

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAVA DİRENÇ KATSAYISININ YAKIT TÜKETİMİ ÜZERİNE ETKİSİNİN
NÜMERİK YÖNTEMLE İNCELENMESİ**

VOLKAN AKGÜL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. MUAMMER ÖZKAN**

İSTANBUL, 2013

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HAVA DİRENÇ KATSAYISININ YAKIT TÜKETİMİNE ETKİSİNİN NÜMERİK
YÖNTEMLE İNCELENMESİ**

Volkan AKGÜL tarafından hazırlanan tez çalışması 09.10.2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Muammer ÖZKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Muammer ÖZKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Alp Tekin ERGENÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Övün IŞIN
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın tamamlanması sürecinde bilgi birikimi ve desteğini esirgemeyen çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Muammer ÖZKAN'a, analizler için gerekli donanımın sağlanmasında büyük desteği olan hocam Yrd. Doç. Dr. Volkan KIRMACI'ya, Arş. Gör. Bilal KURŞUNCU, Arş. Gör. Muzaffer KARAGÖZ ve Arş. Gör. Ali YARAŞ'a, Anneme, Babama ve süreçteki büyük fedakarlığından dolayı değerli eşim Gamze AKGÜL'e teşekkür ederim.

Ekim, 2013

Volkan AKGÜL

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET.....	xiv
ABSTRACT	xv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	3
BÖLÜM 2	
TAŞITLARDA YAKIT TÜKETİMİ, KAYIPLAR VE DİRENÇLER.....	4
2.1 Motor Kayıpları	4
2.2 Aktarma Organları Kayıpları.....	5
2.3 Yardımcı Eleman Kayıpları	6
2.4 Taşıt Faktörleri	6
2.4.1 Aerodinamik	6
2.4.2 Yapısal Özellik	7
2.4.3 Lastikler ve Yuvarlanma Direnci	7
2.5 Taşıt İşletme Faktörleri	9
2.5.1 Sürüş Çevrimi	9
2.5.2 İlk Çalışma ve Isınma.....	10
2.5.3 Ortam Koşulları.....	10
2.5.4 Yol Faktörleri.....	11
2.5.5 Bakım	11

2.5.6	Sürüş Alışkanlıkları	11
BÖLÜM 3		
KARAYOLU TAŞITLARININ AERODİNAMİĞİ		13
3.1	Bir Araç Etrafındaki Hava Akış Mekaniği	13
3.2	Bir Araç Etrafındaki Basınç Dağılımı	19
3.3	Aerodinamik Kuvvetler	22
3.3.1	Direnç Kuvveti.....	23
3.4	Aerodinamik Direncin Yakıt Tüketimine Etkisi.....	37
BÖLÜM 4		
MATEMATİKSEL YAKLAŞIM		39
4.1	Genel Denklemler	39
4.1.1	Süreklilik Denklemi	40
4.1.2	Momentum Denklemi	41
4.1.3	Navier Stokes Denklemleri	42
4.1.4	Genel Transport Denklemi.....	46
4.2	Türbülans Modelleme.....	47
4.2.1	$k-\varepsilon$ Model.....	48
4.2.1.1	Re Normalleştirme Grubu (RNG) $k-\varepsilon$	50
BÖLÜM 5		
MODELLEME VE ANALİZ		51
5.1	Geometri Modelleme	51
5.1.1	Taşıt Yüzeyinin Modellenmesi	54
5.1.2	Genel Taşıtların Boyutları	52
5.2	Analiz.....	54
5.2.1	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği	54
5.2.2	Çözüm Geometrisi	57
5.2.3	Ağ.....	58
5.2.4	Çözüm	61
5.2.4.1	Tavan Açısı & Cd-CI Değişimi	66
5.2.4.2	Ön Cam Açısı & Cd-CI Değişimi.....	70
5.2.4.3	Durma Noktası ve Yer Aralığı & Cd-CI Değişimi.....	73
5.2.5	Akış Kontrol Uygulamaları	78
5.2.5.1	Spoiler Uygulaması.....	78
5.2.5.2	Vortex Generatörü Uygulaması	80
BÖLÜM 6		
SONUÇ VE ÖNERİLER		84
KAYNAKLAR.....		90

EK-A

OPTİMİZASYON SÜRECİNDE OLUŞTURULAN TAŞIT MODELLERİ	94
ÖZGEÇMİŞ	97

SİMGE LİSTESİ

A	Taşıt projeksiyon alanı (m ²)
C_d	Hava direnç katsayısı
Cl	Kaldırma katsayısı
Cl_f	Ön kaldırma katsayısı
Cl_r	Arka kaldırma katsayısı
C_p	Basınç katsayısı
C_p	Özgül ısı (j/gK)
$C_{1\varepsilon}$	Türbülans model sabiti
$C_{2\varepsilon}$	Türbülans model sabiti
C_μ	Türbülans model sabiti
D	Direnç kuvveti (N)
e	Yer aralığı (mm)
e_{xx}	Doğrusal uzama deformasyon elemanı
e_{xy}	Doğrusal kayma deformasyon elemanı
E_T	Toplam enerji (joule)
f	Yuvarlanma direnç katsayısı
f	Basınç gerinim tensöründeki sönüm fonksiyonu
f_K	Viraj Direnci
g	Yerçekimi ivmesi (m/s ²)
h	Saat
i, j	x ve y yönleri indisi
k	Isı iletim katsayısı (w/m ² K)
k	Türbülans kinetik enerjisi (m ² /s ²)
M	Taşıt kütlesi (kg)
p	Basınç (N/m ²)
P_{atm}	Atmosfer basıncı (Pa)
Pr_t	Türbülans Prandtl Sayısı
P_T	Statik ve dinamik basıncın toplamı (Pa)
P_t	Akış durma noktasındaki basınç (Pa)
Re	Reynolds Sayısı
S	Kaynak terimi
T	Sıcaklık (K)

t	Zaman
u	Anlık hız vektörünün x bileşeni
u	x doğrultusunda dalgalanan hız
\vec{u}	Anlık hız vektörü (m/s)
\bar{U}	x doğrultusunda zaman ortalamalı hız
V	Taşıt hızı (m/s)
v	Anlık hız vektörünün y bileşeni
Zs	Durma noktası yüksekliği (mm)
Zv	Araç yüksekliği (mm)
x, y, z	Kartezyen koordinat sistemi indisi
w	Anlık hız vektörünün z bileşeni
ρ	Hava yoğunluğu (kg/m ³)
δ	Hız sınır tabaka kalınlığı (mm)
μ	Dinamik viskozite (kg/ms)
\emptyset	Tavan açısı (°)
ϕ	Ön cam açısı
\emptyset	Genel diferansiyel denklemde herhangi bir değişken
τ_{xx}	Normal gerilme
τ_{xy}	Kayma gerilmesi
λ	Viskozite Sabiti
Γ	Difüzyon katsayısı
ε	Türbülans harcanımı (m ² /s ³)
μ_t	Türbülans viskozitesi
σ_k	Türbülans model sabiti
σ_ε	Türbülans model sabiti

KISALTMA LİSTESİ

CFD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
LES	Büyük Eddy Simülasyonu (Large Eddy Simulation)
NEWF	Dengede Olmayan Duvar Fonksiyonu (Non-Equilibrium Wall Function)
PIV	Parçacık Görüntülü Hız ölçümü (Particle Image Velocimetry)
RANS	Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (Reynolds Averaged Navier Stokes)
RNG	Reynolds Normalleştirme Grubu (Reynolds Normalization Group)
RSM	Reynolds Gerilme Modeli (Reynolds Stress Model)

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1	Şehiriçi, otoyol ve karma çevrimler için meydana gelen güç kayıpları	4
Şekil 2. 2	Yüksek, düşük direnç katsayısı ve yuvarlanma direncinin fonksiyonu olarak taşıt hızına bağlı oluşan direnç kuvveti	6
Şekil 2. 3	Audi Q5 gövde yapısı.....	7
Şekil 2. 4	Farklı radyal tip lastikler için yuvarlanma direnç katsayısının hıza bağlı değişimi	8
Şekil 2. 5	Bias ve Radyal tip lastik yapısı.....	9
Şekil 2. 6	İlk çalışma ve normal çalışma sıcaklıklarında yakıt ekonomisi	10
Şekil 2. 7	Farklı vites seviyelerinde hıza göre yakıt tüketimindeki değişim	12
Şekil 3. 1	İlk kara hız rekorunu kıran ve Gaston Chasseloup-Laubat tarafından kullanılan Jantaud isimli kara taşıtı	13
Şekil 3. 2	Taşıt gövdesi üzerinde akmakta olan akış tüpleri	15
Şekil 3. 3	Bir gövde üzerinde meydana gelen hava akışındaki basınç ve hız gradyanları	16
Şekil 3. 4	Düz plaka üzerindeki akışta sınır tabakanın gelişimi ve farklı akış rejimleri	17
Şekil 3. 5	Düşük ve yüksek hızlarda laminar, türbilanslı sınır tabaka ve geçiş noktası.....	17
Şekil 3. 6	Karşı basınç gradyanında akış ayrılması.....	18
Şekil 3. 7	Akış ayrılması ve yeniden tutunma	19
Şekil 3. 8	Aracın merkez çizgisi boyunca basınç dağılımı	20
Şekil 3. 9	Bir aracın arka kısmında oluşan girdap sistemleri	21
Şekil 3. 10	Farklı araç tipleri için aerodinamik kaldırma ve direnç kuvvetleri.....	21
Şekil 3. 11	Taşıt üzerine etki eden aerodinamik kuvvet ve momentler	23
Şekil 3. 12	Yüzey elemanına etkiyen kuvvet.....	23
Şekil 3. 13	Farklı kesitlerdeki hava akışı	25
Şekil 3. 14	Basınç direnci aparatı.....	26
Şekil 3. 15	Ard akış izi	28
Şekil 3. 16	Taşıt ön ucu tasarımının direnç katsayısı üzerine etkisi.....	31
Şekil 3. 17	Yer aralığının direnç katsayısı üzerine etkisi	31
Şekil 3. 18	Farklı burun profilleri için araç gövdesi etrafındaki hava kütlesi dağılımı ...	33
Şekil 3. 19	Arka tavan açısının direnç katsayısı üzerine etkisi.....	34

Şekil 3. 20	Ön cam açısının direnç üzerindeki etkisi.....	34
Şekil 3. 21	Taşıt altı panellerinin direnç katsayısı üzerine etkisi	35
Şekil 3. 22	Tekerlek haznesindeki hava resirkülasyonu	35
Şekil 3. 23	Tipik bir motor bölmesindeki hava akış şekli	36
Şekil 3. 24	Soğutma sisteminin direnç üzerindeki etkisi	37
Şekil 4. 1	Akışkan hacim elemanı	39
Şekil 4. 2	Bir akışkan elemanının yüzeylerindeki gerilme bileşenleri.....	42
Şekil 5. 1	Taşıt Geometisi Kafes Görünümü	51
Şekil 5. 2	Sınır çizgileri yardımıyla oluşturulan yüzey elemanı	52
Şekil 5. 3	Yüzey modellemesi tamamlanmış taşıt geometrisi	52
Şekil 5. 4	Taşıt genel görünüşleri	53
Şekil 5. 5	Taşıt yan görünüş boyutları	53
Şekil 5. 6	Taşıt ön görünüş boyutları	54
Şekil 5. 7	Akış bölgesindeki kontrol hacimleri	55
Şekil 5. 8	CFD modellemede işlem adımları	56
Şekil 5. 9	Rüzgar tüneli (hesaplama alanı) boyutları ve taşıt modelinin rüzgar tüneli içindeki konumu	57
Şekil 5. 10	“Grid Independency” çalışması.....	58
Şekil 5. 11	Taşıt yüzeyinde oluşturulan ağ yapısı (ön görünüm)	59
Şekil 5. 12	Taşıt yüzeyinde oluşturulan ağ yapısı (arka görünüm)	59
Şekil 5. 13	Simetri eksenini boyunca taşıttan dışa doğru ağın yoğunluk değişimi.....	59
Şekil 5. 14	Üç boyutlu tetradedral elemanlar	60
Şekil 5. 15	Ağ içerisinde sınır değeri aşan çarpık elemanlar.....	60
Şekil 5. 16	Çarpık elemanları gidermek amacıyla oluşturulan sanal yüzeyler	61
Şekil 5. 17	Sınır tabaka etkilerini yakalamak için taşıt yüzeyi üzerinde oluşturulan katmanlar.....	61
Şekil 5. 18	Ayrık (segregated) ve birleşik (coupled) çözüm algoritmaları	62
Şekil 5. 19	Tavan açısı & Cd-Cl değişimi.....	66
Şekil 5. 20	35°-30°-25°-20°-15°-10° tavan açıları için simetri düzlemindeki hız konturları (FLUENT)	67
Şekil 5. 21	35°-30°-25°-20°-15°-10° tavan açıları için simetri düzlemindeki hız konturları (CFX)	67
Şekil 5. 22	35° tavan açısı için simetri düzlemindeki hız vektörleri.....	68
Şekil 5. 23	30° tavan açısı için simetri düzlemindeki hız vektörleri.....	68
Şekil 5. 24	25° tavan açısı için simetri düzlemindeki hız vektörleri.....	68
Şekil 5. 25	20° tavan açısı için simetri düzlemindeki hız vektörleri.....	69
Şekil 5. 26	15° tavan açısı için simetri düzlemindeki hız vektörleri.....	69
Şekil 5. 27	10° tavan açısı için simetri düzlemindeki hız vektörleri.....	69
Şekil 5. 28	Ön cam açısı(φ) & Cd-Cl değişimi.....	70
Şekil 5. 29	45°-43°-41°-39°-37°-35° ön cam açıları için statik basınç konturları (FLUENT).....	71
Şekil 5. 30	45°-43°-41°-39°-37°-35° ön cam açıları için statik basınç konturları (CFX)	72
Şekil 5. 31	Akış durma noktası (Zs/Zv) ve Yer aralığı (e) & Cd-Cl değişimi	73
Şekil 5. 32	$\varnothing = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$ ve Zs/Zv = 0.05 için akış çizgileri	74

Şekil 5. 33	$\emptyset = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$ ve yer aralığı $e = 0$ için $Z = -6m$ düzleminde durma noktası (Z_s/Z_v) değişimine bağlı yüzey akış çizgileri (Girdap Boyutları)	74
Şekil 5. 34	$\emptyset = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$ ve $Z_s/Z_v = 0.05$ için $Z = -6m$ düzleminde yer aralığı değişimine bağlı yüzey akış çizgileri (Girdap Boyutları)	75
Şekil 5. 35	$\emptyset = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$ ve $Z_s/Z_v = 0.05$ için 0.03 ölçeğinde yer aralığı değişimine bağlı vortisite değerleri.....	75
Şekil 5. 36	$Z = -6m$ düzleminde $\emptyset = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$, $Z_s/Z_v = 0.05$ ve $e = 20$ mm için 0.003 ölçeğindeki vorteks bölgesi	76
Şekil 5. 37	$Z = -6m$ düzleminde $\emptyset = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$, $Z_s/Z_v = 0.05$ ve $e = 10$ mm için 0.003 ölçeğindeki vorteks bölgesi	76
Şekil 5. 38	$Z = -6m$ düzleminde $\emptyset = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$, $Z_s/Z_v = 0.05$ ve $e = 0$ mm için 0.003 ölçeğindeki vorteks bölgesi	76
Şekil 5. 39	$Z = -6m$ düzleminde $\emptyset = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$, $Z_s/Z_v = 0.05$ ve $e = -10$ mm için 0.003 ölçeğindeki vorteks bölgesi	77
Şekil 5. 40	$Z = -6m$ düzleminde $\emptyset = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$, $Z_s/Z_v = 0.05$ ve $e = -20$ mm için 0.003 ölçeğindeki vorteks bölgesi	77
Şekil 5. 41	$Z = -6m$ düzleminde $\emptyset = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$, $Z_s/Z_v = 0.05$ ve $e = -30$ mm için 0.003 ölçeğindeki vorteks bölgesi	77
Şekil 5. 42	$\emptyset = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$ ve $Z_s/Z_v = 0.05$ için taşıt alt yüzeyinde simetri ekseninde yer aralığı değişimine bağlı statik basınç değerleri.....	78
Şekil 5. 43	Taşıt modeli üzerine yerleştirilen arka spoyleler	79
Şekil 5. 44	$\emptyset = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$, $Z_s/Z_v = 0.05$ ve $e = -30$ mm için taşıt modeli üzerine eklenen arka spoylelerin C_d ve C_l üzerine etkisi, hız konturları (FLUENT)	79
Şekil 5. 45	$\emptyset = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$, $Z_s/Z_v = 0.05$ ve $e = -30$ mm için taşıt modeli üzerine eklenen arka spoylelerin C_d ve C_l üzerine etkisi, hız konturları (CFX)	79
Şekil 5. 46	Bir savaş uçağı kanadı üzerine yerleştirilmiş vorteks generatörleri	80
Şekil 5. 47	Taşıt tavan bitimi civarında hız profili şematığı	80
Şekil 5. 48	Vorteks generatörü etrafındaki akış şematığı	81
Şekil 5. 49	Simetri ekseninde spoyleler yüzeyinden yukarı doğru hız profili ($X = 4.4$ m)	81
Şekil 5. 50	Taşıt modelinde arka spoyleler üzerine yerleştirilen vortex generatörlerinin akış yönüne göre konumu ve boyutları	82
Şekil 5. 51	Taşıt modelinde arka spoyleler üzerine yerleştirilmiş vortex generatörleri ..	82
Şekil 5. 52	$\emptyset = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$, $Z_s/Z_v = 0.05$ ve $e = -30$ mm için spoyleler üzerine eklenen vorteks generatörlerinin C_d ve C_l üzerine etkisi, hız konturları (FLUENT)	83
Şekil 5. 53	$\emptyset = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$, $Z_s/Z_v = 0.05$ ve $e = -30$ mm için spoyleler üzerine eklenen vorteks generatörlerinin C_d ve C_l üzerine etkisi, hız konturları (CFX)	83
Şekil 6. 1	Optimizasyon sürecindeki C_d değişimi	86
Şekil 6. 2	Optimizasyon sürecindeki C_l değişimi	86
Şekil 6. 3	Optimizasyon sürecindeki C_d değişim yüzdesi	86
Şekil 6. 4	Optimizasyon sürecindeki C_l değişim yüzdesi	87
Şekil 6. 5	Taşıt modellerinin orijinal forma göre yakıt tüketimindeki değişim yüzdeleri	89

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3. 1	Aerodinamik kuvvet ve momentler22
Çizelge 3. 2	Çeşitli sınıflardaki taşıtlar için direnç katsayısı28
Çizelge 3. 3	Çeşitli şekillerdeki cisimler için direnç katsayıları29
Çizelge 3. 4	Bazı geometrik şekillerin basınç ve sürtünme direnci katkıları.....30
Çizelge 3. 5	Bir taşıt için aerodinamik direnç bileşenleri.....30
Çizelge 5. 1	Süreklilik ve korunum denklemlerinin değişkenleri55
Çizelge 5. 2	Analizlerde kullanılan yakınsama tolerans faktörleri63
Çizelge 5. 3	Sayısal çözümlerinde kullanılan özellikler65
Çizelge 5. 4	Relaksasyon kriterleri65
Çizelge 5. 5	Diskritizasyon özellikleri65
Çizelge 5. 6	Akışkan olarak kullanılan havanın özellikleri.....66
Çizelge 6. 1	Taşıtların modelleri, özellikleri ve Cd&Cl verileri85
Çizelge 6. 2	40 m/s hız ile 100 km mesafe için harcanan enerji miktarları88

HAVA DİRENÇ KATSAYISININ YAKIT TÜKETİMİNE ETKİSİNİN NÜMERİK YÖNTEMLE İNCELENMESİ

Volkan AKGÜL

Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Muammer ÖZKAN

Bu çalışmada üç boyutta tasarlanmış olan 1/1 ölçekte bir SUV modeli için tavan açısı, ön cam açısı, akış durma noktası ve yer aralığı gibi kritik boyutların ve taşıt arkasındaki hava akışını kontrol etmek için tavan bitimine eklenen arka spoiler ve vorteks generatörlerinin hava direnç katsayısı ve dolaylı olarak yakıt tüketimine etkisi nümerik yöntemle incelenmiştir.

Bu amaçla toplamda 22 adet model geliştirilmiş ve her bir model gerçek bir rüzgar tüneli boyutuna eşdeğer hesaplama bölgesi için Fluent ve CFX kodu kullanarak 2 denklemlili RNG $k - \epsilon$ türbülans modeli ile çözülmüştür. Grid oluşturma işlemi Ansys Mesher, çözüm adımı Fluent ve CFX programları ile, sonuç görüntüleme işlemleri ise CFD Post programları yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda taşıt modelinin yakıt tüketiminde Fluent verilerine göre %12.2, CFX verilerine göre %16.3 düşüş meydana geleceği öngörülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Hava direnç katsayısı, yakıt tüketimi, türbülans, Fluent, CFX

**NUMERICAL INVESTIGATION THE EFFECT OF AIR RESISTANCE
COEFFICIENT ON FUEL CONSUMPTION**

Volkan AKGÜL

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Muammer ÖZKAN

In this study the effect of critical dimensions (roof angle, windshield angle, stagnation point and ground clearance) and flow control applications(rear spoiler and vortex generator) on air resistance coefficient and indirectly on fuel consumption were numerically investigated for 1/1 scaled SUV model.

For this purpose 22 models were developed and each model were solved for computational domain which is equal in size with a real wind tunnel by using Fluent and CFX code with two-equation RNG $k - \varepsilon$ turbulence model. Ansys Mesher, Fluent-CFX and CFD Post were used as a grid generator, flow solver and post processor. Numerical results showed that possible fuel consumption was decreased %12.2 and %16.3 according to Fluent and CFX data respectively.

Keywords: Air resistance coefficient, fuel consumption, turbulence, Fluent, CFX

1.1 Literatür Özeti

Han ve ark. (1996), üç farklı tipteki (kare arka yüzeyli, uzun eğimli arka yüzeyli, kısa eğimli arka yüzeyli) taşıt için Standart $k-\epsilon$ ve RNG $k-\epsilon$ modelleri ile direnç katsayısı belirlemişler ve RNG modelin kullanıldığı çözümlerin deneysel sonuçlara daha yakın olduğunu tespit etmişlerdir [1].

Schenkel (1977), 3/8 ölçekli bir taşıtın ön ve arka tarafına eklenen spoylerin direnç ve kaldırma kuvveti üzerindeki etkilerini rüzgar tüneli deneyleri ile incelemiştir [2].

Perzon ve ark. (1999), 0,3 ölçekli bir çekici ve römork modelinden elde ettikleri deneysel sonuçlarla Standart $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, Non-linear Eddy Viscosity ve Reynolds Stress Transport (RSM) türbülans modellerinden elde ettikleri sayısal verileri karşılaştırmışlar ve RNG $k-\epsilon$ ve Non-linear Eddy Viscosity modelleri ile durma noktalarındaki basıncın daha doğru tespit edilebildiğini belirlemişlerdir [3].

Jindal ve ark. (2005), iki araç geometrisi etrafındaki akış alanının sayısal sonuçlarını nesnelere etrafındaki akışın grid çizgilerinin gövde yüzeylerine hizalanmasına gerek duyulmadan hesaplanmasına olanak veren Immersed Boundary (IB) tekniğini steady RANS CFD çözücüsü ile birlikte kullanarak incelemiştir. Sonuçlar PIV hız ve basınç ölçümleri ile elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmış ve CFD simülasyonları iki araç modeli için direnç katsayısını %6 doğruluk derecesinde hesaplamıştır [4].

Helgason ve Hafsteinsson (2009), bir aracın aerodinamik özelliklerini geliştirmek amacıyla otomatik şekil optimizasyonunu kullanmıştır. Çözüm ağı ve CFD hesaplamaları

için AVL FIRE kodu, çözüm ağı deformasyonu için Sculptor ve optimizasyon için ise modeFrontier yazılımları kullanılmıştır. Karşılaştırma, iki farklı optimum geometri sonucunu veren kararlı $k-\varepsilon$ ve LES türbülans modelleri arasında yapılmış, $k-\varepsilon$ modelinde direnç katsayısı %1.3 azalmış, kaldırma katsayısı ise %38 artmıştır. LES modelinde ise direnç katsayısının %13, kaldırma katsayısının ise %26 azaldığı görülmüştür [5].

Favre (2009), basit araç modellerinin çapraz rüzgar aerodinamiğini simüle etmek için DES simülasyonunun sağladığı olanakları endüstriyel çerçevede incelemiştir. DES ile simüle edilen sonuçlar umut verici bulunmuş ve mevcut deneysel verilerle iyi derecede örtüştüğü görülmüştür [6].

Bordei ve Popescu (2011), ihtiyaçları doğrultusunda uygun model ve sayısal şemayı seçmek için Ahmed cismi üzerinde Fluent, CFX, OpenFOAM ve PowerFLOW ile yapılan farklı sayısal deneylerin kıyaslamasını yapmışlar, uygulama olarak ise bir sedan yarış arabası etrafındaki akışı göz önünde bulundurmışlardır. Sonuçlar doğruluk açısından en iyi çözücünün Star-CCM+ olduğunu, Fluent yazılımında direnç bakımından en iyi modelin Spalart-Allmaras olarak bulunduğu, Ahmed cismi için Fluent formülasyonu Transition Shear Stress Transport türbülans modeli aerodinamik verimlilik ve kaldırma kuvveti hesabında en iyi aday olarak belirlenmiş ve son olarak ANSA, PowerFLOW, DISCRETIZER, ANSYS Mesher, CFX Pre, Gambit ve T-Grid ile kıyaslandığında HARPOON yazılımının en hızlı çözüm ağı oluşturma yazılımı olduğunu fakat çok kompleks geometrilerde ANSA yazılımının daha güvenilir olduğunu öne sürmüşlerdir [7].

Koike ve ark. (2004), Mitsubishi Lancer Evolution aracının tavanında sürüklenme direncine sebep olan akış ayrılma noktasını geciktirmek için tavan bitimine yerleştirilen bombe şekilli girdap üreticileri (Vortex Generators)'ni 50 m/s hızla kapalı, tam ölçekli bir rüzgar tüneline ve CFD analizleri ile test etmişler ve sürüklenme ve kaldırma katsayılarında 0,006 düşüş meydana geldiğini gözlemlemişlerdir [8].

Krajnovic ve Davidson (2005) hareketli bir zeminin eğimli arka geometriye sahip bir araç üzerindeki akışa etkisini LES (Large Eddy Simulation) türbülans modeli kullanarak incelemiş ve bu zeminin direnci %8 azalttığını ortaya koymuşlardır [9].

1.2 Tezin Amacı

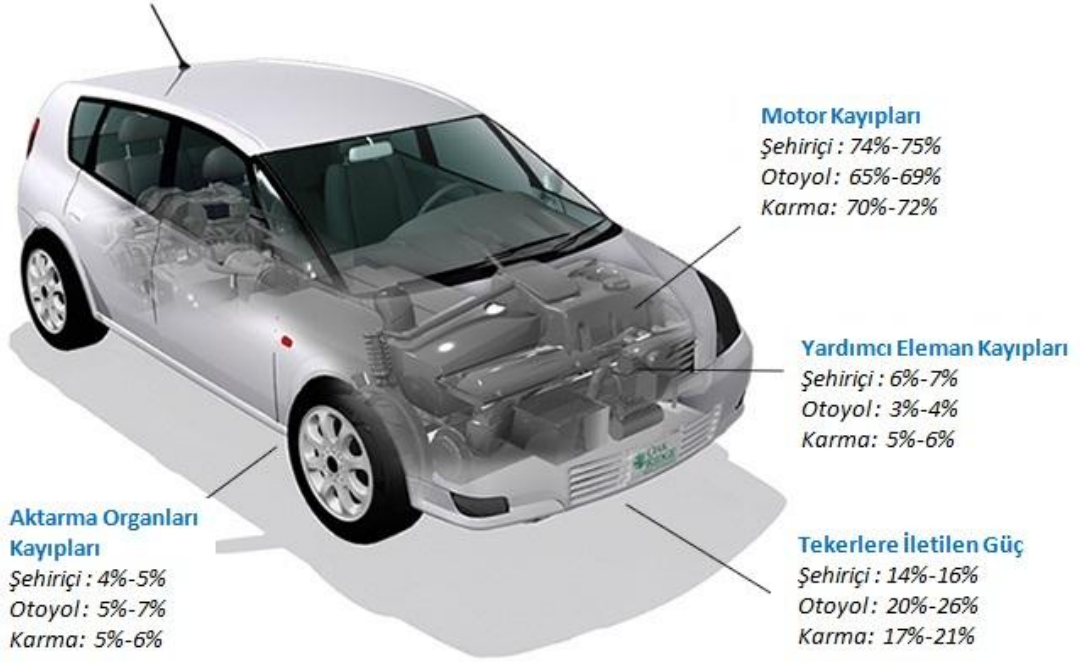
Bu çalışmanın amacı hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile taşıt üzerindeki basınç, hız, türbülans ve akış karakteristiğini önemli ölçüde değiştiren kritik boyutları belirleyip akış kontrol uygulamaları ile aerodinamik bakımdan optimum taşıt geometrisini belirlemek ve bu özellik ve uygulamaların taşıtın muhtemel yakıt tüketimine etkisini incelemektir.

1.3 Hipotez

Taşıtlarda yakıt tüketimini azaltmak ve maksimum hızı iyileştirmek amacıyla hava direnç katsayısını düşürme çalışmaları günümüzde taşıt tasarımcılarının üzerinde yoğunlaştıkları en önemli konulardan birisidir. Bu çalışmalar sırasında taşıt kullanım alanı kısıtlanmamalı ve müşteri açısından belirleyici noktalardan biri olan estetik görünüm göz ardı edilmemelidir. Bu özellikler dikkate alınarak hazırlanan modellerden elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında direnç ve kaldırma katsayılarının literatürdeki geometri kaynaklı C_d ve C_l değişimleriyle neredeyse aynı yönlü değiştiği fakat bazı durumlarda değişim oranlarının birbirlerinden farklı olduğu görülmüştür.

TAŞITLARDA YAKIT TÜKETİMİ, KAYIPLAR VE DİRENÇLER

Bir taşıtın yakıt tankına konulan yakıtın enerjisinin sadece 14%-26%'sı sürüş çevrimine bağlı olarak taşıtın hareket ettirilmesi amacıyla kullanılır. Enerjinin geri kalan kısmı motorda, aktarma organlarında ve yardımcı güç elemanlarında kullanılır [10].



Şekil 2. 1 Şehir içi, otoyol ve karma çevrimler için meydana gelen güç kayıpları [10]

2.1 Motor Kayıpları

Benzinli araçlarda yakıt enerjisinin büyük bir kısmı motordan ısı olarak dışarı atılır. Bunun yanında küçük miktarda enerji de motor sürtünmesi, havanın motor içine ve

dışına gönderilmesi ve verimsiz yanma sonucunda kaybedilir. Değişken subap zamanlaması ve kaldırma (VVT&L), turboşarj, direkt yakıt püskürtme ve silindir deaktivasyonu gibi gelişmiş teknolojiler meydana gelen bu kayıpları azaltmak amacıyla kullanılabilir.

Dizel araçlarda kayıplar daha düşük seviyelerdedir ve benzinli araçlara göre genellikle üçte bir oranında daha verimli çalışırlar. Dizel teknolojisindeki ve yakıtlarındaki son gelişmeler dizel araçları daha çekici hale getirmektedir.

Bilimsel ve teknolojik gelişmeler ışığında benzin ve dizel motorlarında bulunan sistemlerin daha etkin hale getirilerek verimlerinin artırılması amacıyla yapılan çalışmalar devam etmektedir [10].

2.2 Aktarma Organları Kayıpları

Transmisyon ve diferansiyel yakıt tüketimi bakımından en önemli iki aktarma organı elemanlarıdır. Güç transmisyonunda, özellikle de nispeten verimsiz tork konverteri ile otomatik transmisyonunda ve ön diferansiyel aksamındaki hipoid dişlilerde kayıplar mevcut olabilir. Üniversal kavrama, rulmanlar ve diğer elemanlarda kayıplar daha azdır.

Mevcut taşıtlarda transmisyonlar ya otomatik ya da maneldir ve sonsuz sayıda vites çevrim oranı mevcuttur. Bu nedenle motor ve taşıtı motorun çalışma aralığı boyunca mükemmel bir şekilde eşleştirmek genellikle mümkün değildir. Mükemmel olmayan bu eşleşme yüzünden motor, verilen bir hız ve yükte genellikle optimum verimden daha düşük seviyelerde çalışır. Yarı otomatik şanzıman(AMT), çift kavrama, lock-up şanzıman ve sürekli değişken şanzıman(CVT) gibi teknolojiler bu kayıpları azaltabilmektedir.

Aktarma organlarının en önemli elemanı diferansiyel aksamıdır. Modern taşıtlarda tekerlere eşit tork sağlamak amacıyla tork eşitleyici diferansiyel kullanılır ve bu sistem farklı dairesel hızların oluşmasını mümkün kılar. Arkadan çekişli bir sistemde hipoid dişli seti diferansiyelin uç kısmına giren tahrik miline oldukça düşük bir pozisyon sağlamak amacıyla kullanılır. Hipoid dişlilerde meydana gelen sürtünme önemlidir ve özel viskoz yağlayıcılar gerektirir. Buna karşılık önden çekişli sistemlerde hipoid dişli kullanılmaz ve tahrik dişlisi daha verimlidir [11].

2.3 Yardımcı Eleman Kayıpları

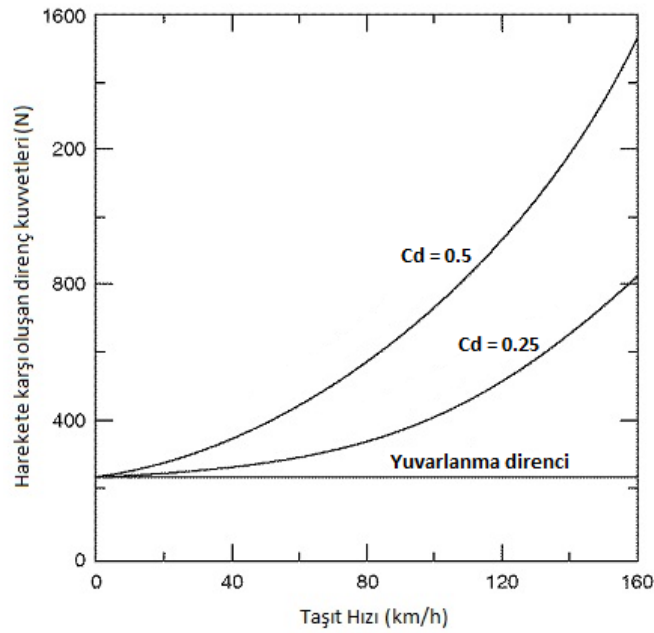
Fan, alternatör, hidrolik direksiyon, klima, devirdaim pompası ve diğer ekipmanlar motor tarafından üretilen enerjiyi kullanırlar [10].

2.4 Taşıt Faktörleri

Aktarma organlarının dışında taşıtın genel yakıt tüketimini önemli ölçüde etkileyen çok sayıda faktör bulunmaktadır. Bu faktörlerin yakıt tüketimine etkisi genellikle sürüş çevrimleriyle doğrudan ilişkilidir. Örneğin aerodinamik yüksek hızlarda düşük hızlara oranla daha önemlidir [11].

2.4.1 Aerodinamik

Taşıtlarda daha iyi yakıt tüketimi, performans, rüzgar ses seviyesinin azaltılması, geliştirilmiş yol tutuşu ve stabilite üreticileri çeşitli çalışma koşulları altında farklı gövde şekilleri için hava direncini incelemeye sevk etmiştir. Aerodinamik direnç düşük taşıt hızlarında genellikle etkisizdir fakat artan hızlarda hava direncinin büyüklüğü önemli seviyelerde olmaktadır. Bu durum bir aracın tipik hız aralığında sabit yuvarlanma direncine karşı farklı aerodinamik dirençlerin oluşturduğu kuvvetleri gösteren Şekil 2.2'de açıkça görülmektedir [12].

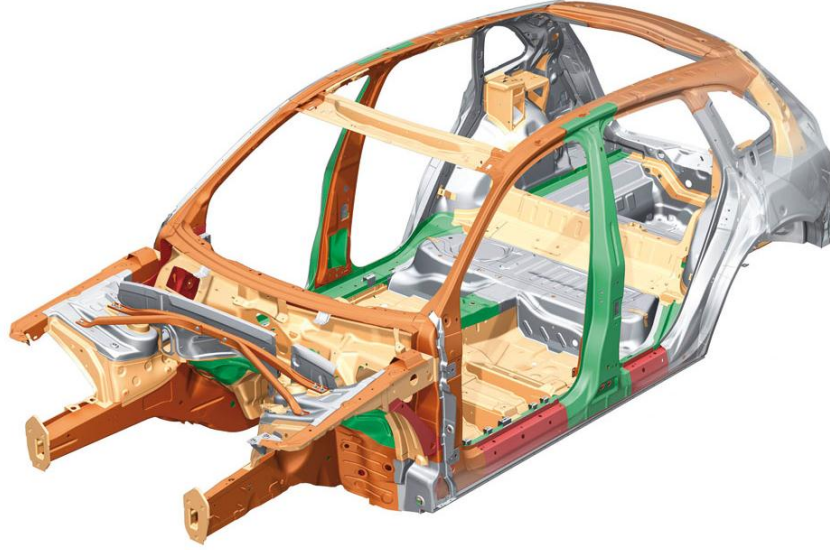


Şekil 2. 2 Yüksek, düşük direnç katsayısı ve yuvarlanma direncinin fonksiyonu olarak taşıt hızına bağlı oluşan direnç kuvveti [12]

2.4.2 Yapısal Özellik

Taşıtlar için yapısal tasarım ve ağırlık yönetimi yoğun araştırma ve geliştirmeler içerisinde önemli bir yere sahiptir. Şüphesiz ki taşıt ağırlığının azaltılması yakıt ekonomisi sağlanması amacıyla kullanılan önemli yöntemlerden birisidir fakat ağırlık azaltmak amacıyla sadece boyut küçültme yapıldığında bazı kısıtlamalarla karşılaşılır. Taşıt tasarımında makul maliyetlerle uygun yolcu ve bagaj kapasitesi, korozyon direnci sağlama, sürüş kalitesi, kontrol ve çarpmalara karşı dayanıklılık gibi çeşitli kriterler önem arz etmektedir.

Taşıt ölçülendirmesindeki kısıtlamalar dahilinde modern tasarımcıların amacı diğer tasarım kriterleriyle uyumlu malzemeler ile ağırlığı minimize etmektir. Yolcu taşıtları, yükleri kolayca taşıyabilecek ölçüde güçlü olmanın ötesinde yapısal olarak rijit olmalıdırlar [11].



Şekil 2. 3 Audi Q5 gövde yapısı [13]

2.4.3 Lastikler ve Yuvarlanma Direnci

Yuvarlanma direnci F_{RO} lastik ile yol yüzeyi arasındaki temas bölgesinde meydana gelen deformasyon prosesinin bir ürünüdür.

$$F_{RO} = f \cdot G = f \cdot m \cdot g \quad (2.1)$$

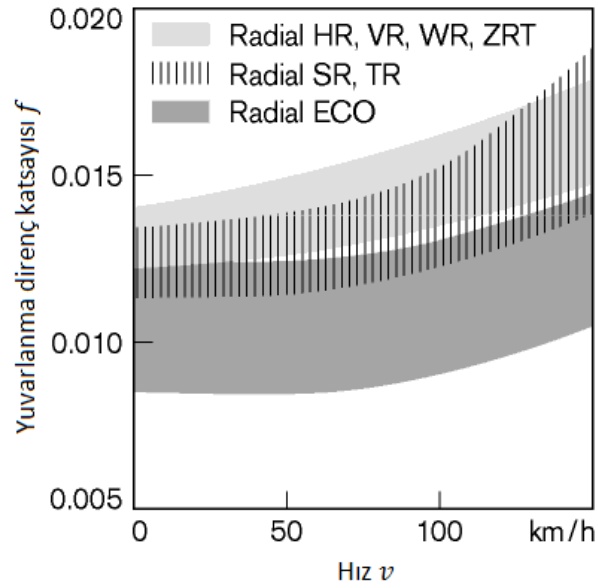
Yuvarlanma direnç katsayısı, deformasyon seviyesi ile doğru, lastik yarıçapı ile ters orantılı olarak artar ya da azalır. Bu yüzden yuvarlanma direnç katsayısı büyük yüklerde, yüksek hızlarda ve düşük lastik basınçlarında artış gösterir.

Viraj alma sırasında yuvarlanma direncine ilave viraj direnci ortaya çıkar.

$$F_K = f_K \cdot G \quad (2.2)$$

Viraj direnci F_K taşıt hızı, kavis yarıçapı, süspansiyon geometrisi, lastikler, lastik basıncı ve yanal ivmelenme altında taşıtın tepkisinin bir fonksiyonudur [14].

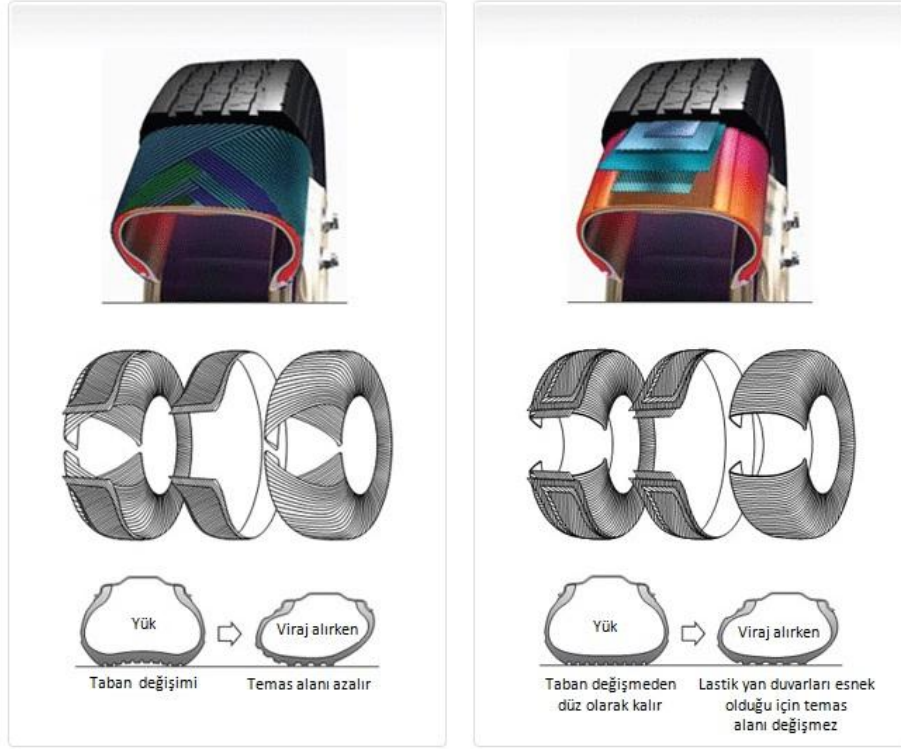
Bulduğumuz yüzyılda otomotiv teknolojisindeki en önemli yeniliklerden birisi modern pnömatik lastiklerin geliştirilmesidir. Günümüzde kullanılan lastikler üstün sürüş kalitesi sağlarlar, sessiz ve dayanıklıdır ve farklı yol yüzeylerinde üstün tutuş kabiliyetine sahiptirler. Lastik, sert zeminde yuvarlanma direnci için anahtar faktördür.



Şekil 2. 4 Farklı radyal tip lastikler için yuvarlanma direnç katsayısının hıza bağlı değişimi [14]

Bu direnç birincil olarak lastik karkasındaki gecikmeden kaynaklanır. Rüzgar ve lastik kayması gibi diğer faktörlerin etkisi daha azdır.

Eski bias-ply lastik tasarımlarının yerini radial-ply lastiklerin almasıyla birlikte lastik yuvarlanma direncinin azaltılmasına yönelik çarpıcı gelişmeler kaydedilmiştir [14].



(a) Bias tipi lastik

(b) Radyal tip lastik

Şekil 2. 5 Bias ve Radyal tip lastik yapısı [15]

2.5 Taşıt İşletme Faktörleri

2.5.1 Sürüş Çevrimi

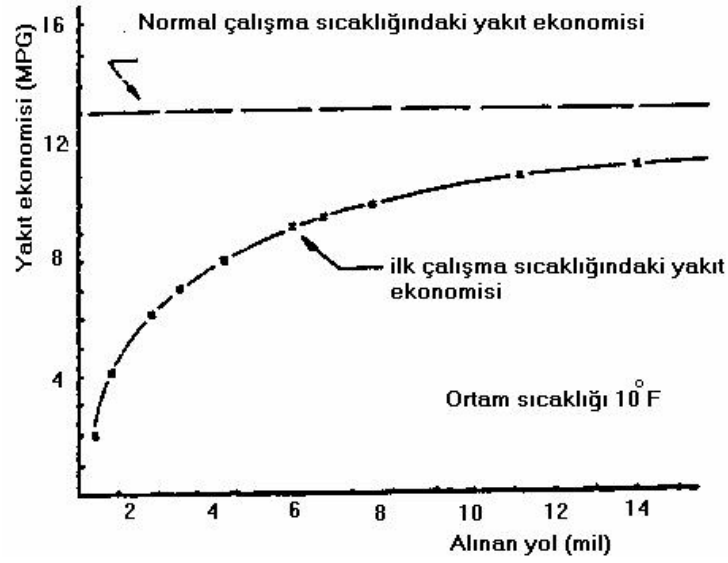
Şehir içindeki düşük hızlarda ve dur-kalk şeklinde gerçekleşen sürüşlerde yakıt sarfiyatı, düzgün fakat daha yüksek hızlarda uygulanan şehir dışı veya otopan sürüşlerine göre oldukça yüksek seviyelerdedir.

Seyir çevriminin bu etkisi EPA (Environmental Protection Agency) tarafından yapılan şehir içi ve şehir dışı yakıt tüketimi test çevrimi sonuçlarından görülebilir. Bu bilgiler şehir içi yakıt tüketiminin şehir dışına nazaran %50'den daha fazla olduğunu göstermektedir. Test çevrimleri sonuçlarında görülen büyük farklılıklar, yakıt ekonomisi ile ilgili bir değere, seyir çevrimi açık bir şekilde belirtilmedikçe itibar edilmemesi gerektiğini göstermektedir. Şehir içi yakıt tüketiminin bu derece yüksek olmasının çeşitli nedenleri vardır. En önemli etken taşıtın ağırlığıdır. Taşıt ivmelenirken aynı zamanda kinetik enerjisi de artar. Frenleme esnasında, bu kinetik enerjinin bir bölümü ısıya dönüştürülmekte ve dolayısıyla kaybolmaktadır. EPA şehir içi çevriminde toplam

yakıt enerjisinin büyük çoğunluğu frenlemede kaybolmaktadır. Bu problem frenleme enerjisinin geri kazanılması düşüncesini ortaya çıkarmıştır [16].

2.5.2 İlk Çalışma ve Isınma

Soğuk bir taşıtın çalıştırılması esnasında, motor ve aktarma organlarındaki sürtünme oldukça fazladır. Aynı zamanda özellikle buji ile ateşlemeli motorlarda zengin hava/yakıt karışımı gerekmektedir. Şekil 2.6' da ısınmanın yakıt ekonomisi üzerindeki etkisi görülmektedir [16].



Şekil 2. 6 İlk çalışma ve normal çalışma sıcaklıklarında yakıt ekonomisi [16]

2.5.3 Ortam Koşulları

Motorlu taşıtların şehir içi ve şehir dışı seyir çevrimleri arasında fark olduğu gibi kendi içlerinde de farklılıklara sahiptirler. Şehir içi seyir çevrimlerinde dikkati çeken en önemli özelliklerden birisi motorun boştaki çalışması (relanti), diğeri kapış pompasını çalıştıran pozitif ivmeli hareketlerdir. Ayrıca motorun soğuk veya sıcak ilk hareketi de yakıt ekonomisini etkilemektedir.

Çevre sıcaklığı ve diğere çevre faktörleri yakıt tüketimini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum birçok sürücünün yaz aylarında kışa nazaran daha az yakıt sarf ettikleri görüşünü doğrulamaktadır.

Sıcaklığın lastik histerizisi ve motor sürtünmeleri üzerindeki etkisi, atmosfer nemliliğinin hava/yakıt karışım oranını ve dolayısıyla yanmayı olumsuz etkilemesi yakıt tüketimini etkileyen unsurlar arasında sayılabilir [16].

2.5.4 Yol Faktörleri

Şehir içi yollarda hareket etmek, şehir dışı yolda hareket etmeye oranla daha fazla duruş - kalkış ve daha düşük hız gerektirir. Taşıtın harekete geçmesi için kararlı hızdaki koşullarda bulunmayan ivmelenme direnci etkili olur. İvme direnci arttıkça bunu karşılamak için güç ihtiyacı da artar. Motorun daha fazla güç üretmesi için yakıt tüketimi artar. Yakıt tüketiminin artması, yakıt ekonomisinin kötüleşmesine neden olur [16].

2.5.5 Bakım

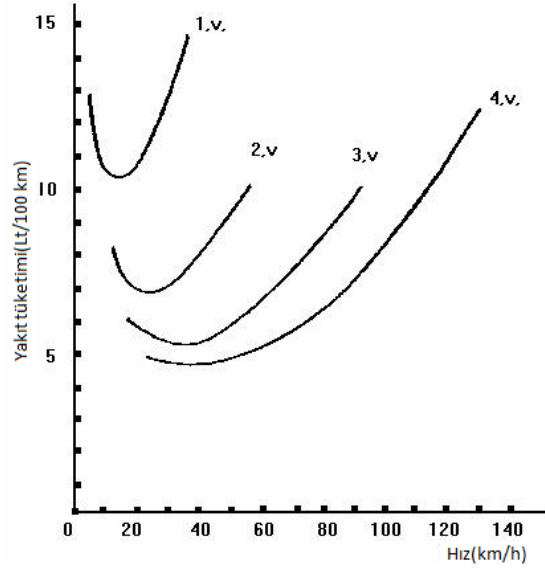
Motor ve taşıt ayarlarındaki düzensizlikler, yakıt ekonomisini dikkate değer oranda etkilemektedir. Örneğin; soğutma suyu sıcaklığının 95 °C yerine 75 °C olması, yakıt ekonomisini % 6-7, ekonomizer düzensizliği % 10 – 15, altı silindirli bir motorda bir bujinin çakmaması % 20-25, iki bujinin çakmaması ise % 50-60 kadar kötüleştirmektedir. Bu tür kayıpları en aza indirmenin temel koşulu, düzenli periyodik kontrol ve bakımdır [17].

2.5.6 Sürüş Alışkanlıkları

Bir taşıtın ani ilk harekete geçişi, müteakiben gaz kesilerek motor freni oluşturulması, birinci viteste uzun süre hareket edilmesi, gaz pedalının darbeleri kullanılması, vites değiştirmede gaz vermeye devam edilmesi veya ara gazı verilmesi, yüksek pozitif ve negatif ivme kullanılması sürücünün dikkat etmesi gereken yakıt tüketimini artırıcı işletme şekilleridir.

Taşıt sürücülerinin ani ivmelenme ve çok hızlı taşıt kullanmaları yakıt ekonomisini kötüleştirmektedir. Taşıt kullanıcılarından kaynaklanan hatalı davranışlar, sürücülerin eğitilmesiyle giderilebilir.

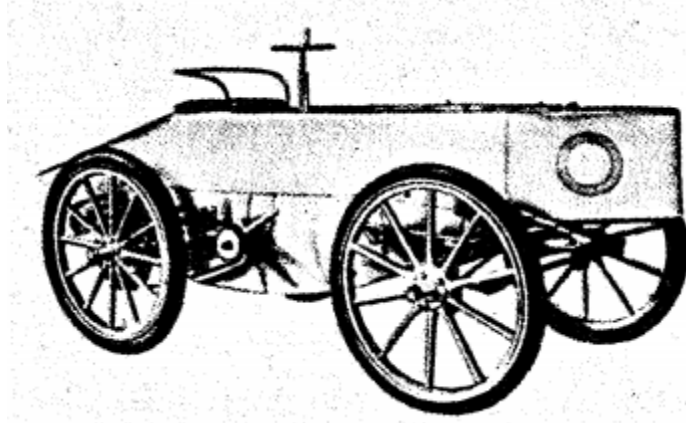
Bölgelerin topografik yapısına bağlı olarak yol eğimleri, yol kalitesi ve viraj durumu emisyonları artırıcı yönde etkili olmaktadır. Sürücülerin yol, trafik ve aracın durumuna göre uygun vitesi kullanmamaları yakıt tüketimi ve buna bağlı olarak egzoz emisyonlarını değiştirmektedir. Şekil 2.7’de bu etki görülmektedir [18]. Trafik düzeninin yeterli olduğu ve trafik akışının rahatça sağlandığı yollarda egzoz gazları emisyonları oldukça azalmaktadır. Aksi durumda yani araçların sık sık durup kalkmak, hızlanmak ve yavaşlamak, relantide beklemek zorunda kaldıkları durumlarda emisyonlar çok hızlı artmaktadır [16].



Şekil 2. 7 Farklı vites seviyelerinde hıza göre yakıt tüketimindeki değişim [16]

KARAYOLU TAŞITLARININ AERODİNAMİĞİ

Taşıt aerodinamiği taşıtın hava içindeki hareketi sonucu ortaya çıkan etkilerle ilgilenmektedir. Karayolu taşıtları için bu etkilerin önemi bu taşıtlar yüksek hızlara çıkmaya başladıklarında anlaşılır olmuştur. Aerodinamik prensiplerin karayolu taşıtlarına uygulanmasıyla ilgili ilk girişimlerden bir tanesi karadaki ilk hız rekorunu elinde tutan ve Gaston Chasseloup-Laubat tarafından kullanılan Jantaud (Şekil 3.1) isimli taşıtın hava akışına uygun şekillendirilmesi olmuştur [11].



Şekil 3. 1 İlk kara hız rekorunu kıran ve Gaston Chasseloup-Laubat tarafından kullanılan Jantaud isimli kara taşıtı [11]

3.1 Bir Araç Etrafındaki Hava Akış Mekanikliği

Bir araç üzerindeki hava akışı, hız ve basıncın Bernoulli Denklemi'ndeki ilişkisi ile ifade edilir. (Bernoulli Denklemi'nde akış, taşıt aerodinamiğine uygun olarak sıkıştırılamaz olarak ele alınır, buna karşılık sıkıştırılabilir akış için eşdeğer ilişki Euler Denklemi'nde bulunmaktadır.)

Bernoulli Denklemi;

$$P_{Statik} + P_{Dinamik} = P_{Toplam} \quad (3.1)$$

$$P_S + \frac{1}{2}\rho V^2 = P_T \quad (3.2)$$

şeklindedir.

ρ =Havanın yoğunluğu

V =Havanın araca göre hızı

Bu ilişki sakın bir tarzda akan akışkan hacmine Newton'un İkinci Yasası'nın uygulanmasıyla türetilmiştir. Buradaki "sakın" kelimesi akışın pürüzsüz ve yumuşak bir şekilde hareket ettiğini ve ihmal edilebilir bir sürtünmeye maruz kaldığını belirtmekte olup bu koşullar bir taşıta yaklaşan hava akışına da uygulanabilmektedir. Denklemin türetilmesinde kuvvetlerin toplamı akış alanı üzerindeki basınç etkisini ortaya koymaktadır. Bu ifade momentum değişim hızına eşitlenerek hız terimi ortaya çıkarılabilir.

Bernoulli Denklemi havanın statik ve dinamik basınçlarının toplamının (P_T) taşıta yaklaştıkça sabit olacağını ifade etmektedir. Aracın hareketsiz, havanın ise (rüzgar tüneline olduğu gibi) hareket halinde olduğu göz önüne alındığında havanın "akış çizgileri" adı verilen çizgiler boyunca aktığı görülür. Bir demet akış çizgisi akış tüpünü oluşturur.

Taşıttan belirli bir mesafede statik basınç yalnızca ortam basıncı ya da (P_{atm}) barometrik basıncıdır. Dinamik basınç, taşıta yaklaşan bütün akış çizgileri için sabit olan bağıl hız tarafından oluşturulmaktadır. Bundan dolayı toplam basınç P_t bütün akış çizgileri için aynıdır ve $P_S + \frac{1}{2}\rho V^2$ ye eşittir.

Akış araca yaklaşırken akış tüpleri ayrılır ve bir kısmı aracın yukarisına diğer bir kısmı ise aşağısına doğru gider. Sonuç olarak bir akış çizgisi gövde üzerine düz bir şekilde gitmeli ve ayrışmalıdır (Şekil 3.2'deki tampon üzerine çarpan akış çizgisi). Bu noktada bağıl hız sıfır olur. Sıfır olan hız terimi ile araç üzerindeki bu noktada gözlemlenen basınç P_t olacaktır. Yani taşıt üzerindeki bu noktaya bir basınç algılayıcı yerleştirildiğinde toplam basınç ölçülecektir [19].

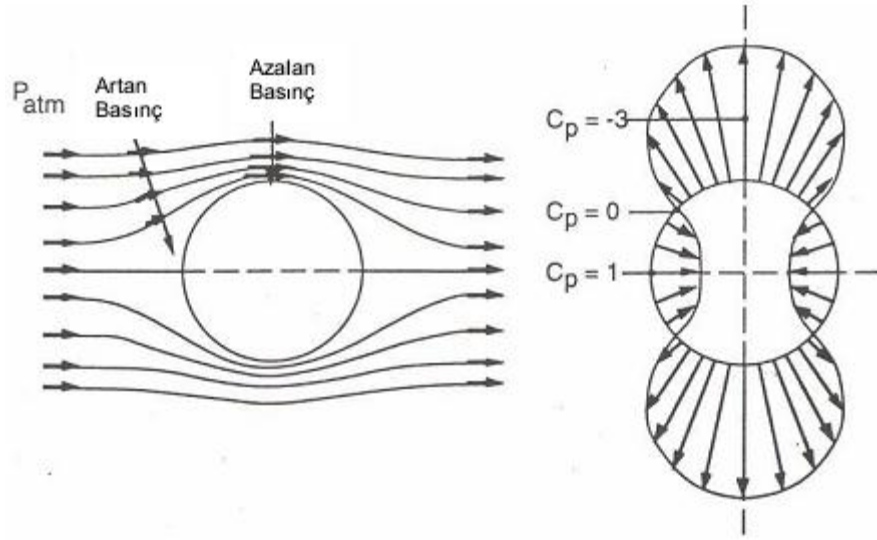


Şekil 3. 2 Taşıt gövdesi üzerinde akmakta olan akış tüpleri [20]

Kaput üzerinde akan akış çizgilerine ne olması gerektiği göz önüne alınsın. İlk olarak yukarı doğru yöneldiklerinde, kavis yukarı doğru konkavdır. Taşıt üzerinde akış çizgilerinin hala düz olduğu mesafede statik basınç ortam basıncıyla aynı olmalıdır. Hava akışının yukarı doğru kavis alması için hava akışını çevirecek kuvveti sağlamak amacıyla bu bölgede statik basınç ortam basıncından yüksek olmalıdır. Eğer statik basınç daha yüksekse, bu bölgede hız, Bernoulli Denklemi'ne uymak için azalmalıdır.

Diğer taraftan, akış kaporta yüzeyini takip etmek için döndükçe basınç akışı yönlendirmek (eğmek) için ortam basıncının altına düşmeli ve hız artmalıdır. Bu noktalar, bir silindir üzerindeki akışı ifade eden Şekil 3.3' de gösterilmiştir.

Böylece, Bernoulli Denklemi, bir araç gövdesi üzerindeki hava akışında basınç ve hızın nasıl değiştiğini ifade etmektedir. Sürtünmenin mevcut olmaması durumunda hava ön kısımda olduğu gibi hızı basınca değiştirerek tavan üzerinden yukarı doğru ve aracın arka kısmında aşağı doğru akacaktır. Bu durumda, aracın arka kısmındaki basınç kuvvetleri ön kısımdakileri tam olarak dengeleyecek ve direnç oluşmayacaktır. Ancak yapılan deneyler direncin oluştuğunu göstermektedir. Oluşan direncin bir kısmı aracın yüzeyindeki havanın sürtünmesinden, bir kısmı ise sürtünmenin ana akışı aracın arka kısmında aşağı doğru yönlendirmesinden kaynaklanır. Bu durum, bir cisim üzerindeki akışta sınır tabakanın etkisiyle açıklanır [19].

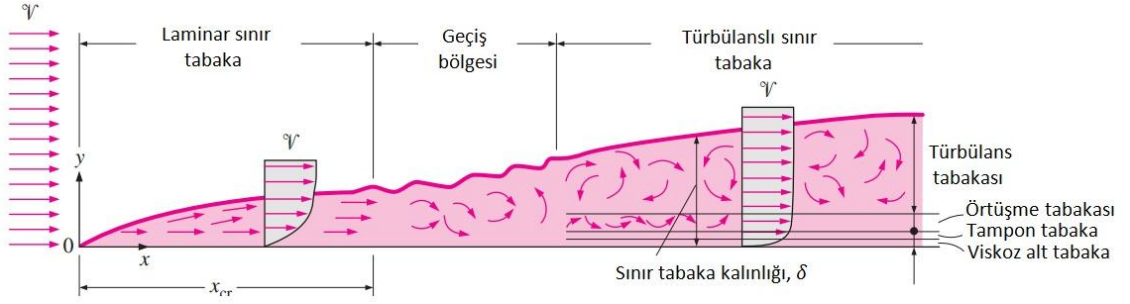


Şekil 3.3 Bir gövde üzerinde meydana gelen hava akışındaki basınç ve hız gradyanları [19]

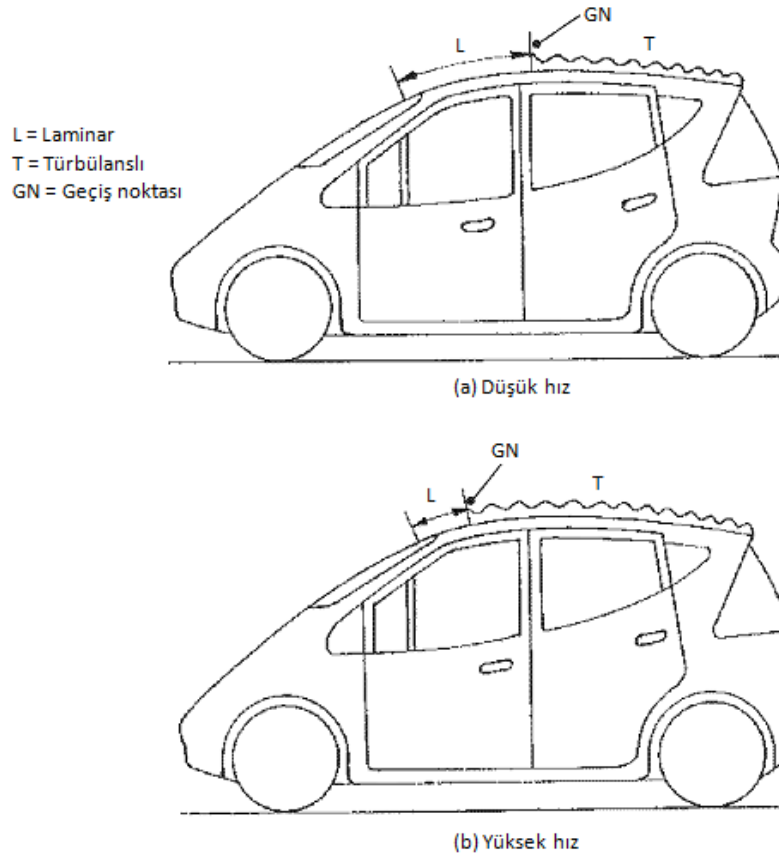
Şekil 3.4'de gösterilen düz bir plaka üzerindeki akış göz önüne alındığında plaka üzerine V hızı ile yaklaşan hava birbiri üzerine istiflenmiş bitişik tabakalar olarak düşünülebilir. Plakaya bitişik ilk akışkan tabakasındaki parçacıkların hızı kaymama koşulundan dolayı sıfır olur. Hareketsiz olan bu tabaka, farklı hızlarda birbirine bitişik akışkan tabakalarının parçacıkları arasındaki sürtünmeden dolayı komşu akışkan tabakanın parçacıklarını yavaşlatır. Daha sonra bu akışkan tabakası yanındaki tabakanın moleküllerini yavaşlatır ve bu süreç böyle devam eder. Bundan dolayı plakanın varlığı, plakadan δ kadar uzağa, serbest akım hızının hemen hemen değişmeden kaldığı bir yere kadar hissedilir. Sonuç olarak akışkanın hızının x - bileşeni $y = 0$ 'da 0 değerinden $y = \delta$ 'da hemen hemen V 'ye kadar değişir. Akışkan viskozitesinin neden olduğu viskoz kayma kuvvetlerinin hissedildiği, plaka üzerinde δ ile sınırlanan akış bölgesine "hız sınır tabakası" adı verilir [21]. Sınır tabaka sıfır kalınlık ile başlar ve cisim boyunca gelişerek devam eder. Başlangıçta laminar akışa sahip olan sınır tabaka daha sonra türbülanslı bir akışa sahip olur.

Sınır tabaka araç gövdesinin ön yüzünde duracak olan akış çizgisinin yüzeye çarptığı noktada başlar. Sınır tabakada hız sürtünmeden dolayı azalır. Durma noktasında basınç toplam basınçtır (statik artı dinamik) ve yüzey boyunca azalır. Bundan dolayı yüzey boyunca basınç gradyanı havayı sınır tabaka boyunca itmeye çalışır ve tabakanın

gelişmesi engellenir. Akış yönündeki basınç düşüşü sınır tabakanın gelişimini engellediğinden “ faydalı basınç gradyeni” olarak adlandırılır [19].

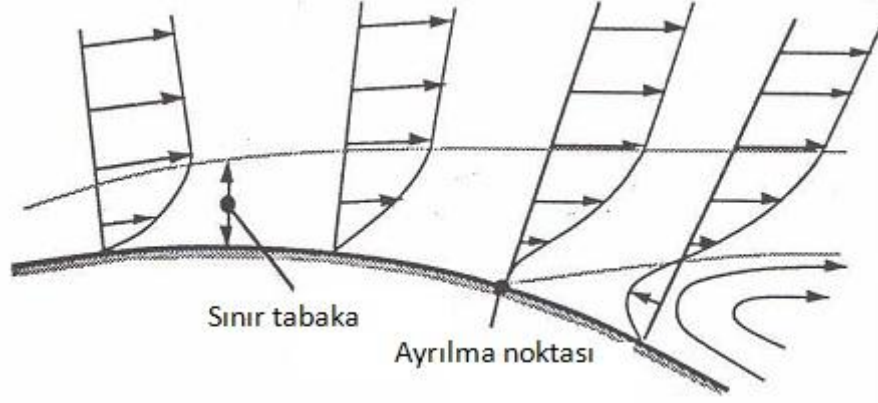


Şekil 3. 4 Düz plaka üzerindeki akışta sınır tabakanın gelişimi ve farklı akış rejimleri [21]



Şekil 3. 5 Düşük ve yüksek hızlarda laminar, türbülanslı sınır tabaka ve geçiş noktası [12]

Buna karşın, akış gövdeyi takip etmek için geri döndüğünde basınç tekrar yükselir. Yükselen basınç akışı yavaşlatarak sınır tabaka kalınlığının artmasına neden olur. Bu nedenle “karşı basınç gradyeni” oluşur. Belirli bir noktada yüzeye yakın yerde akış, basıncın etkisiyle Şekil 3.6’daki gibi geri dönüş yapabilir.



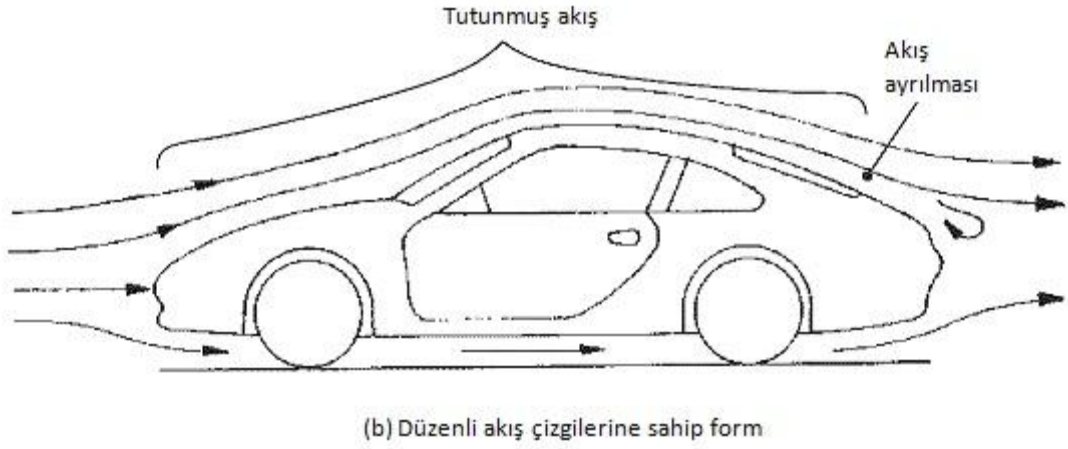
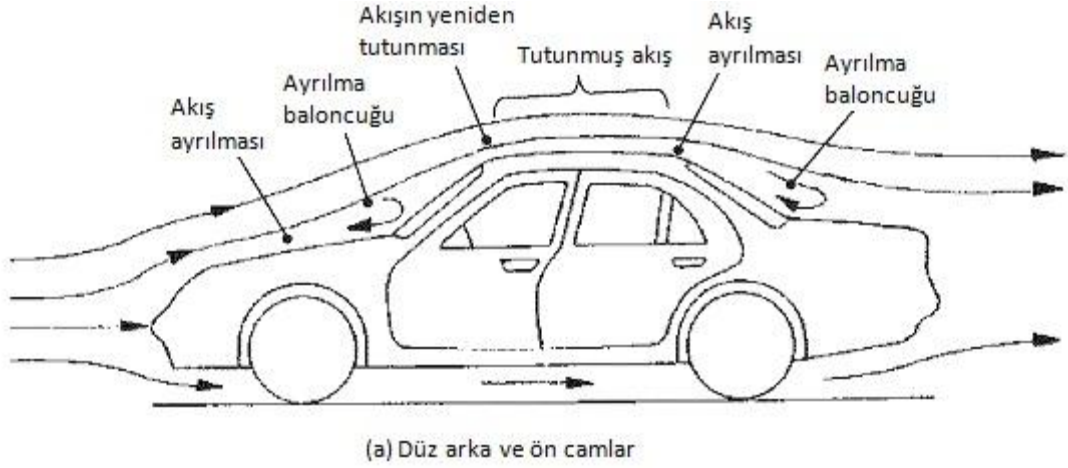
Şekil 3. 6 Karşı basınç gradyeninde akış ayrılması [19]

Akışın durduğu nokta “ayrılma noktası” olarak adlandırılır. Bu noktada ana akış artık cisme tutunmaz ve az çok düz bir çizgide yoluna devam eder. Akış, cismin arka kısmından hava ilave etmeye çalıştığı için bu bölgedeki basınç ortam basıncının altına düşer. Girdaplar oluşur ve bu bölgede akış oldukça düzensizdir [19].

Taşıt gövdesi üzerinde akmakta olan hava, biçimsel olarak ani değişiklikler olmadıkça Şekil 3.7(a)'daki gibi gövde formuna benzer bir yol takip eder. Ön tampon genellikle hafif eğimlidir ve ön cama doğru yukarıya meyil verir. Ön cam yukarı yönlü bir eğim açısına sahiptir ve bu geometriyi kavisli fakat yatay olan tavan kısmı izler. Daha sonra arka cam aşağı doğru eğim göstererek ya bagaj ile birleşir ya da son kısma ulaşana kadar aşağı doğru iner.

Bu nedenle ön camın üst kısmında hava hızı ve basıncı sırasıyla en yüksek ve en düşük değerlerine ulaşırlar. Buna rağmen tavanın arka kısmına doğru ve aşağı doğru eğimin başladığı yerde havanın hızında azalma, basınçta ise artış meydana gelir. Eğer aracın arkasına doğru basınç düşüşü çok kademeli ise hava akımı ile türbülanslı sınır tabakaların karışımı nispeten karardır. Böylece, dış katmanlar ana hava akımı ile birlikte sürüklenecektir Şekil 3.7(b). Diğer taraftan Şekil 3.7(a)'daki gibi arka cam/bagaj eğimi büyük olursa basınç artışı yüksek olacaktır ve böylece ana hava akımının sınır tabakalarla karışım oranı iç tabakaların hareketini devam ettiremeyecek düzeyde olacaktır ve bunun sonucunda yavaşlayan sınır tabakalar kalınlaşacaktır. Bu koşullar altında ana hava akımı gövde yüzeyinden ayrılır ve buna “akış ayrılması” adı verilir. Kaput ile ön cam arasındaki açı büyük olduğunda akış çizgileri kaput yüzeyinden ayrılır

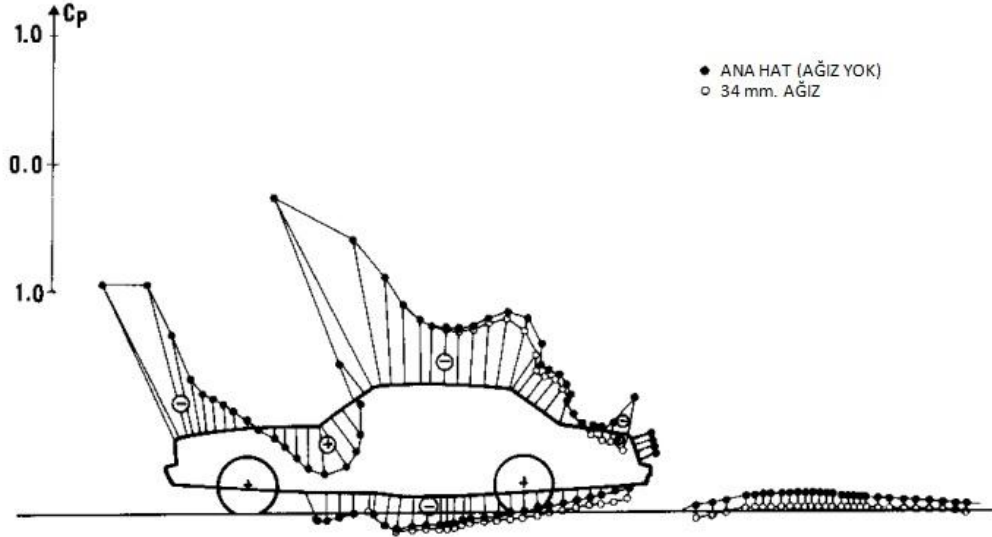
ve ön camın üst kısmında yeniden tutunurlar (Şekil 3.7(a)). Ayrılma ve yeniden tutunma arasındaki boşlukta “ayrılma baloncuğu” adı verilen ve sirküle eden bir hava akımı meydana gelir. Eğer bu dönel hareket çok güçlü olursa enine vorteks oluşumu tespit edilir [12].



Şekil 3. 7 Akış ayrılması ve yeniden tutunma [12]

3.2 Bir Araç Etrafındaki Basınç Dağılımı

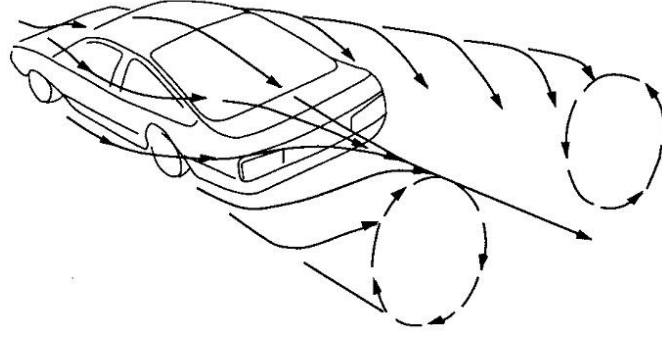
Bu kısma kadar açıklanan temel mekanizmalar bir araç gövdesi üzerinde statik basınç dağılımı meydana getirmektedir. Şekil 3.8 deneysel olarak ölçülmüş basınçları yüzeye dik olarak çizilmiş halde göstermektedir.



Şekil 3. 8 Aracın merkez çizgisi boyunca basınç dağılımı [22,23]

Aracın ön kısmı boyunca yükselen akış dönerek ve kaputu yatay olarak izlemeye çalıştıkça kaputun ön ucunda negatif basınç meydana gelir. Bu bölgedeki karşı basınç gradyeni, bu alanda direnç oluşturan sınır tabaka akışını durdurma potansiyeline sahiptir.

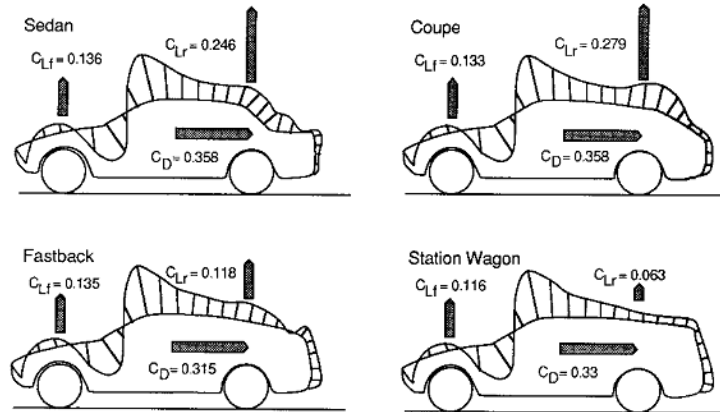
Ön camın alt kısmı ve motor kapağında akış yukarı doğru yönelmelidir ve bundan dolayı yüksek basınç meydana gelmektedir. Bu yüksek basınç alanı klima kontrol sistemleri ve motor hava alığına hava temini için oldukça idealdir ve bu amaçla geçmişte sayısız araçta kullanılmıştır. Bu bölgede ön cam sileceklerinin aerodinamik kuvvetler nedeniyle bozulmasını önlemek amacıyla yüksek basınçlara düşük hızlar eşlik etmektedir. Hava tavan konturunu takip etmeye çalıştığından tavan çizgisi üzerinde basınç yeniden negatif olur. Basınç, arka cam üzerinden bagaja kadar devam eden kavisten dolayı düşük kalmayı sürdürür. Bu bölgede akış ayrılmasının gerçekleşme ihtimali yüksektir. Bu bölgede gövde konturunun açıları ve detaylarının tasarımı aerodinamik bakımdan kritiktir. Düşük basınçtan dolayı aracın yan kısımlarındaki akış da bu bölgeye hava besleme eğiliminde olacaktır [24] ve ayrışma potansiyeline katkıda bulunabilecektir. Bir aracın üst ve yan kısmında meydana gelen genel hava akışı Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Aracın yan kısımlarındaki hava akışı arkadaki düşük basınç bölgesine girip tavan üzerinden gelen akışla birleşerek aracın arkasında girdaplar oluşturur.



Şekil 3. 9 Bir aracın arka kısmında oluşan girdap sistemleri [19]

Bir aracın arka cam açısı ve bagaj uzunluğu, ayrılma noktasının kontrolü bakımından aerodinamik kuvvetler üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Ayrılma bir noktada oluşmalıdır ve alan ne kadar küçük ise genellikle direnç de o derece az olur. Teorik olarak aerodinamik bakış açısından ideal olanı arka kısmın damla şeklinde olmasıdır. Diğer bir ifadeyle belli bir noktaya kadar 15° veya daha küçük açılarla gittikçe incelen konik bir şekildedir. Koninin uç noktasına doğru alan oldukça küçük olduğundan ideal aracın arka ucunun büyük bir ayrılma alanı meydana getirmeden kesilebileceği 1930'lu yıllarda ortaya konmuştur. Küt arka uç formu, dirençte büyük oranda bir artışa neden olmadan arka koltuk bölümünde daha geniş bir hacme olanak sağlamaktadır.

Ayrılma alanının boyutu aerodinamik direnci doğrudan etkilerken aracın arkasından aşağı doğru yönlenmeye zorlanan akış arka kısımdaki aerodinamik kaldırma kuvvetini etkiler. Şekil 3.10 dört farklı tipteki araç için kaldırma ve direnç etkilerini göstermektedir. Ayrılma alanını minimize eden akış kontrolü, akış aşağı doğru çekilirken basınç düşüşünden dolayı arka kısımda aerodinamik kaldırma kuvvetinin artmasına sebep olur [19].



Şekil 3. 10 Farklı araç tipleri için aerodinamik kaldırma ve direnç kuvvetleri [19]

3.3 Aerodinamik Kuvvetler

Basınç kuvvetleri yüzeye dik etki ederler. Cisim üzerindeki kuvvet, basınç vektörlerinin toplamının cisim alanıyla çarpımıdır.

$$\vec{F} = \Sigma p \vec{n} \Delta A \quad (3.3)$$

$$\vec{F} = \oint p \vec{n} \Delta A \quad (3.4)$$

$$\text{Kaldırma kuvveti} = L = F_{normal}$$

$$\text{Direnç kuvveti} = D = F_{akış yönü}$$

İki katı cisim bir mekanik işlemde etkileşim halinde olduklarında kuvvetler temas noktasında uygulanır ya da iletilir. Fakat katı bir cisim bir akışkan ile etkileşim halinde olduğunda bazı ifadelerin açıklanması daha zordur çünkü akışkan şeklini değiştirebilmektedir. Bir akışkan içine daldırılmış katı bir cisim için cismin yüzeyindeki her nokta temas noktasıdır. Akışkan cisim etrafında hareket ederken bütün noktalarda fiziksel temas kurar. Katı cisim ve akışkan arasında mekanik kuvvetlerin uygulanması veya aktarımı cisim üzerindeki bütün noktalar üzerinde meydana gelmektedir ve bu kuvvetlerin aktarımı akışkan basıncı doğrultusunda gerçekleşir [25].

Bu verilere paralel olarak hava akışının bir taşıtla etkileşmesi sonucunda meydana gelen kuvvet ve momentler Çizelge 3.1' de gösterilmiştir.

Çizelge 3. 1 Aerodinamik kuvvet ve momentler [26]

<u>Yön</u>	<u>Kuvvet</u>	<u>Moment</u>
Boyuna (x- ekseni, geriye doğru pozitif)	Direnç	Yuvarlanma momenti
Yanal (y-ekseni, sağa doğru pozitif)	Yan kuvvet	Sapma moment
Dikey (z-ekseni, yukarı doğru pozitif)	Kaldırma	Yunuslama momenti

Hava taşıt yüzeyi boyunca akarken yüzey direnci ya da yüzey sürtünme direnci olarak bilinen ikinci sürtünme bileşeninin ortaya çıkmasına neden olan sürtünme kuvvetleri meydana gelir. Eğer havanın viskozitesi hemen hemen sabit kabul edilirse gövde yüzeyi üzerindeki herhangi bir noktada sürtünme kuvvetleri sınır tabakada meydana gelen yüzey gerilmelerine bağlıdır. Sınır tabaka akışkan hızının yüzeyde sıfırdan (taşıta göre bağlı) yüzeyden belli bir mesafede yerel maksimumuna kadar değişen akışkan tabakasıdır. Bu maksimum yüzey boyunca değişiklik gösterir ve yerel basınç ile doğrudan ilişkilidir. Hem yerel hız hem de sınır tabakanın kalınlığı ve karakteri taşıtın şekli ve hızına büyük oranda bağlıdır.

Gerçekçi yolcu alanı ve mekanik dizayn gereksinimlerinin neden olduğu kısıtlamaların bir sonucu olarak kuvvetin dik bileşeni ortaya çıkmaktadır. Akış karakterinin değişmesine neden olan pozitif veya negatif kaldırma kuvveti İndüklenmiş direnç kuvvetinin ortaya çıkmasına sebep olur.

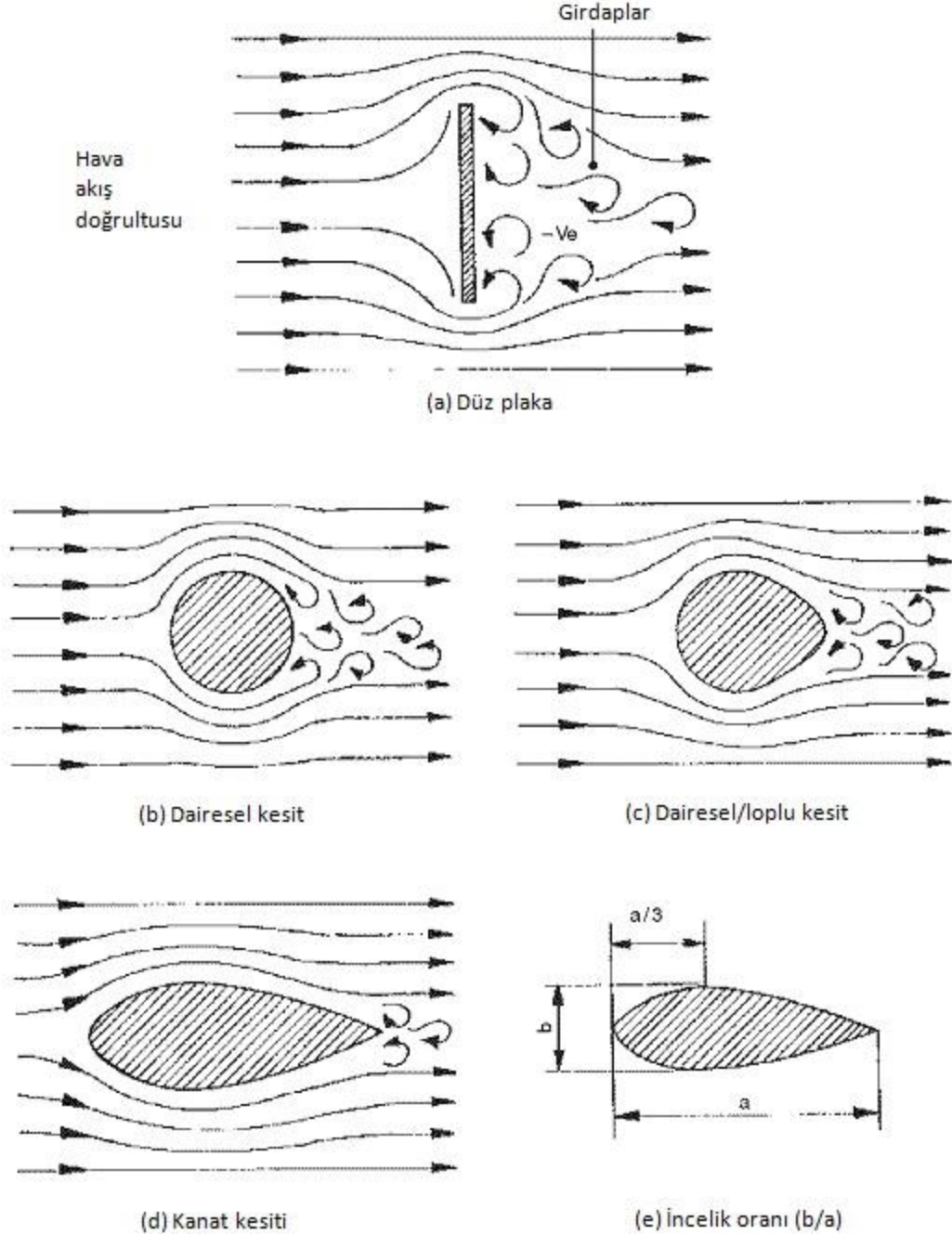
Pratik gereksinimler genellikle pürüzlülük direnci adı verilen başka bir direnç kaynağının oluşmasından da büyük oranda sorumludurlar. Bu direnç taşıtın pürüzsüz yüzeyi haricinde enerji sönmleyen girdaplar ve türbülansın meydana gelmesine neden olan bütün bu bileşenlerin bir sonucudur. Tekerlekler ve tekerlek kemeri, aynalar, kapı kolları, yağmur olukları, ön cam silecekleri bu bileşenlerden bazılarıdır. Bunun yanı sıra egzoz sistemi gibi görünmeyen elemanlar da önemli direnç kaynaklarıdır.

Bu elemanlardan bazıları tek başlarına küçük direnç kuvvetleri oluştururken toplam etkileri genel direnç kuvvetini %50 ye kadar artırabilir. Ana akış ve aynalar gibi dış elemanlarda meydana gelen akışın etkileşmesi ilave bir direnç oluşturabilir. Buna genellikle etkileşim direnci adı verilir.

Taşıt direncini etkileyen temel bileşenlerden sonuncusu motorun ve frenler gibi mekanik aksamaların soğutulması ve kabin havalandırma akışlarından kaynaklanmaktadır. Bu dahili direnç kaynakları toplam dirençte %10'a varan bir artış meydana getirebilir [28].

Viskoz hava bir katı şeklin üzerinden akıp geçtiğinde arka tarafta akışın düzgün akış çizgilerinden sapmasına neden olan girdaplar oluşur (Şekil 3.13(a)). Bu koşullar altında arka tarafta basınç atmosfer basıncından düşük olurken katı cismin ön kısmında hava

akış basıncı atmosfer basıncından daha yüksek olacaktır ve sonuç olarak katı cisim hava akışı doğrultusunda bir dirence maruz kalacaktır. Basınç direncine uç bir örneğin verildiği Şekil 3.14'de hava hareketine dik konumda yerleştirilen düz bir plaka, plakanın hareketine akış doğrultusunda karşı koyan ve kasnak ağırlığı ile temsil edilen direnç kuvvetine maruz kalacaktır.

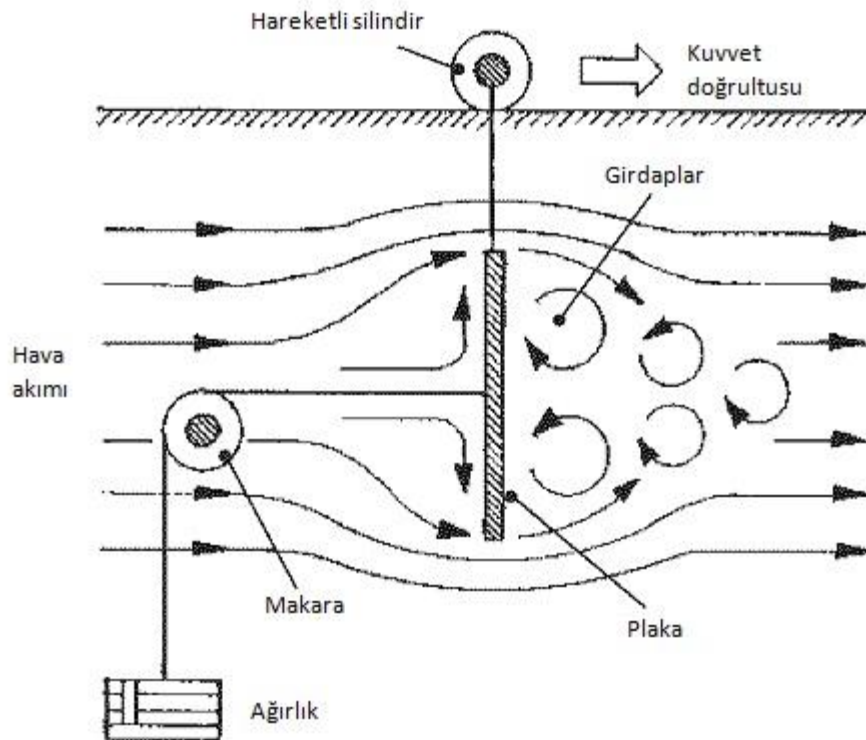


Şekil 3. 13 Farklı kesitlerdeki hava akışı [12]

Hava akımına maruz kalan herhangi bir katı formun basınç direnci akış çizgilerinin düzgünleşmesini sağlayacak şekilde form değişikliğine gidilerek azaltılabilir. Şekil 3.13(b)'de gösterilen yuvarlak borunun ön yarısında ve arka kısmın belirli bir bölümünde hava akışının ayrılma gerçekleşmeden önce düzgün bir şekilde yol almasıyla direnç düz plakaya oranla yaklaşık %50 azalmaktadır. Borunun arka kısmı uzatılıp inceltilerek direnç düz plakaya oranla yaklaşık %15 daha azaltılabilir (Şekil 3.13(c)). Kesit ölçüleri orantılı hale getirilip (Şekil 3.13(d)) boru kesiti 2 ile 4 arasında değişen a/b incelik oranı ve arkadan ön uca olan mesafenin üçte biri olacak şekilde belirlenecek b maksimum kalınlığı ile daha düşük direnç seviyelerine ulaşılabilir (Şekil 3.13) [12].

Hava içinden geçen bir cisim için karşı direncin hesaplanması amacıyla kullanılan formül aşağıdaki gibi türetilebilir:

Şekil 3.14'de gösterilen düz plakanın bir hava akımına maruz kaldığı, hava partiküllerinin elastik olmadığı ve plakaya çarptıklarında aşağı doğru düştükleri varsayalım. 1m^3 hava deniz seviyesinde yaklaşık 1.225 kg 'dır ve bundan dolayı havanın yoğunluğu 1.225 kg/m^3 tür.



Şekil 3. 14 Basınç direnci aparatı [12]

Kütle = $m \text{ kg}$

Hacim = $Q \text{ m}^3$

Hava akışının yoğunluğu = $\rho \text{ kg/m}^3$

Plakanın ön yüz alanı = $A \text{ m}^2$

Yüzeye çarpan havanın hızı = $v \text{ m/s}$

Plakaya bir saniyede çarpan havanın hacmi = $Q = vA \text{ m}^3$ (3.5)

Havanın bir saniyedeki kütle hareketi = $\rho Q = \rho \times vA$ (3.6)

$Q = vA$ olduğundan

Havanın momentumu(mv)= $\rho vA \times v$ olur. (3.7)

Bundan dolayı;

Havanın bir saniyedeki momentum kaybı = ρAv^2 dir. (3.8)

Newton'un İkinci Kanunu'na dayanarak hava hareketinin değişim oranı

plakaya uygulanan kuvveti verecektir.

Bu nedenle plakaya uygulanan kuvvet = $\rho Av^2 \text{ N'dur}$. (3.9)

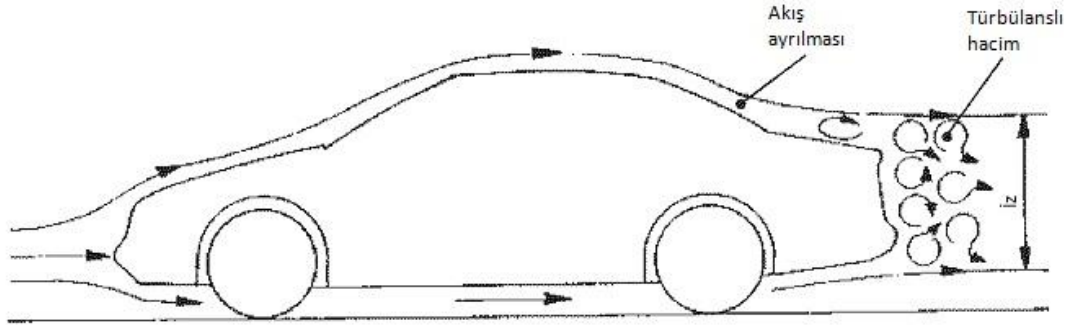
Bununla birlikte deneysel hava düz plakayı hesaplanan ρAv^2 kuvvetinin kabaca %60'ı kadar bir kuvvet ile itmektedir. Oldukça büyük olan bu %40'lık hata esasında plakaya çarpan havanın hareketsiz hale geldiği ve aşağı doğru düştüğü varsayımından kaynaklanmaktadır. Gerçekte havanın büyük bir kısmı plakanın kenarlarından kaçmakta ve türbülanslı hale gelmektedir. Yani teorik hava akış kuvveti plakaya uygulanan deneysel kuvvet (F) ile uymamaktadır fakat bu deneysel kuvvetin ρAv^2 ile orantılı olduğu ortaya konmuştur.

$$F \propto Av^2$$

Bundan dolayı hava direnci $F = C_D Av^2$. Burada C_D orantı katsayısıdır. (3.10)

C_D sabiti direnç katsayısı olarak bilinir, birimsizdir ve değeri hava akımına maruz kalan cismin şekline bağlıdır [12].

Ard akış izi hareket eden bir aracın arka kısmında oluşan ve araçla birlikte hareket etme eğiliminde olan türbülanslı hava hacmidir (Şekil 3.15). Ard akış izinin kesit alanı yaklaşık olarak arka dikey bagaj paneli ile aşağı doğru eğimli olan arka camda akış ayrılma seviyesinden bagajın üst kenarı arasında kalan bölgenin projeksiyon alanı toplamına eşittir.



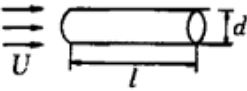
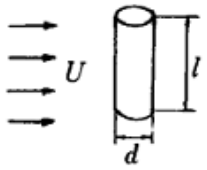
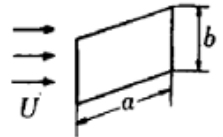





Şekil 3. 15 Ard akış izi [12]

Aerodinamik direnç katsayısı aracın ileri hareketi esnasında hava direncini düşürmede aerodinamik gövde şeklinin etkenliğinin bir ölçüsüdür. Düşük direnç katsayısı aracın viskoz hava içerisinde minimum dirence maruz kalarak kolayca hareket edebileceğini; yüksek direnç katsayısı ise düzgün olmayan akış çizgilerinin oluşması nedeniyle hareket esnasında aracın yüksek dirence maruz kalacağını belirtmektedir.





Çizelge 3. 2 Çeşitli sınıflardaki taşıtlar için direnç katsayısı [12]

Taşıt tipi	Direnç katsayısı C_D
Sedan otomobil	0.22-0.4
Spor otomobil	0.28-0.4
Hafif kamyonet	0.35-0.5
Otobüs	0.4 -0.8
Römorklu kamyon	0.55-0.8

Çizelge 3. 3 Çeşitli şekillerdeki cisimler için direnç katsayıları [29]

Cisim	Boyutsal oran	Alan A	Direnç katsayısı C_D
Akış yönünde silindir 	$l/d = 1$	$\frac{\pi}{4} d^2$	0.91
	2		0.85
	4		0.87
	7		0.99
Akışa dik yönde silindir 	$l/d = 1$	dl	0.63
	2		0.68
	5		0.74
	10		0.82
	40		0.98
	∞		1.20
Akışa dik yönde eğik levha 	$a/b = 1$	ab	1.12
	2		1.15
	4		1.19
	10		1.29
	18		1.40
	∞		2.01
Çok derin yarım küre 	I	$\frac{\pi}{4} d^2$	0.34
	II		1.33
koni 	$a = 60^\circ$	$\frac{\pi}{4} d^2$	0.51
	$a = 30^\circ$		0.34
			$\frac{\pi}{4} d^2$
Yolcu otomobili 	Ön projeksiyon alanı 		0.28-0.37

Çizelge 3. 4 Bazı geometrik şekillerin basınç ve sürtünme direnci katkıları [29]

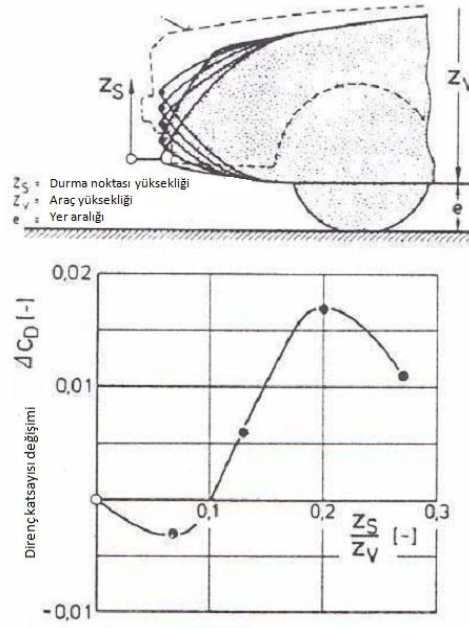
Şekil	Basınç Direnci (%)	Sürtünme Direnci (%)
	0	100
	≈ 10	≈ 90
	≈ 90	≈ 10
	100	0

Çizelge 3. 5 Bir taşıt için aerodinamik direnç bileşenleri [30]

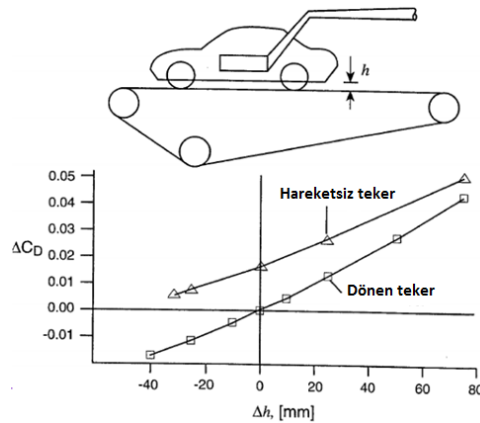
DİRENÇ KATSAYISI BİLEŞENİ	TİPİK DEĞER (1970'ler ve 1980'lerin başı)
Taşıt önü	0.055
Taşıt arkası	0.14
Taşıt altı	0.06
Yüzey sürtünmesi	0.025
Toplam gövde direnci	0.28
Tekerlekler ve tekerlek boşlukları	0.09
Su olukları	0.01
Cam çerçeveleri	0.01
Dış ayna (bir adet)	0.01
Toplam çıkıntı direnci	0.12
Soğutma sistemi	0.035
Toplam iç direnç	0.035
Genel toplam direnç	0.435

Taşıt önü direnci, ön ucun tasarımından ve ön cam açısından etkilenmektedir. Ön ucun yuvarlaklığı genellikle dinamik basıncın direnci tetiklemek için üzerinde

hareketlenebileceği alanı oluşturur. Şekil 3.16 aracın ön ucunun yüksekliğinin direnç katsayısı üzerine etkisini göstermektedir. Bu noktanın konumu durma noktasına doğru akan akış çizgisinin konumunu belirler. Bu akış çizgisi, akışın gövde altına ve üstüne ayrılmasını hazırlamasından dolayı önemlidir. Minimum direnç, durma noktasının aracın ön profili üzerinde aşağıda tutulmasıyla sağlanır. Yuvarlaklaştırılmış düşük kaporta çizgisi, toplam direnç katsayısında %5'ten %15'e kadar azalma sağlamaktadır[22, 23].



Şekil 3. 16 Taşit ön ucu tasarımının direnç katsayısı üzerine etkisi [22]

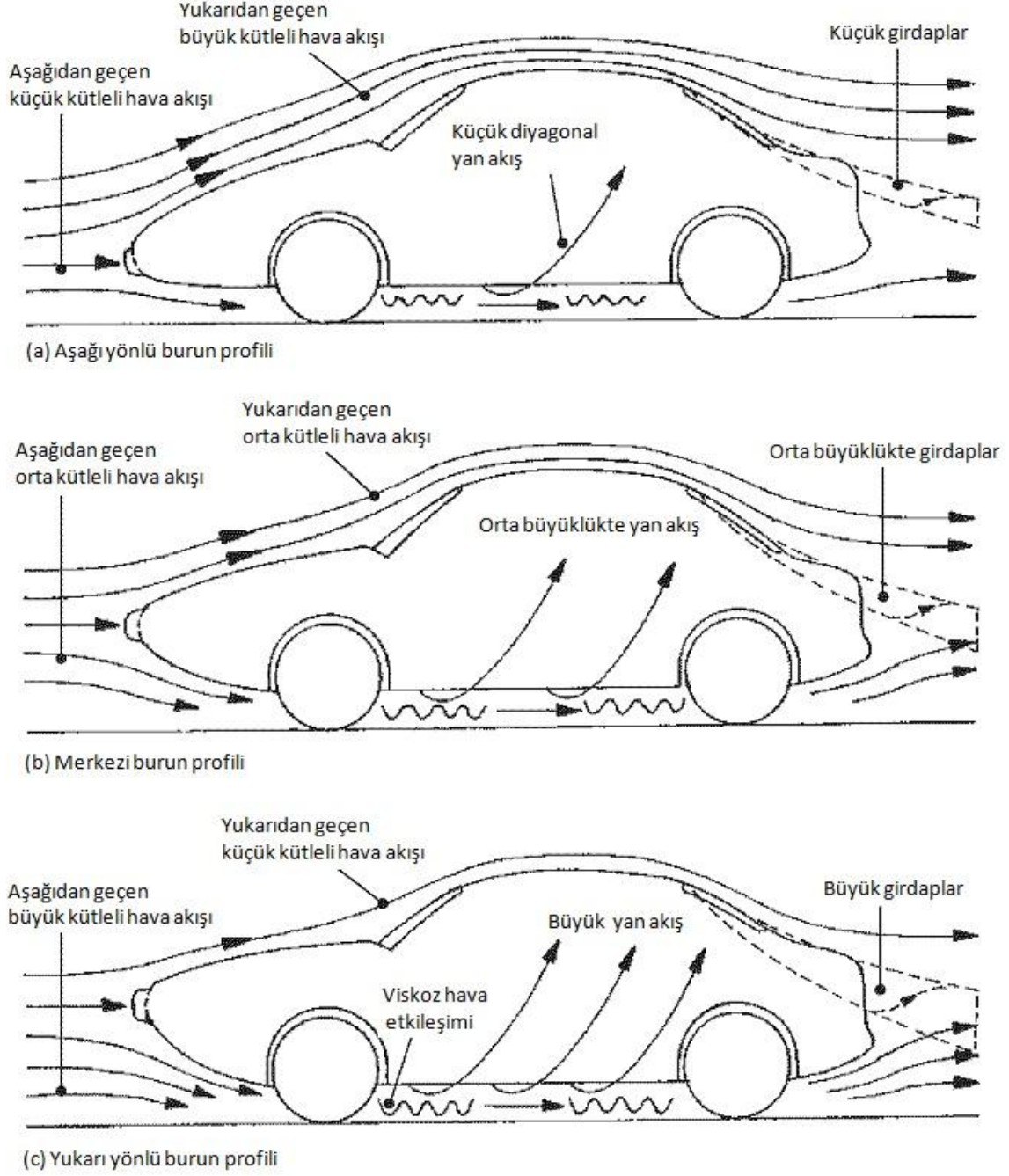


Şekil 3. 17 Yer aralığının direnç katsayısı üzerine etkisi [31]

Aşağı yönlü burun profilinde (Şekil 3.18(a)) hava kütlelerinin büyük bir kısmı araç gövdesinin altına yönelmektedir ve nispeten küçük bir kısmı aracın üst tarafına yönelmektedir. Merkezi burun profilinde (Şekil 3.18(b)) hareket eden hava kütlesi

aracın alt ve üst kısmına daha dengeli bir şekilde ayrılmaktadır; ancak araç alt kısmı ile yol arasındaki viskoz hava etkileşimi havanın büyük bir kısmının hala üst tarafa yönlendirilmesine sebep olur. Diğer taraftan yukarı yönlü burun profilinde (Şekil 3.18(c)) ventüri etkisi oluşturan aşağı doğru eğimli giriş kısmı hava kütlesinin büyük kısmının aracın altına doğru yönelmesine neden olur. Yol ile aracın alt kısmı arasındaki boşlukta akan hava kütlesinin artması aracın alt kısmının yüzeylerinde viskoz etkileşimini artırır ve bundan dolayı havayı diyagonal olarak dışarı ve aracın yan taraflarından yukarı doğru hareket etmeye zorlar. Bu durum aracın yan ve arka kısımlarındaki vorteks oluşumunu güçlendirir ve sonuç olarak ön taraftaki aerodinamik kaldırma kuvvetinin artmasına neden olur.

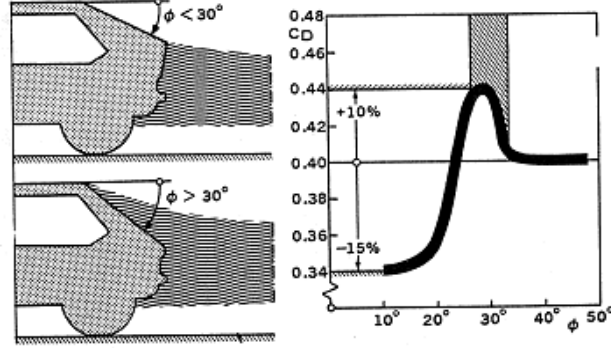
Rüzgar tüneli testlerinde merkezi burun profili ve aşağı yönlü burun profili için C_D değerleri sırasıyla 0.223 ve 0.224 iken en yüksek direnç katsayısı 0.24 değeri ile yukarı yönlü burun profilinde görülmüştür. Bununla birlikte taşıtın ön kısmı için kaldırma katsayısı C_L üç profil için belirgin fark göstermektedir. Kaldırma katsayısı C_L ; yukarı yönlü profil için +0.2 (pozitif kaldırma), merkezi burun profili için 0.02 (hemen hemen nötr), aşağı yönlü burun profili için ise -0.1 (negatif kaldırma) değerini almıştır [12].



Şekil 3. 18 Farklı burun profilleri için araç gövdesi etrafındaki hava kütlesi dağılımı [12]

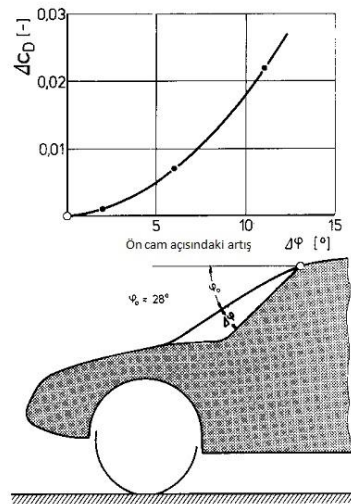
Taşıt tavanının eğimli arka kısmının açısının sürüklenme direncine olan etkisi Janssen ve Hucho tarafından yapılan deneyle ortaya konulmuştur. Yapılan bu deneyle küçük aralıktaki tavan açıları için (25° - 35°) toplam sürüklenme direnci eğrisinin Şekil 3.19'da gösterildiği gibi bir yol izlediği görülmüştür. 32° den büyük açılar için üst ayrılma çizgisinin eğimli yüzeyin yukarı kısmında olduğu, 28° den küçük açılar için ayrılma

çizgisinin aşağı doğru hareket ettiği ve bu iki açı arasındaki değerler için ayrılma noktasının yukarıdan aşağı ve tersi yönde yer değiştirdiği görülmüştür [11].



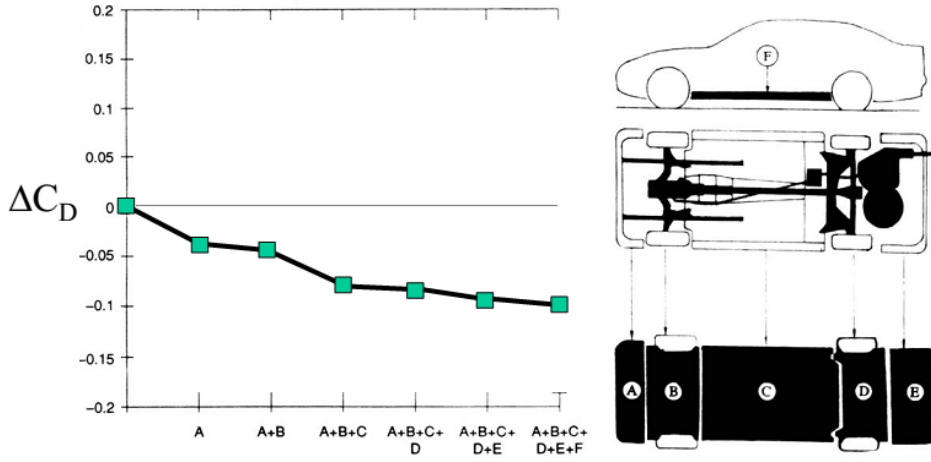
Şekil 3.19 Arka tavan açısının direnç katsayısı üzerine etkisi [11]

Ön cam, yatay tavana doğru yaklaştıkça, akış yönünü düzenlemektedir. Bundan dolayı ön cam açısının meydana gelen direnç üzerinde doğrudan bir etkisi vardır. Dar açılar direnci azaltır, fakat ön camın güneş ısısından kaynaklanan yüklerle daha fazla maruz kalması ve dar açılardaki deformasyonun minimuma indirilmesi durumu araç tasarımını daha çok karmaşıktır. Şekil 3.20 ön cam açısının nominal açı olan 28° ye göre artırılmasının dirençte meydana getirdiği değişim gösterilmektedir. Dik açı ile ön cama yaklaşan havanın hızı o bölgedeki yüksek basınç ile azalır. Dar bir açı ile yaklaşımda cam silecekleri üzerindeki aerodinamik yüklerle ek olarak rüzgar hızı da yüksek olacaktır [22].

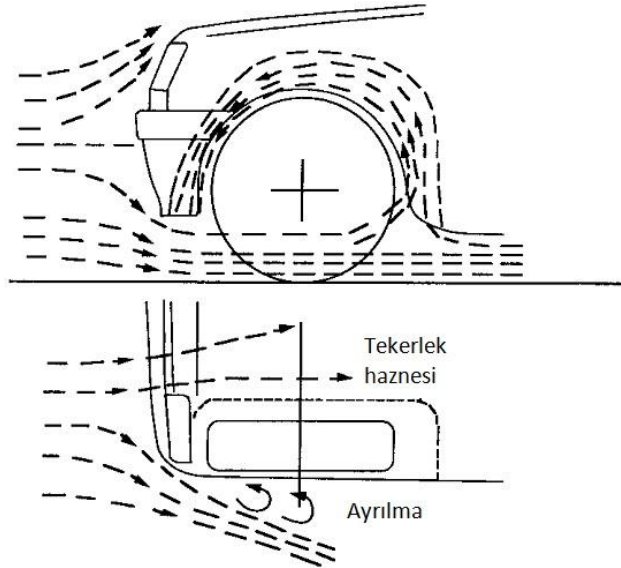


Şekil 3.20 Ön cam açısının direnç üzerindeki etkisi [22]

Taşıt altı gövde direncini üreten kritik bir bölgedir. Süspansiyonlar, egzoz sistemleri ve alt gövdedeki diğer çıkıntılı parçalar direncin nedenleridir. Bu bölgedeki hava akışı, yol yüzeyi üzerindeki sıfır hava hızı ile kontrol edilen ve alt gövde elemanlarının direnciyle tetiklenen bir kesme düzlemidir. Taşıt altı direncini minimuma indirmek için düz taşıt altı panelleri kullanılabilir [23].

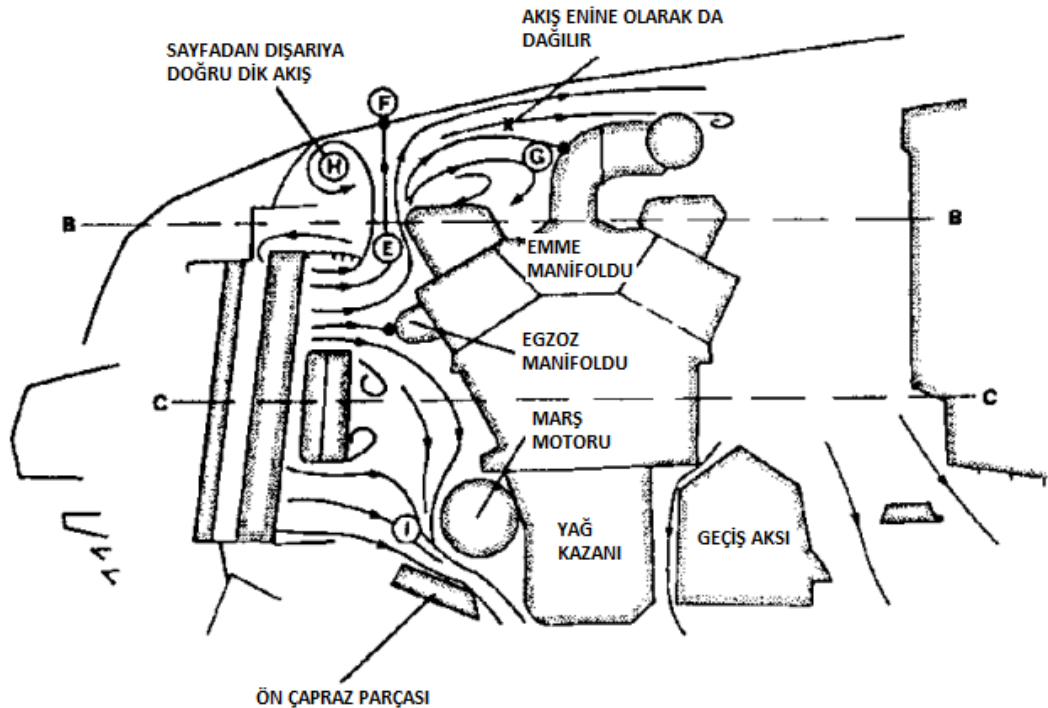


Gövdedeki çıkıntılar direncin azaltılabileceği ikinci bir alanı teşkil etmektedir. Tekerlekler ve tekerlek hazneleri bu sınıfta direnç oluşumunda en büyük paya sahiptirler. Haznelerdeki dalgalı, dönen akış nedeniyle tekerleklerde önemli derece direnç meydana gelmektedir.



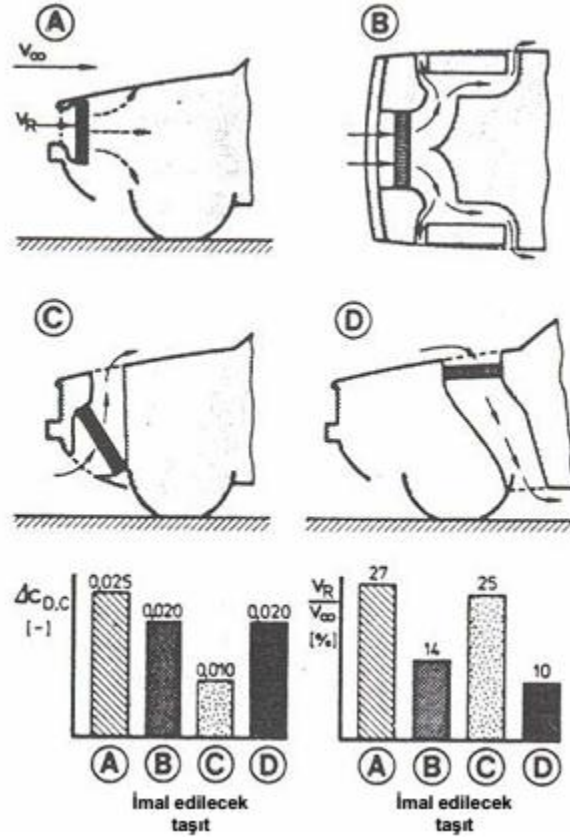
Şekil 3.22, tekerlek çevresinde meydana gelen karmaşık akış şeklini göstermektedir. Tekerlek haznelerinin keskin kenarları, tekerlek dik düzlemde dönerken akışın yatay düzlemde ilerlemesini sağlar. Bu etkiler akışı, tekerleğin akışa tabi olan ön yüzünden daha fazla etkilemektedir. Tekerleklerin ve tekerlek hazne alanlarının aerodinamik olarak kapatılmasıyla direnç miktarı azaltılabilir. Bu durumun uygulanması arka tekerleklerde belirli bir seviyeye kadar mümkün iken, ön tekerleklerin dönüş hareketleri nedeniyle kısıtlamalar meydana gelmektedir. Yapılan deneysel araştırmalarda, alt taraf ile yer yüzeyi arasındaki mesafenin düşürülmesi ve tekerlek boşluğunun minimuma indirilmesiyle tekerlek tarafından oluşturulan toplam aerodinamik direncin düştüğü gözlenmiştir [19, 23].

Soğutma sistemi, direnç yaratan başlıca nedenlerden birisidir. Radyatörden geçen hava akışı motora alev bölmesine etki ederek dinamik basıncı araç üzerinde direnç olarak meydana getirir. Tipik bir motor bölmesi içinde hava akış şekli, bu alanda aerodinamik düzeltmenin olmamasından dolayı çok karmaşık olabilir (Şekil 3.23). Hava akışı şekline dikkat edilmediğinde, radyatöre giren hava, ileri momentumunun büyük bir kısmını, alt taraftaki açıklıklardan dışarı çıkmadan önce, motor bölmesindeki araç parçalarına karşı harcayarak momentum alışverişinin doğrudan artan dirence dönüşmesine sebep olur.



Şekil 3. 23 Tipik bir motor bölmesindeki hava akış şekli [19, 23]

Soğutma sistemindeki akış yönetimi, direnç katsayısını 0.035'e kadar etkileyebilir. Bu kaynaktan dirence olan katkı, normal olarak soğutma sistemi girişlerinin açık ve kapalı olduğu durumlarda ölçülen direnç değerlerinin arasındaki fark olarak alınır. Şekil 3.24'de görüldüğü gibi, akışı yönlendirmek için yapılan tasarım (hızın devam ettirilmesini sağlayarak statik basıncı düşük tutan) direnci azaltabilir. Modern otomobillerde direnci azaltmak için soğutma giriş boyutu mümkün olan asgaride tutulmaktadır [23].



Şekil 3. 24 Soğutma sisteminin direnç üzerindeki etkisi [23]

3.4 Aerodinamik Direncin Yakıt Tüketimine Etkisi

Aerodinamik direnç kuvveti motorun sağladığı çeki kuvveti ile karşılanmaktadır. Onun için direnç kuvveti direkt olarak gerekli motor gücüne ve dolayısıyla da yakıt tüketimine etkilidir. Herhangi bir hızdaki yakıt tüketimi direkt olarak gerekli olan güç ile orantılıdır. Aerodinamik direnci yenmek için gerekli güç, motor gücünün büyük bir kısmını oluşturmaktadır.

Taşıtların karakteristik yakıt tüketimi, genellikle deneysel yollarla bulunur ve 1 kW için gerekli değer olan $C[L/kW.sa]$ olarak belirtilir. Bu katsayının gerçek motor gücü ile çarpımı motorun toplam karakteristik yakıt tüketimini verir:

$$G = (kW)_E \times C \quad [L/H] \quad (3.11)$$

Pratikte yakıt tüketimi L/km veya km/L gibi oranlar şeklinde verilir. Avrupa'nın çoğunluğunda ve Türkiye'de 100 km mesafede tüketilen yakıt miktarı verilmekle birlikte İngiltere ve diğer bazı ülkelerde 1 L yakıt ile kat edilecek mesafe verilmektedir.

Taşıtlar üzerindeki dirençlerin her birinin yakıt tüketimine olan etkileri harcadıkları güçlerle orantılıdır. Bunun için şehir içinde ortalama 30 km/sa hızla seyahat eden bir taşıtların inceleyecek olursak; en çok taşıtlar ivmelendirmek için iş yapılır ve bu iş daha sonra frenlerden ısı olarak atılır. Bu sırada yuvarlanma direncine ve aerodinamik dirence karşı da iş yapılır. Eğer M kütledeki bir taşıtlar durgun halden V hızına çıkartılırsa yapılan iş;

$$E_1 = \frac{1}{2} \times M \times V^2 \quad (3.12)$$

dir.

Bu sırada s kadar yol kat edildiyse yuvarlanma direncine karşı yapılan iş (aerodinamik kaldırma kuvveti=0 için)

$$E_2 = P \times s = W \times f \times s \quad (3.13)$$

dir.

Aynı mesafe için aerodinamik direnç kuvvetine karşı yapılan iş ise;

$$E_3 = R_A \times s = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D s \quad (3.14)$$

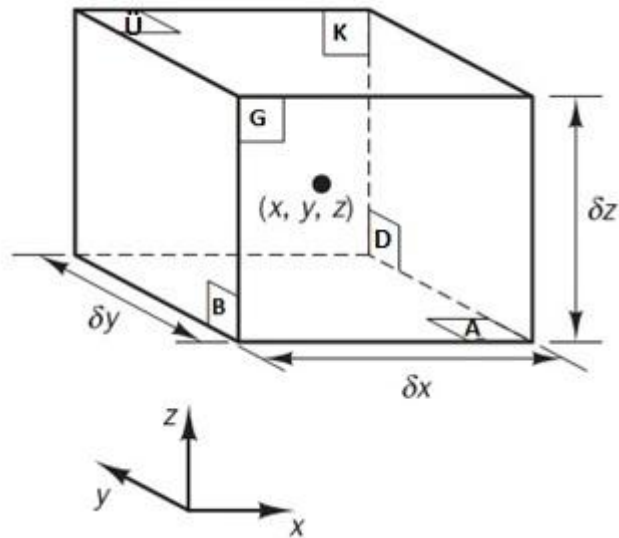
dir [33].

MATEMATİKSEL YAKLAŞIM

4.1 Genel Denklemler

Akışkanların genel denklemleri fiziğin korunum yasalarının matematiksel ifadelerini temsil etmektedirler. Bu yasalar, sıvı kütlesinin korunduğunu, bir akışkan parçacığının momentumundaki değişimin bu parçacığa etki eden kuvvetlerin toplamına eşit olduğunu (Newton'un İkinci Yasası) ve bir akışkan parçacığının enerjisindeki değişim bu akışkan parçacığı üzerinde yapılan iş ve ilave edilen ısı miktarına eşit olduğunu belirtmektedir (Termodinamiğin Birinci Yasası).

δ_x , δ_y ve δ_z kenar uzunluklarına sahip küçük bir akışkan eleman göz önüne alındığında (Şekil 4.1)



Şekil 4. 1 Akışkan hacim elemanı[34]

K,G,D,B,A ve Ü olarak etiketlenen altı yüzey Kuzey, Güney, Doğu, Batı, Alt ve Üst'ü temsil etmektedir. Elemanın merkezi (x, y, z) noktasında konumlanmıştır. Akışkan elemanın sınırları boyunca gerçekleşen akışkan hareketinden dolayı elemanın kütle, momentum ve enerjisindeki sistematik değişim akışkan hareket denklemlerini ortaya çıkarır.

Bütün akışkan özellikleri uzay ve zamanın fonksiyonlarıdır ve sırasıyla yoğunluk, basınç, sıcaklık ve hız için $\rho(z, y, z, t)$, $p(z, y, z, t)$, $T(z, y, z, t)$ ve $\mathbf{u}(z, y, z, t)$ tanımlanmalıdır.

Göz önüne alınan elemanın yüzeylerindeki akışkan özellikleri Taylor Serisi Açılımı'nın ilk iki terimi vasıtasıyla açıklanabilir. Örneğin her ikisi de eleman merkezinden $\frac{1}{2}\delta_x$ uzaklıkta olan B ve D yüzeylerindeki basınçlar

$$p - \frac{\partial(p)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta_x \text{ ve } p + \frac{\partial(p)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta_x \quad (4.1)$$

olarak ifade edilebilir [34].

$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$ ifadesi bileşenleri u, v ve w olan bir \vec{u} hız vektörünün diverjansı olarak adlandırılır ve $div \vec{u}$ olarak gösterilir. Aynı hız vektörünün bileşenleri $u = \frac{d\phi}{dx}$, $v = \frac{d\phi}{dy}$ ve $w = \frac{d\phi}{dz}$ olarak tanımlanırsa $\vec{u} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k} = grad\phi$ elde edilir. Buna da ϕ 'nin gradyanı adı verilir [23].

4.1.1 Süreklilik Denklemi

Süreklilik denklemi, uzayda sabitlenmiş bir hacim elemanına akışkan hareketi boyunca kütle dengesi uygulanarak elde edilir[33].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (4.2)$$

veya hız vektörü $\vec{u} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$ olarak kabul edilirse,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho \vec{u}) = 0 \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edilir. Eşitliğin solundaki birinci terim yoğunluğun zamana göre değişim hızını, ikinci terim ise akışkan elemanın sınırlarından çıkan kütlenin net akışını

tanımlar ve konvektif terim olarak adlandırılır. Sıkıştırılamayan akışkanlar için yoğunluk(ρ) sabit olup Eş.4.2

$$\text{div}\vec{u} = 0 \quad (4.4)$$

veya

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.5)$$

haline gelir [23].

4.1.2 Momentum Denklemi

Newton'un ikinci kanununa göre bir akışkan parçasının momentumunun değişim hızı bu akışkan parçasına etki eden kuvvetlerin toplamına eşittir. Bir akışkan parçasının birim hacminin x, y ve z yönlerindeki momentum artış hızı sırasıyla $\rho \frac{Du}{Dt}$, $\rho \frac{Dv}{Dt}$ ve $\rho \frac{Dw}{Dt}$ terimleri ile ifade edilir.

Momentum denkleminin x-bileşeni;

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p+\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{M_x} \quad (4.6)$$

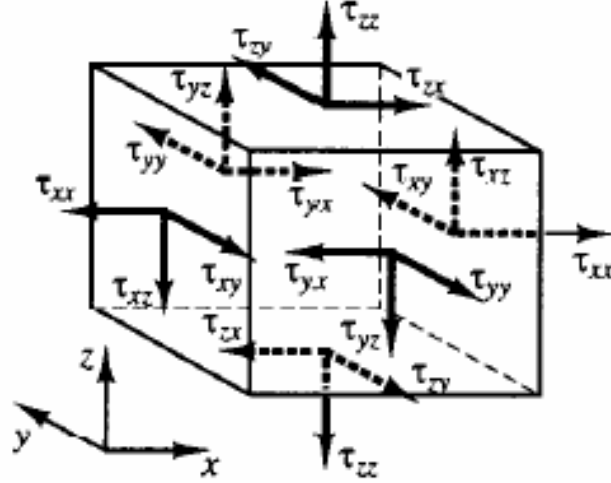
Momentum denkleminin y-bileşeni;

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p+\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} + S_{M_y} \quad (4.7)$$

Momentum denkleminin z-bileşeni;

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p+\tau_{zz})}{\partial z} + S_{M_z} \quad (4.8)$$

olarak ifade edilir.



Şekil 4. 2 Bir akışkan elemanın yüzeylerindeki gerilme bileşenleri [23]

Burada p basıncı, τ viskoz gerilmeleri, τ_{ij} Şekil 4.2’de görüldüğü gibi viskoz gerilmelerin yönünü (j yönündeki yüzeyde i yönüne dik), S ise kaynak terimini (S_{M_x} = Birim zamanda birim hacmin x -momentumunun kaynak terimi) belirtir [23].

4.1.3 Navier-Stokes Denklemleri

Birçok akışta viskoz gerilmeler bölgesel deformasyon hızı (veya gerinim hızı)’nın fonksiyonu olarak ifade edilir. Üç boyutlu bir akışta bölgesel deformasyon hızı, doğrusal deformasyon hızı ile hacimsel deformasyon hızından meydana gelir [34].

Akışkanları izotropik kabul ederek bir akışkan elemanın doğrusal deformasyon hızı üç yönde dokuz elemana sahiptir. Üçü doğrusal uzama deformasyon elemanı;

$$e_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad e_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad e_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (4.9)$$

altısı doğrusal kayma deformasyon elemanıdır.

$$e_{xy} = e_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (4.10)$$

$$e_{xz} = e_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (4.11)$$

$$e_{yz} = e_{zy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (4.12)$$

Hacimsel deformasyon,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \text{div} \vec{u} \quad (4.13)$$

ile ifade edilir. Bir Newton akışkanında viskoz gerilmeler deformasyon hızlarıyla orantılıdır. Gerilmeleri doğrusal deformasyonlarla ilişkilendirebilmek için λ , ikinci viskozite sabitleri kullanıldığında altısı bağımsız dokuz viskoz gerilme elemanları elde edilir.

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \text{div} \vec{u} \quad (4.14)$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \text{div} \vec{u} \quad (4.15)$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \text{div} \vec{u} \quad (4.16)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (4.17)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (4.18)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (4.19)$$

Pratikte etkisi çok küçük olduğu için ikinci viskozite terimi λ ile ilgili fazla bir bilgi yoksa da gazlar için $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$, Schlichting (1979) tarafından önerilmiştir [35]. Sıvılar sıkıştırılmaz olduğundan süreklilik denklemi $\text{div} \vec{u} = 0$ 'dır. Dolayısıyla viskoz gerilmeler, bölgesel lineer deformasyon hızı ile dinamik viskozitenin çarpımının iki katıdır. Eş.4.14, 4.17 ve 4.18 Eş.4.6 ile birlikte kullanıldığında

$$\begin{aligned} \rho \frac{Du}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[-p + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + S_{M_x} \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{Du}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \text{div} \vec{u} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + S_{M_x} \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} \vec{\mathbf{u}} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \\
&= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\
&+ \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \operatorname{div} \vec{\mathbf{u}})
\end{aligned}$$

$$= \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} u) + S_{M_x} \quad (4.22)$$

olarak düzenlenir.

$$S_M = S_M + S_M \quad (4.23)$$

olarak tanımlanırsa

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} u) + S_{M_x} \quad (4.24)$$

elde edilir. Benzer bir şekilde Eş.4.15, 4.17 ve 4.19 Eş.4.7'de kullanıldığında momentum denkleminin y- bileşeni;

$$\begin{aligned}
\rho \frac{Dv}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[-p + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \\
&+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + S_{M_y}
\end{aligned} \quad (4.25)$$

$$\begin{aligned}
\rho \frac{Dv}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \operatorname{div} \vec{\mathbf{u}} \right] \\
&+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + S_{M_y}
\end{aligned} \quad (4.26)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \operatorname{div} \vec{\mathbf{u}} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \\
&= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\
&+ \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \operatorname{div} \vec{\mathbf{u}}) \\
&= \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} v) + S_{M_y}
\end{aligned} \quad (4.27)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} v) + S_{M_y} \quad (4.28)$$

olarak elde edilir. Momentum denkleminin z- bileşeni ise Eş.4.16, 4.18 ve 4.19'un Eş.4.8'de kullanılması sonucunda;

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[-p + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] + S_{M_z} \quad (4.29)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \operatorname{div} \vec{u} \right] + S_{M_z} \quad (4.30)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \operatorname{div} \vec{u} \right] \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ &+ \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \operatorname{div} \vec{u}) \\ &= \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} w) + S_{M_z} \end{aligned} \quad (4.31)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} w) + S_{M_z} \quad (4.32)$$

olarak elde edilir. Eş.4.24, Eş.4.28 ve Eş.4.32 ile ifade edilen denklemler Navier-Stokes denklemlerinin sonlu hacimler metodunun geliştirilmesi için en kullanışlı halidir. Sabit viskoziteye sahip sıkıştırılmayan akış için anlık süreklilik denklemi;

$$\operatorname{div} \vec{u} = 0 \quad (4.33)$$

olacağı için Eş.4.24, Eş.4.28 ve Eş.4.32'de yer alan kaynak terimleri bünyesinde $\operatorname{div} \vec{u}$ terimi bulundurması nedeniyle sıfır olur. Herhangi bir ϕ özelliğinin toplam türevi,

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \operatorname{grad} \phi = \frac{\partial \phi}{\partial t} + \operatorname{div}(\phi \vec{u}) \quad (4.34)$$

olduğuna göre Eş.4.24, Eş.4.28 ve Eş.4.32'de belirtilen Navier-Stokes denklemleri anlık denklemler halinde yazılırsa,

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \operatorname{div}(u \vec{u}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \operatorname{div}(\operatorname{grad} u) \quad (4.35)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \operatorname{div}(v \vec{u}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \operatorname{div}(\operatorname{grad} v) \quad (4.36)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \text{div}(w\vec{\mathbf{u}}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \text{div}(\text{grad}w) \quad (4.37)$$

olarak ifade edilir [23].

4.1.4 Genel Transport Denklemi

ϕ gibi genel bir değişken göz önünde bulundurulursa sıcaklık ve kirlilik konsantrasyonu gibi skaler niceliklerin eşitliklerini içeren, bütün akışkan hareketlerinin kapalı formu

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\vec{\mathbf{u}}) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (4.38)$$

olarak ifade edilir.

Eşitlik 4.38, ϕ değişkeninin transport denklemi olarak adlandırılır. Bu ifade açıkça çeşitli transport proseslerini vurgulamaktadır : Denklem solundaki değişim hızı terimi ve taşınım terimi, denklemin sağındaki sırasıyla difüzyon terimi (Γ = difüzyon katsayısı) ve kaynak terimidir.

Eşitlik 4.38 sonlu hacim metodunda hesaplama adımları için başlangıç noktası olarak kabul edilir. ϕ 'yi 1 , u , v ve w ye eşitleyerek ve uygun difüzyon katsayısı Γ ve kaynak terimleri seçerek kütle ve momentum korunumunu ifade eden kısmi diferansiyel denklemlerin her birisi için özel formlar elde edilir. Sonlu hacim metodunun anahtar adımı Eşitlik 4.38'in üç boyutlu kontrol hacmi (KH) boyunca integre edilmesidir:

$$\int_{KH} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{KH} \text{div}(\rho\phi\vec{\mathbf{u}}) dV = \int_{KH} \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) dV + \int_{KH} S_\phi dV \quad (4.39)$$

Sol taraftaki ikinci terim olan taşınım teriminin ve sağ taraftaki ilk terim olan difüzyon teriminin hacim integralleri kontrol hacminin bütün sınır yüzeyi boyunca integre edilirken Gauss Diverjans Teoremi kullanılarak tekrar yazılır. \mathbf{a} vektörü için bu teorem

$$\int_{KH} \text{div}(\mathbf{a}) dV = \int_A \mathbf{n} \cdot \mathbf{a} dA \quad (4.40)$$

halini alır.

$\mathbf{n} \cdot \mathbf{a}$ fiziksel olarak dA yüzey elemanına dik \mathbf{n} vektörü doğrultusundaki \mathbf{a} vektörünün bileşeni anlamına gelmektedir. Bu nedenle hacim üzerinde \mathbf{a} vektörünün diverjansının integrali, A sınır yüzeyi üzerinde toplanan (integre edilen) hacmi sınırlayan yüzeye dik

doğrultudaki \mathbf{a} 'nın bileşenine eşittir. Gauss Diverjans Teoremi uygulandığında Eşitlik 4.39,

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{KH} \rho \phi dV \right) + \int_A \mathbf{n} \cdot (\rho \phi \mathbf{u}) dA = \int_A \mathbf{n} \cdot (\Gamma \text{grad} \phi) dA + \int_{KH} S_\phi dV \quad (4.41)$$

şeklinde yazılabilir.

Kararlı duruma sahip problemlerde Eş.4.41'in değişim hızı terimi sifıra eşit olur. Bu durum kararlı transport denkleminin integral formunu meydana getirir [34].

$$\int_A \mathbf{n} \cdot (\rho \phi \mathbf{u}) dA = \int_A \mathbf{n} \cdot (\Gamma \text{grad} \phi) dA + \int_{KH} S_\phi dV \quad (4.42)$$

4.2 Türbülans Modelleme

Günlük hayatta karşılaşılan hemen hemen her akışkan hareketi türbülanslıdır. Kara taşıtları, uçaklar ve binaların etrafındaki sınır tabakalar ve arka taraftaki ard akış izleri türbülanslıdır. Ayrıca pistonlu motorlarda, gaz türbinlerinde ve yanma odalarında akış ve yanma yüksek oranda türbülanslıdır. Bundan dolayı bir akışkan hareketi çözümlendiğinde akışın büyük olasılıkla türbülanslı olduğu görülecektir.

Türbülanslı akışta değişkenler genellikle $U = \bar{U} + u$ olacak şekilde zamandan bağımsız (ortalama akış kararlı olduğunda) bir zaman ortalamalı kısım \bar{U} ve bir de dalgalanan (kararsız) kısım olan u ya ayrılır.

Türbülanslı akışın herhangi bir tanımı yoktur fakat bu türden bir akışın bazı karakteristik özellikleri mevcuttur:

- **Düzensizlik** : Türbülanslı akış düzensiz, rastgele ve karmaşıktır. Akış farklı boyutlardaki girdapları kapsar. Büyük girdaplar akış geometrisi (sınır tabaka kalınlığı, jet genişliği, vb.) civarındadır. Küçük boyutlu girdaplar ise viskoz kuvvetler tarafından iç enerjiye dağıtılır. Türbülans karmaşık olmasına rağmen belirlenebilir ve Navier-Stokes Denklemleri ile ifade edilebilir.

-**Difüzivite** : Türbülanslı akışta difüzivite artar. Bu durum, akış türbülanslı hale gelirken sınır tabakaların, jetlerin, vb. yayılma oranının artacağı anlamına gelmektedir. Türbülans sınır tabakalarda momentum alışverişini artırır ve dolayısıyla silindirler, kanatçıklar ve kara taşıtları gibi gövdelerde akış ayrılmasını azaltır veya geciktirir.

-Yüksek Reynolds Sayıları : Türbülanslı akış yüksek reynolds sayılarında meydana gelir. Türbülanslı akışa geçiş borularda $Re_x \cong 2300$ ve sınır tabakalarda $Re_x \cong 100000$ ' de gerçekleşir.

-Üç Boyutluluk : Türbülanslı akış daima üç boyutludur. Ancak denklemler zaman ortalamalı olduğunda akış iki boyutlu olarak nitelendirilebilir.

-Harcanım : Türbülanslı akış harcanırdır. Bu ifade küçük girdapların sahip olduğu kinetik enerjinin iç enerjiye dönüştüğünü belirtmektedir. Küçük girdaplar kısmen büyük girdaplardan kinetik enerjiyi alırlar. Kısmen büyük girdaplar da daha büyük girdaplardan kinetik enerjiyi alırlar ve bu böyle devam eder. En büyük boyuttaki girdaplar enerjilerini ortalama akıştan alırlar. Büyük türbülanslı girdaplardan küçük olanlara doğru gerçekleşen bu enerji transferi *kaskat prosesi* olarak adlandırılır.

-Süreklilik : Akışta küçük türbülanslı girdaplar olmasına rağmen boyutlarının moleküler seviyelerden daha büyük olmaları sebebiyle akış sürekli olarak nitelendirilebilir [36] .

4.2.1 *k-ε* Model

Navier-Stokes Denklemleri'nin zaman ortalaması ile Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes Denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\rho \bar{u}_j + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho f_i + \frac{d}{dx_j} [-\bar{p} \delta_{ij} + 2\mu \bar{S}_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j}] \quad (4.43)$$

k-ε modeli Reynolds gerilmelerini ortalama hız gradientleri ve türbülans viskozitesi ile ilişkilendirmek için gradient difüzyon hipotezini kullanır. Ters basınç gradienti, akış ayrılması ve güçlü akım çizgisi eğrileri içeren kompleks akışlar için bazı durumlarda yetersiz kalabilmektedir [37].

k-ε modeli güçlü, kolay uygulanabilir çözüm maliyeti ucuz ve bilinen kısıtlamalarına karşın yaygın olarak kullanılan bir modeldir. Bunun yanı sıra model başlangıç iterasyonları ve parametrik çalışmalar için uygundur.

k-ε türbülans modeli denklemleri aşağıdaki gibidir.

Türbülans kinetik enerjisi '*k*' için :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k + P_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4.44)$$

Harcanım 'ε' için :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P_k + C_{3\varepsilon} P_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4.45)$$

Burada;

Türbülans viskozitesi

$$\mu_t = \rho C_M \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.46)$$

olarak modellenir.

k 'nın üretimi

$$P_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{du_j}{dx_i} \quad (4.47)$$

$$P_k = -\mu_t S^2 \quad (4.48)$$

şeklindedir.

Ortalama gerinim tensor oranı 'S'

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (4.49)$$

şeklinde tanımlanır.

Batmazlık etkisi :

$$P_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{dT}{dx_i} \quad (4.50)$$

Burada Pr_t türbülans Prandtl sayısı ve g_i yerçekimi vektörünün i 'nci doğrultudaki bileşenidir. Standart ve realizable modeller için varsayılan Pr_t sayısı 0.85 dir.

Termal genişleme katsayısı β

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dT} \right)_P \quad (4.51)$$

şeklinde tanımlanır [38].

Model sabitleri:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

4.2.1.1 Re Normalleştirme Grubu (RNG) $k-\varepsilon$

RNG modeli Yakhot ve arkadaşlarının [39]. Navier-Stokes Denklemleri'ni yeniden normalleştirmek için Re Normalleştirme Grubu (RNG) metotlarını kullanmalarıyla geliştirilmiştir.

RNG modelindeki epsilon denkleminde türbülans harcanımı ile ortalama kayma arasındaki etkileşimi ifade eden ilave bir terim dışında RNG modeli $k-\varepsilon$ benzerdir. Bunun yanı sıra RNG modeli türbülansda girdap etkisini de kapsar. Bundan dolayı model yüksel akım çizgisi eğimi ve geçişli akışlar için daha doğru bir tahmin sağlar. k ve ε denklemleri için transport denklemlerini yazmak amacıyla birkaç yol mevcuttur. Batmazlık (buoyancy) ihmal edildiğinde Basit bir yorumlama;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \rho \varepsilon \quad (4.52)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P_k) - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.53)$$

şeklinde olur.

Burada;

$$C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right)}{1 + \beta \eta^3} \quad (4.54)$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (4.55)$$

$$S \equiv \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (4.56)$$

Türbülans viskozitesi $k-\varepsilon$ modelindeki gibi hesaplanır. Sabitler için en çok kullanılan değerler RNG prosedüründe türetilmiştir [38].

$$C_\mu = 0.0845, \sigma_k = 0.7194$$

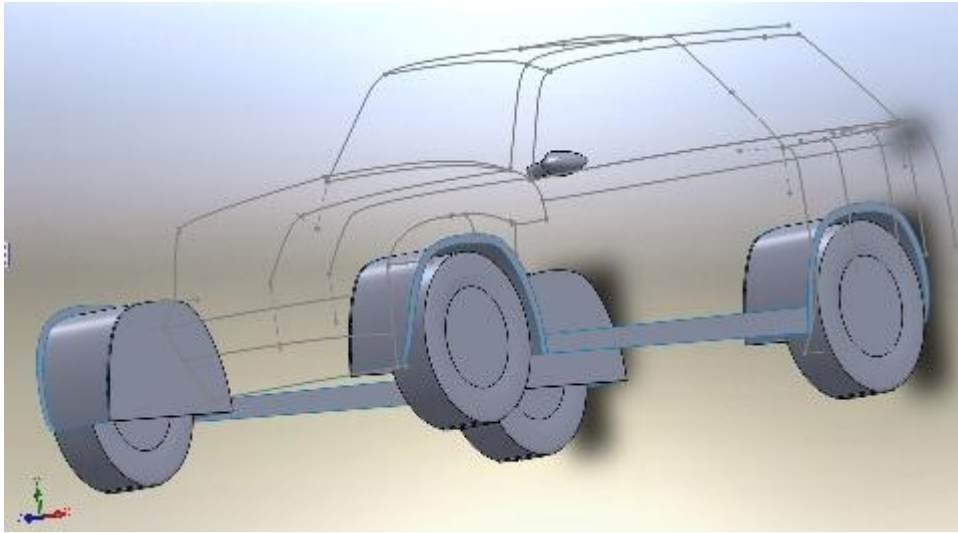
$$\sigma_\varepsilon = 0.7194, C_{\varepsilon 1} = 1.42, C_{\varepsilon 2} = 1.68, \eta_0 = 4.38$$

MODELLEME VE ANALİZ

5.1 Geometri Modelleme

5.1.1 Taşıt Yüzeyinin Modellenmesi

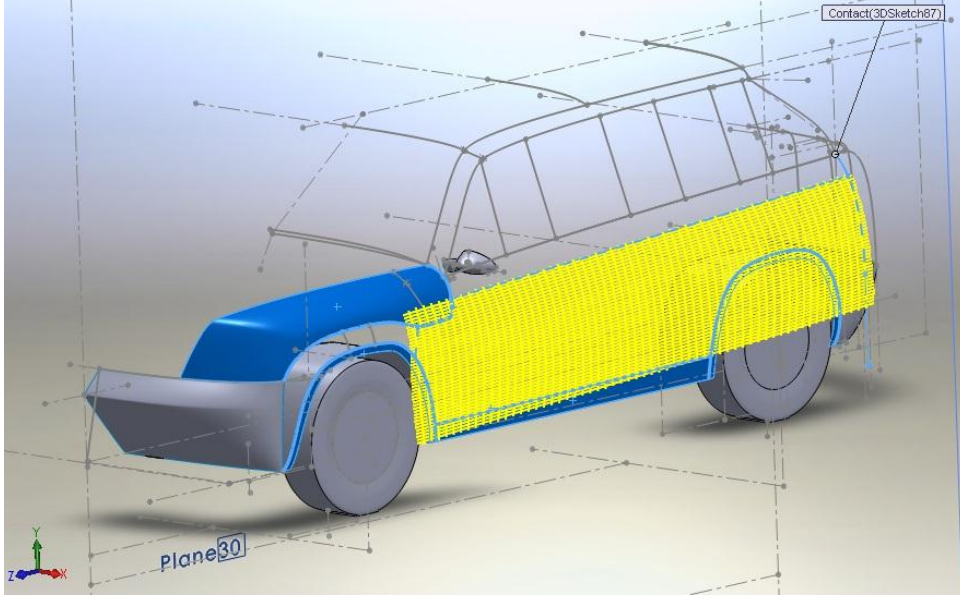
Akış analizleri yapılacak SUV modelleri Solidworks Premium 2010 programı yardımıyla yüzey modelleme gerçekleştirilerek tasarlanmıştır.



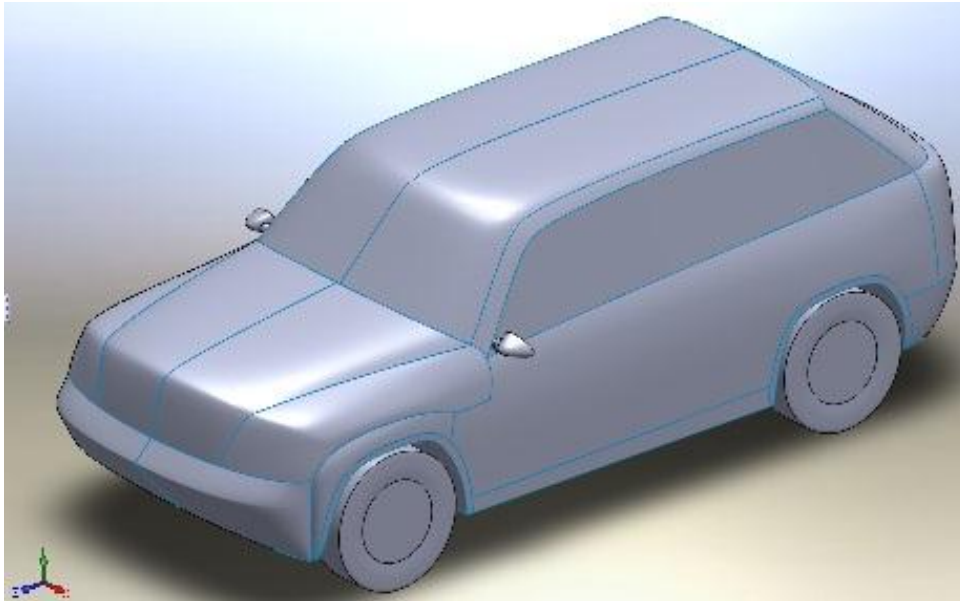
Şekil 5. 1 Taşıt geometrisi kafes görünümü

Öncelikle ön, üst ve yan görünüşlerde iki boyutta çizimler yapılmış ve bu çizimlerin izdüşümlerinin kesişimleri ile üçüncü boyutta kafes yapının temelini oluşturan ve yüzey modelleme için sınırları oluşturacak yeni eğriler elde edilmiştir. Bu eğrilerle oluşturulan

bölgeler yüzeylerle doldurularak taşıt formları oluşturulmuştur. Taşıtın tekerlek ve tekerlek haznesi gibi kısımları katı modelleme ile oluşturulmuştur.



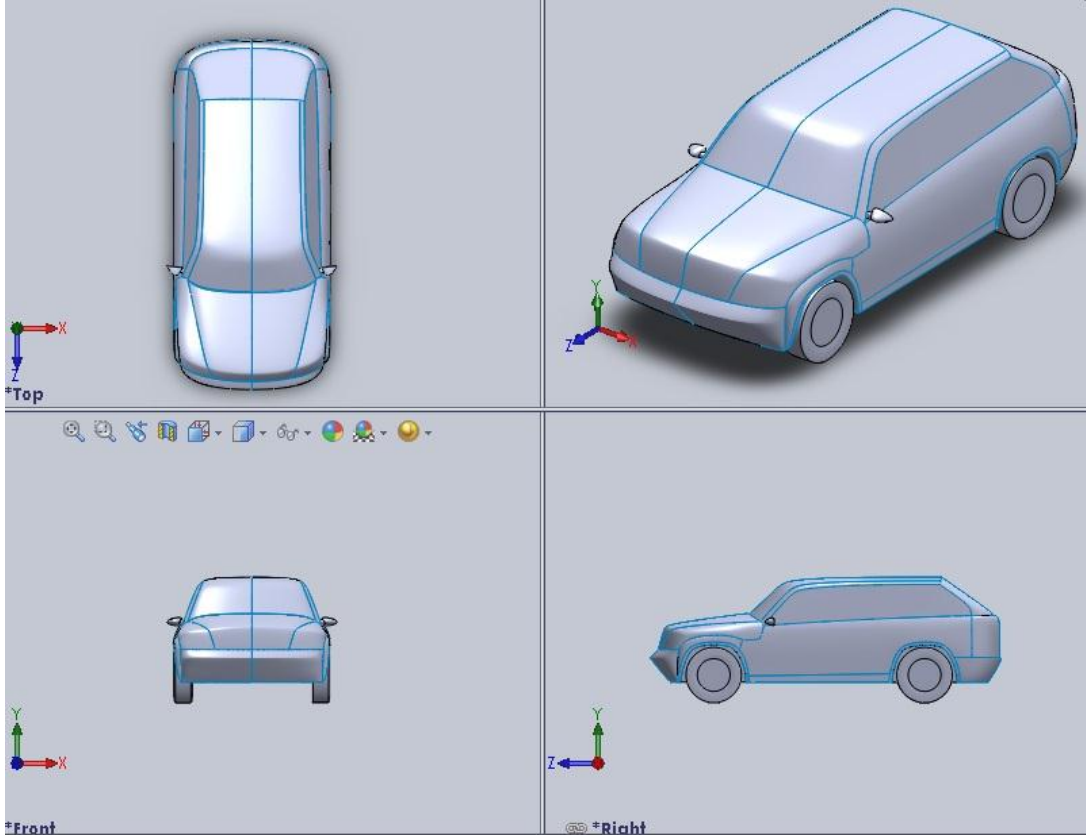
Şekil 5. 2 Sınır çizgileri yardımıyla oluşturulan yüzey elemanı



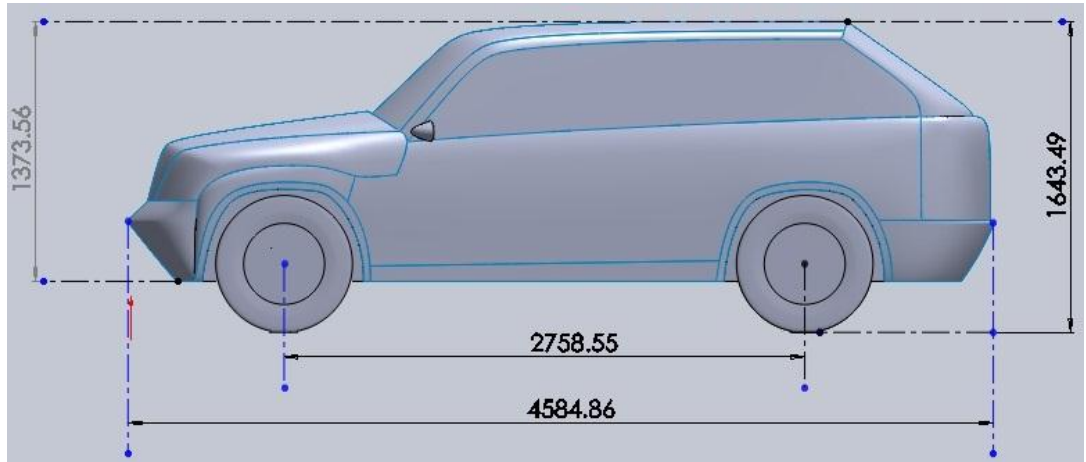
Şekil 5. 3 Yüzey modellemesi tamamlanmış taşıt geometrisi

5.1.2 Genel Taşıt Boyutları

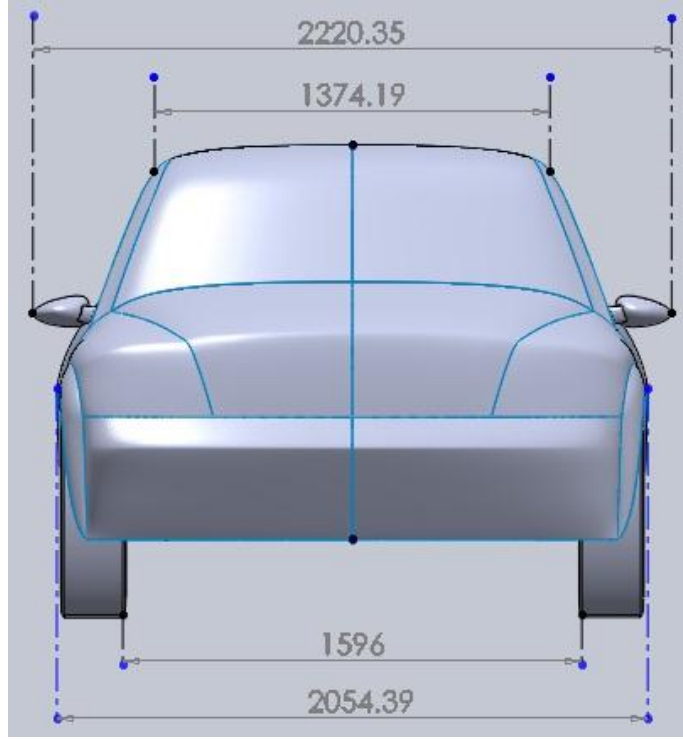
Üzerinde hava direnç katsayısını azaltmaya yönelik çalışmalar yapılacak ana taşıt modelinin görünüşleri, yan görünüş boyutları ve ön görünüş boyutları sırasıyla Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5. 4 Taşıt genel görünümü



Şekil 5. 5 Taşıt yan görünüş boyutları



Şekil 5. 6 Taşıt ön görünüş boyutları

5.2 Analiz

5.2.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD), akışkan hareketini, ısı ve kütle transferini, kimyasal reaksiyonları ve ilgili olayları, fiziksel korunumları ifade eden matematiksel denklemlerini nümerik olarak çözerek öngöründe bulunan bir bilimdir.

- Kütle korunumu
- Momentum korunumu
- Enerjinin korunumu
- vb.

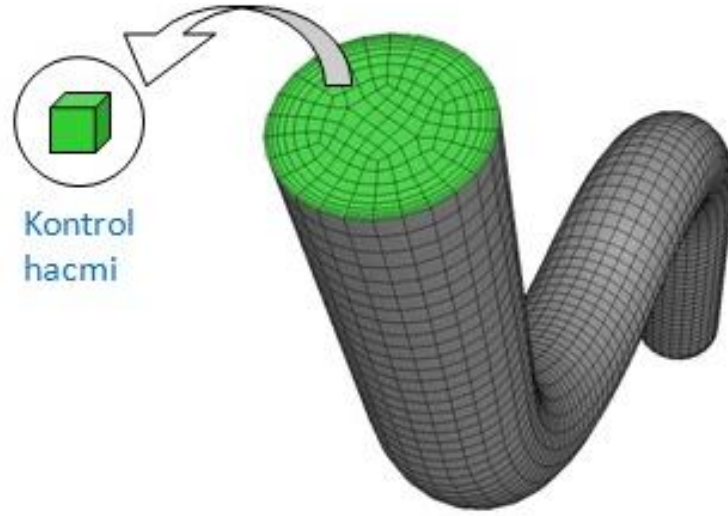
CFD analizleri yeni tasarımların kavramsal çalışmaları, detaylı ürün geliştirme, sorun giderme ve yeniden tasarlama amacıyla yapılmaktadır ve ele alınan problemin test ve deney ihtiyacını matematiksel çözümleme ile tamamlayarak deneysel çalışmalar ve veri toplama için gerekli maliyeti azaltmaktadır.

ANSYS CFD çözümleri sonlu hacim metodu tabanlıdır.

- Çözüm alanı sonlu kontrol hacimlerine ayrılır,
- Kütle, momentum, enerji, vb. için genel korunum (transport) denklemleri bu kontrol hacmi grubu için çözülür,

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} = \oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\mathbf{A} + \int_V S_\phi dV \quad (5.1)$$

- Kısmi diferansiyel denklemler cebirsel denklem sistemlerine dönüştürülür,
- Bütün cebirsel denklemler daha sonra çözüm alanını resmetmek için nümerik olarak çözülür [40].



Şekil 5. 7 Akış bölgesindeki kontrol hacimleri [40]

Çizelge 5. 1 Süreklilik ve korunum denklemlerinin değişkenleri [40]

<u>Denklem</u>	<u>Değişken</u>
Süreklilik	1
X-Momentum	u
Y-Momentum	v
Z-Momentum	w
Enerji	h



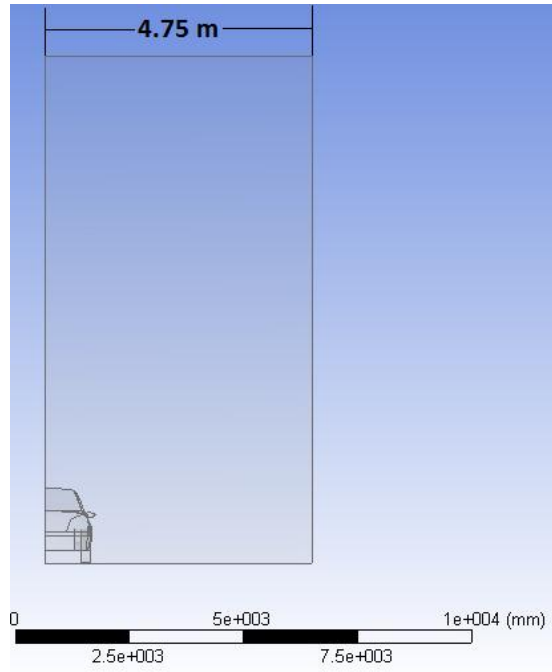
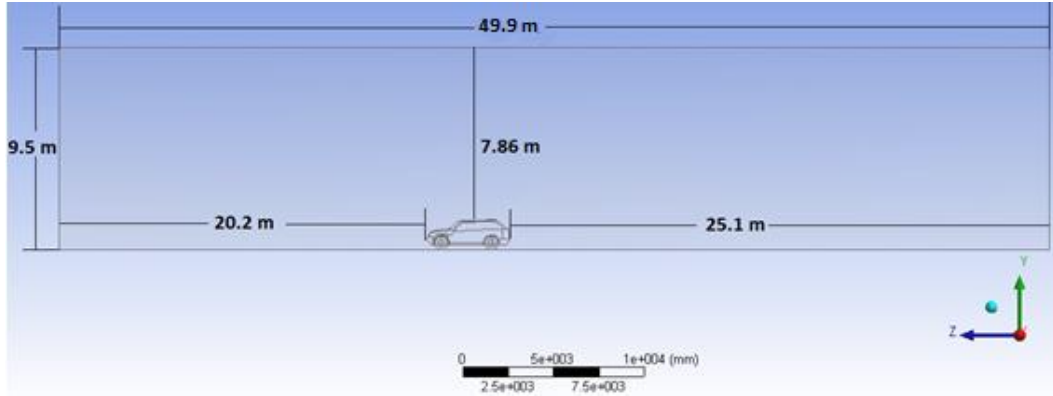
Şekil 5. 8 CFD modellemede işlem adımları [40]

CFD analizleri Şekil 5.8' de gösterilen işlem adımları takip edilerek yapılır.

- Problem Tanımlama
 1. Modelleme için amaçlar belirlenir.
 2. Modelleneyecek çözüm alanı tanımlanır.
- Ön işlem ve çözüm
 3. Çözüm alanını temsil eden katı model oluşturulur.
 4. Çözüm ağı tasarlanır ve oluşturulur (grid).
 5. Fiziksel özellikler tanımlanır (fiziksel modeller, malzeme özellikleri, çözüm alanı özellikleri, sınır koşulları, vb.).
 6. Çözücü ayarları tanımlanır (fiziksel şemalar, yakınsama kontrolleri, vb.).
 7. Hesaplama ve çözümü izleme.
- Art işlem
 8. Sonuçlar değerlendirilir.
 9. Model üzerinde revizyon yapılır [40].

5.2.2 Çözüm Geometrisi

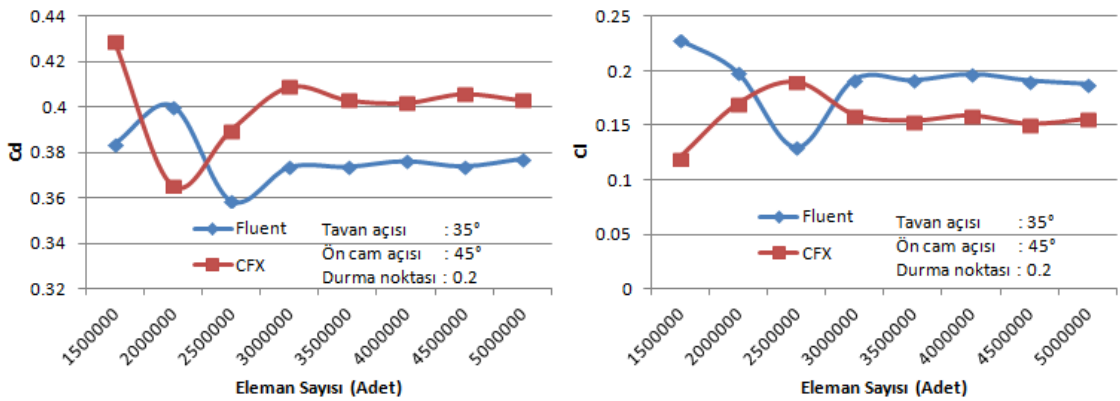
Solidworks Premium 2010 programı ile modellenen taşıt geometrisi ANSYS v13.0 yazılımının geometri modülüne çağırıldıktan sonra boyutları 9.5m x 9.5m x 49.9 m boyutundaki bir rüzgar tüneline eşdeğer olan dikdörtgen prizma ile kuşatılmıştır. Taşıt geometrisini oluşturan hacim tünel hacminden çıkarılarak sayısal hesaplamaların yapılacağı çözüm alanı elde edilmiştir. Akış doğrultusunda taşıt geometrisi simetrik olduğundan dolayı çözüm süresini en aza indirmek için akış alanı modellenirken taşıt geometrisinin yarısı kullanılmıştır.



Şekil 5. 9 Rüzgar tüneli (hesaplama alanı) boyutları ve taşıt modelinin rüzgar tüneli içindeki konumu

5.2.3 Ağ

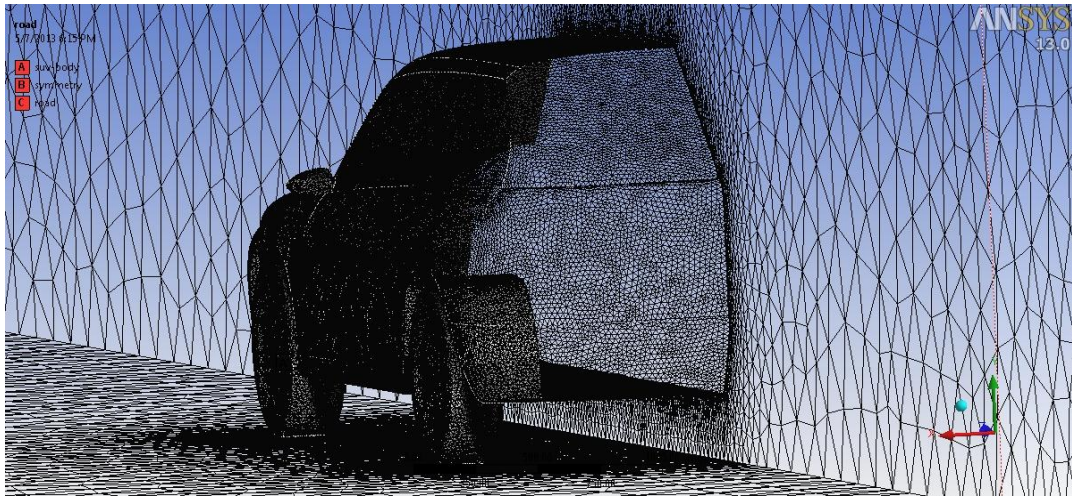
Akış hacmini temsil eden geometri tamamlandıktan sonra ağ yapısının oluşturulması için geometri Ansys Mesher modülüne import edilmiştir. Tam ölçekli taşıt modelinin yüzeyi 5 mm aralıklı “Triangular” elemanlara ayrılmıştır. Yüzeydeki bu elemanlar referans alınarak 1.2 artırım oranıyla “Tetrahedral” hacimsel elemanlar oluşturulmuştur. Eleman boyutları Şekil 5.10’da gösterilen “grid independency” çalışmasına bağlı olarak elde edilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi direnç ve kaldırma katsayıları için ardışık farkların yaklaşık 3 milyon elemandan sonra azalmaya başlamıştır. Analiz sonuçların kabul edilebilir seviyelerde olması için ağı oluşturan elemanların çarpıklık değerinin 0.9’dan aşağı olması gerekmektedir. Geometri üzerinde gerekli görülen bazı bölgelerde eleman boyutları küçültülerek ve bazı yüzeylerin temas noktalarını sanal yüzeyler ile birleştirerek çarpıklık değeri kabul edilebilir seviyelere indirilmiştir. Çözüm süresini azaltmak amacıyla direnç katsayısına etkisinin inceleneceği bölgelerde küçük eleman boyutları, diğer bölgelerde ise daha kaba elemanlar kullanılmıştır. Taşıt yüzeyi üzerindeki sınır tabaka oluşumu direnç katsayısını önemli derecede etkileyen bir faktördür. Sınır tabakanın hesaplamalar sırasındaki rolünü daha iyi gözlemleyebilmek için taşıt modelinin bütün yüzeyleri “inflation layer” olarak adlandırılan oldukça düzgün yapıllı dikdörtgen prizma şekilli hacim elemanlarıyla üst üste 5 katman halinde çevrelenmiştir. Tünel girişi için “velocity-inlet”, çıkış için “pressure-outlet”, taban için “wall” diğer yüzeyler için ise “symmetry” sınır şartları tanımlanmıştır.



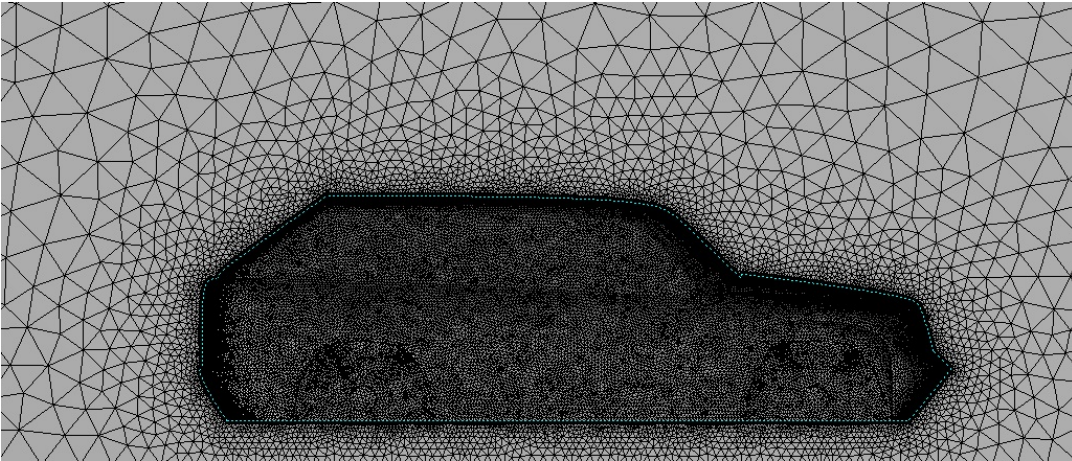
Şekil 5. 10 “Grid Independency” çalışması



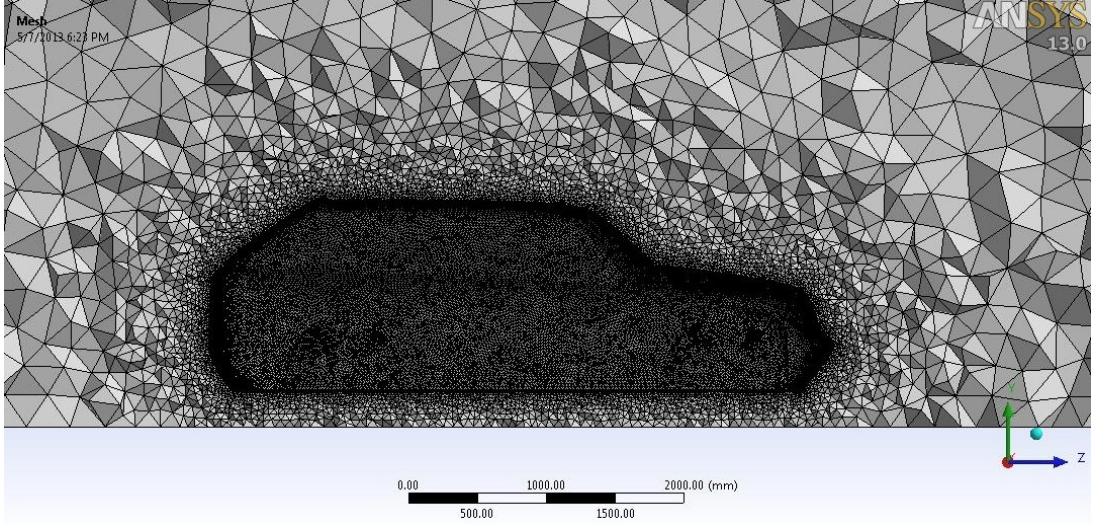
Şekil 5. 11 Taşıt yüzeyinde oluşturulan ağ yapısı (ön görünüm)



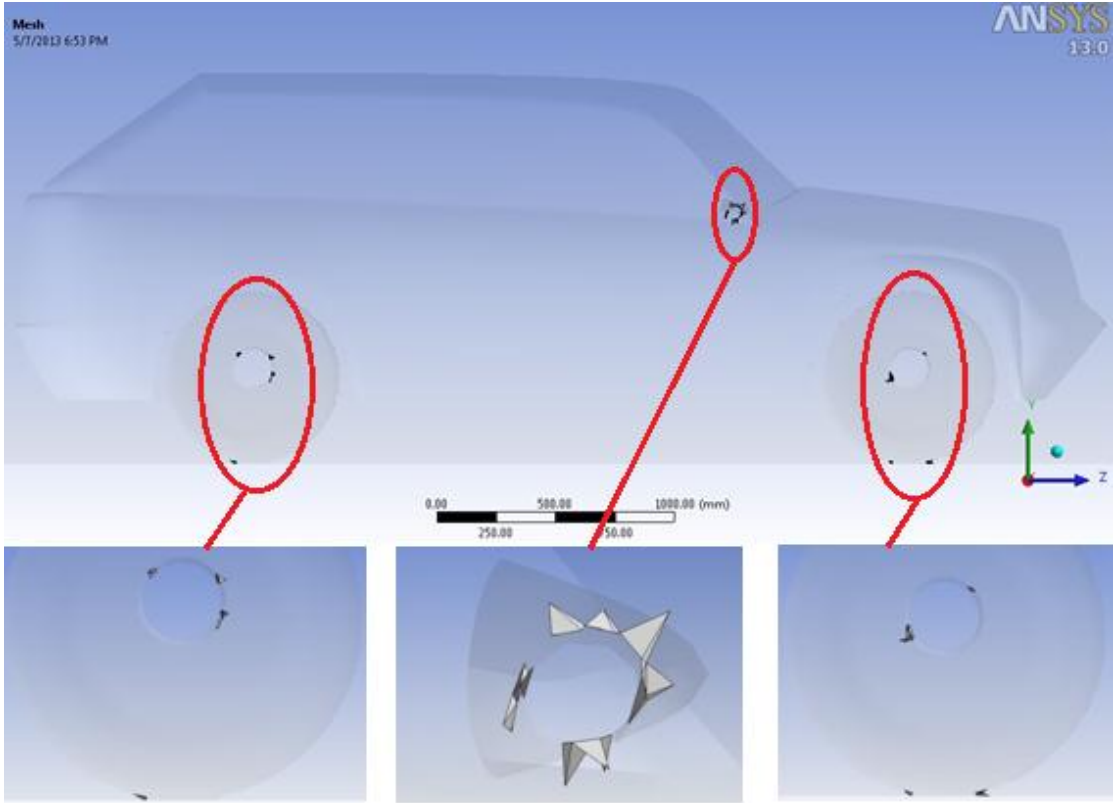
Şekil 5. 12 Taşıt yüzeyinde oluşturulan ağ yapısı (arka görünüm)



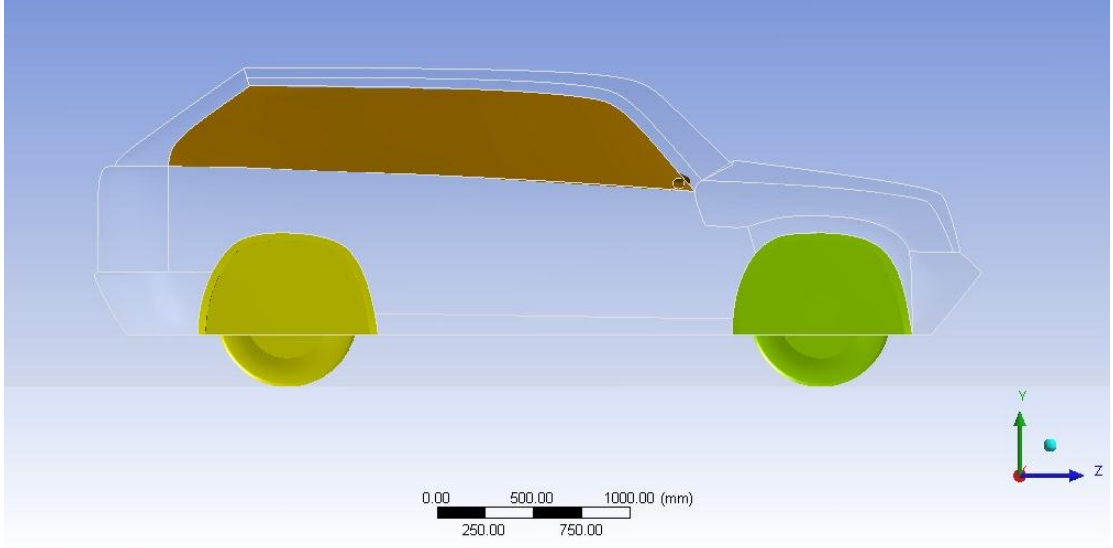
Şekil 5. 13 Simetri eksenini boyunca taşıttan dışı doğru ağın yoğunluk değışimi



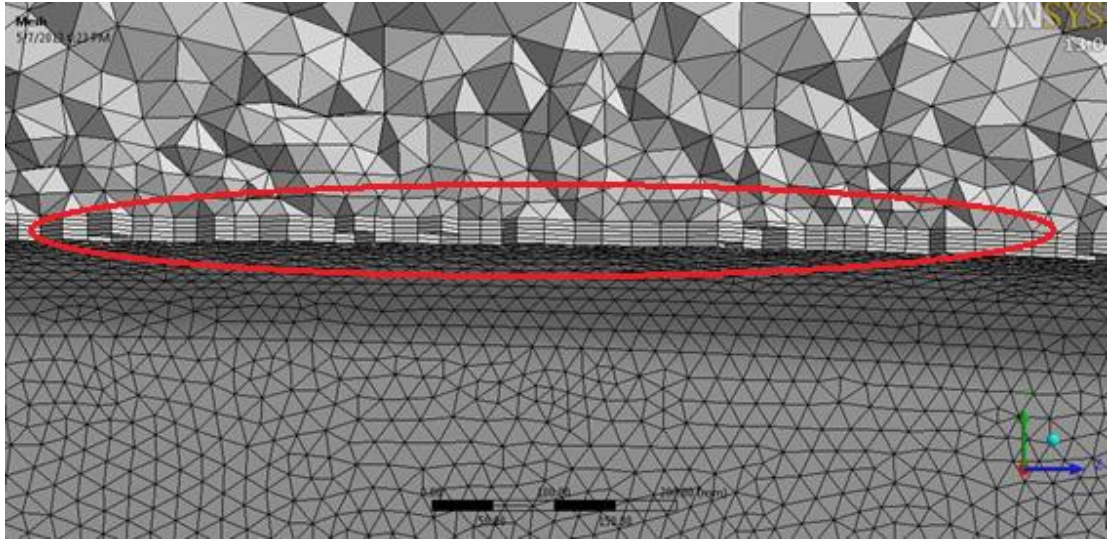
Şekil 5. 14 Üç boyutlu tetrahedral elemanlar



Şekil 5. 15 Ağ içerisinde sınır değeri aşan çarpık elemanlar



Şekil 5. 16 Çarpık elemanları gidermek amacıyla oluşturulan sanal yüzeyler



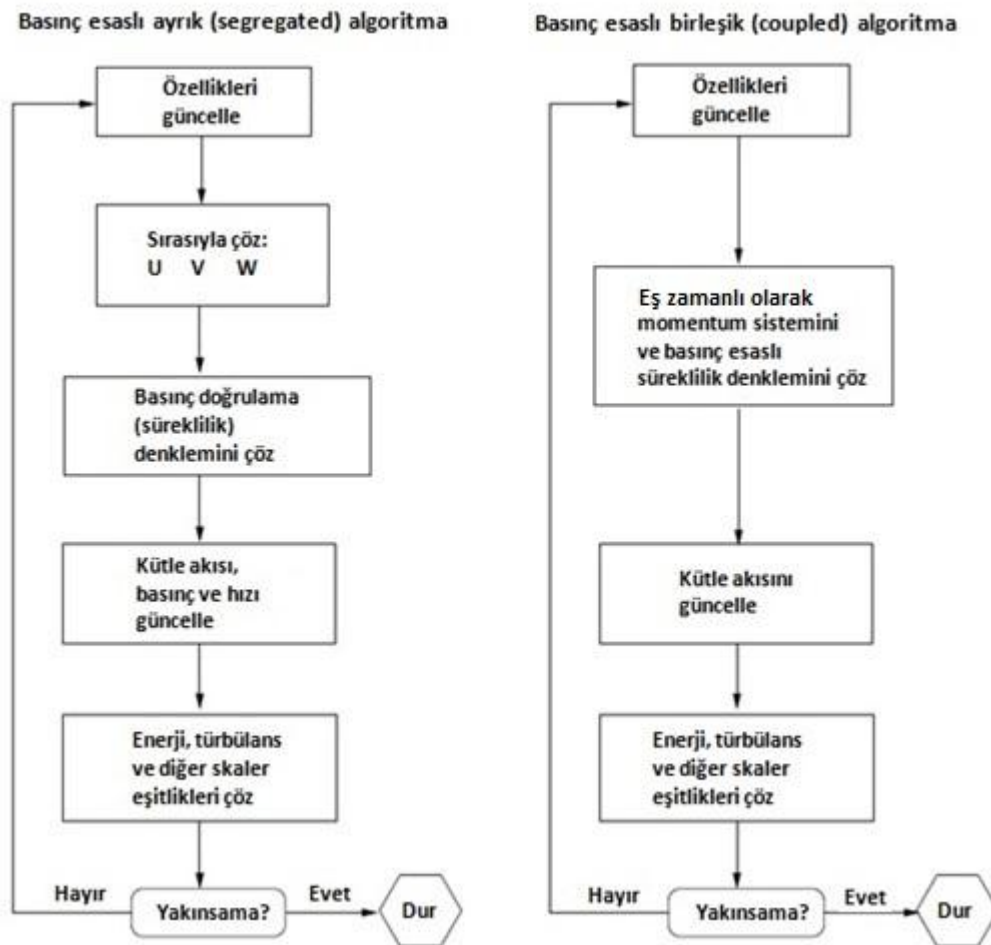
Şekil 5. 17 Sınır tabaka etkilerini yakalamak için taşıt yüzeyi üzerinde oluşturulan katmanlar

5.2.4 Çözüm

Ağ yapısı oluşturulmuş bütün modeller için çözümler ANSYS Fluent 13.0 ve CFX kodları ile ayrı ayrı yapılmıştır. Her iki program ayrık (segregated) ve birleşik (coupled) olmak üzere iki sayısal çözücü sunmaktadır (Şekil 5.17). Fluent ve CFX bu metotları kullanarak süreklilik, momentum, enerji ile türbülans ve kimyasal parçacıklar gibi diğer skalerler için genel integral denklemlerini çözmektedir. Her iki durumda (segregated ve coupled) da kontrol hacim esaslı teknik, bir işlem gridinin kullanıldığı ayrık kontrol hacimlerine bölünmüş bölümden, farklı bağımlı değişkenler (hız, basınç, sıcaklık) için cebirsel

denklemlerin oluşturulduğu her bir kontrol hacimde korunum denklemlerinin integrasyonundan, bağımlı değişkenlerin en son değerlerini kullanmak için diskritize edilmiş denklemlerin lineer hale getirilmesinden ve bu lineer denklem sisteminin çözümünden meydana gelir. Her iki çözüm sistemi de benzer diskritizasyon işlemi(sonlu-hacim) ifade etse de diskritize edilmiş denklemlerin lineer hale getirilmesi ve çözümü farklıdır. Ayrık çözücü korunum denklemlerini (süreklilik, momentum, enerji) sırasıyla çözerken, birleşik çözücü bu denklemleri anlık olarak(hepsini birden) çözmektedir [23].

Bütün korunum denklemleri çözüm alanındaki her noktada dengeye geldiği zaman yapılan analizde yakınsama gerçekleşmektedir. Her akışkan değişkeni için artıklar çözümdeki hatanın şiddetini belirtmektedir. Artıklar normalize edilmekte ve her korunum denklemi için hesaplanmaktadır [23]. Bu çalışmada kullanılan yakınsama kriterleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5. 18 Ayrık (segregated) ve birleşik (coupled) çözüm algoritmaları [41]

Çizelge 5. 2 Analizlerde kullanılan yakınsama tolerans faktörleri

<u>Denklem</u>	<u>Değişken</u>
Süreklilik	1.0×10^{-6}
X-Hızı	1.0×10^{-6}
Y-Hızı	1.0×10^{-6}
Z-Hızı	1.0×10^{-6}
k	1.0×10^{-6}
ϵ	1.0×10^{-6}

Çalışma esnasında artıkların değişimi ekranda görülmekte ve artıklar kararlı bir hal aldığı anda yakınsama tolerans değerlerine ulaşılmaya da işleme son verilmektedir.

Fluent ve CFX programları korunum denklemlerinin (süreklilik, momentum, ve enerji) sayısal olarak çözülebilmelerini sağlamak için, cebirsel denklemlere dönüştürebilmek amacıyla kontrol hacmi formülasyonunu kullanmaktadır. Bu kontrol hacmi tekniği her kontrol hacmi için tanımlanan denklemlerin integre edilmesinden oluşmaktadır. Fluent ve CFX kontrol hacimlerinin geometrik merkezinde hesaplanan skalar değişkenleri ve hızları saklamaktadır. Fakat, çözüm esnasında, bu değişkenlerin değerleri kontrol hacmi sınırlarında kullanılmaktadır. Yüzey değerleri aşağıda belirtilen interpolasyon seçenekleriyle elde edilebilmektedir.

- Birinci Derece Ayrıklaştırma (First-Order Upwind Scheme)
- İkinci Derece Ayrıklaştırma (Second-Order Upwind Scheme)
- Power-Law Scheme
- QUICK Scheme

Birinci Derece Ayrıklaştırma düzeninin önemi interpolasyona akışkan yönünün de dahil edilebilmesidir. Batı yüzeyindeki hücrenin herhangi bir ϕ değeri aynı zamanda merkezdeki ϕ_p ve ϕ_w değerlerinden etkilenmektedir. Fakat, batıdan doğuya güçlü bir taşınım olduğu zaman merkezi fark işlemi uygun olmamaktadır. Çünkü batı yüzeyindeki hücre ϕ_w değerinden ϕ_p değerine oranla daha fazla etkilenmektedir.

Birinci Derece Ayırıklaştırma düzeninin doğruluğu Taylor serileri kesme hataları cinsinden sadece birinci derecedendir. Bu düzenin değerlerini kullanmak yöntemin kararlı olduğunu temin eder fakat, birinci derece doğruluk nümerik difüzyon hatalarına yol açmaktadır. Bu sebeplerden ötürü, birinci derece ayırıklaştırma düzeni bu çalışmada kullanılmamıştır. Nümerik difüzyon hataları ikinci dereceden ayırıklaştırma yöntemi kullanılarak en az düzeye indirilmiştir. Daha yüksek mertebeden düzenler OUICK ve İkinci Dereceden Ayırıklaştırma Şeması gibi daha fazla komşu noktaya sahiptirler ve ayırıklaştırma hatalarını çevre komşu noktaların etkilerini daha fazla göz önüne alarak en aza indirmektedirler.

Power-law düzeni değişken ϕ 'nin yüzey değerlerini interpolate etmek için bir boyutlu konveksiyon difüzyon denkleminin kesin çözümünü kullanmaktadır. Power-Law şeması akış bir boyutlu olduğu zaman avantajlıdır. Bundan dolayı, akış alanı hesaplama gridleri ile aynı hizada olduğu zaman, akış tahminleri için güzel bir seçenektir. Fakat, akış hesaplama gridleri ile açığı yaptığı zaman veya daha yüksek hassasiyet istendiği zaman OUICK (The Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics) düzeni veya ikinci dereceden ayırıklaştırma düzeni kullanılması tercih edilmektedir. Birçok durumda, akış alanı hesaplama gridleri ile örtüşmemektedir. Bu nedenle, power-law şeması interpolasyon şeması olarak seçilmemiştir.

OUICK düzeni kontrol hacmi yüzeyinde daha kapsamlı bir yaklaşımı oluşturmaktadır. Birinci derece ayırıklaştırma düzeninde olduğu gibi, OUICK ve ikinci derece ayırıklaştırma düzeninde de interpolasyon esnasında akışın yönü dikkate alınmaktadır. OUICK düzeni kuadratik bir interpolasyon şeması kullanmaktadır. Kuadratik interpolasyon şeması nümerik olarak daha fazla hassasiyet içermekte ve en önemlisi akış alanı grid sistemi ile örtüşmediği durumlarda da rahatça kullanılabilir.

İkinci dereceden ayırıklaştırma düzeninde, hücre yüzeylerindeki değerler OUICK düzeninde olduğu gibi kuadratik interpolasyon yaklaşımı yerine çok boyutlu lineer yaklaşımı ile hesaplanmaktadır. Bu anlamda, hücre yüzeylerinde Taylor serisinin hücre merkezli çözüm açılımı ile yüksek hassasiyet sağlanmaktadır [23]. Bu çalışmadaki bütün analizlerde ikinci dereceden ayırıklaştırma düzeni kullanılmıştır.

Bu çalışmadaki sayısal çözümlerinde kullanılan özellikler Çizelge 5.3’de, relaksasyon kriterleri Çizelge 5.4’de, diskritizasyon özellikleri Çizelge 5.5’de verilmiştir.

Çizelge 5. 3 Sayısal çözümlerinde kullanılan özellikler

<u>Fonksiyon</u>	<u>Özellik</u>
Çözücü	Basınç esaslı (Pressure based)
Zaman	Sabit
Hız formülasyonu	Mutlak
Akışkan	Hava (Sıkıştırılmaz)
Basınç-hız bağlantısı	Coupled

Çizelge 5. 4 Relaksasyon kriterleri

Basınç	0.1
Momentum	0.1
Yoğunluk	0.8
Gövde kuvvetleri	0.8
Türbülans kinetik enerji	0.1
Türbülans harcanım oranı	0.1
Türbülans viskozite	0.95

Çizelge 5. 5 Diskritizasyon özellikleri

Basınç	İkinci derece
Momentum	İkinci derece
Türbülans kinetik enerji	İkinci derece
Türbülans harcanım oranı	İkinci derece
Türbülans viskozite	İkinci derece

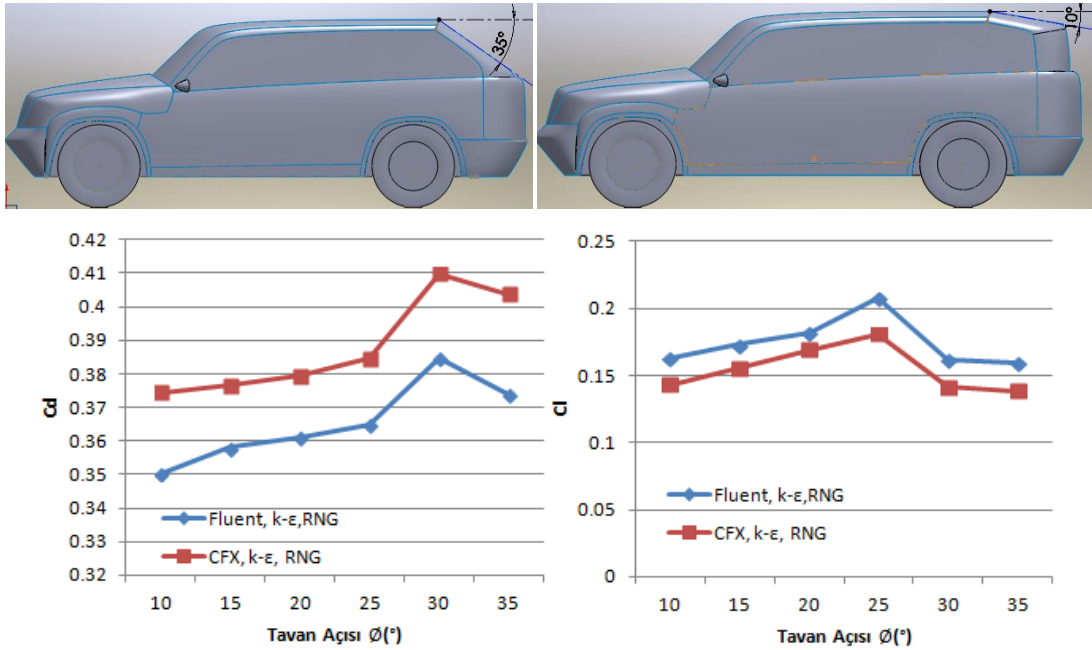
Bu çalışmada akışkan olarak kullanılan havanın özellikleri Çizelge 5.6'da verilmiştir. Süreklilik ve momentum denklemleri akışkan özelliklerinin sabit olduğu kabulü ile çözülmüştür.

Çizelge 5. 6 Akışkan olarak kullanılan havanın özellikleri

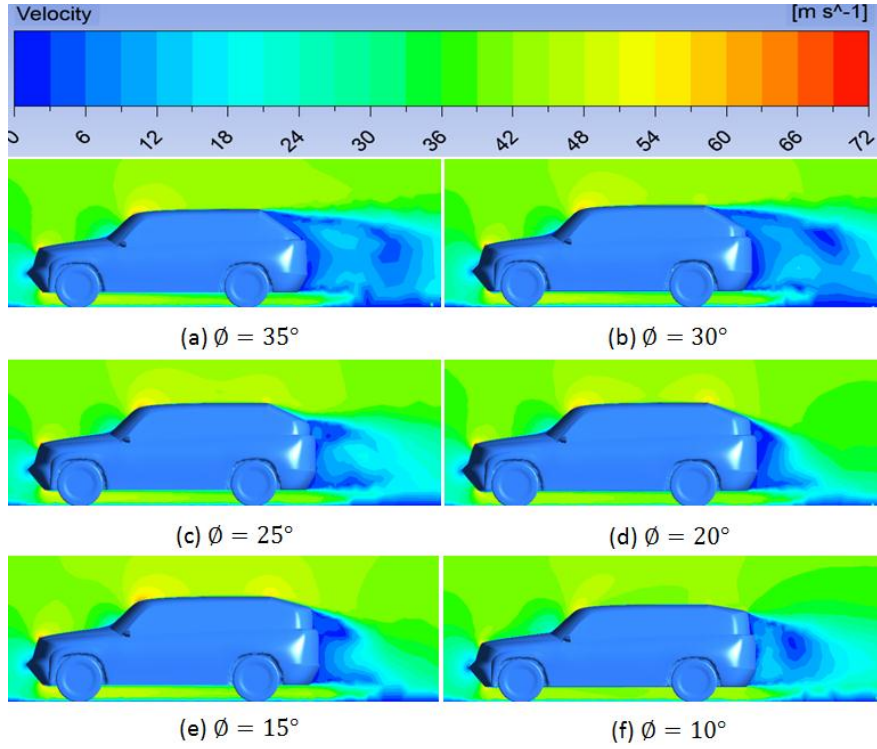
<u>Özellik</u>	<u>Değer</u>
ρ (Yoğunluk)	1.225 kg/m^3
μ (Dinamik viskozite)	$1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$
C_p (Özgül ısı)	1006.43 j/kgK
k (Isı iletim katsayısı)	$0.0242 \text{ w/m}^2 \text{ K}$

1/1 ölçekli taşıt geometrileri için akış analizleri $Re:12.322.566$ 'de $k - \epsilon$ (RNG) türbülans modeli ve Non-Equilibrium wall function duvar kenarı modelleme opsiyonları kullanılarak yapılmıştır.

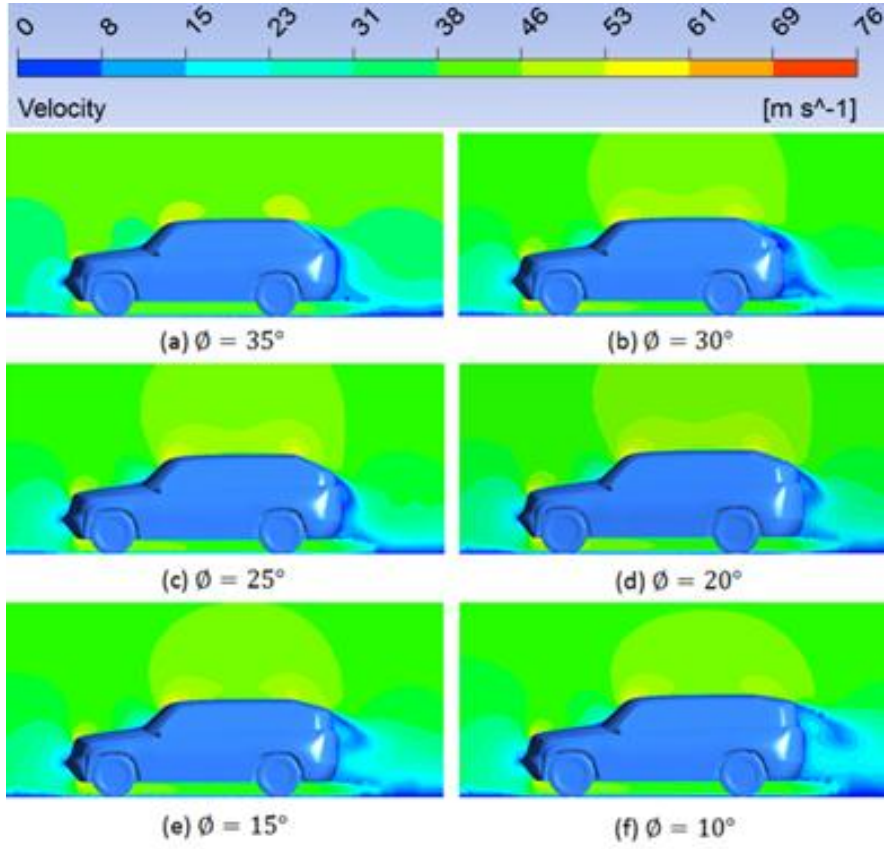
5.2.4.1 Tavan açısı(θ) & Cd-Cl Değişimi



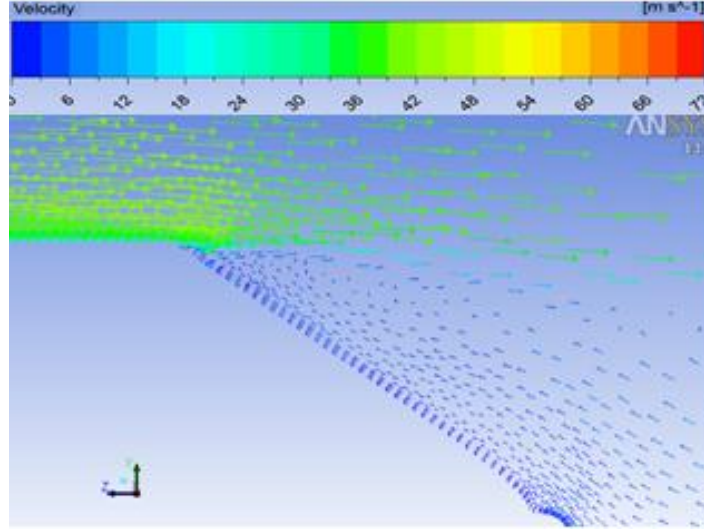
Şekil 5. 19 Tavan açısı(θ) & Cd-Cl değişimi



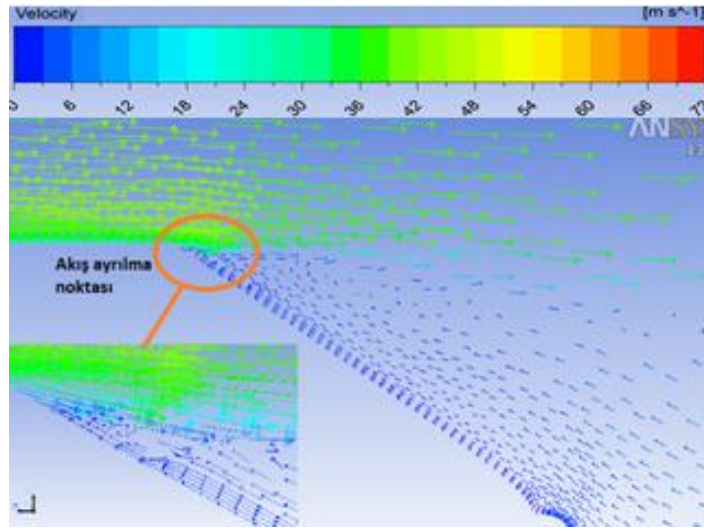
Şekil 5. 20 35°-30°-25°-20°-15°-10° tavan açıları için simetri düzlemindeki hız konturları (FLUENT)



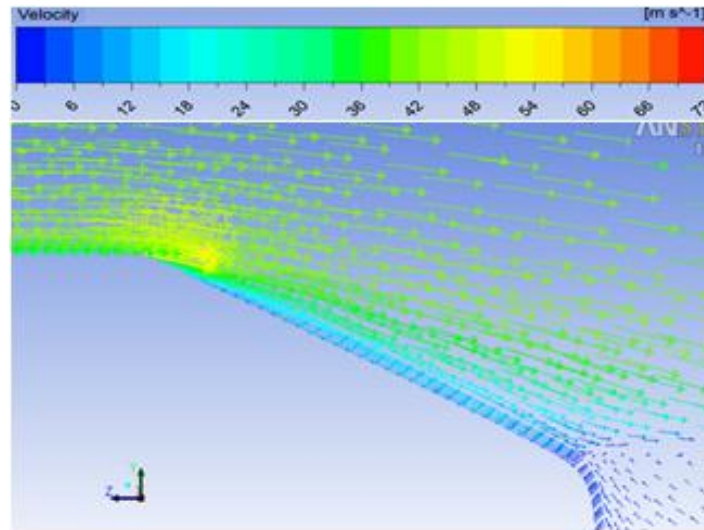
Şekil 5. 21 35°-30°-25°-20°-15°-10° tavan açıları için simetri düzlemindeki hız konturları (CFX)



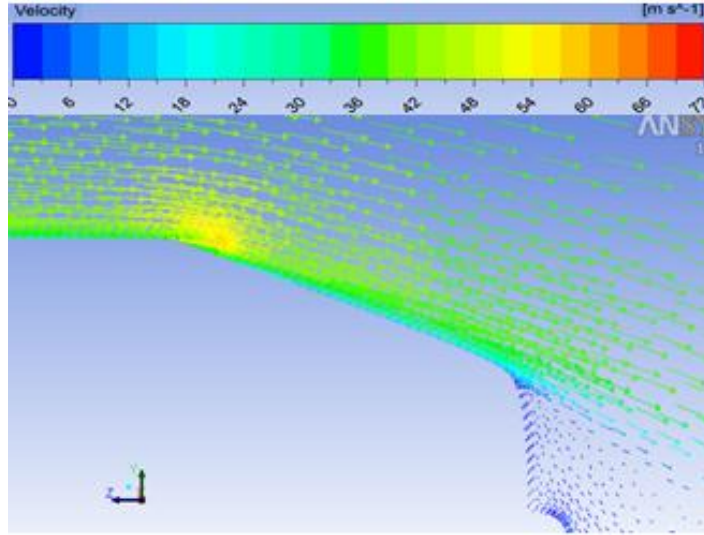
Şekil 5. 22 35° tavan açısı için simetri düzlemindeki hız vektörleri



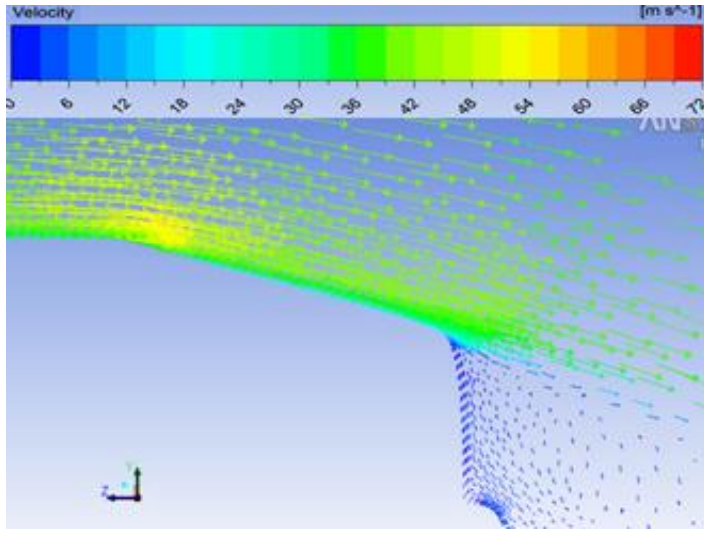
Şekil 5. 23 30° tavan açısı için simetri düzlemindeki hız vektörleri



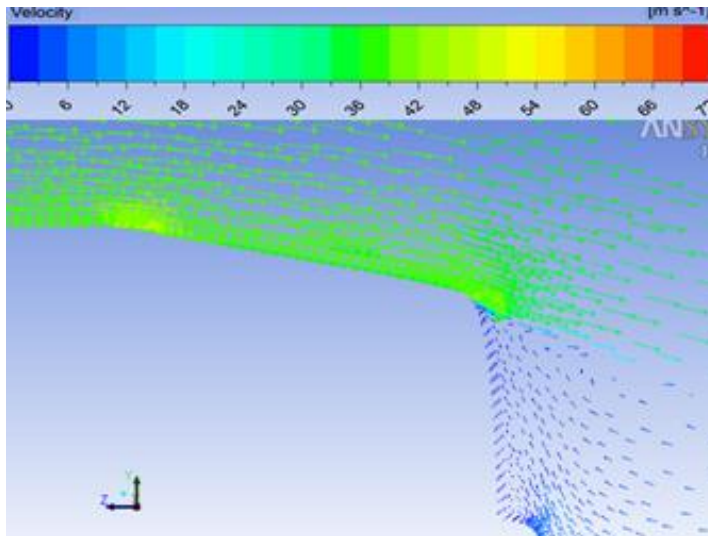
Şekil 5. 24 25° tavan açısı için simetri düzlemindeki hız vektörleri



Şekil 5. 25 20° tavan açısı için simetri düzlemindeki hız vektörleri

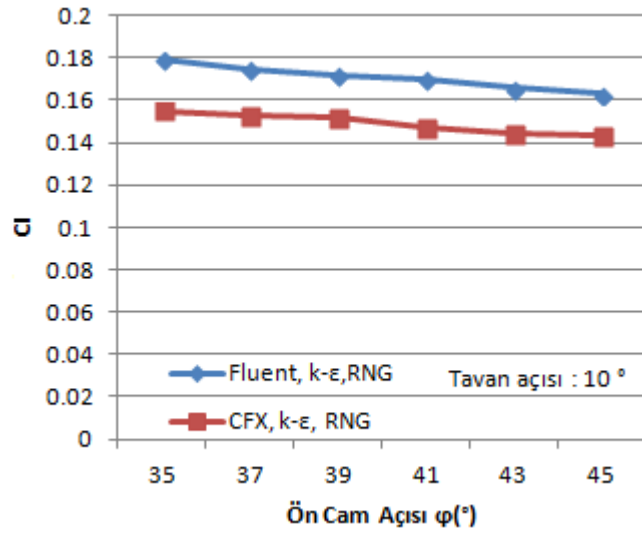
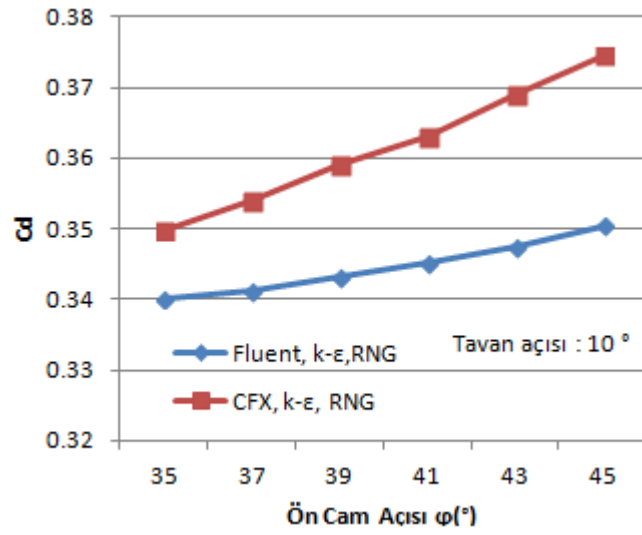
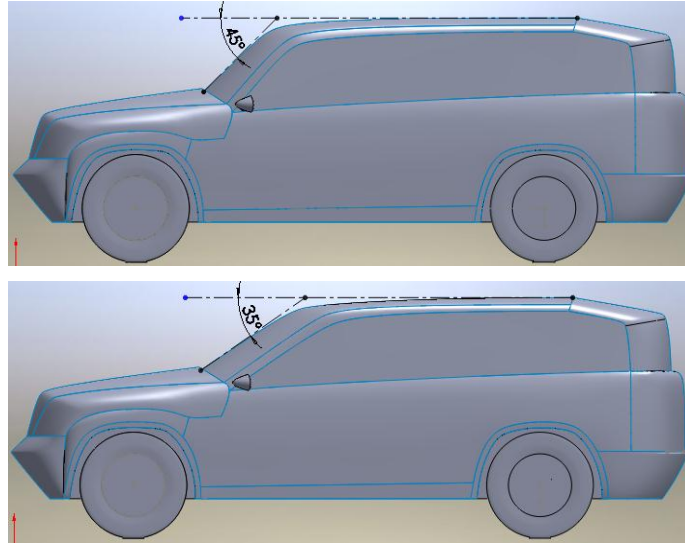


Şekil 5. 26 15° tavan açısı için simetri düzlemindeki hız vektörleri

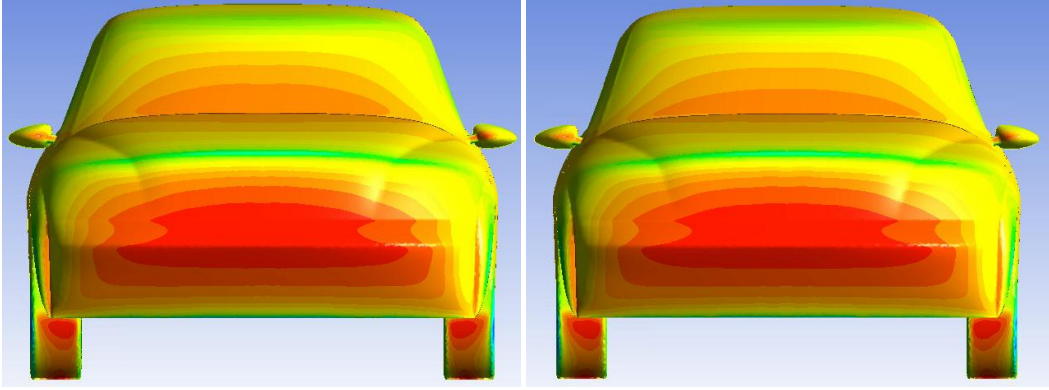
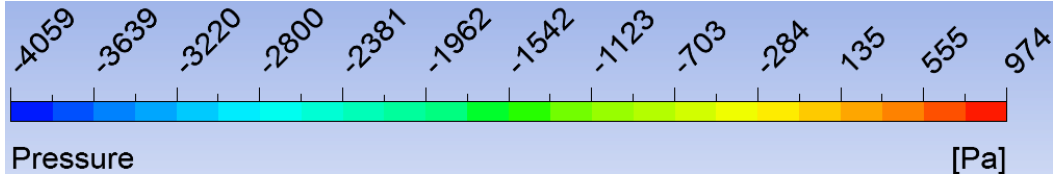


Şekil 5. 27 10° tavan açısı için simetri düzlemindeki hız vektörleri

5.2.4.2 Ön cam açısı(φ) & Cd-Cl Değişimi

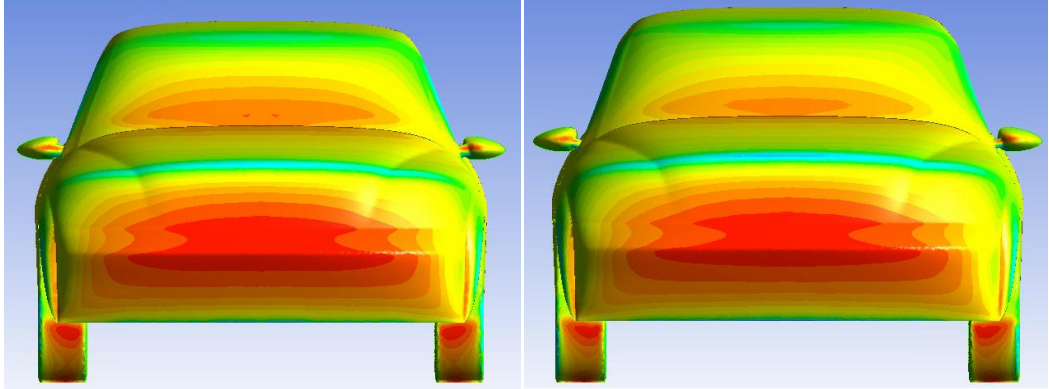


Şekil 5. 28 Ön cam açısı(φ) & Cd-Cl değişimi



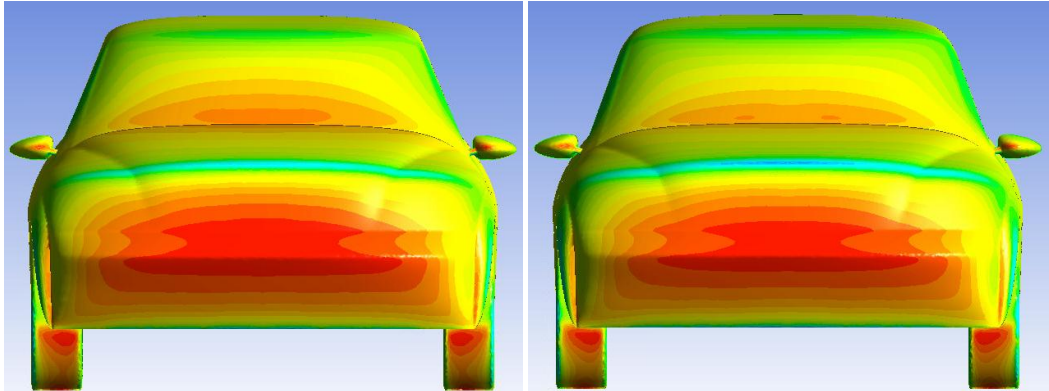
(a) $\varphi = 45^\circ$

(b) $\varphi = 43^\circ$



(c) $\varphi = 41^\circ$

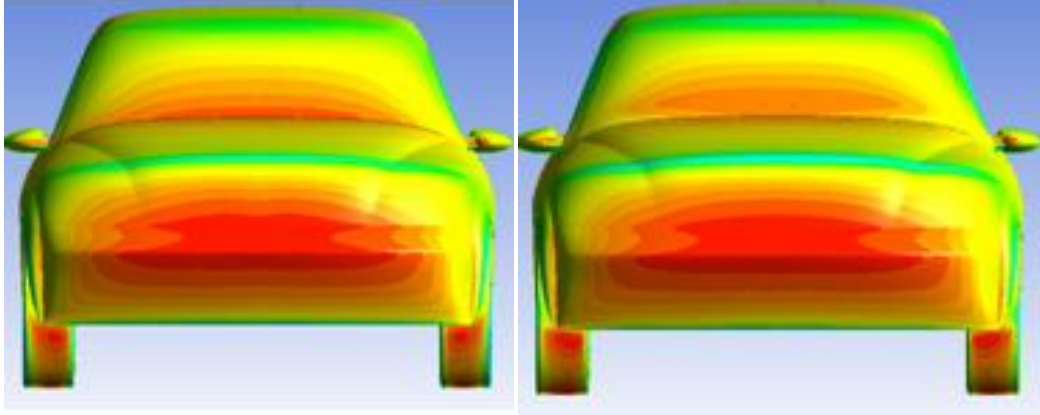
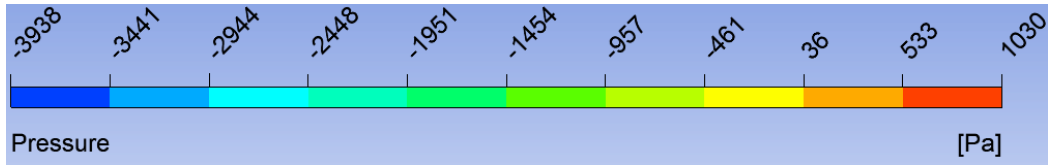
(d) $\varphi = 39^\circ$



(e) $\varphi = 37^\circ$

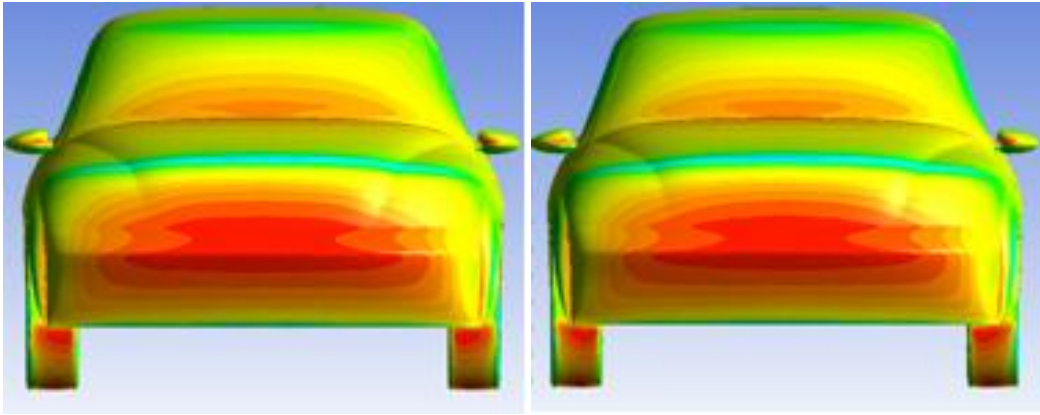
(f) $\varphi = 35^\circ$

Şekil 5. 29 45°-43°-41°-39°-37°-35° ön cam açılırları için statik basınç konturları (FLUENT)



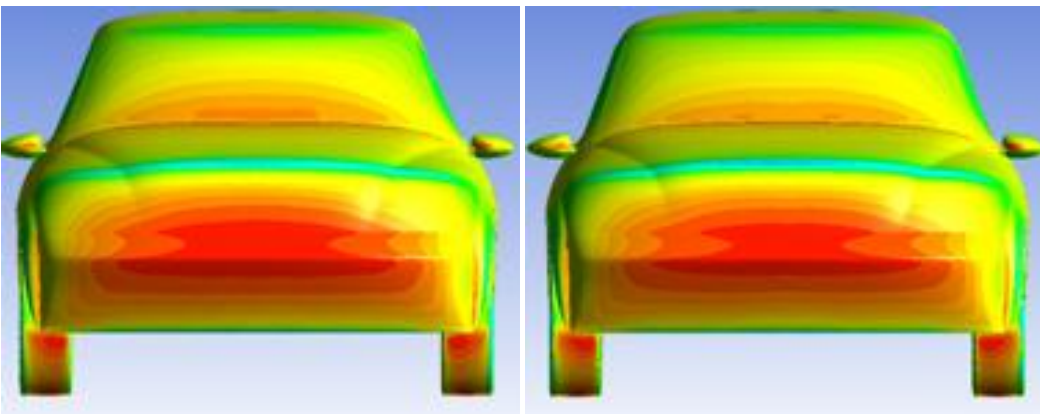
(a) $\varphi = 45^\circ$

(b) $\varphi = 43^\circ$



(c) $\varphi = 41^\circ$

(d) $\varphi = 39^\circ$

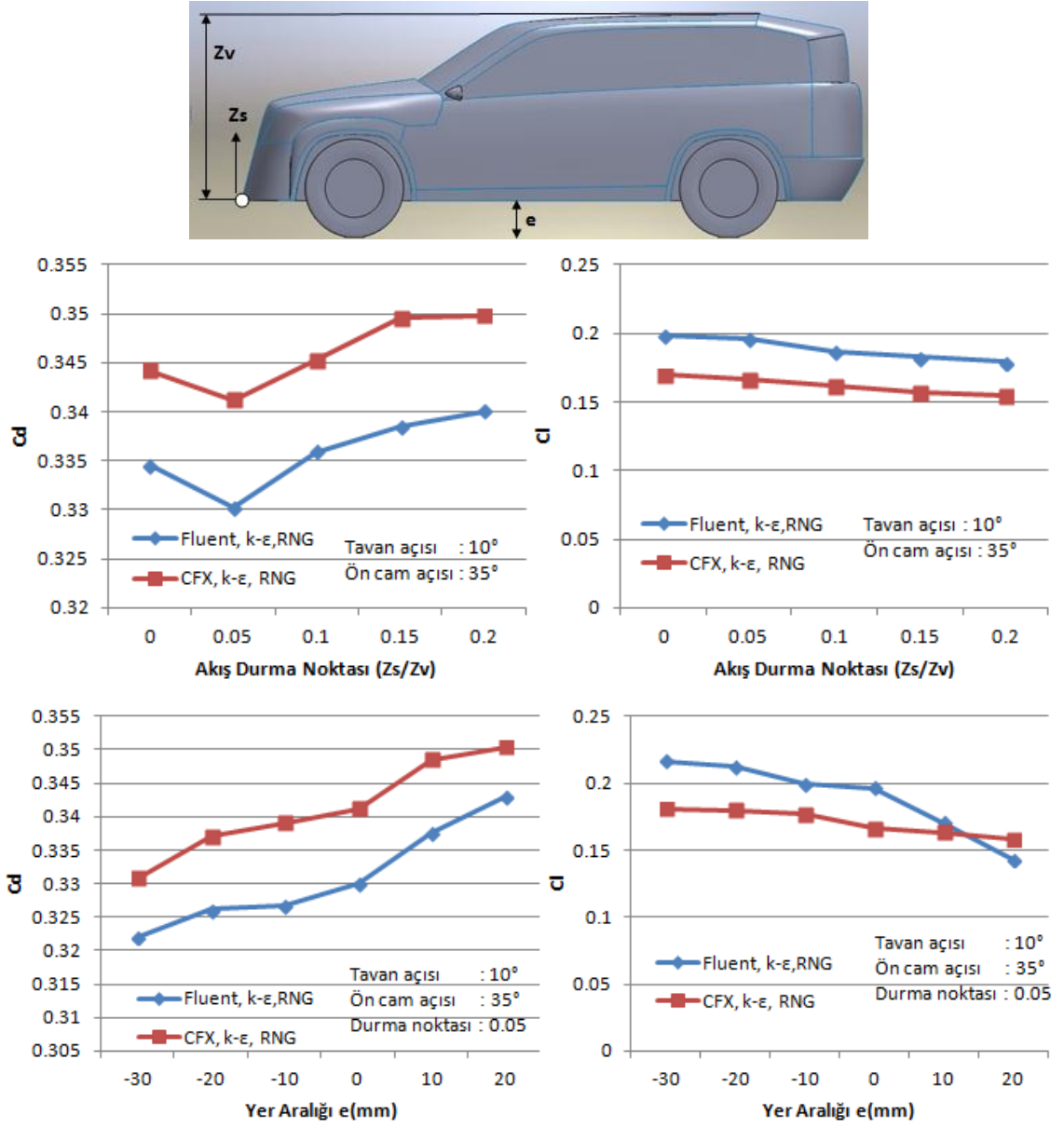


(e) $\varphi = 37^\circ$

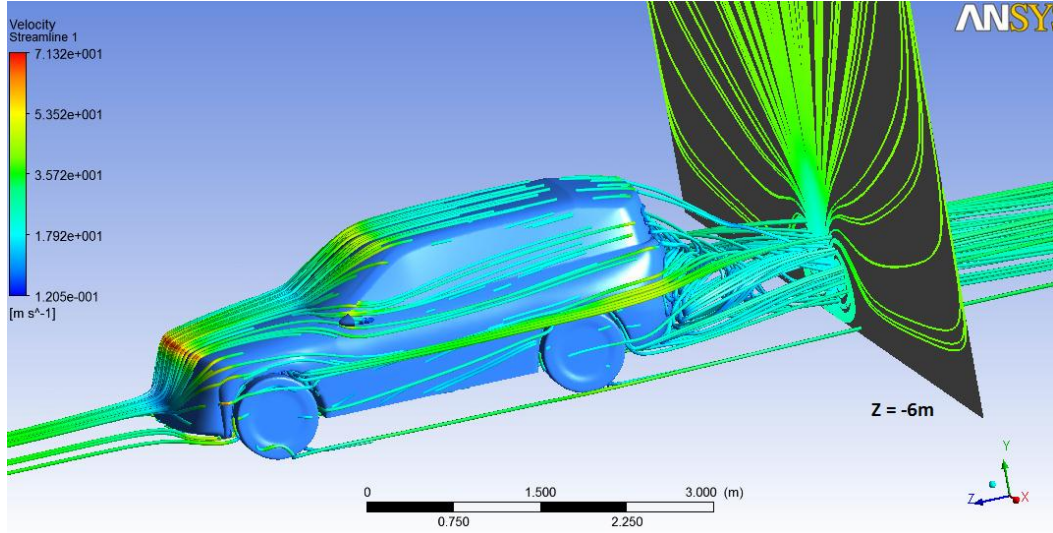
(f) $\varphi = 35^\circ$

Şekil 5. 30 45°-43°-41°-39°-37°-35° ön cam açılı için statik basınç konturları (CFX)

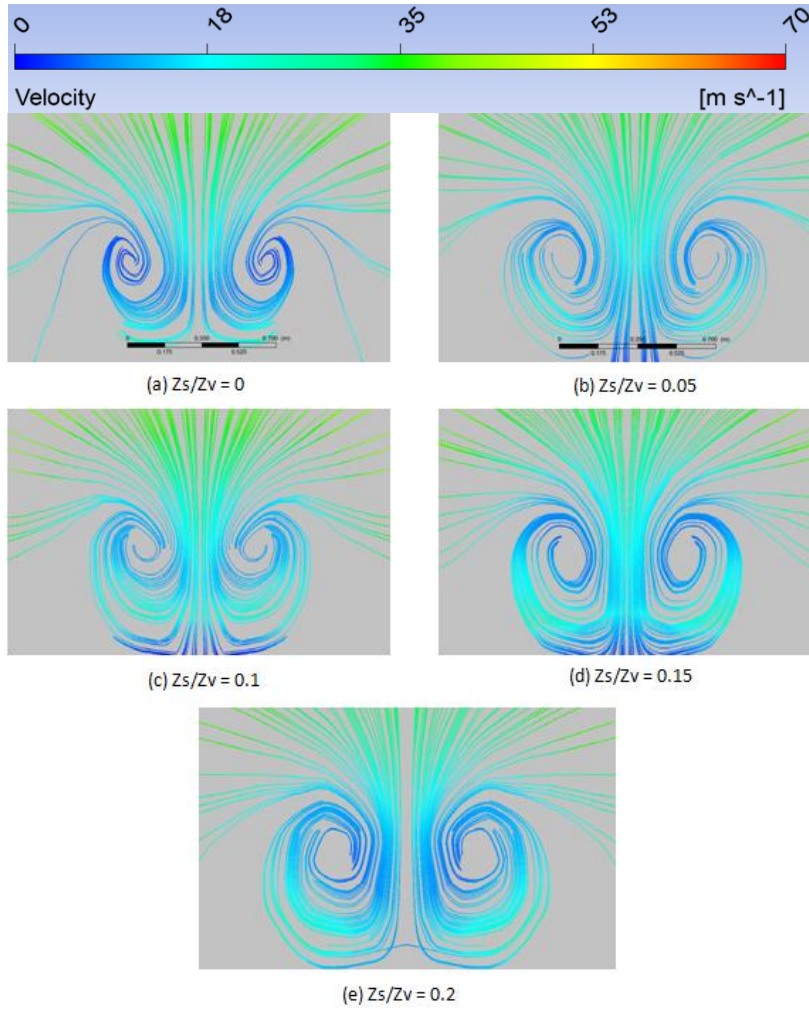
5.2.4.3 Durma noktası (Z_s/Z_v) ve Yer Aralığı (e) & C_d - C_l Değişimi



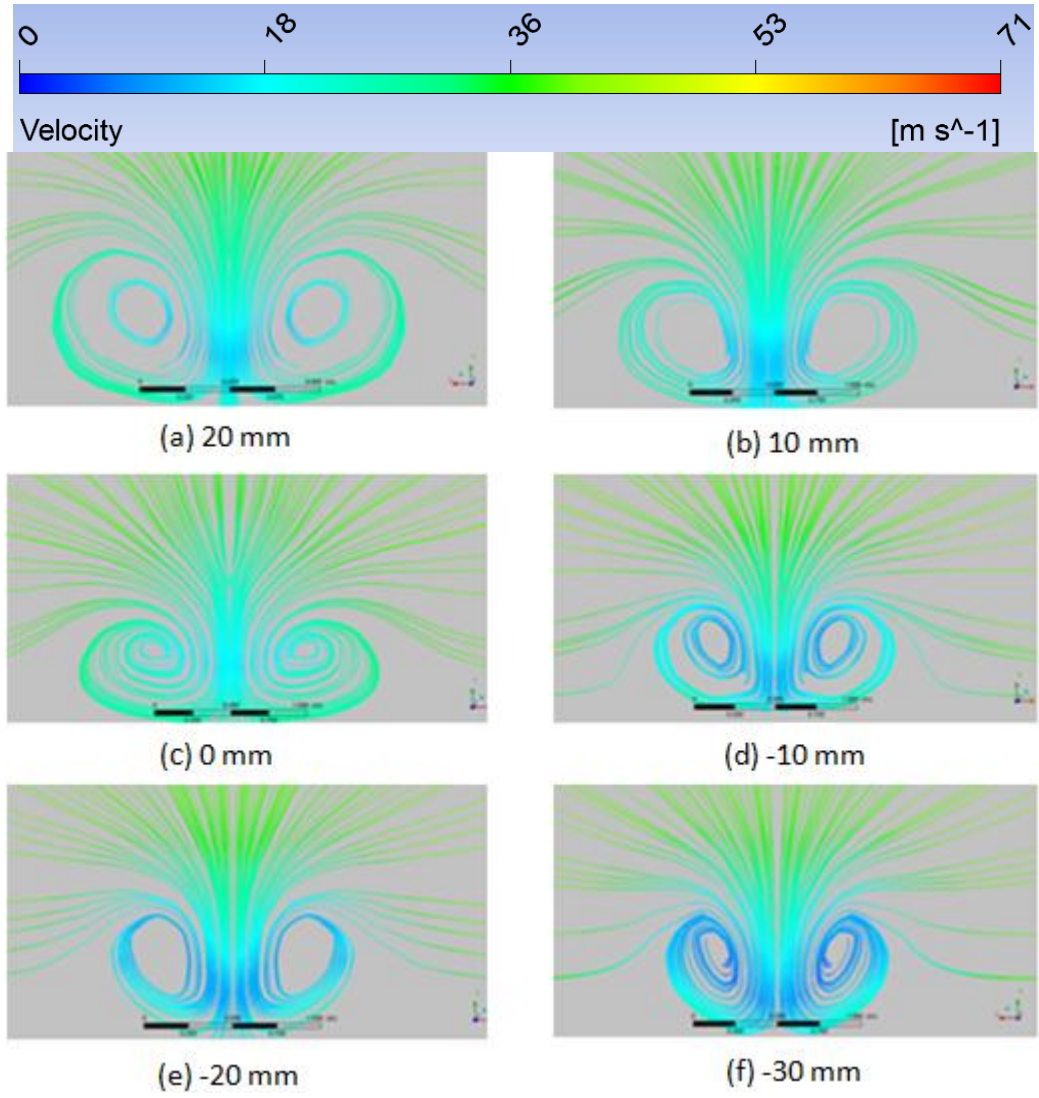
Şekil 5. 31 Akış durma noktası (Z_s/Z_v) ve Yer aralığı (e) & C_d - C_l değişimi



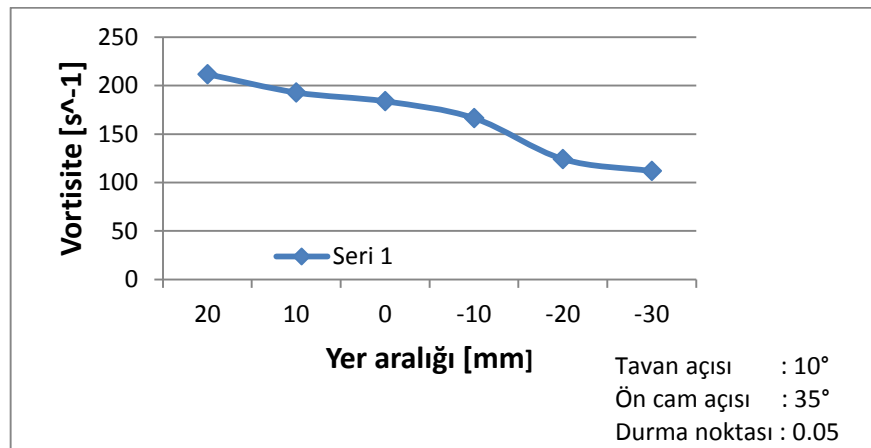
Şekil 5. 32 $\phi = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$ ve $Z_s/Z_v = 0.05$ için akış çizgileri



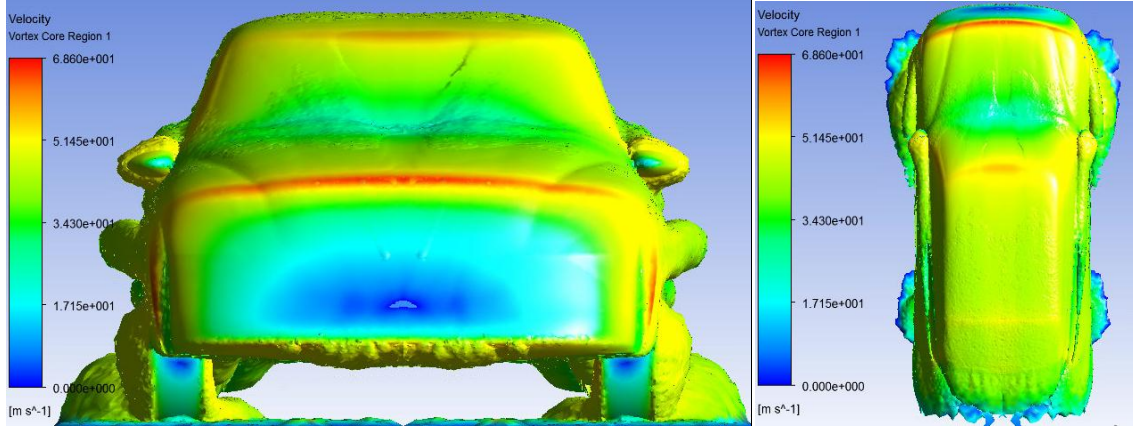
Şekil 5. 33 $\phi = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$ ve yer aralığı $e = 0$ için $Z = -6m$ düzleminde durma noktası (Z_s/Z_v) değişimine bağlı yüzey akış çizgileri (Girdap Boyutları)



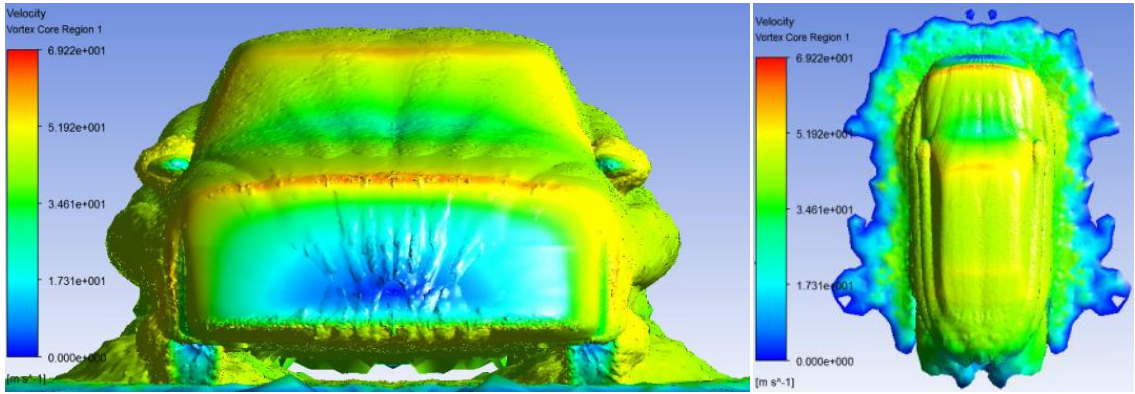
Şekil 5. 34 $\phi = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$ ve $Z_s/Z_v = 0.05$ için $Z = -6m$ düzleminde yer aralığı değişimine bağlı yüzey akış çizgileri (Girdap Boyutları)



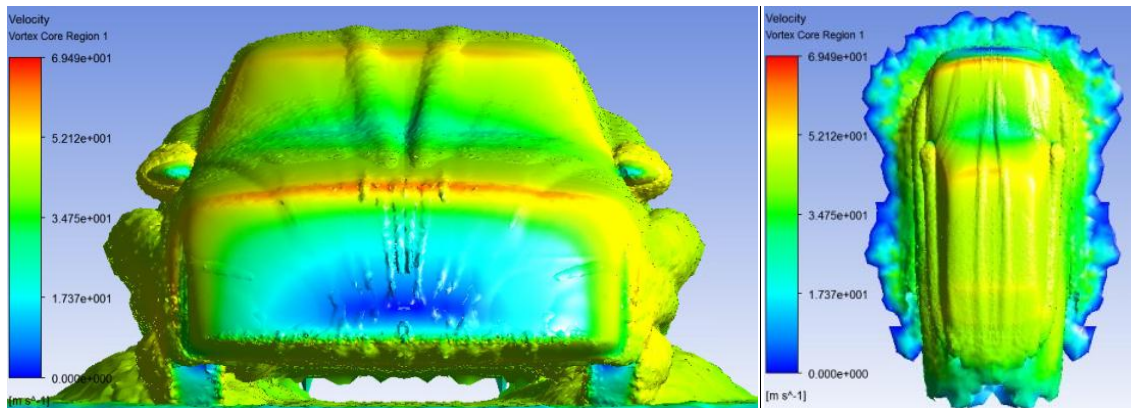
Şekil 5. 35 $\phi = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$ ve $Z_s/Z_v = 0.05$ için 0.03 seviyesindeki yer aralığı değişimine bağlı vortisite değerleri



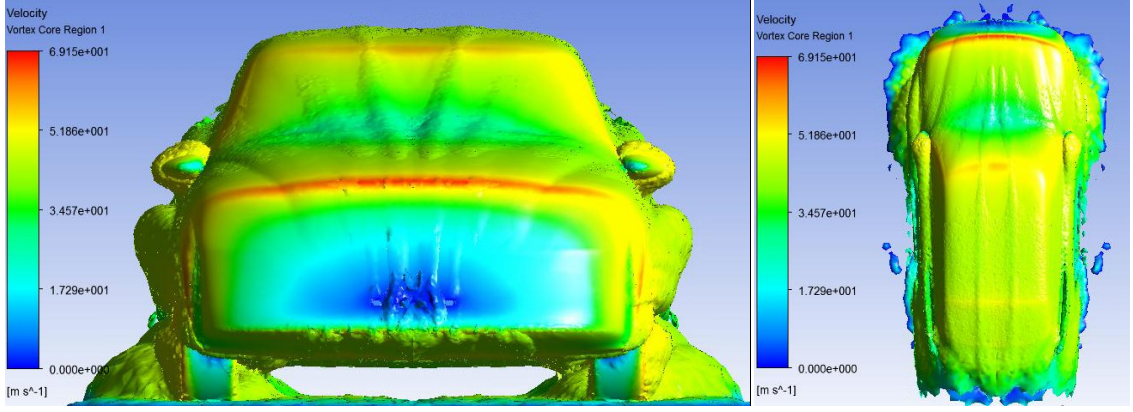
Şekil 5. 36 $Z = -6\text{m}$ düzleminde $\theta = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$, $Z_s/Z_v = 0.05$ ve $e = 20\text{ mm}$ için 0.003 seviyesindeki vorteks bölgesi



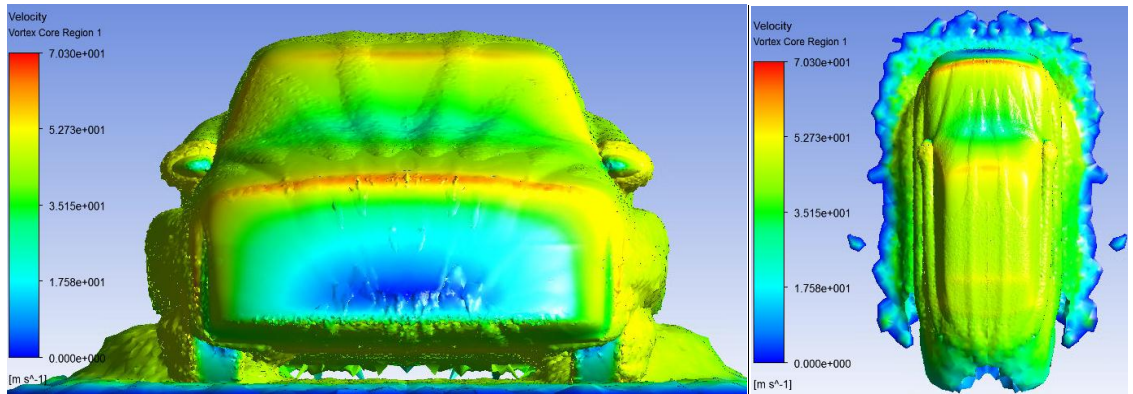
Şekil 5. 37 $Z = -6\text{m}$ düzleminde $\theta = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$, $Z_s/Z_v = 0.05$ ve $e = 10\text{ mm}$ için 0.003 seviyesindeki vorteks bölgesi



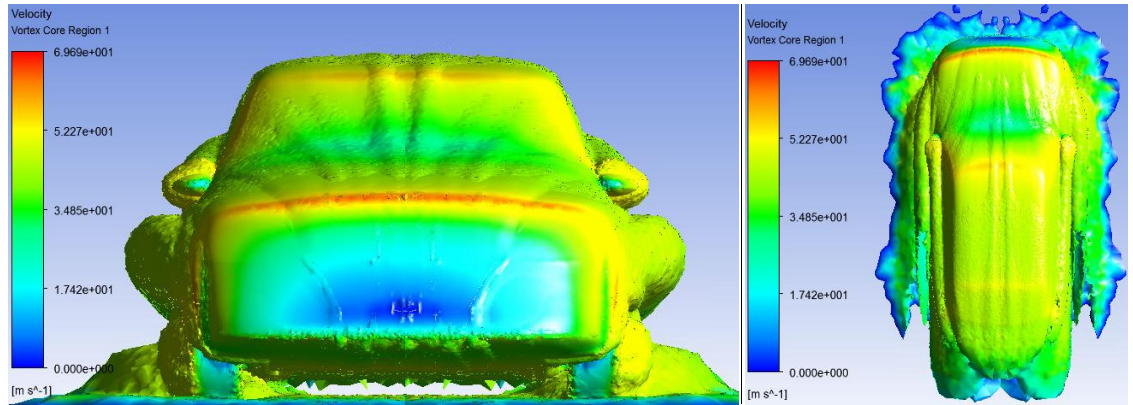
Şekil 5. 38 $Z = -6\text{m}$ düzleminde $\theta = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$, $Z_s/Z_v = 0.05$ ve $e = 0\text{ mm}$ için 0.003 seviyesindeki vorteks bölgesi



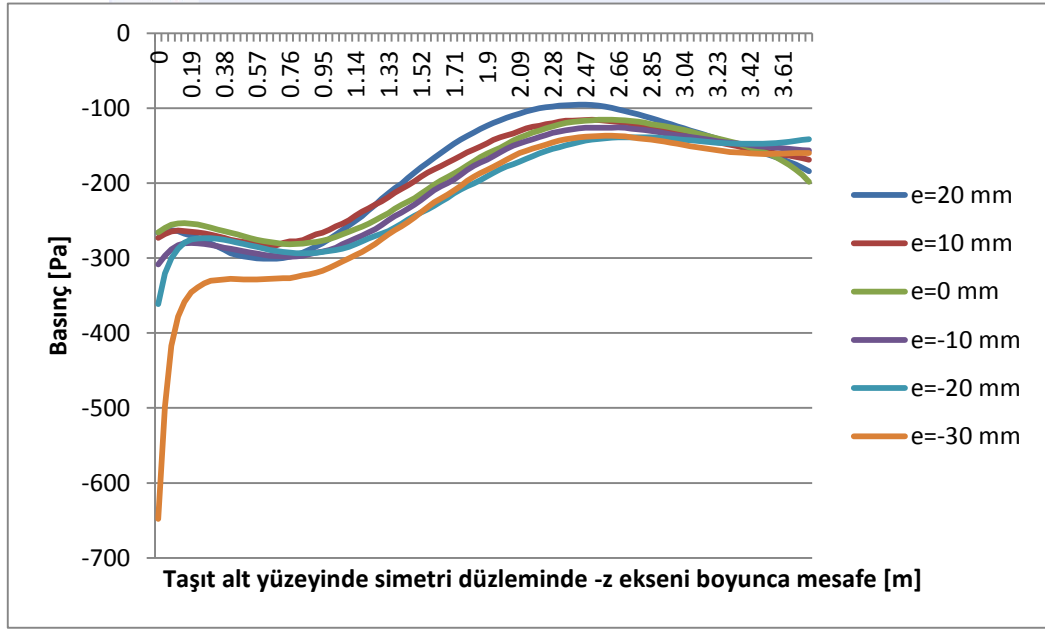
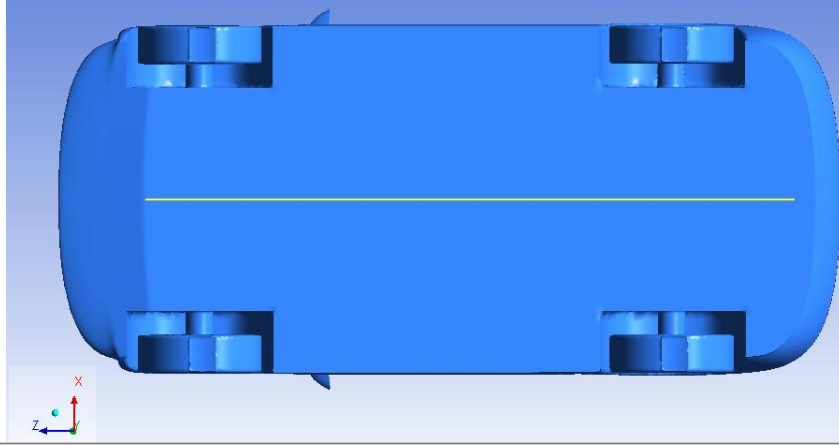
Şekil 5. 39 $Z = -6\text{m}$ düzleminde $\phi = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$, $Z_s/Z_v = 0.05$ ve $e = -10\text{ mm}$ için 0.003 seviyesindeki vorteks bölgesi



Şekil 5. 40 $Z = -6\text{m}$ düzleminde $\phi = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$, $Z_s/Z_v = 0.05$ ve $e = -20\text{ mm}$ için 0.003 seviyesindeki vorteks bölgesi



Şekil 5. 41 $Z = -6\text{m}$ düzleminde $\phi = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$, $Z_s/Z_v = 0.05$ ve $e = -30\text{ mm}$ için 0.003 seviyesindeki vorteks bölgesi

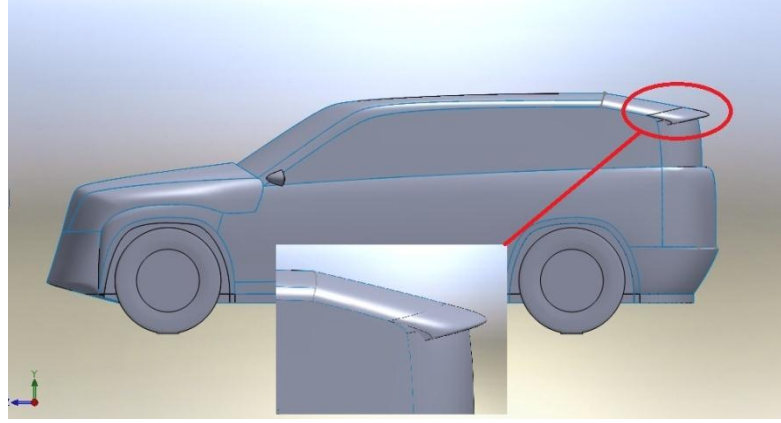


Şekil 5. 42 $\theta = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$ ve $Z_s/Z_v = 0.05$ için taşıt alt yüzeyinde simetri ekseninde yer aralığı değişimine bağlı statik basınç değerleri

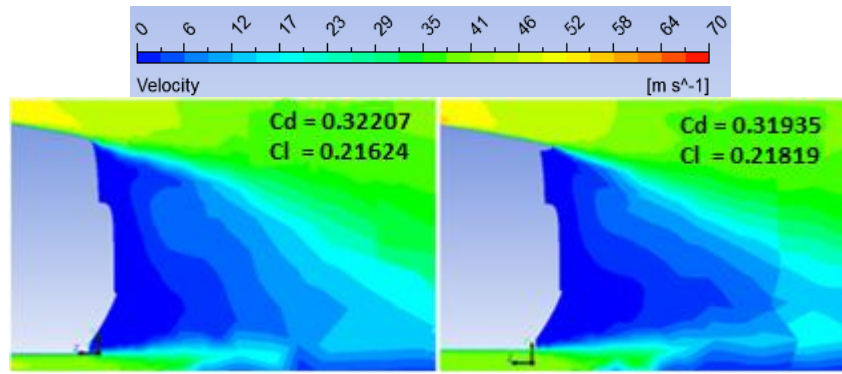
5.2.5 Akış Kontrol Uygulamaları

5.2.5.1 Arka Spoiler Uygulaması

Spoiler araç etrafında oluşan uygunsuz hava akımını minimize etmek için kullanılır ve ön-arka sployler olmak üzere ikiye ayrılır. Tampona bağlı olan ön spoylerin amacı temel olarak havayı taşıt altına yönlendirmek ve tekerlerle olan temasını en aza indirmektir. Arka spoiler ise taşıtlarda genellikle bagaj kapağı üzerine yerleştirilir ve taşıt üzerindeki hava akışını difüze ederek taşıt arkasında oluşan türbülansı azaltır [42, 43]. Taşıt modeli üzerine yerleştirilen arka spoiler Şekil 5.43'de gösterilmiştir.



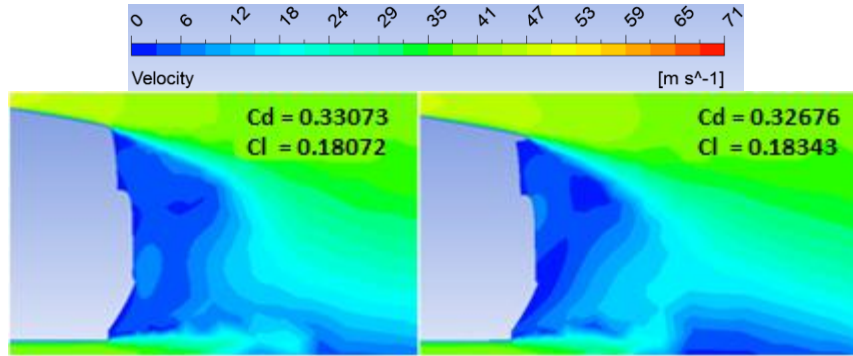
Şekil 5. 43 Taşıt modeli üzerine yerleştirilen arka spoyler



(a) Spoyler yok(FLUENT)

(b) Spoyler var(FLUENT)

Şekil 5. 44 $\theta = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$, $Z_s/Z_v = 0.05$ ve $e = -30$ mm için için taşıt modeli üzerine eklenen arka spoylerin Cd ve Cl üzerine etkisi, hız konturları (FLUENT)



(c) Spoyler yok (CFX)

(d) Spoyler var (CFX)

Şekil 5. 45 $\theta = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$, $Z_s/Z_v = 0.05$ ve $e = -30$ mm için için taşıt modeli üzerine eklenen arka spoylerin Cd ve Cl üzerine etkisi, hız konturları (CFX)

5.2.5.2 Vortex Generatörü Uygulaması

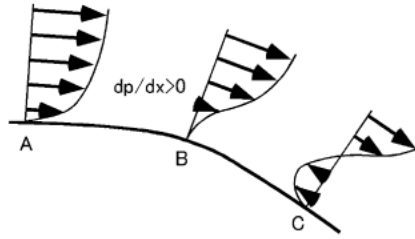
Genellikle uçak kanatları üzerinde kullanılan vorteks generatörleri dış akıştaki yüksek enerjili havanın sınır tabakadaki yavaş hareket eden havayla karışması/yer

değiştirmesini sağlayan güçlü girdaplar oluşturur, karşı basınç gradientlerinin etkisini azaltır ve akış ayrılmasını önler. Vorteks generatörleri genellikle laminer akıştan türbülanslı akışa geçişin olduğu yere konumlandırılırlar[44].



Şekil 5. 46 Bir savaş uçağı kanadı üzerine yerleştirilmiş vorteks generatörleri [45]

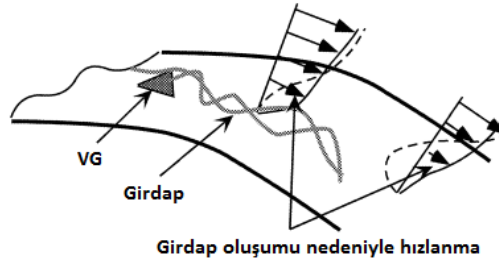
Şekil 5.47 bir taşıtın tavan bitiminde simetri eksenini boyunca hız profilini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 5. 47 Taşıt tavan bitimi civarında hız profili şematiği [8]

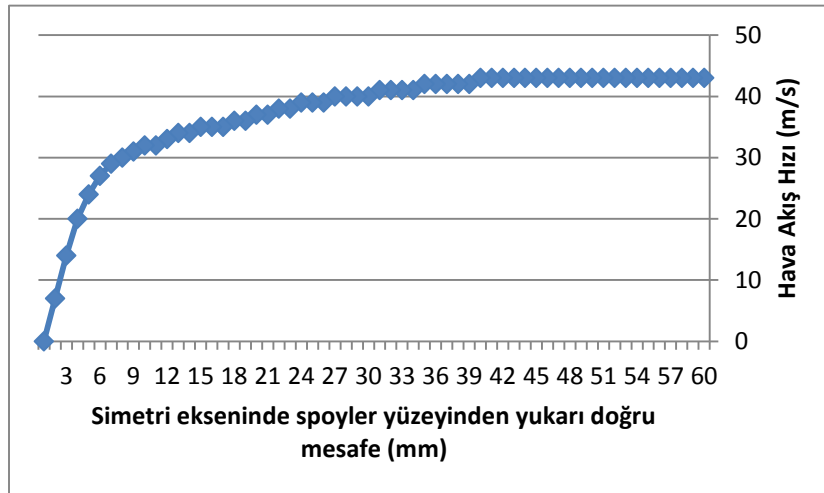
Bu bölgede taşıt yüksekliği giderek azaldığından akış aşağı doğru hareket ederken burada genişmiş hava akımı meydana gelir. Bu durum aşağı yönlü basıncın artmasına sebep olur ve bu nedenle ana akışın tersi yönde etkiyen kuvvet ile C noktasında ters akış oluşur. C noktasının üst kısmında bulunan A noktasında ters akış oluşmaz çünkü sınır tabakanın momentumu bu noktada basınç gradienti (dp/dx)nin üzerindedir. A ve C noktaları arasında bir ayrışma noktası (B) vardır ve bu noktada basınç gradienti ve sınır tabakanın momentumu denge halindedir. Şekil 5.47'te görüldüğü gibi taşıt yüzeyine yakın aşağı bölgede sınır tabaka içerisinde hava akışı aşağı doğru hareket ederken viskozitesinden dolayı momentumunu hızlıca kaybetmektedir. Vorteks generatörü uygulamasının temel amacı Şekil 5.48'te görüldüğü gibi ayrışma

noktasından hemen önce yerleştirilen vorteks generatörleri tarafından oluşturulan girdaplar sayesinde yüksek momentuma sahip üst bölgeden alçak momentuma sahip alt bölgeye momentum desteği sağlamaktır. Bu durum ayrışma noktasının aşağı doğru kaymasını sağlamaktadır [8].



Şekil 5. 48 Vorteks generatörü etrafındaki akış şematiği[8]

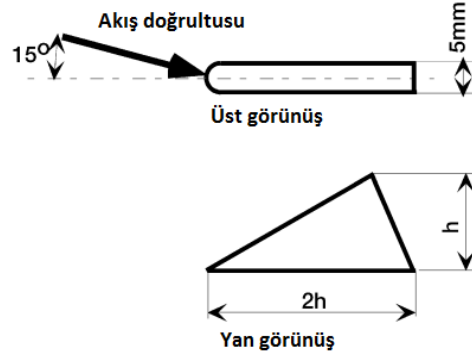
Taşıt modelinde delta kanat tipi vorteks generatörleri Şekil 5.31’de gösterildiği ölçülerde hava akışı doğrultusuyla 15° açı yapacak şekilde taşıt modeli üzerinde arka spoyler üzerine yerleştirilmiştir. Simetri ekseninde spoyler yüzeyine dik doğrultuda yerleştirilen bir çizgi üzerinden hız ölçümleri alınmış ve vorteks generatörünün yüksekliği Şekil 5.49’da görüldüğü taşıt üzerindeki hava akışının sınır tabaka kalınlığı kadar yani yaklaşık 40 mm olacak şekilde belirlenmiştir.



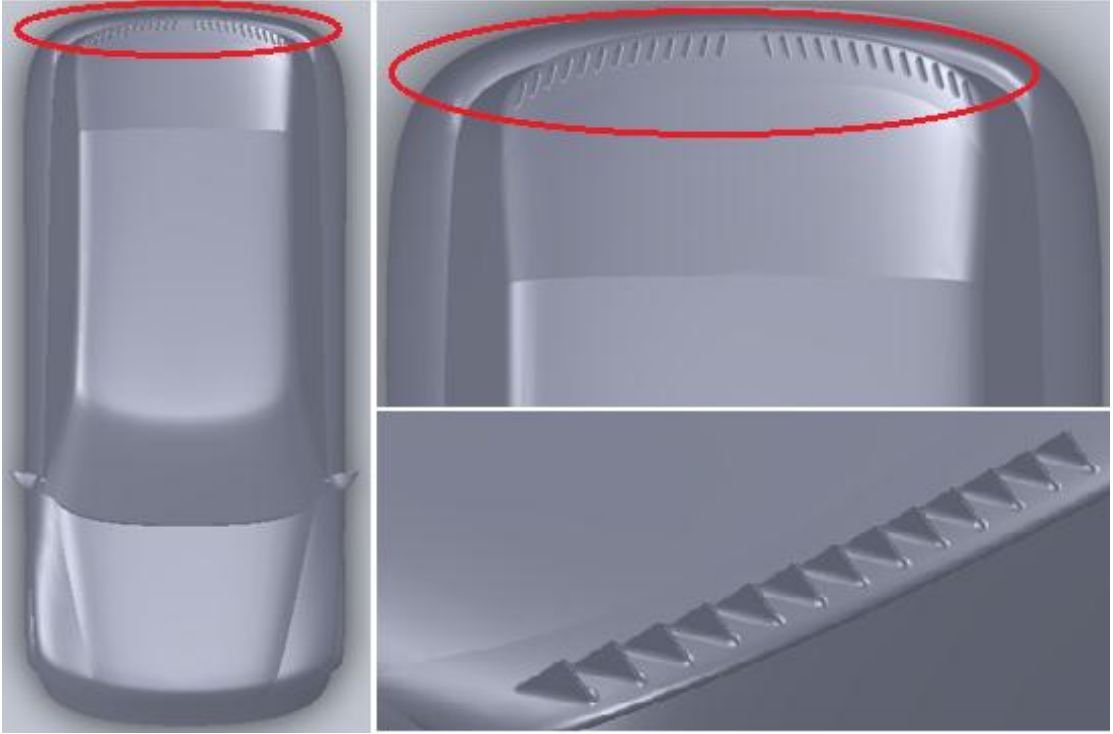
Şekil 5. 49 Simetri ekseninde spoyler yüzeyinden yukarı doğru hız profili (X = 4.4 m)

Vorteks generatörü yüksekliğinin sınır tabaka kalınlığından düşük ya da daha yüksek olması aerodinamik direnç katsayısını artırıcı yönde etki yapabilmektedir. Delta kanat tipi vorteks generatörünün diğer bazı vortex generatörlerine (örn: bombe şekilli VG.) göre

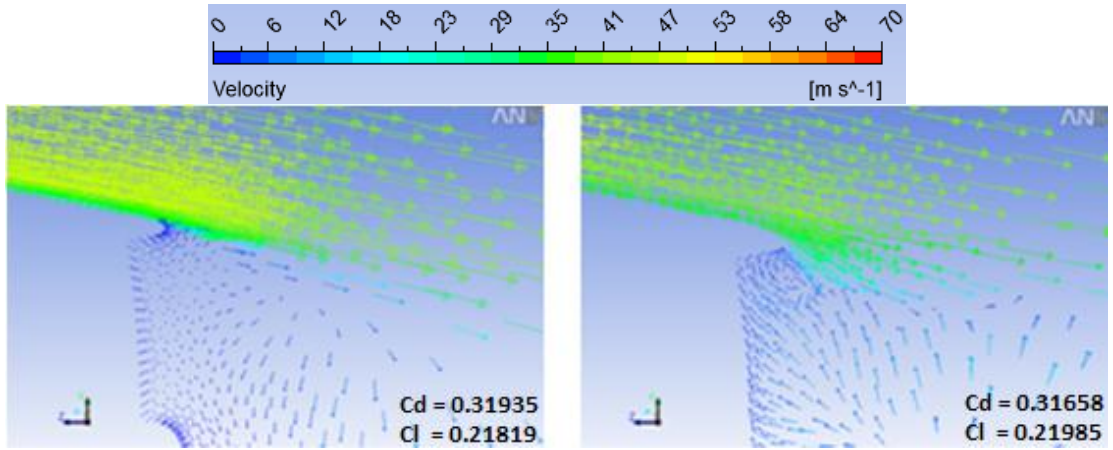
aerodinamik direnç katsayısını azaltma yönünde daha etkili olmasının sebebi delta kanat tipi VG'lerin ön projeksiyon alanlarının daha az olmasıdır.



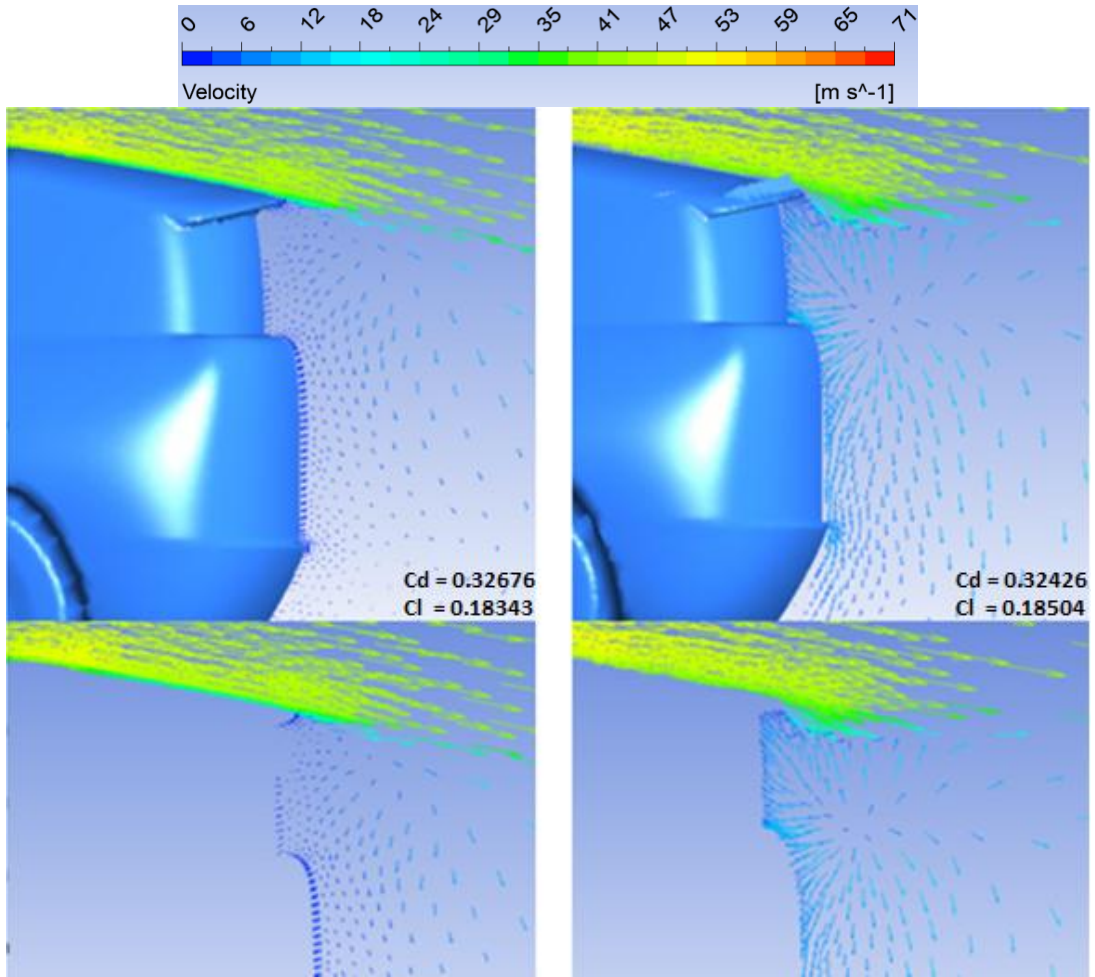
Şekil 5. 50 Taşıt modelinde arka spoyler üzerine yerleştirilen vortex generatörlerinin akış yönüne göre konumu ve boyutları [8]



Şekil 5. 51 Taşıt modelinde arka spoyler üzerine yerleştirilmiş vortex generatörleri



Şekil 5. 52 $\phi = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$, $Z_s/Z_v = 0.05$ ve $e = -30$ mm için için spoyler üzerine eklenen vorteks generatörlerinin C_d ve C_l üzerine etkisi, hız konturları (FLUENT)



Şekil 5. 53 $\phi = 10^\circ$, $\varphi = 35^\circ$, $Z_s/Z_v = 0.05$ ve $e = -60$ mm için için spoyler üzerine eklenen vorteks generatörlerinin C_d ve C_l üzerine etkisi, hız konturları (CFX)

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 2x1.6x4.5 m boyutunda 1/1 ölçekli 22 adet model için 9.5x9.5x49.9 m boyutlarındaki akış alanında 40 m/s akış hızı ile Fluent ve CFX kodu kullanarak toplamda 44 adet analiz gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Taşıt tavan açısının 35° den 10° ye düşürülmesi sonucunda direnç katsayısında Fluent verilerine göre %6.31, CFX verilerine göre %7.26 düşüş, kaldırma katsayısında Fluent verilerine göre %2.2, CFX verilerine göre %3.26 artış meydana geldiği ve 30°-25° aralığında akış ayrılmasının ortadan kaybolmaya başlaması nedeniyle direnç katsayısındaki düşüş oranının daha yüksek olduğu görülmüştür.

- Taşıt ön cam açısının 45° den 35° ye düşürülmesi sonucunda ön cama uygulanan basıncın ve dolayısıyla akış doğrultusunda araca uygulanan kuvvetin azalması sebebiyle direnç katsayısında Fluent verilerine göre %2.94, CFX verilerine göre %6.59 düşüş, akış düzlemine dik doğrultuda ön cama uygulanan basınç azaldığından dolayı kaldırma katsayısında Fluent verilerine göre %9.88, CFX verilerine göre %8.54 artış meydana geldiği belirlenmiştir.

- Akış durma noktası ve yer aralığının yükselmesinin taşıt altına yönlendirilen hava miktarının artmasına neden olduğu ve bu nedenle taşıt arkasında meydana gelen girdap büyüklüklerinin arttığı görülmüştür. Yer aralığının azalmasının taşıt altındaki negatif basıncın artmasına neden olduğu taşıt altında simetri eksenine yerleştirilen bir doğru üzerinden alınan ölçümlerde görülmüştür. Akış durma noktasının 0.2'den 0.05'e indirilmesi direnç katsayısında Fluent verilerine göre %2.91, CFX verilerine göre %2.44 düşüş, kaldırma katsayısında Fluent verilerine göre %9.75, CFX verilerine göre %7.26

artış olduğu, yer aralığının 30 mm azaltılmasının direnç katsayısında Fluent verilerine göre %2.45, CFX verilerine göre %3.07 düşüş, kaldırma katsayısında ise Fluent verilerine göre %10.08, CFX verilerine göre %8.59 artış meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

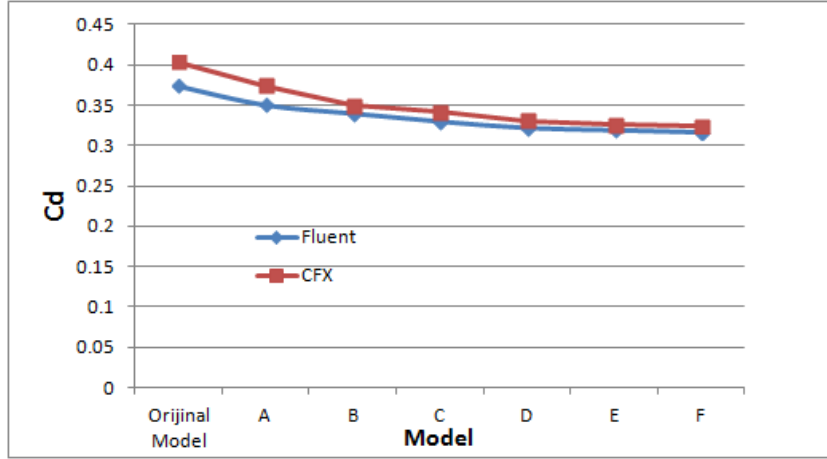
-Taşıt üzerine yerleştirilen arka spoylerin taşıt ard akış izi bölgesini azaltma eğiliminde olduğu bu nedenle direnç katsayısında Fluent verilerine göre %0.85, CFX verilerine göre %1.2 düşüş, kaldırma katsayısında Fluent verilerine göre %0.9, CFX verilerine göre ise %1.49 artış olduğu görülmüştür.

-Arka spoyler üzerine yerleştirilen 26 adet delta kanat tipi vorteks generatörünün tavan bitiminde hava akışını aşağı yönde hızlandırdığı ve ayrışma noktasını aşağı doğru kaydırma eğiliminde olduğu açıkça görülmüştür. Bu uygulamanın direnç katsayısında Fluent verilerine göre %0.87, CFX verilerine göre %0.76 düşüş, kaldırma katsayısında Fluent verilerine göre %0.75, CFX verilerine göre %0.88 artış meydana getirdiği tespit edilmiştir.

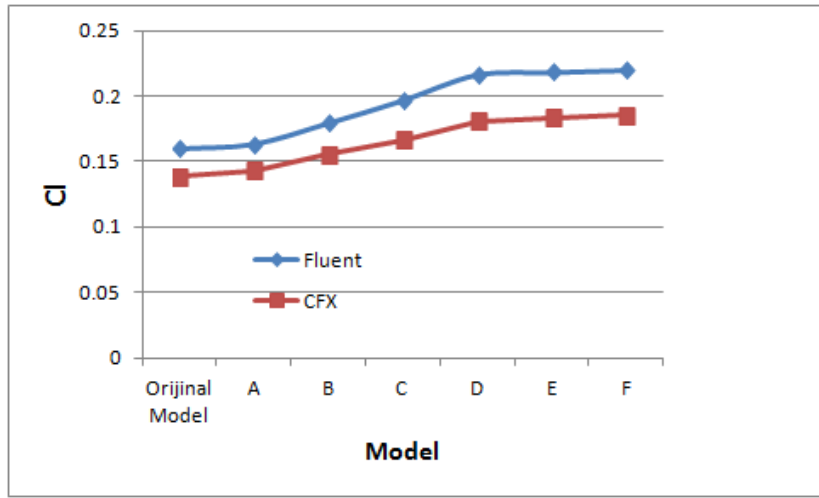
- Elde edilen optimum formun (F modeli) direnç katsayısının orijinal forma göre Fluent verilerine bağlı olarak %15.34, CFX verilerine göre %19.7 düşük olduğu, kaldırma katsayısının ise Fluent verilerine göre %37.95, CFX verilerine göre ise %33.69 fazla olduğu görülmüştür.

Çizelge 6. 1 Taşıt modelleri, özellikleri ve Cd&Cl verileri

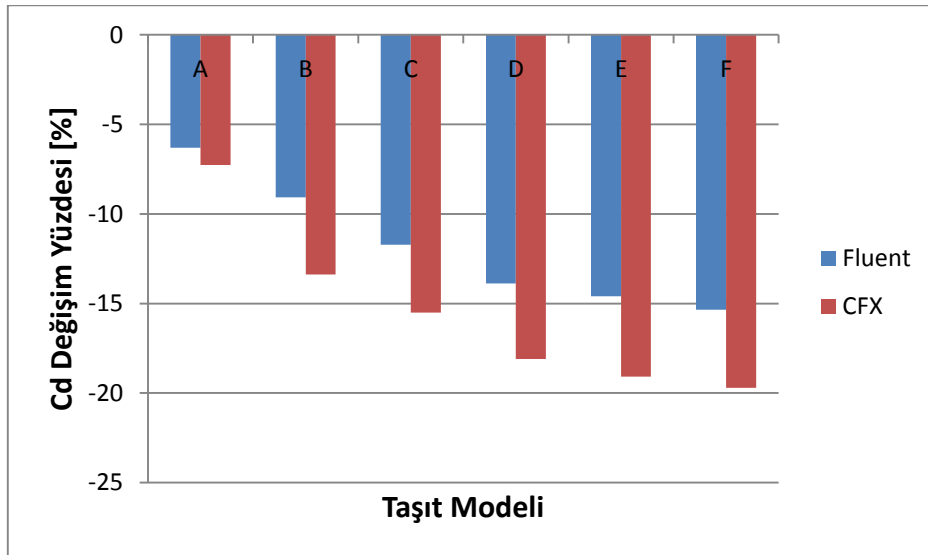
Model	θ [°]	ϕ [°]	Zs/Zv	e[mm]	Spoylar	VG	FLUENT		CFX	
							Cd	Cl	Cd	Cl
Orijinal	35	45	0.2	-	-	-	0.37396	0.15936	0.40383	0.13841
A	10	45	0.2	-	-	-	0.35036	0.16288	0.37448	0.14293
B	10	35	0.2	-	-	-	0.34004	0.17898	0.34977	0.15515
C	10	35	0.05	-	-	-	0.33016	0.19644	0.34122	0.16642
D	10	35	0.05	-30	-	-	0.32207	0.21624	0.33073	0.18072
E	10	35	0.05	-30	var	-	0.31935	0.21819	0.32676	0.18343
F	10	35	0.05	-30	var	var	0.31658	0.21985	0.32426	0.18504



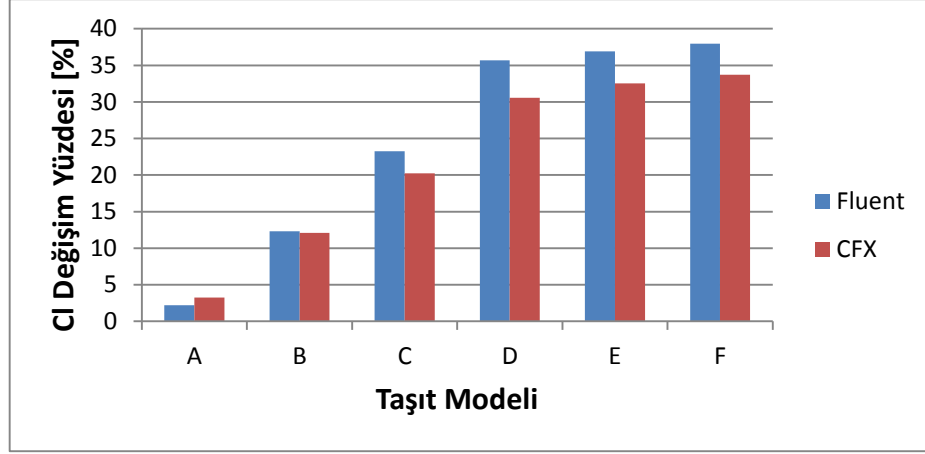
Şekil 6. 1 Optimizasyon sürecindeki Cd değişimi



Şekil 6. 2 Optimizasyon sürecindeki Cl değişimi



Şekil 6. 3 Optimizasyon sürecindeki Cd değişim yüzdesi



Şekil 6. 4 Optimizasyon sürecindeki Cl değişim yüzdesi

- Aerodinamik direnç katsayısı taşıtlarda enerji tüketim seviyesini önemli derecede belirleyen bir unsurdur. Bu kapsamda, aerodinamik optimizasyon sonucunda elde edilen modellerin orijinal modele göre enerji tüketimindeki değişimi incelemek çalışmanın asıl amacını belirleyecektir.

Tasarımı yapılan taşıt modelinin teknik özellikleri;

Kütle : 2300 *kg* (75 *kg* sürücü ağırlığı ve %90 yakıt ağırlığı dahil)

Projeksiyon Alanı (A) : 2.63 m² (D, E ve F modelleri 2.68 m²)

Yuvarlanma Direnci : 0.02

Hız : 40 m/s (144km/h)

Alınan Mesafe : 100 km

Üretilen Maksimum Güç : 140 kw@3500 d/d

ve yakıt enerjisinin yaklaşık %30'unun tekerleklerde faydalı işe dönüştüğü (η : %30) göz önüne alındığında taşıtın durgun halden 40 m/s hıza ulaşması için yapılan iş (3.12) yardımıyla

$$E_1 = \frac{1}{2} x M x V^2$$

$$E_1 = \frac{1}{2} x 2300 x 40^2 = 1840 \text{ kJ olarak hesaplanır.}$$

Bu sırada s kadar yol katedildiğinde yuvarlanma direncine karşı yapılan (kaldırma direnci = 0 kabulüyle) iş (3.13) ile;

$$E_2 = P \times s = W \times f \times s$$

$$E_2 = 22540 \times 0.02 \times 100000 = 45080 \text{ kj}$$

Aynı mesafe için aerodinamik direnç kuvvetine karşı yapılan iş (3.13) yardımıyla;

$$E_3 = R_A s = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D s$$

$$E_3 = 0.5 \times 1.225 \times 40^2 \times 2.63 \times C_D \times 100000 \text{ olarak bulunur.}$$

Buna göre toplam enerji;

$$E_T = \frac{(E_1 + E_2 + E_3)}{\eta} \quad (6.1)$$

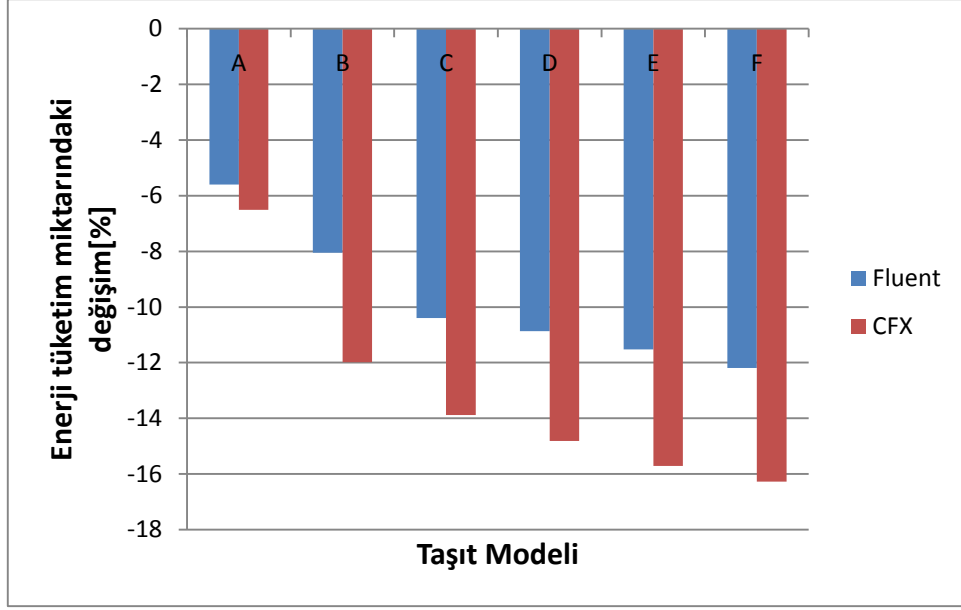
bağıntısından;

$E_T = \frac{(46920 \text{ kj} + E_3)}{0.3}$ olarak bulunur. Analizleri yapılan modeller için Cd değerleri E_3 denkleminde yerine yazıldığında her model için harcanan toplam enerji değerleri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6. 2 40 m/s hız ile 100 km mesafe için harcanan enerji miktarları

Model	Harcanan Toplam Enerji (kJ)	
	Fluent	CFX
Orijinal	361782.966	387423.813
A	341513.853	362216.553
B	332648.363	340983.76
C	324157.73	333635.36
D	322470.953	330028.006
E	320084.606	326549.52
F	317660.55	324363.803

Çizelge 6.2 ve Şekil 6.5’de görüldüğü gibi optimizasyon sonucunda yakıt tüketiminde orijinal modele göre toplamda Fluent verileri ile %12.2, CFX verileri ile %16.3 düşüş olacağı öngörülmüştür. Bu değerlerin direnç katsayısı değişim yüzdeleriyle aynı olması



Şekil 6. 5 Taşıtların modellerinin orijinal forma göre yakıt tüketimindeki değişim yüzdeleri gerekirken D modelinde yer aralığının azalması sonucunda projeksiyon alanı artmış ve bu nedenle toplam yakıt tüketimi değişim yüzdelerinin (Fluent ve CFX için), toplam Cd değişim yüzdelerinden daha düşük olduğu görülmüştür.

Yapılan bu çalışmanın sonucunda elde edilen veriler bir taşıtın formunda aerodinamik bakımdan yapılacak optimizasyonların taşıtın genel yakıt tüketimindeki etkisinin oldukça büyük olduğunu göstermiştir. Analizler için yüksek kapasiteli bilgisayarlar kullanmak ve çözüm ağındaki düzensizliklerin farklı teknikler kullanarak en aza indirilmesi analiz süresini kısaltacak ve en önemlisi sonuçların gerçeğe çok daha yakın olmasını sağlayacaktır. Bu çalışmanın bir sonraki adımında farklı türbülans modellerinin çözüm sonuçlarına etkisinin incelenmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Han, T., Sumantran, V., Haris, C., Kuzmanov, T., Huebler, M. ve Zak, T., (1996). "Flowfield simulations of three simplified vehicle shapes and comparisons with experimental measurements", SAE Technical Paper Series 960678 : 820-835.
- [2] Schenkel, K.F., (1977). "The origins of drag and lift reductions on automobiles with front and rear spoilers", SAE Technical Paper Series, 770389 : 1-11.
- [3] Perzon, S., Janson, J. ve Höglin, L., (1999). "On comparisons between CFD methods and wind tunnel tests on a bluff body", SAE Technical Paper Series, 1999-01-0805:1-11.
- [4] Jindal, S., Khalighi, B. ve Lacarino, K., (2005). "Numerical Investigation of Road Vehicle Aerodynamics Using Immersed Boundary RANS Approach"
- [5] Helgason, E., Hafsteinsson, E. H., (2009). Automatic Shape Optimization of Aerodynamic Properties of Cars, Yüksek Lisans Tezi, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- [6] Favre, T., (2009). Numerical Investigation of Unsteady Crosswind Aerodynamics for Ground Vehicles, Lisans Tezi, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm.
- [7] Bordei, Ş. ve Popescu, F., (2011). "Aerodynamic Results for a Notchback Race Car", Technologies in Machine Building, 5:159-178.
- [8] Koike, M., Nagayoshi T. ve Hamamoto, N., (2004). "Research on Aerodynamic Drag Reduction by Vortex Generators", Mitsubishi Motors Technical Review, 16:11-16.
- [9] Krajnovic, S. ve Davidson, L., (2005). "Influence of floor motions in wind tunnels on the aerodynamics of road vehicles", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 93(9):677-696.
- [10] U.S. Department of Energy, Fuel Economy: Where the Energy Goes, <http://www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml>, 20 Haziran 2013.
- [11] Hilliard, J., (1984). Fuel Economy: in Road Vehicles Powered by Spark Ignition Engines, Nineteenth Edition, Basic Books, NY.

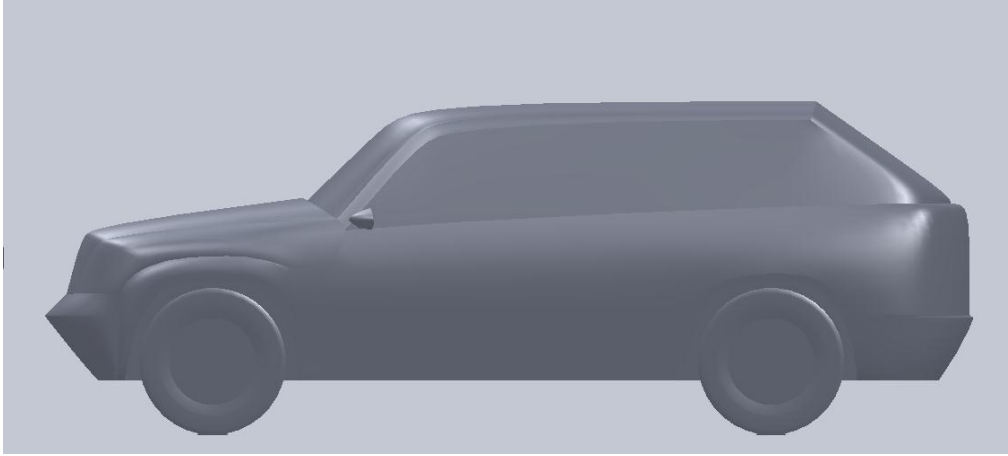
- [12] Heisler, H., (2002)., Advanced Vehicle Technology, Second Edition, Butterworth–Heinemann, Great Britain.
- [13] Car Body Design, Audi Q5 Body Structure, <http://www.carbodydesign.com/archive/2008/07/08-audi-q5/>, 20 Haziran 2013.
- [14] Robert Bosch GmbH, (2002). Electronic Automotive Handbook, 1st Edition,
- [15] Tire types, Tire Classification According to Structure, <http://www.carid.com/images/hankook/info/tire-types-types.html>, 20 Haziran 2013.
- [16] Otomotiv Bilim ve Teknoloji Topluluğu, Buji Ateşlemeli Motorlarda Yakıt Ekonomisinin İyileştirilmesi, http://data.obitet.net/obitet/yakit_ekonomisi/bujili_motorda_yakit_ekonomisi.htm, 20 Haziran 2013.
- [17] BATMAZ, İ., (1993). Araç Bakım-Onarım İşlemlerinde Servis Etkinlik Derecesinin Deneysel Olarak Saptanması, Yüksek Lisans Tezi, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [18] Borat, O., Balcı, M. ve Sürmen, A., (1987). "Benzin Motorlarında Yakıt Ekonomisi", G.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Dergisi, 1:19-38.
- [19] Gillespie, T., (1992). Fundamentals of Vehicle Dynamics, 1st Edition, Society of Automotive Engineers, Inc., PA.
- [20] Autospeed, Aero Testing, <http://www.autospeed.com/cms/article.html?&A=108676>, Haziran 2013.
- [21] Çengel, Y. ve Cimbala, M. J., (2008). Akışkanlar mekaniği : Temelleri ve Uygulamaları, Birinci Baskı, Güven Kitabevi, İzmir.
- [22] Hucho, W. H., (1987). Aerodynamics of Road Vehicles, 1st Edition, Butterworth Heinemann, London.
- [23] İnce, İ. T., (2007). GTD Model İdari Hizmet Pikap Aracının Aerodinamik Analizi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [24] Kramer, C., "Introduction to Aerodynamics," Lecture notes for Short Course 1984-01, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Jan. 1984, 60p.
- [25] National Aeronautics and Space Administration, Aerodynamic Forces, <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/presar.html>, Haziran 2013.
- [26] SAE J670e, (1976). Vehicle Dynamics Terminology, SAE, Warrendale, PA.
- [27] Hucho, W. H., Janssen, L. J. ve Emmelmann, H. J., (1976). "The Optimization of Body Details – A Method for Reducing Aerodynamic Drag of Road Vehicles", SAE Paper No. 760185.
- [28] Smith, J. H., (2002). An Introduction to Modern Vehicle Design, 1st Edition Butterworth Heinemann, Oxford.

- [29] Nakayama, Y., Boucher, R.F., (2000). Introduction to fluid mechanics, 2nd Edition Butterworth Heinemann, London.
- [30] Wong, J.Y., (2001). Theory of Ground Vehicles, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Canada.
- [31] Experimental Aerodynamics, Wind Tunnel Tests on Road Vehicles, <http://www.ltas-aea.ulg.ac.be/cms/uploads/Expaero07.pdf>, 20 Haziran 2013.
- [32] Ground Vehicle Aerodynamics, Flow Field Features and Aerodynamic Drag of Passenger Cars, http://www.grandmarq.net/blaze/Blaze_Pics/AE%20507%20lect%207%20Aero%20Drag%20of%20Autos.pdf, 20 Haziran 2013.
- [33] Sarı, F. M., (2007). Hafif Ticari Taşıtlarda Taşıt Ön Formuna Etkiyen Hava Direncinin Aerodinamik Analizi ve Yakıt Sarfiyatına Etkisi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [34] Versteeg, H. K. ve Malalasekera, W., (2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics, Pearson Education Limited, Glasgow.
- [35] Schlichting, H., (1979). Boundary Layer Theory, 7th Edition, McGraw – Hill, New York.
- [36] Davidson, L., (2011). An Introduction to Turbulence Models, Chalmers University of Technology, Publication 97/2.
- [37] Wilcox, D., (2000). Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries, Inc, California.
- [38] Mazyan, W. I., (2013). Numerical Simulations of Drag-Reducing Devices for Ground Vehicles, Master's Thesis, American University of Sharjah, Sharjah.
- [39] Yakhot, V., (1986). "Renormalization Group Analysis of Turbulence", Journal of Scientific Computing, 1(1):3.
- [40] ANSYS Inch, (2009). Introductory Fluent Training, Inventory #002600, PA.
- [41] Ansys 13 Training Manual.
- [42] Hu, X. ve W, E., (2011). "A Numerical Study On Rear-spoiler Of Passenger Vehicle", World Academy of Science - Engineering and Technology, 57:636-641.
- [43] Bin Che Zake, R., (2008). Aerodynamics of Aftermarket Rear Spoiler, Bachelor's Thesis, Malaysia Pahang University, Pahang.
- [44] Mason, W., Configuration Aerodynamics Lecture Notes: Vortex Generators, www.dept.aoe.vt.edu/~mason/Mason_f/VortexGeneratorsS04.ppt, 20 Haziran 2013.

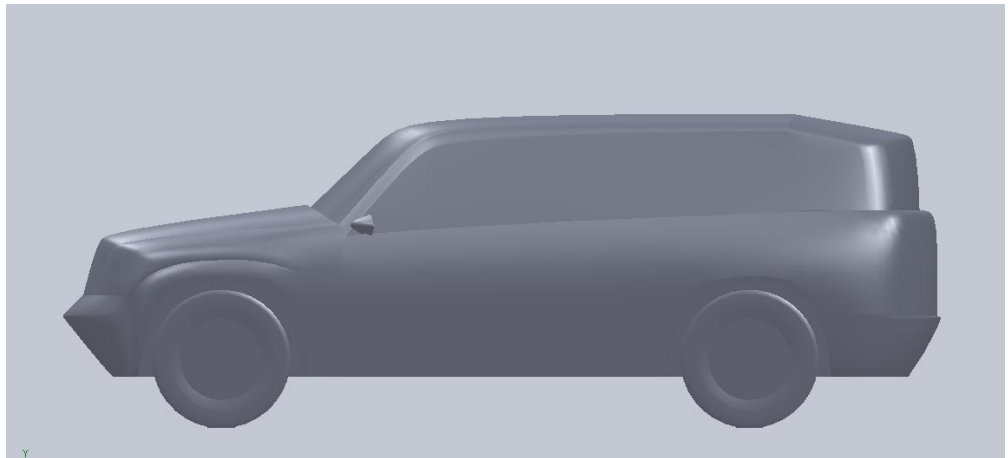
- [45] Science News, Scientists Discover Second Purpose for Vortex Generators, <http://phys.org/news/2012-09-scientists-purpose-vortex.html>, 20 Haziran 2013.

OPTİMİZASYON SÜRECİNDE OLUŞTURULAN TAŞIT MODELLERİ

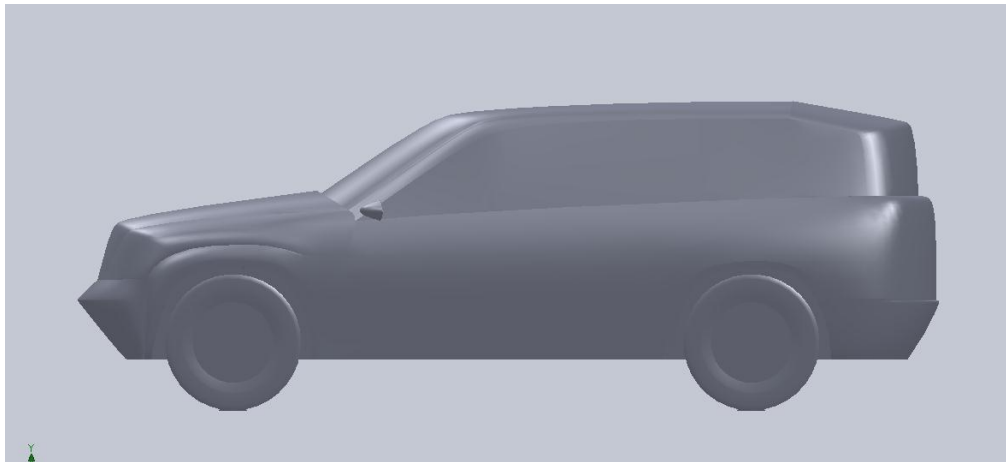
A-1 Orijinal Model



A-2 A Modeli



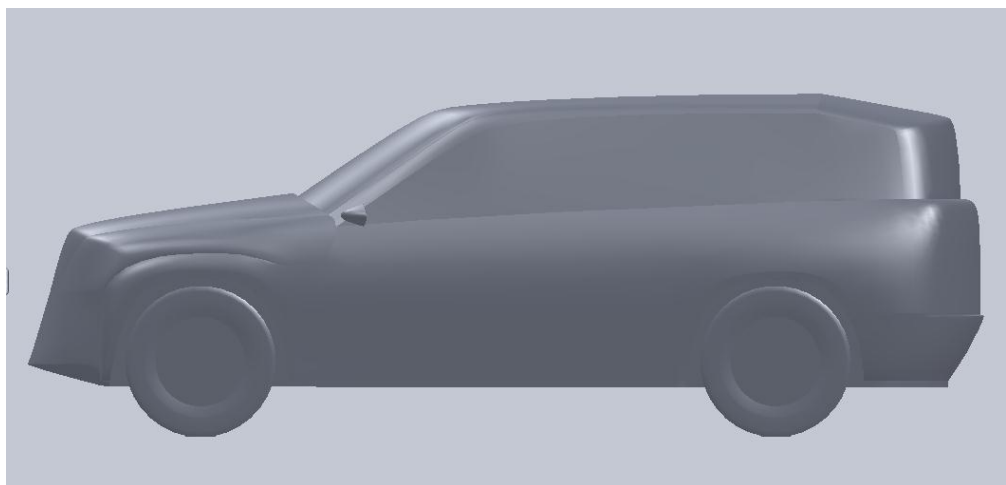
A-3 B Modeli



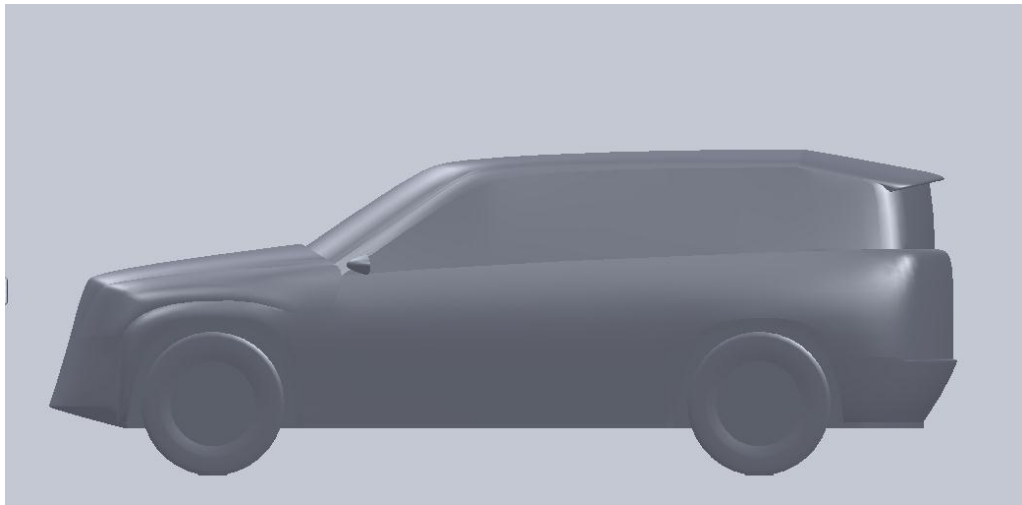
A-4 C Modeli



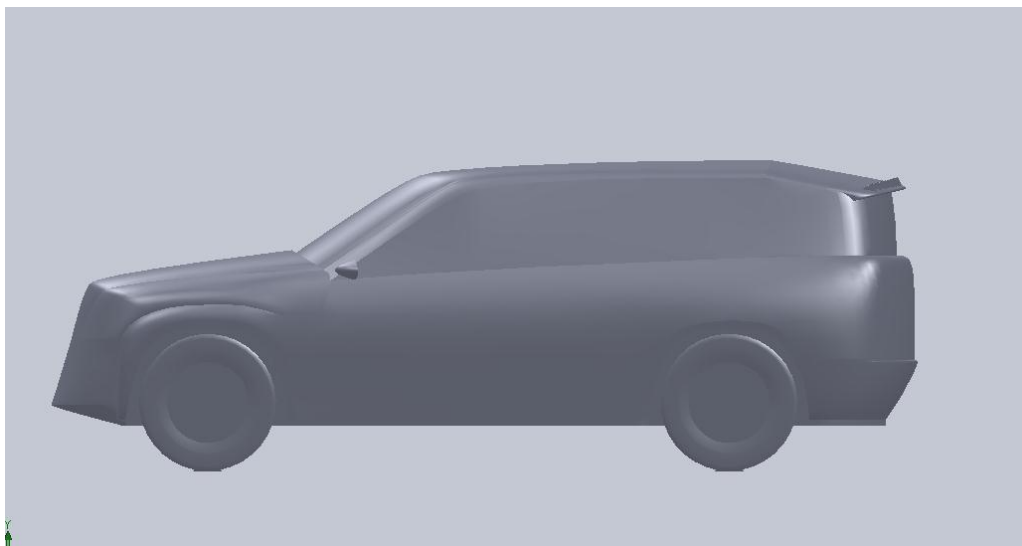
A-5 D Modeli



A-6 E Modeli



A-7 F Modeli (Optimum)



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Volkan AKGÜL
Doğum Tarihi ve Yeri : 15.01.1985 Suluova/AMASYA
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : volkanakgul@bartin.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	
Lisans	Makina Mühendisliği	Dumlupınar Üniversitesi	2008
Lise	Fen Bilimleri	Merzifon Anadolu Lisesi	2003

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2011	Bartın Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2009	KROS Otomotiv San. ve Tic. A.Ş.	Proje Mühendisi(Teknik Ürün Sorumlusu)

