerodinamik direnç katsayısının Reynolds sayısından bağımsız hale geldiği görülmektedir (Stone ve Ball, 2004).



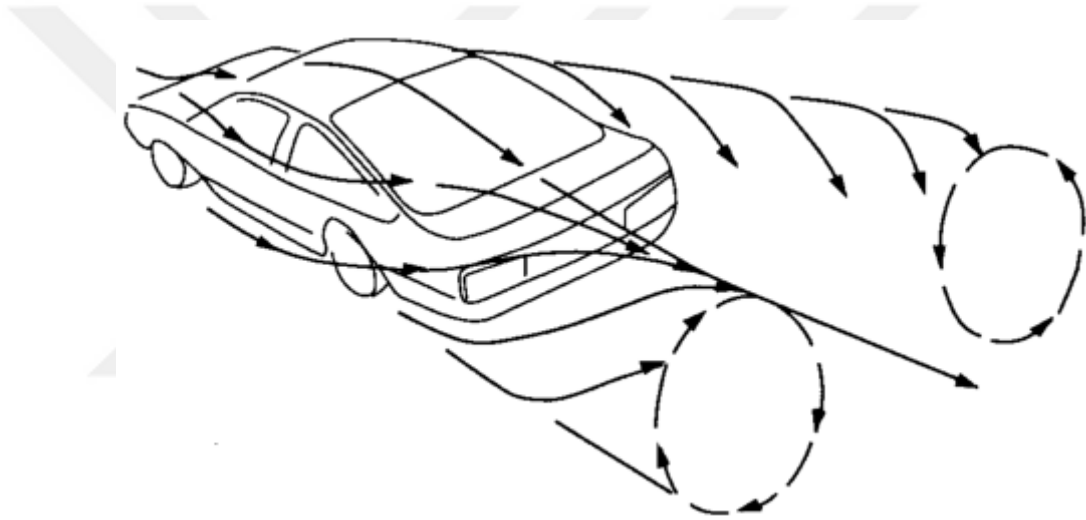
Şekil 1.7. Reynolds sayısının aerodinamik direnç katsayısına etkisi (Stone ve Ball, 2004).

Aerodinamik direnç katsayısını etkileyen bir diğer faktör taşıtın sürüş kararlılığı üzerindeki önemli etkisi olan sapma açısıdır. Şekil 1.8’de tipik bir taşıt için sapma açısının sürüklenme katsayısı üzerindeki etkisi görülmektedir. Taşıtın yan tarafında olan akış ayrılması sebebiyle sıfır olmayan sapma açısında sürüklenme katsayısı artış göstermektedir. Sapma açısı taşıtın hareketi yönünde olmayan bir rüzgârdan kaynaklandığı için aerodinamik direnç katsayısının sapmaya karşı duyarlılığı çok önemlidir (Stone ve Ball, 2004).



Şekil 1.8. Sapma açısının aerodinamik direnç katsayısı üzerindeki etkisi (Stone ve Ball, 2004)

Taşıtın tavanı kısmında akan havanın hızı alt kısma göre yüksek olduğu için tavan üzerindeki havanın basıncı taşıtın alt tarafındaki basınca göre daha düşük olur. Potansiyel akış (sınır tabaka dışında meydana gelen akış) teorisine göre taşıtın üst tarafı ile alt tarafı arasında oluşan basınç farkı, Şekil 1.9'da görüldüğü gibi taşıtın yan tarafları boyunca hortum şeklinde girdaplar ve taşıtı yukarıya doğru itmeye çalışan bir kaldırma kuvvetinin meydana gelmesine neden olur. Kaldırma ve sürüklenme arasında karmaşık bir ilişki vardır. Kaldırma artarken sürüklemenin arttığı, kaldırma azalırken sürüklemenin azaldığı ve kaldırma azalırken sürüklemenin arttığı durumlar bu karmaşık ilişkinin göstergesidir. Teorik olarak, minimum sürüklemenin sıfır kaldırma durumunda meydana geldiği tahmin edilmektedir (Stone ve Ball, 2004).



Şekil 1.9. Taşıt etrafında oluşan hortum şeklindeki girdaplar (Gillespie, 1992).

1.3.2. Otomobildeki kayıplar

Otomobillerde motor tarafından üretilen güç, sistem içindeki ve hava direncindeki kayıpları dengeler. Bu kayıplar başlıca;

- Yuvarlanma
- İvme
- Termodinamik
- Transmisyon kayıplarıdır.

Hava direnci, düşük hızlarda değerlendirildiğinde diğer kayıplara kıyasla oldukça düşük seviyelerdedir. Bununla beraber saatte 30-40 km gibi hız değerlerine ulaştığında hava direnci önem kazanmaya başlar. Bu durum hava direncinin hızın karesi ile doğru orantılı artmasından kaynaklanmaktadır (Anonim 4).

Araç dış formu ve geometrik boyutlarına bağlı direnç katsayısı (C_D) belirlenmiş bir araca herhangi bir hızda etkiyen direnç kuvvetini hesaplamak mümkündür. Örneğin; Rüzgâra dik kesit yüzeyi 3 metrekare ve hızı 30 m/sn (108 km/h) olan bir aracın direnç katsayısı $C_D = 0,45$ olarak kabul edilirse söz konusu araca etkiyen direnç (Anonim 4): $D = 0,5 \times d \times C_D \times A \times V^2$ formülü ile bulunabilir.

Burada;

- d: Havanın yoğunluğu (1.255 kg/m^3)
- V: aracın hızı (m/sn) dir.
- A: Aracın ön kesit alanı (m^2)
- $D = 0,5 \times 1,255 \times 0,45 \times 3 \times (30)^2 = 762,4 \text{ Newton}$

Bu kuvvet aynı zamanda 80 kg ağırlığında bir kütleyi havaya kaldırmak için gerekli olan kuvvet değeridir. Çizelge 1’de ağırlığı, motor tipi ve hızı belirli olan bir otomobilin, belirli ivme ve yük şartlarındaki enerji kayıpları gösterilmiştir (Anonim 4).

Çizelge 1. 1200 kg'lık benzinli bir motor kullanılan otomobilin 90 km/h'te yakıt ile verilen enerjinin kullanımı (%) (Anonim 4).

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	%10,6	%5,9
Transmisyon	%1,8	%0,8
Krank milinden alınan faydalı iş	%22	%28
Taşıta yakıt ile verilen enerji	%100	%100

C_D bir cisim için dış forma bağlı olarak düzgün doğrusal bir akımın içinde oluşturduğu girdap ve süreksizlik gibi bozulmalar ile açığa çıkar. Direnç katsayısının ve bunla ilişkili direnç kuvvetinin düşük olabilmesi için o cismin yüzey formundaki hatlarından kaynaklı akım çizgilerindeki bozulmanın az olmasıyla mümkündür. Bir otomobilin hava direncinden kaynaklı kaybını düşürmek, söz konusu aracın dış yüzey formuna bağlı olan direnç katsayısını C_D 'yi düşürmek gerekmekte ve bu durum (Anonim 4);

- Belirli bir hıza çıkmak için gereken gücü daha küçük bir motor ile yapmak
- Motor gücü sabit olan bir aracın daha yüksek hızlara çıkabilmesi anlamına gelmektedir.

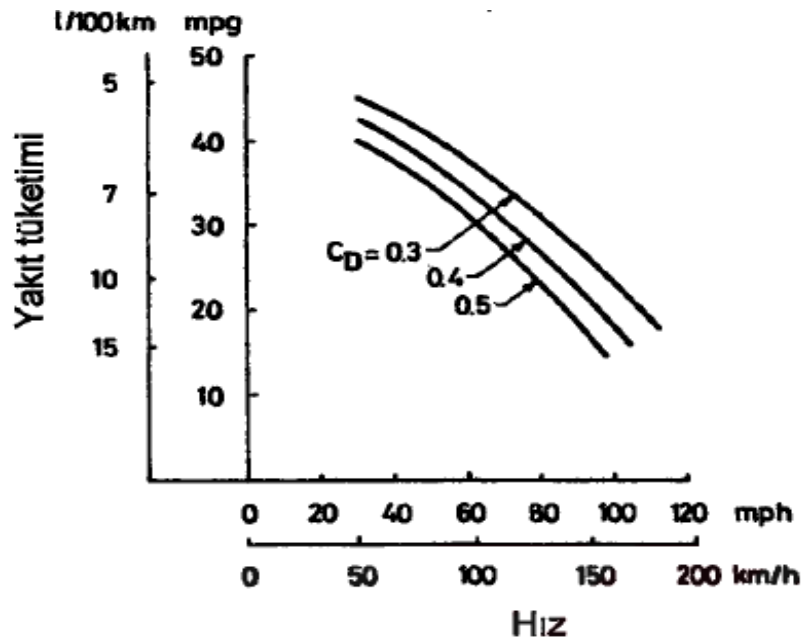
Hız performans kaygısının olduğu süper spor otomobillerde yüksek performans ihtiyacı olduğundan motor gücü sabitken yüksek hız elde etmek, günlük ve ticari amaçlı kullanılan araçlarda yakıt ekonomisi elde etmek için belirli bir hıza, daha düşük bir motor ile çıkabilmek, C_D değerinin önemli bir parametre olduğunu ortaya koyar (Anonim 4).

Günümüz araç dış tasarımlarında hava direnci oluşturacak keskin ve küt tasarımlardan kaçınılarak damla formuna benzeyen tasarımlar üzerinde çalışılması direnç katsayısı C_D 'nin düşürülmesi amacıyla yapılmaktadır. Akım çizgilerinin en az bozulmaya uğradığı tasarım damla formu olarak bilinmektedir (Anonim 4).

1.3.3. Aerodinamik kuvvetler

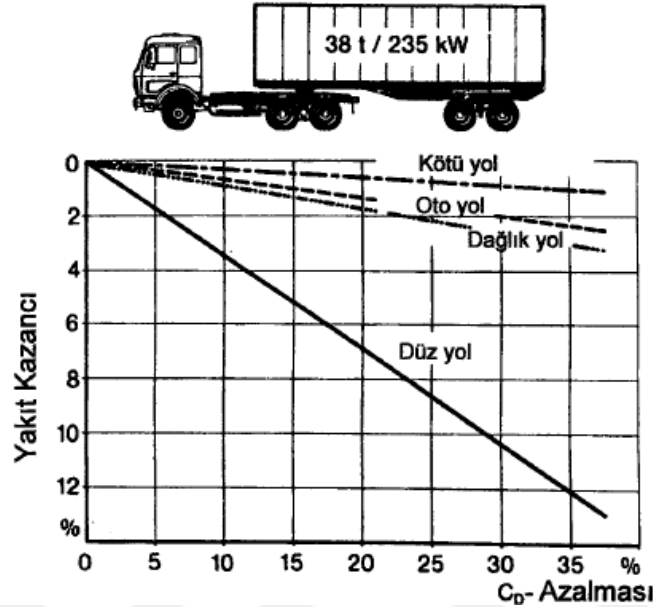
Taşıta etkiye kuvvetlerin birbirine dik olan üç eksen boyunca taşıta etki ettiği düşünülebilir. Bu kuvvetler, aracın öne doğru hareketine karşı koyan aerodinamik direnç kuvveti, aracın yukarı ya da aşağıya doğru yönelmesine neden olan kaldırma kuvveti ve sadece yandan esen rüzgâr durumunda araç üzerinde meydana gelen yanal kuvvet olarak üçe ayrılmıştır (Julian, 2004).

Aerodinamik direnç (sürüklenme) kuvveti: Şekil 1.10'da 1060 kg kütleye, 1.77 m² alın alanına ve radyal lastik tipine sahip bir binek taşıta ait C_D değeri düşüşünün daimî akış şartlarındaki yakıt tüketimine olan etkisi görülmektedir. 96 km/h'lik daimî hız şartlarında C_D değeri 0,5'ten 0,3 seviyesine düştüğünde yakıt ekonomisinde %23'lük bir kazanım elde edilmektedir (Çağan, 2000).



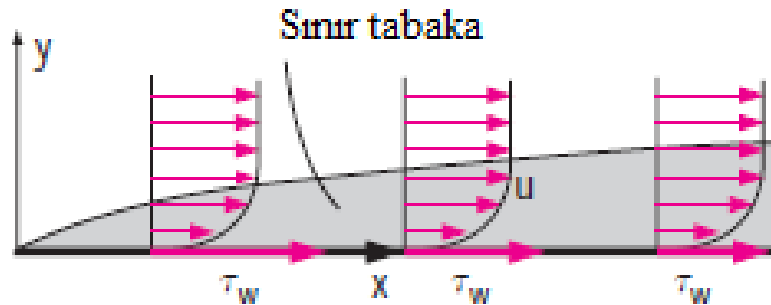
Şekil 1.10. Orta büyüklükte bir binek taşıta için, C_D değeri düşüşünün yakıt ekonomisine olan etkisi (Çağan, 2000).

Şekil 1.11’de bir kamyonu ait C_D değeri düşüşünün farklı yol koşullarındaki yakıt tüketimindeki kazancına olan etkisi gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere bir kamyonun C_D değerinin azaltılması, yakıt ekonomisine en iyi şekilde düz yolda olumlu etkilemiştir. Taşıtların C_D değerinin düşürülmesi önemli bir faktördür bu nedenle önemli bir faktördür. (Çağan, 2000).



Şekil 1.11. Bir kamyon (çekici ve yarı römork) için C_D değerindeki düşüşün yakıt kazancına olan etkisi (Çağan, 2000).

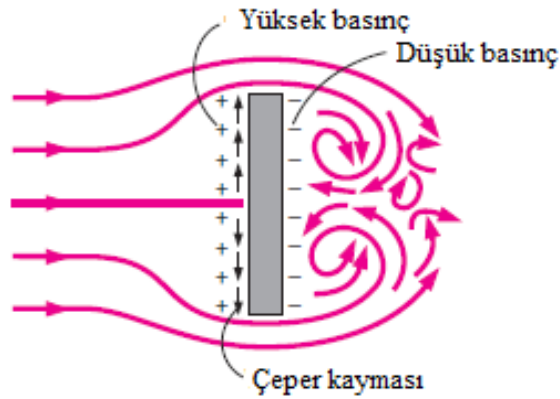
Yüzey sürtünme direnci: havanın katı bir yüzey üzerinden aktığı süreçte sınır tabaka içerisinde oluşan dirence yüzey sürtünme direnci denir. Yüzey sürtünmesi direnç kuvveti, havanın üzerinden geçtiği katı yüzey alanına, yüzey pürüzlülük ya da düzgünlük derecesi ile hava hızına bağlı olan bir faktördür. Düz bir plakaya etki eden direnç kuvveti Şekil 1.12’de gösterilmiştir (Çengel, 2008).



Şekil 1.12. Düz plaka üzerine etki eden direnç kuvvetinin sadece duvar kayma gerilmesine bağlı olması durumu (Çengel, 2008).

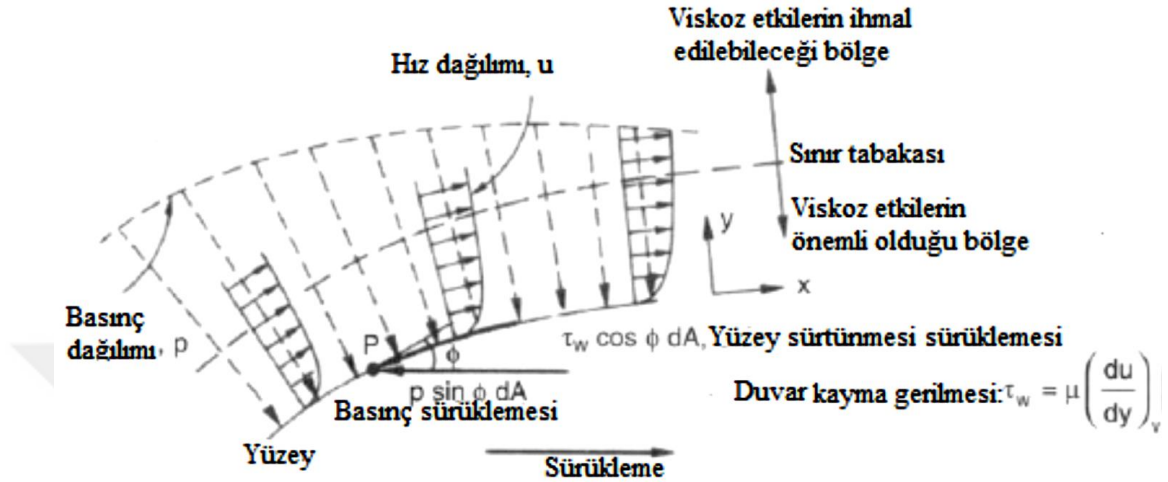
Otomobillerde sürükleme (direnç) kuvveti, otomobile etkiyen en önemli aerodinamik kuvvet bileşeni olarak görülmektedir. Yakıt tüketimi de bu kuvvete bağlı olarak değişkenlik göstermekte ve motorun ürettiği gücün bir kısmı sürükleme kuvvetini karşılamak için kullanılır. Örnek olarak 48 km/h hıza sahip olan bir otomobilde aerodinamik sürtünme, lastik ve yer arasındaki yuvarlanma sürtünmesini aşabilmektedir.

Basınç direnci: akışkan içerisine dalmış cismin önü ve arka kısmına etki eden basınçlar ve ön bakış alanı ile arasındaki farkla doğru orantılıdır. Bu nedenle basınç direnci körlenmiş cisimlerde genellikle daha baskındır. Diğer taraftan kanat formu gibi akım çizgili cisimlerde ihmal edilebilir ve akışla paralel olan ince düz plakalarda sıfırdır. Akışkanın, hızının çok yüksek ve cismin eğriliğini takip edebileceği durumlarda basınç direnci çok önem arz eder ve bu sayede cismin bir noktasında akışkan cisimden ayrılarak cismin arkasında Şekil 1.13'te görüldüğü üzere çok düşük bir basınç bölgesi meydana gelir. Böyle bir durumda basınç direnci, cismin ön ve arka kısımları arasındaki basınç farkının büyük olmasından kaynaklanır (Çengel, 2008).



Şekil 1.13. Akışa dik yerleştirilen düz plakaya etki eden direnç kuvvetinin sadece basınca bağlı olması durumu (Çengel, 2008).

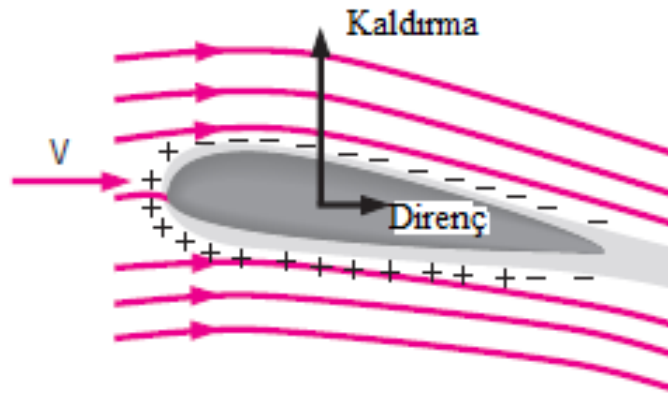
Şekil 1.14'te görüldüğü gibi, hava eğri formda bir yüzey üzerinde sabit hızla aktığında, yüzey üzerine etkiyen toplam sürüklenme kuvveti, yüzey sürtünme kuvveti ve basınç kuvveti olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır (Stone ve Ball, 2004).



Şekil 1.14. Yüzey üzerindeki basınç ve hız dağılımlarının sürüklemeye etkisi (Stone ve Ball, 2004).

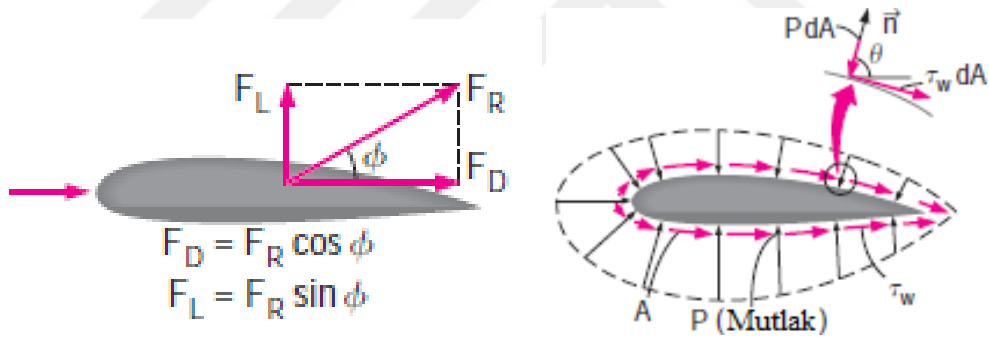
Kaldırma kuvveti: otomobilin simetri düzleminde, sürtünmeden dolayı taşıma kuvveti ve yunuslama momenti, alt ve üst yüzeylerindeki basınç kuvveti meydana gelir. Otomobilin yol ile alt kısmı arasında kalan alan bir kanal gibi çalışmaktadır. Otomobilin arka kısmına doğru kanalın daralmasıyla birlikte akım geriye doğru hız kazanır ve basınç azalır. Kanalın genişlemesi durumunda ise akım yavaşlamaya başlar ve basınç artış görülür. Bu durum ön ve arka tekerleklere kaldırma kuvvetinin dağılımı üzerinde önem arz eden bir durumdur. Bir kanatın kaldırma kuvveti etkisindeki akım çizgileri ve kanata uygulanan kuvvet yönü Şekil 1.15'te görülmektedir. Yunuslama momenti ve kaldırma kuvveti otomobilin kontrolü ve dengesi açısından etkili parametrelerdir (Çengel, 2008).

Durgun vaziyetteki bir akışkan, içine daldırılmış bir cisme karşı sadece dik yönde bir basınç kuvvetleri uygular. Hareketli akışkan ise viskoz etkilerin yol açtığı kaymama koşulundan kaynaklı yüzey üzerine teğetsel kayma kuvvetleri de uygular. Çeper kayma ve basınç kuvvetlerinin akışa karşı dik yöndeki bileşenleri, cismi aynı yönde hareket etmeye zorlamaktadır ve bunların tamamına kaldırma kuvveti denir (Çengel, 2008).



Şekil 1.15. Kanatın kaldırma kuvveti etkisi altında olması durumu (Çengel, 2008).

İki boyutlu akışlarda basınç ve kayma kuvvetlerinin bileşkesi Şekil 1.16'da görüldüğü üzere iki bileşene ayrılabilir. Bunlardan bir tanesi akış yönünde oluşan direnç kuvveti, diğeri ise akışa dik yönde olan kaldırma kuvvetidir (Çengel, 2008).



Şekil 1.16. İki boyutlu bir cisim üzerine etki eden basınç kuvveti ve viskoz kuvvet ile bileşke, direnç ve kaldırma kuvvetleri (Çengel, 2008).

1.4. Aerodinamik Etkilerin Hesaplamaları

Bir cisim üzerine etkiyen aerodinamik etkilerin hesabı sayısal analiz yöntemiyle paket programlar yardımıyla ve deneysel olarak rüzgâr tüneli kullanarak çözümlenebilir ve üretici firmaların vermiş olduğu değerlerle kıyaslanabilir.

1.4.1. Sayısal analiz yöntemi

1.4.1.1. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği günümüzde özellikle akışkan ile alakalı olan problemlerin analizlerinin yapılmasına ve performanslarının testinde kullanılır. Bu programlar sayesinde enerji, süreklilik ve momentum denklemleri bilgisayarlar vasıtasıyla sayısal olarak çözümlenmekte ve akışla ilgili bazı parametrelerin dağılımlarının bulunmasına imkân tanımaktadır (Anonim 5). ANSYS Fluent hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözümlemelerinde kullanılan yaygın programlardan biridir.

Sonlu elemanlar ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile ilgili analizlerinde kullanılmaya elverişli olan Gambit genel amaçlı bir ön işlemcidir. Gambit aynı zamanda içeriğinde bulundurduğu katı modelleme araçları yardımıyla hem orta derecede karmaşık geometrilerin tasarlanmasında hem de gelişmiş geometri içe aktarım kapasitesinin yardımıyla SOLIDWORKS, Pro/ENGINEER, UNIGRAPHICS, CATIA ve I-DEAS gibi profesyonel katı modelleme programlarında tasarlanan modellerin içe aktarımına imkân sunmaktadır. Öte yandan ANSYS Fluent, bir başka sonlu hacimler yöntemiyle çözümler yapan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımıdır. Çok uzun zamanlardan beri en yaygın bir şekilde kullanılan yazılım olan Fluent (Anonim 5), başta otomotiv ve havacılık endüstrisi olmak üzere beyaz eşya, turbo makineler, yiyecek ve kimya endüstrisi gibi farklı birçok alanda ısı transferi ve akışkanlar mekaniği problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır.

1.4.2. Deneysel yöntemler

Motorlu taşıtlara etkiyen aerodinamik kuvvetler taşıtın etrafındaki akım alanının yapısına bağlıdır. Bu akım alanıyla ilgili hava tünellerinde gerçek boyutlardaki modeller üzerinde deneyler yapılmaktadır. Motorlu kara taşıtları için Schlichting'in iplik, yağ ve duman yöntemi gibi metotların kullanılması ile birlikte su tünelleri de kullanılabilmektedir (Schlichting, 1960).

Günümüzde rüzgâr tünellerinde yapılan deneyler hızlı, kolay, ucuz ve güvenilir olduğundan daha fazla tercih edilmektedir. Rüzgâr tünellerinde taşıtların gerçek yol şartlarındaki durumunu yapay olarak simüle edilmektedir. Rüzgâr tüneli deneylerinde sürüklenme (hava direnç) kuvvetinin optimizasyonu için çalışmalar yapılabilmektedir. Sürüklenme kuvvetinin azaltılması yakıt ekonomisine olumlu yönde katkı sağlamaktadır (Gümüşlüol ve ark, 2006).

Otomobil gibi kara taşıtları, çevresindeki akım alanın üç boyutlu olmakla beraber oldukça kompleks bir yapıya sahiptir. Hava tüneli deneylerinde blokaj etkisi önemli olduğundan açık deney odalı olanları daha çok tercih edilmektedirler (Atlı, 1985).

Hava tüneli deneyleri yapılması otomobil sanayisinin ülkemizde gelişebilmesi için önemlidir. İTÜ Aerodinamik Laboratuvarındaki Hava Tünelleri, ODTÜ Hava Tüneli, TÜBİTAK SAGE ve Ankara Rüzgâr Tünelleri bu maksatla kullanılabilir (Canbazoğlu, 2000).

1.4.2.1. Benzerlik

Deneyisel çalışma için gerekli teçhizatlarının maliyeti, prototipin boyutsal büyüklüğü ve buna bağlı olarak gerekli olan çalışma alanının büyüklüğü vs. gibi nedenlerden dolayı deneyisel çalışmaların gerçek prototipler ile yapılması güç bir hal almakta ve model kullanımının gerekliliği ön plana çıkmaktadır. Model ile yapılan çalışma sonuç verilerinin prototipe uygun olması açısından modelin özelliklerinin prototipe çok yakın veya aynı olması gerekir. Akışkanlar dinamiği deneylerinde model ve prototip arasında üç farklı benzerlik türünün olması beklenir. Bunlar geometrik, kinematik ve dinamik benzerliklerdir (Aka, 2003).

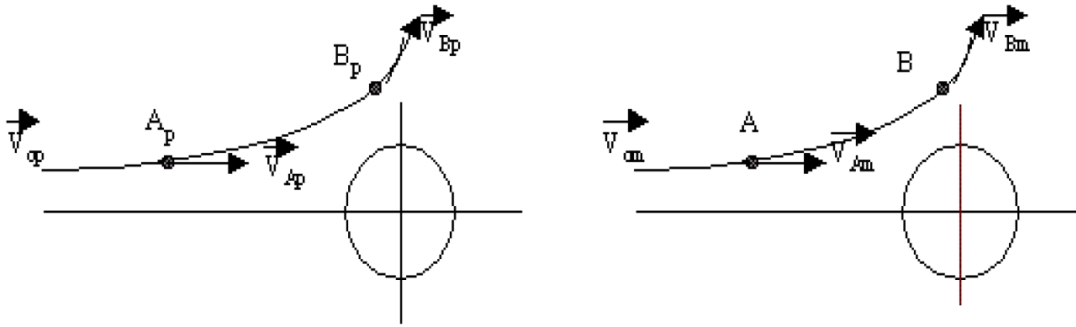
Geometrik benzerlik: geometrik benzerliğin uygulanması için modelin boyut ölçüleri prototip ile aynı olması gerekmektedir.

Kinematik benzerlik: kinematik benzerlik faktörünün uygulanması için model ve prototip üzerindeki hız vektörleri olan mutlak ve paralel değerlerinin oranlarının

sabit olması gerekmektedir. Kinematik benzer akışların vektörel gösterimi Şekil 1.17’de gösterilmiştir (Aka, 2003).

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

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



Şekil 1.17. Kinematik benzer akışlar (Aka, 2003).

Aerodinamik deneylerde akım çizgilerinin prototip ve model için aynı olduğu bir durumda kinematik benzerlik şartının sağlanması anlamını taşır. Rüzgâr tüneli deneylerinde kinematik benzerliğin uygulanması blokaj etkisiyle de ilişkilidir. Normal şartlarda durağan bir durumdan hareketli duruma geçiş yapan otomobil etrafında meydana gelen hava hareketi, aracın dış formunda bir sınır tabaka oluşturur. Plaka yüzeyinden yukarı doğru gittikçe akışkanın sınır tabaka içindeki hızı parabolik bir oranla artış gösterir, plaka yüzeyinden itibaren belli bir δ yükseklikte hız, serbest akış hızına eşit olur. Prandtl, δ yüksekliğini "sınır tabakası kalınlığı" olarak isimlendirilmiştir (Aka, 2003).

Deneyde modelin tünel kesit alanı içinde büyük bir alanı işgal etmesi durumunda model ile tünel duvarı arasında yer alan bölge dar olur ve akışkan hızını koruyarak bu dar bölgeden akıp geçmeden bloke olur. Bu durumda ise serbest akış hızı sınır tabakanın üzerinde akış hızıyla eşit olmaz ve akış düzeni bozularak blokaj hataları oluşmasına neden olur. Bunun sonucunda gerçekte prototip üzerinde oluşan akım çizgileriyle model üzerinde oluşan akım çizgilerinin paralellik şartı sağlanması mümkün olmaz. Bulunan serbest akış değeri yanlış olacağından deneylerde elde edilen veriler de gerçek verilerle uyum sağlamaz. Blokaj oranı “model kesit alanı / rüzgâr tüneli deney

odasının kesit alanı” olarak ifade edilir. Literatürde blokaj oranının %10 sınırının altında olması, rüzgâr tüneli deneylerinde blokaj etkilerinin ihmal edilebilir seviyede olabilmesi için gerekli bir orandır (Aka, 2003).

$$\text{Blokaj Oranı} = \frac{\text{Model Kesit Alanı}}{\text{Deney Odası Kesit Alanı}}$$

Dinamik benzerlik: kinematik ve geometrik olarak benzer olan sistemlerde dinamik benzerliğin de sağlanması için, geometrik olarak benzer konumlardaki kuvvet vektörleri paralel ve mutlak değerleri orantılı olmalıdır (Aka, 2003).

$$(F_p/F_v)_m = (F_p/F_v)_p = \text{sabit ve } (F_p/F_g)_m = (F_p/F_g)_p = \text{sabit olmalıdır.} \quad (1.3)$$

F_p = basınç kuvveti, F_v = kesme kuvveti, F_g = yerçekimi kuvveti olarak ifade edilmektedir.

Bir akışkanın hareketi esnasında basınç, atalet, viskozite, yüzey gerilimi, yerçekimi ve sıkıştırılabilirlik kuvvetleri ile karşılaşır. Bu kuvvetlerden herhangi ikisinin birbirine oranı boyutsuz olacaktır. Dinamik benzerliğin sağlanması için analiz sonuç verilerinde bulunan boyutsuz katsayıların model ve prototip için aynı değerde olması gerekmektedir. Geometrik benzerlik gösteren akışlarda ise sadece bir boyutsuz katsayının aynı değerde olması gerekir. Atalet ve viskoz kuvvetleri, otomobil formunda oluşan akışın incelendiği bu çalışma için etkili kuvvetlerdir.

$$\text{Re} = \frac{\text{Atalet kuvveti}}{\text{Viskoz kuvvet}} = \frac{(V^2 L^2)}{(VL\mu)} = \frac{(\rho VL)}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (1.4)$$

Viskoz ve atalet kuvvetin etkili kuvvet olduğu durumlarda dinamik benzerliğin tam olarak oluşması için Re sayılarının model ve prototip için aynı olması şartı aranır. Fakat model ve prototip farklı boyutlarda olması halinde, Reynolds sayılarında eşitliğin sağlanabilmesi zor bir durumdur. Ölçülmüş olan büyüklükleri ifade eden boyutsuz katsayılar, belirli bir hız değerinin üzerinde Reynolds sayısından etkilenmemekte ve

Reynolds sayısı yükseldikçe değişkenlik göstermiyorsa dinamik benzerlik bu durumda sağlanmış olur.

II Teoremi (Buckingham Teoremi) yardımı ile otomobil üzerindeki akışın boyut analizi: boyut analizinde deneysel ölçümlerde bağımsız ve bağımlı olan deney değişkenler arasındaki karmaşık ifadeleri belirlemede kullanılmakta olan bir teoremdir. Deneylerde elde edilen fiziksel büyüklükler bir boyut ve bu boyutun standart birimi türünden ifade edilen bir şiddete sahiptirler. Temel boyutlar kütle, uzunluk ve zaman, olup bunlar sırasıyla M, L, T harfleriyle gösterilmektedir. Bunlar dışında diğer tüm fiziksel büyüklükler bu temel boyutlar türünden ifade edilebilmektedirler. Temel boyutlar türünden fiziksel büyüklükler Çizelge 2.'de ifade edilmiştir (Gökçeğöz, 2013).

Her araç için farklı büyüklüklerde kuvvet ve momentler oluşacağından taşıt üzerindeki aerodinamik kuvvet ve momentler kuvvet birimleri cinsinden ifade edildiğinde karşılaştırma yapmak güçtür. Akışkanlar dinamiğinde incelenen değerler üzerinde boyutsal analiz yöntemleri uygulanarak bu büyüklüklerin boyutsuz hale getirilmesi sağlanmıştır. Buckingham Pi teoremi kullanılarak, bağımlı bir değişkene etki eden bağımsız değişkenler boyutsuz sayılar olarak birleştirilerek analiz için gerekli olan değişken sayısı azaltılır.

Otomobil üzerine etki eden sürüklenme kuvveti, F_D ; L (karakteristik uzunluk), V (serbest akış hızı), ρ (akışkanın yoğunluğu), μ akışkanın viskozitesine bağlıdır.

$F_D = f(V, L, \mu, \rho)$ şeklinde ifade edilebilir.

Çizelge 2. Bazı temel mühendislik büyüklüklerinin temel boyut olarak gösterilmesi (Ersoy ve Mert, 1977).

Büyüklik	Sembol	Boyut
Uzunluk	L	L
Alan	A	L ²
Kütle	M	M
Zaman	T	T
Yoğunluk	ρ	ML ⁻³
Dinamik Viskozite	μ	ML ⁻¹ T ⁻¹
Kinematik Viskozite	ν	L ² T ⁻¹
Hız	V	LT ⁻¹
İvme	a	LT ⁻²
Basınç	P	ML ⁻¹ T ⁻²
Hacimsel Debi	Q	L ³ T ⁻¹
Kuvvet	F	MLT ⁻²
İş	W	ML ² T ⁻²

F_D , V, L, ρ , μ ve buna göre fiziksel büyüklük sayısı = $n = 5$ olur. Bütün değişkenler temel boyutlar cinsinden ifade edilir. Ana boyut sayısı = $m = 3$, bunlar M, L, T'dir. ρ , V, L değişkenleri tekrarlanan değişkenler olarak seçilir. Geriye kalan parametreler (F, μ), tekrarlanan parametreler ile gruplanır. Boyutsuz grup sayısı $n - m = 5 - 3 = 2$ olarak bulunur ve aşağıdaki denklemler yazılabilir.

$$\pi_1 = f_1(\rho, V, L, F_D), \pi_2 = f_2(\rho, V, L, F_D) \text{ ve } \pi_1 = f_3(\pi_2) \text{ olur. } \pi_1 = \rho^{x_1} \cdot V^{y_1} \cdot L^{z_1} \cdot F_D \text{ ve } \pi_2 = \rho^{x_2} \cdot V^{y_2} \cdot L^{z_2} \cdot \mu$$

şeklinde yazılabilir.

Denklemler düzenlenirse;

$$\pi_1 = (ML^{-3})^{x_1} \cdot (LT^{-1})^{y_1} \cdot (L)^{z_1} \cdot (M \cdot L \cdot T^{-2}),$$

$$\pi_2 = (ML^{-3})^{x_2} \cdot (LT^{-1})^{y_2} \cdot (L)^{z_2} \cdot (M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}) \text{ haline getirilebilir.}$$

π_1 için;

M: $x_1 + 1 = 0$ ise $x_1 = -1$

T: $-y_1 - 2 = 0$ ise $y_1 = -2$

L: $-3x_1 - y_1 + z_1 + 1 = 0$ ise $z_1 = -2$ bulunur.

Sonuç olarak;

$$\pi_1 = f_1(\rho, V, L, F_D) = \frac{F_D}{\rho \cdot V^2 \cdot L^2} \text{ elde edilir.} \quad (1.5)$$

π_2 için;

M: $x_2 + 1 = 0$ ise $x_2 = -1$

T: $-y_2 - 1 = 0$ ise $y_2 = -2$

L: $-3x_2 - y_2 + z_2 - 1 = 0$ ise $z_2 = -1$ bulunur.

Sonuç olarak;

$$\pi_2 = f_2(\rho, V, L, F_D) = \frac{\mu}{\rho \cdot V \cdot L} \text{ elde edilir.} \quad (1.6)$$

Bu değer ise $\frac{1}{Re}$ değerine eşittir.

π_1 ve π_2 arasında;

$$\pi_1 = f_3(\pi_2) \text{ veya } \frac{F_D}{\rho \cdot V^2 \cdot L^2} = f_3\left(\frac{1}{Re}\right) = f_4 Re \text{ şeklinde yazılabilir.} \quad (1.7)$$

Denklem 1.7’de L^2 yerine otomobilin karakteristik alanını (A) yazıp, $\frac{1}{2}$ gibi bir katsayı ile çarparsak;

$$\pi_1 = \frac{F_D}{\rho \cdot V^2 \cdot L^2} = f_5(Re) = C_D \quad (1.8)$$

Bu denklemde C_D sürüklenme direnci katsayısıdır. Denklemden de anlaşılacağı gibi C_D sürüklenme direnci katsayısı Re sayısı ile ilişkilendirilebilir.

1.4.2.2. Deneysel yöntem türleri

1.4.2.2.1. Kuvvet ve basınç ölçümü yardımı ile yapılan hesaplamalar

Böyle bir deneysel çalışmada kullanılan kuvvet ölçme sistemi yük hücreleri (loadcell) kullanılarak tasarlanmış bir düzenek ve ona bağlı bir elektronik gösterge ve komütatörden oluşur. Böyle bir çalışmada C_D sürüklenme direnci katsayısını yüksek doğrulukla belirlemek amaçlandığından sadece bu amaca yönelik bir sistem tasarlanmıştır. Genel itibariyle deneyler iki aşamada gerçekleştirilir. Birinci aşamada basınç dağılımını belirlemek için model üzerinde açılan yüzeye dik deliklerden farklı serbest akış hızlarında basınç ölçümleri yapılır. İkinci aşamada serbest akış hızı küçükten büyüğe değiştirilmek suretiyle sürüklenme kuvvetleri ölçümü yapılır. Son olarak (1.9) denkleminde C_D katsayısı hesaplanır (Gökçegöz, 2013).

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho \cdot V^2 \cdot A} \quad (1.9)$$

Deneysel çalışmalarda bir binek otomobil modelinin aerodinamik karakteristiği, rüzgâr tüneline çeşitli serbest akış hızlarına karşılık, model üzerindeki çeşitli noktalarda basınç, kaldırma kuvveti, sürüklenme direnci kuvvetleri ölçülerek belirlenmeye çalışıldığından yapılan ölçümler akış hızı ölçümü, basınç ölçümü ve kuvvet ölçümleridir (Gökçegöz, 2013).

Rüzgâr tüneli: Deney odasına modelin yerleştirilebildiği ve akış hızının değiştirilerek istenilen şartların oluşturulduğu deney ortamıdır.

Fark basınç ölçer: Araç üzerindeki basınç dağılımı ölçümlerinde ve rüzgâr tüneli içerisindeki serbest akış hızının ölçümünde pitot tüpü ile birlikte kullanılır.

Kuvvet ölçüm düzeneği: Bu çalışma için özel olarak tasarlanan bu düzende üç adet yük hücresi kullanılmaktadır. Kaldırma kuvveti ve Sürüklenme direnci ölçümünde kullanılır.

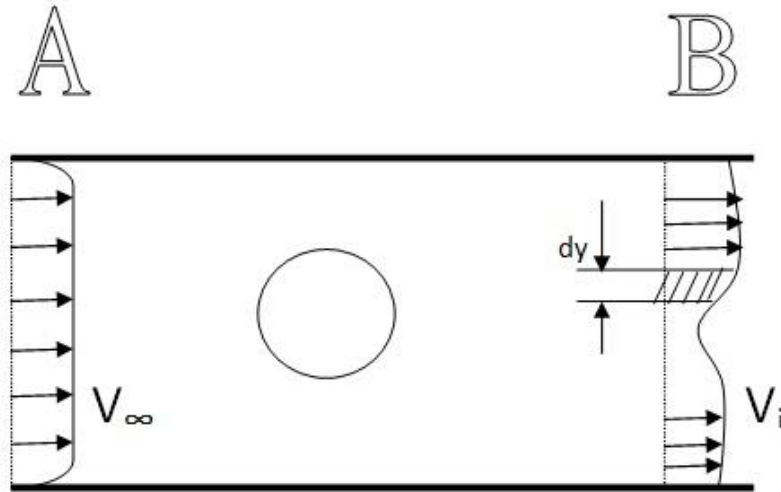
Elektronik gösterge: Kuvvet ölçüm düzeneğine entegre edilerek yük hücrelerine düşen yükün ölçülmesinde gösterge olarak kullanılır.

Sıcaklık ve nem ölçer: Deneylerin yapıldığı laboratuvarın ortam koşullarının belirlenmesinde kullanılır.

Kalibrasyon ağırlıkları: Kuvvet ölçüm düzeneğinin kalibrasyonunda kullanılan ağırlık etalonlarıdır.

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

Hava tüneli deney akışı içerisinde yerleştirilmiş bir silindir düşünelim. Çapı “D” uzunluğu “b” kabul edilmiştir. İlk olarak üniform kabul ettiğimiz hız dağılımı cismin iz akış bölgesinde değişecektir (Şekil 1.18) A ve B bölgeleri arasındaki momentum kaybı cisme etkiyen dirence (F_D) eşit olacaktır. Hız değerleri dy aralığında bir pitot tüpü vasıtasıyla tespit edilebilir (Gökçegöz, 2013).



Şekil 1.18. Hava tüneli deneyi, akış içerisinde yerleştirilmiş silindir üzerindeki hız dağılımı (Gökçegöz, 2013).

$$\text{Birim elemandan geçen debi} = d.\dot{m} = \rho.V_i.dy.b \quad (1.10)$$

A ve B arasındaki momentum kaybından yola çıkacağız.

$$A \text{ kesitinin momentumu (birim elemana karşılık gelen)} = \rho \cdot V_i \cdot d_y \cdot b \cdot V_\infty \quad (1.11)$$

$$B \text{ kesitinin momentumu (birim elemana karşılık gelen)} = \rho \cdot V_i \cdot d_y \cdot b \cdot V_i \quad (1.12)$$

İkisinin farkı (kesit boyunca) F_D sürüklenme direnç kuvvetini verir.

$$F_D = b \int_{-\infty}^{\infty} (\rho \cdot V_i \cdot V_\infty - \rho \cdot V_i \cdot V_i) d_y \quad (1.13)$$

$$F_D = b \cdot \rho \int_{-\infty}^{\infty} V_i (V_\infty - V_i) d_y \quad (1.14)$$

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

A kesitinde;

$$P_T = P_\infty + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \quad (1.15)$$

$$V_\infty = \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_T - P_\infty)} \quad (1.16)$$

B kesitinde;

$$P_{T_i} = P_i + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_i^2 \quad (1.17)$$

$$V_i = \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_{T_i} - P_i)} \quad (1.18)$$

F_D 'de yerine yazılırsa;

$$F_D = b \cdot \rho \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_{T_i} - P_i)} \left[\sqrt{\frac{2}{\rho} (P_T - P_\infty)} - \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_{T_i} - P_i)} \right] d_y \quad (1.19)$$

düzenlenirse;

$$F_D = 2.b \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{(P_{T_i} - P_i)} [\sqrt{(P_T - P_{\infty})} - \sqrt{(P_{T_i} - P_i)}] dy \quad (1.20)$$

elde edilir. Direnç katsayısı ise;

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho . V^2 . A} = \frac{F_D}{(P_T - P_{\infty})(D.b)} \quad (1.21)$$

olduğundan;

$$C_D = \frac{2}{(P_T - P_{\infty})D} \sum_{i=0}^n \sqrt{(P_{T_i} - P_i)} [\sqrt{(P_T - P_{\infty})} - \sqrt{(P_{T_i} - P_i)}] dy \quad (1.22)$$

A_f alanı farklı olduğundan denklem tekrar düzenlenirse;

$$C_D = \frac{2b}{(P_T - P_{\infty})A_f} \sum_{i=0}^n \sqrt{(P_{T_i} - P_i)} [\sqrt{(P_T - P_{\infty})} - \sqrt{(P_{T_i} - P_i)}] dy \quad (1.23)$$

Buradaki “ d_y ” ölçüm noktaları arasındaki mesafedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Ahmed ve Ramm (1984), bir araç modelinin basitleştirilmiş şeklini geliştirmişlerdir. “Ahmed Body” adını verdikleri bu araç üzerinde yaptıkları çalışmada modelinin arka kısmındaki eğim açılarının, sürüklenme katsayısına olan etkileri üzerine incelemeler yapmışlardır. Sonuç olarak modelin arka kısmındaki 5° , $12,5^\circ$ ve 30° ’lik açı değerleri için sürüklenme katsayısı değerini; 0,231, 0,23 ve 0,26 olarak bulmuşlardır (Ahmed ve Ramm, 1984).

Han (1989), yaptığı çalışmayla taşıt çevresinde meydana gelen akışı simüle etmiştir. Bu simülasyonu sıkıştırılmaz Reynolds ortalımalı Navier – Stokes metodu ve k- ϵ türbülans modelini kullanarak yapmıştır. Analiz sonucunda 3 farklı tasarıma sahip otomobilin direnç katsayısını elde etmiştir. Çalışmaları neticesinde deneysel yolla elde edilen değerlerin sayısal yollarla da yaklaşık olarak elde edilebilmesinin mümkün olduğunu bulmuşlardır (Han, 1989).

Aydın (1994), çalışmasında otomobilde meydana gelen akışı 2 boyutlu model kullanarak sayısal olarak incelemiştir. Yapılan çalışmada sayısal yöntemler kullanılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen verilerde analizi yapılan modeldeki basınç dağılımı değerleri literatürdeki çalışmalarla benzer sonuçlar vermiştir (Aydın, 1994).

Ramnefors ve arkadaşları (1996), sayısal akışkanlar dinamiği yöntemini kullanarak yaptıkları çalışmada standart k- ϵ ve Reynolds stress türbülans modeli (RSM) türbülans modelini kullanmışlardır. Çalışmada “Volvo ECC” modeli inceleyerek basınç ve sürüklenme katsayısı değerlerini bulmuşlardır. Kaput önü, spoyler ucu, tavan ön ve arka bölümlerinde ve dış formdaki keskin olan hatlarda yüksek oranda hata bulmuşlardır. Analizi yapılan modele uygulanan ağ yapısının yoğun olmasının çözüm verilerin doğruluğuyla doğru orantılı olduğunu tespit etmişler. Kalıntıların 10^{-4} - 10^{-5} aralığında olmasının çözümün yakınsaması için uygun bir seviye olduğunu belirtmişlerdir. (Ramnefors ve ark, 1996).

Bayraktar (2002), “Ahmed” modeliyle yaptığı çalışmada aracın arka kısmındaki eğim açısının sürüklenme katsayısına etkisini incelemiştir. Çalışmayı deneysel ve sayısal yöntemlerle yapmıştır. Yaptığı deneysel çalışmalar neticesinde en iyi sürüklenme katsayısı değerine, aracın arka kısmındaki açının $12,5^\circ$ olduğu halinde ulaşmıştır (Bayraktar, 2002).

Aka (2003), deneysel çalışmasında, rüzgâr tüneli içerisine yerleştirdiği 1/16 oranında küçültülmüş bir araç modelini 40 m/s akış hızı şartlarında değerlendirmiştir. Çalışmadan elde ettiği verilerde kaldırma, sürüklenme ve basınç katsayılarını bulmuştur. Tespit edilen sürüklenme katsayısının aracın orijinal halindeki değerine göre %5 hata ile tespit etmiş ve bulunan hatanın oluşmasındaki faktörleri belirlemiştir. Deney sonucunda, 40 m/s hız değerinin rüzgâr tünellerinde yapılacak olan aerodinamik testler için uygun değer olduğunu belirtmiştir (Aka, 2003).

Koike ve arkadaşları (2004), “Mitsubishi” marka “Lancer” model sedan bir otomobilin arka camında oluşan hava akışını incelemişlerdir. Kullanılan modelin tavan ve arka camın birleştiği bölgeye akış ayrılmasının gecikmesini sağlamak için kısa girdap üreticileri monte etmişlerdir. Çalışmalarda elde edilen verilerde sürüklenme ve kaldırma katsayılarında 0,006 değerinde azalma tespit etmişlerdir (Koike ve ark, 2004).

Henning ve King (2005), akış bozulmaları üzerine yaptıkları çalışmada basınç kontrolü yaparak akış formunu incelemişlerdir. Basıncı kontrol etmek için kullanılan sensör, türbülans sebebiyle meydana gelen dalgalanmalar ile çalışmaktadır. Akış hatlarını takip etmede LDA (Laser Drop Anemometry) metodunu kullanmışlardır. Çalışma verileri sonucunda gerçeğe uygun modellerin kullanılmasının sağlıklı sonuçlar elde edilmesinde önemli bir faktör olduğunu belirtmişlerdir (Henning ve King, 2005).

Kavadar (2006), rüzgâr tüneli ve sayısal yöntemleri kullanarak yaptığı çalışmada bir otobüs modelinin ön kısmı için mekatronik bir burun tasarlamıştır. Burunun farklı açılara göre sürüklenme katsayısına olan etkilerini tespit etmiştir. Çalışmadan elde edilen veriler sonucunda burun açısının değiştirilerek sürüklenme katsayısında %10,7 oranında bir düşüş elde etmeyi başarmıştır (Kavadar, 2006).

Sarı (2007), çalışmasında “Renault” Marka “Kangoo” Model bir araç modelinin farklı ön cam ve kaput açılarının sürtünme katsayısına etkisini incelemiştir. Çalışmayı ANSYS Fluent programı üzerinde sonlu hacimler yöntemini kullanarak yapmıştır. Sonuç olarak ön cam açısının “20°, 30°, 40°, 50° ve 60°” değerleri için sürüklenme katsayısı değerlerini sırasıyla “1,150, 1,052, 0,931, 0,93 ve 0,866” olarak bulmuştur. Kaput açısının “0°, 5°, 10°, 15° ve 20°” değerleri için sürüklenme katsayısı değerlerini sırasıyla “1, 0,96, 0,95, 0,93 ve 0,929” olarak bulmuştur. Elde edilen veriler sonucunda, 20°’lik kaput eğim açısı ve 60°’lik ön cam açısında en uygun sürüklenme katsayısı değerine ulaştığını belirtmiştir (Sarı, 2007).

Demircioğlu (2007), ANSYS kullanarak yaptığı çalışmada kendi tasarladığı “Ferrari F1” yarış aracı incelemiştir. 130 km/h akış hızı ve k-ε türbülans modeliyle yaptığı analizde sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerini bulmuştur. Analiz sonucunda C_D ’yi 0,516, C_L ’yi ise 0,425 bulmuştur. Fakat bulunan bu değerlerin gerçek verilerle uyumlu olmadığını belirtmiştir. Bu uyumsuzluğun analizde kullanılan modelin gerçek model ile birebir aynı olmaması ve mesh sayısının yetersiz olmasından kaynaklandığını belirtmiştir (Demircioğlu, 2007).

Roumeas ve arkadaşları (2008), “Ahmed” modeli üzerinde yaptıkları çalışmada aracın arka camında oluşan akış yapısını incelemiştir. Deneysel ve sayısal yöntemle yapılan çalışmada bu iki metodun verilerini karşılaştırmışlardır. İki metodun sonuç verileri karşılaştırıldığında sürüklenme katsayısında 0,04 değerinde bir fark oluştuğunu belirtmişlerdir. Arka cam yüzeyinde meydana gelen türbülanslı bölgenin azaltılmasının sürüklenme katsayısına olumlu yansıdığını belirtmişlerdir (Roumeas ve ark, 2008).

Helgason ve Hafsteinsson (2009), aerodinamik katsayıların otomatik araç optimizasyonu ile ilişkisini incelemiştir. “Volvo” marka bir araç ile yapılan çalışmada model dış formunda yaptıkları değişikliklerle sürüklenme katsayısının değişimi gözlemleyerek en iyi sürüklenme katsayısı değerini aracın orijinal tasarımındaki halinde olduğu gibi elde etmişlerdir. Bulunan değer deneysel sonuçlarla %5 hata oranıyla uyumlu olduğunu belirtmişlerdir (Helgason ve Hafsteinsson, 2009).

Solmaz (2010), farklı tasarımlara sahip 3 otomobil modeli ve bir otobüs modelini rüzgâr tüneline 28 m/s hız değerinde ve 1/24 ölçeğinde test ederek sürüklenme katsayılarını tespit etmiştir. Deney sonuç verilerinde sürüklenme katsayılarını %7,8, %12,5 ve %14 hata oranıyla hesaplamıştır. Otobüsün sürüklenme katsayısını 0,65 olarak bulmuştur (Solmaz, 2010).

Pujals ve arkadaşları (2010), “Ahmed” modeliyle yaptıkları çalışmada modelin tavanına girdap üretici yerleştirilerek taşıtın arka kısmında meydana gelecek akış ayrılmalarını geciktirmeye çalışmışlardır. Literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak çok sayıda silindirik girdap üreticiyi enine yerleştirmişler. Kullanılan girdap üreticilerinin sürüklenme katsayısında %10 oranında düşüş sağladığını belirtmişlerdir (Pujals ve ark, 2010).

İpçi ve arkadaşları (2015), “Ahmed” modelini kullandıkları çalışmalarında sayısal akışkanlar dinamiği yöntemiyle taşıt etrafındaki akışın yapısını RNG k- ϵ ve k- ϵ türbülans modeliyle su tüneli kullanarak 0,218 m/s hız ile incelemişlerdir. Modelin ön kısmında bir durma noktası oluşurken arka kısımda yer alan 25° eğimli alanda ise akışta bozulma oluşmadığını fakat eğimli kısmın sonunda bozulmalar görüldüğü ve vorteksli bir alan meydana geldiğini gözlemlemişler. Modelin arka kısmında meydana gelen vorteksli bölgenin uzunluğu k- ϵ için “0,83H”, RNG k- ϵ için de “0,69H” olarak tespit etmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen hız profilinin literatürdeki benzer çalışmalarla uyumlu olduğunu aktarmışlardır (İpçi ve ark, 2015).

Gebel ve arkadaşları (2018), Elektrikli bir araç prototipini 3D yazıcıda 1/16 ölçeğinde üretilen aracı rüzgâr tüneline deneysel olarak ve ANSYS’te sayısal olarak incelemişlerdir. k- ϵ RNG türbülans modeliyle 6 farklı giriş hızında C_D ’nin değişimi gözlemlemiş ve sonuçlar karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak deneysel ve sayısal sonuçlar arasında %1’lik hata payı olduğunu belirtmişlerdir (Gebel ve ark, 2018).

Uçar (2018), çalışmada “Ford” marka “Fiesta” model araca yeni bir spoiler tasarımı geliştirilerek deneysel ve sayısal olarak ANSYS Fluent’te incelemiştir. Deneysel çalışmada, trafiğe çıkan gerçek test aracı kullanmıştır. Yakıt tüketimi ve performansı ölçümlerinde belgelendirilmiş bir kuruluş olan “Prosmer” şirketinde yapmıştır. Yeni

tasarlanan spoiler modelinin CFD analiz sonuçlarına göre aracın arka kısmına etkiyen baskı kuvvetinde %59 oranında bir artış olduğunu ve yine arka kısmında oluşan düzensiz hava akımının daha düzenli bir akım profiline dönüştüğünü tespit etmiştir. Yetkili kuruluşça yapılan performans test sonuçlarında ise yeni spoiler modeli ile birlikte yakıt tüketiminde lt/100 bazında şehir içinde %1,59'luk şehir dışında %2,79 oranında bir kazanç elde etmiştir (Uçar, 2018).

Yarin (2019), çalışmasında farklı dış tasarımlara sahip 5 taşıt modelini ANSYS Fluent'te sayısal olarak incelemiş ve sürtünme katsayılarını bularak karşılaştırmıştır. 1. Model taşıt çok keskin hatlara sahipken yaptığı revizyonlarla 5. Modele kadar her modelde iyileştirmeler yapmıştır. Sırasıyla bulduğu C_D değerleri; 0,74, 0,71, 0,48, 0,27 ve 0,25 tir. Akışın bozulduğu bölgelerde taşıt dış formundaki keskin hatların yuvarlatılması ve damla formuna yakın bir tasarım uygulanmasının, C_D 'yi düşürerek yakıt ekonomisine olumlu katkı sağlayacağını belirtmiştir (Yarin, 2019).

Yamaç ve arkadaşları (2020), Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesinin tasarladığı elektrik bir model üzerinde yaptıkları çalışmalarında 7 farklı hız değerinde ölçümler yaparak sürüklenme kuvveti F_D ve sürüklenme katsayısı C_D 'yi hesaplamışlardır. Çalışmayı sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak hava hızının F_D ile doğru orantılı olarak arttığını, Reynolds sayısının arttıkça C_D 'de düşüş gözlemlendiğini, deneysel ve sayısal çalışmalar karşılaştırıldığında hata oranının %2,69 olduğunu belirtmişlerdir (Yamaç ve ark, 2020).

Yukarıda verilen literatür çalışmaları incelendiğinde, motorlu taşıtlarda aerodinamik performansın özellikle yakıt tüketimi başta olmak üzere güvenlik açısından da önemli bir yere sahip olduğu ve dolayısıyla geliştirilmesinin önemli bir yer tuttuğu anlaşılmaktadır. Yapılan çalışmalar genel olarak taşıtlarda sürüklenme kuvvetinin azaltılması üzerinde yoğunlaştığı ve bu amaçla taşıtların ön cam, tavan ve bagaj yüzeylerinde tasarım değişikliklerine gidildiği görülmektedir.

Bu çalışmalarda yapılan tasarım değişiklikleri sonucunda araç üzerinden geçen akım çizgilerinde, basınç dağılımında ve dolayısıyla C_D değerinde iyileşme olduğu bildirilen sonuçlar arasında yer almaktadır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Modelin Özellikleri

Deneysel çalışmada, hâlihazırda piyasaya sunulmuş gerçek bir araç modeli kullanılmıştır. Çalışmada “J” segmentindeki “Premium SUV” kategorisinde yer alan otomobil modelinin görseli Şekil 3.1’de, teknik özellikleri Çizelge 4’te görülmektedir.

Çizelge 4. Otomobil modelinin fabrika teknik verileri.

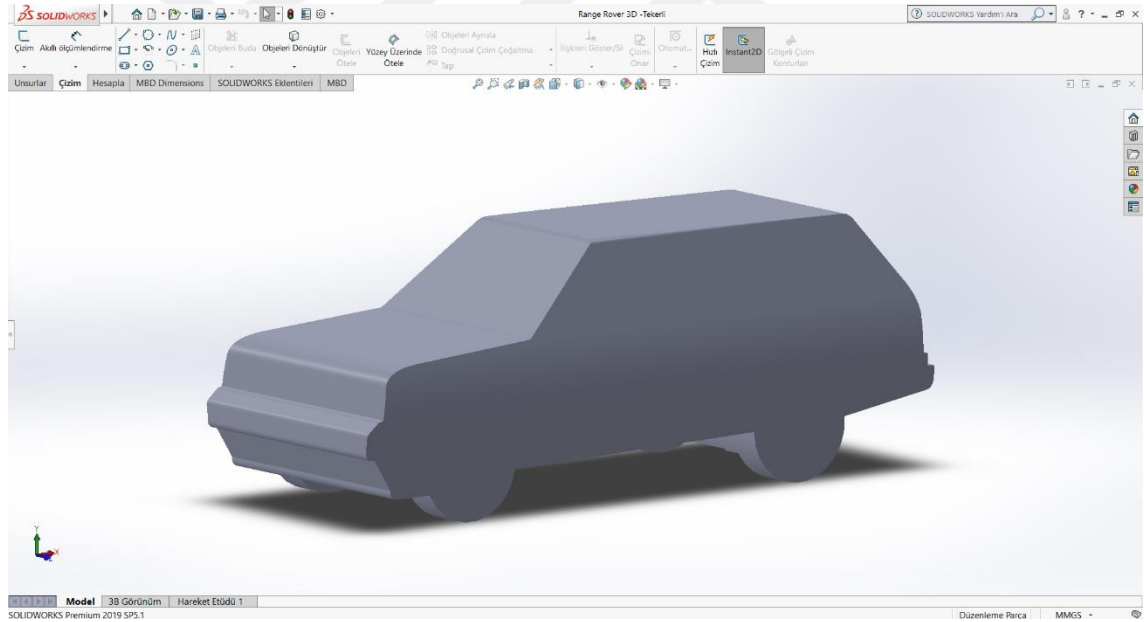
Malzeme	Alüminyum
Yükseklik	1835 mm
Genişlik	2220 mm
Uzunluk	4999 mm
Marka	Land Rover
Model	Range Rover
Model Yılı	2012
C_D	0.37



Şekil 3.1. Analizi yapılan otomobil modelinin görseli (Anonim 7).

3.2. Geometri

Çalışmadaki modellerin çizimi makine, tesis, ürün vb. bir çok tasarımda kullanıcının kolay, ergonomik ve hızlı bir şekilde tasarım yapmasına olanak tanıyan bir CAD programı olan SolidWorks'te yapılmıştır. Modeli çizimleri, analizde kullanılacak ANSYS Fluent programına aktarılabilir. SolidWorks tasarımın ilk aşamasında tek boyutta aracın yan izdüşümü lineer çizgi, yay, daire, radyus araçları kullanılarak çizilerek ardından kalınlık verme ve çıkarma işlemleri yapılarak 3 boyutlu modeller elde edilmiştir. Çizimler yapılırken ilgili araçların ölçülü teknik çizimlerinden faydalanılarak 1:1 ölçek oranında yani gerçek boyutlarında (1835 mm x 2220 mm x 4999 mm) çizilen modelin görselleri Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te görülmektedir. Elde edilen 2 boyutlu tasarıma malzeme türü ataması ANSYS Fluent üzerinden yapılacağından SolidWorks'te malzeme türü belirleme işlemi gerçekleştirilmemiştir.

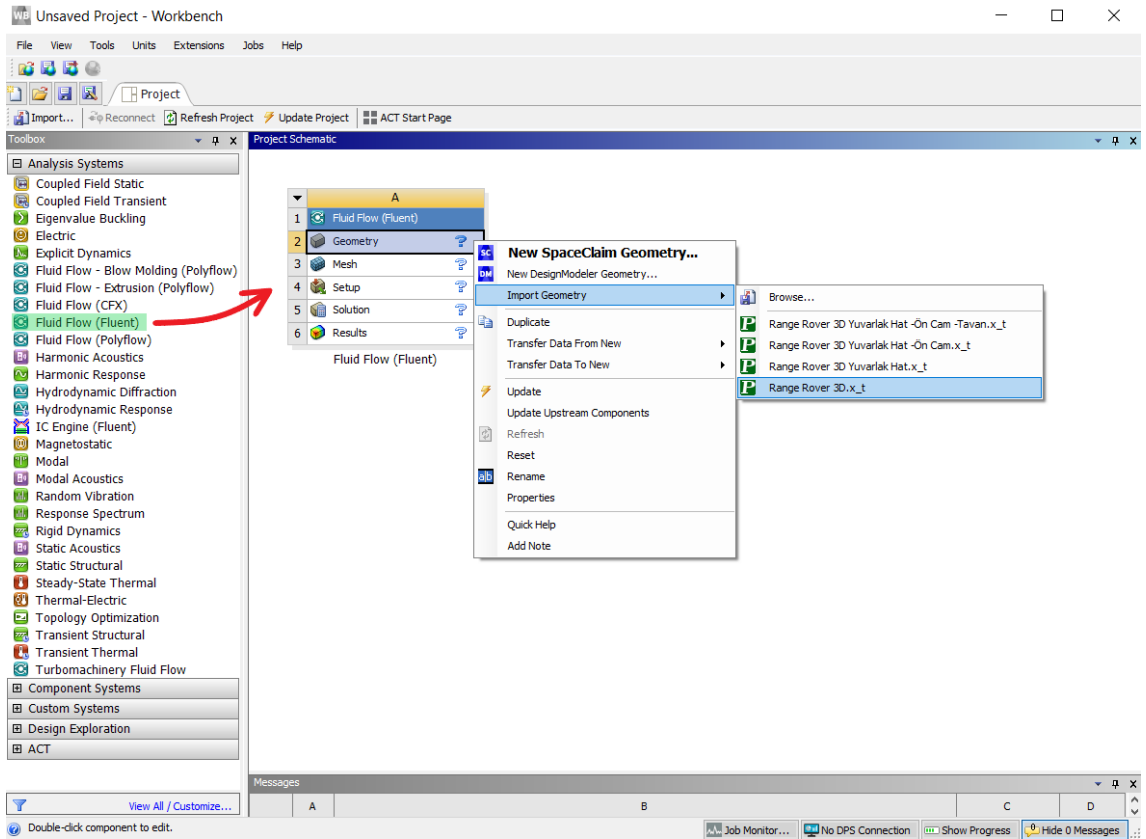


Şekil 3.2. Model otomobilin SolidWorks perspektif görünümü.



Şekil 3.3. Model otomobilin +Z eksenî görünümü.

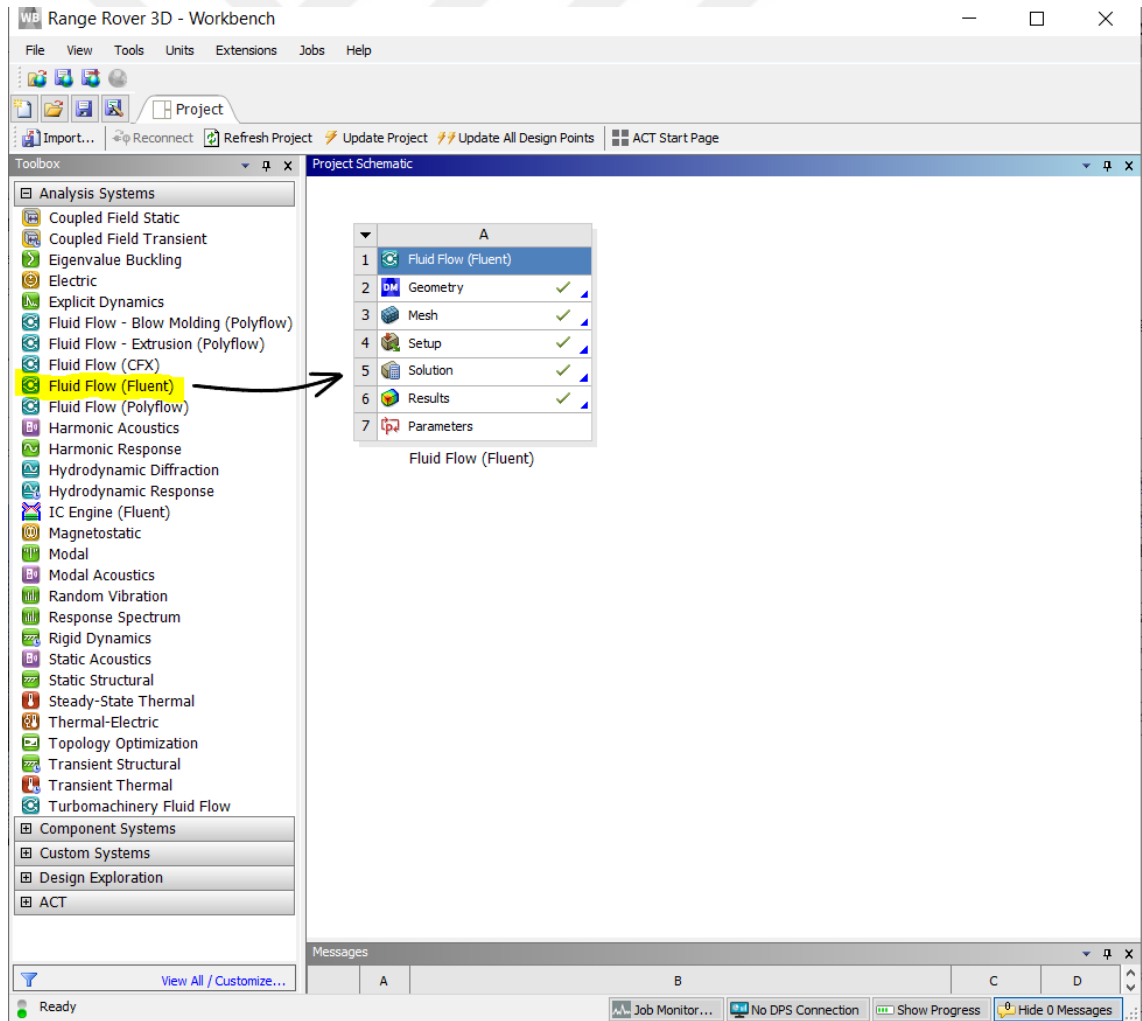
SolidWorks'te tasarlanan modellerin ANSYS Fluent programına aktarımı için, çizimlerin parasolid (.x_t) uzantılı kayıt edilmesi gerekmektedir. Şekil 3.4 'te görüldüğü üzere öncelikle analiz türü olarak Fluid Flow (Fluent) seçilmiştir. SolidWorks'te çizilen çizimin açılması için Geometry > Import Geometry > “Çizim Dosyası” adımları izlenmiştir. İzlenen seçimler Şekil 3.4'te vurgulanarak gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Modelin ANSYS Fluent'e yüklenmesi

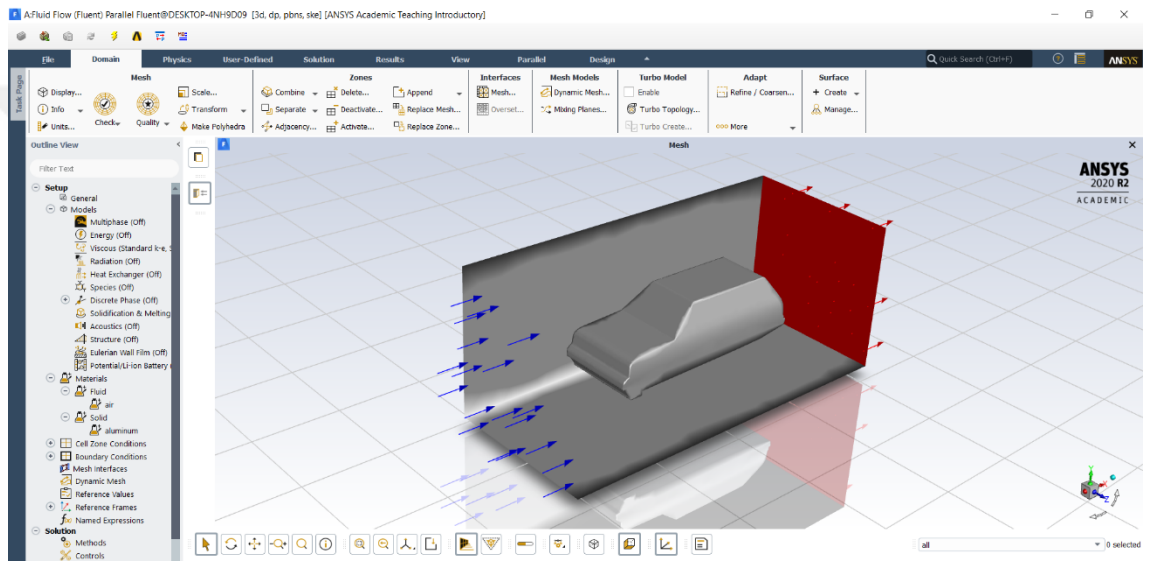
3.3. ANSYS Fluent Analizi

Bu çalışmada, akış alanını sayısal olarak hesaplamak için sonlu hacimler yöntemlerini kullanarak akışla ilgili eşitlikleri çözebilen ANSYS Fluent 2020 programı kullanılmıştır. Program ile yapılan analizlerde akış olayının meydana geldiği bölgedeki ağ yapısının hassasiyeti kullanılan bilgisayarın özelliklerine bağlıdır. Fluent paket programı analiz sırasında işlem yaparken problemin boyutuna göre bilgisayar hafızasını kullanmaktadır. Problemin boyutu ağ yapısının durumu, hücre sayısı, akışın türbülanslı veya laminar olması gibi etkenlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Çalışmada, Intel 2.4 GHZ İ7 işlemcili 8 GB ön bellek özelliklerine sahip olan bilgisayar kullanılmış ve model taşıt etrafında gelişen akış türbülanslı olduğu için akışla ilgili kabul edilebilir bir sonuç elde etmek için Standart k- ϵ modeli seçilmiştir.



Şekil 3.5. ANSYS Fluent / Program ara yüz görüntüsü.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinde sonlu hacimler yöntemini kullanan ANSYS Fluent sıkça tercih edilen bir yazılımdır. 1983'ten beri dünya genelinde birçok farklı endüstri dalında kullanılmaktadır. Gittikçe gelişerek HAD piyasasında dünyadaki en çok kullanılan yazılım olma başarısını elde eden ANSYS Fluent, yüksek teknolojiye sahip ticari HAD yazılımı olarak kullanıcıların çözümü karmaşık ve zor problemlerine etkili ve kolay çözümler ile hizmet sunmaktadır. ANSYS Fluent programında, çalışma seçiminin yapıldığı ve çalışma yapılan ekran görüntüsü Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



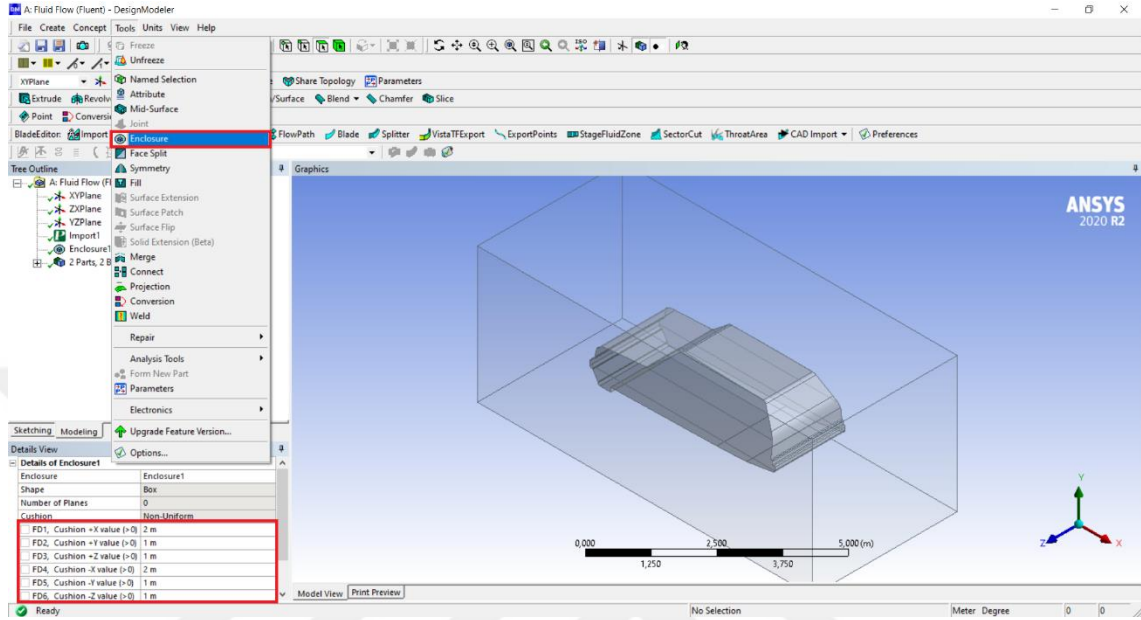
Şekil 3.6. ANSYS Fluent program ara yüz görüntüsü.

3.4. Akış Alanının Oluşturulması (Enclosure)

Oluşturulan modelin ANSYS Fluent'e aktarımının ardından modelin analizi için model çevresinde akış alanı oluşturulmalıdır. Oluşturulan akış alanının modelin yüzeyine çok yakın olmaması, hata payı oranı düşük analiz sonuçlarına ulaşılmasında önemlidir. Program ara yüzünde Şekil 3.7'de görüldüğü gibi Tools > Enclosure işlemi uygulanmıştır. Oluşturulan tünelin boyutları "Details View" kısmında x, y, z vektörleri için metre cinsinden değerler girilerek oluşturulmuştur. Bu değerler Çizelge 4.'te yer almaktadır.

Çizelge 4. Enclosure - Details View değerleri.

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



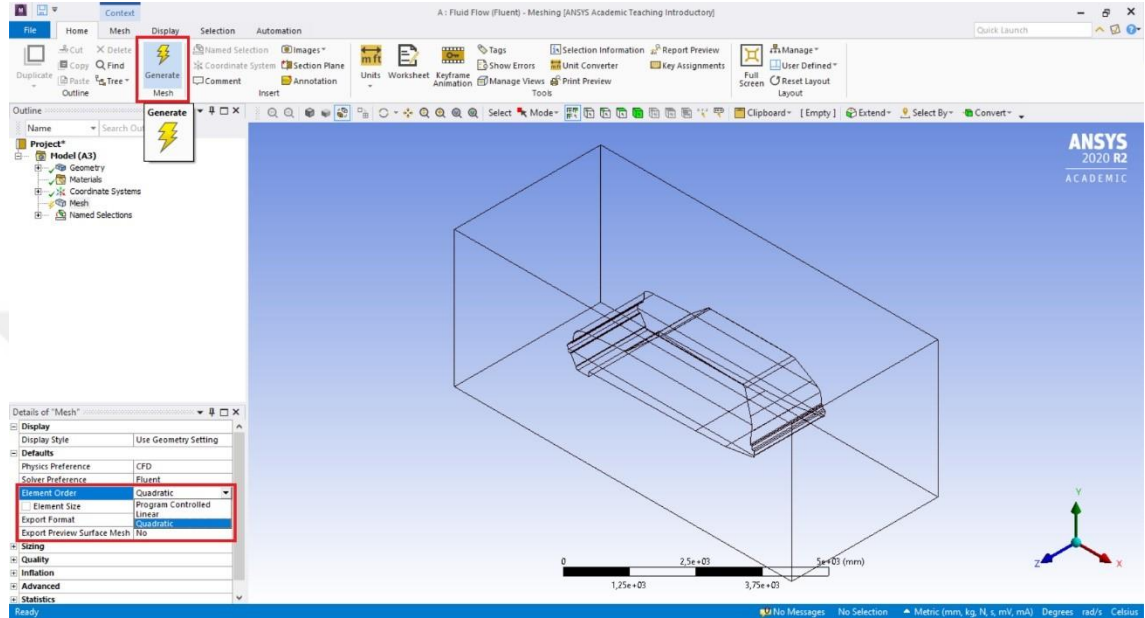
Şekil 3.7. Akış alanının oluşturulması.

3.5. Ağ Yapısı (Mesh)

Amacı, karmaşık olan bir hacmi simülasyonunun çalıştırabileceği küçük parçalara bölmek olan Mesh, tanım gereği nokta ve hücrelerden meydana gelen bir ağıdır. Bu parçalar analiz yapılan hacmin geometrisine ve mesh sıklığına bağlı olarak farklı boyut ve şekillere sahip olabilir. Mesh işlemine hazır olan modelin görünümü Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

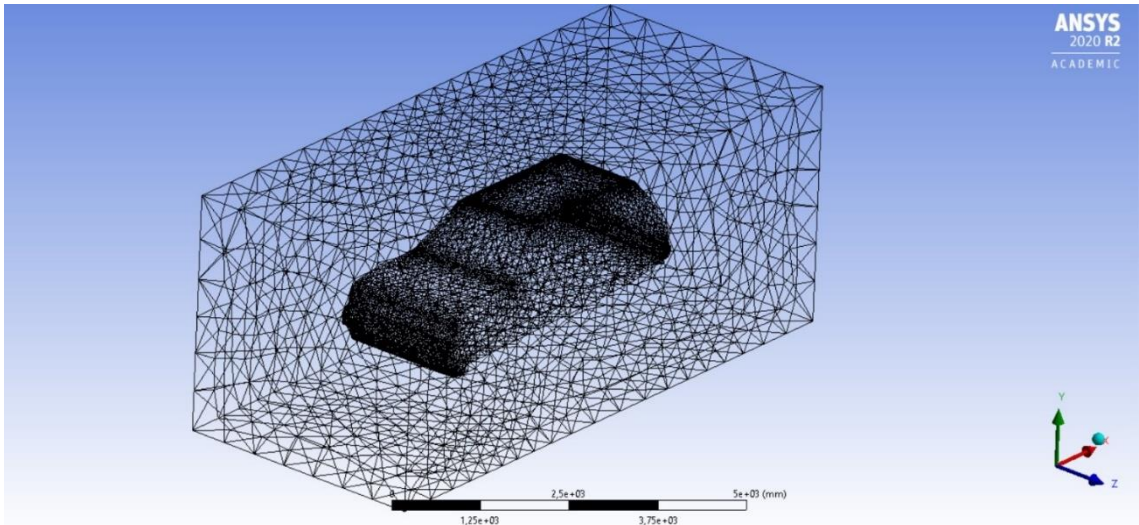
Domain yüzeyleri ve araba gövdesinden oluşan yüzeyler üzerine hücreler oluşturulmuştur. Şekil 3.9, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de görüldüğü üzere aracın kıvrımlı olan yüzeylerinde mesh uygulamasının daha sık bir şekilde uygulandığı görülmektedir. Bunun sebebi analiz sonuçlarında daha ayrıntılı bir sonuç edebilmektedir. Nokta ve element sayısı Çizelge 5’te belirtilmiştir.

Modelin programa yüklenmesi ve akış alanının oluşturulmasının ardından yapılan işlemler kaydedilip mesh işlemine geçilmiştir. Mesh işlemini başlatmadan önce “Details of mesh” araç kutusunda yer alan “Element Order = Quadratic” seçimi yapılmıştır. Bu işlemde izlenen adımlar aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi uygulanmıştır.

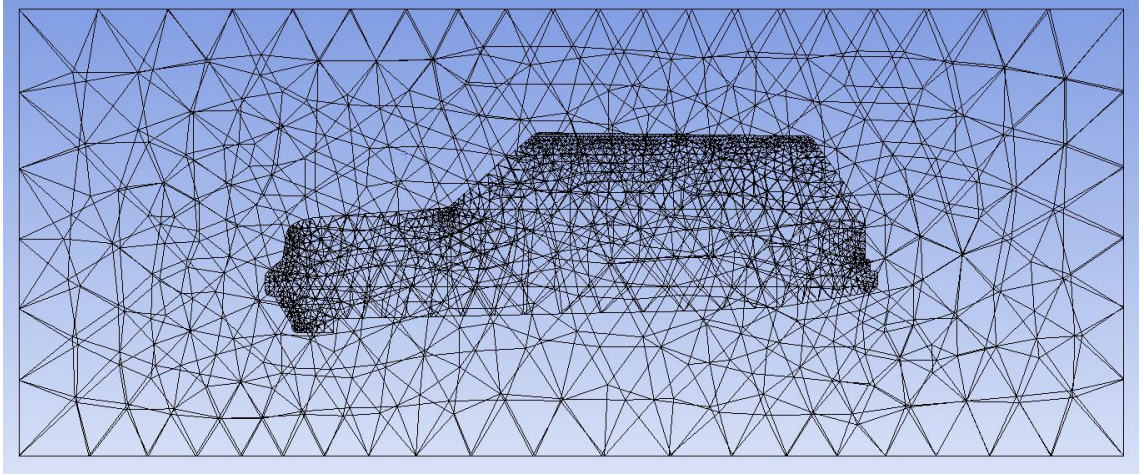


Şekil 3.8. Mesh işleminin yapılması.

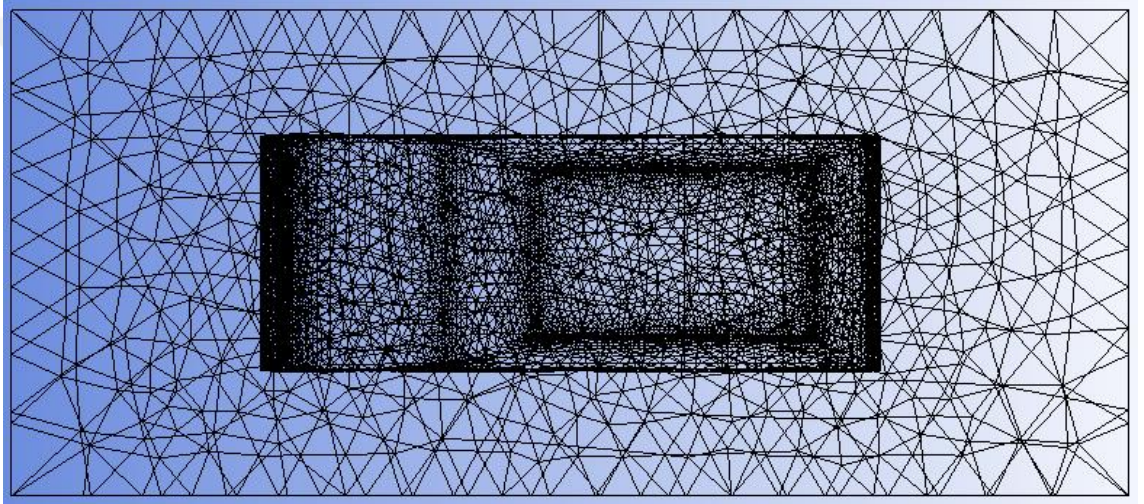
Mesh işlemi analiz sürecinde bilgisayar performansına en çok ihtiyaç duyulan adımlarından biridir. Dolayısıyla modelin geometrik boyutlarına, seçilen mesh sıklığına, analiz yapılan bilgisayarın işlemci performansına bağlı olarak uzun sürebilir.



Şekil 3.9. Ağ yapısı izometrik görünümü.



Şekil 3.10. Ağ yapısı yan görünümü.



Şekil 3.11. Ağ yapısı üst görünümü.

Çizelge 5. Mesh nokta ve element sayısı.

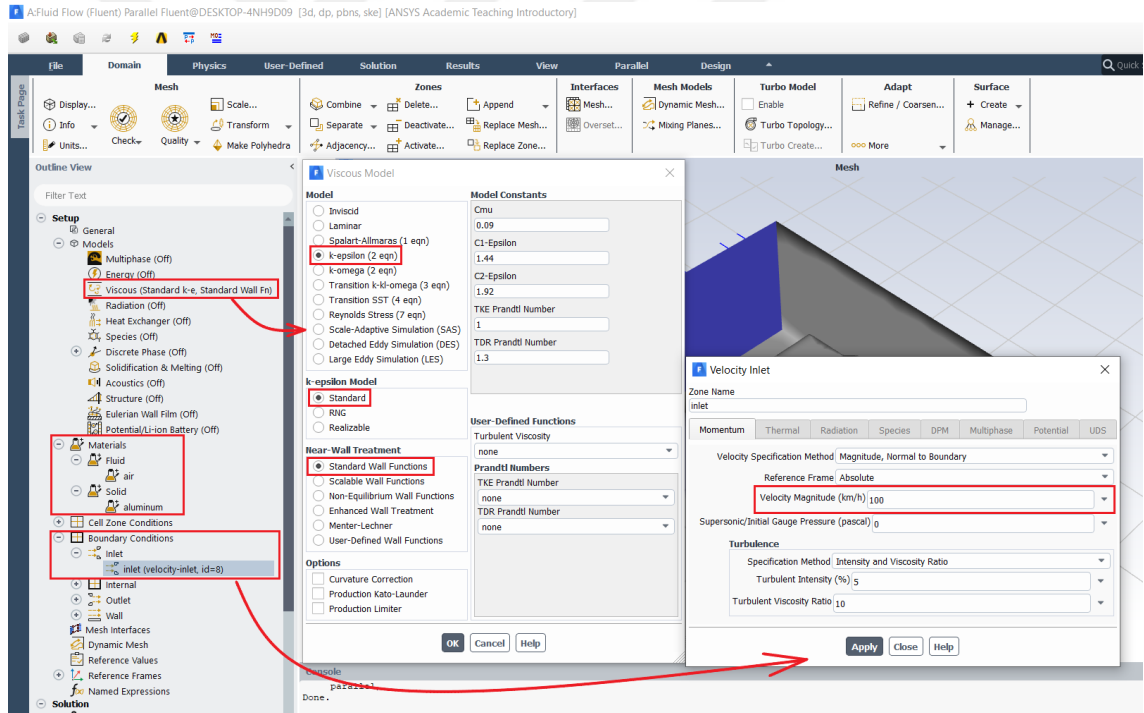
Nokta Sayısı	367010
Element Sayısı	262640

3.6. Sınır Şartları

Ağ yapısı oluşturulduktan sonra analizin hangi şartlarda yapılmasını belirlemek için Şekil 3.12’de görüldüğü gibi sınır şartları bilgilerinin girilmesi gerekmektedir. Sınır şartları belirlenirken yapılan analiz türü göz önüne alınıp, analiz sonuçlarında en optimum verilere ulaşabilmek için benzer çalışmalarda sıkça kullanılan parametreler kullanılmıştır. Sınır şartları Çizelge 6’da belirtildiği gibi tanımlanmıştır.

Çizelge 6. Sınır şartları.

Sınır	Şart
Rüzgâr Tüneli	Kayma yok
Taşıt Yüzeyi	Kayma yok
Giriş (Hız)	100 km/h
Çıkış (Basınç)	0 kPa
Katı (Malzeme)	Alüminyum
Akışkan (Malzeme)	Hava
Türbülans Modeli	k-epsilon 2 eqn (Standart)
Duvar Fonksiyonu	Standart duvar fonksiyonu
İterasyon Sayısı	200



Şekil 3.12. ANSYS Fluent'te sınır şartlarının tanımlanması.

Öncelikle akış modelinin belirlenmesi işlemi için Setup >Viscous araç kutusunda,

- Model = k-epsilon (2eqn),
- k-epsilon Model = Standart,
- Near-Wall Treatment = Standart Wall Functions olarak belirlenmiştir.

Bu tür analizlerde sıkça tercih edilen bir model olması ve çalışmada yapılan analiz için optimum verilere ulaşmada daha iyi sonuçlar vermesinden dolayı Standart k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Han, yaptığı çalışmayla taşıt çevresinde meydana gelen akışı simüle etmiştir. k- ϵ türbülans modelini kullandığı çalışmada deneysel yolla elde edilen değerlerin sayısal yollarla da yaklaşık olarak elde edilebilmesinin mümkün olduğunu belirtmiştir (Han, 1989).

- “k” türbülans kinetik enerji değerini (m^2/s^2),
- “ ϵ ” türbülans dağılım oranını (m^2/s^3) ifade eder.

Akış ve katı modelin malzeme türünün belirlenmesi için Materials araç kutusunda,

- Fluid (Akışkan) = Air (Hava)
- Solid (Katı) = Aluminum (Alüminyum)

Akış hızının belirlenmesi için Boundary Conditions araç kutusunda,

- Velocity Magnitude (Hız Büyüklüğü) = 100 km/h olarak belirlenmiştir.

Sınır şartlarında da belirtildiği üzere analizde rüzgâr tüneli girişinde hız, çıkışında ise basınç değerleri tanımlanmıştır. Girişte basıncın belirtilmemesinin sebebi hareket denklemlerinde hız ve basıncın bağlı olmasından kaynaklanmaktadır. Aksi bir tanımlama yapılması durumunda çözümde karmaşık matematiksel tanımlamalar oluşur. Aynı durum bir basınç girişinde veya çıkışında hız faktörünün belirtilmemesinde de geçerlidir. Belirtilmesi halinde bu da karmaşık matematiksel tanımlamalar oluşmasına sebep olur.

3.7. Duvar Fonksiyonu

Sınır tabadaki hız profilini çözmek için duvar fonksiyonları kullanılır. Fluent paket programında standart duvar ve dengede olmayan duvar fonksiyonları olmak üzere iki türlü duvar fonksiyonu vardır. Standart duvar fonksiyonları, duvar yakını akışları tam türbülanslı kabul eder ve sınır tabakasındaki gradyanları çözmek için algoritma kullanır. Dengede olmayan duvar fonksiyonlarında ise basınç gradyanlarının hassasiyeti standart duvar fonksiyonlarından daha yüksektir. Dengede olmayan duvar

fonksiyonu akışa maruz kalan geometrinin karmaşık ve yeniden birleşmeli akış ayrılmasının sıklıkla görüldüğü domainlerde daha iyi hesaplama sağladığından dolayı simülasyonlar için seçilmiştir. Bu durum, basınç gradyanlı etkileri hesaba katabilme kabiliyetinden kaynaklanmaktadır.

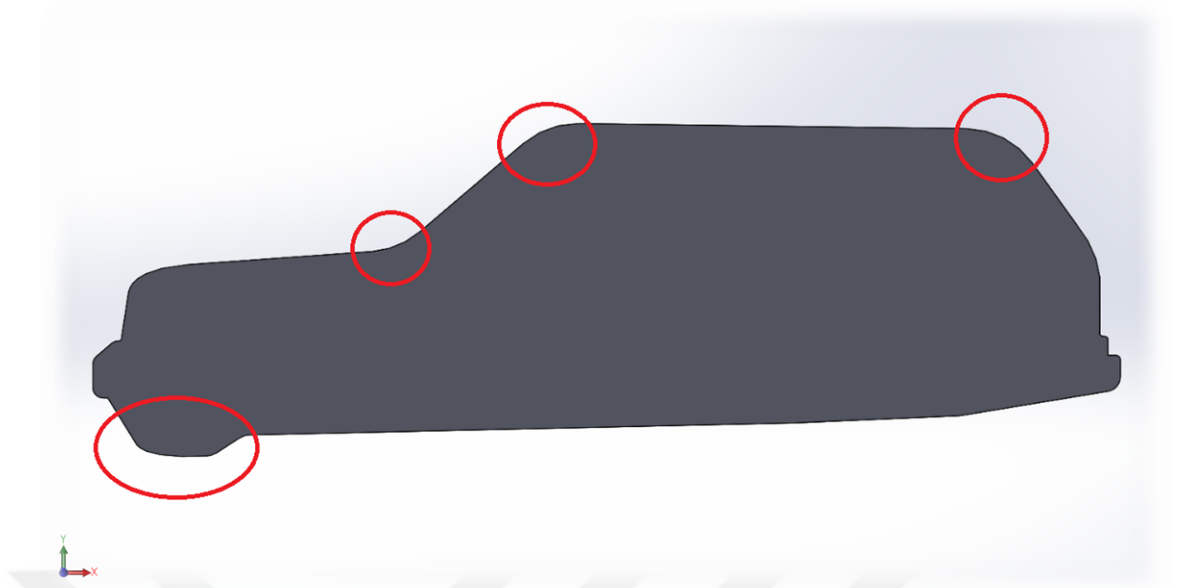
3.8. Geometrik İyileştirme ve Analizleri

Çalışmada ilk olarak 1/1 ölçekte çizilen taşıt modelinin üzerinde 3 farklı geometrik iyileştirme yapılmıştır. Her iyileştirme sonunda ortaya çıkan yeni prototip ANSYS Fluent'te aynı sınır şartlarında tekrar analiz edilerek C_D değişimi gözlemlenmiştir. Model taşıtın orijinal hali Şekil 3.13'te ve yapılan tasarımsal değişiklikler ise Şekil 3.14, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da gösterilmiştir. Ayrıca Çizelge 7'de taşıt modeli üzerinde yapılan değişiklikler açıklanmıştır.



Şekil 3.13. Orijinal (Prototip) model (1 Numaralı Model).

Şekil 3.13'te 1 numaralı model 1/1 ölçekte çizilmiş modeldir. Herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.



Şekil 3.14. 2 Numaralı model.

Şekil 3.14'te 2 numaralı modelde aracın ön cam-kaput, cam-tavan, tavan-arka cam birleşim yüzeylerinde ve ön tamponun alt kısmındaki keskin hatlar yuvarlatılmıştır.



Şekil 3.15. 3 Numaralı model.

Şekil 3.15'te 3. modelde, 2. modele ek olarak 40° olan Ön cam açısı 34° olarak revize edilmiştir.



Şekil 3.16. 4 Numaralı model.

Şekil 3.16’da 4. modelde, 3. Modele ek olarak 359° olan tavan çizgisi 357° olarak revize edilmiştir. Taşıt modeli üzerinde yapılan değişiklikler Çizelge 7’de belirtilmiştir. Her yapılan değişiklik kendisinden bir önceki yapılan değişikliğin üzerine yapılmıştır.

Çizelge 7. Taşıt modeli üzerinde yapılan değişiklikler.

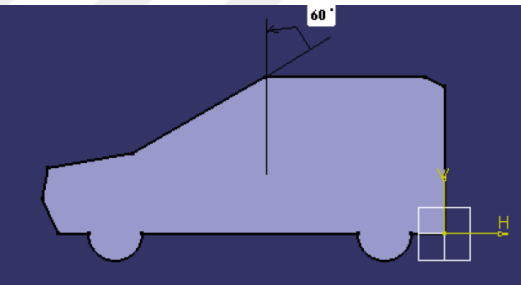
Taşıt Modeli	Yapılan Geometrik Değişiklikler
1. Model	1/1 ölçekte çizilmiş modeldir. Herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.
2. Model	Aracın ön cam-kaput, cam-tavan, tavan-arka cam birleşim yüzeylerinde ve ön tamponun alt kısmındaki keskin hatlar yuvarlatılmıştır.
3. Model	2. Model taşıta ek olarak 40° olan ön cam açısı 34° olarak revize edilmiştir.
4. Model	3. Modele ek olarak 359° olan tavan çizgisi eğimi 357° olarak revize edilmiştir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

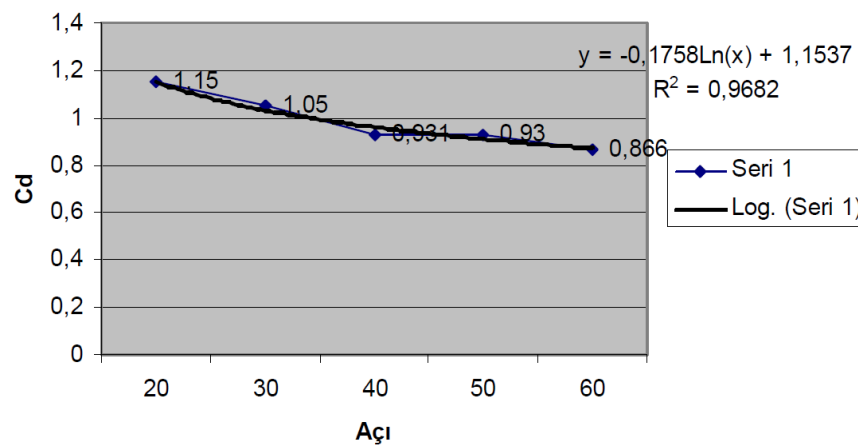
Sarı (2007), çalışmasında “Renault” Marka “Kangoo” Model bir araç modelinin farklı ön cam ve kaput açılarının sürtünme katsayısına etkisini incelemiştir. Çalışmayı ANSYS Fluent programı üzerinde sonlu hacimler yöntemini kullanarak yapmıştır. Sonuç olarak ön cam açısının “20°, 30°, 40°, 50° ve 60°” değerleri için sürüklenme katsayısı değerlerini sırasıyla “1,150, 1,052, 0,931, 0,93 ve 0,866” olarak bulmuştur. Elde edilen veriler sonucunda, 60°’lik ön cam açısında en uygun sürüklenme katsayısı değerine ulaştığını belirtmiştir. Analiz sonucunda elde edilen veriler Çizelge 8’de gösterilmiştir.

Çizelge 8. Renault-Kangoo ön cam eğim açısı ile direnç kuvveti değişimi ve C_D (Sarı, 2007).

Ön Cam Açısı (derece)	Direnç Kuvveti N	C_d Boyutsuz
20	1642	1,150
30	1500	1,052
40	1327	0,931
50	1326,42	0,93
60	1234,67	0,866



Çizelge 9’da verilen değerlerler dikkate alındığında, ön cam açısı değişimi ile aerodinamik direnç katsayısı arasındaki değişim, Şekil 4.1’de ki gibi olmaktadır. Bu grafiklerden, direncin hangi açılarda arttığı ve hangi açılarda minimum olduğu gözlemlenmektedir (Sarı, 2007).



Şekil 4.1. C_D ’nin ön cam açısı ile değişimi (Sarı, 2007).

Sarı (2007) çalışması referans alınarak “Renault” Marka “Kangoo” Model aracın 20° , 30° , 40° , 50° ve 60° olan ön cam açısı değerine sahip modelleri SolidWorks’te çizilmiştir. Referans çalışmadaki parametreler baz alınarak ANSYS Fluent’te sayısal olarak analiz edilmiştir. Hız 100 km/h, akışkan modeli “Spalart-Allmaras” olarak belirlenmiştir. Çizilen araç modelleri Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da, analiz sonuçları Çizelge 9’da ve Şekil 4.7’de görülmektedir.



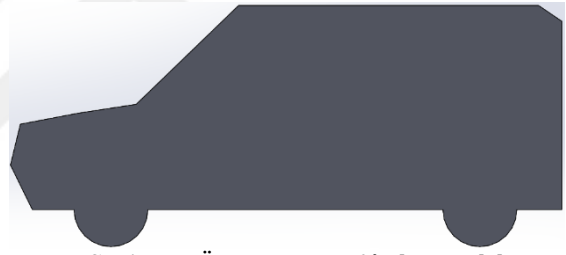
Şekil 4.2. Ön cam açısı 20° olan model



Şekil 4.3. Ön cam açısı 30° olan model



Şekil 4.4. Ön cam açısı 40° olan model



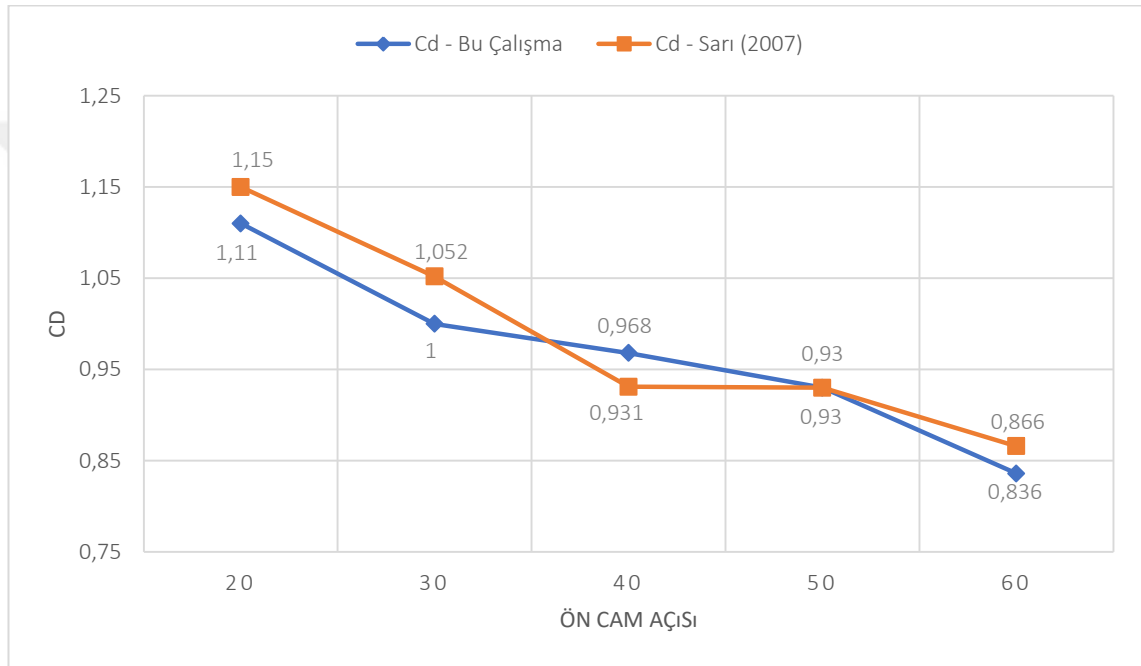
Şekil 4.5. Ön cam açısı 50° olan model



Şekil 4.6. Ön cam açısı 60° olan model

Çizelge 9. Renault-Kangoo ön cam açısı ve C_D değişimi.

Ön Cam Açısı (Derece)	C_D Bu Çalışma	C_D Sarı (2007)
20	1,11	1,15
30	1,00	1,052
40	0,968	0,931
50	0,930	0,93
60	0,836	0,866

Şekil 4.7. Renault-Kangoo C_D 'nin ön cam açısı ile değişimi**Çalışmaya dair notlar:**

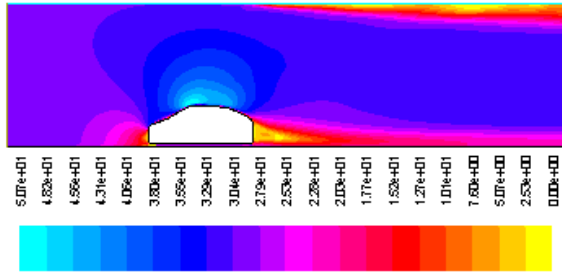
Sarı (2007) çalışmasındaki rüzgâr tüneli boyutları incelendiğinde modelin ön ve arka alanındaki rüzgâr tüneli alanı aracın geometrik boyutlarına göre düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, analiz sonuçlarında yanıltıcı sonuç verme olasılığı sebebiyle HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizleri için tercih edilen bir durum değildir.

Modellemenin Renault-Kangoo marka ve model aracın orijinal ölçüleriyle yapıldığı belirtilmiştir. Fakat söz konusu aracın tasarımı orijinal hali incelendiğinde

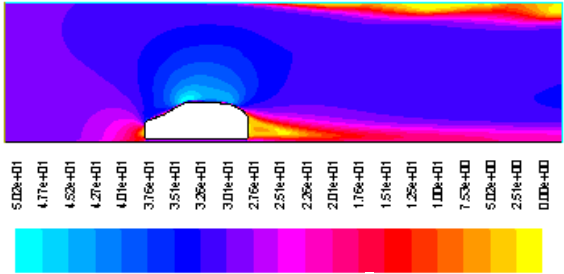
modellemenin dış formunun ve yan izdüşümünün geometrik benzerliğinin düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Çalışmada 7 farklı ön cam açısı incelenerek yakıt tasarrufu sağlaması açısından optimum açı değerinin 60° olduğu belirtilmiştir. Fakat aracın orijinal ön cam açısının 40° olduğu göz önünde bulundurulsa 60° 'lik bir ön cam tasarımının aracın iç hacminde ciddi bir düşüşe sebep olduğu görülmektedir. Ticari sınıf araçların müşteri portföyü sebebiyle iç hacim kaygısının duyulması göz önünde bulundurulduğunda çalışmada yapılan 20° bir revizenin sağlıklı olmadığı gözlemlenmiştir.

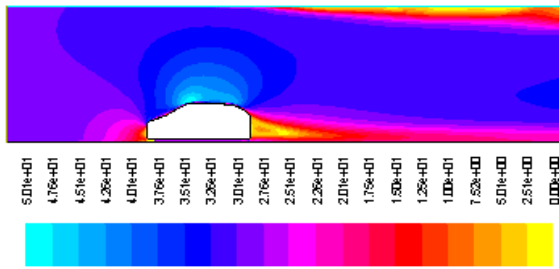
Bir diğer karşılaştırma için Bao, Wang, Wu'nun "Arka cam açısının araç aerodinamiği üzerindeki etkisi" isimli çalışması seçilmiştir (Bao ve ark, 2020). Çalışmada 7 farklı arka cam açısına sahip taşıt modellerini ANSYS Fluent'te sayısal olarak incelemişlerdir. Analizi yapılan araç modellerinin görselleri Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12 Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te bulunan C_D değerlerinin grafiği Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



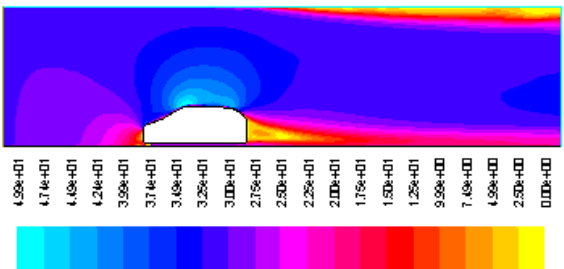
Şekil 4.8. Arka cam açısı 30° olan model



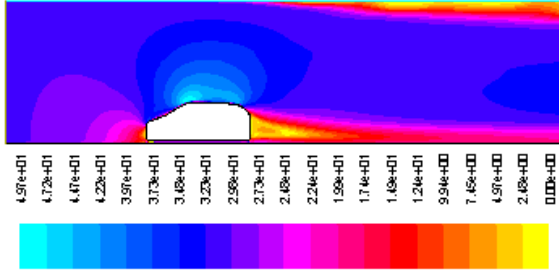
Şekil 4.9. Arka cam açısı 35° olan model



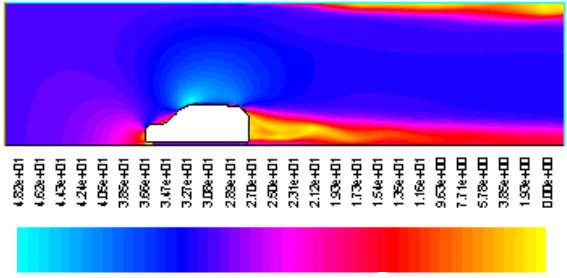
Şekil 4.10. Arka cam açısı 40° olan model



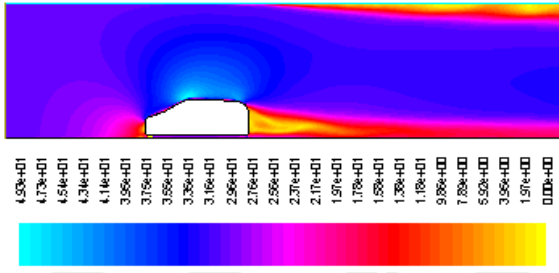
Şekil 4.11. Arka cam açısı 45° olan model



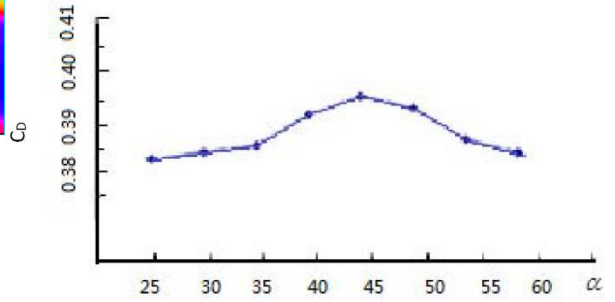
Şekil 4.12. Arka cam açısı 50° olan model



Şekil 4.13. Arka cam açısı 55° olan model



Şekil 4.14. Arka cam açısı 60° olan model

Şekil 4.15. Arka cam açısının C_D 'ye etkisi.

Bao, Wang, Wu (2020) çalışması referans alınarak 7 farklı arka cam açısına sahip araç modelleri SolidWorks'te çizilmiştir. Referans çalışmada analize dair parametreler belirtilmediği için literatürlerde genellikle kullanılan parametreler baz alınarak arka cam açısı 30° ve 35° olan modeller ANSYS Fluent'te sayısal olarak analiz edilmiştir. Hız 28 m/s, akışkan modeli “k-epsilon 2 eqn” olarak belirlenmiştir. Çizilen araç modelleri Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22'de, analiz sonuçları Çizelge 10'da ve Şekil 4.23'te görülmektedir.



Şekil 4.16. Arka cam açısı 30° olan model



Şekil 4.17. Arka cam açısı 35° olan model



Şekil 4.18. Arka cam açısı 40° olan model



Şekil 4.19. Arka cam açısı 45° olan model



Şekil 4.20. Arka cam açısı 50° olan model



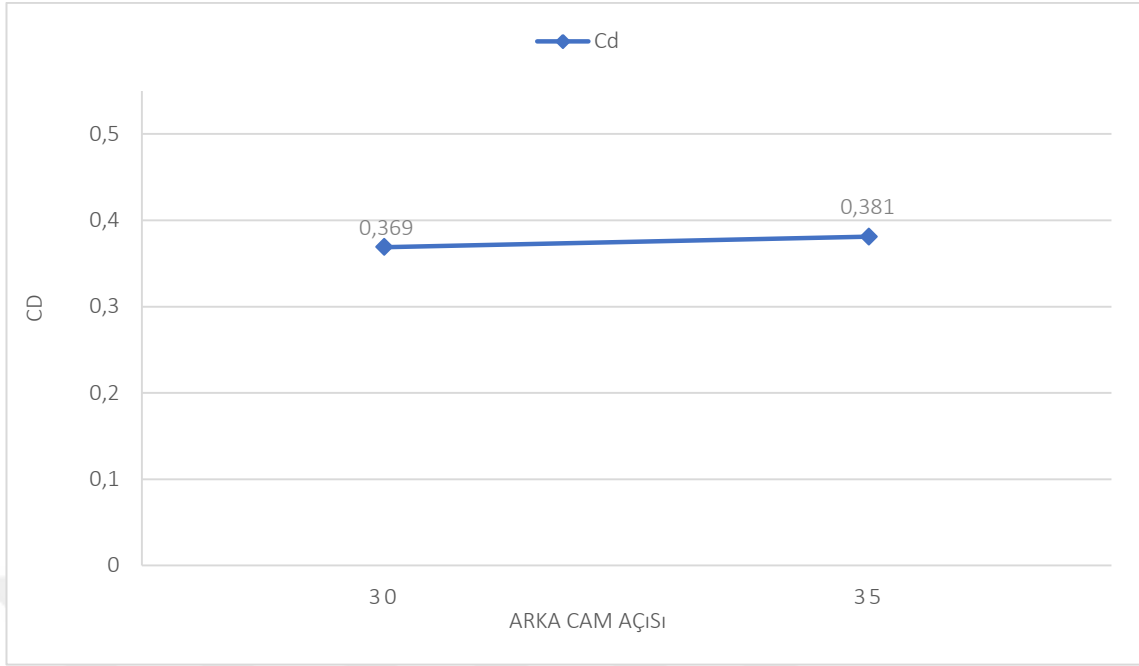
Şekil 4.21. Arka cam açısı 55° olan model



Şekil 4.22. Arka cam açısı 60° olan model

Çizelge 10. Arka cam açısı ile C_D 'nin değişimi.

Arka Cam Açısı (Derece)	C_D (Bu Çalışma)
30	0,369
35	0,381



Şekil 4.23. Arka cam açısı ile C_D 'nin değişimi.

Çalışmaya dair notlar:

Bao, Wang, Wu (2020) çalışmalarında, 7 farklı arka cam açısına sahip taşıt modelleri kullanmıştır. Arka camın yuvarlak bir yapıya sahip olması sebebiyle, geometrik tanımlamanın açısı olarak yapılması sağlıklı bir tanımlama olmamıştır. Geometrik tanımlamada açı yerine radyus olarak yapılacak bir tanımlama daha anlaşılabilir olabilirdi.

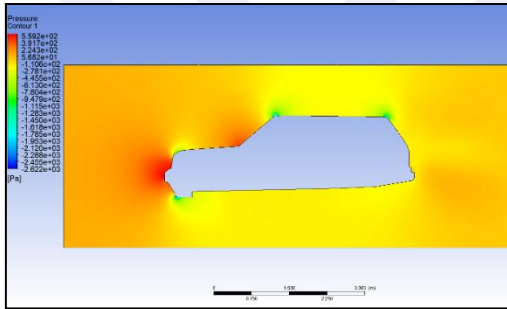
Çalışmada yapılan sayısal analize dair; hız, analiz metodu, akışkan modeli, taşıt boyutları, iterasyon sayısı vb. parametrelerden bahsedilmemiştir.

Analizi yapılan modelin 1:1 ölçekte çizildiği ve tekerlek, egzoz boruları, kapı kolları, dikiz aynalarının göz ardı edildiği belirtilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere taşıt modeli göz ardı edilen hususlara rağmen gerçek bir araç modeliyle geometrik benzerlik göstermemektedir.

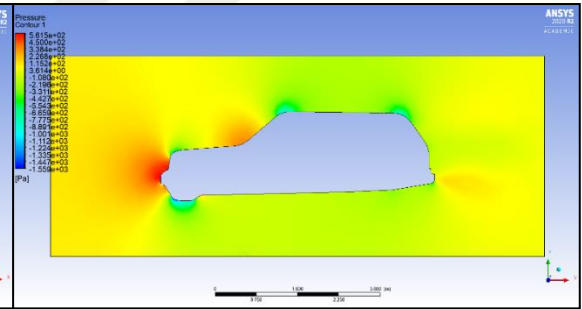
Analiz sonucunda elde edilen C_D değerleri grafik halinde verilmiştir lakin bu değerleri sayısal olarak çizelge formatında aktarılmamıştır. Bu durum çalışma sonuçlarının değerlendirilmesi açısından bir eksiklik olarak gözlemlenmiştir.

4.1. Basınç Dağılımı

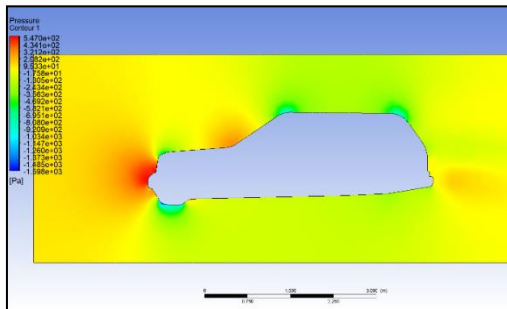
Yapılan analizde 1 ana model ve 3 revize modelin basınç dağılımı gözlemlendiğinde yapılan değişikliklerin araç üzerinde basıncın düşmesini sağladığı Şekil 4.24 ve Şekil 4.27'nin karşılaştırılması sonucu net olarak görülmektedir. Yapılan revizelerin aracın rüzgâr direncinin düşürülmesi amacıyla yapılması sebebiyle araç yüzeyinde yer alan keskin hatlarda daha yuvarlak bir tasarıma, ön cam ve tavan açısının daha düşük bir seviyeye revize edilmesine gidilmiştir. Bu nedenle rüzgârın araç üzerindeki oluşturduğu basınç her iyileştirme sonunda daha da düşmektedir. Bu durum maksimum ve minimum basınç değerlerinin yer aldığı Çizelge 11'de sayısal olarak görülmektedir.



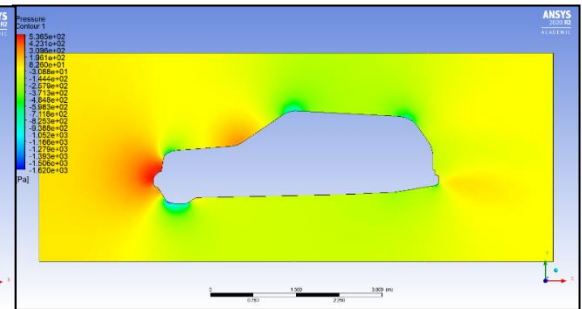
Şekil 4.24. 1. Model basınç dağılımı.



Şekil 4.25. 2. Model basınç dağılımı.



Şekil 4.26. 3. Model basınç dağılımı.



Şekil 4.27. 4. Model basınç dağılımı.

Şekil 4.25'te 2. Modelin basınç dağılımı gözlemlendiğinde 1. Modele kıyasla basınçta büyük oranda iyileştirme olduğu görülmektedir. Araç dış yüzeyinde ön tamponda, cam -kaput, cam - tavan ve tavan – arka cam birleşim noktalarındaki keskin hatların yuvarlatılmasının basıncın azaltılması yönünden büyük ölçüde etkili olduğu tespit edilmiştir.

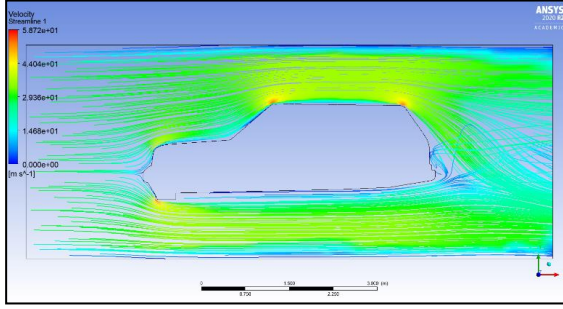
Çizelge 11. Maksimum ve minimum basınç değerleri (Pa).

Model	Maksimum Basınç	Minimum Basınç
1. Model	559,2 Pa	-2622 Pa
2. Model	561,5 Pa	-1559 Pa
3. Model	547 Pa	-1598 Pa
4. Model	536,5 Pa	-1620 Pa

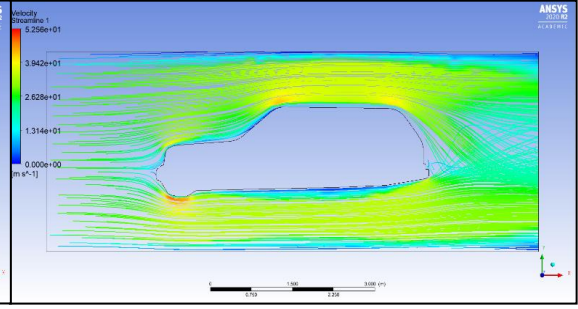
4.2.Akım Çizgileri

Şekil 4.28, Şekil 4.29, Şekil 4.30 ve Şekil 4.31’de görüldüğü gibi aracın orta düzlemi boyunca araç üzerinde oluşan akım çizgilerinin yüzey geometrisine bağlı olarak nasıl değiştiği gösterilmiştir. Şekil 4.28’de görüldüğü üzere aracın ön tarafında yüksek basınç bölgesi olduğu için akım çizgileri yüzeyden ayrılmıştır. Kaput ile ön cam arasındaki bölgede yüksek basınç olduğu için burada da akım çizgileri yüzey geometrisini takip edememiş ve daha sonraki bölgede havanın hızı arttığı için havanın basıncı düşmüş ve bu durum havanın yeniden yüzey geometrisini takip etmesiyle sonuçlanmıştır. Ön ve arka cam yüzeylerinin tavanla buluştuğu köşelerin keskin bir hat tasarımına sahip olması sebebiyle o kısımlardaki hava akım çizgisinin kırmızı renkte olduğu görülmektedir. Taşıtın arka kısmında ise hava molekülleri yüzeyin geometrisine bağlı olarak yüzeye tutunamadığı için yine akış ayrılması meydana gelmiş ve bu da akım çizgilerinin yüzey geometrisini takip edememesine neden olmuştur.

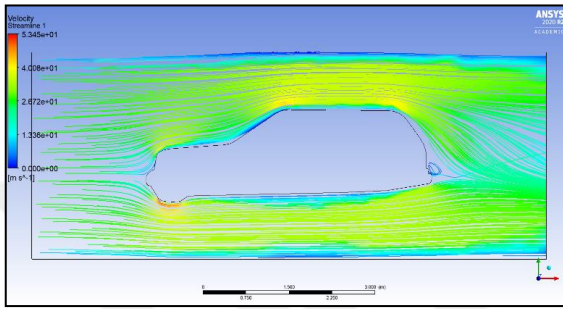
Şekil 4.31’de ise yeniden tasarlanan araç üzerinde oluşan hava akım çizgileri görülmektedir. 1. Modele kıyasla akım çizgilerinin ön tamponda ve tavan köşelerinde daha stabil bir akış olduğu görülmektedir. Aracın arka tarafında meydana gelen akış ayrılması alanın 1. Modele göre daha az olduğu şekilden anlaşılmaktadır. Bu durum aerodinamik direnç kuvvetine katkısı olan basınç direncinde azalmaya yol açmıştır.



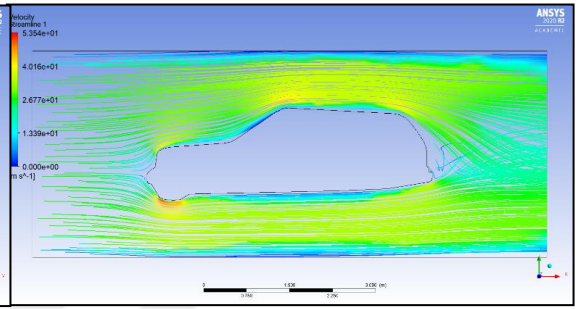
Şekil 4.28. 1. Model akım çizgileri.



Şekil 4.29. 2. Model akım çizgileri.



Şekil 4.30. 3. Model akım çizgileri.

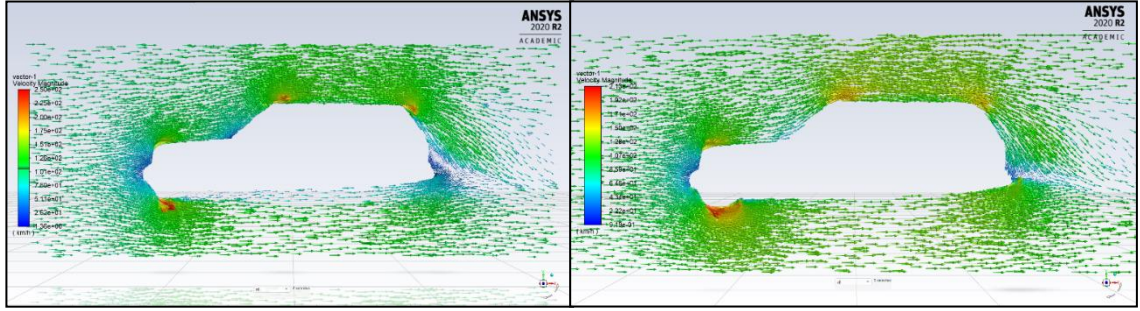


Şekil 4.31. 4. Model akım çizgileri.

4.3. Hız Vektörleri

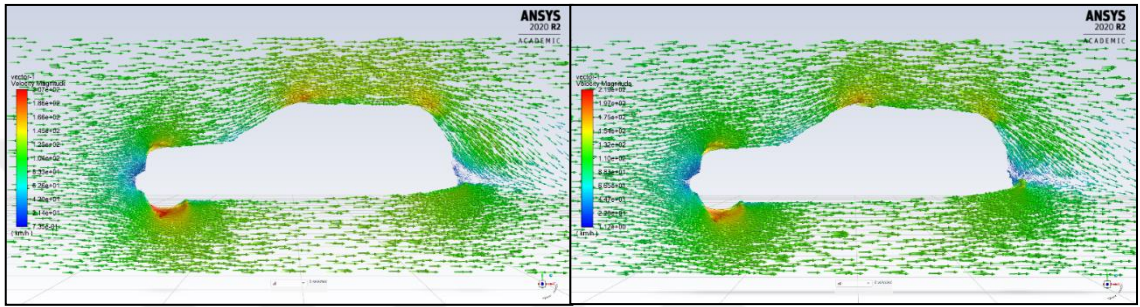
Şekil 4.32’de araç modelinin ön tampon tasarımının keskin hatlara sahip olması sebebiyle hız vektörlerinin aracın taban kısmında seyrek olduğu görülmektedir. Şekil 4.33’te ön tamponda yapılan tasarım değişikliği sayesinde hız vektörlerinin aracın alt kısmında daha sık olduğu gözlemlenmektedir. Tamponda yapılan bu tasarım değişikliği aracın C_L katsayısını düşürerek, aracın üst kısımlarındaki basınçların alt kısımlarındaki basınçlardan daha yüksek olmasını sağlamış ve bu durum kaldırma kuvveti etkisi azaltmıştır. Dolayısıyla aracın yüksek hızlarda, virajlarda savrulmasına engel olarak stabilitesini artırarak yol tutuşunu katkı sağlamıştır.

Şekil 4.34’te ön cam açısının düşürülmesiyle birlikte hız vektörlerinin Şekil 4.32’de ki gibi kaput yüzeyinden ön camı takip ederek tavana ilerlerken yoğunluk oluşturmadığı görülmektedir.



Şekil 4.32. 1. Model hız vektörleri.

Şekil 4.33. 2. Model hız vektörleri.



Şekil 4.34. 3. Model hız vektörleri.

Şekil 4.35. 4. Model hız vektörleri.

Şekil 4.32’de görüldüğü gibi aracın orta düzlemi boyunca meydana gelen akış hareketinin yönü ve şiddeti hız vektörleriyle birlikte gösterilmiştir. Akış ayrılmasının meydana geldiği bölgelerde girdapların oluştuğu görülmektedir. Aracın arka tarafında türbülans yoğunluğu fazla olduğu için diğer bölgelere göre daha fazla girdap hareketleri oluşmuştur. Aracın arkasında oluşan girdap hareketleri görüldüğü gibi art izi bölgesi oluşturmuştur. Bu bölgede havanın aracın gövdesiyle teması zayıflamış ve yüzey sürtünme direncinde azalma olmuştur.

Şekil 4.35’te ise yeniden tasarlanan araç üzerinde oluşan hız vektörleri görülmektedir. Orijinal araç ile karşılaştırıldığında, aracın arka tarafındaki art izi alanının daha az olduğu anlaşılmaktadır.

4.4. C_D ve C_L Katsayıları

Çalışmada, 1 Ana model ve iyileştirme yapılan 3 modelin ANSYS Fluent analizinin sonucunda elde edilen C_D ve C_L değerlerindeki değişim Çizelge 12, Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’de görülmektedir. 0,255 olan C_D katsayısı %20 oranında 4. Modelde 0,204’e kadar düşürülmüştür. -0,218 olan C_L katsayısı 4. Modelde -0,367’ye kadar düşürülmüştür.

Elde edilen sonuç verileri değerlendirildiğinde, taşıt dış formunda aerodinamik çizgiler kullanılması halinde sürüklenme katsayısı önemli ölçüde düşürülebilmektedir. İlk olarak analiz edilen 1. Model tasarımında çok sayıda keskin köşe bulunmaktadır ve analiz sonuçlarına bakıldığında yüksek bir sürüklenme katsayısı değeri elde edilmiştir. Görselleştirilmiş akım çizgileri değerlendirilip, akışta bozulmaların olduğu bölgelerde iyileştirmeler yapılarak oluşturulan yeni modeller analiz edildiğinde sürüklenme katsayısı değerinde büyük oranda düşüş gözlemlenmiştir.

Kara taşıtlarının özellikle yüksek hızlarda yol tutuşunun daha fazla olması için kaldırma katsayısının mümkün olduğunca düşük seviyelerde kalmasını sağlayacak önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu önemlerden en yaygın olanı spoyler kullanımıdır. Çalışmada kullanılan modelin bulunduğu segmentte spoyler kullanımının yaygın olmaması ve model aracın tasarımına göreceli olarak hitap etmemesi sebebiyle dış tasarım iyileştirmelerinde spoyler tasarımı yapılmamıştır. Kaldırma katsayısında elde edilen düşüş 2. Modelde keskin keskin hatların iyileştirilmesi ve 4. Modelde tavan eğim açısının düşürülmesi ile elde edilmiştir.

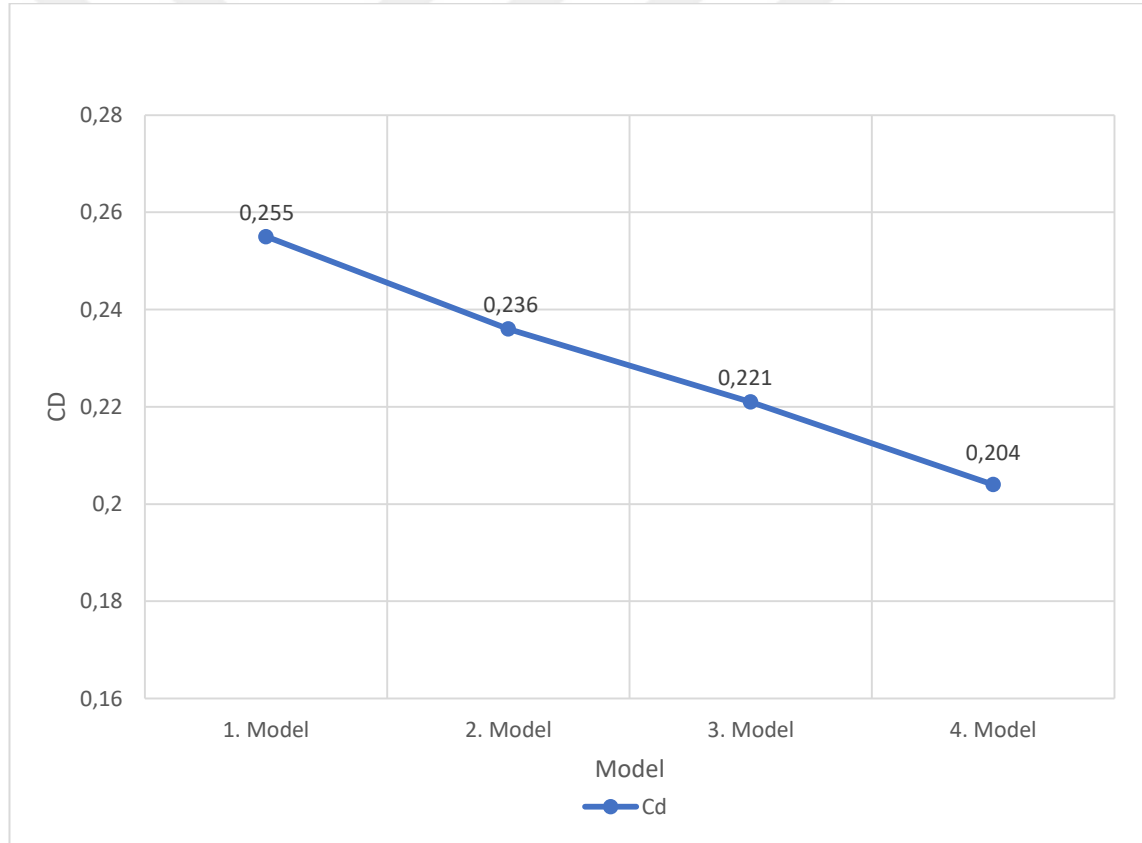
Çalışmada, 3. Modelde ön cam açısında yapılan değişiklik sonucu C_D değerinde düşüş elde edilmiş olup benzer bir yöntem uygulayan Sarı (2007) çalışmasında “Renault” Marka “Kangoo” Model bir araç modelinin farklı ön cam ve kaput açılarının sürtünme katsayısına etkisini incelemiş ve benzer sonuçlar elde ederek C_D değerinde düşüş gözlemlenmiştir (Sarı, 2007).

Roumeas ve arkadaşları (2008) “Ahmed” modeli üzerinde yaptıkları çalışmada aracın arka camında oluşan akış yapısını incelemişlerdir. Arka cam yüzeyinde meydana

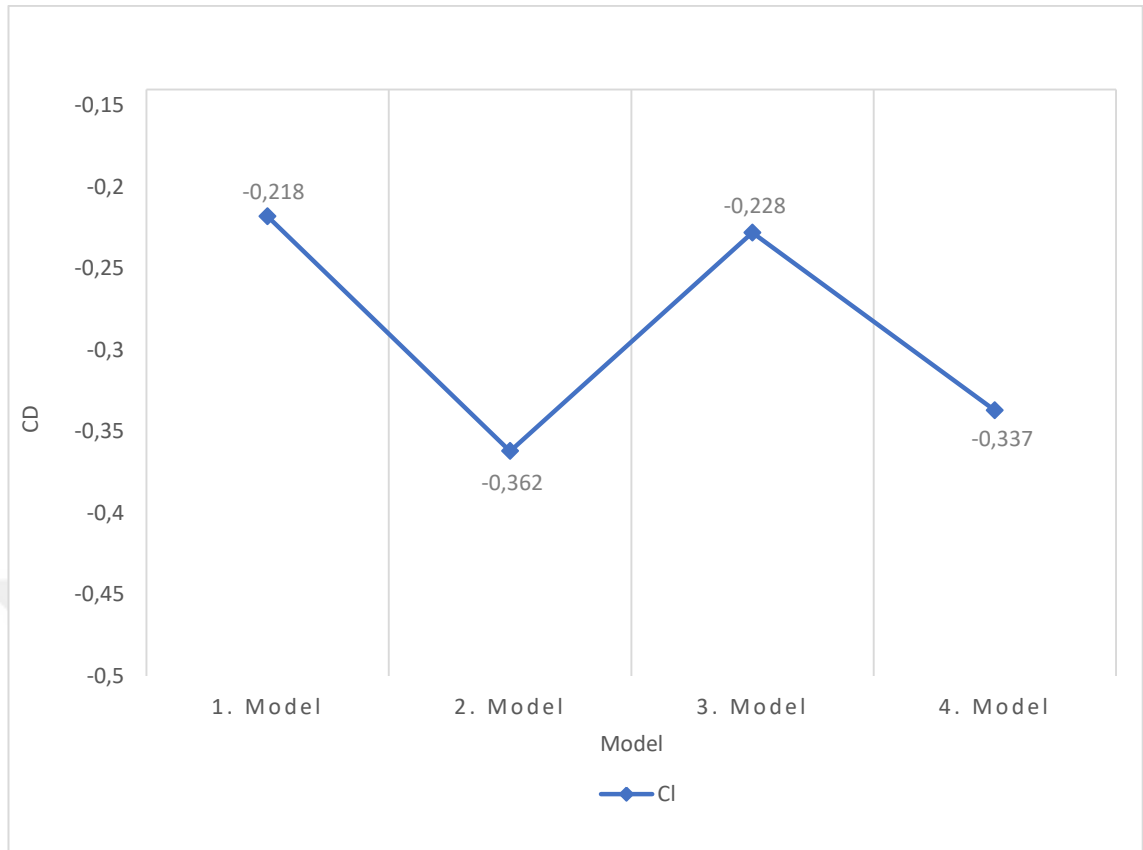
gelen türbülanslı bölgenin azaltılmasının sürüklenme katsayısına olumlu yansıdığını belirtmişlerdir (Roumeas ve ark, 2008).

Çizelge 12. Araç modellerinin C_D ve C_L değerleri.

Model Tipi	C_D / Sürüklenme Katsayısı	C_L / Kaldırma Katsayısı
1. Model (Orijinal)	0.255	-0.218
2. Model	0.236	-0.362
3. Model	0.221	-0.228
4. Model	0.204	-0.337



Şekil 4.36. Modellerin C_D katsayısı değişimi.



Şekil 4.37. Modellerin C_L katsayısı değişimi.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Model otomobilde yapılan revizeler sonucu, 200 iterasyon sonunda C_D katsayısı 0,255'ten 0,204'e düşürülmüştür. Model otomobilin orijinal (1. Model) halinde bulunan C_D katsayısı (0,255), prototipin fabrika verisine (0,37) göre düşük çıkmıştır. Bu durum modelin, prototip ile %100 geometrik benzerliği olmamasından kaynaklanmaktadır. Prototipte yer alan silecekler, tekerlek boşlukları, dış aynalar, cam çerçeveleri, araç altında yer alan teçhizatlar vb. birçok faktörlerden kaynaklanan dirençlerin olmamasıdır.

Çalışmada, 2. Model üzerinde aracın ön cam-kaput, cam-tavan, tavan-arka cam birleşim yüzeylerinde ve ön tamponun alt kısmındaki keskin hatlar yuvarlatılmıştır. Akım çizgilerinin yuvarlak hatlar üzerinde keskin hatlara kıyasla daha stabil bir akış profili oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu revize sonucu C_D değeri 0,255'ten 0,236'ya düşürülmüştür. Dolayısıyla C_D katsayısında %7,45 oranında düşüş gözlemlenmiştir.

Bir sonraki revize model olan 3. Model üzerinde 2. Model araca ek olarak 40° olan ön cam açısı 34° olarak revize edilmiştir. Bir yüzey üzerinde ilerleyen akış, farklı açılara sahip bir başka yüzeye geçişi esnasında akım çizgilerinde şartlara bağlı olarak bozulma ve dağılma meydana gelmesi muhtemeldir. Aracın kaput yüzeyinde ön cama ve ön camdan tavan yüzeyine ilerleyen akım çizgilerindeki söz konusu bozulmayı minimize etmek amacıyla yapılan bu revizyon neticesinde C_D katsayısı 2. Model araca kıyasla 0,236'dan 0,221'e düşürülmüştür. Dolayısıyla C_D katsayısında %6,35 oranında düşüş gözlemlenmiştir.

Son revize model olan 4. Model üzerinde 3. Model araca ek olarak 359° olan tavan çizgisi 357° olarak revize edilmiştir. Akım çizgilerinin, aracın yüzeylerinde geçip arka tarafında oluşturduğu ve araçla aynı yönde gitmeye çalışan türbülanslı hava bölgesine (art izi bölgesi) tavandan gelen akışın yataya daha paralel bir açıyla gelmesi amacıyla yapılan bu revizyon sayesinde C_D katsayısı 0,221'den 0,204'e düşürülmüştür. Dolayısıyla C_D katsayısında %7,7 oranında düşüş gözlemlenmiştir.

Model araç üzerinde yapılan 3 farklı tasarım iyileştirmesi sonucu C_D katsayısı 0,255'ten 0,204'e düşürülmüştür. Dolayısıyla tüm revizeler sonucu C_D katsayısında %20 oranında düşüş gözlemlenmiştir.

Basınç dağılım verilerinde, 1. Modelde taşıt yüzeyine etkiyen 559,2 Pa maksimum basınç değeri %4,05 oranında düşürülerek 4. Model'de 536,5 Pa'a indirilmiştir.

Yapılan geometrik revizeler neticesinde akım çizgilerinde daha stabil bir profil elde edilerek, hız vektörlerinin taşıt yüzeyinde hız kaybına uğradığı bölgeler azaltılmıştır.

5.2. Öneriler

Yapılan bu çalışma, belirlenmiş olan bir model üzerinde otomobillerin aerodinamiğiyle ilişkili olan sürüklenme ve kaldırma değerlerini aracın tasarımda değişiklikler yapılarak, yakıt ekonomisine katkı sağlayabilecek şekilde düşürmeyi amaçlamıştır.

Çalışmada yapılan tasarımsal değişiklikler, aracın bulunduğu “J” segmentindeki “Premium SUV” kategorisinin ortalama boyut ölçülerinden ayrılmayacak ve aracın orijinalinde sunduğu iç hacmi çok fazla değiştirmeyecek şekilde yapılmıştır. Zira ilerleyen süreçte kullanıcıların değişen ihtiyaçları ile birlikte araç tasarımlarında meydana gelebilecek farklı ölçü standartlarıyla birlikte, yapılacak olan çalışmalarda iç hacim kaygısının daha az olduğu, güçlü tasarımsal değişiklikler yapılarak C_D katsayısı daha iyi seviyelere düşürülerek aerodinamik etkinliği artırılabilir. Yapılan sayısal çalışmaların doğruluğunu test etmek için çalışmada kullanılan model aracın prototipi kullanılarak rüzgâr tünellerinde deneyler yapılabilir. Bu sayede sayısal çalışmalarla elde edilen veriler ile rüzgâr tüneli deneyinden elde edilen verilerle karşılaştırılabilir.

Yapılan çalışmada, belirlenen tasarımsal değişikliklerin etkilerinin daha belirgin olması için, araç-tekerlek ve araç-zemin etkileşimleri kısmen göz ardı edilmiştir. Bu şekilde özellikle araç ana gövdesi üzerinde iyileştirme çalışmaları yürütülmüştür.

Özellikle araç ana gövdesine ait sürüklenme katsayısında iyileştirmeler sağlanmıştır. Gelecek çalışmalarda tüm tasarımsal bileşenler ve araç-zemin etkileşimi göz önünde bulundurularak tasarımlar ve analizler yapılabilir.



KAYNAKLAR

- Ahmed, S. R., Ramm, G., (1984). Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. SAE Technical Paper, 93: 473-503.
- Aka, H., (2003). Otomobillerin aerodinamik karakteristiğinin bir rüzgar tüneline incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü: Ankara, 83 sayfa.
- Altun, Ş., Rodríguez-Fernández, J., (2016). Biofuels derived from Turkish industry wastes- study of performance and emissions in a diesel engine. Environ. Prog. Sustainable Energy, 35: 847-852.
- Atlı, V., (1985). Kara vasıtaları aerodinamiği incelemelerinde kullanılan hava tünelleri, I. Otomotiv ve Yan Sanayi Sempozyumu, TMMOB, Yayın No.117.
- Aydın, O., (1994). İki boyutlu bir otomobil modeli etrafındaki akışın sayısal olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü: Trabzon, 63 sayfa.
- Bayındırlı, C., Çelik, M., (2019). Bir taşıta etki eden aerodinamik direnç kuvvetinin bagaj üstü spoiler ile iyileştirilmesi. AKÜ FEMÜBİD 19 (025903): 470-479.
- Bayraktar, İ., (2002). Ağır kara araçlarının dış aerodinamiği: hesaplamalar ve rüzgar tüneli testi, Doktora Tezi, Old Dominion University Havacılık ve Uzay Mühendisliği, 130 sayfa.
- Boa, H., Wang, C., Wu, Y., (2020). Effect of rear window angle on car aerodynamic characteristics, 3rd world conference on mechanical engineering and intelligent manufacturing (WCMEIM), China:Shanghai, 650-653.
- Canbazoğlu, S., (2000). Aerodinamik Yapının Otomobil Performansına Etkileri, III. Havacılık Sempozyumu: Kayseri, 10-12.
- Çağan, M., (2000). Taşıt aerodinamik özelliklerinin sayısal yöntemlerle incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü: İstanbul, 133 Sayfa.
- Çağlayan, R., (2020). Taşıtlarda ağırlık azaltımında hafif malzeme olarak alüminyum kullanımı ve optimizasyon, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü: Bursa 68 sayfa.
- Çengel, Y. A., Cimbala, J. M., (2008). Akışkanlar Mekaniği, McGraw Hill: İzmir, 277-299, 562-567.

- Demircioğlu, T. K. (2007). Bir araç modelinin aerodinamik analizi ve sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi: Balıkesir, 72 sayfa.
- Ersoy, Y. ve Mert, M., (1977). Boyut Analizi ve Fiziksel Ölçmeler, ODTÜ Yayıncılık: Ankara, 474 sayfa.
- Ertekin, İ., (2011). Farklı lastik profillerinin taşıt performansına etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü: Konya, 79 sayfa.
- Gebel, M. E., Önalı, S., Korkmaz, S., Osmanoglu, S., Özçelik, B., Ermurat, M. ve İmal, M., (2018). Bir elektrikli aracın aerodinamik özelliklerinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, 9th International Automotive Technologies Congress, OTEKON, 9 sayfa.
- Gillespie, D. T., (1992). Fundamentals of Vehicle Dynamics, Warrendale, 85– 98.
- Gökçeğöz, G., (2013). Model bir otomobile etkiyen aerodinamik kuvvetlerin analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi: Elazığ, 109 Sayfa.
- Gümüşlüol, Ü., Çetinkaya, T.A., Albayrak, K., (2006). Geçiş durumundaki taşıtların aerodinamik etkileşimlerinin deneysel olarak incelenmesi, *Mühendis ve Makina Dergisi*, 561: 28-35.
- Hacıbekir, T., (2006). Adaptif seyir sistemlerinin yakıt tüketimine etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü: İstanbul, 249 sayfa.
- Han, T. (1989). Computational analysis of three-dimensional turbulent flow around a bluff body in ground proximity, *AIAA J.*, 27 (9): 1213-1219.
- Helgason, E., Hafsteinsson, H.E., (2009). Automatic shape optimization of aerodynamic properties of cars. Master Thesis, Chalmers University of Technology, Department of Applied Mechanics: Göteborg.
- Henning, L., King, R. (2005). Drag reduction by closed-loop of a seperated flow over a bluff body with a blunt trailing edge. Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, 15 December 2005: Seville.
- Hucho, W. H., Savran G., (1993). Aerodynamics of road vehicles, *Annu.Rev. Fluid Mech.* 25: 485-537.

- İpçi, D., Yılmaz E., Aysal F.E., Solmaz H., (2015). Bir kara taşıt modeli etrafındaki akış yapısının sayısal olarak incelenmesi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 12(2):51-64.
- Julian, H. S., (2004). An Introduction to Modern Vehicle Design, Butterworth-Heinemann: Oxford, 111-112.
- Kavadar, G., (2006). Design and protoyping of a mechatronic system as a drag reduction device for buses. Master Thesis, İzmir Institute of Technology: İzmir, 109 sayfa.
- Koike, M., Nagayoshi, T. And Hamamoto, N. (2004). Research on aerodynamic drag reductionby vortex generators, *Mitsubishi Motors Technical Review*, 16: 11-16.
- Köylü, H., (2017). Vites geçişlerine göre yakıt tüketiminin modellenmesi: Vites değiştirme stratejilerinin yakıt tüketimine etkilerinin analizi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(3): 627-643.
- Lapuerta, M., Hernández, J. J., Oliva, F., (2014). Strategies for active diesel particulate filter regeneration based on late injection and exhaust recirculation with different fuels. *Int J Engine Res*, 15: 209–21.
- Özen, İ., (2015). Bir Binek Aracın Aerodinamik Etkinliğinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü: Elazığ, 109 Sayfa.
- Pujals, G., Depardon, S. And Cossu, C. (2010). Drag reduction of a bluff body using coherent streamwise streaks: *Springer*, 49(5): 1085-1094.
- Ramnefors, M., Bensiyd, R., Holmberg, E., Perzan, S., (1996). Accuracy of drag prediction on cars using CFD-effect of grid refinement and turbulence models. *SAE Technical Paper Series*, 960681: 865-879.
- Roumeas, M., Gillieron, P. And Kourta, A., (2008). Seperated flows around the rear window of a simplified car geometry, *Journal of Fluid Engineering*, 130(2): 1-10.
- Sarı, F. M., (2007). Hafif ticari taşıtlarda taşıt ön formuna etkiyen hava direncinin aerodinamik analizi ve yakıt sarfiyatına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Ünstitüsü: Eskişehir, 120 Sayfa.
- Schlichting, H., (1960). Aerodinamic problems of motor cars, The Institute of fluid Mechanics Technical University Braunschweig, Prepared for meating of AGAED Fluid Dynamics Panel on, Industrial Use of Wind Tunnels: İstanbul.

- Solmaz, H., (2010). Değişik araç modellerinin rüzgar direnç katsayılarının bir rüzgar tüneline belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü: Ankara, 120 sayfa.
- Stone, R., Ball, J.K., (2004). Automotive engineering fundamentals, Warrendale, 435-454.
- Uçar, M. F., (2018). Yeni bir arka spoiler tasarımı, araç dinamiğine etkisi ve araç üzerine uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi: Karabük, 101 sayfa
- Uyumaz, A., Solmaz, H., (2016). RCCI bir motorda enjeksiyon zamanlaması ve lamdanın yanma ve performans karakteristikleri üzerindeki etkilerinin deneysel incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilim Dergisi Part:C*, Tasarım ve Teknoloji, 4: 299–308.
- Yamaç, Y., Gencer, F., Aşçı, M.İ. ve Gündeşli, R., (2020). Elektrikli bir aracın aerodinamik performansının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, Makale, *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(1), 12 sayfa.
- Yarin, T. G., (2019). Farklı taşıt modellerinin aerodinamik yapısının nümerik olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi: Bursa, 56 sayfa.

İNTERNET KAYNAKLARI

- Anonim 1, (2019). Ham Petrol ve Doğal Gaz Sektör Raporu, Türkiye Petrolleri A.O., <https://www.tpao.gov.tr/file/2005/2019-tpao-sektor-raporu-3185ed3b4af5442c.pdf> [Erişim Tarihi: 20 Ocak 2021]
- Anonim 2, (2019). Sektör Raporu, Petrol Sanayi Derneği (PETDER) <https://www.petder.org.tr/Uploads/Document/7b886e84-a89f-403b-a510-32fcb202f3dd.pdf?v-637332621912723005> [Erişim Tarihi: 20 Ocak 2021]
- Anonim 3, <https://www.muhendisbeyinler.net/araclarda-aerodinamik-nedir/> [Erişim Tarihi: 23 Şubat 2021]
- Anonim 4, [https://tr.wikipedia.org/wiki/aerodinamik_\(otomobil\)](https://tr.wikipedia.org/wiki/aerodinamik_(otomobil)) [Erişim Tarihi: 24 Şubat 2021]
- Anonim 5, <http://www.gokhanturkyilmaz.com/yayin/proje.htm>, [Erişim Tarihi: 3 Nisan 2021]
- Anonim 6, <https://muhendisbilir.com/aerodinamik-nedir-arabalar-icin-neden-onemli/> [Erişim Tarihi: 18 Nisan 2021].

Anonim 7, <https://www.motortrend.com/cars/land-rover/range-rover/2012/>, [Erişim Tarihi 20 Nisan]

Anonymous 1, <https://driveteslacanada.ca/cybertruck/just-how-aerodynamic-is-teslas-triangle-on-wheels-otherwise-known-as-the-cybertruck/> [Erişim Tarihi: 24 şubat 2021].

Anonymous 2, https://en.wikipedia.org/wiki/Flow_visualization [Erişim tarihi: 18 Nisan 2021]

Anonymous 3, <https://www.caranddriver.com/research/a31863081/aerodynamic-cars/> [Erişim tarihi: 28 Nisan 2021]

