



T.C.
Fırat Üniversitesi
Fırat University

Fen Bilimleri Enstitüsü
The Institute of Natural and Applied Sciences

**BİR BİNEK ARACIN AERODİNAMİK ETKİNLİĞİNİN
MODELLENMESİ**

İsmail ÖZEN

Yüksek Lisans Tezi
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Yasin VAROL
MAYIS-2015

ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

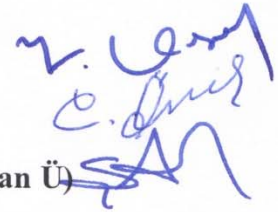
BİR BİNEK ARACIN AERODİNAMİK ETKİNLİĞİNİN MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İsmail ÖZEN
(121136102)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12 Mayıs 2015
Tezin Savunulduğu Tarih : 08 Mayıs 2015

Danışman : Prof. Dr. Yasin VAROL (F.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Cengiz ÖNER (F.Ü)
Doç. Dr. Şehmus ALTUN (Batman Ü)



MAYIS – 2015

ÖNSÖZ

Çalışmalarım sırasında engin bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Yasin VAROL' a, deneylerle ilgili setlerin ve cihazların sağlanmasında yardımları olan Gazi Üniversitesi öğretim üyelerine (Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ, Prof. Dr. H. Serdar YÜCESU ve Arş. Gör. Dr. Hamit SOLMAZ) ve sayısal çalışmalar için yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Erman ÇELİK' e teşekkürlerimi sunarım.

İsmail ÖZEN
ELAZIĞ - 2015

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VI
RESİMLER LİSTESİ.....	IX
ÇİZELGE LİSTESİ.....	X
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XI
ÖZET.....	XIV
SUMMARY.....	XV
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Taşıt Aerodinamiğinin Tarihçesi.....	7
1.2. Aerodinamiğin Önemi.....	8
1.3. Aerodinamik Kuvvetler.....	11
1.3.1. Aerodinamik Direnç (Sürükleme) Kuvveti.....	12
1.3.2. Kaldırma Kuvveti.....	14
1.4. Boyutsal Parametreler.....	15
1.4.1. Aerodinamik Direnç (Sürükleme) Katsayısı.....	15
1.4.2. Kaldırma Katsayısı.....	16
1.4.3. Basınç Katsayısı.....	16
1.4.4. Buckingham Pi Teoremi.....	18
1.5. Viskoz Hava Akışı.....	21
1.5.1. Sınır Tabaka.....	21
1.5.2. Yüzey Düzgünlüğü.....	21
1.5.3. Ventüri Etkisi.....	22
1.5.4. Hava Akım Çizgileri.....	23
1.5.5. Bağlı Hız ve Basınç.....	23
1.5.6. Laminer, Türbülanslı Sınır Tabaka.....	24
1.5.7. Laminer – Türbülanslı Sınır Tabaka Geçiş Noktası.....	25
1.5.8. Akış Ayrılması.....	25
1.5.9. Art İzi Bölgesi.....	27

1.5.10. Girdaplar	28
1.6. Aerodinamik Direnç (Sürüklenme) Kuvvetinin Önemi	28
1.7. Aerodinamik Direnç Kuvvetini Azaltmak İçin Yapılan İyileştirmeler	31
1.7.1. Profil Kenar Yuvarlatma veya Düzleştirme	33
1.7.2. Kaput Eğimi ve Ön Cam Eğiminin Düzenlenmesi.....	33
1.7.3. Tavan ve Yan Panelin Kavislendirilmesi	34
1.7.4. Arka Yan Panelin Sivriltilmesi.....	35
1.7.5. Alt Gövdenin Arka Ucunun Yukarı Doğru Sivriltilmesi.....	36
1.7.6. Alt Gövde Pürüzlülüğünün Giderilmesi	36
1.7.7. Arka Tarafın Kuyruk Şeklinde Uzatılması	36
1.8. Aerodinamik Kaldırma Kuvvetini Azaltmak İçin Yapılan İyileştirmeler	37
1.8.1. Spoiler Kullanımı	37
1.8.2. Negatif Kaldırmalı Kanatlar Kullanımı	38
2. MATERYAL ve METOT	40
2. 1. Deneysel Modelleme	40
2.1.1. Benzerlik.....	42
2.1.1.1. Geometrik Benzerlik.....	43
2.1.1.2. Kinematik Benzerlik.....	43
2.1.1.3. Dinamik Benzerlik.....	44
2.1.2. Deneysel Çalışmada Kullanılan Modelin Özellikleri	45
2.1.3. Model karakteristik uzunluğunun belirlenmesi	45
2.1.4. Modelin ön bakış alanının belirlenmesi.....	45
2.1.5. Rüzgar Tüneli Testi	45
2.1.6. Akış Hızı Ölçme Sistemi	46
2.1.7. Basınç Ölçme Sistemi.....	47
2.1.8 Kuvvet Ölçme Sistemi.....	49
2.2. Matematiksel Modelleme	50
2.2.1 Akışkanlar Dinamiğiyle İlgili Genel Denklemler	50
2.2.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği	51
2.2.3. Türbülanslı Akışın Modellenmesi	53
2.2.3.1. Standart K- ϵ Türbülans Modeli	54
2.2.3.2. Realizable K- ϵ Türbülans Modeli.....	54
2.2.4. ANSYS Fluent Analizi	56
2.2.4.1. Geometri	56
2.2.4. 2. Domain	57

2.2.4.3. Ağ Yapısı (Mesh)	58
2.2.4.4. Sınır Şartları.....	58
2.2.4.5. Duvar Fonksiyonu	59
2.2.4.6. Fluent Çözümleyici	59
2.2.4.7. Ayrıklaştırma	60
2.2.4.8. Simülasyon	60
3. BULGULAR	61
3.1. Sürüklenme Kuvveti	61
3.2. Sürüklenme Katsayısı.....	62
3.3. Kaldırma Kuvveti	63
3.4. Kaldırma Katsayısı	64
3.5. Basınç Katsayısı	65
3.6. Simülasyon Sonuçları	67
4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	78
5. ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR.....	80
EKLER	83
ÖZGEÇMİŞ.....	93

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1. 1. Araçların aerodinamik direnç katsayısının tarihçesi.	7
Şekil 1. 2. Seyir halindeki bir taşıt üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetler.	8
Şekil 1. 3. Reynolds sayısının aerodinamik direnç katsayısına etkisi.	9
Şekil 1. 4. Sapma açısının aerodinamik direnç katsayısı üzerindeki etkisi.	10
Şekil 1. 5. Taşıt etrafında oluşan hortum şeklindeki girdaplar.	11
Şekil 1. 6. Düz plaka üzerine etki eden direnç kuvvetinin sadece duvar kayma gerilmesine bağlı olması durumu.	12
Şekil 1. 7. Akışa dik yerleştirilen düz plakaya etki eden direnç kuvvetinin sadece basınca bağlı olması durumu.	13
Şekil 1. 8. Yüzey üzerindeki basınç ve hız dağılımlarının sürüklemeye etkisi.	14
Şekil 1. 9. Kanatın kaldırma kuvveti etkisi altında olması durumu.	14
Şekil 1. 10. İki boyutlu bir cisim üzerine etki eden basınç kuvveti ve viskoz kuvvet ile bileşke, kaldırma ve direnç kuvvetleri.	15
Şekil 1. 11. Bazı araçların sürüklenme katsayıları.	16
Şekil 1. 12. Araç gövdesinin üstündeki ve altındaki basınç dağılımı.	17
Şekil 1. 13. Sınır tabakadaki hız değişimi.	21
Şekil 1. 14. Yüzey pürüzlülüğünün sınır tabaka üzerindeki etkisi.	22
Şekil 1. 15. Ventürinin hava hareketi üzerindeki etkisi.	22
Şekil 1. 16. Araç üzerindeki akım çizgili hava akışı.	23
Şekil 1. 17. Hareket eden bir aracın üst profilindeki bağıl hız ve basınç durumu.	24
Şekil 1. 18. Laminer ve türbülanslı hava akışı.	24
Şekil 1. 19. Laminer/türbülans sınır tabaka geçiş noktası.	25
Şekil 1. 20. Akış ayrılmasının hız ve basınç dağılımı üzerindeki etkisi.	26
Şekil 1. 21. Akış ayrılması ve birleşmesi.	27
Şekil 1. 22. Art izi bölgesi.	28
Şekil 1. 23. Aracın değişik bölgelerinde oluşan girdaplar.	28
Şekil 1. 24. Aerodinamik direncin taşıt performansı üzerindeki etkisi.	29
Şekil 1. 25. Aerodinamik direnç katsayısının yakıt tüketimi üzerindeki etkisi.	31
Şekil 1. 26. Burun geometrisinin sürüklenme katsayısı üzerindeki etkisi.	32
Şekil 1. 27. Ön gövde kaput kenar şeklinin sürüklenme katsayısı üzerindeki etkisi.	33

Şekil 1. 28. Kaput ve ön cam eğim acısının sürüklenme katsayısına etkisi	34
Şekil 1. 29. Tavan eğriliğinin sürüklenme üzerindeki etkisi	34
Şekil 1. 30. Yan panel eğriliğinin sürüklenme katsayısına etkisi.....	35
Şekil 1. 31. Arka yan panel sivrilmesinin sürüklenme katsayısına etkisi.....	35
Şekil 1. 32. Arka tarafın yukarı doğru sivriltilmesinin sürüklenme katsayısına etkisi.....	36
Şekil 1. 33. Arka uç kuyruk uzamasının sürüklenme katsayısına etkisi.....	37
Şekil 1. 34. Arka uç spoylerin kaldırma ve sürüklenme katsayıları üzerindeki etkisi.	38
Şekil 1. 35. Negatif kaldırma kanatlarının yarış arabasındaki yerleştirilme biçimleri	39
Şekil 2. 1. Bir rüzgâr tünelineki model tıra etkiyen sürüklenme kuvvetinin ölçümü.....	40
Şekil 2. 2. Açık devre rüzgar tüneli	42
Şekil 2. 3. Kapalı devre rüzgar tüneli	42
Şekil 2. 4. Prototip araba ile model araba arasındaki geometrik benzerlik	43
Şekil 2. 5. Prototip araba ile model araba arasındaki kinematik benzerlik	43
Şekil 2. 6. Prototip araba ile model araba arasındaki dinamik benzerlik	44
Şekil 2. 7. Rüzgar tünelinin şematik resmi.....	46
Şekil 2. 8. Akış hızı ölçme sistemi	47
Şekil 2. 9. HAD simülasyonunda kullanılan taşıt modelinin perspektif görünümü	57
Şekil 2. 10. HAD analizleri için kullanılan domaininin boyutları.....	57
Şekil 2. 11. Araba geometrisi için uygun ağ yapısı	58
Şekil 3. 1. Sürüklenme kuvvetinin tünel girişindeki hava hızına bağlı değişimi	61
Şekil 3. 2. Sürüklenme katsayısının Reynolds sayısına bağlı değişimi.....	62
Şekil 3. 3. Sürüklenme katsayısının yüksek Reynolds sayılarındaki değişimi.....	63
Şekil 3. 4. Kaldırma kuvvetinin tünel girişindeki hava hızına bağlı değişimi.....	64
Şekil 3. 5. Kaldırma katsayısının Reynolds sayısına bağlı değişimi	64
Şekil 3. 6. Kaldırma katsayısının yüksek Reynolds sayılarındaki değişimi.....	65
Şekil 3. 7. Model üzerindeki ölçme noktalarından elde edilen basınç katsayılarının tünel girişindeki hava hızına bağlı değişimi	66
Şekil 3. 8. Modelin orta düzlemi boyunca üst yüzeyindeki basınç dağılımı.....	67
Şekil 3. 9. $X=0$, simetri ekseni boyunca orijinal araç üzerinde oluşan hız konturları.....	68
Şekil 3. 10. $X=0$, simetri ekseni boyunca yeniden tasarlanan araç üzerinde oluşan hız konturları	68
Şekil 3. 11. $X=0$, simetri ekseni boyunca orijinal araç üzerinde oluşan basınç konturları .	69

Şekil 3. 12. $X=0$, simetri ekseni boyunca yeniden tasarlanan araç üzerinde oluşan basınç konturları	70
Şekil 3. 13. Orijinal aracın üst yüzeyleri boyunca meydana gelen statik basınç dağılımı ..	71
Şekil 3. 14. Yeniden tasarlanan aracın üst yüzeyleri boyunca meydana gelen statik basınç dağılımı	71
Şekil 3. 15. $X=0$, simetri ekseni boyunca orijinal araç üzerinde oluşan akım çizgileri	72
Şekil 3. 16. $X=0$, simetri ekseni boyunca yeniden tasarlanan araç üzerinde oluşan akım çizgileri	73
Şekil 3. 17. $X=0$, simetri ekseni boyunca orijinal araç üzerinde oluşan hız vektörleri	74
Şekil 3. 18. $X=0$, simetri ekseni boyunca orijinal aracın arka tarafında oluşan art izi bölgesi	74
Şekil 3. 19. $X=0$, simetri ekseni boyunca yeniden tasarlanan araç üzerinde oluşan hız vektörleri	75
Şekil 3. 20. $X=0$, simetri ekseni boyunca yeniden tasarlanan aracın arka tarafında oluşan art izi bölgesi	75
Şekil 3. 21. $X=0$, simetri ekseni boyunca orijinal aracın tüm gövdesinde oluşan basınç dağılımı	76
Şekil 3. 22. $X=0$, simetri ekseni boyunca yeniden tasarlanan aracın tüm gövdesinde oluşan basınç dağılımı	77

RESİMLER LİSTESİ

Sayfa No

Resim 2. 1. Elektronik fark basınç ölçer	48
Resim 2. 2. Basınç ölçümü için model üzerine açılan delikler.....	48
Resim 2. 3. Basınç ölçümü için hortumların modele bağlantısı	49
Resim 2. 4. İki eksenli yük hücresi ve amplifikatör	50

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 1. 1. Fiziksel büyüklükler	19
Çizelge 1. 2. Temel boyutlar	19
Çizelge 1. 3. C_d ' nin 0,45' ten 0,33' e düşürülmesinin yakıt tüketimine etkisi	30
Çizelge 2. 1. Model özellikleri	45
Çizelge 2. 2. Rüzgar tünelinin teknik özellikleri	46
Çizelge 2. 3. Elektronik fark basınç ölçerin teknik özellikleri	48
Çizelge 2. 4. Sınır şartları	59
Çizelge 3. 1. Simülasyon sonucu elde edilen sürüklenme ve kaldırma katsayısı değerleri ..	77

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
A	Ön bakış alanı (m^2)
$C_1, C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_2, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$	Türbülans model sabitleri
C	Ses hızı
C_D	Aerodinamik direnç katsayısı
C_L	Kaldırma katsayısı
C_P	Basınç katsayısı
C_S	Yanal kuvvet katsayısı
e_{xx}, e_{yy}, e_{zz}	Doğrusal şekil değiştirme hızları
e_{xy}, e_{yz}, e_{zx}	Kayma şekil değiştirme hızları
F_D	Toplam sürüklenme kuvveti (N)
F_L	Kaldırma kuvveti (N)
F_R	Bileşke kuvvet (N)
i, j	x ve y yönü indisleri
k	Türbülans kinetik enerjisi (m^2/s^2)
$k(t)$	Anlık kinetik enerji (m^2/s^2)
K	Ortalama kinetik enerji (m^2/s^2)
L	Karakteristik uzunluk (m)
M_a	Mach sayısı
p	Basınç (N/m^2)
P	Basınç indisi
P_d	Dinamik basınç (N/m^2)
P_{yerel}	Model üzerinde herhangi bir noktadaki basınç (N/m^2)
P_∞	Ortamdaki havanın basıncı (N/m^2)
P	Zaman ortalamalı basınç (N/m^2)
P_s	Statik basınç (N/m^2)
P_u	Atmosferik basınç (N/m^2)

P'	Basınç gradyanı
Re	Reynolds sayısı
S	Kaynak terimi
$\vec{u}$	Anlık hız vektörü (m/s)
u	Anlık hız vektörünün x yönündeki bileşeni (m/s)
V	Hız indisi
V_{yerel}	Model üzerinde herhangi bir noktadaki hız (m/s)
V_{∞}	Ortamdaki havanın hızı (m/s)
v	Anlık hız vektörünün y yönündeki bileşeni (m/s)
w	Anlık hız vektörünün z yönündeki bileşeni (m/s)
$\vec{u}'$	Çalkantı hız vektörü (m/s)
u'	Çalkantı hız vektörünün x bileşeni (m/s)
v'	Çalkantı hız vektörünün y bileşeni (m/s)
w'	Çalkantı hız vektörünün z bileşeni (m/s)
$\vec{U}$	Ortalama hız vektörü (m/s)
U	Ortalama hızın x bileşeni (m/s)
V	Ortalama hızın y bileşeni (m/s)
W	Ortalama hızın z bileşeni (m/s)
x, y, z	Kartezyen koordinat sistemi indisleri
t	Zaman (s)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
$\rho_{sıvı}$	Eğik manometredeki sıvının yoğunluğu (kg/m ³)
δ	Sınır tabaka kalınlığı (m)
μ	Dinamik viskozite (Pa.s)
μ_t	Türbülans viskozitesi (Pa.s)
ν	Kinematik viskozite (m ² /s ²)
$\sigma_K, \sigma_\epsilon$	Türbülans Prandtl sayıları
ϵ	Türbülans yitim hızı (m ² /s ³)

$\tau_{ij,türbülans}$

Özgöl Reynolds gerilme tensörü

$\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}$

Normal gerilmeler (N/m²)

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$

Kayma gerilmeleri (N/m²)

τ_w

Duvar kayma gerilmesi (N/m²)

Δh

Eğik manometredeki sıvı yüksekliği (m)

∇

Del (türev) operatörü

$\vec{\nabla}$

Kısmi türev operatörü

$\frac{D}{Dt}$

Toplam türev operatörü

Kısaltma

Açıklama

HAD

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

RANS

Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes

NEWF

Dengede Olmayan Duvar Fonksiyonu

EWT

Geliştirilmiş Duvar işlevi

ÖZET

Binek taşıtların aerodinamik etkinliğini modellemek için rüzgâr tünel testleri ve sayısal çalışmalardan yararlanılmaktadır. Sayısal ve deneysel çalışmalar sayesinde binek taşıtların aerodinamik etkinliklerinin arttırılmasına yönelik olarak taşıtların, dış gövde tasarımında iyileştirmeler yapılmaktadır. Böylece, taşıtların zararlı egzoz emisyonları azaltılmakta, yakıt ekonomileri, yol tutuşu ve manevra kabiliyetlerinde önemli artışlar sağlanmaktadır. Rüzgâr tünel testleri sayısal çalışmalarla karşılaştırıldığı zaman çok zaman alıcı ve maliyetlidir. Bu yüzden, son yıllarda bilgisayar teknolojisindeki hızlı ilerlemelere paralel olarak sayısal çalışmalara olan ilgi sürekli artmaktadır.

Bu çalışmada, taşıt aerodinamiğiyle ilgili kapsamlı literatür araştırması yapılmış, taşıt etrafındaki hava akışı nedeniyle taşıt üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetler ile bu aerodinamik kuvvetleri oluşturan temel parametreler incelenmiştir. Daha sonra, günümüzde kullanılan bir taşıt modelinin aerodinamik etkinliğiyle ilgili temel parametrelerini tespit etmek için sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Her iki çalışmadan elde edilen verilerden yararlanarak ilgili taşıt modelinin aerodinamik etkinliğini arttırmak için dış tasarımına yönelik iyileştirme çalışması yapılmıştır. Bunun için, taşıtın bagaj bölmesinin alt tarafına açılan bir difüzör kanalı sayesinde taşıtın sürüklenme katsayısının % 2 azaldığı ve yol tutuşunun önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, 1:24 ölçekli Audi A4 taşıt modeli ile yapılan sayısal ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların birbiriyle uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Sayısal çalışmalar için kullanılan taşıt modelinin boyutları 1:1 ölçeğe kadar büyütülerek aerodinamik direnç katsayısının Reynolds sayısı bağımsızlığı sağlanmıştır. Ancak, deneysel çalışmalar için kullanılan taşıt modelinin çok küçük olması ve rüzgar tüneli setinde maksimum giriş hızına çıkılamamasından dolayı aerodinamik direnç katsayısının Reynolds sayısı bağımsızlığı sağlanamamıştır.

Anahtar Kelimeler; Taşıt Aerodinamiği, Yakıt Tüketimi, K- ϵ Türbülans Modeli

SUMMARY

Modelling of a Passenger Vehicle's Aerodynamics Efficiency

For modeling the aerodynamic efficiency of passenger vehicles has been benefited from wind tunnel tests and numerical studies. In order to increase aerodynamics efficiency of passenger vehicles by numerical and experimental studies, improvements in their exterior body design has been made. In this way, harmful exhaust emissions of vehicles is reduced, provided significant increases in their fuel economies, road holding and maneuverability. When compared with the numerical studies, wind tunnel tests are very time consuming and cost. Accordingly, interest in the numerical studies in parallel with the rapid advances in computer technology in recent years has been increased steadily.

In this study, comprehensive literature research regarding vehicle aerodynamics was made, aerodynamics forces occurring over a vehicle because of airflow around it and basic parameters creating this aerodynamics forces were examined. Later, experimental and numerical studies were carried out in order to determine basic parameters regarding aerodynamics efficiency of a vehicle model used at the present time. Based on the data obtained from both studies, an improvement work for its exterior design to increase aerodynamics efficiency of related vehicle model was made. In this way, by a diffuser channel opened to lower side of vehicle's boot compartment, decreasing its drag coefficient % 2 and increasing its road holding significantly was determined.

Consequently, it was determined that results obtained from experimental and numerical studies made for 1:24 scaled Audi A4 vehicle model are in agreement with each other. Reynolds number independence of drag coefficient was provided by having enlarged sizes of vehicle model up to 1:1 scale for numerical study. However, Reynolds number independence of drag coefficient couldn't be provided since vehicle model used for experimental studies was too small and maximum inlet velocity for the wind tunnel set couldn't be reached

Key Words; Vehicle Aerodynamics, Fuel Consumption, K- ϵ Turbulence Model

1. GİRİŞ

Taşıt aerodinamiği, taşıt etrafındaki hava akışı, taşıtın alt gövdesiyle yol arasındaki etkileşimi ve karmaşık geometrili taşıt gövdelerini kapsamasının yanında taşıtların hem sürüş kararlılıklarını hem de yakıt tüketimlerini önemli ölçüde etkilediği için, son derece önemli bir konudur. Taşıtların yakıt ekonomisi, özellikle yüksek seyir hızlarında etkili olan aerodinamik direnç kuvvetinin azaltılmasıyla belirgin bir şekilde arttırılabilir [17].

Taşıt aerodinamiğiyle ilgili esas gelişmeler 1980'li yılların başında meydana gelmiş ve günümüzde düşük aerodinamik dirençli taşıtların kullanımı yaygın şekilde devam etmiştir [21]. Düşük aerodinamik dirençli taşıtların geliştirilmesi geçmişteki deneyimlere bağlı kalarak günümüzde teknolojinin hızla gelişmesi sayesinde daha hızlı olmaktadır [16].

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 ortaya çıkan yer etkisi taşıtın hareketine karşı koyan aerodinamik direnç kuvveti üzerinde çok az bir etkiye sahip olmasına karşın, taşıtın yol tutuşunu etkileyen kaldırma kuvveti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [20].

Bir taşıtın aerodinamik açıdan tasarımı yapılırken taşıt etrafındaki hava akışının taşıtın cam ve lamba yüzeyleri üzerinde su ve kir birikintileri oluşturduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Buna ilaveden, 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 [21].

Taşıtlar üzerinde etkili olan aerodinamik kuvvetlerin deneysel ve sayısal metotlarla incelenmesi geçmişten günümüze kadar üzerinde durulan önemli konulardan birisi olmuştur. Seyir halinde olan taşıta etki eden aerodinamik kuvvetler taşıtların yakıt tüketimi, egzoz emisyon değerleri, ilave motor gücü, yol tutuş özellikleri, değişen yol şartlarında yol dengesini sağlama gibi temel parametrelerini etkilemesi bakımından önemlidir. Taşıt aerodinamiği üzerinde yapılan çalışmalarda deneysel yöntemlerin uzun zaman alması ve maliyetli olması, ölçüm cihazlarının pahalı olması ve taşıtın tüm dış yüzeylerinde ölçümlerin zor yapılması nedeniyle sayısal hesaplama yöntemleri günümüzde daha avantajlı duruma gelmiştir [16].

Bir taşıt etrafındaki hava akışının yapısı, yüksek derecede karmaşık, üç boyutlu ve zamana bağlı olduğu için taşıt etrafındaki akışın bilgisayarda tam olarak modellenmesi mümkün değildir. Son yıllarda, bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişmeler ve ilerlemeler, akışkanlar mekaniğinde analitik çözümleri mümkün olmayan birçok problemin yaklaşık çözümünü gerçekleştirmek için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) adıyla anılan yeni bir çalışma alanının ortaya çıkmasına neden olmuştur. HAD çalışmalarında, bilgisayar yardımıyla akış simülasyonu yapılacak olan alan ve bu alanda meydana gelen etkileşimler detaylı olarak incelenebilmektedir. Daha önce yapılan araştırmalarda, HAD kodları kullanılarak elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla çok iyi derecede uyum içerisinde olduğu görülmüştür. HAD kodları genellikle ticari paket programlarıyla kullanılmaktadır. Bu kodlarla iki veya üç boyutlu çözümler yapılabilmesinin yanında çözümlerden elde edilen sonuçlar grafik ve animasyonlarla gösterilebilmektedir. HAD ile taşıt etrafındaki hava akışının incelenmesi sayesinde taşıtın dış gövdesi üzerinde etkili olan hız, basınç, aerodinamik kuvvet ve moment analizleri yapılarak taşıtın imalatı yapılmadan önce dış tasarımı hakkında önemli bilgiler elde edilebilir [16].

Günümüzde taşıtlar genellikle gövde tiplerine göre tasarlandıktan sonra taşıtların aerodinamik direnç katsayılarının azaltılması ve diğer aerodinamik iyileştirmelerine yönelik gerekli düzeltmeler aerodinamikle ilgilenen tasarımcılar tarafından yapılmaktadır. Yine de, tasarımcılar düşük aerodinamik direnç katsayılı taşıtların daha çekici olduğunun farkında oldukları için prensip olarak taşıt gövde şekillerinin akım çizgili olmasına dikkat etmektedirler [18].

Damjonovic vd., bir HAD paket programı kullanarak bir binek araç modelinin etrafındaki hava akışını incelemişlerdir. Bu çalışma için Standart K- ϵ türbülans modelini tercih ederek iki ve üç boyutlu akış modellemesi yapmışlardır. Orijinal araç modeli etrafındaki hava akışını inceledikten sonra, model aracın ön camıyla tavanı arasındaki açığı değiştirmişler ve bunun yanında model aracın arka tarafına kanat ilave etmişlerdir. Daha sonra iki farklı araç modeli için elde edilen analiz sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak dış tasarımı değiştirilmiş araç modelinin arka tarafındaki türbülansın yüksek seyir hızlarında azaldığını, kaldırma kuvveti katsayısının olumlu yönde etkilendiğini ve sürüş kararlılığının arttığını tespit etmişlerdir. Bunun yanında, model aracın arka tarafına ilave edilen kanadın çift gözlü olması sayesinde düşük seyir hızlarında aracın arka tarafında oluşan akış ayrılmasını engelleyebildiğini fakat yüksek seyir hızlarında aerodinamik direnç kuvvetini arttırdığını tespit etmişlerdir [1].

Barbut ve Negrus, bir HAD paket programı kullanarak sedan tip bir model aracın alt tarafının geometrisini değiştirerek aerodinamik direnç katsayısını düşürmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla model aracın alt tarafında farklı eğimlere sahip geometriler oluşturmuşlar ve bu sayede aracın aerodinamik direnç katsayısının % 12,7' ye kadar azaltılabileceğini tespit etmişlerdir [2].

Ahmad vd., bir HAD paket programı kullanarak, bir binek aracın aerodinamik direnç katsayısını doğru bir şekilde hesaplamak için uygun bir ağ yapısı stratejisi kullanmışlar ve analiz için bilgisayar hafızasını daha az kullanarak analiz süresini azaltmayı amaçlamışlardır. Bu amaçla, model araç için 1:3, 1:4, 1:5 ölçekli olarak üç farklı ölçeklendirme yapmışlardır. En küçük ölçeklendirme sayesinde analiz süresi ile analiz için kullanılan bilgisayar hafızasının azaltılabileceğini ve sürüklenme kuvveti katsayısının deneysel veriye dayalı olarak %0,83 hata ile bulunabileceğini tespit etmişlerdir [3].

Desai vd., 1:15 ölçekli bir model araç etrafındaki akışı incelemek için sayısal ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Sayısal çalışmalar için bir HAD paket programı, deneysel çalışmalar için 300 x 300 x 1000 mm kesit bölgesi ölçülerine sahip bir rüzgâr tüneli kullanmışlardır. Sayısal çalışmalar için Standart K- ϵ türbülans modelini tercih etmişlerdir. Aerodinamik direnç katsayısı değerini deneysel çalışmayla 0,4, sayısal çalışmayla ise 0,55 olarak belirlemişlerdir. Sayısal çalışmadan elde edilen değerin yüksek

olmasını, analiz için kullanılan bilgisayarın yüksek hızlı işlemciye sahip olmadığı için çalışmada kullanılan model araç tasarımının basitleştirilmesinden kaynaklandığını ifade etmişlerdir [4].

Tabacu vd., bir HAD paket programı kullanarak sedan ve wagon tip arabalar etrafındaki hava akışını incelemek için bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma için Standart K- ϵ türbülans modelini tercih etmişlerdir. Sonuç olarak wagon tip arabanın arka tarafındaki oluşan akışın, sedan tip araca göre daha türbülanslı olduğunu tespit etmişlerdir. Aynı zamanda, elde edilen analiz sonuçlarına bağlı olarak aerodinamik direnç katsayısının gerçek değerine göre % 12,5 hata ile bulunabileceğini belirtmişlerdir [5].

Chainani ve Perera, bir HAD paket programı kullanarak, farklı dış tasarıma sahip bir model yarış arabası etrafındaki hava akışını incelemişlerdir. Dış tasarım yönünden daha iyi akım çizgili bir tasarım yapıldığında, model yarış arabasının kaldırma ve sürüklenme kuvveti katsayılarında önemli bir değişme olacağını ispat etmişlerdir. Sonuç olarak, daha iyi akım çizgili dış tasarım sayesinde model yarış arabasının aerodinamik direnç katsayısının % 40,49 oranında azaltılabileceğini tespit etmişlerdir [6].

Khalig vd., kamu yararına kullanılabilecek sportif bir araba modeli etrafındaki hava akışını analiz etmek için Batık Sınır (IB) tekniğine dayalı olan Kartezyen Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) yazılımını kullanmışlardır. Kullanılan yöntemin doğruluğunu test etmek için is tarama metodu, yüzey üzerindeki basınç dağılımı ve aerodinamik direnç katsayısının ölçümlerini kapsayan deneyler yapmışlardır. Sayısal çalışmadan elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışma sonuçlarının % 5 hata ile uyum içerisinde olduğu sonucuna varmışlardır [7].

Prasad vd., bir HAD paket programı kullanarak Tata Nano marka bir model araç etrafındaki hava akışını incelemişlerdir. Model arabanın dış tasarımına yönelik olarak dört farklı değişiklik yapmışlardır. Farklı tasarımlar sayesinde aerodinamik direnç katsayısının 0,392'den 0,336'ya düşürülebileceğini ve bu sayede bir depo yakıt için 2,14 litre tasarruf sağlanabileceğini belirtmişlerdir [8].

İslam ve Mamun, bir HAD paket programı kullanarak 1:15 ölçekli bir model araç etrafındaki hava akışını incelemişlerdir. Bu çalışmada Standart K- ϵ türbülans modelini

tercih etmişlerdir. Sayısal çalışmadan elde ettikleri sonuçları deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırmışlar ve sonuçların birbiriyle çok iyi derecede uyum içerisinde olduğunu tespit etmişlerdir [9].

Kieffer vd., bir HAD paket programı kullanarak bir Mazda yarış arabası modeli etrafındaki hava akışını değişik tasarım şekilleri için incelemişlerdir. Model araba için tasarım değişikliği parametresi olarak yer etkisinde olan ön kanat ile model arabanın arka tarafındaki kanatın farklı hücum açılarında aerodinamik direnç ve kaldırma katsayılarını nasıl etkilediğini grafiksel ve görsel olarak incelemişlerdir. Ön ve arka kanat performansının farklı hücum açılarında yer etkisinden etkilendiğini ve bu nedenle model araç üzerinde büyük bir negatif kaldırma kuvvetinin oluştuğunu tespit etmişlerdir [10].

Helgason ve Hafsteinsson, bir HAD paket programı kullanarak 1:1 ölçekli farklı dış tasarımlara sahip araçlar için sürüklenme ve kaldırma kuvveti katsayılarını bulmak için K- ϵ ve LES türbülans modellerini seçmişlerdir. Her iki türbülans modellemesi ile yakınsamış çözüm elde etmelerine rağmen, sonuçların yüksek derecede akışı modellemek için seçilen türbülans modeline bağlı olduğunu tespit etmişlerdir [11].

Bordei ve Popescu, referans model olarak seçtikleri Ahmed Body modeli etrafındaki akış özelliklerini incelemek için bir HAD paket programı olan Fluent Fluid Flow, CFX, Open Foam ve Power Flow gibi programları kullanmışlardır. Bu programlardan hangisinin en kısa sürede ve en doğru şekilde aerodinamik direnç, kaldırma katsayılarını hesapladığını ve en iyi aerodinamik etkinliği sağladığını tespit etmek için bir çalışma yapmışlardır. Fluent paket programı içerisinde yer alan Spalart-Allmaras türbülans modeli seçildiği zaman Ahmed Body modeli için aerodinamik direnç kuvvetini, Geçiş Kayma Gerilmesi Taşıma Türbülans modelinin (T-SST) kaldırma kuvvetini en doğru şekilde hesapladığını ve en iyi aerodinamik etkinlik sağladığını, Power Flow paket programının en iyi giriş sınır şartı şeffaflığına sahip olduğunu ve maliyet oranı bakımından en iyi kalitenin Open Foam paket programına ait olduğunu tespit etmişlerdir [12].

Selenbaş, bir HAD paket programı kullanarak ağır vasıta bir model etrafındaki hava akışını incelemiştir. Bu çalışma için Realizable K- ϵ türbülans modelini seçmiştir. Sayısal çalışma sonuçlarının doğruluğunu test etmek için 1:15 ölçekli ağır vasıta modelini rüzgar

tüneline yerleştirerek deneyler yapmıştır. Aerodinamik direnç katsayısının hesaplanması yönünden sayısal çalışma ile deneysel çalışma sonucu arasında % 10'luk bir hata olduğunu tespit etmiştir. Bu hatayı ortadan kaldırmak için akış modelleme parametreleri üzerinde düzeltmeler yapılması gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca, ağır vasıta modeli üzerinde yer alan bazı aksesuarlarda yapmış olduğu geometrik iyileştirmeler sayesinde aerodinamik direnç katsayısının azaltılabileceğini tespit etmiştir [13].

Sarı, bir hafif ticari aracın ön formuna etkiyen hava direncinin etkisini azaltmak için bir HAD paket programı kullanarak sayısal çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmada Spalart-Allmaras türbülans modelini tercih etmiştir. Tasarım parametreleri olarak model aracın ön kaput açısı ile ön cam açısını değiştirmiş ve bu açı değişimlerini optimum düzeyde tutarak 100 km/h hızla giden bir araçtan elde edilen yakıt tasarrufunun, aracın en kötü ön form durumuna göre % 15'e karşılık geldiğini tespit etmiştir [14].

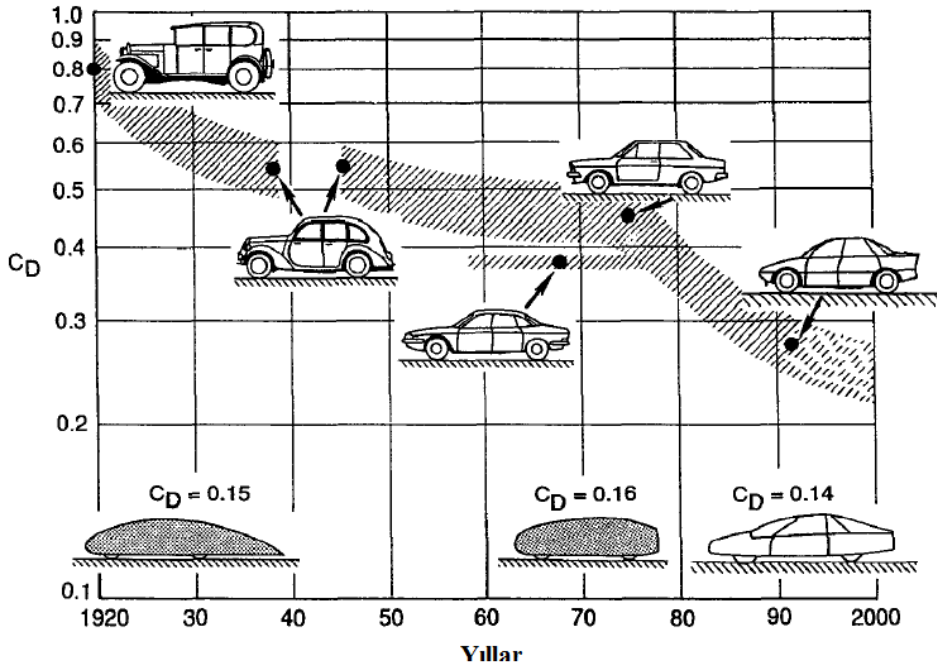
İnce, bir pikap taşıtın aerodinamik etkinliğiyle ilgili olan aerodinamik direnç katsayısını belirlemek için 1:4 ölçekli pikap taşıt modeli kullanarak deneysel ve sayısal çalışmalar yapmıştır. Sayısal çalışma için Fluent paket programı kullanmış, K- ϵ (Standart, Realizable, RNG), Reynolds gerilme modeli (RSM) ve K-W (Standart, SST) türbülans modellerini tercih etmiştir. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde ettiği sonuçlara göre, taşıt modeli üzerine etki eden en yüksek basıncın ön burun kısmında, en düşük basıncın ise ön cam ile tavanın birleştiği kısımda olduğunu gözlemlemiştir [15].

Bu çalışmada ise günümüzde kullanılan bir taşıt modeli etrafında oluşan hava akışı deneysel ve sayısal yöntemler kullanılarak incelenmiş, taşıt modelinin aerodinamik direnç katsayısı, kaldırma katsayısı ve taşıt modeli üzerindeki basınç dağılımı belirlenmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarla sayısal çalışmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen verilerin, Reynolds sayısından bağımsızlığını sağlamak için çalışmada kullanılan taşıt modelinin boyutları büyütülmüştür. Ayrıca, çalışma için kullanılan taşıt modeli için aerodinamik direnç katsayısı ve kaldırma katsayısının azaltılmasına yönelik bir iyileştirme çalışması yapılmıştır. Deneysel çalışma için maksimum hava giriş hızı 27 m/s olan bir rüzgar tüneli, sayısal çalışma için ANSYS Fluent 14.5 paket programı kullanılmıştır.

1.1. Taşıt Aerodinamiğinin Tarihçesi

100 yıl öncesine kadar, içten yanmalı motorlar yük taşımak için kullanılan atların yerini aldığı zaman taşıt aerodinamiğiyle ilgili kimsenin bir şey bilmediği anlaşılmaktadır. O zamanlarda, yük taşımak için kullanılan araçlara dış gövde ilave edilmesinin nedeni önceden olduğu gibi sürücü ve yolcuları rüzgârdan, yağmurdan ve çamurdan korumak olduğu söylenmektedir. Bu tip araçların dış gövde tasarımını aerodinamik açıdan değerlendirme fikri, aradan uzun yıllar geçtikten sonra hava araçları teknolojisinde önemli derecede ilerleme olduğunda gündeme gelmiştir. Hem uçaklar hem de diğer hava araçları için aerodinamik direnç kuvvetinin önemli derecede azaltılması için geliştirilen akım çizgili gövde tasarımları sayesinde motordan elde edilen güçle daha yüksek seyir hızlarına çıkılabilmektedir. [16].

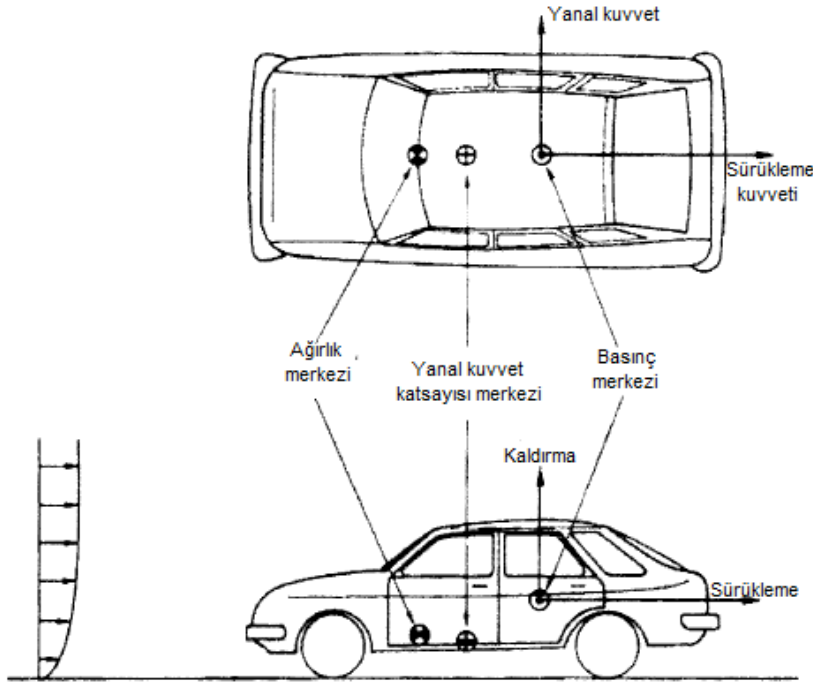
Taşıtların dış gövde şekilleri yıllar geçtikçe devrimsel bir tarzdan ziyade evrimsel bir tarzda değişmiş olduğu şekil 1.1’ de görülmektedir. 1970’li yıllarda ortaya çıkan petrol krizi, yakıt ekonomisini önemli ölçüde arttırmak için üretici firmalar üzerinde büyük baskı oluşturmuş ve bu sayede taşıt aerodinamiği için yeni bir çağ açılmıştır. O yıllardan beri taşıtların yakıt tüketimiyle doğrudan ilişkili olan aerodinamik direnç katsayısı çarpıcı derecede düşüşe geçirilmiştir [16].



Şekil 1. 1. Araçların aerodinamik direnç katsayısının tarihçesi [16].

1.2. Aerodinamiğin Önemi

Düz bir yolda hareket eden bir taşıt düşünüldüğünde, taşıt etrafındaki hava akışının taşıtı ne yönde etkilediği taşıtın hızına ve ortamdaki rüzgâra bağlıdır. Rüzgâr, yerel bölge anatomisi ve yeryüzü sınır tabakasından dolayı üniform olmayan bir hız profiline sahiptir ve genelde rüzgâr hızının büyüklüğünde ve yönünde değişme olur. Taşıt üzerinde etkili olan aerodinamik kuvvetler ve momentler taşıtın basınç merkezine etki eder. Taşıtın ağırlık merkezi ile basınç merkezi aynı yerde değildir, ancak basınç merkezinin yeri hava akışına bağlıdır. Basınç merkezi yüksek hızlarda öne doğru hareket etme eğilimi gösterir. Düz bir yolda seyir halinde olan bir araç üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetler şekil 1.2’ de gösterildiği gibi olmaktadır [17].



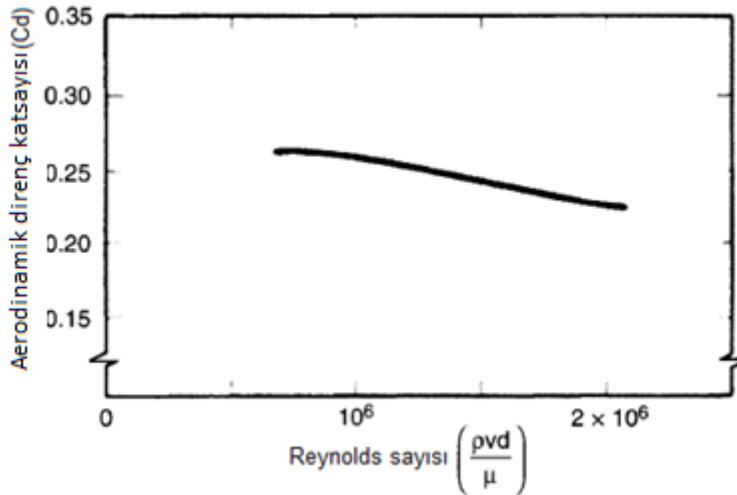
Şekil 1. 2. Seyir halindeki bir taşıt üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetler [17].

Şekil 1.2’ de yanal kuvvet katsayısı merkezi de gösterilmiştir. Tüm seyir hızlarında kararlı sürüş için yanal kuvvet katsayısı merkezi ağırlık merkezinin arkasında olmalıdır. 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 değişir. Basınç merkezi, yanal kuvvet katsayısı merkezinin arkasında olursa taşıtın sürüş kararlılığı iyi olur. Basınç merkezi ağırlık merkezinin önünde olursa taşıtın sürüş kararlılığı bozulur 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 azaltılabilir [17].

Taşıt ve hava hızı eş doğrusal olmadığı için taşıtı yana doğru yönlendirmeye çalışan yanal kuvvet oluşur. Taşıtın üstü ve altında simetrik olmayan bir hava akışı söz konusu olduğu için taşıtı yukarıya doğru kaldırmaya çalışan kaldırma kuvveti oluşur ve bu kuvvet taşıtın yer ile etkileşiminden çok güçlü bir şekilde etkilenir [17].

Taşıtların aerodinamik direnç katsayıları karşılaştırılırken hız ve alanın iyi bir şekilde tanımlanıp tanımlanmadığına dikkat edilmelidir. 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 daha önceden yapılan deneysel çalışmalarla tespit edilmiştir. Şekil 1.3’ te Reynolds sayısı 2×10^6 ’nın üzerinde olduğu zaman aerodinamik direnç katsayısının Reynolds sayısından bağımsız hale geldiği görülmektedir [17].

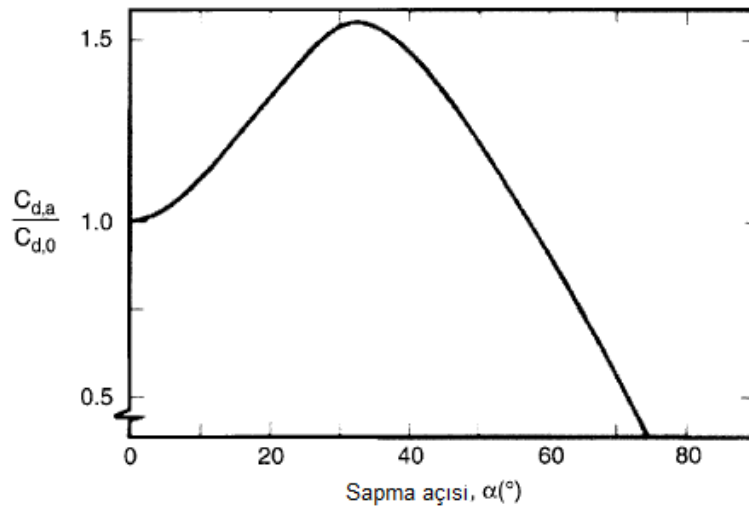


Şekil 1. 3. Reynolds sayısının aerodinamik direnç katsayısına etkisi [17].

Aerodinamik direnç katsayısı, taşıtın değişik bölgelerinde yer alan elemanların soğutulması için gerekli olan hava akışı, özellikle taşıtın yan camlarının açık olması, taşıtın alt gövdesi ile zemin arasındaki etkileşim (yer etkisi) ve aracın üst tarafına bagaj koymak için herhangi bir şey ilave edilmesi gibi durumlardan etkilenir. Araç üzerindeki bagaj kısmı

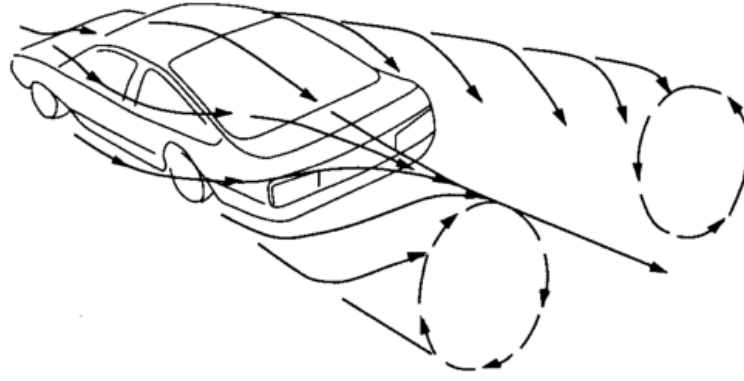
boşken sürüklenme kuvveti % 10' a kadar, bagaj kısmında bisiklet varken % 40'a kadar artabileceği daha önce yapılmış çalışmalarla tespit edilmiştir [17]

Aerodinamik direnç katsayısını etkileyen bir başka faktör taşıtın sürüş kararlılığı üzerindeki etkisi önemli olan sapma açısıdır. Şekil 1.4' te tipik bir taşıt için sapma açısının sürüklenme katsayısı üzerindeki etkisi görülmektedir. Taşıtın yan tarafından olan akış ayrılması nedeniyle sıfır olmayan sapma açısında sürüklenme katsayısı artar. Sapma açısı taşıtın hareketi yönünde olmayan bir rüzgârdan kaynaklandığı için aerodinamik direnç katsayısının saptmaya karşı duyarlılığı çok önemlidir [17].



Şekil 1. 4. Sapma açısının aerodinamik direnç katsayısı üzerindeki etkisi [17].

Taşıtın tavanı üzerinden akan havanın hızı alt tarafına 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 meydana gelen basınç farkı, şekil 1.5' te görüldüğü gibi taşıtın yan tarafları boyunca hortum şeklinde girdaplar ve taşıtı yukarıya doğru itmeye çalışan bir kaldırma kuvvetinin oluşmasına neden olur. Kaldırma ve sürüklenme arasında yüksek derecede 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 [17].



Şekil 1. 5. Taşıt etrafında oluşan hortum şeklindeki girdaplar [21].

Yarış arabalarında kaldırma kuvvetinin azaltılması büyük önem arz etmektedir. Sürüklenme kuvvetinin artmasına neden olmasına rağmen negatif yönlü kaldırma istenir. Sürüklenme kuvvetinin artmasından dolayı yarış arabasının ulaşabileceği maksimum hızın azalmasına rağmen daha yüksek bir negatif yönlü kaldırma kuvvetiyle sayesinde daha yüksek viraj alma hızlarına ulaşılır. 270 km/h hızda seyreden yarış arabasında taşıt ağırlığının üç katı kadar negatif yönlü bir kaldırma kuvveti oluşur. Negatif yönlü kaldırma kuvveti ters çevrilmiş bir kanat ve arabanın her iki yanındaki gövde altındaki yayıcı şeklindeki geometri sayesinde oluşturulan düşük basınç bölgesi tarafından ortaya çıkar. Yanlardan gelen havanın içe doğru akışını azaltmak için esnek etekler kullanılabilir ya da bunların kullanımı yasaksa alt gövdenin yere çok yakın olması gereklidir. Yaygın olarak kullanılan taşıtlarda olduğu gibi taşıtın arka tarafındaki gövde altında ‘beslemeli’ düşük basınç bölgesi sayesinde negatif yönlü kaldırma kuvveti oluşturulur. Bu düşük basınç bölgesi sürüklenme kuvvetinin kaynaklarından biri olduğu için negatif yönlü kaldırma kuvveti sürüklenme kuvvetinin artmasına karşın daha da arttırılabilir [17].

1.3. Aerodinamik Kuvvetler

Aerodinamikle ilgili yapılan araştırmalar ilk zamanlarda direnç kuvvetinin azaltılması üzerinde yapılıyordu, fakat aradan kısa bir süre geçtikten sonra kaldırma ve yanal kuvvetlerinin aracın yol kararlılığı bakımından büyük önem taşıdığı anlaşılmıştır. 1980’li yıllarda düşük aerodinamik direnç katsayısına sahip olan araçların yandan esen rüzgâr koşullarında sürüldüğü zaman yol kararlılıklarında önemli derecede azalma olduğu görülmüştür. Günümüzde otomotiv tasarımcıları yan rüzgâr etkilerini her zaman dikkate

almışlardır. Ancak, binek araçlar etrafındaki hava akışıyla ilgili önemli ölçüde karmaşık ve genellikle süreksiz olan akışlarını ise göz ardı etmiştir [18].

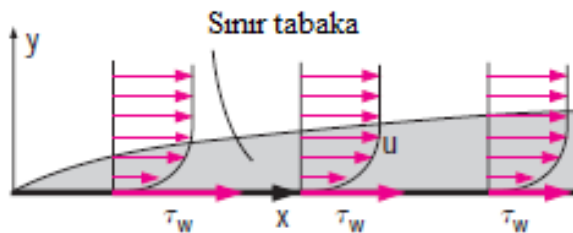
Kuvvetlerin birbirine dik olan üç eksen boyunca taşıta etki ettiği düşünülebilir. Bu kuvvetler, aracın öne doğru hareketine karşı koyan aerodinamik direnç kuvveti, aracın yukarı ya da aşağıya doğru yönlenmesine neden olan kaldırma kuvveti ve sadece yandan esen rüzgâr durumunda araç üzerinde meydana gelen yanal kuvvet olarak üç kısma ayrılmıştır [18].

1.3.1. Aerodinamik Direnç (Sürüklenme) Kuvveti

Bir akışkan bir cisim üzerine değişik yönlerde kuvvet ve moment uygulayabilir. Akan akışkanın cisme akış yönünde uyguladığı kuvvete direnç denir. Direnç, tıpkı sürtünme gibi çoğunlukla arzu edilmeyen bir etkidir ve bunu en aza indirebilmek için gayret edilir. Direncin kara, deniz ve hava araçlarında azaltılması; sert rüzgârlara maruz kalan yapıların güvenliğinin artırılması ve dayanıklılığın, gürültünün ve titreşimin azaltılması ile yakından ilgilidir. Direnç kuvvetinin oluşmasına neden olan iki farklı etken söz konusudur [19].

1.3.1.1. Yüzey Sürtünme Direnci

Doğrudan çeper kayma gerilmesi τ_w ’ den kaynaklanan direnç kısmına, sürtünme etkilerinden dolayı meydana geldiği için sürtünme direnci denir. Sürtünme direnci, şekil 1.6’ da görüldüğü gibi çeper kayma kuvvetinin akış yönündeki bileşenidir. Bu nedenle cismin yerleştirilme biçimine ve ayrıca çeper kayma gerilmesi olan τ_w ’nin büyüklüğüne bağlıdır. Akışa dik yüzey için sürtünme direnci sıfırdır, akışa paralel düz yüzey için ise maksimumdur, çünkü bu durumda sürtünme direnci yüzeydeki toplam kayma kuvvetine eşittir [19]

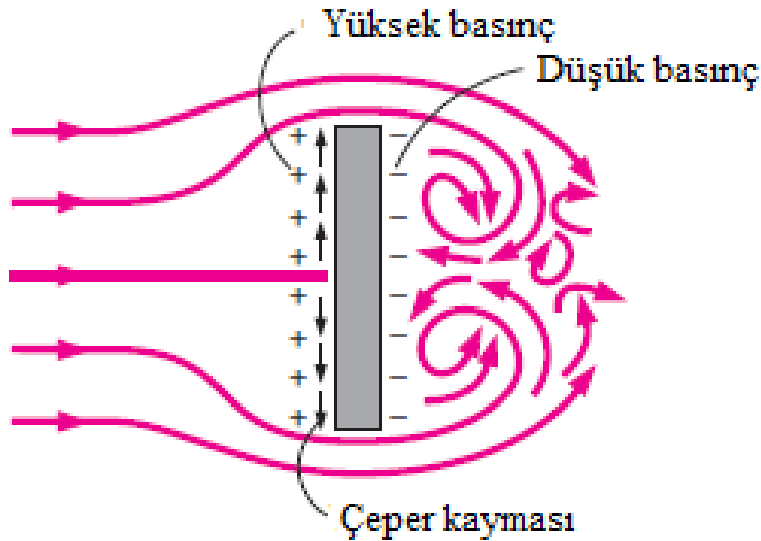


Şekil 1. 6. Düz plaka üzerine etki eden direnç kuvvetinin sadece duvar kayma gerilmesine bağlı olması durumu [19].

Havanın katı bir yüzey üzerinden aktığı zaman 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 bağlıdır.

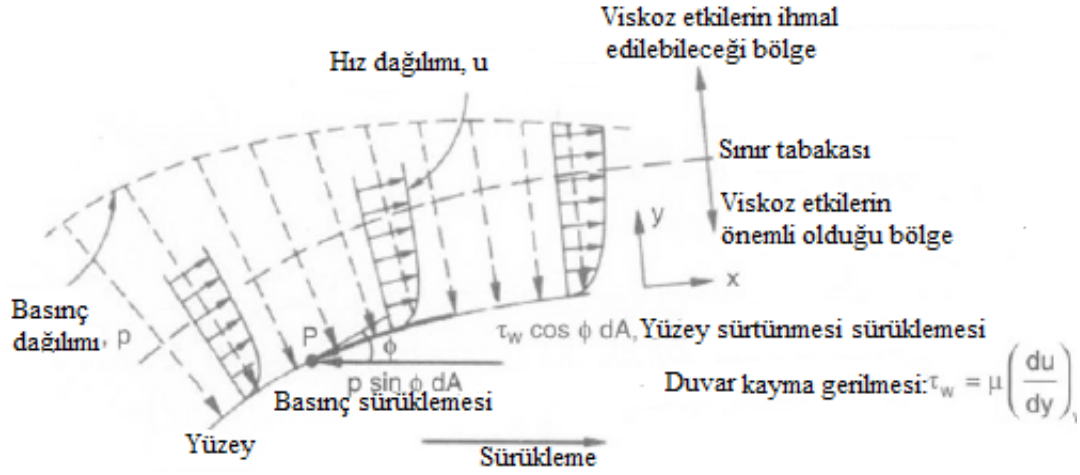
1.3.1.2. Basınç Direnci

Ön bakış alanı ve akışkan içerisine dalmış cismin önü ve arkasına etki eden basınçlar arasındaki farkla doğru orantılıdır. Bu yüzden basınç direnci çoğunlukla körlenmiş cisimlerde baskındır. Öte yandan kanatlar gibi akım çizgili cisimlerde ihmal edilebilir ve akışa paralel ince düz plakalarda sıfırdır. Akışkanın cismin eğriliğini takip edebileceği şekilde akışkan hızı çok yüksek olduğunda basınç direnci çok önemli olur ve bu sayede cismin bir noktasında akışkan cisimden ayrılarak cismin arkasında şekil 1.7’ de görüldüğü gibi çok düşük bir basınç bölgesi oluşturur. Bu durumda basınç direnci cismin ön ve arka tarafları arasındaki basınç farkının büyük olmasından kaynaklanır [19].



Şekil 1. 7. Akışa dik yerleştirilen düz plakaya etki eden direnç kuvvetinin sadece basınca bağlı olması durumu [19].

Şekil 1.8’ de görüldüğü gibi, hava eğri şeklindeki bir yüzey üzerinden sabit hızla aktığı zaman, yüzey üzerine etki eden toplam sürükleme kuvveti, yüzey sürtünme kuvveti ve basınç kuvveti olmak üzere iki bileşenden oluşur [17].



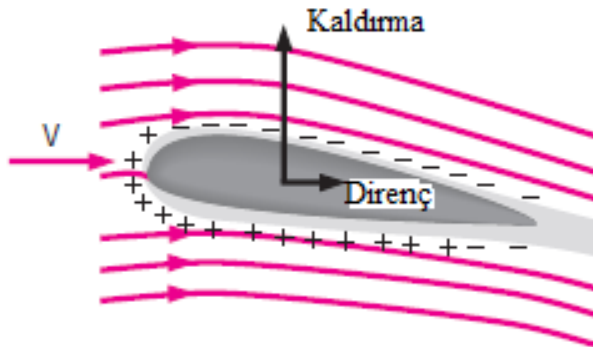
Şekil 1. 8. Yüzey üzerindeki basınç ve hız dağılımlarının sürüklemeye etkisi [17].

$$F_D = F_{Sürtünme} + F_{Basınç} = \int \tau_w \cos \phi dA + \int P \sin \phi dA \quad (1.1)$$

Burada, F_D , toplam sürüklemeye kuvvetini, $F_{Sürtünme}$, yüzeydeki viskoz etkilerin neden olduğu yüzey sürtünme kuvvetini, $F_{Basınç}$, yüzey üzerindeki basınç farklılıklarının neden olduğu basınç kuvvetini temsil etmektedir.

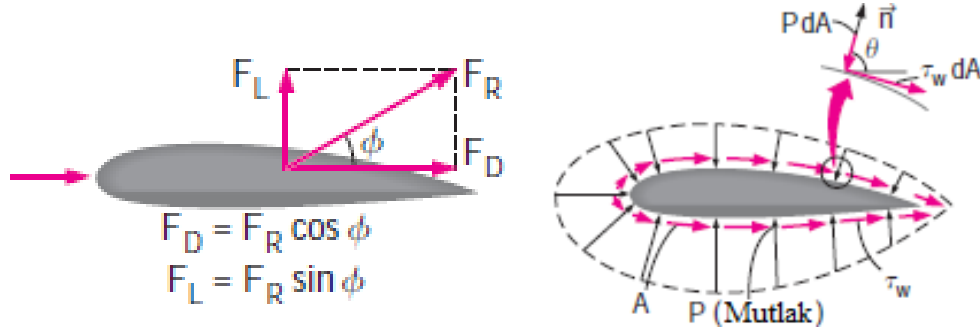
1.3.2. Kaldırma Kuvveti

Durgun haldeki bir akışkan içerisinde daldırılmış cisme, sadece dik yönde basınç kuvvetleri uygular. Hareketli akışkan ise viskoz etkilerin yol açtığı kaymama koşulundan dolayı yüzey üzerine teğetsel kayma kuvvetleri de uygular. Basınç ve çeper kayma kuvvetlerinin akışa dik yöndeki bileşenleri, cismi aynı yönde hareket etmeye zorlar ve bunların toplamına kaldırma kuvveti denir [19].



Şekil 1. 9. Kanatın kaldırma kuvveti etkisi altında olması durumu [19].

İki boyutlu akışlarda basınç ve kayma kuvvetlerinin bileşkesi şekil 1.10’da görüldüğü gibi iki bileşene ayrılabilir. Bunlardan biri akış yönünde oluşan direnç kuvveti, diğeri ise akışa dik yönde olan kaldırma kuvvetidir [19].



Şekil 1. 10. İki boyutlu bir cisim üzerine etki eden basınç kuvveti ve viskoz kuvvet ile bileşke, kaldırma ve direnç kuvvetleri [19].

Direnç kuvveti;

$$F_D = \int (-P \cdot \cos \theta + \tau_w \cdot \sin \theta) \cdot dA \quad (1.2)$$

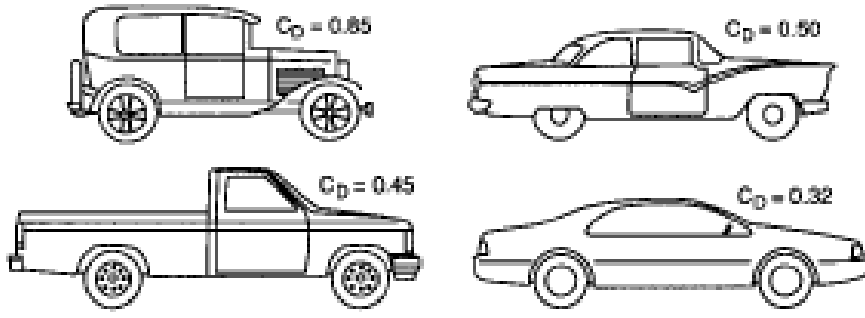
Kaldırma kuvveti;

$$F_L = - \int (P \cdot \sin \theta + \tau_w \cdot \cos \theta) \cdot dA \quad (1.3)$$

1.4. Boyutsal Parametreler

1.4.1. Aerodinamik Direnç (Sürüklenme) Katsayısı

Aracın öne doğru hareketine karşı koyan direnç kuvvetinin azaltılması amacıyla aracın gövde şeklini akım çizgili hale getirerek aerodinamik etkinliğini belirlemek için kullanılan boyutsuz sayıya sürüklenme katsayısı denir. Şekil 1.11’ de görüldüğü gibi düşük bir sürüklenme katsayısı aracın gövde şeklinin güçlü yönde akım çizgili olduğunu ve minimum hava direnciyle birlikte çevredeki viskoz hava içerisinde rahat bir şekilde hareket edebileceğini gösterir. Daha yüksek bir sürüklenme katsayısı ise aracın gövde şeklinin zayıf yönde akım çizgili olduğunu ve araç hareket ettiğinde daha yüksek bir direnç kuvvetiyle karşılaşacağını gösterir [20].



Şekil 1. 11. Bazı araçların sürüklenme katsayıları [21].

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (1.4)$$

Burada F_D , sürüklenme kuvvetini, A aracın ön bakış alanını, ρ , akışkan yoğunluğunu, C_D sürüklenme katsayısını ve V ise taşıt hızını temsil etmektedir.

1.4.2. Kaldırma Katsayısı

Viskoz hava içerisinde hareket eden bir aracın gövdesinin altı ile üstünde oluşan basınçtaki farklılığın ölçümünü veren katsayıya kaldırma katsayısı denir. Araç gövdesinin şekline bağlı olarak araç üzerinde aşağı ya da yukarı yönlü bir itme kuvveti oluşur. Pozitif olarak bilinen yukarı yönlü kaldırma, aracın tekerleklerinin yer ile temasını keseceği için araç için istenmeyen bir durumdur. Negatif yönlü kaldırma, aracın tekerleklerinin yere tutunmasını sağladığı için istenen bir durumdur [20].

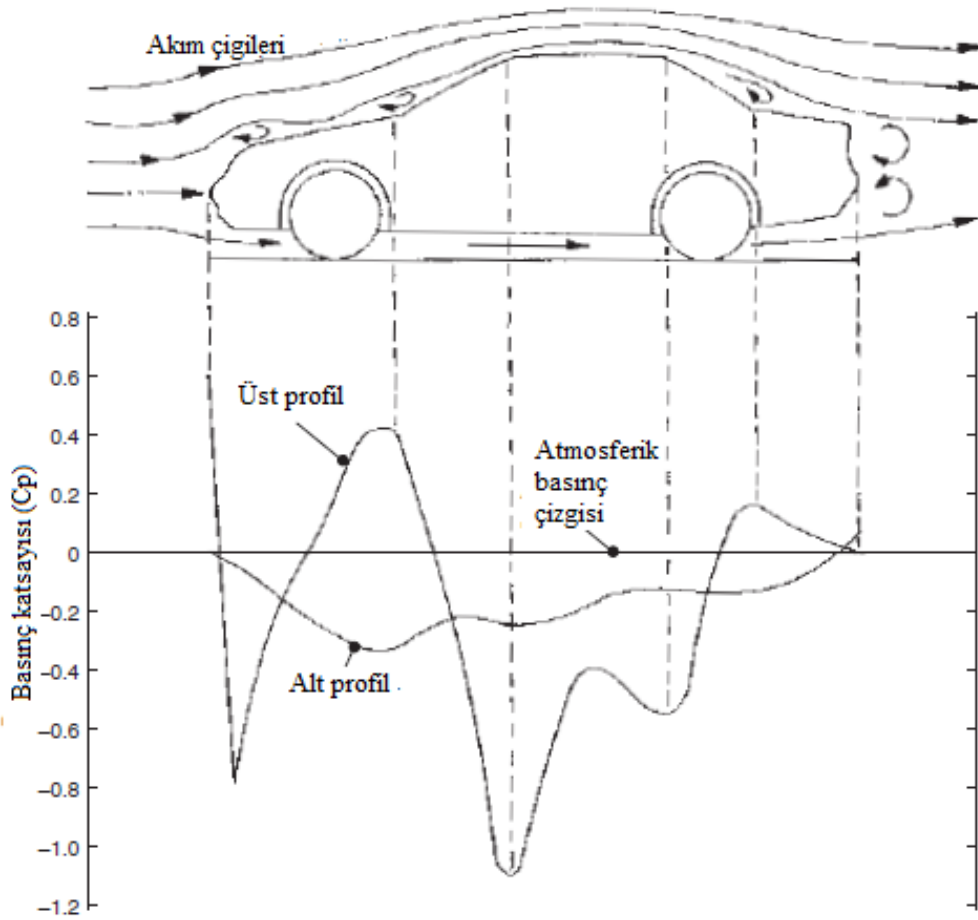
$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (1.5)$$

Burada F_L , kaldırma kuvvetini, A aracın ön bakış alanını, ρ , akışkan yoğunluğunu, C_L kaldırma katsayısını ve V ise taşıt hızını temsil etmektedir.

1.4.3. Basınç Katsayısı

Aracın gövdesinin üzerindeki ve altındaki basınç dağılımı grafikte gösterilebilir. Bu grafik sadece tipik basınç dağılımı eğrilerini gösterir. Şekil 1.12’ de görüldüğü gibi, kaputun arka yarısı ile ön camın orta bölgesine kadar olan kısımdaki basınç katsayısı pozitifken, arka camın orta kısmı ile bagaj bölmesinin arka ucu arasında kalan bölgede ise

daha düşük bir değerle pozitiftir. Diğer taraftan kaputun ön yarı bölgesi ile özellikle ön camın tavan hücum kenarı ve hava akım hızının en yüksek olduğu yatay tavan bölmesi üzerindeki basınç katsayısı değeri negatiftir. Araç gövdesi altındaki hava hareketi göz önüne alındığı zaman kısıtlanmış hava akışı havanın hareketini hızlandırma eğilimi gösterir. Dolayısıyla aracın tüm alt tarafındaki basınç katsayısı değeri hafif derecede negatif olur. Gerçek şartlar altında aracın gövdesinin üstü ve altındaki basınç dağılımı aracın gövde profil biçimi, hızı ile rüzgarın yönü ve şiddetinden önemli derecede etkilenir [20].



Şekil 1. 12. Araç gövdesinin üstündeki ve altındaki basınç dağılımı [20].

Bernolli eşitliği, taşıt gövdesi üzerindeki herhangi bir yerdeki ve ortamdaki havanın özelliklerine göre yazılırsa;

$$P_{yerel} + \left(\frac{1}{2} \rho V_{yerel}^2 \right) = P_{\infty} + \left(\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 \right) \quad (1.6)$$

(1.6) eşitliğinin sağ tarafına P_{yere} yazılırsa;

$$\left(\frac{1}{2}\rho V_{yere}^2\right) = P_{\infty} - P_{yere} + \left(\frac{1}{2}\rho V_{\infty}^2\right) \quad (1.7)$$

(1.7) eşitliğinin her iki tarafı, $\left(\frac{1}{2}\rho V_{giris}^2\right)$ terimi ile bölünürse;

$$\frac{P_{\infty} - P_{yere}}{\left(\frac{1}{2}\rho V_{\infty}^2\right)} + 1 = \frac{\left(\frac{1}{2}\rho V_{yere}^2\right)}{\left(\frac{1}{2}\rho V_{\infty}^2\right)} \quad (1.8)$$

$$C_P = \frac{P_{yere} - P_{\infty}}{\left(\frac{1}{2}\rho V_{\infty}^2\right)} \quad (1.9)$$

Basınç katsayısı terimi (1. 9) eşitliği tekrar düzenlenerek yazılırsa;

$$C_P = 1 - \frac{V_{yere}^2}{V_{\infty}^2} \quad (1.10)$$

1.4.4. Buckingham Pi Teoremi

Bir fiziksel bağıntıda her terim aynı boyutta olmalıdır. Fiziksel bir bağıntı (n-k) adet boyutsuz Π çarpanı ile tanımlanabilir [19].

n; Fiziksel bağıntıdaki büyüklük sayısı

k; Temel boyut sayısı (k=3; Kütle, Uzunluk, Zaman)

$$\Pi_1 = f_1 (P_1, P_2, \dots, P_K, P_{K+1})$$

$$\Pi_2 = f_2 (P_1, P_2, \dots, P_K, P_{K+2})$$

.....

$$\Pi_{N-K} = f_N (P_1, P_2, \dots, P_K, P_N)$$

Pi teoreminin aerodinamik kuvvetleri bulmak için uygulaması şu şekilde yapılabilir.

Verilmiş bir geometri için bağıntı;

$$f(F, \rho, V, L, \mu, C) = 0$$

Çizelge 1. 1. Fiziksel büyüklükler

Fiziksel büyüklükler (n=6)	Semboller	Birimler
Kuvvet	F	MLT^{-2}
Yoğunluk	P	ML^{-3}
Uzunluk	L	L
Hız	V	LT^{-1}
Ses hızı	C	LT^{-1}
Viskozite	μ	$ML^{-1}T^{-1}$

Çizelge 1. 2. Temel boyutlar

Temel boyutlar (k=3)	Birim
Kütle	M
Uzunluk	L
Zaman	T

Π çarpanı sayısı, $n - k = 6 - 3 = 3$

Buckingham Pi Teoremi; $f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3) = 0$

Buckingham Pi Teoremi; $f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3) = 0$

Π Çarpanları;

$$\Pi_1 = f_1(\rho, V, L, F)$$

$$\Pi_2 = f_2(\rho, V, L, \mu)$$

$$\Pi_3 = f_2(\rho, V, L, C)$$

Π_1 için boyut analizi;

$$\Pi_1 = (\rho)^a \cdot (V)^b \cdot (L)^c \cdot F$$

$$[0] = [ML^{-3}]^a \cdot [LT^{-1}]^b \cdot [L]^c \cdot [MLT^{-2}]$$

$$[M] \text{ Kütle boyutu için, } 0 = a + 1 \rightarrow a = -1$$

$$[L] \text{ Uzunluk boyutu için, } 0 = -3a + b + c + 1 \rightarrow c = -2$$

$$[T] \text{ Zaman boyutu için, } 0 = -b - 2 \rightarrow b = -2$$

$$\Pi_1 = (\rho)^{-1} \cdot (V)^{-2} \cdot (L)^{-2} \cdot F$$

$$\Pi_1 = \frac{F}{\rho V^2 L^2} \quad (1.11)$$

Bu ifadeye en çok benzeyen boyutsuz parametreler sürüklenme katsayısı (C_D), kaldırma katsayısı (C_L)'dir. Burada L^2 yerine araç karakteristik alanı olan A ifadesini koymakta ve $\frac{1}{2}$ gibi bir katsayı ile çarpmakta bir sakınca yoktur. Bu duruma göre C_D , C_L katsayılarını şu şekilde yazabiliriz;

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (1.12)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (1.13)$$

Π_2 için boyut analizi;

$$\Pi_2 = \rho \cdot (V)^a \cdot (L)^b \cdot (\mu)^c$$

$$[0] = [ML^{-3}] \cdot [LT^{-1}]^a \cdot [L]^b \cdot [ML^{-1}T^{-1}]^c$$

$$[M] \text{ Kütle boyutu için } 0 = 1 + c \rightarrow c = -1$$

$$[L] \text{ Uzunluk boyutu için } 0 = -3 + a + b - c \rightarrow b = 1$$

$$[T] \text{ Zaman boyutu için } 0 = -a - c \rightarrow a = 1$$

$$\Pi_2 = \rho \cdot (V)^1 \cdot (L)^1 \cdot (\mu)^{-1}$$

$$\Pi_2 = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} = Re \quad (1.14)$$

Π_3 için boyut analizi;

$$\Pi_3 = (\rho)^a \cdot V \cdot (L)^b \cdot (C)^c$$

$$[0] = [ML^{-3}]^a \cdot [LT^{-1}] \cdot [L]^b \cdot [LT^{-1}]^c$$

$$[M] \text{ Kütle boyutu için } 0 = a \rightarrow a = 0$$

$$[L] \text{ Uzunluk boyutu için } 0 = -3a + 1 + b + c \rightarrow b = 0$$

$$[T] \text{ Zaman boyutu için } 0 = -1 - c \rightarrow c = -1$$

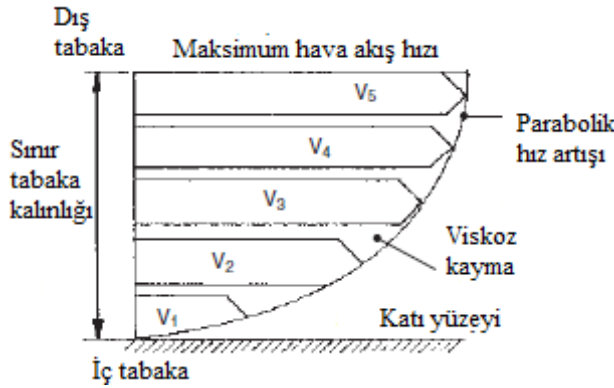
$$\Pi_3 = (\rho)^0 \cdot V \cdot (L)^0 \cdot (C)^{-1}$$

$$\Pi_3 = \frac{V}{C} = Ma \quad (1.15)$$

1.5. Viskoz Hava Akışı

1.5.1. Sınır Tabaka

Bağıl hava hareketi olduğu zaman havanın birbirine komşu tabakaları arasında bir iç sürtünme meydana gelir ve bu durum havanın viskoziteye sahip olduğunu gösterir. Sonuç olarak, birbirine komşu olan hava tabakaları arasında kayma olduğunda bir enerji açığa çıkar. Hava, katı bir yüzey üzerinde aktığı zaman temel hava akımı ile yüzey arasında ince bir sınır tabaka olur. Katının yüzeyi ve temel hava akımı akışı arasındaki herhangi bir bağıl hareket, daha sonra havanın birbirine komşu olan tabakalarının kayması süreci sayesinde bu sınır tabaka içerisinde meydana gelir. Hava, herhangi bir katı yüzey üzerinde aktığı zaman yüzeye birlikte birbiriyle temas halinde olan hava parçacıkları gevşek şekilde birbirlerine tutunurlar. O yüzden, yüzeydeki bağıl hız sıfır olur. Yüzeye yapışan hava filmine komşu olan hava tabakalarının hızı çok yavaşlarken, önündeki komşu tabaka önceden hareket eden bir tabaka üzerinden kayar. O yüzden, havanın bağıl hızı biraz daha artar. Şekil 1.13’ te görüldüğü gibi hava tabakaları arasındaki bağıl hız, maksimum akış hızına ulaşıncaya kadar yüzeyden uzaklaştıkça parabolik olarak artar [20].



Şekil 1. 13. Sınır tabakadaki hız değişimi [20].

1.5.2. Yüzey Düzgünlüğü

Bir katı yüzeyle temas halinde olan hava parçacıkları yüzeye çekilmeye çalışır. Bu nedenle, viskoz sürtünme direnci yüzeye yakın olan yerde hareket eden hava tabakasının hızını kesmeye çalışır. Ancak, sınır tabakasındaki hava hızında içten dışa doğru parabolik bir şekilde artış olur. Sınır tabakası kalınlığı yüzey cilasından etkilenir. Şekil 1.14’ te

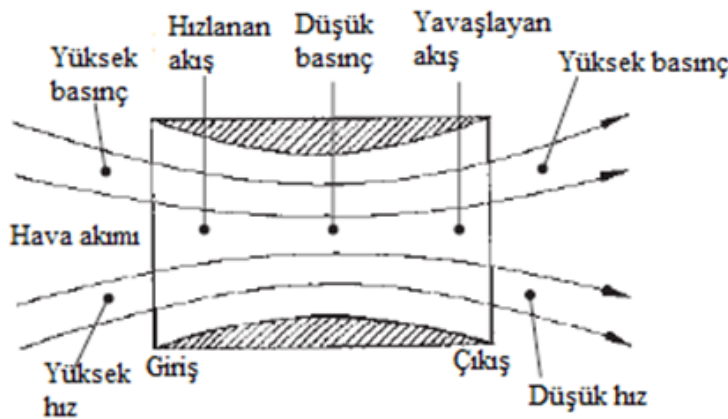
görüldüğü gibi pürüzlü bir yüzey üzerinden akış olması durumunda yüzeyden uzağa doğru gidildikçe hava akış hızı maksimum değerine doğru parabolik bir şekilde artarken, pürüzsüz bir yüzeyde ise hava akış hızı yüzeye daha yakın bir yerde maksimum değerine ulaşır. Dolayısıyla, pürüzlü bir yüzeyde daha kalın sınır tabakası oluşacağı için pürüzsüz yüzeye göre daha fazla direnç kuvveti oluşur [20].



Şekil 1.14. Yüzey pürüzlülüğünün sınır tabaka üzerindeki etkisi [20].

1.5.3. Ventüri Etkisi

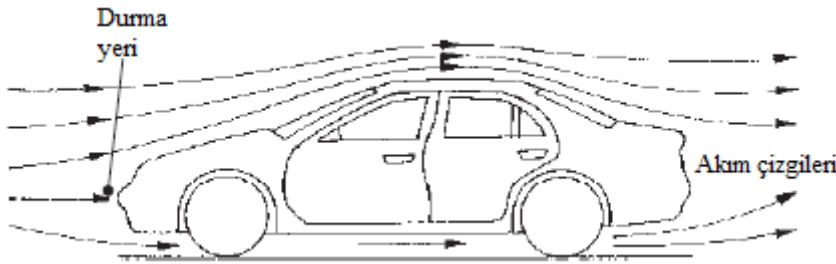
Hava, şekil 1.15’ te görüldüğü gibi yankınsak ve ıraksak kesite sahip olan bir ventürinin içinden geçtiği zaman basıncı ve hızı değişir. Başlangıçta, ventürinin giriş kesitinde atmosfer koşullarında olan havanın basıncı maksimum iken hızı minimumdur. Hava ventürinin yakınsayan kesiti içerisine doğru hareket ettiği zaman kesitten geçen havanın hacimsel debisinin korunması için hava molekülleri hızlanır. Ventürinin en dar kesitinden gelişigüzel şekilde geçen hava moleküllerinin basıncı düşer ve hızı artar. Ventürinin çıkış kesitine doğru ilerlerken hava moleküllerinin basıncında artış ve hareketinde yavaşlama olur [20].



Şekil 1.15. Ventürinin hava hareketi üzerindeki etkisi [20].

1.5.4. Hava Akım Çizgileri

Hava içerisinde hareket eden bir araç önündeki havayı ileri doğru sürüklemeye çalışacağı için hava aracın yanlarına ve arkasına doğru akmaya zorlanır. Araç üzerindeki hava hareketinin yörüngesi iki boyutlu (yan tarafa doğru akış yokmuş gibi) akım çizgileriyle görselleştirilebilir. Bu akım çizgileri şekil 1.16' da görüldüğü gibi aracın gövdesinin dış hatlarını bariz bir şekilde takip eder. Ancak aracın gövdesinde herhangi bir değişiklik yapılırsa akım çizgileri hareketsiz hava boşluğu bölgesine doğru yayılarak yön değiştirmeye zorlanır. Gövdeden daha uzakta kalan akım çizgileri ise dışarı doğru gitme eğilimi gösterir [20].

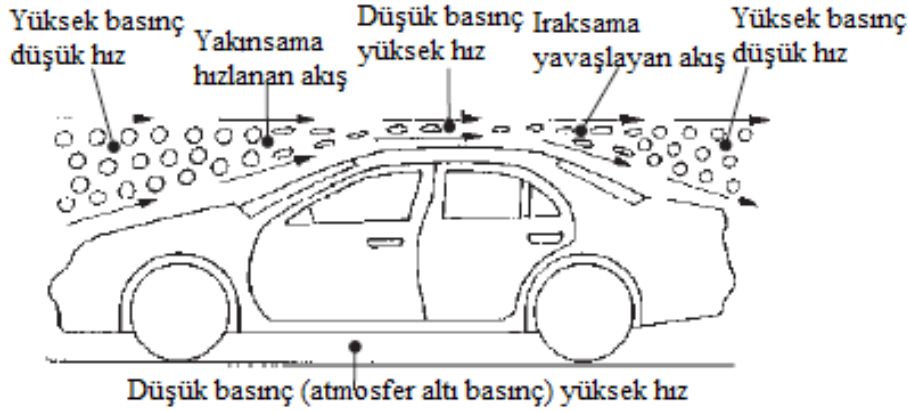


Şekil 1. 16. Araç üzerindeki akım çizgili hava akışı [20].

1.5.5. Bağlı Hız ve Basınc

Bir araç hareket halinde olduğu zaman yol yüzeyine bağlı olarak oluşan yatay dış akım çizgileri ile araç gövdesinin üst profili arasında ortaya çıkan boşluğun şekil 1.17' de görüldüğü gibi bir ventüri etkisi oluşturduğu düşünülebilir. Burada, hava sabitken arabanın hareketli olduğu durum söz konusudur. Hâlbuki rüzgar tüneli testleri bu durumun tersi şeklinde yapılır. Yani tünel içerisine sağa sola dönme yapabilecek şekilde yerleştirilen bir araba üzerinden hava akımı geçirilir. Yatay hava akım çizgileri ile ön uç kaput, ön cam profili, arka cam ve bagaj profili arasındaki hava boşluğu sırasıyla ıraksayan ve yakınsayan bir hava kaması boşluğu oluşturur. Bu nedenle ön kama boşluğu içerisine dolan havanın basıncı atmosfer basıncında, hızı ise hareket eden taşıt hızına eşit olarak kabul edilir. Hava yakınsayan kama boşluğu içerisine hareket ettiği zaman hacimsel yer değiştirme oranını korumak için hızlanmak zorundadır. Tavan üzeri, ventürinin en dar bölgesidir. O yüzden buradan geçen havanın hızında artış, basıncında ise düşme olur ve hava molekülleri dışarı doğru daha fazla yayılır. Son olarak bagaj tarafındaki bağlı hava hareketi araç hızına kadar yavaşlar, buradaki havanın basıncı ise atmosfer basıncına kadar tekrar artar. Bu nedenle biçimi bozulan hava moleküllerinin rastgele biçimde olan bağlantıları daha kararlı duruma

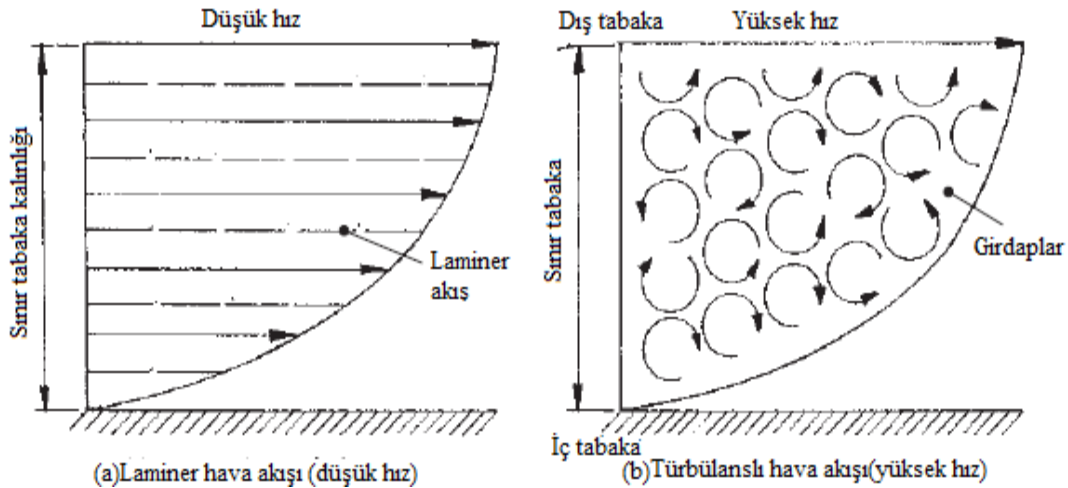
gelineye kadar bir arada daha yakın hareket etme imkânı bulurlar. Hava ıraksayan bir kama boşluğu içerisinde doğru (tavandan dışa doğru) hareket ettiği zaman genişleyen akış boşluğuyla baş etmek için yavaşlar [20].



Şekil 1. 17. Hareket eden bir aracın üst profilindeki bağıl hız ve basınç durumu [20].

1.5.6. Laminer, Türbülanslı Sınır Tabaka

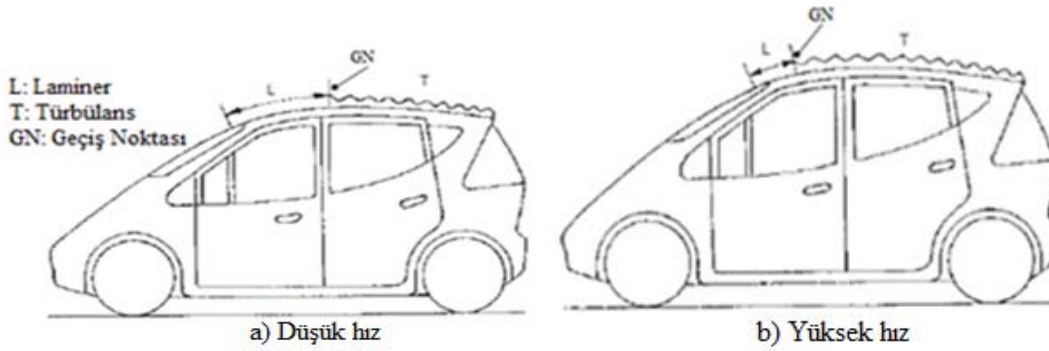
Hava akış hızı düşük olduğu zaman sınır tabaka içerisinde kalan hava tabakaları çok az bir sürtünmeyle farklı hızlarda birbirleri üzerinde kayabilir. Bu tür üniform akışa laminer akış denir. Hava akış hızı laminer akış durumuna göre çok daha yüksek olduğu zaman sınır tabaka içerisinde kalan her bir alt tabakanın hareketlerinin genel yönünden farklı olarak rastgele bir biçimde yönlendirmeye zorlayan iç tabaka sürtünmesinde bir artış olana kadar alt tabakaların bağıl kayma hızı artar. Daha sonra, alt tabakalar Şekil 1.18’ de görüldüğü gibi girdaplar şeklinde dönerek hareket eder. Bu tür üniform olmayan akışa türbülanslı akış denir [20].



Şekil 1. 18. Laminer ve türbülanslı hava akışı [20].

1.5.7. Laminer – Türbülanslı Sınır Tabaka Geçiş Noktası

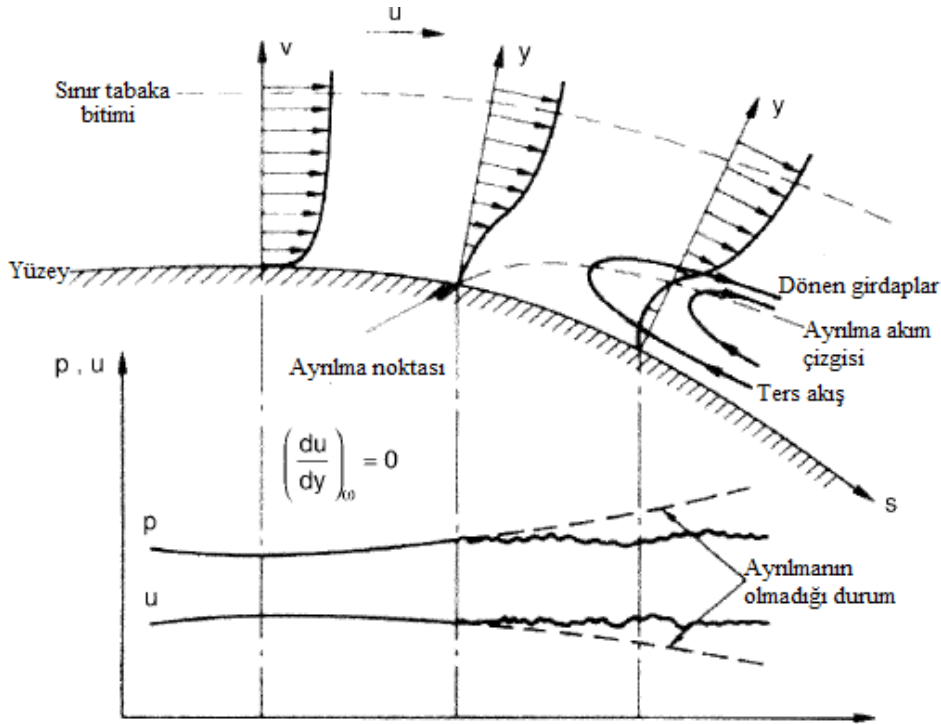
Bir aracın tavanı gibi bir gövdenin ön yüzeyi üzerindeki sınır tabaka şekil 1.19’ da görüldüğü gibi genellikle laminer olur. Ancak, aracın arka tarafına doğru gidildikçe sınır tabakasının laminierden türbülansa geçtiği bir noktaya ulaşılır. Bu nokta geçiş noktası olarak adlandırılmıştır. Aracın hızı arttığı zaman geçiş noktası öne doğru yaklaşma eğilimi gösterir. Bundan dolayı sınır tabakasının bir kısmı laminier, diğer kısmı ise türbülanslı olur. Böyle bir durum daha yüksek seviyeli bir yüzey sürtünmesine yol açar [20].



Şekil 1. 19. Laminer/türbülans sınır tabaka geçiş noktası [20].

1.5.8. Akış Ayrılması

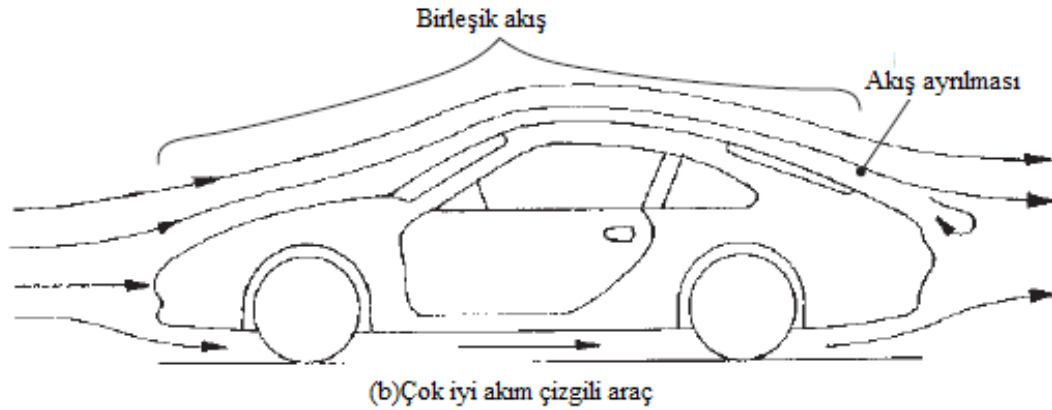
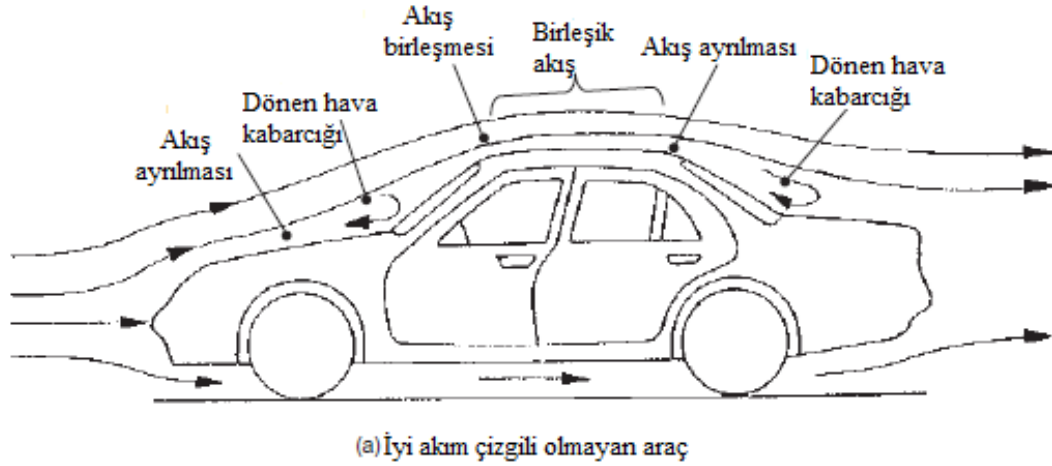
Basıncın akış yönünde pozitif olarak hızlı bir şekilde arttığı yüzey üzerinde akış ayrılması meydana gelir. Şekil 1.20’ de görüldüğü gibi pozitif yönlü bir basınç artışı yüzey üzerindeki akış yönünü tersine çevirmeye meyillidir ve bu etki akışkan momentumunun en küçük olduğu sınır tabaka tabanında çok büyük öneme sahiptir. Yüzey cıdarının uzağında hız artışı veya azalması olmadığı için ters akış meydana gelir. Akış ayrılması, basıncın daha da artmasını önler ve basınç direnci üzerinde olumsuz bir durum yaratır. Yüzeye yakın yerdeki ters akış, yüzey direncini düzgün bir şekilde azaltır. Akış ayrılmasının daha sonra yeniden birleşmeyle sonuçlanması sonraki yüzey geometrisine bağlıdır. Ters akış, viskoz etki yüzünden ana hava akımından enerji harcanmasına yol açarak büyük düzensiz girdaplar oluşturur [20].



Şekil 1. 20. Akış ayrılmasının hız ve basınç dağılımı üzerindeki etkisi [20]

Bir aracın üzerinden geçen havanın akım çizgileri, aracın dış gövdesinde ani bir değişme olmaz ise şekil 1.21' de görüldüğü gibi araç gövdesinin dış hattını takip ederek oluşur. Araçların kaputu genellikle ön cama doğru yukarı yönlü hafif eğimlidir. Kaputun bitiminden itibaren başlayan ön cam yatay durumda olan üst tavana kadar yukarı yönlü eğimlidir. Üst tavan bitiminden itibaren başlayan arka cam bagaj bölmesinin başlangıcına kadar eğimlidir. Bagaj bölmesi ise aracın arka ucuna kadar hafif eğimlidir. Araç üzerinden akan havanın hızı ve basıncı sırasıyla ön camın üst tarafında en yüksek ve en düşük değerlere ulaşır. Üst tavanın devamı olarak arka camın aracın arka uç kısmına kadar eğimli yapılması durumunda havanın hızında ve basıncında sırasıyla azalma ve artış olur. Eğer aracın arka tarafına doğru hareket eden havanın basıncındaki artış çok kademeli olursa hava akımının türbülanslı sınır tabakalarıyla sonradan karışması nispeten sürekli olur. O yüzden en dıştaki tabakalar ana hava akımıyla birlikte çizilir. Diğer taraftan, eğer arka cam, bagaj bölmesinin başlangıcına kadar eğimli yapılırsa üst tavanın bitiminden itibaren basınç artışı daha fazla olur. Böylece ana hava akımının sınır tabakalarıyla birlikte karışması mümkün olmaz ve hareket eden içteki tabakalar yüzeye tutunamaz. Bu durumda ana hava akımı araç gövdesinin dış hat yüzeyinden ayrılır. Bu olaya akış ayrılması denir. Yeniden birleşmeyle sonuçlanan akış ayrılmasına bir örnek olarak kaput ve ön cam üzerinden akan havanın akışı verilebilir. Eğer kaput ve ön cam arasındaki eğiklik çok büyük olursa akım

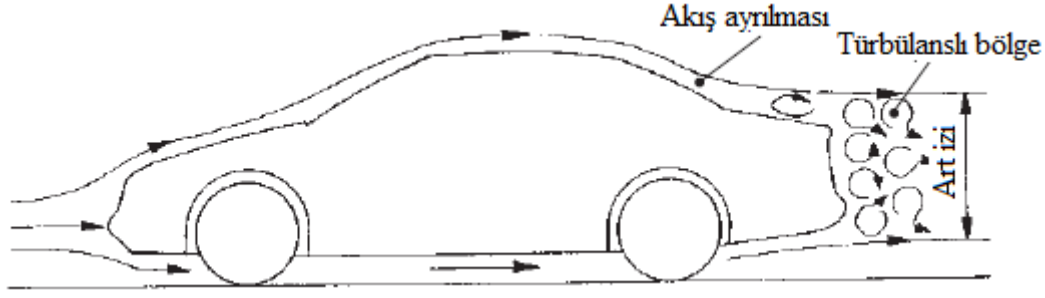
izgili akış kaput yüzeyinden ayrılır ve daha sonra ön camın tepe noktasında gövde yüzeyiyle birleşerek yoluna devam eder. Ayrılma ve birleşme noktaları arasındaki boşluk daha sonra kabarcıklara dönüşen havanın dönmesiyle meşgul olur. Eğer bu dönüşlü hava hareketi güçlü olursa, ters bir girdap oluşur [20].



Şekil 1. 21. Akış ayrılması ve birleşmesi [20]

1.5.9. Art İzi Bölgesi

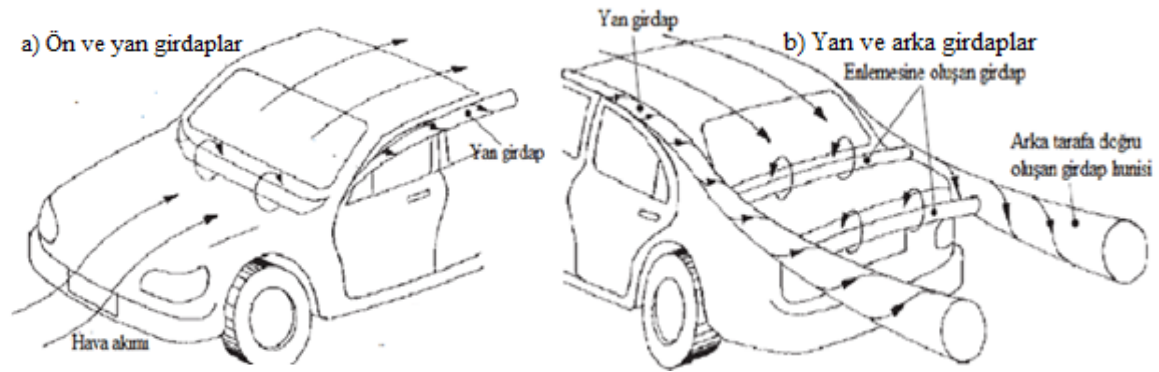
Öne doğru hareket eden bir aracın arka tarafında oluşup araçla aynı yönde gitmeye çalışan türbülanslı hava bölgesine art izi bölgesi denir. Art izi bölgesi, şekil 1.22’ de görüldüğü gibi aracın arka tarafında oluşan akış ayrılmasının başladığı yerden başlayarak aracın arka tarafına doğru ilerler [20].



Şekil 1. 22. Art izi bölgesi [20].

1.5.10. Girdaplar

Hareket halinde olan bir aracın değişik bölgelerinde şekil 1.23’ te görüldüğü gibi girdaplar oluşur. Girdap, halka şeklinde olan dönen bir hava kütlesi olarak tanımlanabilir. Girdabın çevresel hızı yarıçapıyla ters orantılı olarak artar. O yüzden, merkezine yakın bölgedeki çevresel hızı maksimum, en dış bölgesindeki çevresel hızı minimumdur. Girdabın merkez bölgesi çok az dönme hareketi yapar. Dolayısıyla, durgun halde olan merkez hava tabakaları ile hızlı dönme hareketi yapan dış hava tabakaları arasında viskoz kayma meydana gelir. Bu nedenle girdap içerisindeki basınç atmosferik basıncın altında olur. Bu durumda, girdabın merkezinin yakınındaki basınç en dış bölgesindeki basınçtan çok daha düşük olur [20].

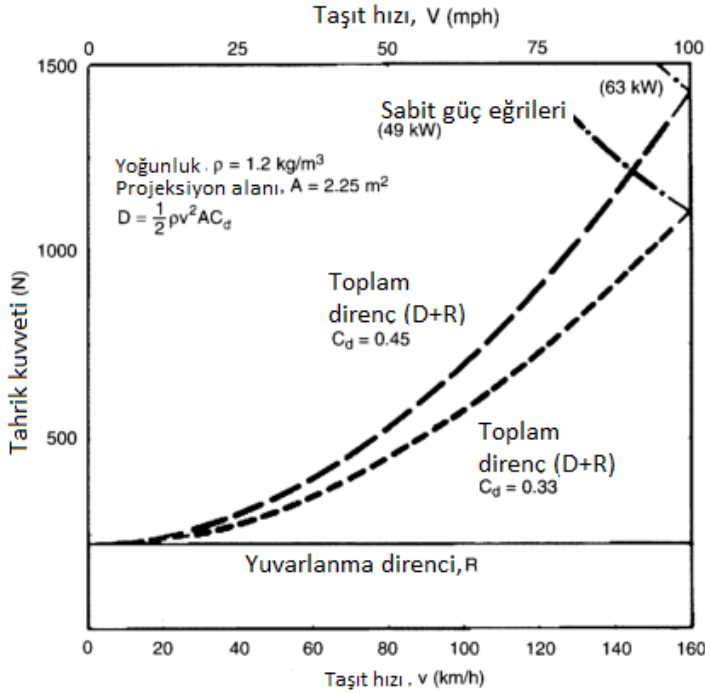


Şekil 1. 23. Aracın değişik bölgelerinde oluşan girdaplar [20].

1.6. Aerodinamik Direnç (Sürüklenme) Kuvvetinin Önemi

Şekil 1.24’ te yuvarlanma direnci ve aerodinamik direnç arasındaki ilişki görülmektedir. 225 N’ luk sabit bir yuvarlanma direnci kabul edilmiş ve aerodinamik direnç iki durum için grafiklerle gösterilmiştir ($C_d = 0,33$ ve $C_d = 0,45$). Her iki durumda ön

bakış alanı 2,25 m² olarak kabul edilmiştir. Bu değerler sırasıyla 1990 ve 1970' li yılların ortalarında tasarlanan küçük bir arabaya aittir. Aerodinamik direnç, hızın karesiyle orantılı olduğu için düşük hızlarda önemsiz olmakta, fakat yüksek hızlarda önemli hale gelmektedir [17].



Şekil 1. 24. Aerodinamik direncin taşıt performansı üzerindeki etkisi [17].

Aerodinamik direnç, sırasıyla iki farklı durum için ($C_d=0,33$ ve $0,45$) 80 km/h ve 70 km/h' teki yuvarlanma direncine eşittir. Bundan dolayı daha yüksek seyir hızlarında dirençteki azalmalar araç performansı üzerinde en büyük etkiye sahip olur. Bu durum maksimum hızlar için en belirgindir. Bir taşıtı hareket ettirmek için gerekli olan güç, tahrik kuvveti ve hızla ilişkilidir. O yüzden, şekilde de görüldüğü gibi sabit güç eğrileri hiperboliktir. 49 kW' lık bir güç çıkışı için $C_d=0,45$ 'den $C_d=0,33$ ' e kadar aerodinamik direnç katsayısındaki azalma maksimum hızın 145 km/h' ten 160 km/h' e doğru artışına yol açar. Başka bir deyişle, C_d 'si 0,45 ve 0,33 olan taşıtlar 160 km/h hızla sürülmek isteniyorsa sırasıyla 63 kW ve 49 kW güç ihtiyaç duyar. Aerodinamik direnç kuvvetinin üstesinden gelmek için gereken güç, taşıt hızının küpüyle doğru orantılıdır [17].

Aerodinamik direncin azaltılmasının taşıtın hızlanmasındaki etkisi, maksimum taşıt hızının maksimum hızlara yaklaşması dışında önemsizdir. Motordan elde edilen momentle

orantılı olan tahrik kuvveti ve taşıtın hareketine karşı koyan tüm direnç kuvvetleri toplamı arasındaki farka eşit olan ivmelenme kuvveti taşıtı hızlandırmak veya yavaşlatmak için kullanılır. İvmelenme kuvveti, taşıt hızının artışına bağlı olarak toplam direncin artmasından veya motordan elde edilen momentin azalmasından dolayı azalır. Taşıt hızının 0 km/h' ten 100 km/h' e kadar arttığı düşünülürse, 49 kw 'lık maksimum motor çıkış gücü için 100 km/h' te elde edilen maksimum tahrik kuvveti 1765 N iken toplam direnç kuvveti 694 N 'dur. Bu durumda taşıtın hızlanması için 1071 N' luk net bir ivmelenme kuvveti ortaya çıkar. Aerodinamik direnç katsayısının $C_d=0,33$ ' e kadar azaltılmasıyla 100 km/h' te olan taşıtın hızlanması için gerekli olan kuvvetin % 11,7 kadar artmasına neden olunur. Bu durumda, ivmelenme zamanında kayda değer bir azalma olur [17].

Aerodinamik direnç katsayısındaki azalmanın yakıt ekonomisine olumlu etkisi yüksek taşıt hızlarında daha belirgin hale gelir. Bu durum basit olarak şöyle ifade edilebilir; Toplam direnç kuvvetlerindeki % 10'luk bir azalmanın yakıt ekonomisi üzerinde %10'luk bir azalmaya neden olabilmektedir. Buradaki varsayım motor veriminin, şanzıman dişli oranının değiştirilmesi ya da motor hacminin azaltılmasının bir sonucu olarak aynı kalmasıdır. İkincil başka etkiler burada hesaba katılmamıştır. Örneğin motor hacminin azaltılması neredeyse tüm motor bileşenleri için bir ağırlık tasarrufu sağlar ve ağırlığın azaltılması yuvarlanma direncini azaltır. Bu basit kabulle, potansiyel yakıt tasarrufları çizelge 1.3' te gösterildiği gibi olmaktadır [17].

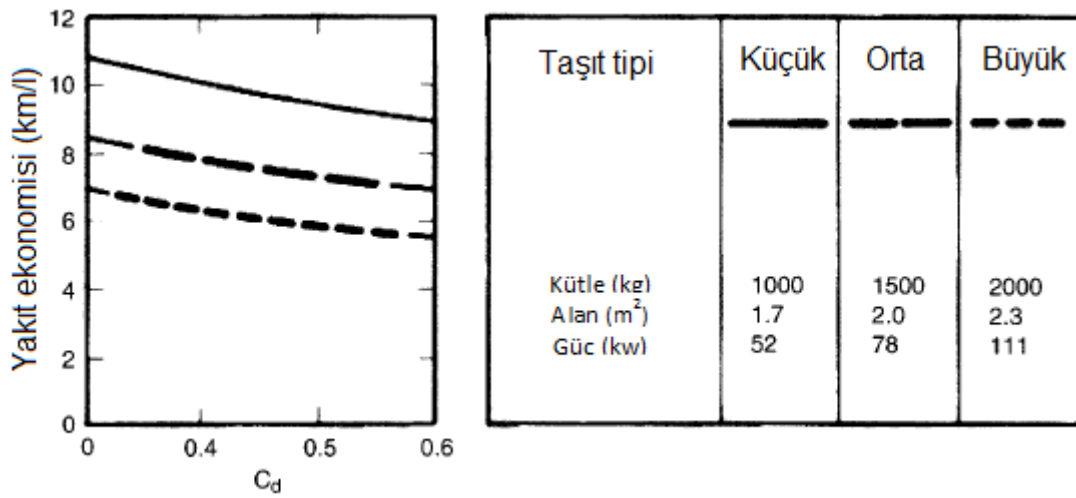
Çizelge 1. 3. C_d ' nin 0,45' ten 0,33' e düşürülmesinin yakıt tüketimine etkisi [17].

Hız (km/h)	50	80	120	160
Yakıt tüketimindeki azalma (%)	6,7	15,2	20	22,5

Yakıt tüketimleri, taşıt sürekli olarak sabit hızlarda sürülmediği için pratikte çizelge 1.3' te gösterildiği gibi gerçekleşmez. Taşıtların yakıt tüketimi hesabı için aşağıdaki adımlar izlenmelidir;

- Sürülen taşıtın hızı, zamanın bir fonksiyonu olarak belirlenmelidir.
- Motor verimi belirlenmelidir.
- Aerodinamik direnç ve yuvarlanma direnci kuvveti belirlenmelidir.

Hucho (1978), Avrupa taşıtları için ön iz düşüm alanı, kütle ve güç arasında ilişkiler olduğunu tespit etmiştir. Buradan yola çıkarak geliştirilmiş taşıt modeliyle uygun bir yakıt ekonomisinin elde edilebileceğini göstermiştir. Herhangi bir taşıtın motor verim haritasını göz önüne alarak aktarma organları verimini % 90 olarak kabul etmiştir. Yakıt tüketimini şehir içi ve şehirlerarası sürüşler için ortalama bir değer olarak hesaplamıştır. Şekil 1.25’ te üç farklı taşıt boyutları için bir taşıt modelinden elde edilen sonuçlar görülmektedir. Sürüklenme katsayısının 0,45’ten 0,33’e düşürülmesiyle yakıt ekonomisinde %9’luk bir kazanç sağlandığı anlaşılmaktadır [17].



Şekil 1. 25. Aerodinamik direnç katsayısının yakıt tüketimi üzerindeki etkisi [17].

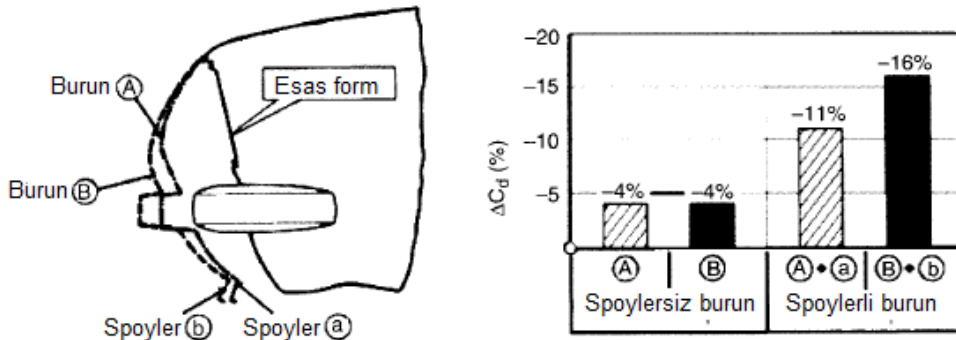
1.7. Aerodinamik Direnç Kuvvetini Azaltmak İçin Yapılan İyileştirmeler

Bir aracın aerodinamik direnci, aracın tüm dış gövde şekline (notchback, hatchback vs.) ve ön cam kenarındaki su olukları ya da tekerlek jant boşlukları gibi gövde detaylarına bağlıdır. Taşıtların dış görünüşleri benzer olmamasına rağmen, taşıtlar boyutsal olarak küçük, orta ve büyük ölçekli olacak şekilde notchback veya hatchback gibi gruplara ayrılabilir. Her gruptaki ön ve arka tekerlek merkezleri arasındaki mesafe ile tekerleklerin dingil mesafeleri dikkate değer derecede aynıdır. Yine de her kategoride tasarımdaki farklılıklara dayandırılması gereken aerodinamik direnç katsayısında önemli değişim olmaktadır [17].

Hatchback arabalarda arka camın eğim açısı, arka camın üstünde veya aşağısında akış ayrılmasının meydana gelip gelmediğini belirler. Akış ayrılması arka camın aşağısında belirgin bir şekilde meydana geldiği zaman arka cam üzerindeki kir birikmesi daha az ciddi

bir problem oluşturur. Arabaların yüksekliği hemen hemen boyuttan bağımsızdır ve arka camın alt kenarının yüksekliği görünürlük gereksinimlerinden etkilenir. Bu nedenle daha uzun arabalar daha düşük sürüklenme katsayılarının elde edilmesi için arka cam daha küçük eğim açısıyla yerleştirilebilir [17].

Burun geometrisi, şekil 1.26’ da görüldüğü gibi kaput üzerindeki akış ayrılması üzerinde etkili olduğu için önemlidir.



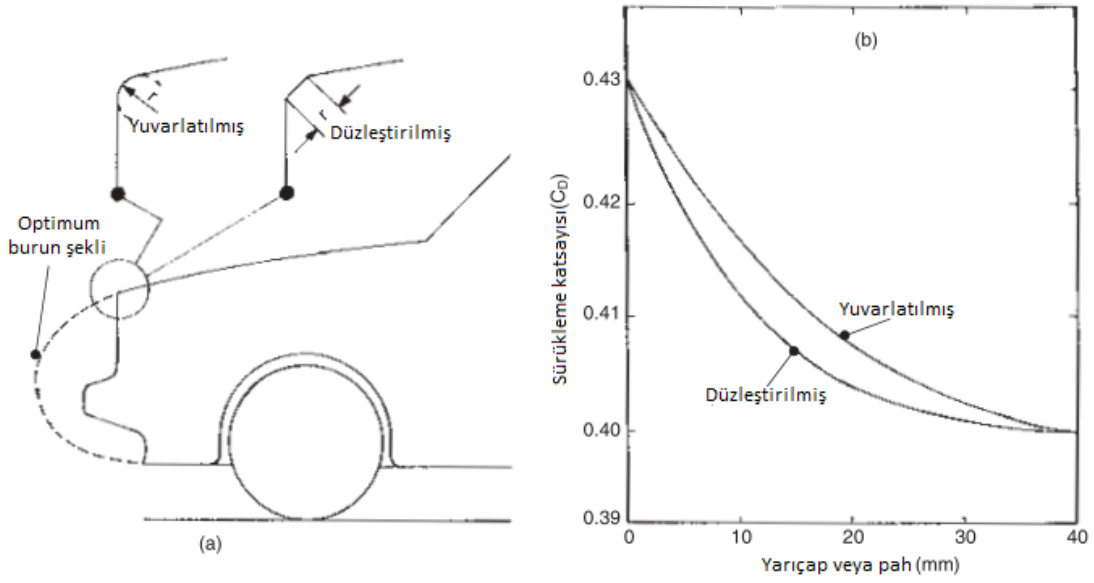
Şekil 1. 26. Burun geometrisinin sürüklenme katsayısı üzerindeki etkisi [17].

Hucho et al. (1976) çok sayıda küçük tasarım değişikliklerinin bir sonucu olarak sürüklenme katsayıları için sonuçları bulmuştur. Örnek verilecek olursa, tavanın arka cama geçişi kavisli yapılırsa sürüklenme katsayısında % 9'luk, aracın genişliği arkaya doğru azaltıldığında sürüklenme katsayısında % 13'lük bir azalma olduğunu tespit etmiştir [17].

Ayrıca, kaput ve ön cam üzerinde akış ayrılmasının meydana gelmesini önleyerek sürüklenme katsayısının minimuma düşürülmesine ilave olarak ön camın dibindeki basınç artışı da arttırılabilir. Bu basınç artışı yolcu bölümündeki havalandırmanın kaynağı olduğu için önemlidir. Eğer akım çizgili gövdenin sürüklenme katsayısı çok fazla artmıyorsa bazı detaylara dikkat etmek son derece önemlidir. Düşük bir sürüklenme katsayısına neden olan yaklaşım tipi gömme montajlı cam, gömme cam silecekleri, optimize edilmiş arka görüş aynaları, düşük türbülanslı tekerlek jantları ve etkin kapı sızdırmazlıkları kullanımıdır [17].

1.7.1. Profil Kenar Yuvarlatma veya Düzleştirme

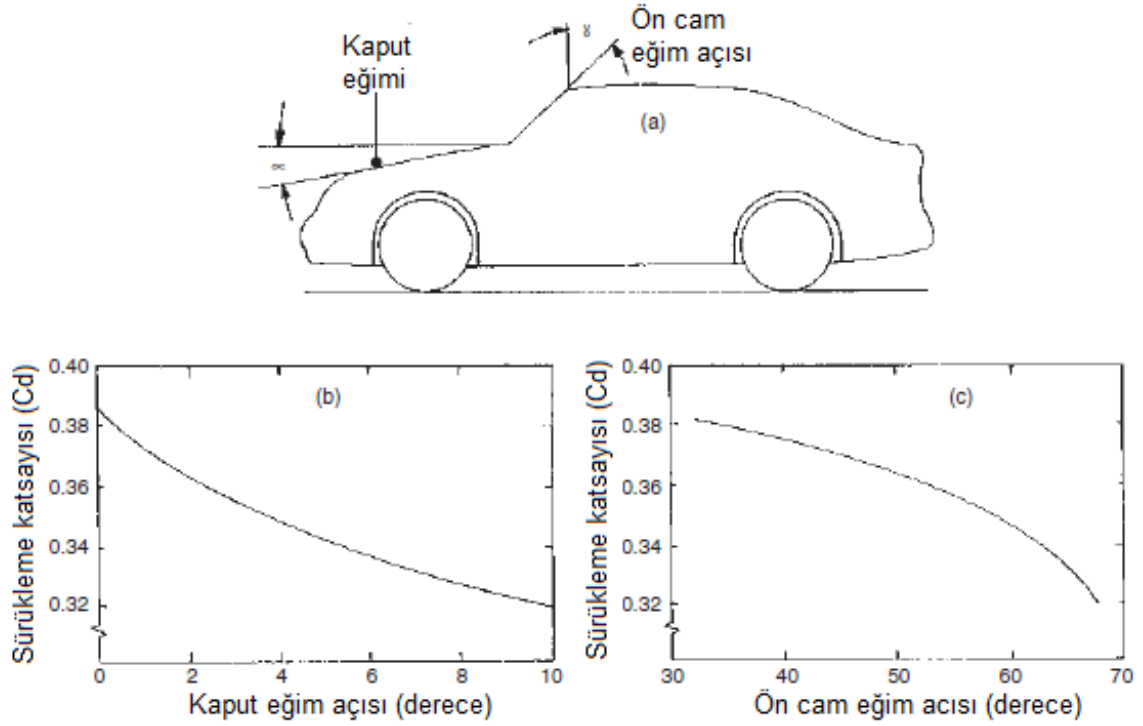
Kenar yuvarlatma veya düzleştirme işlemlerinin artmasıyla birlikte kaldırma ve sürüklenme katsayılarının azaldığına dair genel bir kanı vardır. Özel bir araba şekli için yapılan deneylerde kenarların 0'dan 40 mm'ye kadar yuvarlatılması veya düzleştirilmesiyle birlikte sürüklenme katsayısının 0,43'ten 0,40'a kadar azaldığı görülmüştür ve kenar düzleştirmeyle oluşan azalmanın kenarları yuvarlatmaktan daha fazla olduğu görülmüştür. Ancak 40 mm yarıçaptan sonraki kenar yuvarlatma ya da düzleştirme işleminin fazla avantaj sağlamadığı şekil 1.27'de görülmektedir [20].



Şekil 1. 27. Ön gövde kaput kenar şeklinin sürüklenme katsayısı üzerindeki etkisi [20].

1.7.2. Kaput Eğimi ve Ön Cam Eğiminin Düzenlenmesi

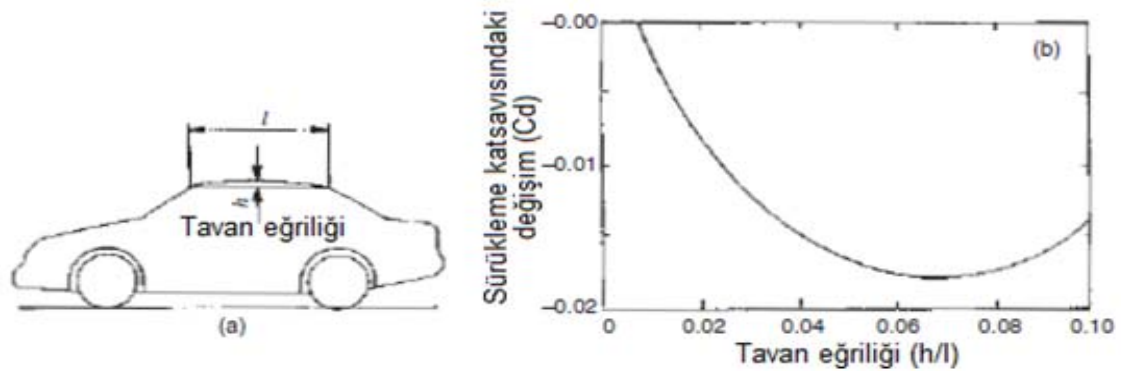
Kaput eğim açısının 0 dereceden 10 dereceye kadar arttırılması sürüklenme katsayısının azalmasına neden olurken, 10 dereceden sonraki eğim açılarında sürüklenme katsayısındaki azalma önemsiz olmaktadır. Aynı şekilde, ön cam eğim açısı özellikle eğim açısı büyük olacak şekilde arttırıldığında sürüklenme katsayısında azalma olacağı şekil 1.28'de görülmektedir [20].



Şekil 1. 28. Kaput ve ön cam eğim açısının sürüklenme katsayısına etkisi [20].

1.7.3. Tavan ve Yan Panelin Kavislendirilmesi

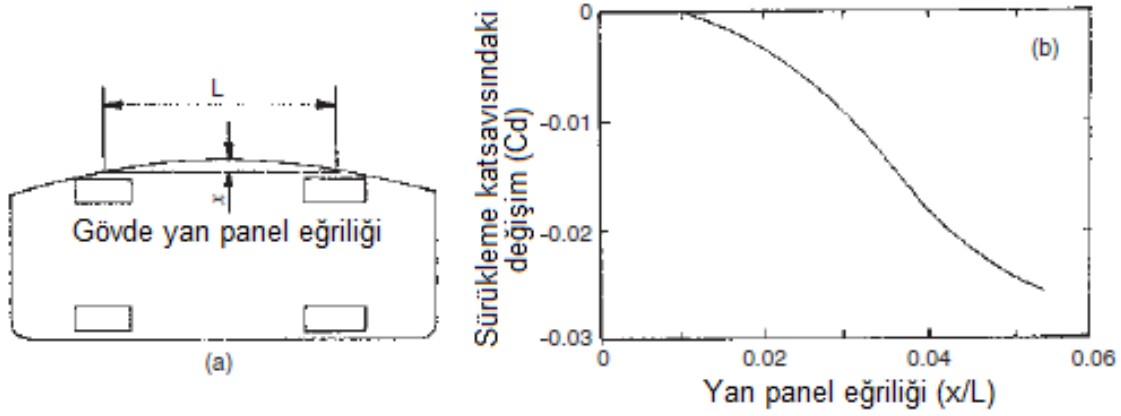
Tavan ve yan panellerin kavislendirilmesi sürüklenme katsayısının azalmasına neden olabilmektedir. Tavan kavisini aşırı derecede fazla yapıldığında sürüklenme katsayısında tekrar bir artış olacağı şekil 1.29’da görülmektedir [20].



Şekil 1. 29. Tavan eğriliğinin sürüklenme üzerindeki etkisi [20].

Yan panel kavisleri az miktarda yapıldığında taşıtın sürüklenme katsayısı azalmakta fakat fazla miktarda yapıldığında ise sürüklenme katsayısının marjinal olarak değiştiği şekil

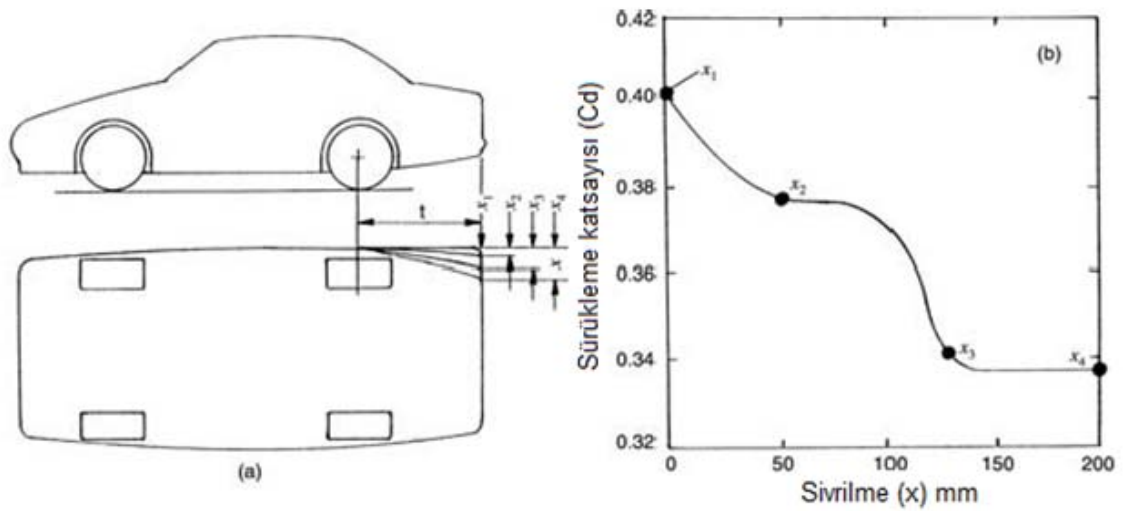
1.30’da görülmektedir. Hem tavan hem de yan panel kavisi taşıtın ön bakış alanının artmasına neden olursa sürüklenme kuvvetinde artış olması muhtemeldir [20].



Şekil 1. 30. Yan panel eğriliğinin sürüklenme katsayısına etkisi [20].

1.7.4. Arka Yan Panelin Sivriltilmesi

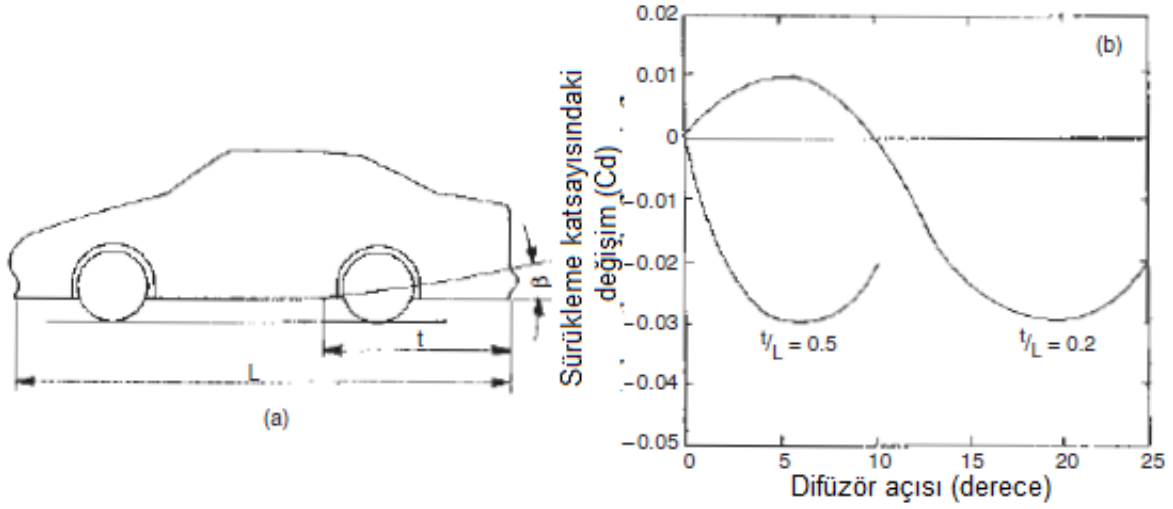
Arka yan panelin arka taraftan içe doğru sivriltilmesi sürüklenme katsayısını azaltır. Şekil 1.31’de görüldüğü gibi arabanın arkasında her iki yönde hem 50 mm hem de 125 mm içe doğru sivriltilme işlemiyle birlikte sürüklenme katsayısında azalmalar olmuştur. Sivriltilme işleminin 200 mm’ye kadar arttırılması durumunda sürüklenme katsayısında azalma olmadığı görülmektedir [20].



Şekil 1. 31. Arka yan panel sivrilmesinin sürüklenme katsayısına etkisi [20].

1.7.5. Alt Gövdenin Arka Ucunun Yukarı Doğru Sivriltilmesi

Taşıtın alt tarafının arka ucunun yukarıya doğru şekil 1.32’de görüldüğü gibi eğimli yapılması sürüklenme katsayısının azalmasına neden olan bir difüzör etkisi oluşturur. Bunun yanında en iyi sonuçları elde etmek için sivriltilme uzunluğunun taşıtın uzunluğuna oranını ve yukarı yönlü eğim açısını optimum düzeyde belirlemek önemlidir [20].



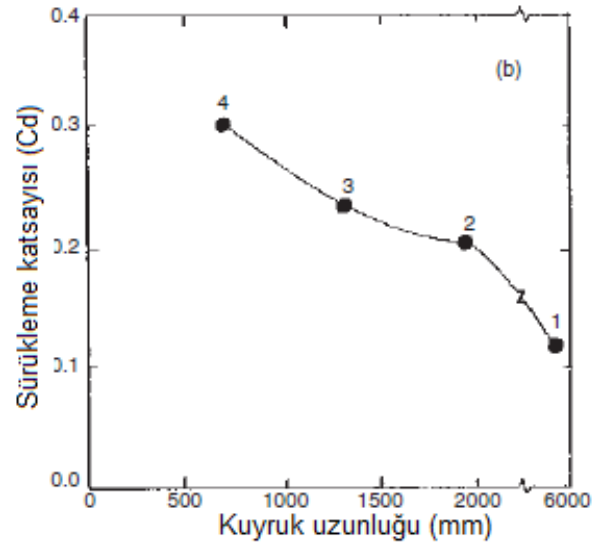
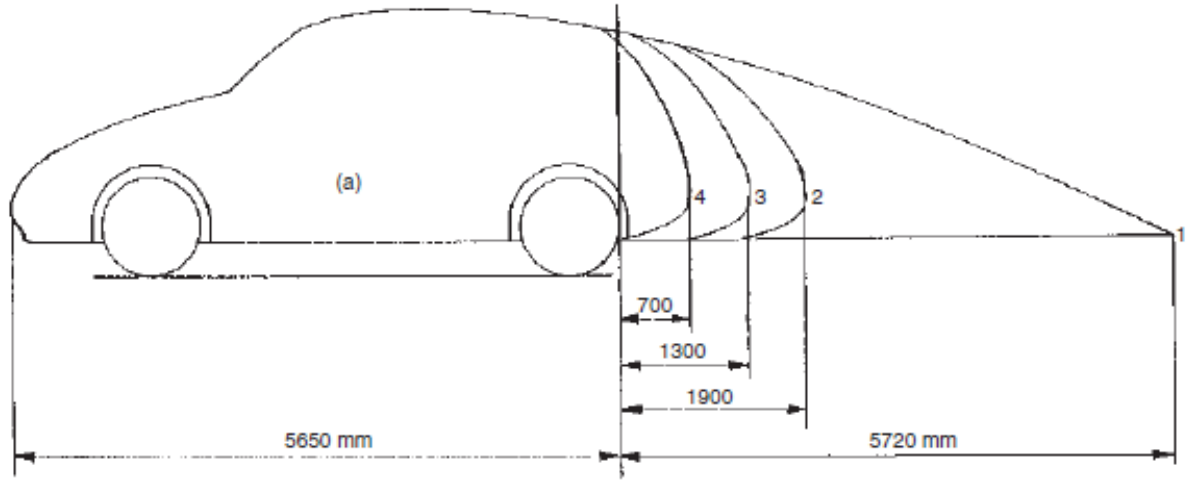
Şekil 1. 32. Arka tarafın yukarı doğru sivriltilmesinin sürüklenme katsayısına etkisi [20].

1.7.6. Alt Gövde Pürüzlülüğünün Giderilmesi

Alt gövdenin pürüzsüz olacak şekilde yapılması sürüklenme katsayısını etkiler. Aracın alt gövdesinde aracın değişik parçaları açık şekilde tutulursa bu parçalar aracın altından geçen hava akımına karşı engel teşkil eder ve sürüklenme katsayısında artışa yol açar. Bunun önüne geçebilmek için arabanın alt tarafı pratikte panellerle kapatılır [20].

1.7.7. Arka Tarafın Kuyruk Şeklinde Uzatılması

Farklı şekilli kuyruk modelleriyle birlikte yapılan rüzgar tüneli testlerinde sürüklenme katsayılarının minimum düzeyde tutulması için arkaya doğru uzanan kuyruk şeklinin uygun olduğu daha önceleri tespit edilmiştir. Ancak, bu şekildeki tasarımlar karayolu taşıtları için pratikte uygun değildir. Tersine, arka uç kuyruk değişik uzunluklarda ve aşağı yönlü eğimli yapılırsa arka tekerleklerden sonra başlayan kuyruk uzunluğundaki her azalmayla birlikte sürüklenme katsayısında bir artış olduğu şekil 1.33’te görülmektedir [20].



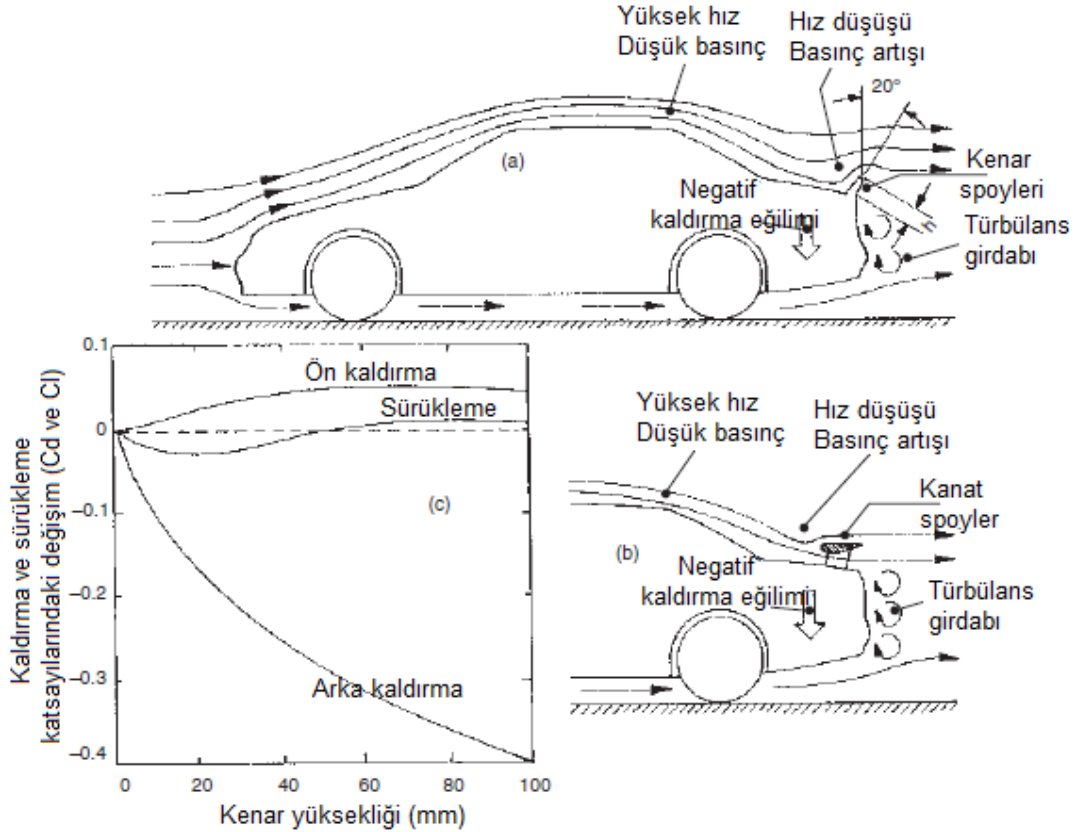
Şekil 1. 33. Arka uç kuyruk uzamasının sürüklenme katsayısına etkisi [20].

1.8. Aerodinamik Kaldırma Kuvvetini Azaltmak İçin Yapılan İyileştirmeler

1.8.1. Spoyler Kullanımı

Genel olarak arka uç gövde profili eğriliği hafif derecede olduğu zaman üst yüzeyden ayrılmayan havanın akışı akım çizgili olur. Bu durumda aracın arka tarafında bir kaldırma kuvveti oluşmasına neden olan (yukarı yönlü emiş) düşük yerel basınçlar oluşur. Şekil 1.34 a ve b’de görüldüğü gibi arabanın bagajının arka ucuna takılan bir spoyler, düz akım çizgili olan hava akışını bozar. Böylece arabanın arka ucundaki hava akışı yavaşlar ve buna bağlı olarak üst yüzeydeki yerel hava basıncının artmasıyla birlikte negatif kaldırma olarak bilinen aşağı yönlü bir kuvvet oluşur. Spoyler kenar yüksekliğine bağlı

olarak arka kaldırma, ön kaldırma ve sürüklenme katsayıları arasındaki tipik ilişki şekil 1.34 c’de görüldüğü gibi olmaktadır. Grafik, spoiler kenar yüksekliğinin arttırılması sayesinde negatif kaldırmada genel artış olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra sürüklenme katsayısında spoiler kenar yüksekliğinin arttırılmasıyla birlikte ilk başlarda azalma ve daha sonra marjinal olarak artış görülürken ön uç kaldırma katsayısında ise düzgün bir artış söz konusudur [20].

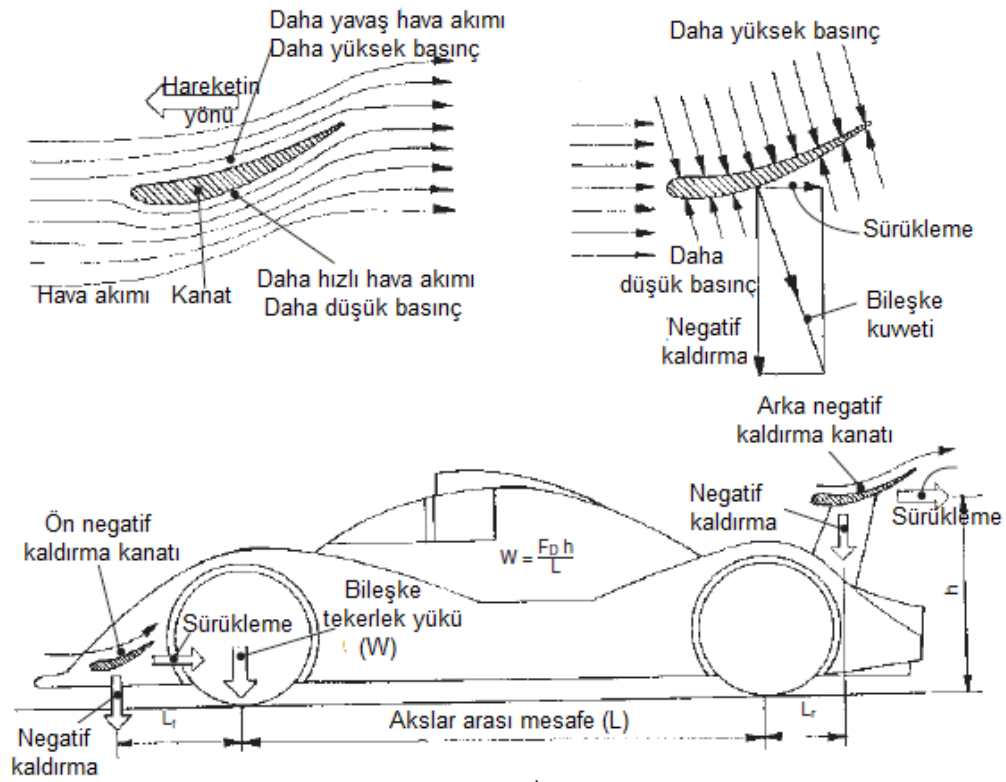


Şekil 1. 34. Arka uç spoilerin kaldırma ve sürüklenme katsayıları üzerindeki etkisi [20].

1.8.2. Negatif Kaldırmalı Kanatlar Kullanımı

Aşağı yönlü bir itme oluşturmak için taşıtın arka tarafına negatif kaldırma etkisi oluşturan bir kanat takılır. Bu durumda, taşıtın arka tahrik tekerlekleri tarafından üretilen çekiş gücünde artış olur. Ön negatif kaldırma kanadı, ön taraftaki yönlendirme tekerleklerinin her ikisinin yol tutuşunu arttırmak için taşıtın ön tarafına yerleştirilir. Taşıtın burun kısmında bulunan negatif kaldırma kanadının ön ucu şekil 1.35’ te görüldüğü gibi aşağı doğru eğimli yapılır. Bu sayede kanatın alt tarafından geçen havanın debisi kanatın üst tarafından geçen havanın debisinden daha fazla olduğu için kanatın alt tarafından geçen havanın hızı daha yüksek olur. Bunun yanında, kanatın altından geçen

havanın basıncı kanatın üstünden geçen havanın basıncına göre daha düşük olur. Bu yüzden, kanat üzerinde aşağı yönlü bir itme kuvveti oluşur. Kanatın eğim açısının artırılmasıyla aşağı yönlü olan itme kuvvetinde artış olurken kanatın ileriye doğru hareketine karşı koyan sürüklenme kuvvetinde de artış olur. Bu nedenle, taşıtın yol tutuşunun artırılması ve sürüklenme kuvvetinin azaltılması arasında bir optimizasyon çalışması yapılmalıdır [20].



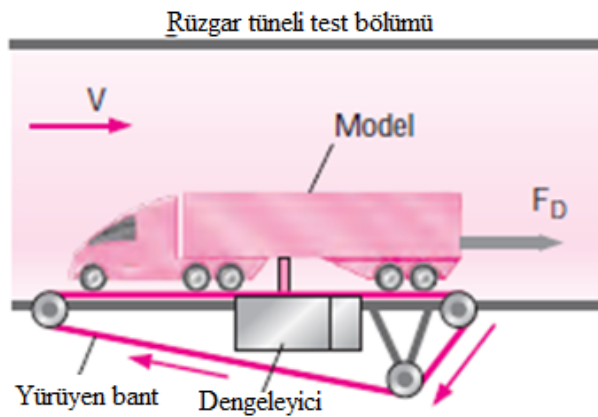
Şekil 1. 35. Negatif kaldırma kanatlarının yarış arabasındaki yerleştirilme biçimleri [20].

2. MATERYAL ve METOT

2. 1. Deneyisel Modelleme

Bir taşıt etrafındaki akış veya basınç dağılımıyla ilgili sürüklenme, kaldırma katsayıları ve taşıtın aerodinamik etkinliği ile ilgili diğer verileri elde etmek için deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulur. En kontrollü şartlar rüzgar tünellerinde oluşturulabilir, ancak rüzgar tüneli içerisindeki atmosferik şartlar gerçek yol şartlarıyla uyumlu olmalıdır. Rüzgar tünellerinin maliyeti deneyde kullanılacak taşıtın boyutlarının artmasıyla birlikte artacağı için çoğu deneysel çalışmalar modellerle birlikte yapılır. Tam ölçekli bir aracın tüm özellikleri bir modele aktarıldığı zaman, model ve tam ölçekli testler arasında bir belirsizlik oluşur. Rüzgar tüneline bir cismin varlığı tüneldaki akışı düzenleme etkisine yol açabilir. Ayrıca, bir rüzgar tüneline duvarlarında sınır tabakalar oluşur ve tüneli içerisindeki ana hava akışı bundan etkilenir [17]. Modelin ön bakış alanının rüzgar tüneline kesit alanına oranı çok düşük olduğu zaman (% 7,5 'in altında) akışı düzenlemeye neden olan blokaj etkileri göz ardı edilebilir [19].

Rüzgar tüneli içerisine modeli yerleştirirken kuvvet ve moment ölçümü için kullanılan dengeleyicinin yerine dikkat edilmelidir. Şekil 2.1' de görüldüğü gibi, istisnai durumlar hariç olmak üzere dengeleyici genellikle tüneli dışına yerleştirilir. Gerçek yol şartlarında meydana gelen yer etkisini incelemek için model altına dönen bir kayışın yerleştirilmesi gerekir. Kayış yüzeyinin yukarı doğru kalkmasını önlemek için kayışın alt tarafına vakum uygulanması gerekir [17].



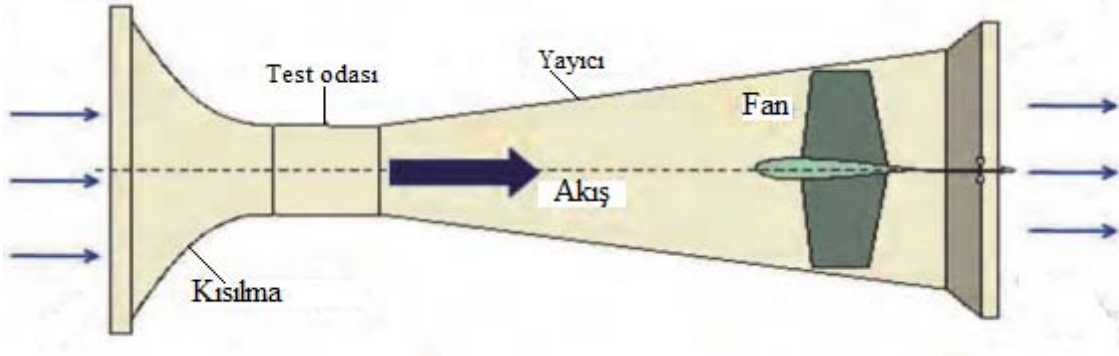
Şekil 2. 1. Bir rüzgâr tüneline model tıra etkiyen sürüklenme kuvvetinin ölçümü [19].

Türbülans seviyesi, akışın laminar sınır tabakadan türbülanslı sınır tabakaya erken geçişine neden olduğu için önemlidir. Laminerden türbülansa geçiş erken olursa, taşıtın gövdesi üzerindeki sınır tabakanın çoğu türbülanslı olacağı için yüzey sürtünme direnci artar. Yüzey sürtünmesi direncinin aerodinamik direnç kuvvetine katkısı azdır. Yüzey üzerindeki akışın büyük bir kısmının türbülanslı olması, akış ayrılmasını geciktirmeye eğilimli olsa da basınç direncinin azalmasında önemli bir etkiye sahiptir. Hava içerisinde hareket eden taşıtın aerodinamik etkinliğini incelemek için rüzgar tünelinin sınır tabakasını değiştirmek gerekebilir. Bunun için çalışma bölümündeki zemin üzerine akıntıya karşı cisimler yerleştirilerek daha gerçekçi sembolik bir sınır tabakası elde edilebilir. Taşıtın yanal etkilerini inceleyebilmek için dönebilen bir tabla üzerine yerleştirilmesi gerekir [17].

Model üzerindeki basınç dağılımı model yüzeyi üzerine yerleştirilen basınç ölçerler sayesinde elde edilebilir. Model yüzeyi üzerindeki basınç ölçümleri yapılırken genellikle uygun bir manometre ya da basınç güç çeviricisine bağlı olan yüzeye açık borular kullanılır. Boruların uç kısımları yüzeye birlikte aynı hizada olmalıdır. Aksi durumda pürüzlü yüzey meydana gelebileceği için türbülanslı sınır tabaka oluşur ve elde edilen ölçüm sonuçlarında hatalar olur [17].

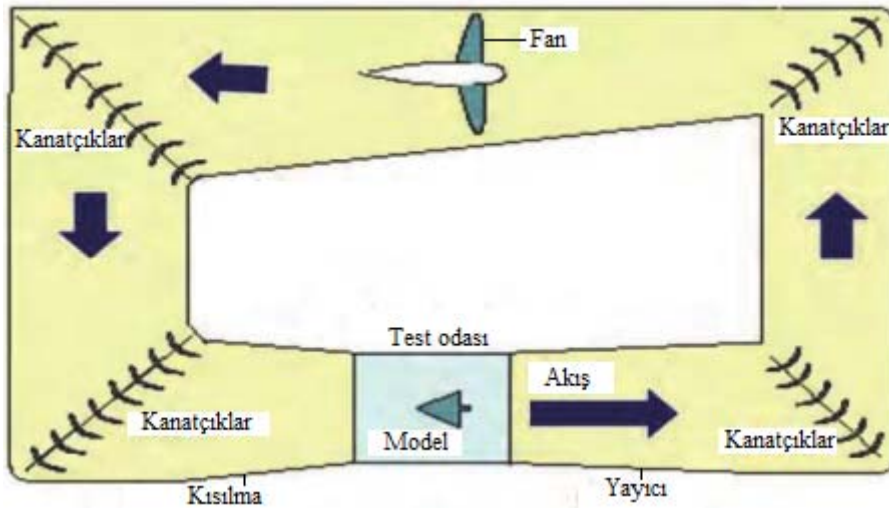
Taşıt etrafında meydana gelen akışın görselleştirilmesi, taşıt aerodinamiği açısından kullanışlı bir tekniktir. Taşıt etrafında oluşan akım çizgileri ile girdapların oluşturduğu akış ayrılması bölgelerini tespit etmek için duman kullanılabilir. Dumanın yoğunluğu ve hızı taşıt üzerinden akan havayla uyumlu olmalıdır. Duman akışının taşıt üzerinden akışı akım çizgili olmalıdır. Aksi takdirde taşıt üzerinde akış bozulmaları meydana gelebilir. Dönel girdapların olduğu yerlerin tespit edilmesi için duman, boru şeklindeki bir çubuk tarafından taşıt üzerine gönderilir [17].

Taşıtlar etrafında meydana gelen akışın karakteristiklerini incelemek için açık ve kapalı devre olmak üzere iki tip rüzgar tüneli kullanılmaktadır. Hava girişi atmosfere açık olan rüzgar tüneli, açık devre tip olarak tanımlanmaktadır. Bu tip rüzgar tüneli, genelde ses altı (düşük hızlı) akışlar için kullanılmaktadır. Tünelin çıkış tarafına yerleştirilen bir fan sayesinde hava tünel içerisine çekilerek akış ortamı oluşturulur [22].



Şekil 2. 2. Açık devre rüzgar tüneli [22].

Ses üstü (yüksek hızlı) akışlar için kapalı devre tip rüzgâr tüneli kullanılmaktadır. Kapalı devre rüzgar tüneli açık devre rüzgar tüneline göre daha üniform bir akış ortamı oluşturduğu için yaygın kullanıma sahiptir. Aynı zamanda, tünel içerisindeki havanın kinetik enerjisi korunduğu için fan motorunun çalıştırılması için gerekli olan güç minimum düzeydedir [17].



Şekil 2. 3. Kapalı devre rüzgar tüneli [22].

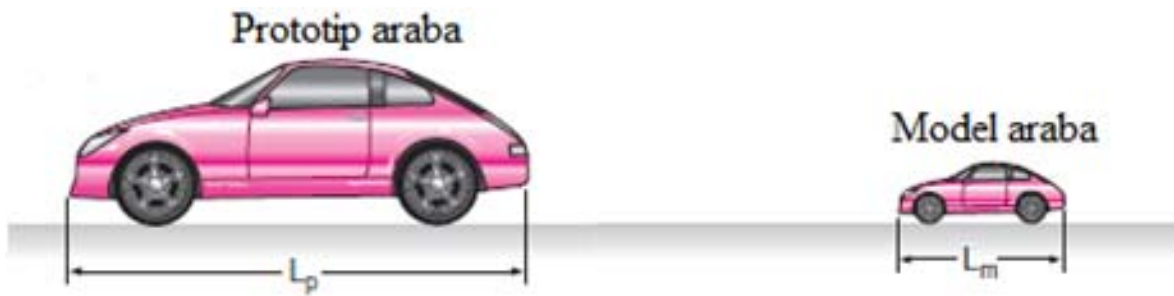
2.1.1. Benzerlik

Tam ölçekli bir araç prototipinin akış modellemesini yapmak için büyük ölçekli rüzgar tünelleri kullanımı çok zaman alıcı ve maliyetli bir iştir. Bundan dolayı, geometrik olarak ölçeklendirilmiş bir araç modelinin akış modellemesini daha küçük boyutlara sahip rüzgâr tüneli kullanarak yapmak mümkündür. Bu sayede zamandan ve paradan tasarruf

sağlanabilir. Bir model ve prototip arasında tam benzerliğin sağlanması için 3 şart gereklidir [19].

2.1.1.1. Geometrik Benzerlik

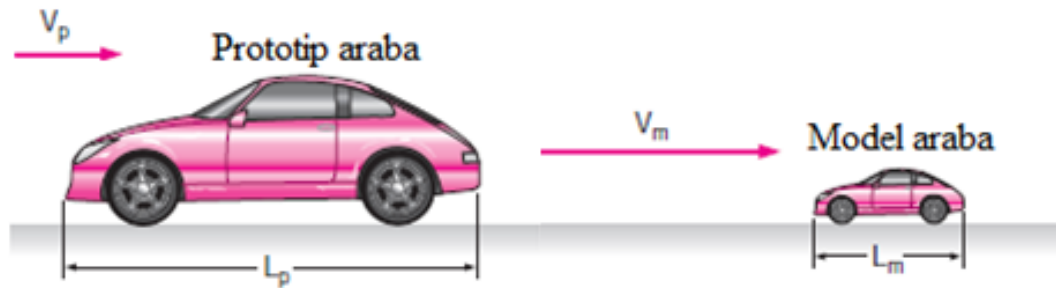
Modelin prototip ile aynı şekle sahip olma durumuna geometrik benzerlik denir. Model ile prototip arasındaki geometrik benzerliğin tam sağlanabilmesi için modelle prototip arasındaki ölçek faktörünün tüm eksenlerde aynı olması gerekir [19].



Şekil 2. 4. Prototip araba ile model araba arasındaki geometrik benzerlik [19].

2.1.1.2. Kinematik Benzerlik

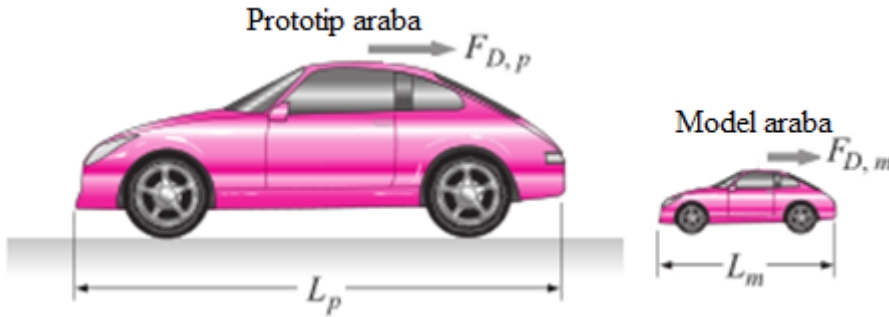
Model etrafındaki akışta modelin herhangi bir noktasındaki hız, prototip akışta prototipte bu noktaya karşılık gelen hız ile orantılı olmalıdır. Özellikle kinematik benzerlik için, birbirine karşılık gelen noktalardaki hızlar büyüklük olarak ölçekli ve aynı bağlı yönlerde olmalıdır. Geometrik benzerlik, kinematik benzerliğin ön şartıdır [19].



Şekil 2. 5. Prototip araba ile model araba arasındaki kinematik benzerlik [19].

2.1.1.3. Dinamik Benzerlik

Model akıştaki bütün kuvvetler, prototip akışta bunlara karşılık gelen kuvvetlerin sabit bir çarpanla ölçeklendirilmesi ile elde edildiğinde dinamik benzerliğe ulaşılmış olur. Kinematik benzerlik dinamik benzerlik için gerekli fakat yeterli olmayan bir şarttır. Bundan dolayı bir model akış ve bir prototip akış için geometrik ve kinematik benzerlik sağlansa bile dinamik benzerliğe ulaşılmamış olabilir. Tam benzerliğin garanti altına alınabilmesi için üç benzerlik şartının da sağlanmış olması gerekir. Bu yüzden akışkanlar mekaniğinde tam benzerliğin sağlandığını ifade eden boyutsuz bir sayı olan Reynolds sayısı en kullanışlı parametredir [19].



Şekil 2. 6. Prototip araba ile model araba arasındaki dinamik benzerlik [19].

$$Re_m = \frac{\rho_m V_m L_m}{\mu_m} = Re_p = \frac{\rho_p V_p L_p}{\mu_p} \quad (2.1)$$

Rüzgar tüneli içerisinde atmosferik şartlara sahip hava kullanılması durumunda, 1:4 ölçekli model için gereken akış hızı tam ölçekli model için gereken akış hızının 4 katı olmalıdır. Sürüklenme katsayısı, Reynolds sayısına duyarlı olmasına karşın, modelin herhangi bir yerinde akış ayrılmasının meydana gelmesi muhtemeldir ve bu durumda basınç merkezinin yeri değişir. Tam ölçekli taşıt 135 km/h hızla yolda seyir halindeymiş gibi simülasyon yapılırsa $M_a = 0,1$ olacağı için havanın sıkıştırılmaz olduğu kabul edilir. Aynı Reynolds sayısı ile 1:4 ölçekli model için simülasyon yapılırsa, $M_a = 0,4$ olur ve havanın sıkıştırılabilirlik özelliği önemli hale gelir. Bu durum, ya tam ölçekli modelle çalışmayı ya da model ve tam ölçekli taşıt hızlarını eşitlemek için tünel içerisindeki havanın yoğunluğunu arttıran basınçlandırılmış rüzgar tünelinin kullanılmasını gerektirir. Bir başka alternatif, havanın viskozitesini arttırmak için soğutma etkisine sahip bir rüzgar tüneli kullanmaktır [17].

2.1.2. Deneysel Çalışmada Kullanılan Modelin Özellikleri

Günümüzde binek olarak kullanılan Audi A4 taşıtının 1:24 ölçekli küçültülmüş modeli deneysel ve sayısal çalışmalar için kullanılmıştır.

Çizelge 2. 1. Model özellikleri

Malzeme	Metal
Yükseklik	0,05946 m
Genişlik	0,07608 m
Uzunluk	0,19587 m
Ön Bakış Alanı	0,0036248 m ²
Karakteristik Uzunluk	0,19587 m
C _D Katsayısı	0,27
Model Yılı	2008

2.1.3. Model karakteristik uzunluğunun belirlenmesi

Daha önce yapılan benzer çalışmalarda modelin karakteristik uzunluğu olarak model genişliği, yüksekliği veya uzunluğu kullanılmıştır. Bu çalışma için model karakteristik uzunluğu olarak modelin uzunluğu seçilmiştir.

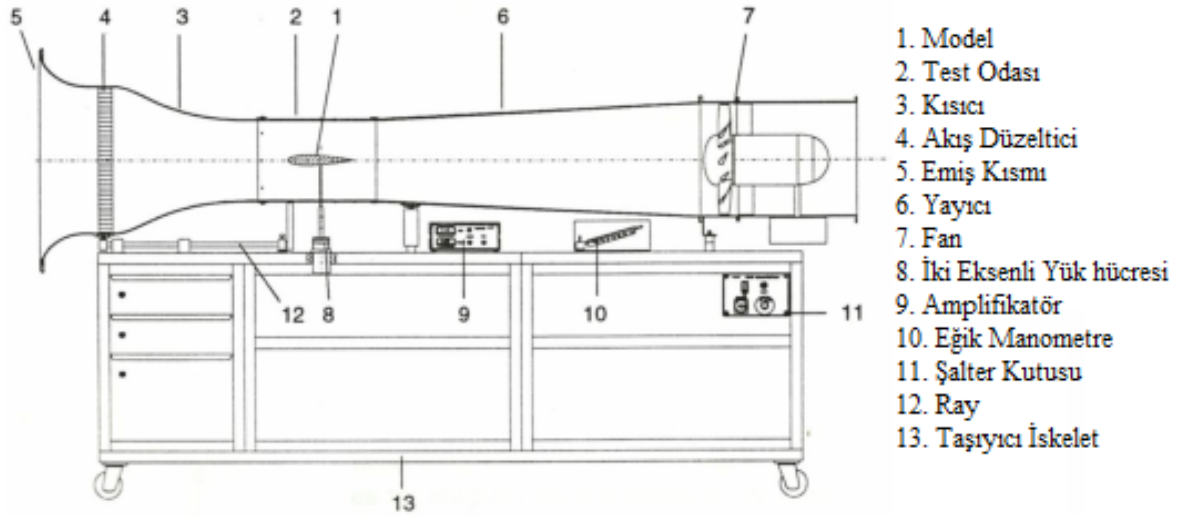
2.1.4. Modelin ön bakış alanının belirlenmesi

Modelin ön bakış alanını belirlemek için ANSYS Fluent paket programı kullanılmıştır. Program içerisinde yer alan rapor kısmında projeksiyon alanı, modelin ön tarafıyla ilgili eksen seçilerek hesaplanmıştır.

2.1.5. Rüzgar Tüneli Testi

Deney için şekil 2.7' de şematik resmi gösterilen Gunt HM 170 marka açık devre tip rüzgar tüneli kullanılmıştır. Tünelin hava girişi fanın emiş yaptığı yöndedir. Tünele giren havanın hızı şalter kutusu üzerinde yer alan fan devir ayar şalteri ile değiştirilerek ayarlanmaktadır. Tünel içerisinde akan hava hızı tünel üzerinde bulunan bir eğik manometre ile ölçülmektedir. Tünelin emiş tarafında tünel içerisine emilen hava akımını

düzelten bir akış düzeltici bulunmaktadır. Deney odası içerisinde daha rahat çalışma imkanı sağlamak için tünelin kısıcı tarafı bir ray üzerine yerleştirilmiştir.



Şekil 2. 7. Rüzgar tünelinin şematik resmi

Çizelge 2. 2. Rüzgar tünelinin teknik özellikleri

İmalatçı firma	Gunt
Maksimum motor devri	2800 rpm
Motor gücü	2,25 Kw
Deney odası kesit boyutları	292 x 292 mm ²
Maksimum akış hızı	28 m/s
Boyutları	2850 x 750 x 1700 mm ³
Kütlesi	250 kg

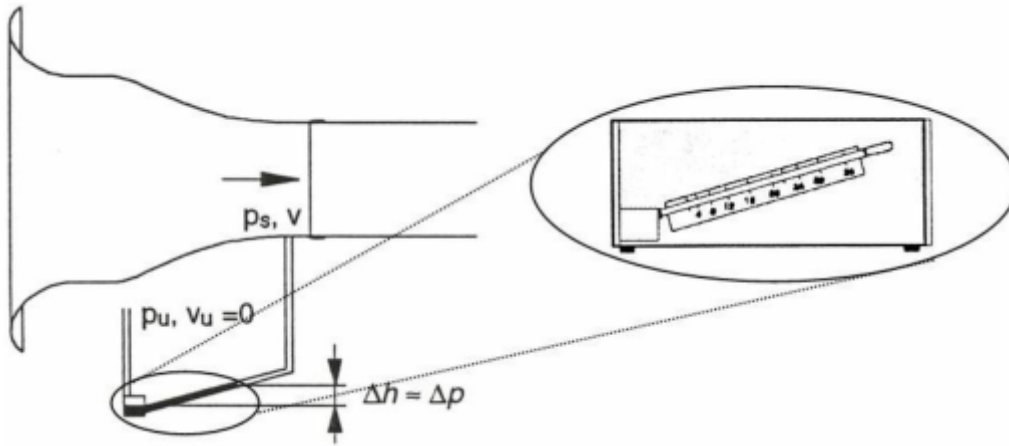
2.1.6. Akış Hızı Ölçme Sistemi

Deneyde rüzgar tüneli içerisinde geçen havanın hızı eğik manometre ile ölçülmüştür. Şekil 2.8' de gösterildiği gibi deney odasının hemen girişinde yüzeye dik olarak yerleştirilen dört delik ile tünel içerisindeki statik basınç ölçümü yapılabilmektedir. Dış ortam basıncı (P_u) ile tünel içerisindeki statik basınç (P_s) arasındaki fark dinamik basınca (P_d) eşittir ve hızın karesi ile doğru orantılıdır.

$$P_d = \Delta P = P_u - P_s = \rho_{sıvı} g \Delta h \quad (2.2)$$

$$V = \sqrt{\frac{2P_d}{\rho}} \quad (2.3)$$

Rüzgar tüneli üzerinde yer alan eğik manometre sayesinde basınç farkı değeri okunarak eşitlik 2.2 ile tünel içerisindeki hava akımının serbest akış hızı hesaplanabilir. Bunun yanında şekil 2.8’ de görüldüğü gibi eğik manometre üzerinde basınç farkı değerine karşılık gelen hız değerinin okunması için hız skalası mevcuttur.



Şekil 2. 8. Akış hızı ölçme sistemi

2.1.7. Basınç Ölçme Sistemi

Basınç ölçümü için resim 2.1’ de görülen elektronik fark basınç ölçer kullanılmıştır. Cihazın pozitif ve negatif girişlerine uygulanan basınçlar arasındaki fark göstergeden dijital olarak okunabilmektedir. Tünel içerisinde bulunan model üzerindeki bir yerin basıncı ile dış ortam basıncı arasındaki farkın ölçülmesi için cihazın negatif girişi dış ortama açık bırakılır ve cihazın pozitif girişine ise basıncı ölçülecek yere bağlı olan hortum takılır. Cihazın dijital ekranından okunan basınç farkının hız karşılığını bulmak için cihaz üzerindeki dönüşüm tablosu kullanılabilir.



Resim 2. 1. Elektronik fark basınç ölçer

Çizelge 2. 3. Elektronik fark basınç ölçerin teknik özellikleri

Marka	Furness Controls FC010 Pocket Manometer
Basınç Ölçme Aralığı	± 1999 Pa
Hız Ölçme Aralığı	0-56 m/ s
Tolerans	$\pm 1\%$
Hassasiyet	1 Pa

Basınç ölçüm işlemleri için resim 2.2’de görüldüğü gibi model taşıtın orta eksenini boyunca ön tampon kısmından başlayarak arka tampon kısmına kadar 12 adet delik açılmıştır.



Resim 2. 2. Basınç ölçümü için model üzerine açılan delikler

Daha sonra, basınç farkı ölçümü için model taşıt üzerine açılan deliklerin her birine model yüzeyi üzerinde pürüz oluşturmeyacak şekilde hortumlar bağlanmış ve hortumların basınç ölçere giden uçları resim 2.3'te görüldüğü gibi taşıt altına açılan deliklerden çıkarılmıştır.



Resim 2. 3. Basınç ölçümü için hortumların modele bağlantısı

2.1.8 Kuvvet Ölçme Sistemi

Model taşıt üzerine etki eden kuvvetleri ölçmek için resim 2.4' te görülen rüzgar tüneli üzerinde bulunan iki eksenli yük hücresi kullanılmıştır. Bu yük hücresi sayesinde model taşıta etki eden kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvveti ölçülebilmektedir. Yük hücresinde oluşan kuvvet bir bağlantı kolu ile bu kuvvetin etkisi ile bükülebilen diyaframa iletilir. Diyafram etrafına yerleştirilmiş yük ölçerlerden elde edilen veriler bir amplifikatör sayesinde dijital olarak gösterilir.



Resim 2. 4. İki eksenli yük hücresi ve amplifikatör

2.2. Matematiksel Modelleme

2.2.1 Akışkanlar Dinamiğiyle İlgili Genel Denklemler

Viskoz, sıkıştırılamaz, serbest yüzey etkileri olmayan Newton tipi akışkanın laminar akışı için hareket denklemleri;

Süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.4)$$

Sürüklenme denkleminin genelleştirilmiş biçimi;

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (2.5)$$

X yönündeki Navier-Stokes denklemi;

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.6)$$

Y yönündeki Navier-Stokes denklemi;

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.7)$$

Z yönündeki Navier-Stokes denklemi;

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.8)$$

Navier-Stokes denklemlerinin genelleştirilmiş biçimi;

$$(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} = - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P + \vec{g} + \nu \nabla^2 \vec{V} \quad (2.9)$$

Daimi, sıkıştırılamaz ve türbülanslı akış için Reynolds-Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemi;

$$(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} = - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P + \vec{g} + \nu \nabla^2 \vec{V} + \vec{\nabla} \cdot (\tau_{ij, \text{türbülans}}) \quad (2.10)$$

$\tau_{ij, \text{türbülans}}$ terimi, viskoz gerilme tensörü olarak bilinmektedir.

$$\tau_{ij, \text{türbülans}} = - \begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

2.2.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

Akışın olduğu mühendislik sistemlerinin tasarımı ve analizinde deney yapma ve hesaplama olmak üzere iki temel yaklaşım vardır. Bunlardan ilki, tipik olarak rüzgâr tüneline veya başka yerlerde test edilecek modellerin yapımını gerektirirken ikincisi diferansiyel denklemlerin analitik veya sayısal olarak çözülmesini içerir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile rüzgâr tüneli testlerinde elde edilemeyen kayma gerilmeleri hız ve basınç dağılımları ile akışa ait akım çizgileri gibi akış alanı hakkındaki ayrıntılar elde edilebilir. HAD sayesinde dikkatlice kontrol edilen parametrik incelemeler yoluyla, deneysel çalışma için gerekli olan test sayısı düşürülerek ürün geliştirme süreci kısaltılabilir [25].

HAD ile laminar akışlar kolayca çözümlenebilirken, uygulamadaki türbülanslı akışları türbülans modellerini kullanmadan çözmek mümkün değildir. Türbülanslı akışları tam çözen genel bir türbülans modeli yoktur ve türbülanslı HAD çözümü, sadece türbülans

modelinin uygunluğu kadar iyidir. Bu sınırlamaya rağmen, standart türbülans modelleri uygulamadaki çoğu mühendislik problemlerinde makul çözümler vermektedir [25].

Bir akışkanın bir yüzey üzerinden akması durumunda oluşacak olan basınç, viskoz ve momentum kuvvetleri arasındaki ilişkiler Navier-Stokes eşitlikleri sayesinde belirlenir. Gerçek akışlar için bu eşitlikler sadece terimlerin çoğunun ihmal edildiği basit durumlar için analitik olarak çözülebilir. Kara taşıtlarıyla ilgili akışlar gibi karmaşık, üç boyutlu akışlar söz konusu olduğunda, bu eşitliklerin yaklaşık çözümlerinin elde edilmesi için sayısal metotların kullanılması gereklidir [25].

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yaklaşımı akışı iki bölgeye ayırmaktadır. Birincisi viskoz etkilerin ihmal edildiği ana akım, ikincisi ise viskoz etkilerin önemli hale geldiği sınır tabaka bölgesidir. Ana akım bölgesindeki akışın sadece basınç ve momentum etkilerine maruz kaldığı kabul edilir ve bu nedenle akış denklemleri tek bir lineer kısmi diferansiyel denkleme (Laplace denklemi) indirgenir. Sınır tabaka bölgesi gövde boyutlarıyla karşılaştırıldığında çok küçük kalır. Bu yüzden gövde şekli üzerindeki etkisi ihmal edilebilir. Ancak, akış ayrılması meydana geldiği zaman akışkan gövdeye daha uzun süre tutunamayacağı için akış basit analitik denklemlerle çözülemez. Başlangıçta, sayısal çözümler akış ayrılması meydana gelmediği durumlar için geçerlidir. Dolaylı olarak, ayrılmanın meydana geleceği yerin belirlenmesi ve herhangi bir sayısal çözüm için geçerliliğın devam etmesinin sağlanması mümkündür. Ayrılma noktası, gövde üzerinden akan havanın hızını, statik basıncını ve Reynolds sayısını değiştirdiğinden dolayı hesaba katılması için bazı düzeltmelere ihtiyaç duyulur [17].

Hesaplama teknikleri Ahmed (1998) tarafından en ince ayrıntısına kadar gözden geçirilmiştir. Başarılı bir şekilde kullanılan ilk HAD metodu bir taşıtın gövde yüzeyinin hücrelere bölündüğü lineer bir teknik olan sınır eleman metodudur. Üç boyutlu akış denklemleri komşu hücreler arasındaki sınır şartlarının bağdaştırılmasıyla birlikte lineer hale getirilir ve akış denklemleri her hücrenin merkezindeki hız ve basıncı hesaplamak için çözülür. Lineer olmayan metotlar, Sürtünmeyi ihmal eden Euler metotları Zaman ortalamalı viskoz (RANS) metotları, LES ya da DNS' yi kullanan süreksiz viskoz metotları olmak üzere üç kategoriye ayrılır [17].

Euler metotları girdapları hesaba katar fakat viskoziteyi ihmal eder. Navier-Stokes denklemleri üç boyutlu uzayda basınç, momentum ve viskoz kuvvetler arasındaki ilişkileri hesaba katar. Bunlar, süreklilik ve enerjinin korunumu denklemlerinin çözülmesini gerektirir. Zaman ortalımalı (RANS) metotlar, türbülans etkisini hesaba katmadığı için yardımcı modellere ihtiyaç duyar ve sonuçlar, türbülans alt modellerinin seçimi ve kullanımına kritik olarak bağlıdır. Bu nedenle, zaman ortalımalı basınç ve kuvvetin ortalama değerlerini hesaplar [17].

LES modelleri, akışın parçası olduğu için büyük girdapları hesaplarken küçük girdapların yerel akışına bağlı olmayan ‘universal’ bir karaktere sahip olduğunu kabul eder. En büyük karmaşık metotlar türbülansla ilgili hiç kabulleri olmayan ve süresiz Navier-Stokes denklemlerini tam çözen DNS metotlarıdır. DNS, deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında % 1-2’lik hatayla mükemmel sonuçlar verebilme kabiliyetine sahiptir, ancak milyon noktalara bölünmüş bir hücre yapısı hesaplama süresini arttırır. Bu hesaplama süresi süper bilgisayarlar için 24 saatlik zaman gerektirmektedir [17].

2.2.3. Türbülanslı Akışın Modellenmesi

HAD simülasyonlarıyla türbülanslı akışın modellenmesi çok zahmetli ve zaman alıcıdır. Çünkü, türbülanslı akış düzensizdir ve zamana bağlı olarak değişim gösterir. Günümüzde kullanılan bilgisayarlarla birlikte türbülanslı akışın tam çözülmesi imkânsızdır. Türbülans modelleri kullanılarak akış alanı, düşük kapasiteli bilgisayarla yaklaşık olarak çözülebilir. Bir türbülans modeli, akışla ilgili olan eşitlikleri düzenler ve türbülans etkilerinin ortalamasını dikkate alır. Daha sonra, akışla ilgili olan Reynolds-Ortalımalı Navier-stokes (RANS) eşitliklerini ortalama bir terim ve zamanla değişen terime ayırır. Herhangi bir türbülans modeli hiçbir zaman tam bir çözüm vermez, ancak en iyi türbülans modeli seçildiği zaman en doğru çözümler elde edilebilmektedir. Türbülans modelinin seçimi simülasyonda kullanılacak bilgisayarın kapasitesi ve ihtiyaç duyulan doğruluk derecesiyle ilgili bir sorundur [23].

2.2.3.1. Standart K- ε Türbülans Modeli

K- ε türbülans modeli türbülanslı akış alanını hesaplarken güvenli bir yakınsama sağladığı için endüstride en yaygın olarak kullanılan modeldir. Ancak, akış hızı ve basıncının hızlı bir şekilde değiştiği alanlarda yüksek hassasiyetli çözüm vermez. K- ε türbülans modeli bir Eddy Viskozite modelidir. Eddy Viskozite modeli, türbülans viskozitesi olan μ_t terimini kullanarak türbülanslı akışı modeller. Bu model, türbülans kinetik enerjisi terimi olan K , türbülans yayılım oranı olan ε terimine bağlı olan yarı ampirik bir metottur. ε için transport eşitliği fiziksel mantık yürütmeye türetilirken, K için transport eşitliği tam türetilir. K- ε türbülans modeli, bir RANS modelidir ve zaman ortalaması terimlerini kullandığı için çok kısa zaman adımları sırasında hız ve basınç gradyanlarındaki değişimleri dikkate almaz [24].

2.2.3.2. Realizable K- ε Türbülans Modeli

Akış alanının daha hassas bir çözümünü elde etmek için Realizable K- ε türbülans modeli geliştirilmiştir. Bu yeni model, türbülans viskozitesi, transport eşitliği ve yayılım oranı için yeni bir formülleştirmeye sahiptir. Standart K- ε türbülans modeli türetilirken akışın tam türbülanslı olduğu ve modelin sadece bu akış durumları için geçerli olduğu kabul edilir. Realizable K- ε türbülans modelinde ise normal ve moleküler gerilmeler biraz daha genişletilerek hesaba katılır [24]. Kinetik enerji, yayılım oranı ve türbülans viskozitesi arasındaki ilişki şu formülle tanımlanır;

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.12)$$

Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) denkleminin sağ tarafındaki ilave gerilme terimi olan $\tau_{ij,türbülans}$ ($-\rho \overline{u'_i u'_j}$), K- ε türbülans modelinde Boussinesq yaklaşımıyla birlikte modellenir;

$$\overline{-\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (2.13)$$

Reynolds ortalaması alınırken anlık Navier-Stokes eşitliklerindeki çözüm değişkenleri ortalama(grup ortalaması ya da zaman ortalaması) ve dalgalanma bileşenlerine ayrılır. Hız bileşenleri için;

$$\bar{u}_i = \frac{1}{T} \int_0^T u_i dt \quad (2.14)$$

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (2.15)$$

Aynı şekilde, basınç ve diğer skaler büyüklükler için yazılabilecek eşitlik;

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (2.16)$$

Boussinesq yaklaşımı ile birlikte modelleme yapmanın avantajı, türbülans viskozitesinin hesaplama maliyetinin daha düşük olmasıdır.

Realizable K- ε türbülans modelindeki K ve ε için genelleştirilmiş transport eşitlikleri sırasıyla şu şekildedir;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (2.18)$$

Bu eşitliklerde, “k” türbülans kinetik enerjisi ve “ ε ” yayılım oranıdır. “ G_k ” ortalama hız gradyanlarından dolayı üretilen kinetik enerjiyi temsil etmektedir. “ G_b ” kaldırma kuvvetlerinden dolayı üretilen türbülans kinetik enerjisidir. “ Y_M ” sıkıştırılabilir akıştaki dalgalanma genişlemesinin genel yayılım oranına katkısını temsil etmektedir. “ C_2 ” ve “ $C_{1\varepsilon}$ ” model sabitleri olup, “ σ_k ” ve “ σ_ε ” sırasıyla “k” ve “ ε ” için “Prandtl” sayılarını temsil etmektedirler. S_k ve S_ε kullanıcı kaynaklı kaynak terimleridir [24].

$$C_1 = \text{maksimum} \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}, \quad (2.19)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2.20)$$

Model sabitleri olan $C_{1\varepsilon}$, C_2 , σ_k , σ_ε ve C_μ değerleri şu şekildedir;

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2, C_\mu = 0.09$$

2.2.4. ANSYS Fluent Analizi

Bu çalışmada, akış alanını sayısal olarak hesaplamak için sonlu hacimler yöntemlerini kullanarak akışla ilgili eşitlikleri çözebilen Fluent 14.5 paket programı kullanılmıştır. Fluent paket programı 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 laminar ya da türbülanslı olması gibi faktörlere bağlıdır. Bu alışmada, Intel 3.5 GHZ İ7 işlemcili 16 GB n bellek özelliklerine sahip olan bilgisayar kullanılmış ve model taşıt etrafında gelişen akış türbülanslı olduğu için akışla ilgili en iyi sonuçları elde etmek için Realizable K- ε türbülans modeli seçilmiştir

2.2.4.1. Geometri

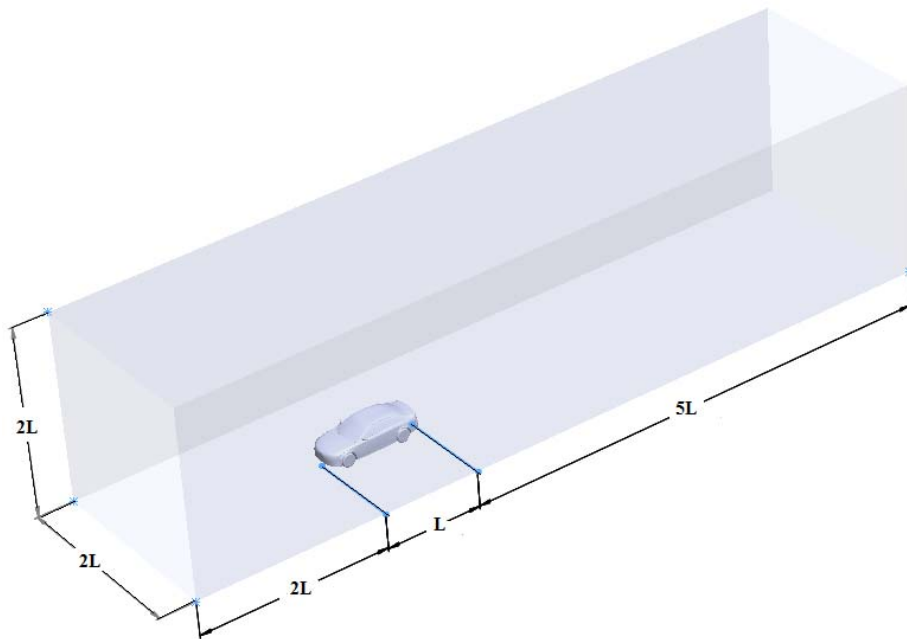
Simülasyon sırasında kullanılan taşıt modeli Solidworks tasarım programında modellendikten sonra ANSYS Fluent paket programının geometri kısmına aktarılmıştır. şekil 2.9’da görüldüğü gibi, Solidworks programında taşıt modeli tasarlanırken taşıtın tekerleklerinin jant bölmeleri, n soğutma kanalları gibi bazı bölümleri simülasyon için kullanılan bilgisayar kapasitesinin yetersizliğinden dolayı göz ardı edilmiştir. Fluent paket programının geometri kısmında taşıt modelinin gövdesi için gerekli iyileştirmeler yapılmıştır. Ayrıca, hesaplama süresini kısaltmak için taşıt modeli 1:24 ölçekli olacak şekilde kltlmştir.



Şekil 2. 9. HAD simülasyonunda kullanılan taşıt modelinin perspektif görünümü

2.2.4. 2. Domain

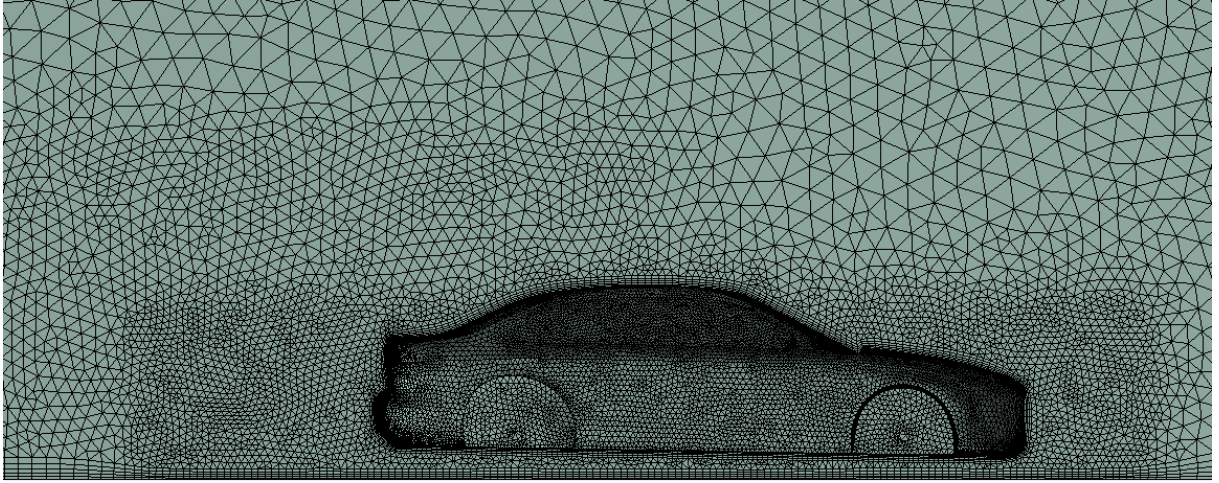
Hesaplama domaini ihmal edilebilir bir blokaj oranıyla birlikte tasarlanmıştır. Domainin boyutları, şekil 2.10’da görüldüğü gibi içerisine yerleştirilen arabanın uzunluğuyla orantılı olacak şekilde belirlenmiştir. Taşıt, domainin içerisine yerleştirildikten sonra domainden çıkartılmış ve taşıt gövdesi domain içerisinde oyuk olacak şekilde oluşturulmuştur.



Şekil 2. 10. HAD analizleri için kullanılan domaininin boyutları

2.2.4.3. Ağ Yapısı (Mesh)

Domain yüzeyleri ve araba gövdesinden oluşan yüzeyler üzerine hücreler oluşturulmuştur. Araba ve domainin yüzeylerinin kesiştiği yerlerde yapılandırılmış ağ hücreleri oluşturulmuştur. Şekil 2.11’de görüldüğü gibi, akış ayrılmasının meydana geldiği ve türbülans derecesinin yüksek olduğu bölgeleri iyi şekilde analiz etmek, araç gövdesinden kaynaklı tüm karmaşıklıkları gidermek ve hassas bir çözüm elde etmek için kritik yerlerdeki hücreler yeterli derecede küçük yapılmıştır. Bu yüzden, araç etrafında, arkasında ve alt tarafında yapılandırılmış ağ oluşturulmuştur. Orijinal araç modeli için ilk başta 1985036 tane mesh oluşturulmuş, daha sonra mesh sayısı 4848979’a çıkartılarak analizlerden elde edilen sonuçların mesh sayısından bağımsızlığı elde edilmeye çalışılmıştır. Yeniden tasarlanan araç modeli için ise 2540223 tane mesh için analiz yapıldıktan sonra, mesh sayısı 5110205’ e çıkartılarak analizlerden elde edilen sonuçların mesh sayısından bağımsızlığı elde edilmiştir.



Şekil 2. 11. Araba geometrisi için uygun ağ yapısı

2.2.4.4. Sınır Şartları

Ağ yapısını oluşturduktan sonra yapılacak olan işlem sınır şartlarının belirlenmesidir. Çizelge 2.4’ te görüldüğü gibi giriş sınır şartı olarak hız girişi, çıkış sınır şartı olarak basınç çıkışı seçilmiştir. Simülasyonlarda kullanılan bilgisayarın, analiz işlemleri için yeterli kapasiteye sahip olmadığı ve simülasyonların uzun zaman almaması için domain ikiye bölünmüş ve bu yüzden domainin orta düzlemi için simetri sınır şartı

seçilmiştir. Domainin diğer tarafları ve taşıtın tüm yüzeyleri için kaymanın olmadığı sabit duvar sınır şartları seçilmiştir.

Çizelge 2. 4. Sınır şartları

Yüzey	Hareket durumu	Tipi	Şart
Sol taraf	Sabit	Duvar	Kayma yok
Orta düzlem	Sabit	Simetri	-
Üst taraf	Sabit	Duvar	Kayma yok
Alt taraf	Sabit	Duvar	Kayma yok
Giriş tarafı	Sabit	Hız girişi	5-70 m/s
Çıkış tarafı	Sabit	Basınç çıkışı	0 Pa
Taşıt yüzeyleri	Sabit	Duvar	Kayma yok

2.2.4.5. 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 [24].

2.2.4.6. Fluent Çözümleyici

Fluent paket programının yazılımında basınç merkezli ve yoğunluk merkezli olmak üzere iki tür çözümleyici vardır. Sıkıştırılamaz ve düşük hızlı akış alanlarının çözümü için genellikle basınç merkezli çözümleyici tercih edilmektedir. Akış analizini yapmak için, domain farklı ağ yapısına sahip olan ayrık kontrol hacimlerine bölünür. Her kontrol hacmi için ilgili eşitlikler her iterasyon için doğrusal hale getirilir ve çözüm yapan cebirsel bir eşitlikle birleştirilir. Daha sonra ilgili eşitliklerin her biri ayrı ayrı (Simple ya da Simplec) ya da kullanılan algoritmaya bağlı olarak birleştirilerek (Coupled) çözülebilir. Simple metodu, akışın sürekli ve simülasyon için kullanılan bilgisayar kapasitesi sınırlı olduğu

zaman seçilmektedir. Coupled metodu, daha iyi yakınsama veren daha güçlü ve güvenli bir metot olduğu için simülasyonlar için seçilmiştir. Geçiş bölgesinde çalışıldığı zaman Simplec ya da Piso tercih edilir. Sürekli rejimli simülasyonlar için Simplec kullanılması, belirsizliklere yol açmaktadır [24].

2.2.4.7. Ayrıklaştırma

Akış alanını analiz etmek için tüm eşitliklerin integralleriyle yazılması ve tüm domainin küçük hücrelere bölünmesi gerekir. Her hücre 6 yüzeyden oluşur ve her hücredeki akış komşu hücrelerine bağlı olarak gelişir. Eşitlikleri her yönde iki komşu hücreyi kullanarak çözdüğü için simülasyonlarda Second Order Upwind hesaplama metodu seçilmiştir. Second Order Upwind hesaplama metodu, First Order Upwind'e göre daha doğru bir çözüm yapmakta, fakat daha fazla bilgisayar kapasitesi kullanmaktadır [24].

2.2.4.8. Simülasyon

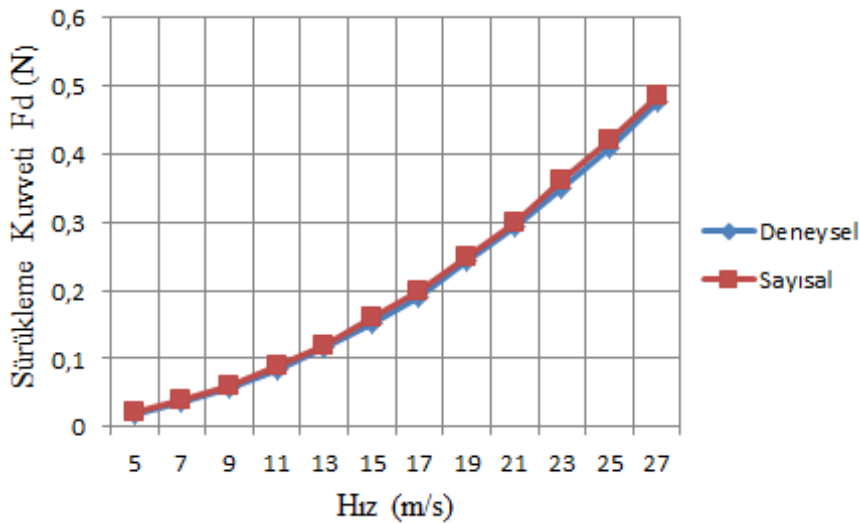
1:24 ölçekli model için yapılan analizlerde iterasyon sayısının 2000 olması, düşük kalıntı (Residual) değerleri sağladığı için yeterli görülmüştür. Sürüklenme katsayısının Reynolds sayısından bağımsızlığını sağlamak için 1:1 ölçekli model için yapılan analizlerde ise iterasyon sayısının 3000 olması uygun görülmüştür. Yapılan analizlerde sürüklenme katsayısı ve kaldırma katsayısı değerleri çok küçük bir hatayla yakınsamıştır.

3. BULGULAR

Sayısal çalışmalardan elde edilen verilerin doğruluğunu test etmek için düşük hızlı bir rüzgar tüneline deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen verilerin birbiriyle tam uyumlu olup olmadığını tespit etmek için, deneysel ve sayısal çalışmalar için tünele veya domain içerisine giren havanın hızı 2 m/s'lik artışlarla birlikte 5-27 m/s hız aralığında seçilmiştir. Sürüklenme katsayısının Reynolds sayısına olan bağımsızlığını tespit etmek için sayısal çalışmalarda domaine içerisine giren havanın hızı 70 m/s' ye kadar yükseltilmiştir. Daha sonra, sayısal çalışmada kullanılan araç modeli ve domainin boyutları 1:24 ölçekten 1:1 ölçeğe kadar arttırılarak Reynolds sayısı artırılmış ve domain içerisine giren havanın hızı 40 m/s ve 50 m/s seçilerek sayısal çalışmalar tekrar yapılmıştır. Bu çalışmadan sonra, 1:1 ölçekli taşıt modelinin alt tarafına, arkaya doğru 3,3 derece eğimli olan bir difüzör kanalı açılmış ve bu difüzör kanalının taşıt modelinin aerodinamik etkinliğine etkisi incelenmiştir. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen verilerin havanın giriş hızı ve Reynolds sayısına bağlı değişimi grafiklerle gösterilmiştir.

3.1. Sürüklenme Kuvveti

Şekil 3.1' de değişik hava giriş hızlarına bağlı olarak taşıt modeline etki eden sürüklenme kuvvetinin değişimi gösterilmiştir. Sayısal ve deneysel çalışmadan elde edilen sürüklenme kuvveti verilerinin birbiriyle uyum içerisinde olduğu anlaşılmaktadır.

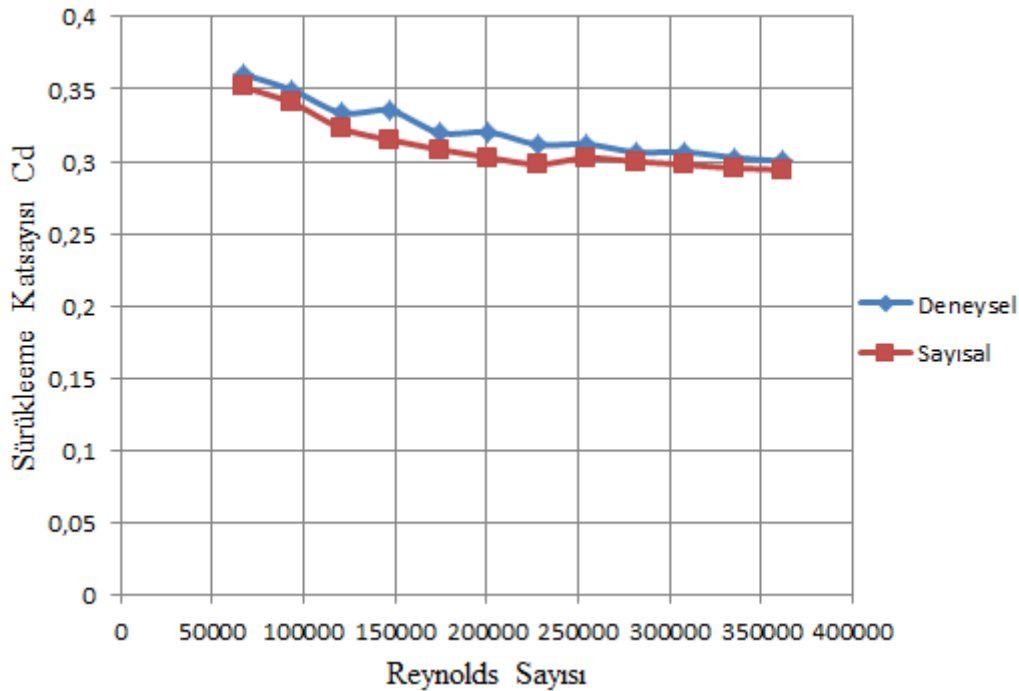


Şekil 3. 1. Sürüklenme kuvvetinin tünel girişindeki hava hızına bağlı değişimi

Tünel veya domain içerisine giren havanın hızı arttığı zaman deneysel ve sayısal çalışmadan elde edilen sürüklenme kuvveti verileri arasındaki uyum derecesi daha da artmaktadır. Hava giriş hızının artmasıyla birlikte taşıt modeline etki eden sürüklenme kuvvetinde parabolik bir artış olmaktadır. Bu şekildeki değişim, taşıt modeline etki eden sürüklenme kuvvetinin havanın giriş hızının karesiyle doğru orantılı olmasından kaynaklanmaktadır.

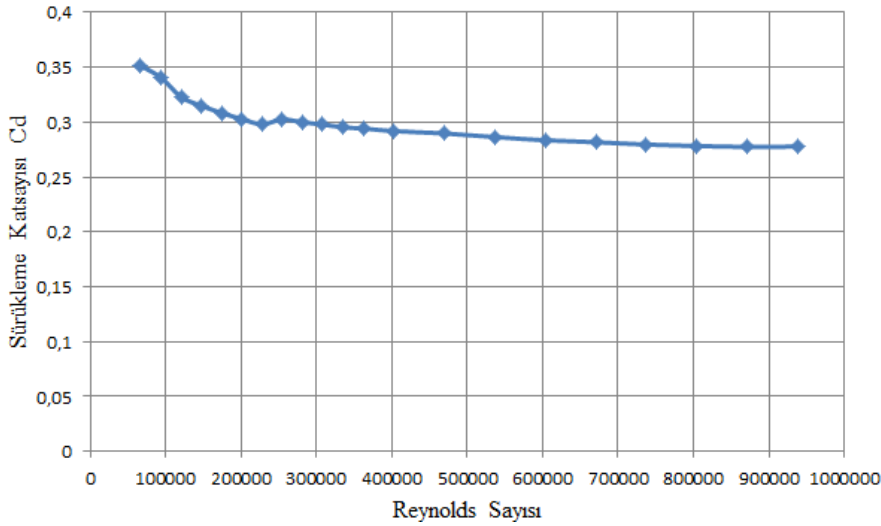
3.2. Sürüklenme Katsayısı

Şekil 3.2’ de taşıt modelinin aerodinamik direnç kuvvetinin etkinlik derecesini gösteren sürüklenme katsayısının Reynolds sayısına bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. Düşük Reynolds sayılarında deneysel ve sayısal çalışmadan elde edilen sürüklenme katsayıları verilerinde kararsızlık olduğu tespit edilmiştir. Buna karşın, Reynolds sayısının artışına bağlı olarak her iki çalışmadan elde edilen sürüklenme katsayısı verilerinde kararlı bir değişim görülmekte ve Reynolds sayısı 350000’i geçtikten sonra sürüklenme katsayısının Reynolds sayısına bağlı olarak değişiminin sabitletme eğilimi içerisine girdiği grafikten anlaşılmaktadır.



Şekil 3. 2. Sürüklenme katsayısının Reynolds sayısına bağlı değişimi

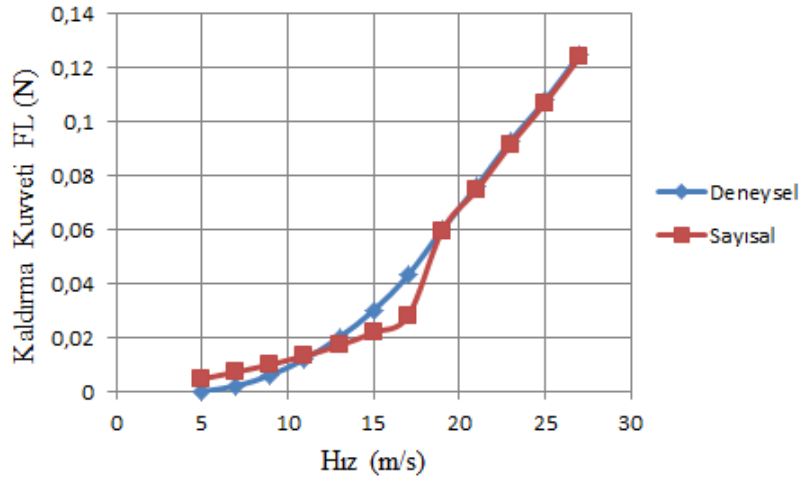
Sürüklenme katsayısının Reynolds sayısına bağlı olarak değişmediğini tespit etmek için rüzgar tüneli giriş hızını artırma mümkün olmadığı için daha yüksek giriş hızları için sadece sayısal çalışmalar yapılmıştır. 70 m/s 'lik giriş hızına kadar 5 m/s hız aralıklarıyla domaine giren havanın hızı arttırılmıştır. 70 m/s'nin üzerindeki giriş hızlarında taşıt modeli üzerinde oluşan maksimum hava hızı 100 m/s'nin üzerine çıktığı için Mach sayısı 0,3'ün üzerinde olabileceği için havanın sıkıştırılma özelliği ortaya çıkmakta ve sayısal çalışmadan elde edilen verilerin hatalı olacağına dikkat çekilmiştir. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi domaine giren hava hızının arttırılmasıyla Reynolds sayısı daha yüksek seviyelere çıkartılmış olmasına rağmen Reynolds sayısı bağımsızlığı sağlanamamıştır. Bu yüzden, Reynolds sayısını arttırmak için alternatif bir yol olarak taşıt modelinin ve domain boyutlarının 1:24 ölçekten 1:1 (tam) ölçeğe kadar büyütülmesi düşünülmüştür.



Şekil 3. 3. Sürüklenme katsayısının yüksek Reynolds sayılarındaki değişimi

3.3. Kaldırma Kuvveti

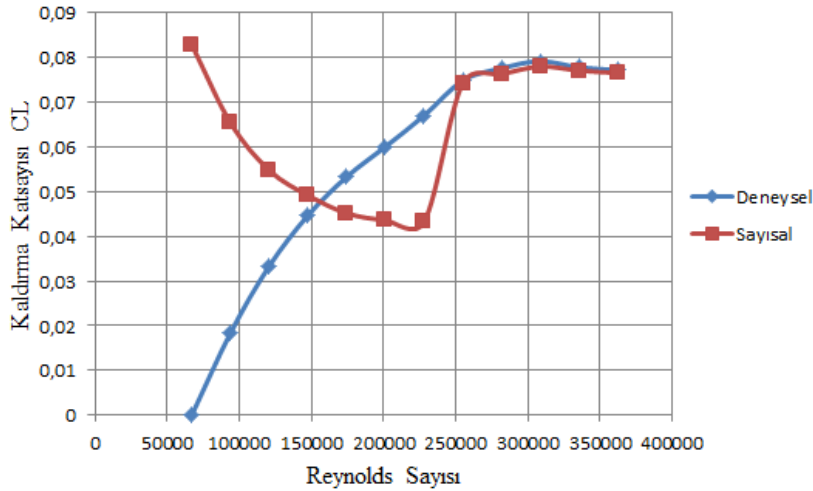
Şekil 3.4'te değişik tünel veya içerisine giren havanın değişik hızlarına göre taşıt modeline etki eden kaldırma kuvvetinin değişimi görülmektedir. Tünel veya domain içerisine giren havanın hızı yüksek hızlara arttırıldığında sayısal ve deneysel çalışmadan elde edilen kaldırma kuvveti verilerinin birbiriyle uyum içerisinde olduğu anlaşılmaktadır. Tünel veya domain içerisine giren havanın hızı düşüken sayısal ve deneysel çalışma verilerinin birbiriyle uyumsuz olmasının nedeninin sayısal çalışma için kullanılan türbülans modelinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Tünel veya domain içerisine giren havanın hızı arttığı zaman kaldırma kuvvetinin arttığı anlaşılmaktadır.



Şekil 3. 4. Kaldırma kuvvetinin tünel girişindeki hava hızına bağlı değişimi

3.4. Kaldırma Katsayısı

Şekil 3.5' te taşıt modeline etki eden kaldırma kuvvetiyle ilgili olan kaldırma katsayısının Reynolds sayısına bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.

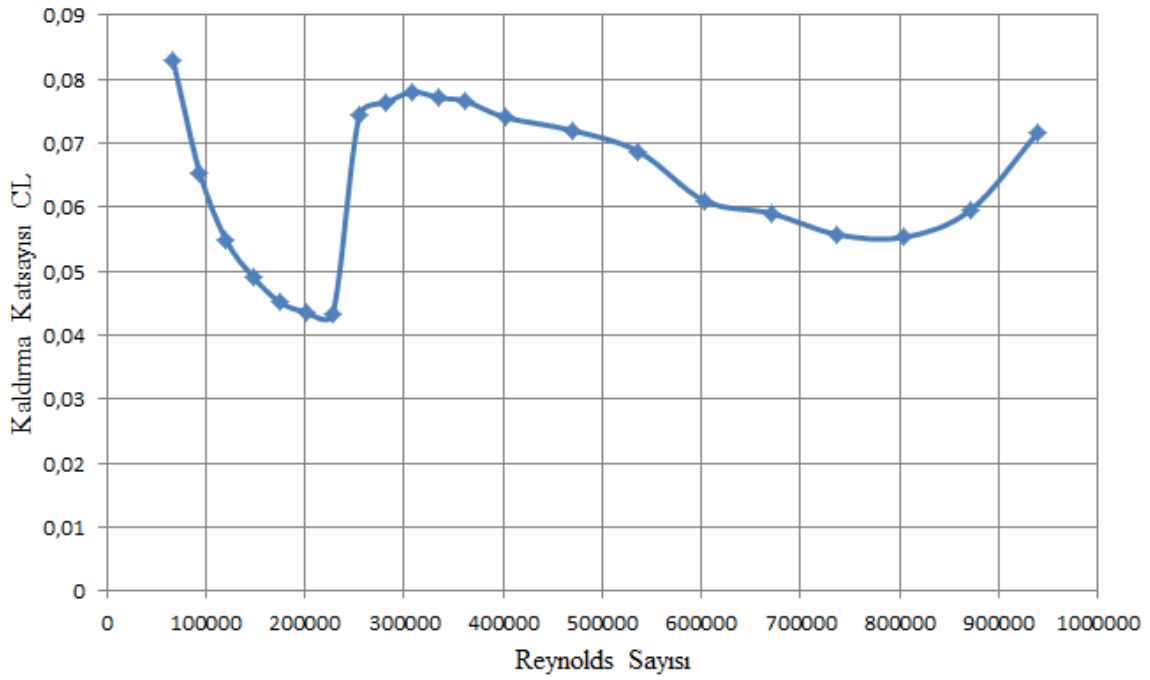


Şekil 3. 5. Kaldırma katsayısının Reynolds sayısına bağlı değişimi

Düşük Reynolds sayılarında deneySEL ve sayısal çalışmadan elde edilen kaldırma katsayısı verileri arasında uyumsuzluk olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin daha önce açıklandığı gibi sayısal çalışma için kullanılan türbülans modelinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü, düşük hava giriş hızlarında Reynolds sayısı düşük olduğu için taşıt modeli üzerindeki sınır tabakanın büyük bir kısmı laminerdir. Sayısal çalışmada kullanılan türbülans modeli laminlerden türbülansa geçiş bölgesine yakın olan bölgelerde akış problemlerini daha doğru çözümleyebildiği için geçiş bölgesine ($5 \cdot 10^5$) yakın olan

Reynolds sayılarında deneysel ve sayısal çalışmadan elde edilen kaldırma katsayısı verilerinin birbiriyle iyi derecede uyum içerisinde olduğu ve Reynolds sayısı 350000'i geçtiğinde kaldırma katsayısının sabitlenme eğilimi girdiği şekil 3.5' ten anlaşılmaktadır.

Sürüklenme katsayısında olduğu gibi kaldırma katsayısının Reynolds sayısı bağımsızlığını tespit etmek için çok daha yüksek Reynolds sayıları için sayısal çalışmalar yapılmış ve şekil 3.6' da görüldüğü gibi kaldırma katsayısının Reynolds sayısı bağımsızlığı yine elde edilememiştir. Reynolds sayısı 8.10^5 'in üzerine çıktığı zaman domain içerisindeki hava akışının sıkıştırılabilir olması söz konusu olduğu için kaldırma katsayısında şekilde görüldüğü gibi artışlar olduğu tahmin edilmektedir.

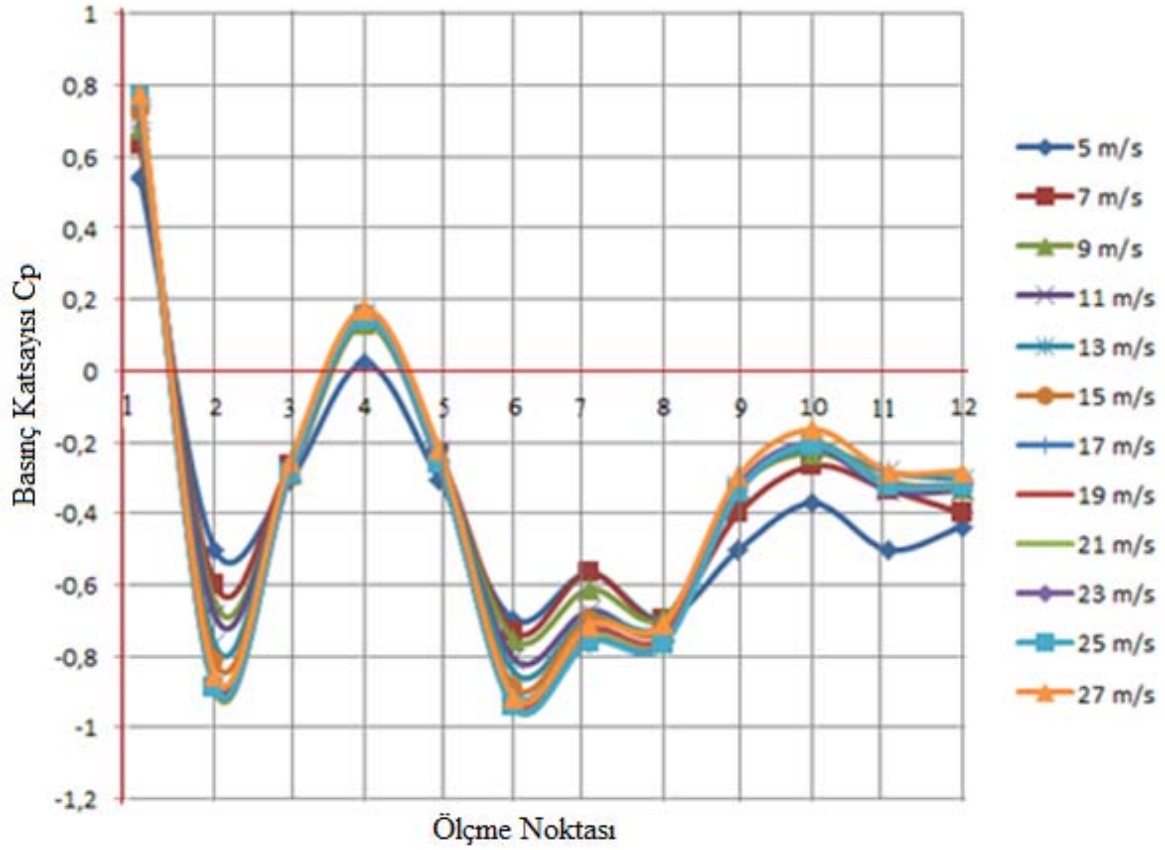


Şekil 3. 6. Kaldırma katsayısının yüksek Reynolds sayılarındaki değişimi

3.5. Basınç Katsayısı

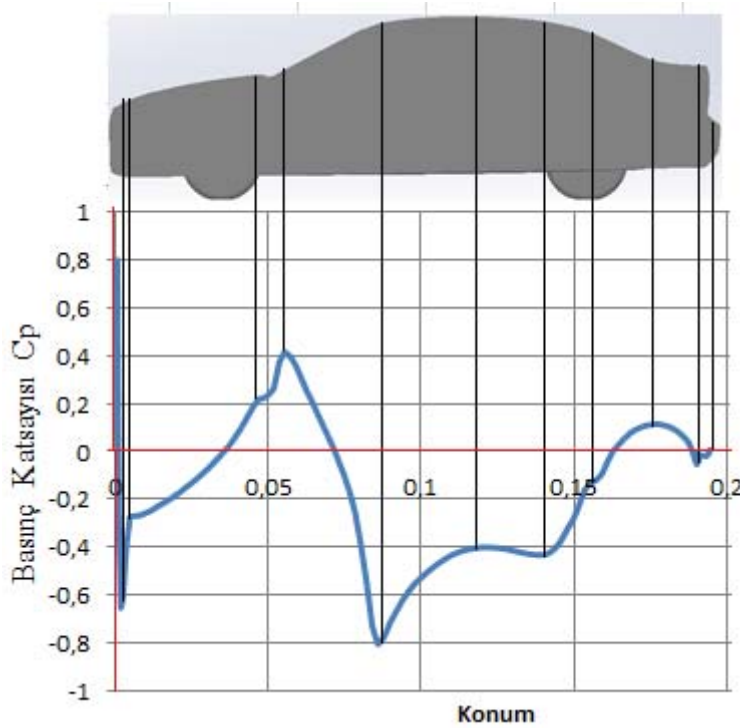
Taşıt etrafında meydana gelen akıştan dolayı taşıt gövdesinin üst yüzeyinde oluşan durma noktasının yerini ve taşıt modeline etki eden kaldırma kuvvetinin hangi yerde taşıt modelini ne şekilde etkilediğini tespit etmek için taşıt modeli üzerine orta düzlemi boyunca 12 adet basınç ölçme delikleri açılmıştır. Basınç ölçme deliklerine bağlı olan hortumlar sayesinde elektronik basınç ölçerle taşıt modelinin üst yüzeyinin değişik noktalarındaki basınçlar ölçülmüş ve taşıt modelinin üst yüzeyi üzerindeki basınç dağılımı grafiği

çizilmiştir. Şekil 3.7' deki grafikten, basınç katsayısının tünel içerisindeki serbest hava hızının artışına bağımlılığının azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda, hız artışı Reynolds sayısı ile doğru orantılı olduğu için Reynolds sayısı bağımlılığının da azaldığı grafikten anlaşılmaktadır.



Şekil 3. 7. Model üzerindeki ölçme noktalarından elde edilen basınç katsayılarının tünel girişindeki hava hızına bağlı değişimi

Şekil 3.8' de gösterilen basınç dağılımı grafiği modelin orta düzlemi boyunca üst yüzeyi için maksimum rüzgar tüneli serbest hava hızı olan 27 m/s' lik giriş hızı için sayısal yöntemle elde edilmiştir. Deneysel çalışmada taşıt üzerindeki basınç dağılımını belirlemek için sadece araç üzerindeki 12 noktadan ölçüm yapma imkânı olduğu için sayısal çalışmaya göre deneysel çalışma sonucu kritik basınç bölgeleri ve bu bölgelerdeki değerler tam olarak elde edilememiştir.

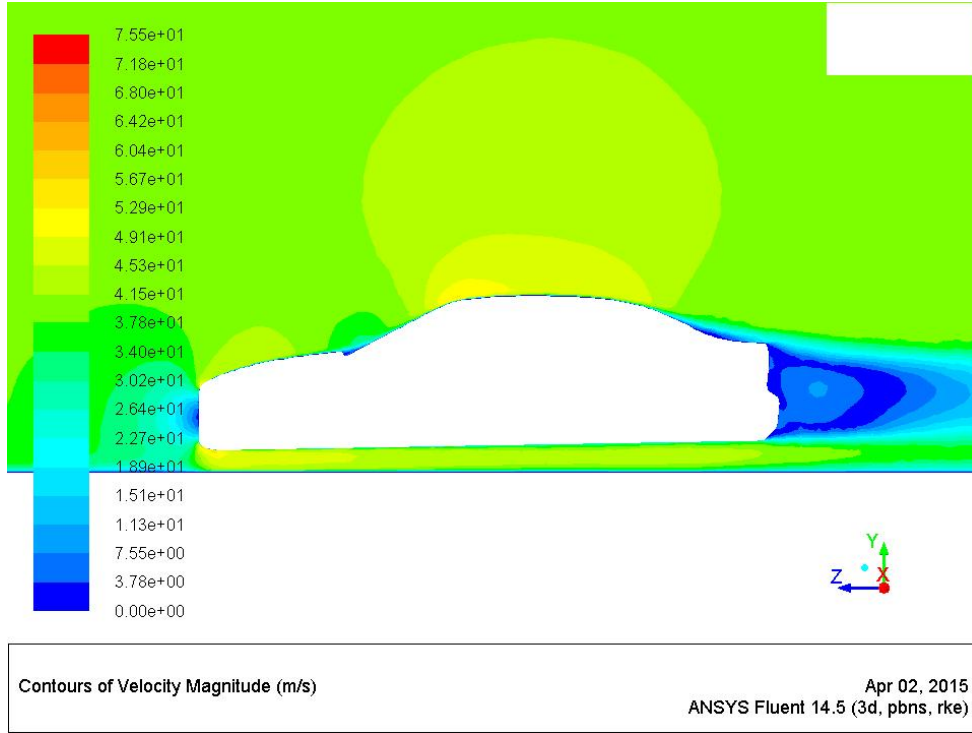


Şekil 3. 8. Modelin orta düzlemi boyunca üst yüzeyindeki basınç dağılımı

Grafik incelendiğinde, taşıt modelinin ön burnunda durma noktasının meydana geldiği görülmektedir. Taşıt modeli üzerinde etkili olan en yüksek pozitif kaldırma etkisinin ön camın üst kenarı ile tavanın başlangıç kenarının birleştiği yerde, en yüksek negatif kaldırma etkisinin ise ön camın alt kenarı ile kaputun birleştiği yerde meydana geldiği tespit edilmiştir. Bunun yanında, taşıt modelinin arka camının alt kenarı ile bagaj kapağının başlangıç kenarının birleştiği yerde hafif dereceli negatif kaldırma etkisinin olduğu grafikten anlaşılmaktadır.

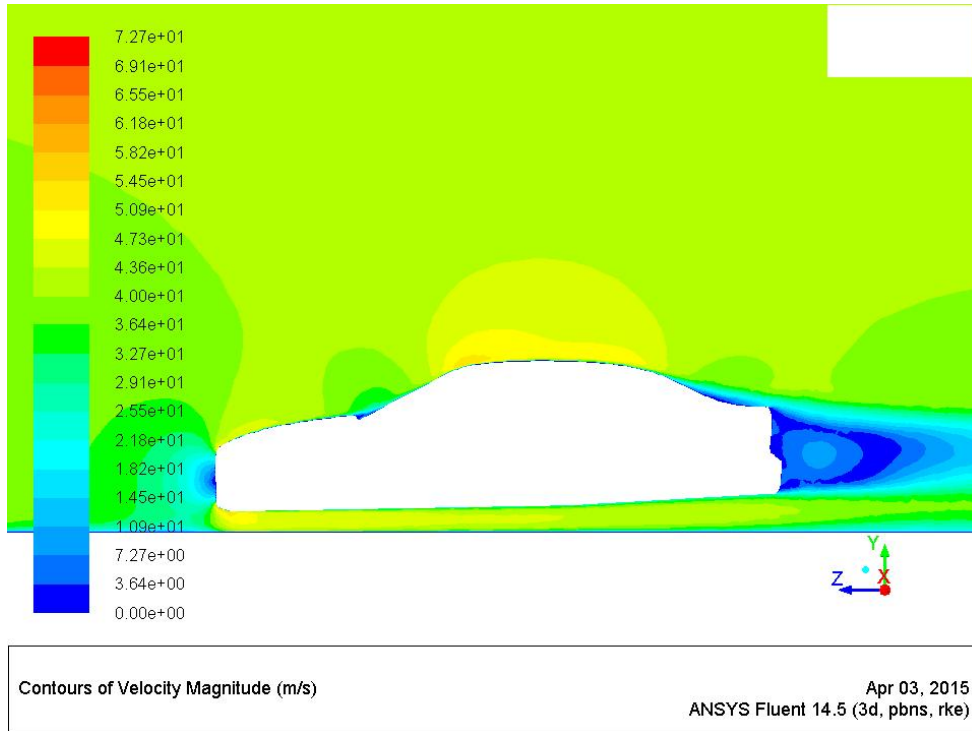
3.6.Simülasyon Sonuçları

Şekil 3.9'da görüldüğü gibi, aracın kaputu ve tavanı üzerinde yüksek bir hız bölgesi oluşmuştur. Bunun yanında kaput ile tavan arasında kalan bölgede ise meydana gelen akış ayrılmasının bir sonucu olarak düşük hız bölgesi oluşmuştur. Aracın ön burnu üzerinde hava akışında yavaşlama veya durma olduğu için düşük bir hız bölgesi oluşmuştur. Aracın arka tarafında ise akış ayrılması meydana geldiği için daha düşük hızlı bir akış bölgesi oluşmuş ve bu sayede art izi bölgesi oluşmuştur. Araç altında ise meydana gelen akış kısıtlamasından dolayı yüksek hız bölgesi oluşmuştur.



Şekil 3. 9. X=0, simetri eksenini boyunca orijinal araç üzerinde oluşan hız konturları

Şekil 3.10'da ise yeniden tasarlanan araç üzerindeki hız dağılımı görülmektedir. Difüzör kanalının başlangıcından itibaren aracın arka tarafına kadar aracın altından akan havanın hızının gittikçe azaldığı anlaşılmaktadır.



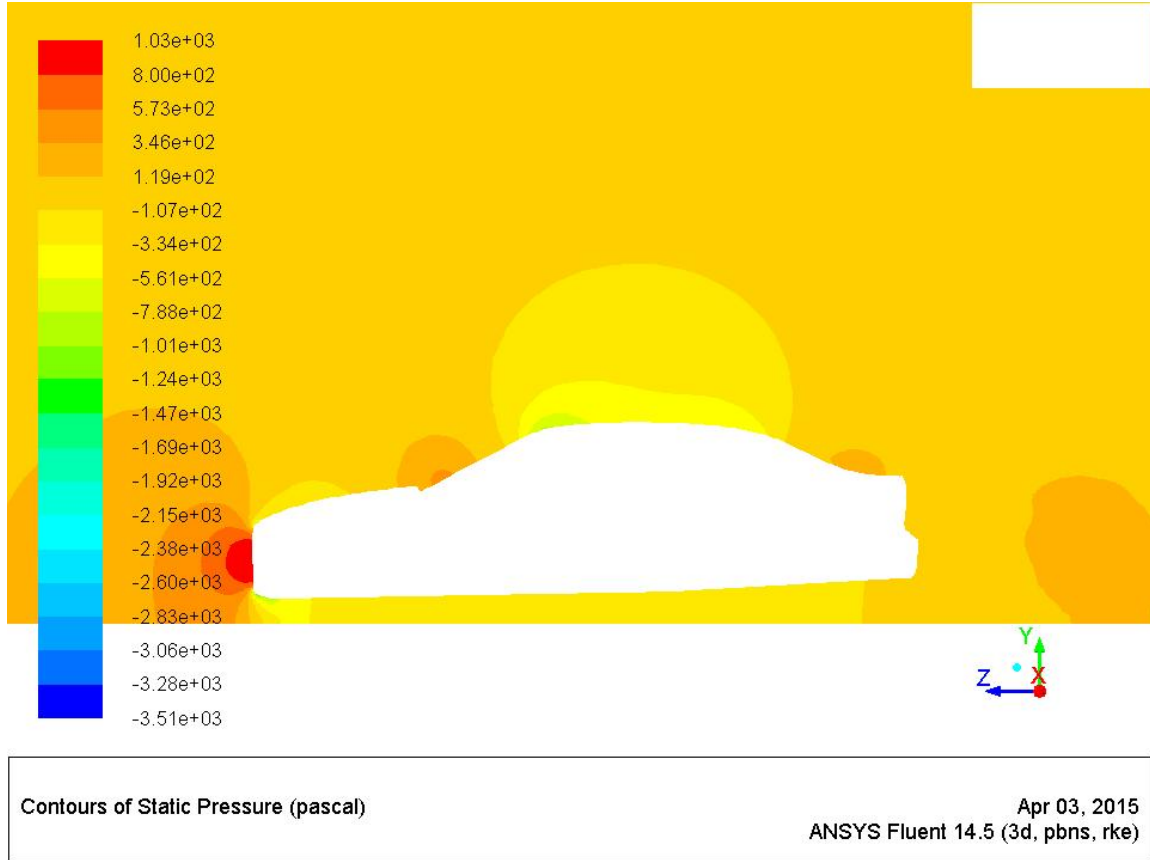
Şekil 3. 10. X=0, simetri eksenini boyunca yeniden tasarlanan araç üzerinde oluşan hız konturları

Şekil 3.11’de görüldüğü gibi, araç üzerinde yüksek hızların olduğu bölgelerde düşük basınç bölgesi, düşük hızların olduğu bölgelerde ise yüksek basınç bölgeleri oluşmuştur. Burada akış hızı ve basıncı arasında Bernoulli eşitliğinin sağlandığı anlaşılmaktadır. Bernoulli eşitliğine göre, aracın ön burnu üzerinde akış durması veya yavaşlaması olduğu için hız minimuma düşmüş, basınç ise maksimuma yükselmiştir.



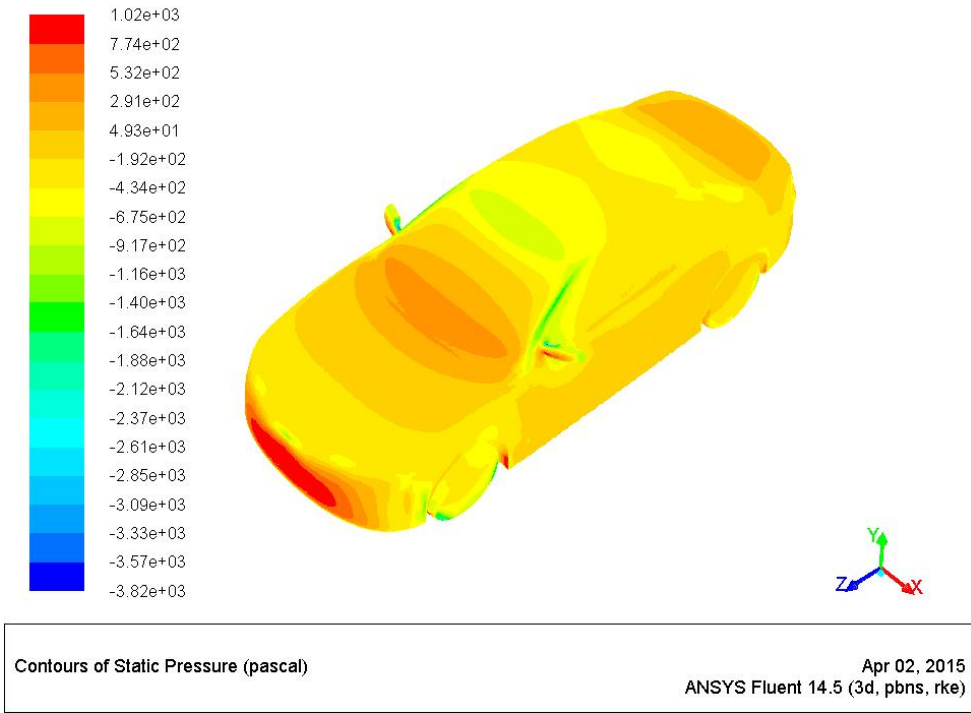
Şekil 3. 11. X=0, simetri eksenini boyunca orijinal araç üzerinde oluşan basınç konturları

Şekil 3.12’ de yeniden tasarlanan araç üzerindeki statik basınç dağılımı görülmektedir. Difüzör kanalının başlangıcına kadar yeniden tasarlanan aracın alt tarafında orijinal araca göre daha yüksek seviyeli negatif yönlü basınç olduğu anlaşılmaktadır. Ancak, yeniden tasarlanan aracın bagaj bölmesinin alt tarafındaki basıncın aracın arka uç kısmında arttığı görülmektedir.



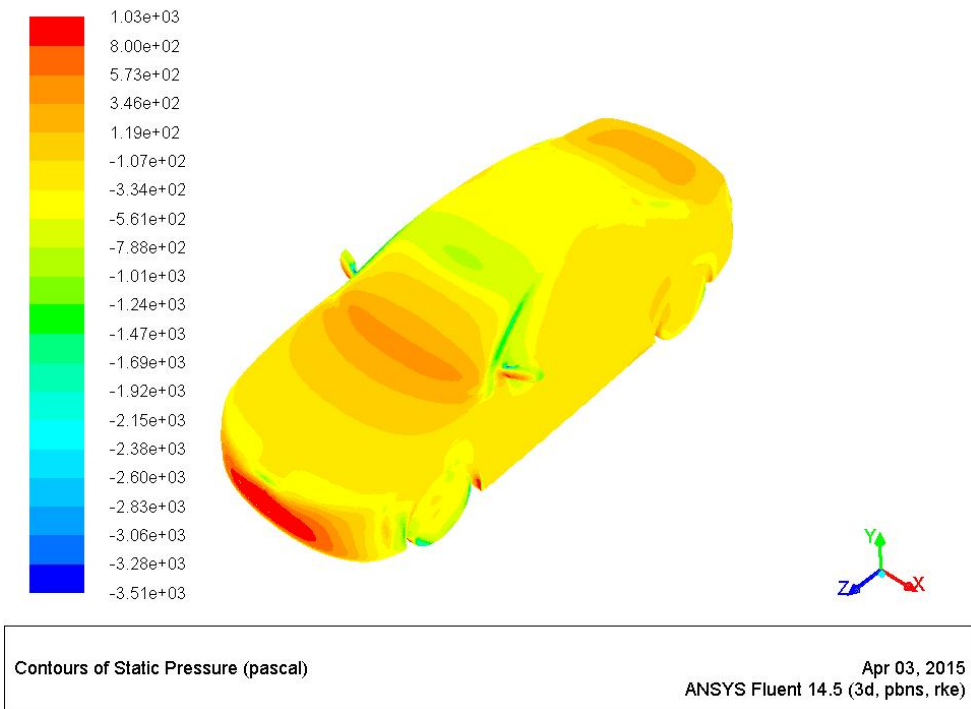
Şekil 3. 12. X=0, simetri eksenini boyuncu yeniden tasarlanan araç üzerinde oluşan basınç konturları

Şekil 3.13' te görüldüğü gibi aracın gövdesinin bütün yüzeyleri boyunca üzerinde oluşan statik basınç dağılımları gösterilmiştir. Şekilden anlaşılacağı gibi tekerleklerin ön taraflarında akış durmasından dolayı yüksek basınç bölgeleri oluşmuştur. Ön burun tarafında oluşan akış durmasından dolayı, hava yanlara doğru kaçmaya çalışmış ve bu yüzden yan taraflarda havanın statik basıncında düşme olmuştur. Hava kaput üzerinden geçerken basıncı azalmış, fakat ön cama ulaştığı zaman basıncında hızlı bir artış olmuştur. Ön camın başlangıcında yüksek basınca sahip olan hava ön cam üzerinden geçerken hızlanmış ve bu yüzden basıncında negatif seviyelere kadar düşme olmuştur. Bu basınç düşmesinden sonra havanın statik basıncının ön cam ile tavanın birleşme noktasında daha da düştüğü ve tavan boyunca devam ettiği şekilden anlaşılmaktadır. Bu yüzden, aracın tavanı boyunca araç üzerinde yukarı yönlü bir kaldırma etkisi oluşmuştur.



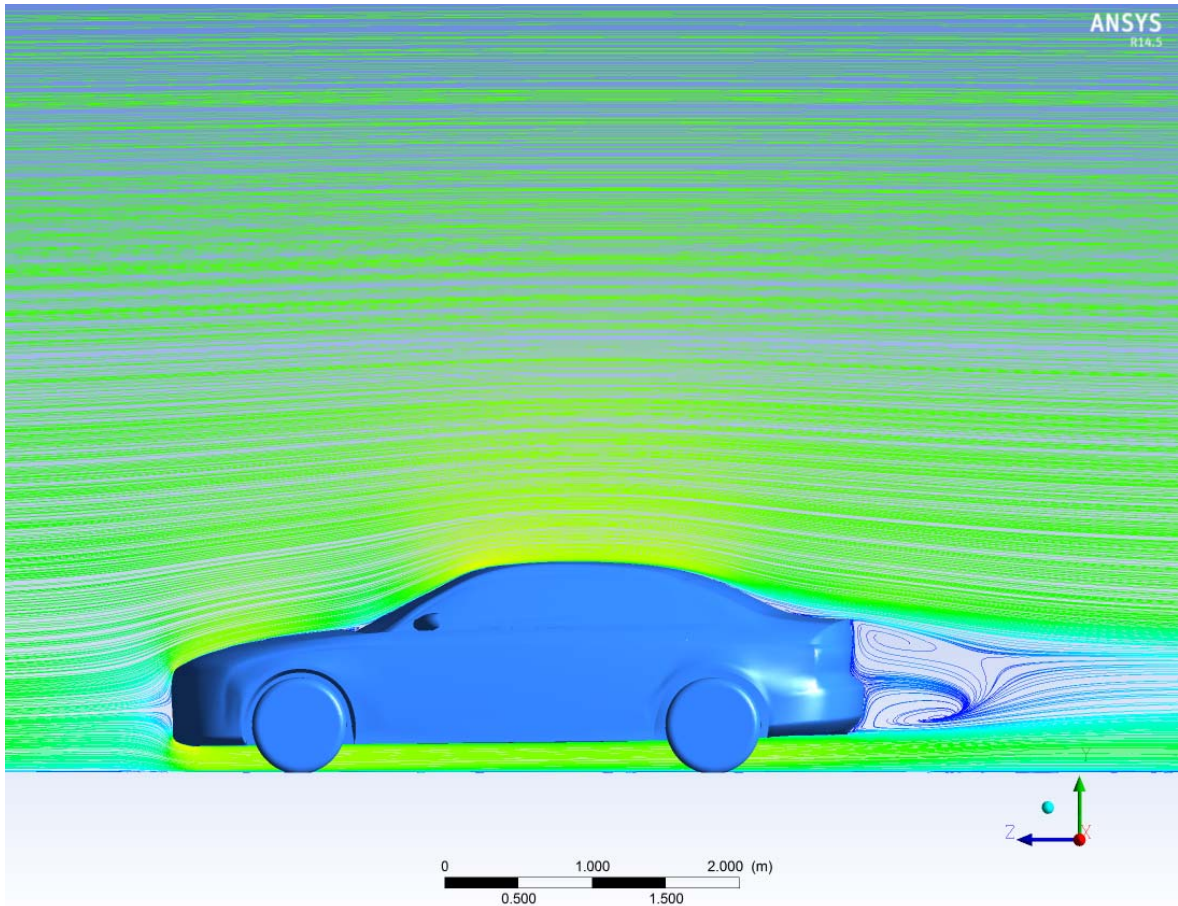
Şekil 3. 13. Orijinal aracın üst yüzeyleri boyunca meydana gelen statik basınç dağılımı

Şekil 3.14' te yeniden tasarımı yapılan aracın bütün yüzeyleri boyunca üzerinde oluşan statik basınç dağılımı gösterilmiştir. Orijinal araca göre aracın tavanı üzerinde daha uniform bir statik basınç dağılımı olduğu şekilden anlaşılmaktadır.



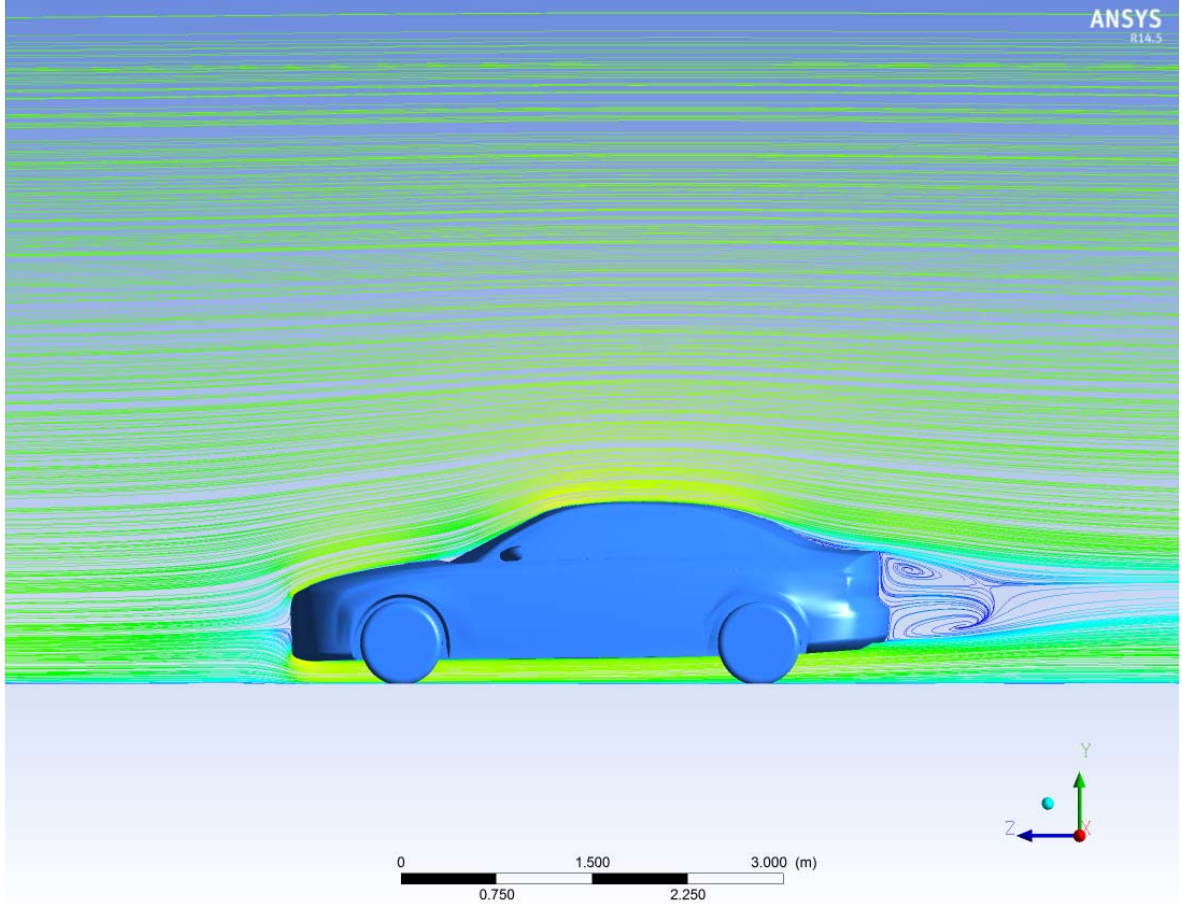
Şekil 3. 14. Yeniden tasarlanan aracın üst yüzeyleri boyunca meydana gelen statik basınç dağılımı

Şekil 3.15’de görüldüğü gibi aracın orta düzlemi boyunca araç üzerinde oluşan akım çizgilerinin yüzey geometrisine bağlı olarak nasıl değiştiği gösterilmiştir. 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. Arka tarafta 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.



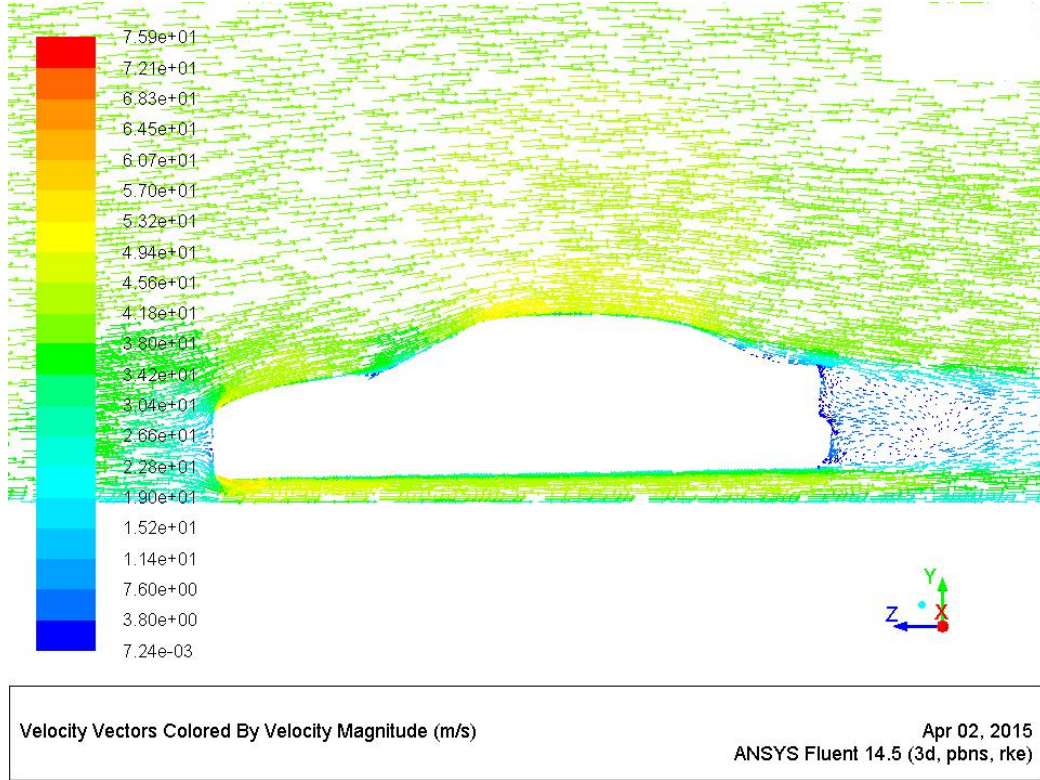
Şekil 3. 15. X=0, simetri eksenini boyunda orijinal araç üzerinde oluşan akım çizgileri

Şekil 3.16’ da ise yeniden tasarlanan araç üzerinde oluşan hava akım çizgileri görülmektedir. Aracın arka tarafında meydana gelen akış ayrılması alanın orijinal araca göre daha az olduğu şekilden anlaşılmaktadır. Bu durum aerodinamik direnç kuvvetine katkısı olan basınç direncinde azalmaya yol açmıştır.

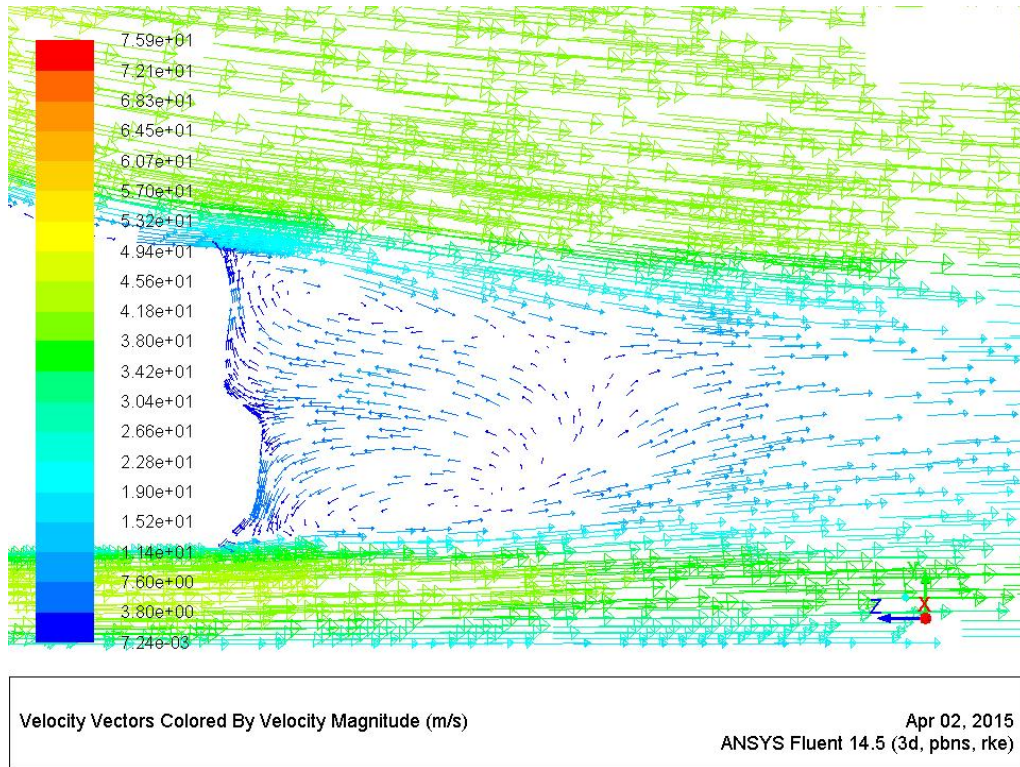


Şekil 3. 16. $X=0$, simetri eksenini boyunca yeniden tasarlanan araç üzerinde oluşan akım çizgileri

Şekil 3.17’ 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 şekil 3.18’ de görüldüğü gibi art izi bölgesi oluşturmuştur. Bu bölgede havanın aracın gövdesiyle teması zayıflamış ve yüzey sürtünme direncinde azalma olmuştur.

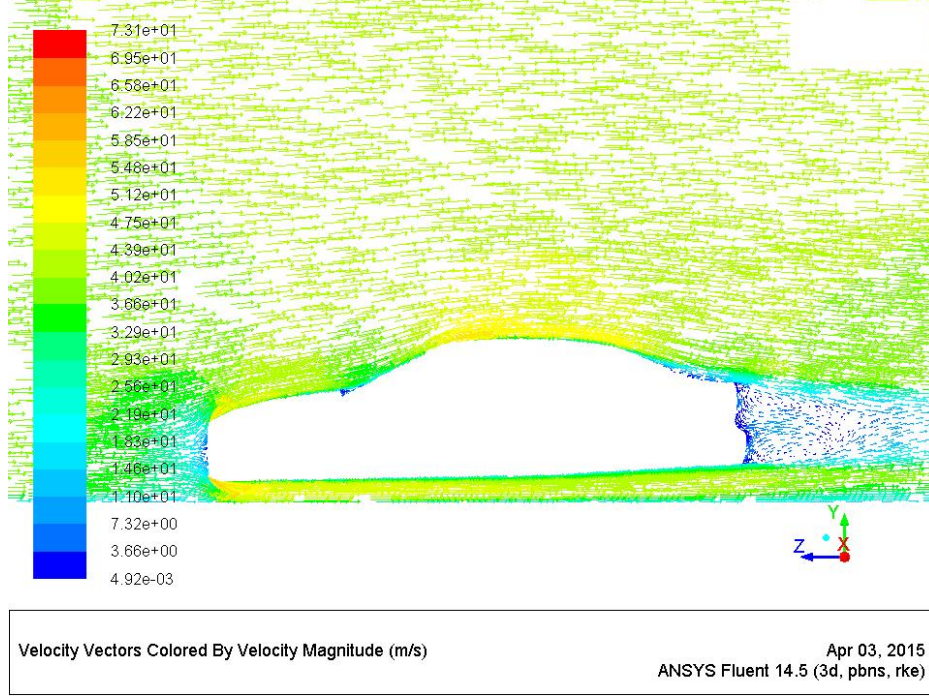


Şekil 3. 17. $X=0$, simetri ekseni boyunca orijinal araç üzerinde oluşan hız vektörleri

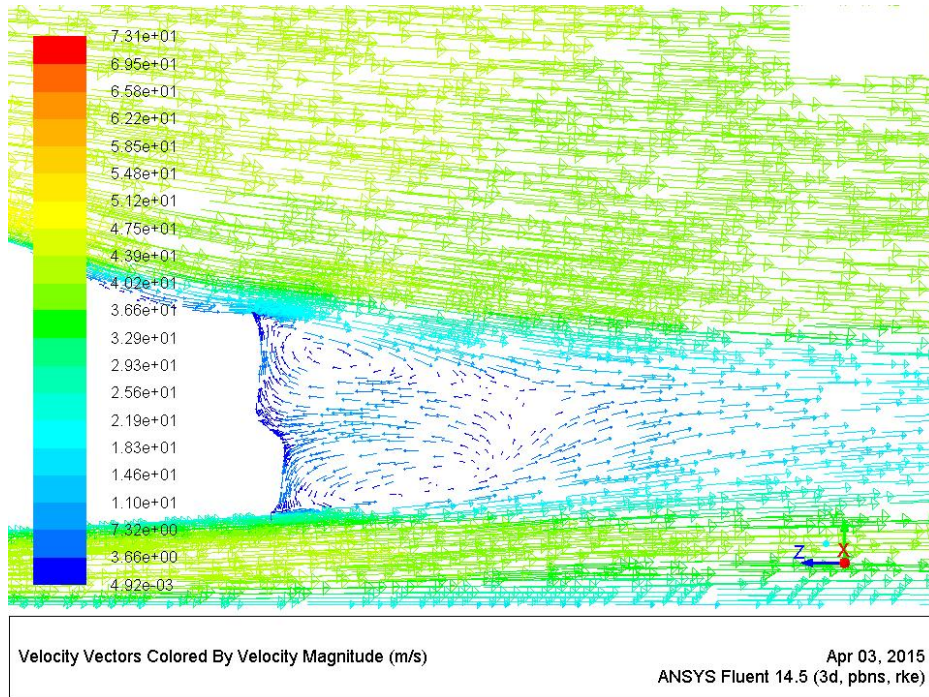


Şekil 3. 18. $X=0$, simetri ekseni boyunca orijinal aracın arka tarafında oluşan art izi bölgesi

Şekil 3.19’ da ise yeniden tasarlanan araç üzerinde oluşan hız vektörleri görülmektedir. Orijinal araç ile karşılaştırıldığında, aracın arka tarafındaki art izi alanının daha az olduğu şekil 3.20’ den daha iyi anlaşılmaktadır.

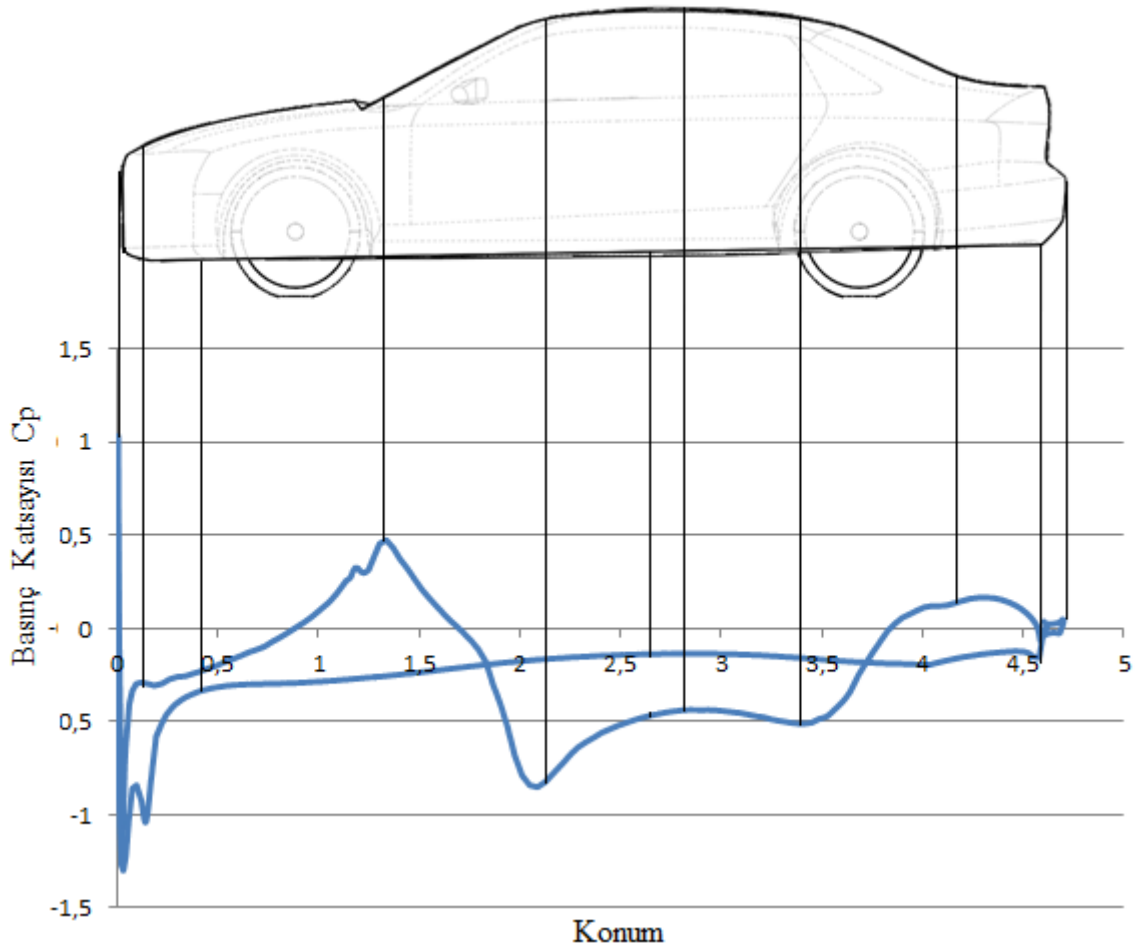


Şekil 3. 19. X=0, simetri ekseni boyunca yeniden tasarlanan araç üzerinde oluşan hız vektörleri



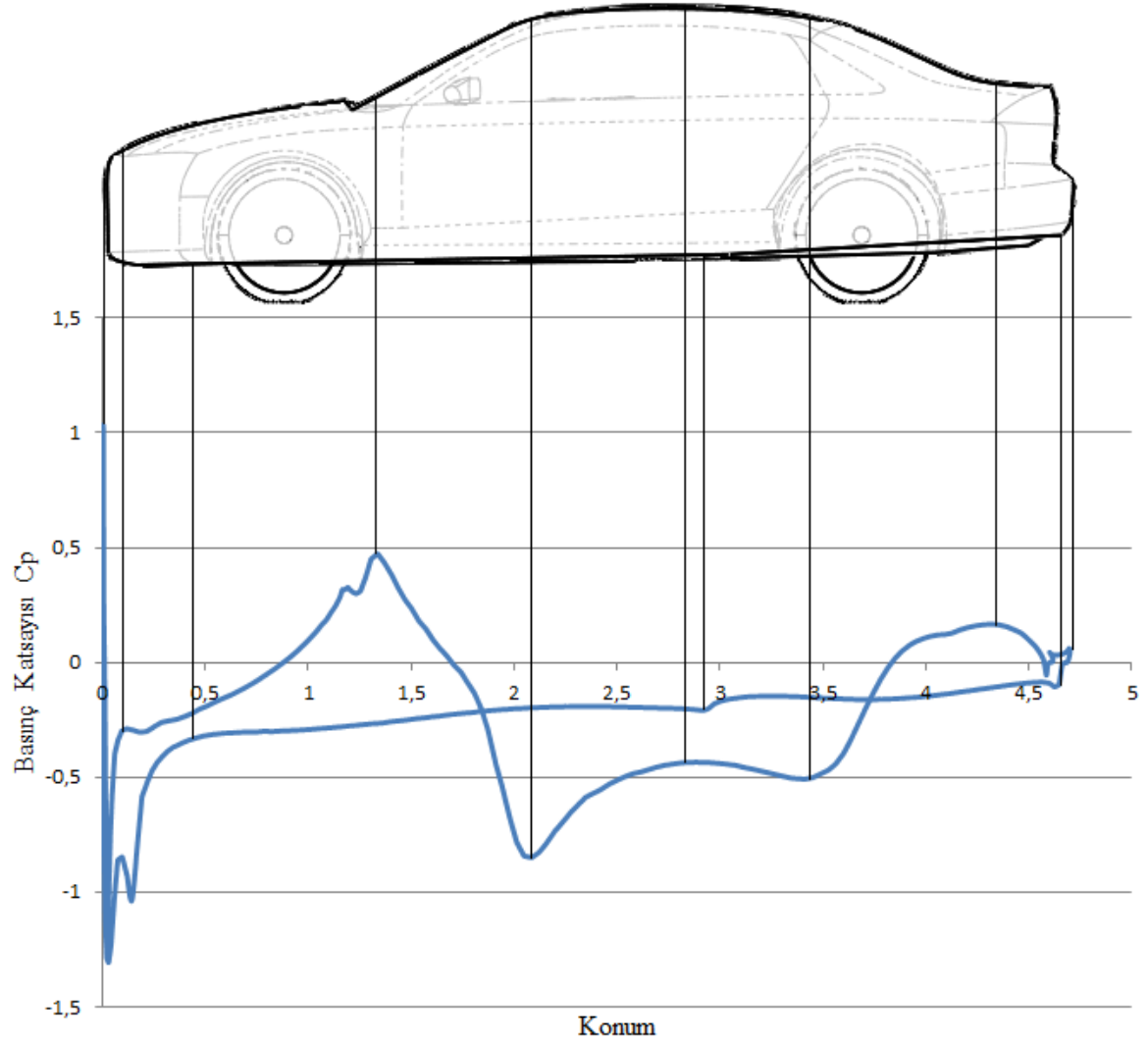
Şekil 3. 20. X=0, simetri ekseni boyunca yeniden tasarlanan aracın arka tarafında oluşan art izi bölgesi

Şekil 3.21’de görüldüğü gibi aracın orta düzlemi boyunca araç üzerinde oluşan basınç dağılımı basınç katsayısı cinsinden gösterilmiştir. En yüksek yukarı yönlü kaldırma etkisinin ön cam ile tavan başlangıcının kesiştiği yerde meydana geldiği görülmektedir. Yukarı yönlü kaldırma etkisi tavan başlangıcından itibaren arabanın arka tarafına doğru gidildikçe azalarak devam etmektedir. Ön cam ile kaputun kesiştiği yerde aşağı yönlü kaldırma etkisinin olduğu görülmektedir. Aracın alt tarafında ise meydana gelen kısıtlanmış akıştan dolayı arkaya doğru gidildikçe statik basınçta bir azalma olmuştur.



Şekil 3. 21. X=0, simetri eksenini boyuncaya orijinal aracın tüm gövdesinde oluşan basınç dağılımı

Orijinal araçla karşılaştırıldığında, yeniden tasarlanan aracın orta düzlemi boyunca alt tarafında difüzör kanalının başlangıcına kadar daha yüksek seviyeli negatif yönlü basınç dağılımı olduğu Şekil 3.22’den anlaşılmaktadır. Ancak, difüzör kanalı boyunca aracın arka tarafına doğru negatif yönlü basınç dağılımı gittikçe azalmıştır. Yani, difüzör kanalının başlangıcından itibaren aracın arka tarafına doğru gidildikçe statik basınçta artış olmuştur.



Şekil 3. 22. X=0, simetri eksenini boyunca yeniden tasarlanan aracın tüm gövdesinde oluşan basınç dağılımı

Çizelge 3. 1. Simülasyon sonucu elde edilen sürüklenme ve kaldırma katsayısı değerleri

Taşıt Modeli	Sürüklenme Katsayısı				Kaldırma Katsayısı
	Gerçek	Hesaplanan	% hata	% azalma	Hesaplanan
Orijinal taşıt modeli	0,27	0,2401	11,07	-	0,007012
Yeniden tasarlanan taşıt modeli	-	0,2352	-	2,04	-0,021512

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada 1:24 ölçekli bir taşıt modelinin aerodinamik etkinliğiyle doğrudan ilişkisi olan sürüklenme ve kaldırma katsayıları rüzgar tünel testleri ve sayısal metotlarla belirlenmeye çalışılmıştır. Rüzgar tünel testleri ve sayısal metotlarla elde edilen sonuçların karşılaştırması yapılmıştır. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçların birbiriyle uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, sayısal çalışma sonucu elde edilen veriler sayesinde taşıt modeli etrafındaki akış olayları görsel olarak incelenmiştir. Çalışmayla ilgili elde edilen sonuçlar şunlardır;

- a. Sayısal çalışmada kullanılan türbülans modeliyle hesaplanan verilerin deneysel çalışmadan elde edilen verilerle uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir.
- b. Çalışmada kullanılan taşıt modeli gibi karmaşık geometrili taşıt modellerinin aerodinamik etkinliğini belirlemek için düşük hızlı, küçük boyutlara sahip rüzgar tünelleri kullanıldığı zaman deneysel çalışma sonucu elde edilen sürüklenme ve kaldırma katsayılarının Reynolds sayısı bağımsızlığının sağlanamadığı belirlenmiştir.
- c. Sayısal çalışmada kullanılan domain ve taşıt modelinin geometrik boyutları tam ölçekli yapılarak sürüklenme ve kaldırma katsayıları Reynolds sayısından bağımsız olacak şekilde hesaplanmıştır.
- d. Taşıt modeli üzerinde etkili olan en yüksek pozitif kaldırma etkisinin ön camın üst kenarı ile tavanın başlangıç kenarının birleştiği yerde, en yüksek negatif kaldırma etkisinin ise ön camın alt kenarı ile kaputun birleştiği yerde meydana geldiği tespit edilmiştir.
- e. Sayısal çalışmada kullanılan taşıt modelinin geometrisi basitleştirildiği için sayısal çalışmadan elde edilen sürüklenme katsayısı değeri gerçek değerine göre yaklaşık % 11 hatayla hesaplanmıştır.
- f. Taşıt modelinin alt tarafına açılan bir difüzör kanalı sayesinde taşıt modelinin sürüklenme katsayısının yaklaşık % 2 azaltılabileceği, kaldırma katsayısının ise negatif seviyeye kadar önemli ölçüde azaltılabileceği tespit edilmiştir.

5. ÖNERİLER

Yapılan çalışma, taşıtların aerodinamik etkinliğiyle ilgili olan sürüklenme ve kaldırma katsayılarının belirlenmesi ve azaltılması açısından farklı bir çözüm önerisi sunmaktadır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar incelendiğinde ileride yapılacak çalışmalar için öneriler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

Çalışmada kullanılan taşıt modelinin aerodinamik etkinliğiyle ilgili verileri gerçeğe daha yakın belirlemek için yüksek donanımsal ve işlevsel özelliklere sahip bilgisayar kullanarak farklı büyüklükteki ağ yapısı ve farklı türbülans modelleriyle modelleme yapılabilir.

Daha büyük boyutlara sahip taşıt modeli kullanılarak yapılan sayısal çalışmaların doğruluğunu test etmek için uygun boyutlara sahip ve daha hassas olan rüzgar tünelleriyle deneyler yapılabilir.

Günümüzde gelişen sensör teknolojisi ve çok küçük hacimlerde dijital veri depolayabilme sayesinde akış ortamında meydana gelen fiziksel olayla ilgili veri toplayabilme mümkün olabilmektedir. Bu bakımdan gerçek bir taşıt modeli üzerine sensörler yerleştirilerek taşıtın aerodinamik etkinliğiyle ilgili istenen ölçümler yapılabilir.

Çalışmada kullanılan taşıt modelinin daha farklı bir şekilde tasarlanmasıyla aerodinamik etkinliği artırılabilir. Taşıt modeline etki eden sürüklenme kuvvetini azaltmak için daha iyi akım çizgili bir gövde tasarımı yapılabilir. Bunun yanında, taşıtın yol tutuşunu arttırmak için ön ya da arka tarafına sürüklenme kuvvetini arttırmayacak şekilde uygun bir spoyler ilavesi yapılabilir.

KAYNAKLAR

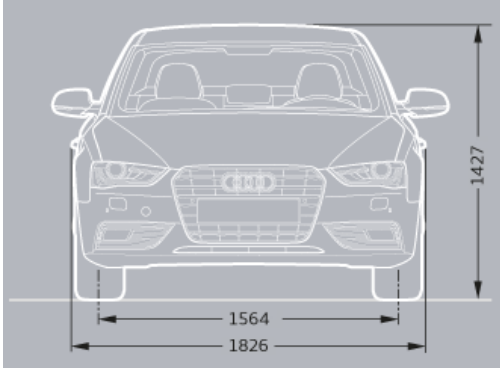
- [1] **Damjanovic, D., Kozak, D., Zivic, M., Ivandic, Z., Baskaric, T.,** 2011. CFD Analysis of Concept Car In Order to Improve Aerodynamics, Járműipari innováció, 01/02, 108-115.
- [2] **Barbut, D., Negrus, E.M.,** 2011. CFD analysis for road vehicles- case study, Incas Bulletin, 3, 15-22.
- [3] **N. E. Ahmad, E. Abo-Serie, A. Gaylard,** 2010. Mesh optimization for ground vehicle aerodynamics, CFD Letters, 2, 54-65.
- [4] **Desai, M., Channiwala, S.A., Nagarsheth, H.J.,** 2003. Experimental and Computational Aerodynamic Investigations of a Car , Wseas Transactions on Fluid Mechanics, 3, 359-367.
- [5] **Tabacu, I., Neacșu, C., Iorga, V., Ivanescu, M.,** 2010. Numerical simulation of flows around two different shaped cars using CFD, Scientific Bulletin Automotive Series, 20.
- [6] **Chainani, A., Perera, N.,** 2008. CFD Investigation of Airflow on a Model Radio Control Race Car, Proceedings of the World Congress on Engineering, 2, 978-988.
- [7] **Khalighi, B., Jindal, S., Laccarino, G.,** 2012. Aerodynamic flow around a sport utility vehicle Computational and experimental investigation, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 107-108, 140-148.
- [8] **Prasad, S., Suvarna, A.A., Bhat, A., Nair, V., Shivakrishna, G.,** 2014. External Aerodynamic Analysis of TATA Nano Using Numerical Tool, International Journal of Current Engineering and Technology, 2, 393-396.

- [9] **Islam, M.M., Mamun, M., 2010.** Computational Drag Analysis Over a Car Body, Proceedings of MARTEC, 155-158
- [10] **Kieffer, W., Moujaes, S., Armbya, N., 2006.** CFD study of section characteristics of Formula Mazda race car wings, Mathematical and Computer Modelling, 43, 1275-1287.
- [11] **Helgason, E., Hafsteinsson, H.E., 2009.** Automatic shape optimization of aerodynamic properties of cars, Master Thesis, Chalmers University of Technology Division of Fluid Mechanics, Goteborg.
- [12] **Bordei, Ş., Popescu, F., 2011.** Aerodynamic results for a notchback race car, Technologies in Machine Building, 5, 159-166
- [13] **Şelenbaş, B., 2011.** Ağır kamyon geometrisinin ve aksesuarlarının aerodinamik tasarım ve optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [14] **Sarı, F.M., 2007.** Hafif ticari taşıtlarda taşıt ön formuna etkiyen hava direncinin aerodinamik analizi ve yakıt sarfiyatına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [15] **İnce, İ.T., 2007.** GDT model idari hizmet pikap aracın aerodinamik analizi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [16] **Hucho, W.H., Savran G., 1993.** Aerodynamics of Road Vehicles, Annu.Rev. Fluid Mech. 25, 485-537.
- [17] **Stone, R., Ball, J.K., 2004.** Automotive Engineering Fundamentals, Warrendale, 435-454.
- [18] **Julian, H. S., 2002.** An Introduction to Modern Vehicle Design, Butterworth-Heinemann, Oxford, 111-112.

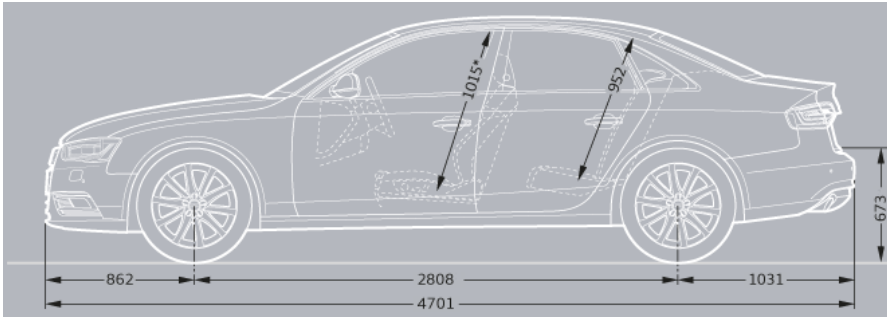
- [19] **Çengel, Y. A., Cimbala, J. M.**, 2008. Akışkanlar Mekaniği, McGraw Hill, İzmir, 277-299, 562-567.
- [20] **Heisler, H.**, 2002. Advanced Vehicle Technology, Butterworth- Heinemann, Oxford, 584-617.
- [21] **Gillespie, D.T.**, 1992. Fundamentals of Vehicle Dynamics, Warrendale, 85– 98.
- [22] **Lerner J. C., Boldes U.**, 2011. Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research, 236-237.
- [23] **Levin, J., Rigdal, R.**, 2011. Aerodynamic analysis of drag reduction devices on the underbody for SAAB 9-3 by using CFD, Master Thesis, Chalmers University of Technology Division of Fluid Mechanics, Goteborg, 16.
- [24] Fluent 6.3 User Guide, 2009.
- [25] **Katz, J.**, 2006. Aerodynamics of Race Cars, Annual Reviews Fluid Mechanics, 53-57.
- [26] http://www.audi.com.tr/tr/brand/tr/models/a4/a4-saloon/tech_data/dimensions.html

EKLER

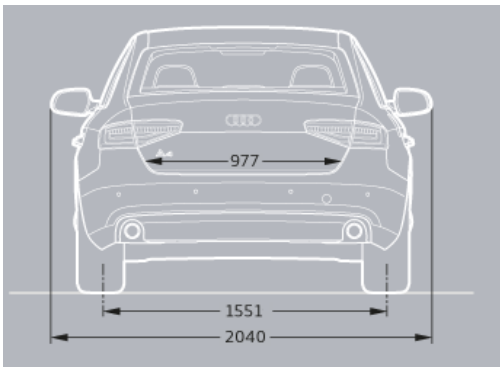
Ek-1. Audi A4 modelini tasarlamak için kullanılan çizim resimleri [27]



Şekil 1.1. Audi A4 modelinin ön görünüşü

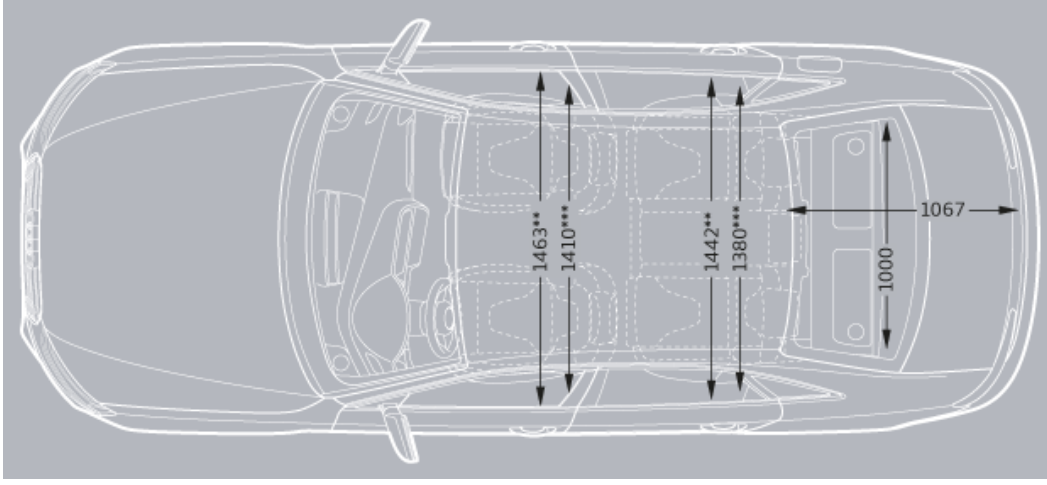


Şekil 1.2. Audi A4 modelinin yan görünüşü

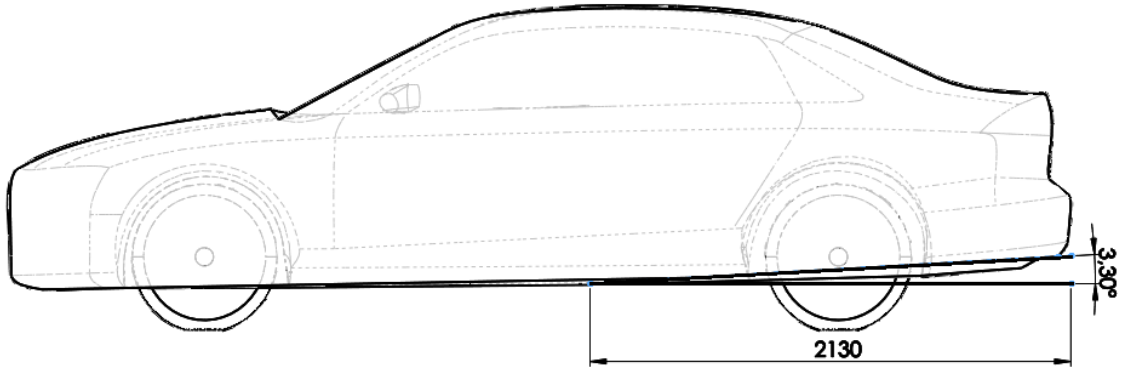


Şekil 1.3. Audi A4 modelinin arka görünüşü

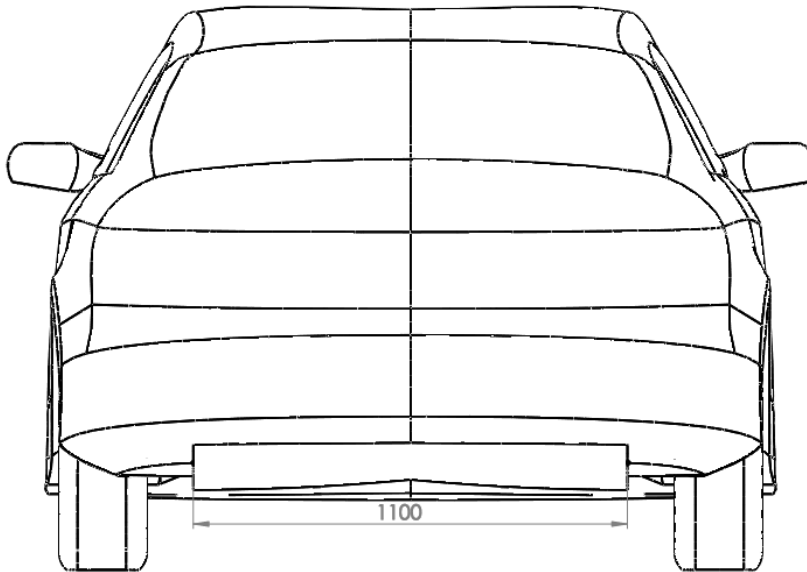
Ek-2 (Devam) Audi A4 modelini tasarlamak için kullanılan çizim resimleri [27]



Şekil 1.4. Audi A4 modelinin üst görünüşü



Şekil 1.5. Yeniden tasarlanan Audi A4 modelinin kesit görünüşü



Şekil 1.6. Yeniden tasarlanan Audi A4 modelinin arka görünüşü

Ek-2 1:24 ölçekli Audi A4 modelinin deney verileri

Çizelge 2.1. 1:24 ölçekli Audi A4 modelinin sürüklenme kuvveti verileri

Hız (m/s)	Fd1 (N)	Fd2 (N)	Fd3 (N)	Fd4 (N)	Fd5(N)	Fdort (N)
5	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
7	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,038
9	0,05	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06
11	0,09	0,08	0,09	0,1	0,09	0,09
13	0,13	0,12	0,11	0,12	0,12	0,12
15	0,16	0,17	0,16	0,15	0,16	0,16
17	0,2	0,19	0,19	0,21	0,21	0,2
19	0,26	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25
21	0,3	0,29	0,3	0,31	0,3	0,3
23	0,36	0,37	0,35	0,36	0,36	0,36
25	0,42	0,43	0,42	0,41	0,42	0,42
27	0,48	0,49	0,48	0,49	0,49	0,486

Çizelge 2.2. 1:24 ölçekli Audi A4 modelinin kaldırma kuvveti verileri

Hız (m/s)	FL1 (N)	FL2 (N)	FL3 (N)	FL4 (N)	FL5 (N)	FLort (N)
5	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0,01	0,002
9	0,01	0	0	0,01	0,01	0,006
11	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,014
13	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
15	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,026
17	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,036
19	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
21	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,076
23	0,09	0,09	0,09	0,09	0,1	0,092
25	0,1	0,11	0,11	0,11	0,11	0,108
27	0,12	0,12	0,13	0,12	0,13	0,124

Ek-2 (Devam) 1:24 ölçekli Audi A4 modelinin deney verileri

Çizelge 2.3. 1:24 ölçekli Audi A4 modeli üzerindeki ortalama basınç dağılımı verileri

Ölçme noktası		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Hız (m/s)	5	7	23	20	15	20	26	26	24	23	21	23	22
	7	11	48	38	26	37	52	51	47	42	38	40	42
	9	16	82	64	43	62	87	84	80	66	61	65	66
	11	22	125	95	63	92	134	128	124	99	90	99	99
	13	29	183	132	87	127	191	177	175	137	126	133	135
	15	38	250	177	116	173	260	238	234	183	166	181	182
	17	46	333	226	150	225	338	311	306	236	214	234	234
	19	56	414	283	186	280	426	386	382	293	266	292	293
	21	66	513	349	230	340	526	475	472	361	324	355	358
	23	78	612	420	276	408	629	571	570	429	390	427	428
	25	90	722	493	327	482	744	677	674	513	462	506	506
	27	100	828	560	370	546	855	763	765	579	520	572	572

Çizelge 2.4. 1:24 ölçekli Audi A4 modeli üzerindeki ortalama hız dağılımı verileri

Ölçme noktası		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Hız (m/s)	5	3,381	6,128	5,714	4,949	5,714	6,515	6,26	6,515	6,128	5,855	6,128	5,993
	7	4,238	8,853	7,877	6,515	7,772	9,214	8,76	9,125	8,281	7,877	8,081	8,281
	9	5,111	11,57	10,22	8,379	10,06	11,92	11,43	11,71	10,38	9,98	10,3	10,38
	11	5,993	14,29	12,45	10,14	12,26	14,79	14,23	14,46	12,71	12,12	12,71	12,71
	13	6,881	17,29	14,68	11,92	14,4	17,66	16,9	17	14,96	14,34	14,74	14,85
	15	7,877	20,2	17	13,76	16,81	20,6	19,55	19,71	17,29	16,46	17,19	17,24
	17	8,666	23,32	19,21	15,65	19,17	23,49	22,35	22,53	19,63	18,69	19,55	19,55
	19	9,562	26	21,5	17,43	21,38	26,37	24,97	25,1	21,87	20,84	21,83	21,87
	21	10,38	28,94	23,87	19,38	23,56	29,3	27,76	27,85	24,28	23	24,07	24,18
	23	11,28	31,61	26,19	21,23	25,81	32,05	30,51	30,53	26,47	25,23	26,4	26,43
	25	12,12	34,33	28,37	23,11	28,05	34,85	33,17	33,25	28,94	27,46	28,74	28,74
	27	12,78	36,77	30,24	24,58	29,86	37,36	35,34	35,29	30,75	29,14	30,56	30,56

Ek-3 1:24 ölçekli Audi A4 modelinin deneyse ve sayısal verilerinin karşılaştırması

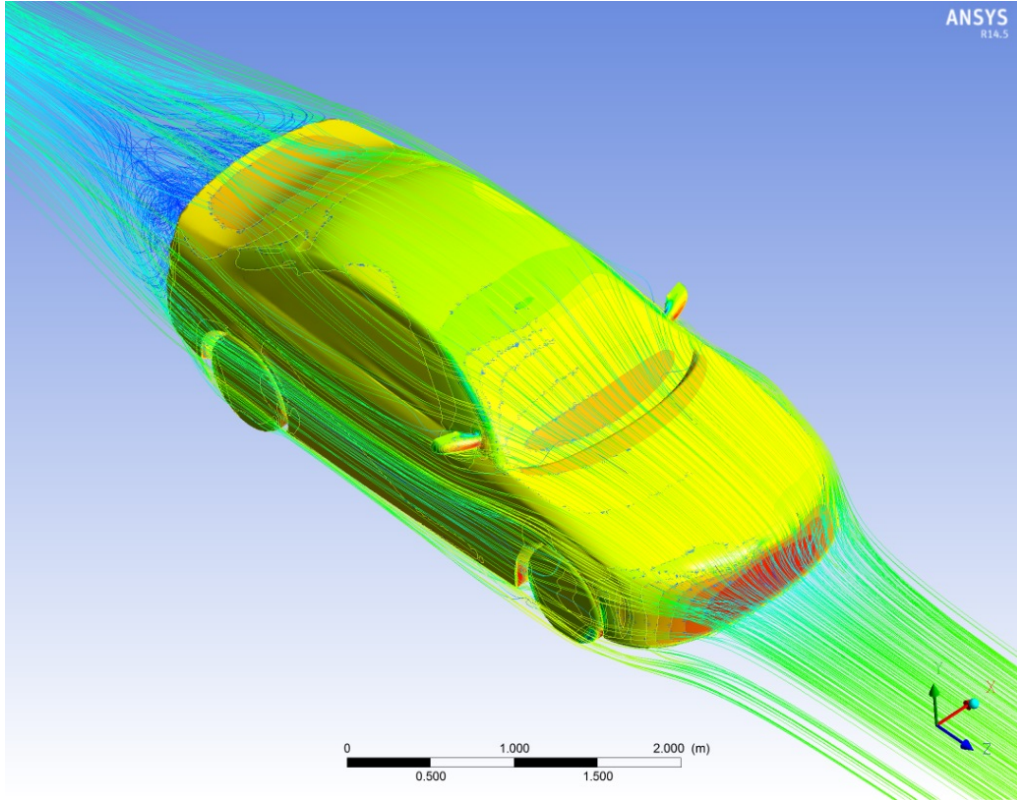
Çizelge 3.1. 1:24 ölçekli Audi A4 modelinin deneysel ve sayısal sürüklenme kuvveti verileri

Hız (m/s)	Fd Sayısal (N)	Fd Deneysel (N)
5	0,01949882	0,02
7	0,03704276	0,038
9	0,05806345	0,06
11	0,08456881	0,09
13	0,11564788	0,12
15	0,15123157	0,16
17	0,19129062	0,2
19	0,24239419	0,25
21	0,29367239	0,3
23	0,34977204	0,36
25	0,40987483	0,42
27	0,4761034	0,486

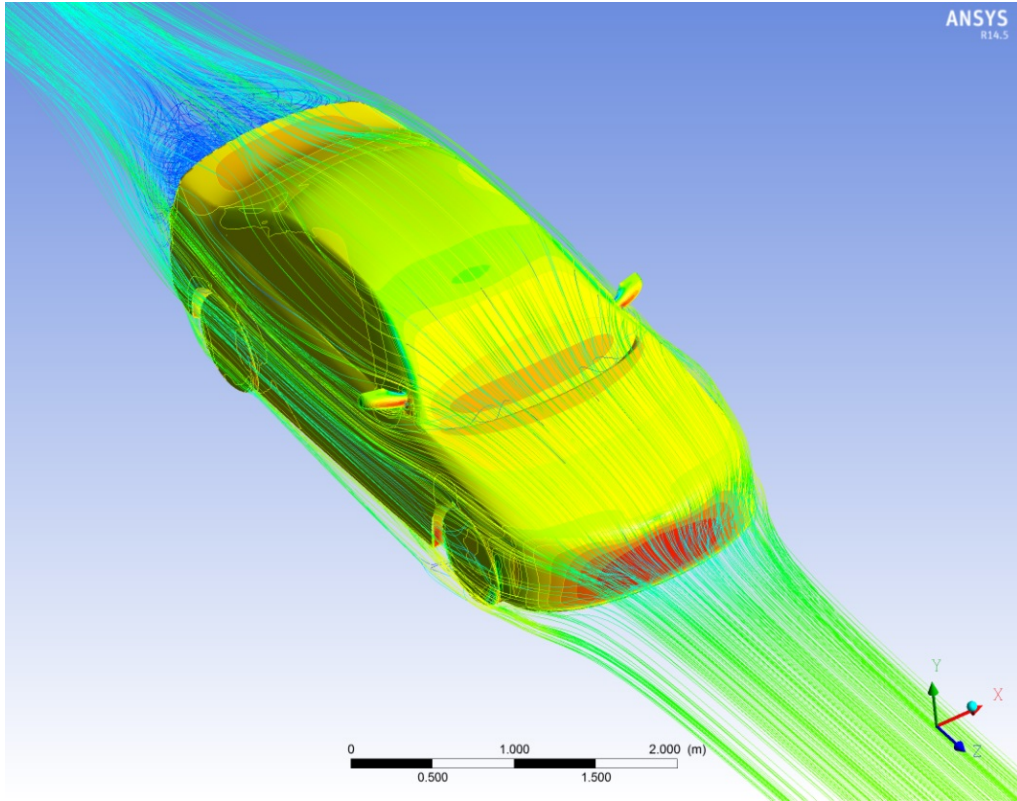
Çizelge 3.2. 1:24 ölçekli Audi A4 modelinin deneysel ve sayısal kaldırma kuvveti verileri

Hız (m/s)	FL Sayısal (N)	FL Deneysel (N)
5	0,004601233	0
7	0,007117105	0,002
9	0,009854979	0,006
11	0,013209176	0,012
13	0,016959587	0,02
15	0,021780064	0,03
17	0,027737877	0,043
19	0,059550602	0,06
21	0,074699745	0,076
23	0,09160948	0,093
25	0,106985406	0,108
27	0,123913777	0,125

Ek-4 1:1 ölçekli orijinal ve yeniden tasarlanan taşıt modelinin simülasyon sonuçları

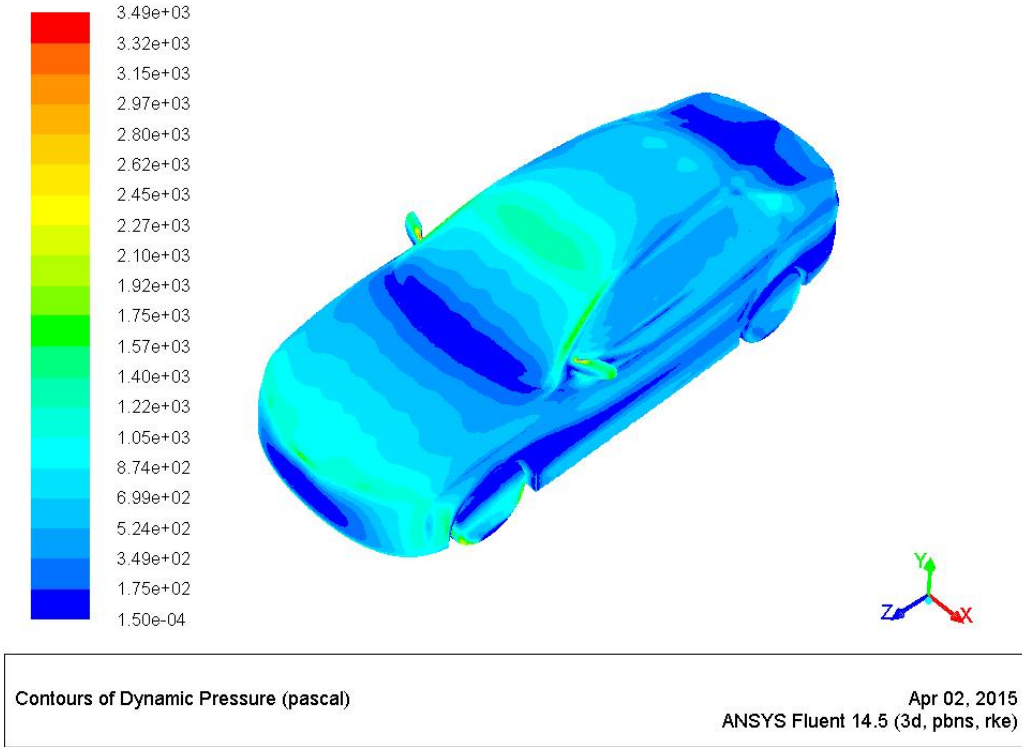


Şekil 4.1. Orijinal taşıt modeli etrafındaki hava akım çizgileri

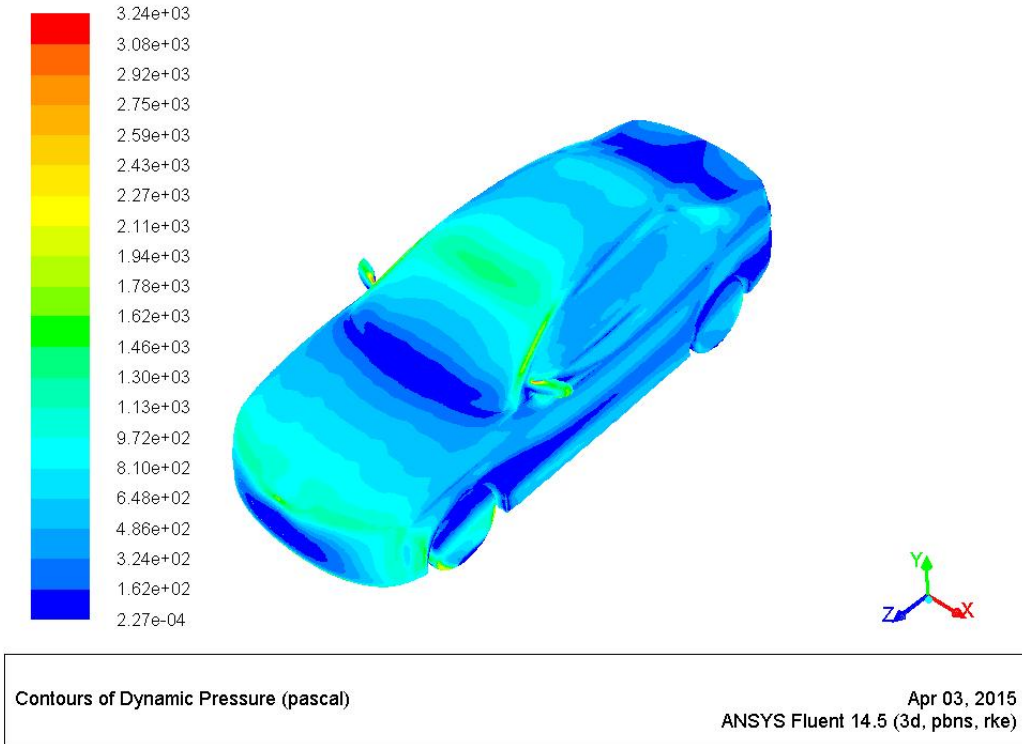


Şekil 4.2. Yeniden tasarlanan taşıt modeli etrafındaki hava akım çizgileri

Ek-4 (devam) 1:1 ölçekli orijinal ve yeniden tasarlanan taşıt modelinin simülasyon sonuçları

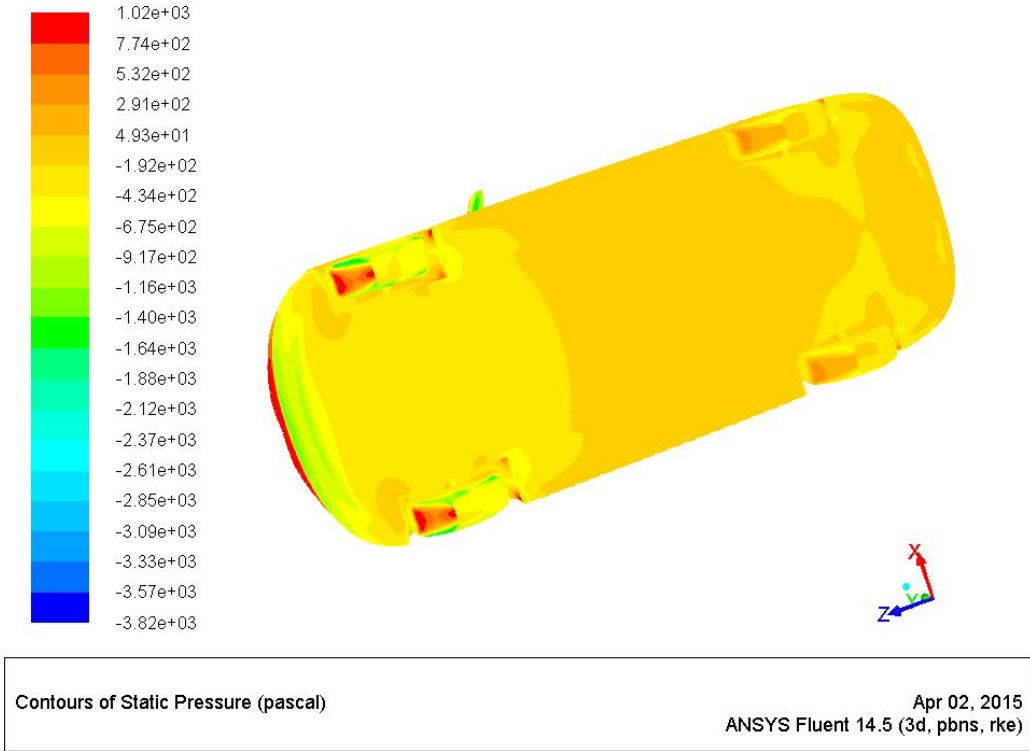


Şekil 4.3. Orijinal taşıt modelinin üzerindeki dinamik basınç dağılımı

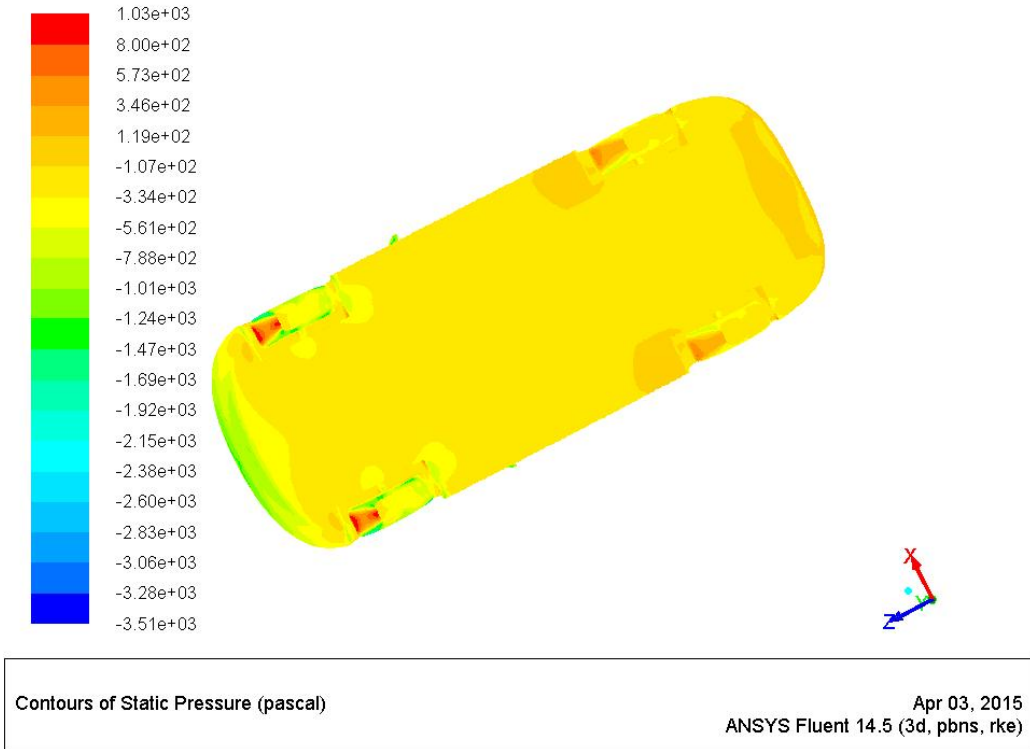


Şekil 4.4. Yeniden tasarlanan taşıt modelinin üzerindeki dinamik basınç dağılımı

Ek-4 (devam) 1:1 ölçekli orijinal ve yeniden tasarlanan taşıt modelinin simülasyon sonuçları

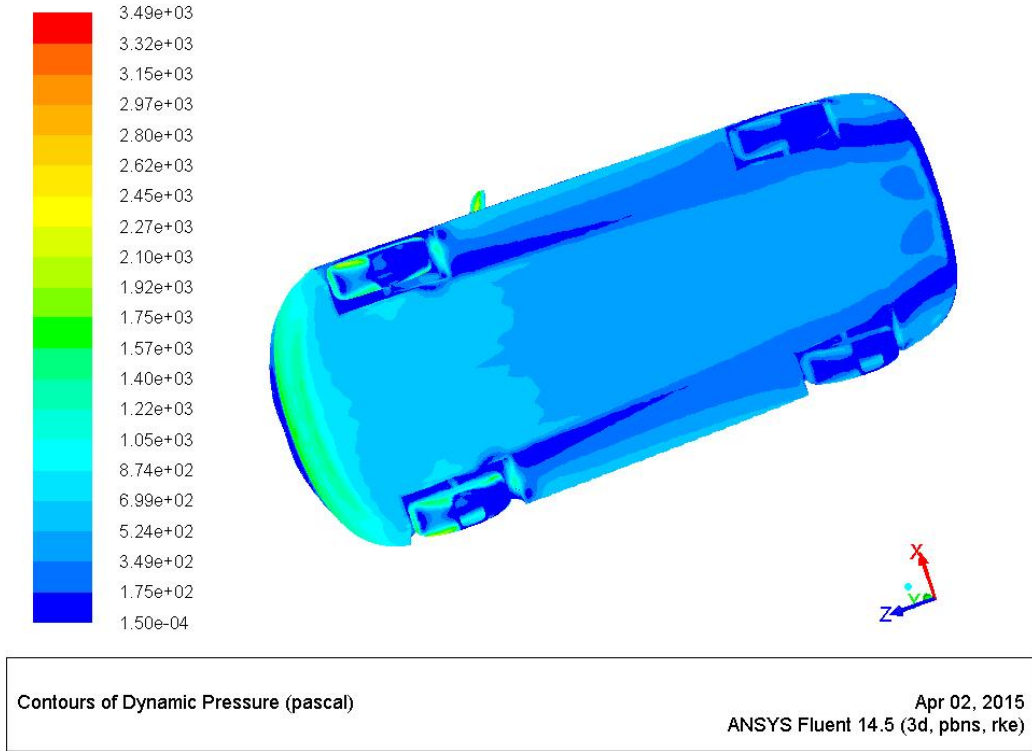


Şekil 4.5. Orijinal taşıt modelinin altındaki statik basınç dağılımı

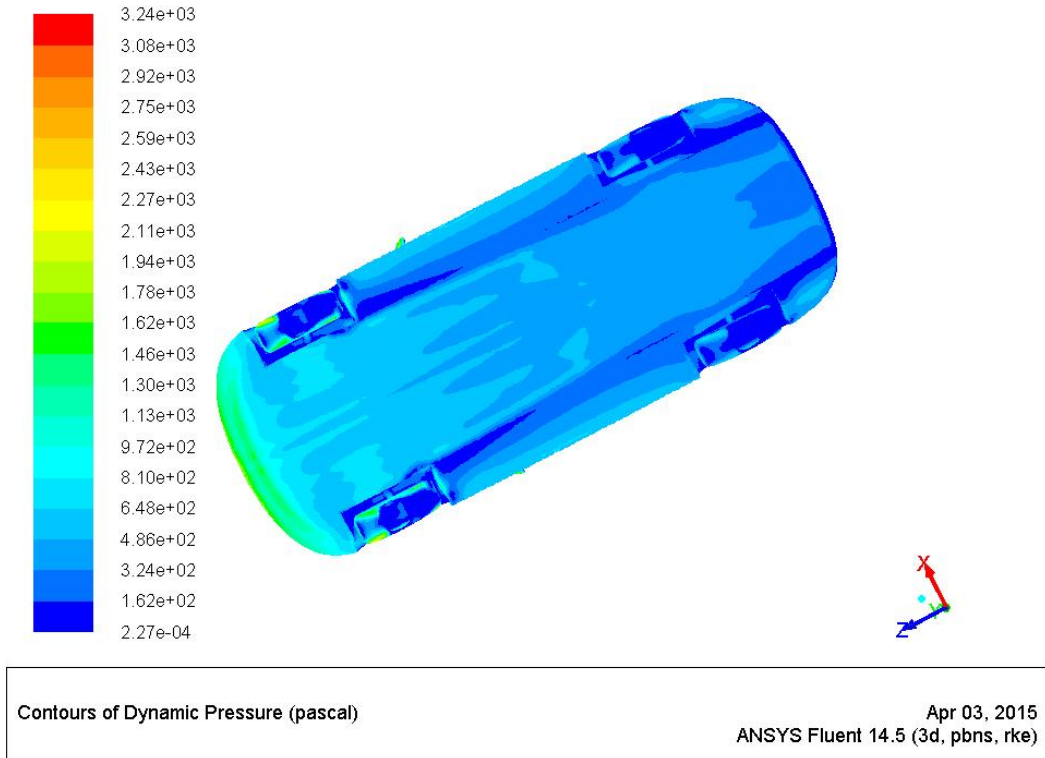


Şekil 4.6. Yeniden tasarlanan taşıt modelinin altındaki statik basınç dağılımı

Ek-4 (devam) 1:1 ölçekli orijinal ve yeniden tasarlanan taşıt modelinin simülasyon sonuçları



Şekil 4.7. Orijinal taşıt modelinin altındaki dinamik basınç dağılımı



Şekil 4.8. Yeniden tasarlanan taşıt modelinin altındaki dinamik basınç dağılımı

Ek-5 Simülasyonda kullanılan yakınsama tolerans faktörleri

Çizelge 5.1. Simülasyondan arda kalan kalıntıların yakınsama tolerans faktörleri

Kalıntılar	Yakınsama Toleransı
Süreklilik	$1,0 \times 10^{-5}$
X – hızı	$1,0 \times 10^{-7}$
Y –hızı	$1,0 \times 10^{-7}$
Z –hızı	$1,0 \times 10^{-7}$
Türbülans kinetik Enerjisi	$1,0 \times 10^{-5}$
Türbülans yayılım oranı	$1,0 \times 10^{-5}$

Çizelge 5.2. 1:24 ölçekli taşıt modelinin akış simülasyonu için yakınsama kriterleri

Basınç	0,35
Yoğunluk	1
Gövde kuvvetleri	1
Momentum	0,65
Türbülans kinetik enerjisi	0,5
Türbülans yayılım oranı	0,5
Türbülans viskozitesi	1

Çizelge 5.3. 1:1 ölçekli taşıt modelinin akış simülasyonu için yakınsama kriterleri

Basınç	0,25
Yoğunluk	1
Gövde kuvvetleri	1
Momentum	0,25
Türbülans kinetik enerjisi	0,65
Türbülans yayılım oranı	0,65
Türbülans viskozitesi	0,9

ÖZGEÇMİŞ

İsmail ÖZEN, 1986 yılında Trabzon' un Of ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Trabzon' da farklı okullarda tamamladıktan sonra 2004 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi/Otomotiv Öğretmenliği Bölümünü kazandı. 2010 yılında lisans eğitimini bitirdikten hemen sonra aynı yıl G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim dalında Lisansüstü eğitimine başladı. 2011 yılı Şubat ayında Türk Hava Yolları Teknik A.Ş.' de işe başladı. 2012 yılı Eylül ayında Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi kadrosuna atandıktan sonra Lisansüstü eğitimine aynı bölümde devam etti. 2014 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2015 yılı Şubat ayında K.T.Ü. Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Anabilim dalında Araştırma görevlisi kadrosuna atandı. Halen bu göreve devam etmektedir.

İletişim Bilgileri;

Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

Makine Mühendisliği Bölümü

Mekanik Anabilim Dalı /TRABZON

Tel: 0(462) 3772922

E –mail. ismailozen@ktu.edu.tr