

Hafif Ticari Taşıtlarda  
Taşıt Ön Formuna Etkiyen Hava Direncinin  
Aerodinamik Analizi ve Yakıt Sarfiyatına Etkisi

Fatih Mehmet SARI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz - 2007

The Aerodynamic Analysis Of Air Resistance Affecting The Front Form Of Light  
Commercial vehicles And Its Effect On Fuel Consumption

Fatih Mehmet SARI

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Mechanical Engineering

July 2007

**HAFİF TİCARİ TAŞITLARDA  
TAŞIT ÖN FORMUNA ETKİYEN HAVA DİRENCİNİN  
AERODİNAMİK ANALİZİ ve YAKIT SARFIYATINA ETKİSİ**

Fatih Mehmet SARI

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Enerji Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Kemal TANER  
Prof. Dr. Aydoğan ÖZDAMAR

Temmuz – 2007

Fatih Mehmet SARI' nın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Hafif Ticari Taşıtlarda Taşıt Ön Formuna Etkiyen Hava Direncinin Aerodinamik Analizi ve Yakıt Sarfiyatına Etkisi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye : Prof. Dr. Kemal TANER

Üye : Prof. Dr. Yaşar PANCAR

Üye : Prof. Dr. Soner ALANYALI

Üye : Prof. Dr. Zekeriya ALTAÇ

Üye : Prof. Dr. Ercengiz YILDIRIM

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

Enstitü Müdürü



# **HAFİF TİCARİ TAŞITLARDA TAŞIT ÖN FORMUNA ETKİYEN HAVA DİRENCİNİN AERODİNAMİK ANALİZİ ve YAKIT SARFIYATINA ETKİSİ**

**FATİH MEHMET SARI**

## **ÖZET**

Bu çalışmada, hafif ticari araçların aerodinamik incelemesi yapılmıştır. Bununla ilgili olarak, araç ön formuna etkiyen hava direnci ve bunun yakıt sarfiyatına etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Bunun için, Renault-Kangoo marka hafif ticari araç modellenmiş, nümerik yaklaşık çözüm yöntemi olan sonlu hacimler yöntemi ile fluent programında analiz edilerek, sanal koşullarda aracın ön formuna etkiyen hava direnci ve  $C_D$  direnç katsayıları bulunmuş, bu verilerin yakıt sarfiyatına olan etkileri araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Taşıt aerodinamiği, yakıt sarfiyatı.

**THE AERODYNAMIC ANALYSIS OF AIR RESISTANCE AFFECTING THE  
FRONT FORM OF LIGHT COMMERCIAL VEHICLES AND ITS EFFECT ON  
FUEL CONSUMPTION**

**FATIH MEHMET SARI**

**SUMMARY**

In this study, the aerodynamic analysis of light commercial vehicles was done. Regarding this, the air resistance affecting the front form of the vehicle and its effect on fuel consumption was analyzed particularly.

For this purpose, Renault's light commercial vehicle 'Kangoo' was modelled. The air resistance affecting the front form of the vehicle in virtual conditions and the  $C_D$  resistance constants was found by analyzing in fluent program with an approximate solution 'finite volume method' , and the effects of these data on fuel consumption was searched.

Keywords : Vehicle aerodynamic, fuel consumption.

## TEŞEKKÜR

“Hafif Ticari Taşıtlarda Taşıt Ön Formuna Etkiyen Hava Direncinin Aerodinamik Analizi ve Yakıt Sarfiyatına Etkisi” başlıklı tez çalışmamda, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan hocalarım Prof.Dr. Kemal TANER’e, Prof.Dr.Aydoğan ÖZDAMAR’a, Araş.Gör.Utku ŞENTÜRK’e teşekkürlerimi sunarım.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	iv
<b>SUMMARY</b> .....	v
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	vi
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	x
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xiv
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xv
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. TAŞIT AERODİNAMİĞİNİN TARİHÇESİ ve KONUyla İLGİLİ</b>	
<b>YAPILAN ÇALIŞMALAR</b> .....	3
2.1 Temel Şekiller.....	4
2.2 Aerodinamik Şekil Devri.....	5
2.3 Otomobile Etkiyen Dirençler ve Taşıt Aerodinamiği.....	12
2.3.1 Yuvarlanma Direnci.....	13
2.3.2 Yokuş Direnci.....	14
2.3.3 Römork Direnci.....	15
2.3.4 Atalet Direnci.....	15
2.3.5 Aktarma Organları Direnci.....	15
2.3.6 Aerodinamik Direnç.....	16
2.3.6.1 Aerodinamik Kuvvetin Performansa Etkisi.....	22
2.3.6.2 Aerodinamik Kuvvetin Araç Maksimum Hızına Etkisi.....	26
2.3.6.3 Aerodinamik Direncin Yakıt Tüketimine Etkisi.....	27
2.4 Hava Direnç Katsayısını Azaltmak İçin Yapılan Çalışmalar.....	30
2.4.1 Taşıt Ön Formunda Aerodinamik Direnci Düşürmeye Yönelik Yapılan Çalışmalar.....	32

## İÇİNDEKİLER (Devam)

	<u>Sayfa</u>
<b>3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ.....</b>	<b>39</b>
3.1.Diferansiyel Denklemler.....	41
3.1.1 Normal Diferansiyel Denklemler.....	41
3.1.2 Kısmi Diferansiyel Denklemler.....	42
3.1.3 Navier-Stokes Denklemleri.....	42
3.2 Gerçek Türev.....	43
3.3 Korunum Kanunları .....	43
3.4 Süreklilik Denklemi.....	45
3.5 Momentum Korunumu.....	45
3.6 Denklemlerin Elde Edilişi.....	46
3.6.1 Denklemlerin Özel Formları.....	47
3.7 CFD Hesaplamasının Temel Adımları.....	53
3.7.1 Üç Boyutlu Ağ Yapısının Oluşturulması.....	53
3.7.2 Lineer CFD Metodu.....	55
3.7.3 Lineer Olmayan CFD Metodu.1.....	55
3.7.3.1 Sonlu Hacimler Metodu.....	57
3.7.4 Modelleme ve Analiz.....	58
3.7.5 Katı Modelin Oluşturulması.....	58
3.7.6 Mesh Oluşturulması ve Sınır Koşulların Belirlenmesi.....	59
3.8 Fluent ile Analiz.....	64
<b>4. SONLU HACİMLER YÖNTEMİ ile ANALİZ.....</b>	<b>74</b>
4.1 Modeller.....	74
4.1.1 Ön Cam Form Değişiklikleri.....	74
4.1.2 Kaput Form Değişiklikleri.....	74
4.2 Gambit’de Modelleme.....	76
4.3 Problemin Oluşturulması.....	80
4.4 Ticari Aracın Fluent’te Analizi.....	80

**İÇİNDEKİLER (Devam)**

	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>5. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME.....</b>	90
5.1 Analiz Sonuçları.....	90
5.1.1 Ön Cam Formları.....	90
5.1.2 Kaput Formları.....	92
5.2 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	95
<b>6. KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>	99
<b>EKLER.....</b>	100
EK-1 Taşıt Ön Camına Etkiyen Direnç Kuvvetlerinin Fluent Çıktıları	
EK-2 Taşıt Kaputuna Etkiyen Direnç Kuvvetlerinin Fluent Çıktıları	

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Otomobil Aerodinamiğinin Tarihsel Gelişimi.....	4
2.2 CAMILLE JENATZY,Tarafından 1899 Yılında Yapılan Rekor Kıran Araba , Max.Hız:105.9 km/h.....	4
2.3 COUNT RICOTTI'nin Alfa-Romeo' Damla Modelinde1914.....	5
2.4 Boat-Tailed "Audi Alpensieger" 1913.....	5
2.5 Şekil Hareket Halinde ki Abranın Arkasında ki Toz akımının Ruml ArabasıylaKarşılaştırılması.....	6
2.6 Rüzgar Tünelinde Rumplerin "teardrop" Arabası 1922.....	6
2.8 "Half-Body" Modeline Göre Aerodinamik direnç Katsayısının Değişimi.....	7
2.9 JARAY ve KAMM kombinasyonları Modelleri ve Hava Direnç Katsayıları.....	8
2.10 Jaray Arabasında Aerodinamik Direnç katsayısının Taşıt İzdüşüm Alanı İle İncelenmesi Modeller 1:10.....	8
2.11 Otomobil Ön ve arka Formlarının Direnç Kuvveti Katsayısına Etkisi.....	9
2.12 1930 'lu Yıllarda Amerika Birleşik Devletleri'nde Otomobil Aerodinamiğinin Durumu.....	9
2.13 1950 den 1977 yılına PORSHE Otomobilleri.....	10
2.14 1955 den 1982 ye CİTROEN Otomobilleri.....	10
2.15 Avrupa 'da seri üretilen ford otomobillerinin direnç kuvveti katsayılar.....	11
2.16 Yüksek hızla giden bir araçla yapılan deneylerin sonuçları.....	11
2.17 Eğimli bir yolda ilerleyen araca etki eden $F_{St}$ yokuş direnci.....	13
2.18 Rüzgar tüneline araç üzerinde ki akış şeklinin belirlenmesi için yapılan deney.....	14
2.19 Basınç merkezi ve ağırlık merkezinin konumları.....	17

**ŞEKİLLER DİZİNİ ( devam )**

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.20 Taşıt Üzerinde Eksenlerin Yerleşimi ve Eksenlere Göre Momentler.....	19
2.21 Taşıt Ön Kesit Alanının Tanımı.....	21
2.22 Yuvarlanma Direnç Güç ve Aerodinamik Direnç Güç Eğrileri.....	22
2.23 Motor Gücü ve Aerodinamik Güç Eğrilerinin Kesiştirilmesi.....	25
2.25 Otomobil ön formuna göre dikine gerçek dağılımlı akım için ve ideal akım için basınç dağılımı.....	32
2.26 Taşıt ön formunda keskin köşe ve yuvarlatılmış köşenin $C_D$ 'ye etkisi.....	33
2.27 Dikine Kesite Basınç Dağılımı.....	34
2.28 Basınç Dağılımını etkileyen ve taşıt ön formunu oluşturan tampon ve spoiler hariç parametreler.....	34
2.29 Dikdörtgenler prizması formundaki şeklin aerodinamik direncinin köşe yarıçaplarıyla değişimi.....	35
2.30 Direnç Kuvveti Katsayısının Otomobil Ön Formuyla Değişimi.....	36
2.31 Otomobil ön formunda ki değişikliklerin $C_D$ değişimine etkisi.....	37
2.32 Volkswagen Golf otomobilinin ön tarafının optimizasyonu.....	38
2.33 Volkswagen Golf otomobilinin ön tarafının optimizasyonu.....	38
3.1 Direnç katsayısına göre rüzgar tüneli test saatlerinin değişim süreci.....	40
3.2 CFD hesaplamasının temel adımları.....	53
3.3 Otomobil yüzeyinde ağ yapısı oluşturulmuş.....	54
3.4 Otomobilin sınır tabakayla birlikte uzaysal ağ yapısının Euler veya Navier-Stokes yöntemlerine göre hesaplanması.....	54
3.5 VW üretimi otomobilin kaput panelinin hava yüklemesi yapıp panel yöntemiyle deformasyon miktarı Nastranda incelenmiştir.....	55
3.6 İki boyutlu akış için sonlu hacimler uygulaması.....	57
3.7 Aracın Catia programındaki katı modelinin bitmiş hali.....	59

## ŞEKİLLER DİZİNİ ( devam )

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
3.8	Gambit açılış penceresi..... 60
3.9	IGS formatında kaydedilen modelin import edilmesi..... 61
3.10	Taşıtın bulunduğu ortamın modelinin gambit'te oluşturulması..... 62
3.11	Subtract komutunun kullanılması ile iki hacmin ayrılması..... 62
3.12	Yüzey ağ yapısının oluşturulması yapılması..... 63
3.13	Hacmin türünün belirlenmesi..... 64
3.14	Fluent açılış seçenekleri..... 64
3.15	Modelin ölçülendirilmesi..... 65
3.16	Modelin görüntülenmesi..... 66
3.17	Grid görünümü..... 66
3.18	Akış modellerinin seçilmesi..... 67
3.19	Materials özellikleri..... 67
3.20	Operasyon koşullarının tanımlanması..... 68
3.21	Sınır koşulları..... 68
3.22	Initialize özellikleri..... 69
3.23	İterasyon özellikleri..... 69
3.24	İterasyon sonucunda elde edilen veriler..... 70
3.25	Çözüm kontrolü..... 70
3.26	Koordinat düzleminde sonuçların gösterimi..... 71
3.27	Y düzlemindeki türbülans değişimi..... 71
3.28	Vektörel gösterim..... 72
3.29	Hız vektörlerinin gösterimi..... 72
3.30	Statik basınç bölgelerinin gösterimi..... 73
4.1	Catia programında modellenen Renault-Kangoo..... 75
4.2a	Ön cam açısı 60 <sup>0</sup> olan model..... 75
4.2b	Ön cam açısı 40 <sup>0</sup> olan model..... 75
4.3a	Kaput açısı 15 derece olan taşıt modeli..... 76
4.3b	Kaput açısı 0 derece olan..... 76

## ŞEKİLLER DİZİNİ ( devam )

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.4	Gambit'e import edilen taşıt modeli..... 77
4.5	Taşıt etrafını saran havanın modellenmesi..... 77
4.6	Akışkan hacminden taşıt hacminin çıkarılması..... 78
4.7	Meshing işlemi yapılmış taşıt..... 79
4.8	Sınır şartlarının tanımlanması..... 79
4.9	Subtract komutunun kullanılması ile iki hacmin ayrılması..... 80
4.10	Model cm olarak ölçülendirilir..... 81
4.11	Solver özellikleri..... 82
4.12	Akış modelinin seçilmesi..... 82
4.13	Materials özelliklerinin tespiti..... 83
4.14	Operasyon koşulları..... 84
4.15	Sınır koşullarının belirlenmesi..... 85
4.16	Giriş ve çıkış zone değerlerinin set edilmesi..... 85
4.17	Çözümleme kontrol menüsü..... 86
4.18	Çözümleme başlangıç değerlerinin girişi..... 86
4.19	İterasyon başlangıç ekranı..... 87
4.20	Display contours..... 87
4.21	Force Report..... 88
4.22	Analiz sonucu taşıta etkiyen kuvvetlerin çıktısı..... 88
4.23	Otomobil, simetri yüzeyi, velocity-inlet, pressure outlet ve alt yüzeyi.... 89
5.1	$C_D$ nin ön cam açısı ile değişimi..... 91
5.2.a	60° lik Ön cam açısına sahip taşıta etkiyen hava direnci..... 92
5.2.b	20° lik Ön cam açısına sahip taşıta etkiyen hava direnci..... 92
5.3	$C_d$ nin kaput açısı ile değişimi..... 93
5.4.a	0° lik kaput açısına sahip taşıta etkiyen hava direnci..... 94
5.4.b	20° lik kaput açısına sahip taşıta etkiyen hava direnci..... 94
5.5	Renault-Kangoo orijinal ölçüleri..... 97

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

<b><u>Çizelge</u></b>		<b><u>Sayfa</u></b>
5.1	Taşıt Ön cam formuna göre değişen direnç kuvveti ve $C_D$ .....	90
5.2	Taşıt kaput formuna göre değişen direnç kuvvetleri ve $C_D$ .....	93



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Taşıt ön İzdüşüm Alanı ( $m^2$ )
B	Yakıt Tüketimi(L/100km)
$C_D$	Aerodinamik direnç katsayısı
$C_L$	Aerodinamik kaldırma katsayısı
$C_Y$ :	Aerodinamik yan kuvvet katsayısı
$C_M$	Birimsiz baş sallama momenti katsayısı
$C_N$	Birimsiz devrilme momenti katsayısı
D	Aerodinamik Direnç (N)
$D_F$	Sürtünme Direnci (N)
$D_P$	Basınç direnci (N)
$D_a$	Aerodinamik çeki kuvveti (N)
$E_T$	Toplam Enerji (Joule)
I	Intensity (%)
h	Saat
L	Taşıtın karakteristik uzunluğu (m)
M	Taşıt kütlesi (kg)
Nu	Nuselt Sayısı
$\rho$	Hava Yoğunluğu( $kg/m^3$ )
Re	Boyutsuz Reynold Sayısı
$L_a$	Aerodinamik kaldırma kuvveti,
$Q_A$	Aerodinamik Yuvarlanma Momenti
$\mu$	Vizkozite ( $Ns/m^2$ )
P	Atmosferik Basınç (atm)
q	Dinamik Basınç (Pascal)

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
V	Taşıt hızı (m/sn)
$Y_a$	Aerodinamik kuvvetin yan bileşeni, (N)
$\eta$	Verim
P	Tensör
<b><u>Kısaltmalar</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
TÜİK.	Türkiye İstatistik Kurumu
CFD	Computational Fluid Dynamics
NS	Navier Stroke
SE	Sonlu Elemanlar
cm	Santimetre
dk	Dakika
et al	Ve diğerleri
g	Gram
L	Litre
ln	Doğal logaritma
s	saniye
m	Metre
mg	Miligram
mm	Milimetre
$\mu\text{m}$	Mikrometre
vb.	Ve benzerleri
vd.	Ve diğerleri

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Karasal taşıtlar; günümüzde insanoğlunun vazgeçilmezleri arasındadır. Ulaşım, ticarete, sağlıkta, vb. hemen hemen hayatın her alanında kullanılan taşıtlar; insanoğluna sunduğu hizmetlerin yanında, ekonomik alanda önemli ölçüde yükler de getirmektedir. Bu yükler, bireysel sorunlar halinden çıkıp, Türkiye gibi dışarıdan enerji ithal eden ülkeler için öncelikli sorun haline almıştır. Bu konuda, ülkeler, enerji ihtiyaçlarını karşılamak için savaştan dahi çekinmemektedirler. Ülkeler için bu kadar önemli bir konuda enerji tasarrufu, öncelikli konuların başındadır. Her ülke enerji sarfiyatını mümkün olduğunca minimize etmeye çalışmaktadır. Çünkü, petrol fiyatlarında ki artış ülke ekonomisini doğrudan olumsuz olarak etkilemektedir.

Türkiye’de petrol sarfiyatının büyük bir kısmı; karasal taşıtlardan(otomobil, kamyon, otobüs, vb.) kaynaklanmaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre, 31.3.2007 itibariyle trafikteki motorlu araç sayısı 12 milyon 297 bin 784’e ulaşmıştır Ocak ayında trafiğe kaydı yapılan toplam 80 bin 561 taşıt içinde otomobil yüzde 43.4 pay ile ilk sırada yer aldı. Otomobili yüzde 28.7 ile kamyonet, yüzde 13.1 ile motosiklet, yüzde 6.1 ile kamyon izledi. Ocak ayında trafiğe kaydolan araçların yüzde 8.7’sini ise minibüs, otobüs, traktör ve özel amaçlı taşıtlar oluşturdu.

Bu değerler giderek artmaktadır. Doğal olarak araç sayısının artmasıyla orantılı olarak ülke içinde ki yakıt sarfiyatı artmaktadır. Bu sarfiyatı azaltmanın yöntemlerini kısaca sıralayacak olursak, gereksiz araç kullanımının azaltılması, daha çok toplu taşıma yöntemlerinin kullanılması, taşıtların gerek motor gerekse gövde olarak yakıt sarfiyatını azaltacak şekilde tasarlanması vb. gibi yöntemler mevcuttur. Bu çalışmada özellikle gövde dış formunun yakıt sarfiyatı, dolayısıyla enerji sarfiyatı üzerine etkisi örnek bir ticari araç modeliyle(Renault-Kangoo) incelenmektedir.

İstenilen bu performans artırımları ve yakıt sarfiyatını minimize etmenin yolu taşıt üzerine gelen dirençleri azaltmaktır. Bu dirençlerden yokuş direnci ile oynamamızın imkanı yoktur ama diğer tüm dirençleri azaltmanın yolları bulunmaktadır. Bu dirençleri azaltmanın yolu bu dirençlerin taşıt performansı üzerindeki etkilerini iyi bilmektir.

Projede, bu dirençlerin hepsinden bahsedilmiş, fakat aerodinamik dirençten, konu itibarıyla daha detaylı inceleme yapılmış ve yakıt sarfiyatına olan etkilerini daha iyi gösterebilmek için geçmişten günümüze benzer çalışmaların verileri, şekil ve fotoğraflarla verilmiştir.

Çalışma da ilk olarak taşıt aerodinamiğinin tarihsel, gelişimi, Aerodinamik dirençler ve yakıt sarfiyatına etkisi, uygulamaları incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan diferansiyel denklem, sonlu hacimler yöntemi, CFD(hesaplamalı akışkanlar dinamiği), uygulamaları ve Fluent programı hakkında bilgiler yer almaktadır.

Türkiye’de çok kullanılan hafif ticari araç sınıfına giren Renault-kangoo ticari aracı Catia programında; taşıt ön formu değiştirilerek çeşitli modelleri oluşturulmuştur..Bu formlar aracın ön kaput ve ön cam formlarıdır. Bu formlara göre CFD(hesaplamalı akışkanlar dinamiği) yöntemiyle aracın üzerine etkileyen hava direnci Fluent programı kullanılarak hesaplanmıştır. Bu araç formlarından elde ettiğimiz veriler üzerinden yorum yapıp benzer ticari araçlar için en az enerji sarfiyatına sahip araç modeli uygulamaları için öneriler getirilmiştir.

## BÖLÜM 2

### TAŞIT AERODİNAMİĞİNİN TARİHÇESİ ve KONUyla İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Aerodinamik ve taşıt teknolojisi, tarih sürecinde birkaç başarılı denemeden sonra bir araya gelmiştir. Bu durum, gerçek anlamda bir sürprizdi. Çünkü, akışkanlar mekaniği, bu bilim dalını verimli bir şekilde kullanan gemi ve uçak tasarımcılarının alanı olarak bilinirdi. Aerodinamik, doğrudan bu alanlarla ilgili olduğu için, uçak ve gemi tasarımcıları bu konuda çok daha iyi durumdaydılar ve kendileri için en iyi model olabilecek kuş ve balık şekillerini tasarımlarında rahatça kullanabiliyorlardı. Doğadan elde ettikleri bu şekillerden, kendileri için gerekli birçok özellik çıkarabiliyorlardı. Fakat, kara taşıtları için benzer bir doğal model yoktu. Bu yüzden, otomobil tasarımcıları tasarımlarında gemi ve uçak şekillerini kullanmaya çalıştılar. Fakat kısa bir süre sonra yaklaşımlarının yanlış olduğunun farkına vardılar. Bu uygunsuz yaklaşımlardan uzaklaşmalarıyla otomobil aerodinamiği ileri doğru bir ivme kazandı (Hucho, 1998).

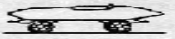
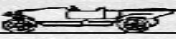


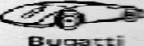










İlk zamanlarda otomobiller çok yavaşlardı. Kötü yollarda aerodinamik şekilli otomobiller oldukça komik görünmekteydiler. Geleneksel atlı arabalar şoför ve yolcuları, rüzgar, çamur ve yağmurdan korumayı çok güzel bir şekilde başarıyorlardı (Hucho, 1998).

Taşıtların aerodinamiğinin tarihsel gelişimi, Şekil 2.1 üzerinde özetlenebilir. Burada, dört periyoda ayrılmış otomobil modelleri görülmektedir. Bu dört periyotta, akışkanlar mekaniğinin etkilerinin zaman içerisinde anlaşılacak taşıtların aerodinamiğinde kullanılmaya başlandığını görülebilir (Hucho, 1998).

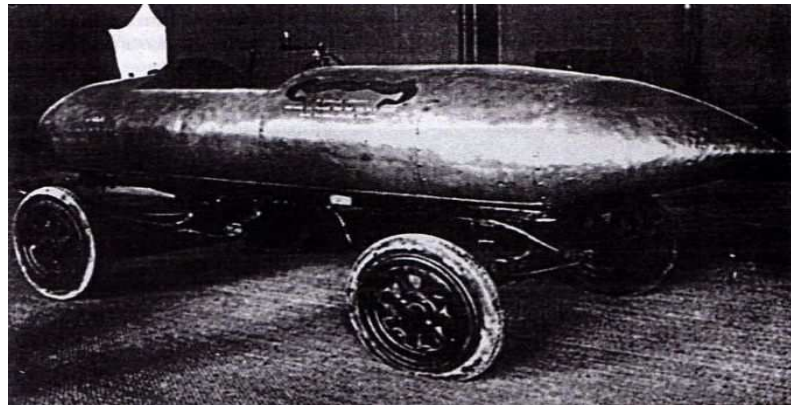
Şekil 2.1'deki ilk iki periyot, kişisel uygulamalar olup, otomotiv endüstrisinden gelmemektedir. Buradaki uygulamalarda, temel havacılık aerodinamik prensiplerinin otomobillere uygulandığı görülür. Son iki periyotta ise, taşıtların aerodinamiği prensiplerini disiplinli bir şekilde uygulayan otomotiv endüstrisindeki firmalar ön plana çıkmaktadır (Hucho, 1998).

## 2.1 Temel Şekiller

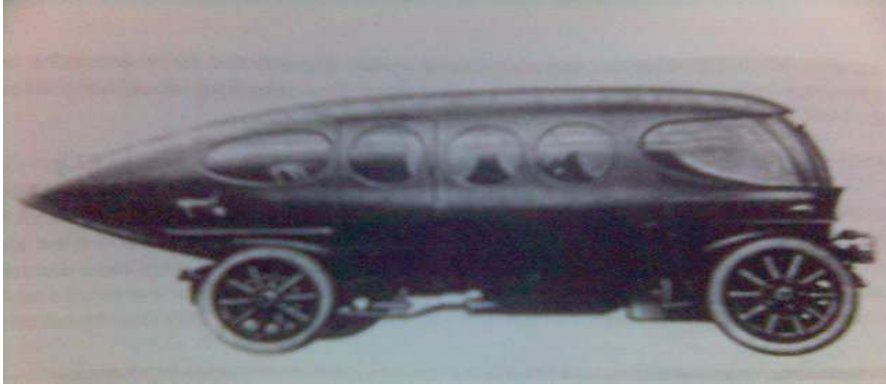
Bu kısımdaki modeller, ilk otomobil dizaynları olup, deniz ve hava taşıtlarına benzetilerek hava direncinin önüne geçileceği düşünülmüştür. Şekil 2.2 , Şekil 2.3 ve Şekil2.4, bu uygulamalara örnektir

TEMEL ŞEKİLLER	1900 to 1925	 Torpedo	 Boat tail	 Air ship	
	ANŞI MODELLİ OTOMOBİLLER	1921 to 1923	 Rumpler	 Bugatti	
1922 to 1939		 Jaray			
1934 to 1939		 Kamm	 Schlör		
Since 1935		 Citroën	 NSU-Ro 80		
DİYETİ OPTİMİZASYONU	Since 1974	 VW-Scirocco I	 VW-Golf I		
	ŞEİL OPTİMİZASYONU	Since 1983	 Audi 100 III	 Ford Sierra	

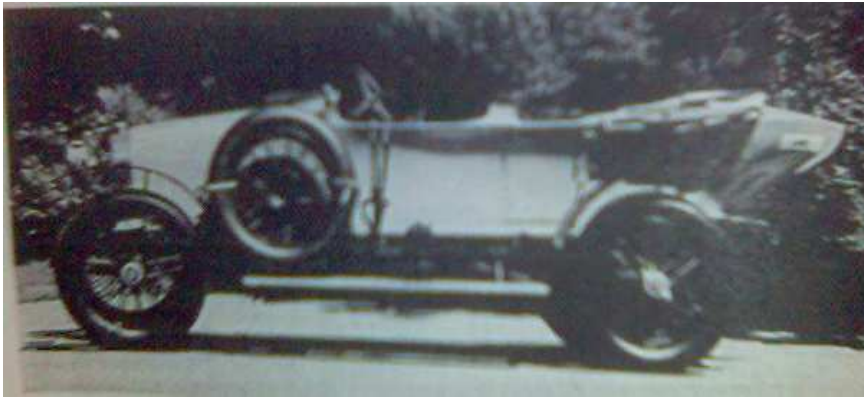
Şekil 2.1 Otomobil aerodinamiğinin tarihsel gelişimi (Hucho, 1998)



Şekil 2.2 CAMILLE JENATZY, tarafından 1899 yılında yapılan rekor kıran araba , max.hız:105,9 km/h (Hucho, 1998)



Şekil 2.3 COUNT RICOTTI'nin damla modelinde Alfa-Romeo'su (1914)  
(Hucho, 1998)



Şekil 2.4 Boat-Tailed "Audi Alpensieger" (1913) (Hucho, 1998)

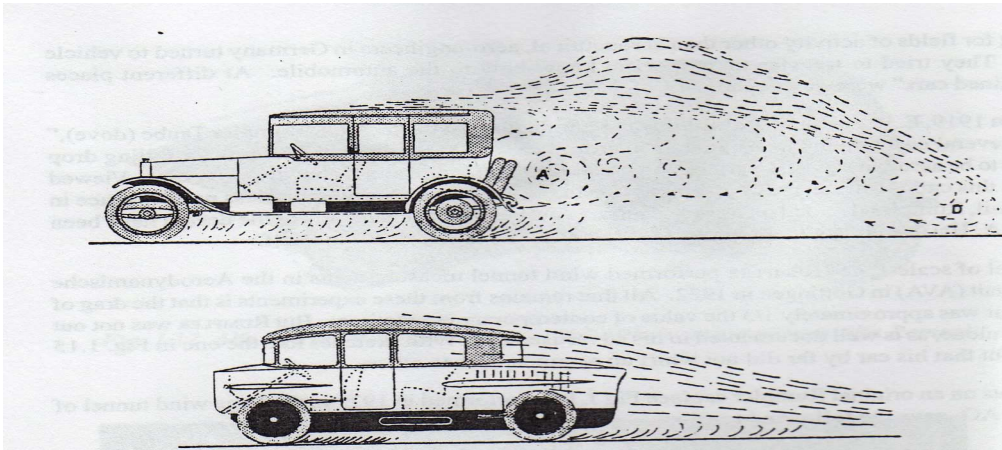
## 2.2 Aerodinamik Şekil Devri

Sezgisel yaklaşımla özellikle 1.Dünya savaşından sonra geliştirilen aerodinamik taşıtların başlangıç dönemini oluşturur. Bu dönemde taşıtlara etkiyen dirençlerden aerodinamik direncin önemi anlaşılmış ve tanımlanmıştır. Elde edilen veriler ışığında aerodinamik direnci yenebilecek tasarımlar yapılmıştır.

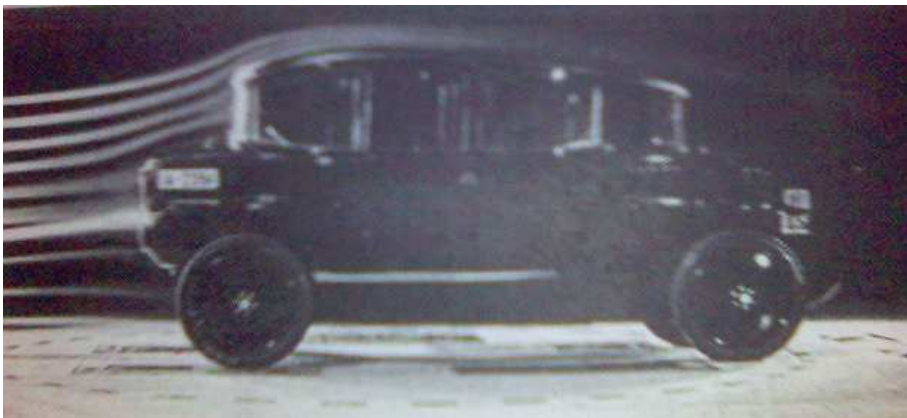
Bunlardan bir tanesi RUMPLER 'ın "Teardrop" arabasıdır. Şekil 2.5 ve Şekil 2.6 görüldüğü üzere otomobil kanat formundadır.

Böylece aerodinamik direnci azaltmaya çalışmıştır. 1979 yılında Volkswagen' in büyük rüzgar tüneline yapılan çalışmada Rumpler arabasından elde edilen sonuçlar;

Direnç Katsayısı  $C_d=0,28$  ; İzdüşüm Alanı  $A=2,57 \text{ m}^2$  olarak bulunmuştur (Hucho, 1998).



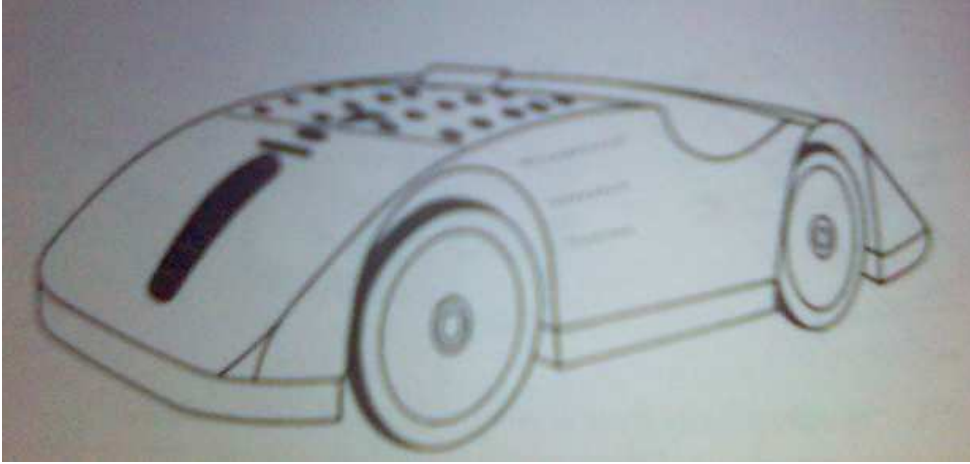
Şekil 2.5 Hareket halindeki arabanın arkasındaki toz akımının Rumpler arabasıyla karşılaştırılması (Hucho, 1998)



Şekil 2.6 Rüzgar tüneline Rumplerin "teardrop" arabası (1922) (Hucho, 1998)

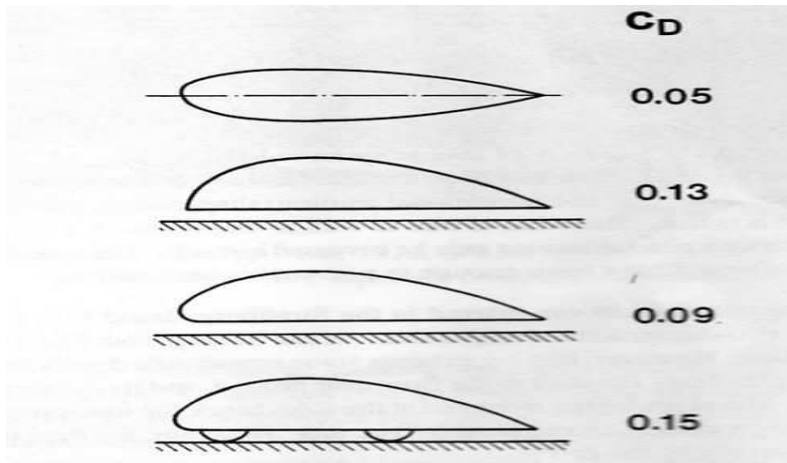


1923 yılında iki boyutlu dizayn şartlarına göre tasarlanan Bugatti otomobili Şekil 2.7 Strasbrurg Grand Prix'ine katıldı. Otomobil yandan görünüşe göre uçağı andırırsa da , dikkate değer bir şekilde düşük hava direncine maruz kalıyordu. Bu otomobil günümüz yarış arabalarına görünüm ve model itibariyle öncülük etmiştir. (Hucho, 1998)



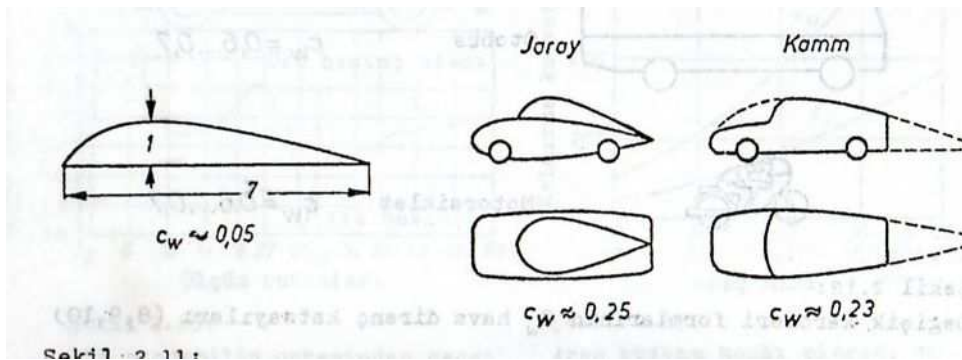
Şekil 2.7 Grand-Prix yarış arabası E.BUGATTI,(1923) (Hucho, 1998)

Bugatti'nin bu arabası "Streamline" otomobiller olarak adlandırılan arabalar üzerinde çalışmaları hızlandırmış yeni yaklaşımlara yol açmıştır. Bu konuyla ilgili W.KELEMPERER[1.31] yaptığı çalışmalarda kanat formunu baz alarak aerodinamik direnci hesaplayabileceği modeller oluşturmuştur. Buna göre Şekil 2.8'de  $C_D$  azalışı görülmektedir. (Hucho, 1998)

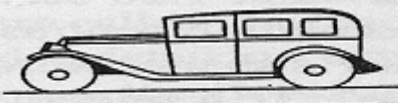

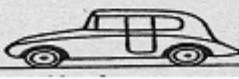


Şekil 2.8 ‘‘Half-Body’’ modeline göre aerodinamik direnç katsayısının değişimi (Hucho, 1998)

Yarım kanat modelinden sonra JARAY ve KLEMPERER üst üste iki yarım kanat modeli koyup bu kombinasyonu, Şekil 2.9’da inceledi. Bu çalışma sonucu JARAY otomobili Şekil 2.10’da görüldüğü üzere ortaya çıktı.

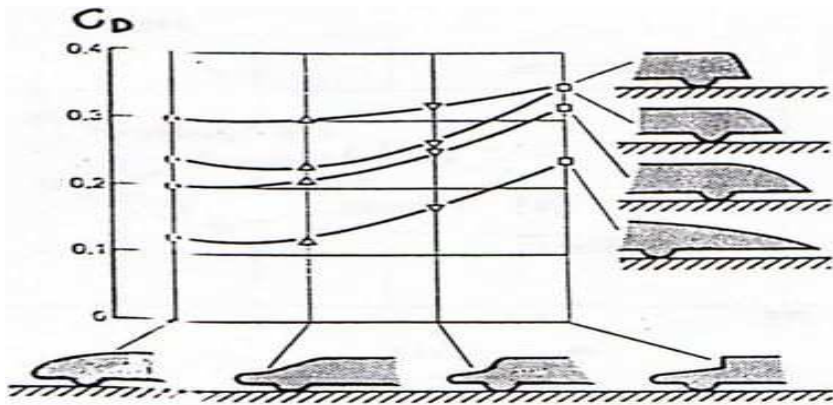


Şekil 2.9 JARAY ve KAMM kombinasyonları modelleri ve hava direnç katsayıları (Hucho, 1998)


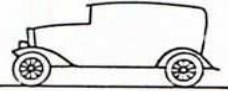
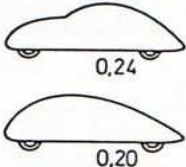
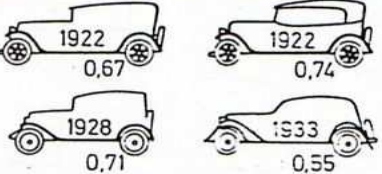
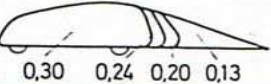

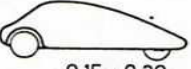

	$A_{1:1} [m^2]$	$c_D$
	2.99	0.64
 BÜYÜK JARAY OTOMOBİLİ	2.86	0.30
 KÜÇÜK JARAY OTOMOBİLİ	1.87	0.29

Şekil 2.10 Jaray arabasında aerodinamik direnç katsayısının taşıt izdüşüm alanı ile incelediği modeller (1:10) (Hucho, 1998)

Bu yıllarda araç ön ve arka formları ile oynayarak direncin nasıl değiştiği gözleniyordu. Şekil 2.11'de ön ve arka formlar incelenmiştir. Şekil 1.12'de optimize edilmiş otomobillerin  $C_D$  değerleriyle verilmektedir. Şekil 2.13, Şekil 2.14 ve Şekil 2.15'te çeşitli otomobil markalarının tarihsel gelişimi verilmektedir.

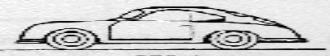
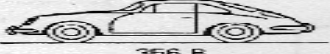
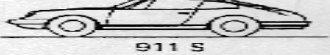
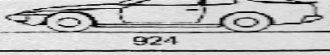
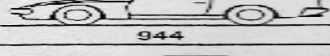
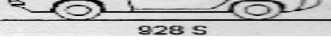


Şekil 2.11 Otomobil ön ve arka formlarının direnç kuvveti katsayısına etkisi (Hucho, 1998)

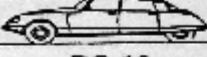
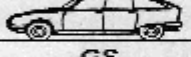
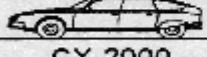
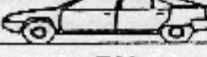
Yazar Yıl ölçek	Optimize Edilmiş Form	Kıyas Otomobili
W. T. Fisheigh 1931 M 1:4	 Direnç Oranı: 1:2,6	
R. H. Heald 1933 M 1:15	 0,24 0,20	
W. E. Lay 1933 M 1:8	 0,30 0,24 0,20 0,13	 0,61
E. G. Reid 1935	 0,15 + 0,20	 0,61

Şekil 2.12 1930' lu yıllarda Amerika Birleşik Devletleri'nde otomobil aerodinamiğinin durumu (Hucho, 1998)

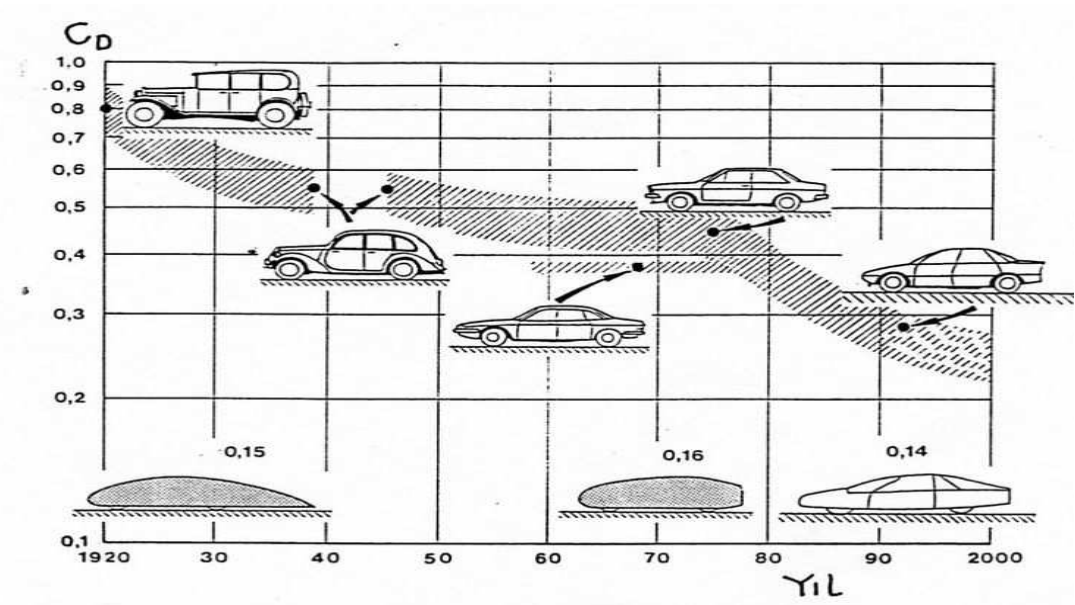
Görüldüğü üzere araç dış formu değişimi, aerodinamik direnci doğrudan etkilemektedir.

	Model yılı	A m <sup>2</sup>	C <sub>D</sub>
 356 A	1950	1.61	0.34
 356 B	1957	1.69	0.31
 911 S	1976	1.77	0.40
 924	1976	1.79	0.33
 944	1981	1.82	0.35
 928 S	1977	1.96	0.39

Şekil 2.13 1950 den 1977 yılına PORSHE otomobilleri (Hucho, 1998)

	Model Yılı	A m <sup>2</sup>	C <sub>D</sub>
 DS 19	1955	2.14	0.38
 GS	1970	1.77	0.37
 CX 2000	1974	1.96	0.40
 BX	1982	1.89	0.33 – 0.34

Şekil 2.14 1955 den 1982 ye CİTROEN otomobilleri(Hucho, 1998)



Şekil 2.15 Avrupa 'da seri üretilen ford otomobillerinin direnç kuvveti katsayıları (Hucho, 1998)

### 2.3. Otomobile Etkiyen Dirençler ve Taşıt Aerodinamiği

Her alanda olan gelişmeler gibi taşıt teknolojisindeki gelişmeler de, performans artırımı üzerinedir. Performans artırımı kısaca taşıtın verimini artırmak anlamındadır, yani taşıtın güç kaynağı olan içten patlamalı motordan gelen gücün, en iyi şekilde kullanılarak maksimum hız, ivmelenme, yokuş kapasitesi ve de günümüz dünyasında en önemli etkenlerinden olan ekonomikliği sağlamasıdır. Özellikle günümüzde yükselen petrol fiyatları, otomotiv endüstrisinin bütün imkanlarıyla, yakıt sarfiyatını minimize etmeye uğraşmaktadır.(HEISLER 2002)

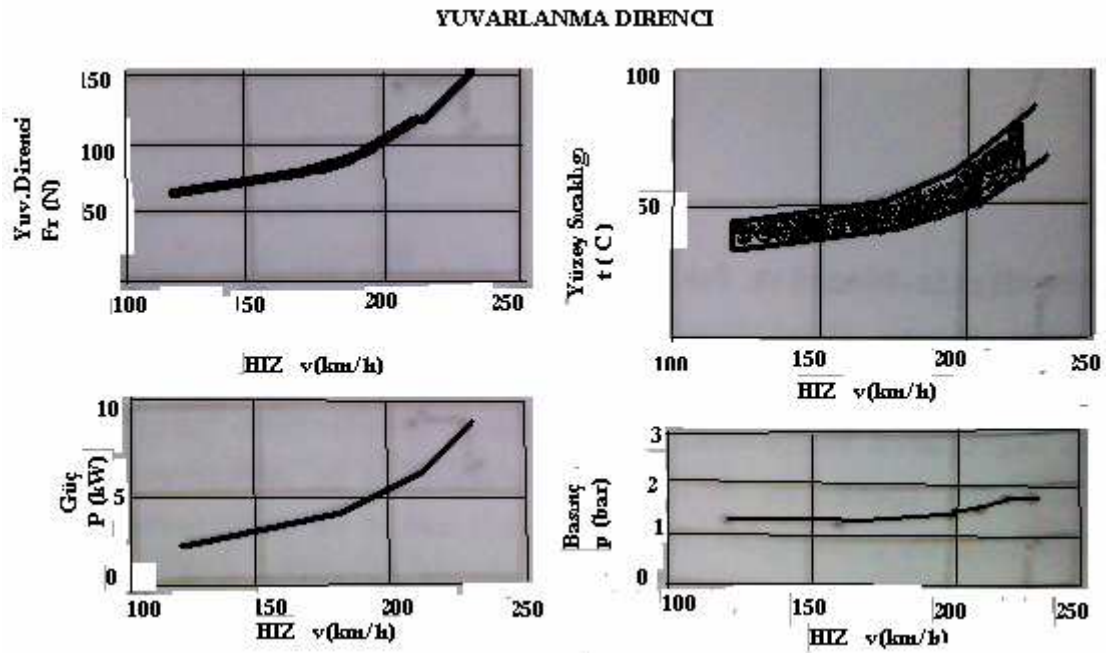
İstenilen bu performans artırımlarını yapmanın yolu taşıt üzerine gelen dirençleri azaltmaktır. Bu dirençlerden yokuş direnci ile oynamamızın imkanı yoktur ama diğer tüm dirençleri azaltmanın yolları bulunmaktadır. Bu dirençleri azaltmanın yolu bu dirençlerin, taşıt performansı üzerindeki etkilerini iyi bilmektir. Projede bu dirençlerin hepsinden bahsedilmiş, fakat aerodinamik dirençten konu itibariyle daha detaylı inceleme yapılmış ve etkilerini daha iyi gösterebilmek için grafiklerle desteklenmiştir. Yapılan kaynak taramaları ve araştırmalar özellikle aerodinamik direnç gibi hız ile oldukça değişen değerler, olduğundan bu direnç güçlerinin, taşıtın verdiği güçle birlikte grafiğinin çizilmesinin, en doğru yaklaşım olduğunu göstermiştir.

Otomobile etkiyen dirençleri altı ana başlık altında toplayabiliriz.(AYDOĞAN 2005)

- Tekerlek Yuvarlanma Direnci
- Yokuş Direnci
- Römork Direnci
- Atalet Direnci
- Aktarma Organları Direnci
- Aerodinamik Direnç

### 2.3.1 Yuvarlanma Direnci

Yuvarlanma direnç kuvveti taşıt tekerleğinin yuvarlanma sırasında yol ve lastiklerdeki şekil değiştirmelerden kaynaklanır. Yuvarlanma direnci yol ile tekerleğin değişik durumları için ayrı ayrı incelenir. Bu durumlar; demiryolu taşımacılığında olduğu gibi; rijit tekerlek – rijit yol, şu anda pek karşılaşılmamakla birlikte toprak zemin üzerinde hareket eden at arabasında olduğu gibi; rijit tekerlek - tekil değiştirebilen yol günümüzde kullandığımız binek otoların en çok karşılaştığı gibi; elastik tekerlek- rijit yol şeklindedir. Şekil 2.16’da yüksek hızla giden araçla yapılan deney sonuçları vardır. Lastikler :185/70 HR 14, Yük: 4000N, Basınç: 1,8 bar(KURULAY, 2002).



Şekil 2.16 Yüksek hızla giden bir araçla yapılan deneylerin sonuçları (KURULAY, 2002).

Otomobillerde kullanılan şişirmeli ( pnömatik ) lastiklerin yuvarlanma direncine birçok faktörün etkisi vardır.

Bu faktörler lastiğin yapısı ve lastiğin çalışma koşulları olarak iki ana başlık altında incelenebilir. Buna rağmen bu faktörleri birbirinden ayrı düşünmek imkansızdır.

Çünkü bir faktörün değişimi diğer bir faktörün değişimini de beraberinde getirir. Örneğin taşıtın hızının artması, lastiğin sıcaklığını artırır ve bu sıcaklık artışı da lastiğin şişirme basıncını değiştirir.

### 2.3.2 Yokuş Direnci

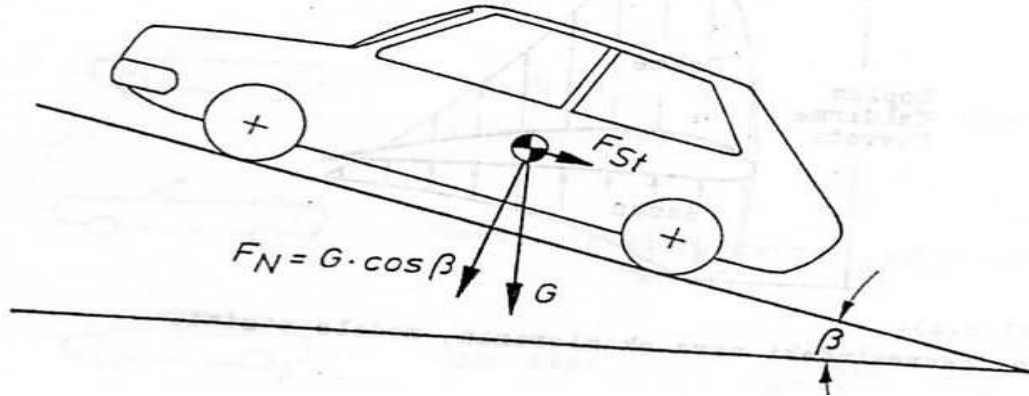
Bu direnç araç ağırlığının sinüs değerinden kaynaklanmaktadır. Hareket yönüne ters bir etki oluşturur. Bu etkiye yokuş direnci adı verilir. Şekil 2.17’de durum özetlenmiştir.

Yokuş direnci:  $F_{St}$

Yerçekim İvmesi :  $G$

Yokuş Açısı :  $\beta$

$$F_{St} = G \cdot \sin \beta$$



Şekil 2.17 Eğimli bir yolda ilerleyen araca etki eden  $F_{St}$  yokuş direnci (KURULAY dan 2002)



### **2.3.3 Römork Direnci**

Römork direnci; römorkun tekerleklerinin de etkisiyle araç yuvarlanma direncini artırmasından dolayı ortaya çıkmaktadır. Yokuş direnciyle birlikte daha belirgin hale gelmektedir.

### **2.3.4 Atalet Direnci**

Bilindiği gibi atalet kuvvetleri ivmeli hareket yapan cisimler üzerinde meydana gelir. Taşıtın genel hareketi ivmesiz kabul edilebilir. Fakat taşıtın ilk hareketi ve frenleme sırasında büyük ivmeler ve dolayısıyla büyük atalet kuvvetleri meydana gelir. Bunun yanı sıra taşıt ivmesiz hareket yaparken bile bu hareketi sağlamak için taşıtın bazı parçaları ivmeli hareket yapmak zorundadır. İşte bu da atalet kuvvetlerinin diğer bir kaynağıdır.

Taşıtın ilk hareketi sırasında ortaya çıkan atalet kuvveti taşıt hareketine zıt yöndedir ve hareket direnci olarak kabul edilir. Frenleme sırasında ortaya çıkan atalet kuvveti hareket yönündedir, yani harekete yardımcı olmaktadır, fakat frenleme zamanında meydana gelen bu kuvvet arzu edilmediğinden bu da bir hareket direnci olarak kabul edilir.

### **2.3.5 Aktarma Organları Direnci**

Hareket dirençleri denildiği zaman genellikle taşıt hareketine zıt yönde olan ve taşıt performansını negatif olarak etkileyen kuvvetler akla gelmektedir. Diğer bir yönden bakıldığında taşıt performansını etkileyen her güç kaybı da hareket dirençleri sınıfına katılabilir. İşte aktarma organları kayıpları da böyle bir dirençtir.

Bu direnç genel olarak kavrama, vites kutusu, tahrik milleri, diferansiyel, kardan kavraması ve yataklardaki kayıplardan meydana gelir. Daha genel bir tanım yapmak gerekirse motor ile taşıt tekerlekleri arasında güç kaybı meydana getiren bütün kayıplara aktarma organları kayıpları ya da aktarma organları direnci adı verilir.

Aslında aktarma organları, tek tek ele alındığında bu noktalardaki güç kayıpları değişkendir. Fakat sistemin toplamına bakıldığında birindeki verim azalmasıyla, diğer birindeki verim artması birbirini dengelediğinden bu kayıplar sabit kabul edilebilir. Örneğin dişli çarklardaki sürtünme kayıpları ile yatak direnci yağın viskozitesine ve dolayısıyla sıcaklığına bağlıdır. Vites kutusundaki, sürtünmelerden ortaya çıkan moment kaybı ısınmaya sebep olur ve ısınma neticesinde yağın viskozitesi düşer. Bu düşme ise direnci azaltır. Böylece vites kutusundaki kayıplar sabit kabul edilebilir.

### 2.3.6 Aerodinamik Direnç

Daha az yakıt sarfiyatı ,daha iyi araç performansı, rüzgar sesi oranındaki azaltma isteği, yolların stabilitesinin ve kalitesinin artması; üreticileri, çeşitli koşullar altında , farklı gövde şekilleri için hava direncini, incelemeye sevk etmiştir. Aerodinamik, katı cismin atmosfer içerisinde hareketini, cismin etrafını saran havanın çeşitli hızlarda ve çeşitli yönlerden esen rüzgarla, cisim arasındaki etkileşimini inceler(HEİSLER, 2002).

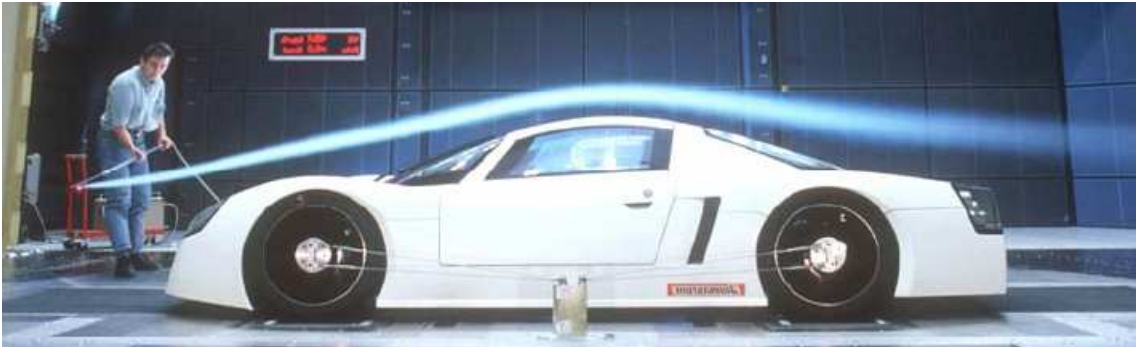
Bu dirençlerden en önemlisi aerodinamik dirençtir. Çünkü, 100 km/h hıza sahip bir otomobilin hareket dirençlerinin %75-80'i aerodinamik dirençten oluşur.(ÖZDAMAR, 2005b).

Bir taşıt hareket halindeyken yere göre bir rölatif hızı vardır. Hava hareketsiz olduğunda ve rüzgar olmadığında taşıt yere ve aynı zamanda havaya göre eşit rölatif hıza sahiptir. Fakat rüzgar olduğunda, yani hava yere göre bir rölatif hıza sahip olduğunda taşıtın yere göre rölatif hızı havaya göre olandan farklıdır.

Taşıtın aerodinamiği incelenirken anlaşılması kolay olması için havanın hareketsiz olduğu ve taşıtın yere göre sabit bir rölatif hızla hareket ettiği düşünülür. Aynı zamanda taşıt hızının havanın sıkıştırılmaz özellikte incelenebilmesini sağlayacak kadar düşük olması ve taşıtın düz bir yolda ilerlediği kabulleri de yapılmalıdır.

Aerodinamik analizlerde dikkat edilmesi gereken diğer bir nokta; taşıtın sabit hava içinde hareket etmesi ile rüzgar tünellerinde olduğu gibi havanın sabit taşıt üzerinden hareket etmesinin hiçbir farkı olmadığıdır. Bütün aerodinamik olaylar taşıt ile havanın birbirine göre yaptığı göreceli hareketten kaynaklanmaktadır.

Herhangi bir anda taşıtın, belirli bir noktasından geçen hava partikülünü düşünelim. Bu partikül hareket eden taşıta göre yerleştirilmiş bir koordinat eksenine göre rölatif bir hareket yapmaktadır ve belirli bir yol izlemektedir. Partikülün izlediği bu yola, akış yolu denir. Daha sonra taşıt üzerinde belirlenen bu noktaya gelen diğer tüm partiküller de bir önceki partikülün izlediği yolu izleyecektir. Bunun gibi diğer bütün akış yollarının oluşturduğu aileye taşıt çevresindeki hava akış şekli denir. Bu akış şekli taşıtın şekline ve hızına bağlıdır. Taşıt üzerindeki bu hava akış şekli, rüzgar tünellerinde veya tüm taşıt yüzeyine ince ve esnek iplikler yerleştirilerek görüntülenebilir. Şekil 2.18’de normal boyutlardaki bir Opel otomobilin üzerindeki hava akış şeklinin rüzgar tüneline duman kullanılarak görüntülenmesi gösterilmektedir.



Şekil 2.18 Rüzgar tüneline araç üzerindeki akış şeklinin belirlenmesi için yapılan deney (Kleber, 2003).

Henüz taşıtın hareket alanına girmemiş hava akımları paralel ve durgun durumdadır, fakat hareket alanı içindekiler oldukça kompleks hareket durumları sergilerler. Dolayısıyla taşıtın çevresinde deforme olmuş bir hava akımı vardır. İnceleme amacıyla kabullerini yaptığımız hava partikülünün hareketi incelendiğinde deforme olmamış bölgedeki partikülün taşıt ile eşit rölatif hıza sahip olduğunu görürüz. Fakat deforme olmuş bölgede (taşıt çevresinde), partikülün rölatif hızı, bazen taşıt hızından yavaş bazen de hızlı olacak şekilde oldukça değişmektedir.

Aerodinamik dirence  $D$  dersek, havanın araç üzerine etkiyen kuvvet ve moment artışını araç hızının karesiyle orantılı olacaktır.(HUCHO 1998)

$$D \approx V^2 \quad (2.1)$$

Buradan

$$D = C_D A \frac{\rho}{2} V_t^2 \quad (2.2)$$

bağıntısı ile verilir. Burada;  $C_D$  direnç kuvveti katsayısı,  $V_t$  taşıt hızı ve  $A$  taşıt izdüşüm alanıdır.

Taşıt dizaynında ilk aşamalardan birisi, taşıt dış yüzey hatlarının belirlenmesidir. Bu hatlar, daha çok aerodinamikçiler tarafından belirlenir. Aerodinamikçi, bu hatları belirlerken, direnç kuvveti katsayısı  $C_D$ ' yi minimum yapmayı amaçlar. Son yıllarda otomobillerin direnç kuvveti katsayısı 0,3 değerinin de altına indirilmiştir. Otomobil dizaynında görev alan aerodinamikçi, dış yüzey hatlarının belirlenmesi yanında, hava akımı tarafından oluşturulan kuvvet ve momentleri dikkate almalıdır. Bu kuvvet ve momentlerden, kaldırma kuvveti, yan rüzgar kuvveti ve otomobil düşey eksenini etrafındaki moment (savrulma) önemlidir. Çünkü, bu kuvvetler ve moment, otomobil stabilitesini önemli oranda etkiler. Bunların dışında da aerodinamikçinin; hava akımından oluşan gürültünün minimuma indirilmesi, sürüşte camların kirlenmesinin az olması ve yüksek hızlarda dikiz aynalarının titreşimlerinin tehlikeli boyutlara ulaşmaması gibi görevleri vardır.

Enerjinin korunumu yasasından oldukça iyi bilinen bir formül olan Bernoulli'nin Teoremini çıkartabiliriz. Bu formül aynı akışyolunun her noktasındaki atmosferik ve dinamik basınçların toplamının sabit olacağını gösterir.

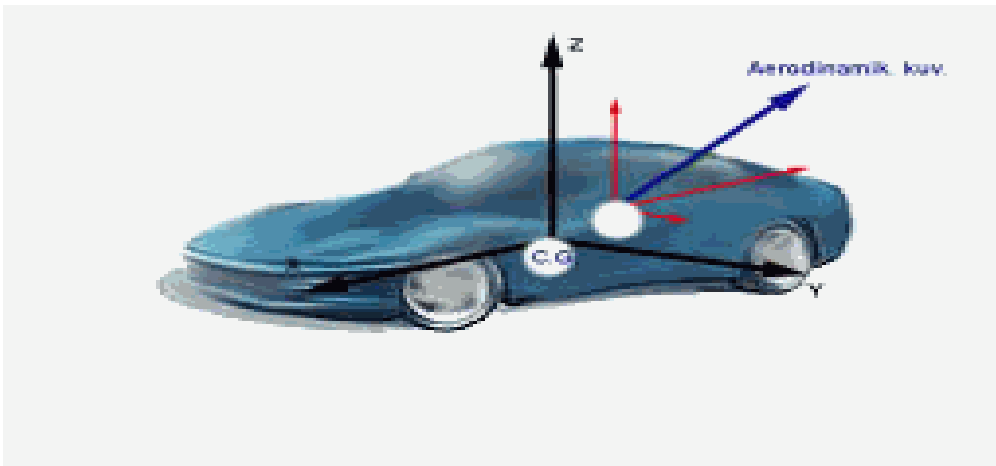
Atmosferik basınç  $P$ , dinamik basınç  $q = \rho V^2/2$  ve toplam basınç  $H$  ile gösterilirse aerodinamiğin temel yasası

$$P + \frac{\rho V^2}{2} = H (\text{sabit}) \quad (2.3)$$

şeklinde oluşur. Buradaki toplam basınç, henüz taşıtın hareket alanına girmemiş yani deforme olmamış hava ortamından hesaplanabilir. Bu formül bize havanın hızının, değiştiği yerlerde dinamik basınçında değişeceğini gösterir.

Bernoulli'nin Teoreminden anlaşılacağı üzere hareketi halindeki bir taşıtın çevresinde oldukça spesifik bir basınç dağılımı oluşur.

Bu basınçlar, taşıtın dış yüzey alanına göre, integre edilirse, taşıtın üzerinde, rölatif hızdan dolayı oluşan bileşke aerodinamik kuvvet bulunur. Bu kuvvet aslında taşıt yüzeyindeki bir yayılı kuvvettir, fakat hesaplamalarda kolaylık olması için bu basınç kuvvetlerinin taşıt üzerindeki belirli bir noktadan etkidiği şeklinde bir idealleştirme yapılabilir. Bu noktaya basınç merkezi (center of pressure, c. p. ) denir. Şekil 2. 19. Bu nokta ağırlık merkezi (center of gravity, c.g. ) ile aynı nokta değildir. Fakat bu iki noktanın çakıştırılması oldukça büyük faydalar sağlar.



Şekil 2.19 Basınç merkezi ve ağırlık merkezinin konumları.

Yukarıda belirtilen integralin sonucunda aerodinamik kuvvetin, hızın karesiyle, hava akımına karşı gelen taşıt alanıyla ve birimsiz bir katsayı ile orantılı olduğu görülür ve (2.2) deki denklemi aşağıda daha detaylı incelersek.

$$F = qA.C_D \quad (2.4)$$

burada;

q: dinamik basınç

A: karakteristik taşıt alanı

$C_D$ : aerodinamik direnç katsayısıdır.

Bileşke aerodinamik kuvvet analizlerde kolaylık olması için üç bileşene ayrılabilir:

Yere paralel ve taşıtın ileri hareket yönüne zıt, aerodinamik çeki kuvveti;  $D_a$

Taşıt hareket doğrultusuna ve yere dik aerodinamik kaldırma kuvveti,  $L_a$

Havanın hareketi taşıt şekline göre simetrik olmadığı zamanlarda oluşan aerodinamik kuvvetin yan bileşeni,  $Y_a$ . Bu kuvvet bileşeni diğer iki bileşen ile de dik açı yapmaktadır.

Aerodinamik kuvvetin bu bileşenleri aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$R_a = \frac{\rho V^2}{2} A_f C_D \Rightarrow C_D = \frac{R_a}{\frac{\rho V^2}{2} A_f} \quad (2.5a)$$

$$L_a = \frac{\rho V^2}{2} S C_L \Rightarrow C_L = \frac{L_a}{\frac{\rho V^2}{2} S} \quad (2.5b)$$

$$Y_a = \frac{\rho V^2}{2} S C_Y \Rightarrow C_Y = \frac{Y_a}{\frac{\rho V^2}{2} S} \quad (2.5c)$$

burada;

$C_D$ : aerodinamik direnç katsayısı

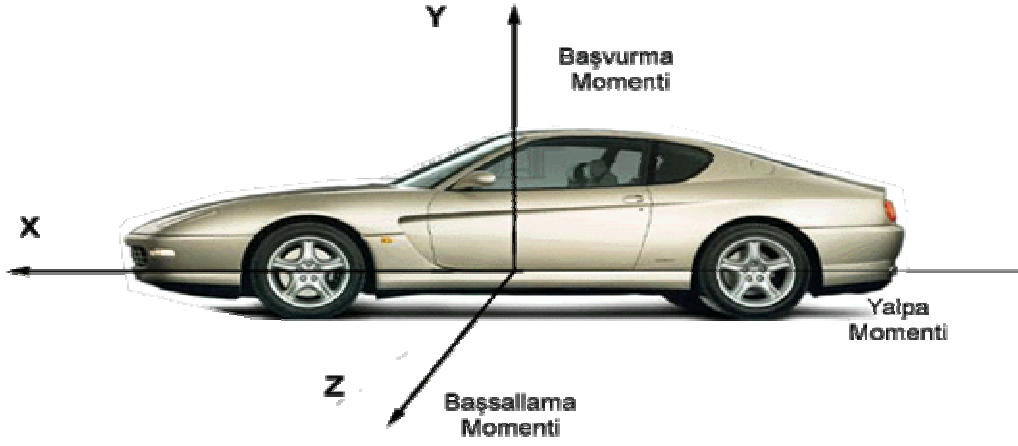
$C_L$ : aerodinamik kaldırma katsayısı

$C_Y$ : aerodinamik yan kuvvet katsayısı

$A$ : taşıtın karakteristik alanıdır.

Yukarıda da belirtildiği gibi aerodinamik kuvvetlerin bileşkesinin etkidiği nokta olarak belirlediğimiz basınç merkezi ile taşıtın bütün dinamik analizlerinin yapıldığı nokta olan ağırlık merkezi aynı nokta değildir. Aerodinamik kuvvetlerinde taşıt dinamiğine etkisi hesaplanmak istendiğinde bu kuvvetlerin de ağırlık merkezine taşınması gereklidir. Bu durumda dinamik analizin içine aerodinamik momentler girmektedir.

Bu momentler aerodinamik kuvvetler ile bunların ağırlık merkezine olan uzaklıklarının çarpımı ile bulunabilir.



Şekil 2.20 Taşıt üzerinde eksenlerin yerleşimi ve eksenlere göre momentler.

Aerodinamik kuvvetler, üç bileşene ayrıldığına göre bunların ağırlık merkezine taşınması sonucunda üç aerodinamik moment oluşur. Bunlar:

Aerodinamik çeki ve aerodinamik kaldırma kuvvetlerinden kaynaklanan başsallama momenti  $M_A$ 'dır. Basınç merkezinin ağırlık merkezine göre rölatif pozisyonu  $x_c$  ve  $z_c$  uzaklığında olarak tanımlanırsa;

$$M_A = L_A \cdot x_c + D_A \cdot z_c = q \cdot A (C_L \cdot x_c + C_D \cdot z_c) = q \cdot A \ell \cdot C_M \quad (2.6)$$

olur.

Burada  $L$  taşıtın karakteristik uzunluğudur ve binek taşıtlar için genellikle ön ve arka akslar arasındaki uzunluk alınır.  $C_M$  ise birimsiz baş sallama momenti katsayısıdır.

Aerodinamik başvurma momenti  $N_A$ ,  $x_c$  uzaklığında etkiyen aerodinamik yan kuvvette kaynaklanmaktadır.

$$N_A = Y_A \cdot x_c = q \cdot A \ell \cdot C_N \quad (2.7)$$

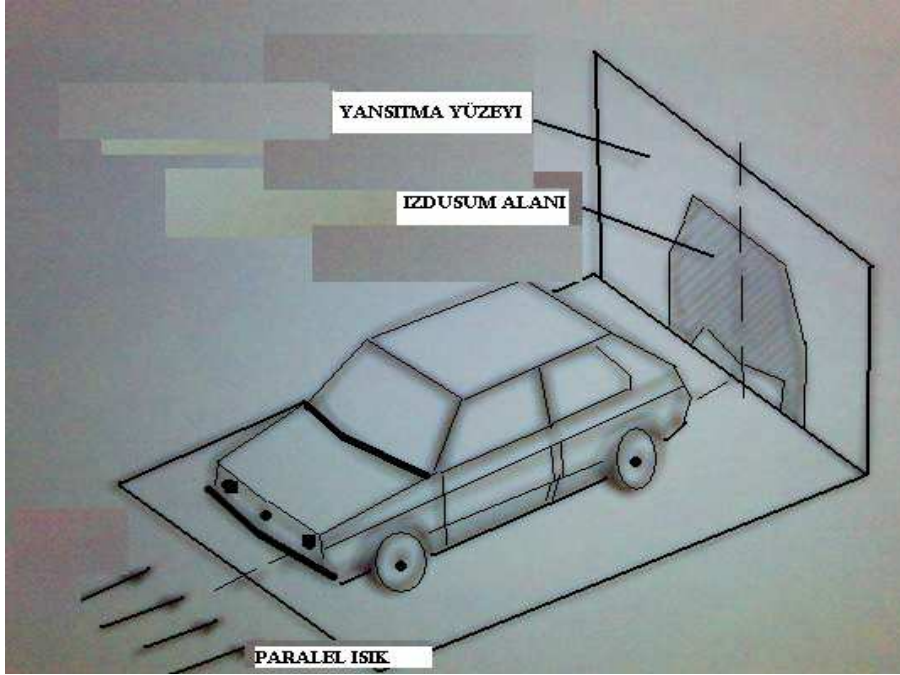
burada  $C_N$  birimsiz devrilme momenti katsayısıdır.

Aerodinamik yalpalama momenti  $Q_A$ ,  $z_c$  uzaklığında etkiyen aerodinamik yan kuvvetten kaynaklanmaktadır.

$$Q_A = Y_A \cdot z_c = q \cdot A \ell \cdot C_Q \quad (2.8)$$

burada  $C_Q$  birimsiz yuvarlanma momenti katsayısıdır.

Taşıt endüstrisinde bütün bu aerodinamik katsayıların maksimum kesit alanı ile ilgili olduğu kabul edilmektedir. Bu alan pratik olarak taşıtın ön kesit alanı ile aynı kabul edilir ve genellikle referans alanı veya karakteristik alan olarak adlandırılır.



Şekil 2.21 Taşıt ön kesit alanının tanımı(HUCHO 1998)

Bu alan lastiklerin hava akımına karşı olan alanlarını da kapsar. Bu alan bazen ön kesit alanı olarak adlandırılır, çünkü bu alan şekilden de görüleceği üzere bir otomobilin önünden paralel gelen ışınlar sonucu arka yüzeyde oluşan gölgedir.

### 2.3.6.1 Aerodinamik kuvvetin performansa etkisi

Halk arasındaki genel kanı aerodinamik kuvvetlerin taşıt performansını fazla etkilemediği yönündedir. Hatta bazı kişiler taşıtlara verilen aerodinamik biçimlerin sadece çekici göstermek amacıyla yapıldığını düşünmektedir.



Bu düşüncelerin doğruluğunun araştırılması için aerodinamik kuvvetlerin taşıt hareketi üzerindeki etkileri incelenmelidir. Bu analizi kolaylaştırmak için taşıtın sabit bir hız ile düz bir yolda ilerlediğini ve atmosferde rüzgar olmadığını düşünülürse. Böylece taşıt üzerindeki bütün kuvvetler dengededir ve taşıtın dik simetri ekseninde etki etmektedirler, yani hiçbir yan kuvvet yoktur.

Taşıtın yukarıda bahsedilen şekilde hareketi sırasında aerodinamik çeki ve aerodinamik kaldırma bileşenlerine ayrılabilen aerodinamik kuvvetlerin yanı sıra tekerleklerdeki yuvarlanma direnç kuvvetinin de dikkate alınması gereklidir. Çünkü çeki tekerleklerinde giden tork, hem aerodinamik kuvvet hem de yuvarlanma direnci ile dengelenmektedir.

Aslında aerodinamik kuvvet ile yuvarlanma direnci birbiriyle oldukça kompleks bir şekilde bağlantılıdır. Aerodinamik kaldırma kuvveti yukarı doğru ise bu kuvvet taşıtın zemine uyguladığı normal kuvveti azaltır ve dolayısıyla yuvarlanma direncini de azaltır. Bu durumun tersi olan aerodinamik kaldırma kuvvetinin aşağı doğru olması durumunda da yuvarlanma direnci artar. Bu durum aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$R_{\text{yuvarlanma}} = (W_{\partial n, \text{ark}} - L_{\partial n, \text{ark}}) f_{\partial n, \text{ark}} \quad (2.9)$$

Taşıtın belirtilen yol durumundaki toplam direnci R, aerodinamik çeki kuvveti ve yuvarlanma direnç kuvveti toplanarak bulunabilir.

$$R = \frac{\rho V^2}{2} AC_D + (W_{\partial n} - L_{\partial n}) f_{\partial n} + (W_{\text{ark}} - L_{\text{ark}}) f_{\text{ark}} \quad (2.10)$$

Daha öncede belirttiğimiz gibi taşıt sabit hızla hareket ettiği için üzerindeki bütün kuvvetler dengededir. Öyleyse toplam direnç kuvveti aktarma organları ve çeki tekerleri aracılığıyla motordan sağlanan çeki kuvvetine,  $F_T$ , eşittir.

Aktarma organları ve vites kutusu ile ilgili olayları bir kenara bıraktığımızda, çeki kuvveti verilen hızdaki motor gücü ile doğrudan bağlantılıdır. Bu durumda sağlanan güç:

$$\eta P_E [W] = F_T [N] V [m/s]$$

$$\eta P_E [kW] = \frac{F_T [N] V [km/sa]}{3.6}$$

$$\eta P_E [HP] = \frac{F_T [N] V [km/sa]}{(745.7)(3.6)} = \frac{F_T [N] V [km/sa]}{2684.52} \quad (2.11)$$

olur.

Burada  $\eta$  ; aktarma organlarındaki kayıplardan dolayı gelen verim ifadesidir.

Bu denklem motor tarafından sağlanan güç ile dirençler tarafından harcanan gücün eşitliğini göstermektedir. Bu durumda

$$\eta P_E = P_A + P_R \quad (2.12)$$

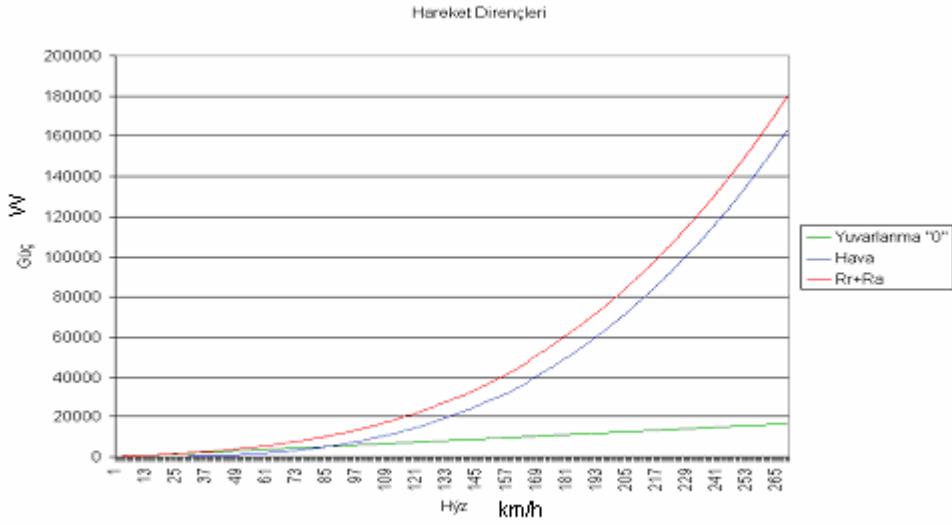
Burada aerodinamik kuvvet ile ilgili güç terimi;

$$P_A [HP] = R_A V_v = \frac{\rho V^3}{2(3.6)^3 (745.7)} \cdot A \left\{ C_D - (C_{L_{\alpha}} \cdot f_{\alpha} + C_{L_{\alpha^2}} \cdot f_{\alpha^2}) \right\} \quad (2.13)$$

yuvarlanma direnci ile ilgili güç terimi;

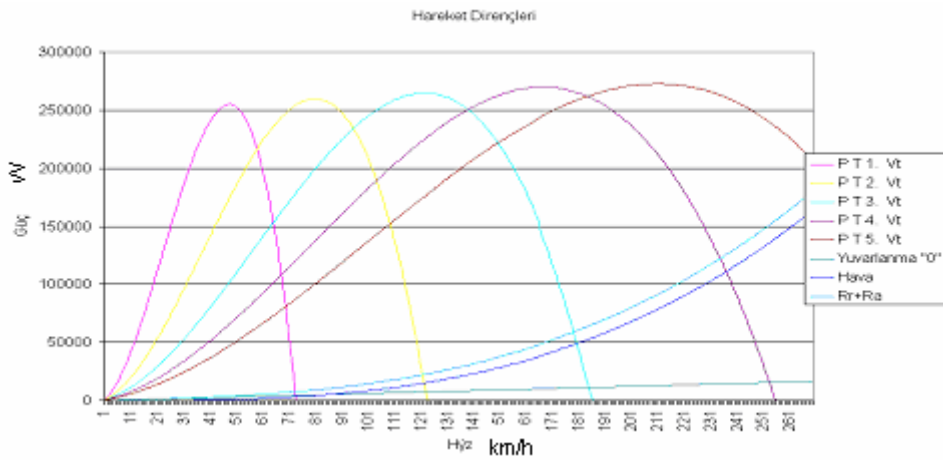
$$P_R [HP] = R_R V_v = \frac{V}{(3.6)(745.7)} [W_{\alpha} \cdot f_{\alpha} + W_{\alpha^2} \cdot f_{\alpha^2}] \quad (2.14)$$

Bu iki denklem karşılaştırıldığında 2.13 denkleminden aerodinamik gücün, hızın küpü ile orantılı olduğu halde 2.14 denkleminden mekanik gücün, hız ile direkt orantılı olduğu görülür. Bu denklemlerin eğrileri çizilirse Şekil 2.22 elde edilir. Bu eğrilerden de görüleceği üzere düşük hızlarda (binek otolar için 60- 70 km/h) mekanik direnç gücü ile aerodinamik direnç gücü hemen hemen aynı olmakla birlikte yüksek hızlarda aerodinamik direnç gücü çabuk bir tırmanışa geçerek mekanik direnç gücünün oldukça üstüne çıkar. Bu arada mekanik direnç gücü yaklaşık olarak hız ile doğrusal bir seyir gösterir.(HEISLER 2002)



Şekil 2.22 Yuvarlanma direnç güç ve aerodinamik direnç güç eğrileri (HEISLER 2002)

Şekil 2.23' teki grafikte toplam direnç gücü ile motor gücü eğrilerinin kesiştiği nokta taşıt üzerindeki kuvvetlerin dengede olduğu noktadır. Bu nokta o andaki vites seçimi ve gaz kelebeğinin açıklığına göre ulaşılabilecek maksimum taşıt hızıdır. Bu nokta, genellikle motor gücü eğrisinin zirve noktasından daha ileride bir yerde olması istenir ve bu şekilde dizayn edilir. Böylece düşük hızlarda ivmelemek için bir miktar güç kalması sağlanmış olur.



Şekil 2.23 Motor gücü ve aerodinamik güç eğrilerinin kesiştirilmesi. (HEISLER 2002)

### 2.3.6.2 Aerodinamik kuvvetin araç maksimum hızına etkisi

Eğer maksimum motor gücü, maksimum taşıt hızında gerçekleşiyorsa, sağlanan maksimum güç taşıt ihtiyacı olan güce eşittir. Bu durumda denklem 2.11, 2.13, 2.14'den

$$(7457) \eta P_{E \max} [HP] = \frac{1}{2} \rho A V_{\max}^3 \frac{1}{(3.6)^3} \{C_D - (C_{Lön} f_{ön} + C_{Larka} f_{arka})\} + V_{\max} (W_{ön} f_{ön} + W_{arka} f_{arka}) \quad (2.15)$$

Taşıttın ön ve arka lastikleri için yuvarlanma direnç katsayıları eşit kabul edilirse, yani  $f_{ön}=f_{arka}=f$  ise;

$$(745.7) \eta P_{E \max} [HP] = \frac{1}{2} \frac{1}{(3.6)^3} V_{\max}^3 (C_D - C_L f) + V_{\max} W f \quad (2.16)$$

olur.

Bu denklemin çözümü oldukça basittir ve taşıt endüstrisinde gösterimi genellikle grafik olarak yapılır. Maksimum taşıt hızının yaklaşık çözümü motor gücünün %70 olduğu durum için en uygundur ve aşağıdaki şekilde çözümlerse;

$$V_{\max} \cong 36 \left\{ \frac{P_E [HP]}{\rho A (C_D - C_L f)} \right\}^{1/3} \quad (2.17)$$

Eğer maksimum güçteki motor torku, vites oranları ve çeki tekerleklerinin etkin yarıçapları biliniyorsa, çeki tekerlerindeki kuvvet bulunabilir. 2.10 denkleminde taşıt maksimum hızı maksimum motor gücündeki çeki kuvveti, aerodinamik direnç kuvveti ve yuvarlanma direnç kuvveti cinsinden bulunabilir.

$$\Rightarrow V_{\max} = \left\{ \frac{F_{TDMaks} - W f}{\rho \frac{A}{2} (C_D - C_L f)} \right\}^{1/2} \quad (2.18)$$

Denklem 2.17 ve 2.18 aerodinamik direncin taşıt hızına olan etkisinin incelenmesinde kullanılır. Denklemlerden de görülebileceği gibi belirli motor gücü ve taşıt ağırlığında hız, sadece yuvarlanma direnç katsayısına değil, aerodinamik direnç katsayısı ve aerodinamik kaldırma katsayısına da bağlıdır. Taşıttın aerodinamik direnç katsayısı veya referans kesit alanı azaltılarak elde edilebilir maksimum taşıt hızı artırılabilir.

Aerodinamik direnç kuvvetlerinin düşürülmesinin avantajlarından, tam anlamıyla yararlanmak istiyorsak, taşıtın aktarma organlarındaki dişlilerin yeniden ayarlanması gerekmektedir.

Aerodinamik kaldırma kuvvetinin taşıt hızına olan etkisi biraz daha karışıktır. 2.17 ve 2.18 denklemlerinden aerodinamik kaldırma kuvvetinin (pozitif yönde) artırılması yuvarlanma direncini azaltır ve dolayısıyla maksimumu taşıt hızını artırır. Diğer taraftan aerodinamik kaldırma kuvveti üretilebilecek maksimum çeki kuvvetini de etkilemektedir. Bu kuvvet çeki lastiklerinin yola tutunması ile ilgilidir:

$$F_{T_{max}} = (W_{\partial N, \partial rka} - L_{\partial N, \partial rka}) \cdot \mu \quad (2.19)$$

Burada  $\mu$  yolun adezyon sınırındır. Bu katsayı yol yüzeyinin yapısı, lastiğin diş şekli ve lastik dişlerinin malzemesiyle ilgilidir. Aerodinamik kaldırma kuvvetinin artması taşıtın üretebileceği maksimum çeki kuvvetini azaltır ve bu değeri motorun üretebileceği değerin de altına indirebilir. Bu durumda aerodinamik kaldırma kuvvetinin, taşıt üzerindeki iki etkisi birbiriyle çakışmaktadır. Ortalama bir binek taşıt için pratikte bu etkilerin bir anlamı yoktur. Fakat hızlı spor arabalar ve yarış araçları için bu etkiler çok önemlidir ve negatif kaldırma aygıtları kullanılarak çeki kuvvetini arttırmak daha baskın bir uygulamadır. Aerodinamik kaldırma kuvvetinin etkileri yol tutuş ve yönlendirme sistemleri üzerinde de oldukça etkilidir.

### 2.3.6.3 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.

Bu konunun önemini daha iyi anlamak için ülke genelindeki yakıt tüketiminin ve bunun ekonomiye olan etkisinin incelenmesi gereklidir. Şu anda Türkiye’de 12 milyon taşıt olduğu kabul edilir, bütün bu taşıtların ortalama hızının 55 km/h olduğu ve senede ortalama 8000 km mesafe kat ettikleri kabulleri yapıldığında konunun önemi anlaşılır.

Eğer taşıtlar, bu şartlarda çalışırken ortalama 30 HP motor gücü ürettikleri ve bu hızdaki ortalama yakıt tüketiminin 9 L/h olduğu kabulleri ile hesap yapıldığında, yıllık ortalama yakıt tüketimi 3552 milyon litre olur. Taşıtlar dizaynındaki bazı iyileştirmelerle aerodinamik direnç katsayısı ortalama %2 düşürülebilir. Katsayıdaki bu düşüş motor gücü ihtiyacına %0.5 olarak yansımaktadır. Bunun ekonomik anlamı ise; yakıt tüketiminde senelik 18 milyon litre yakıt tasarrufu ve 2007 tarihi fiyatlarıyla 54 milyon YTL, eşdeğerdir

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

$$G=(HP)_E \times C[L/H] \quad (2.20)$$

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.

Aerodinamik karakteristiğın, yakıt tüketimine etkisini incelemek için taşıtların tavanına bir bagaj yerleştirildiği durumu düşünelim. Bu durumda taşıtların aerodinamik direnç katsayısında  $\Delta C_D$  kadarlık bir artış olur ve toplam direnç katsayısı  $C_D + \Delta C_D$  olur.

Tavanında bagaj olan taşıtlar aynı hızda normalden daha fazla motor gücüne ihtiyaç duyar. 2.13 no'lu denklemi kullanarak bagajlı ve bagajsız durum için gerekli olan güçleri hesaplayıp oranlarsak;

$$\frac{P_{A_{bagajlı}}}{P_{A_{bagajsız}}} = \frac{(C_D + \Delta C_D) - C_{L_1} \cdot f}{C_D - C_{L_1} \cdot f} \quad (2.21)$$

ifadesi ortaya çıkar.

Buradaki  $C_{L1}$  ve  $C_{L2}$  bagaj yerleştirilmeden önceki ve bagajlı durumdaki aerodinamik direnç katsayılarıdır. Karakteristik yakıt tüketiminin gaz kelebeği açıklığına göre değişmediği kabul edilirse;

$$\frac{G_{bagajlı}}{G_{bagajsız}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 (C_D + \Delta C_D) + W \cdot f}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 (C_D - C_{L_1}) + W \cdot f} \quad (2.22)$$

olur.

Bu örnek belirli bir mesafe için taşıtın dizaynı iyileştirilerek aerodinamik direnç katsayısında elde edilecek azalmanın yakıt tüketimini seyir hızının karesiyle orantılı olarak azaltacağını gösterir. 2.22 no'lu denklemin taşıtın ağırlığının azaltılması veya lastiklerin yuvarlanma direnç katsayılarının azaltılmasının da yakıt tüketimini azaltacağını gösterir.

Yukarıdaki örnekte karakteristik yakıt tüketiminin gaz keleşinin açıklığıyla değişmediği kabulü yapılmıştı, oysaki gerçekte oldukça değişmektedir. Çeşitli gaz keleş açıklıklarına göre karakteristik yakıt tüketiminin hesabı oldukça zor ve karmaşık bir iştir. Bunun için taşıt üreticileri ve ülkelerin hükümetleri belirli hızlardaki karakteristik yakıt tüketimi değerlerinin hesaplanıp belirtilmesini kararlaştırmışlardır. Otomobil kataloglarına bakılınca görülebileceği gibi karakteristik yakıt tüketimi genellikle 90 km/sa sabit hızda, 120 km/h sabit hızda ve şehir içi trafiğinde değişken hızda verilmektedir.

Taşıt üzerindeki dirençlerin her birinin yakıt tüketimine olan etkileri harcadıkları güçlerle orantılıdır. Bunun için şehir içinde ortalama 30 km/sa hızla seyahat eden bir taşıtın inceleyecek olursak; en çok taşıtı 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 taşıt durgun halden V hıza çıkartılırsa yapılan iş;

$$E_1 = \frac{1}{2} \cdot M \cdot V^2 \quad (2.23)$$

dir.

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

$$E_2 = P \cdot s = W \cdot f \cdot s \quad (2.24)$$

dir.

Aynı mesafe için aerodinamik direnç kuvvetine karşı yapılan iş ise;

$$E_3 = R_A \cdot s = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot C_D \cdot s \quad (2.25)$$

dir.

Bu hareket şartlarını 750 kg ağırlığındaki bir taşıtın seyahat sırasında maksimum 50 km/sa hız yaptığı, 25 km gittiği ve bu arada 30 defa durduğu şeklinde bir duruma uyarlıysak; yuvarlanma direnç katsayısı 0.02 ve referans alanı 1.8 için

$E1 : E2 : E3 = 1.2 : 2.0 : 1.0$  oranını buluruz.

Bu oran şehir içinde olduğu gibi düşük hızlarda motorun kullanılabilir iş kapasitesinin  $\frac{1}{4}$ 'ü aerodinamik dirence ve  $\frac{3}{4}$ 'ünün mekanik direnci yenmek için harcadığı görülür.

Eğer aynı yolculuk 90 km/sa maksimum hız ile iki defa durarak kat edilseydi bu oran:

$E1 : E2 : E3 = 0.3 : 2.0 : 3.9$  olurdu. Bu durumda otoyol gibi hız sınırının yüksek olduğu kısımlarda motorun kullanılabilir iş kapasitesinin yaklaşık  $\frac{2}{3}$ 'ü aerodinamik direnç kuvvetine karşı harcanıyor.

## 2.4 Hava Direnç Katsayısını Azaltmak İçin Yapılan Çalışmalar

Aracın kaportası çevresinde akan havanın mümkün olduğunca kesintisiz ve pürüzsüz bir yüzey etrafında akması sağlanarak direnç katsayısı daha da düşürülebilmektedir. Bu amaca yönelik araçlarda kapı camlarının ve farların kaporta ile bir yüzeyde dizayn edilmesi, ön ve arka camların daha yatık dizayn edilmesi, yan aynaların formunun aerodinamik özellik taşıması, lastik oyuklarının genişletilmiş çamurluklarla örtülmesi, ön ve arka tekerlekler arasında etekler yerleştirilmesi, ön panel altına hava kesiciler ( airdam ) yerleştirilmesi, jant kapaklarının mümkün olduğunca aerodinamik yapıda imal edilmeleri, aracın altındaki düzgünlükleri alt kaplama takviyesi ile kamufle edilmesi gibi önlemlere rastlanmaktadır. Günümüzde yukarıda bahsettiğimiz önlemler sayesinde direnç katsayısı;

- Binek araçlarında 0,25'e
- Otobüslerde 0,5'e
- Motosikletlerde 0,4'e
- Kamyonlarda ise 0,65'e

dek düşürülebilmektedir.



Hava akımı içinde, akım yönüne dik olarak tutulan bir levha için, bu değer, 1.28, paraşütte 1.70, tabanca mermisinde 0.3, futbol topunda 0.29, yolcu uçaklarında 0.25, bomba ve yedek yakıt tankı taşımayan savaş uçaklarında 0.20 civarındadır.

Bu arada laboratuvar çalışmalarında bulunan sonuçların, normal trafikte tespit edilenler ile uyuşmaması çoğunlukla rastlanan haldir. Çünkü araca etkiyen yan rüzgar, yük durumu vb. faktörler direnç katsayısına doğrudan tesir ederler.

Açık bir pencere, bagajdaki 20 kg'lık fazla yükün, oluşturduğu yere yaklaşma veya kullanılan lastiklerin daha kalın olanlarıyla değiştirilmesi gibi hallerde direnç katsayısı değeri %10-12 artış gösterir. Küçük gibi görünen bu artışın ise yakıt sarfiyatının %5 yükselmesine neden olduğu tespit edilmiştir.

Aracın altındaki düzgünsüzlüklerin alt kaplama ile kamufle edilmesi halinde  $C_D$  değeri 0.045 düşüş gösterir. Ön ve arka camların eğik dizayn edilmesi, aracın iç kısmını etkileyen güneş ışığı miktarının artmasına neden olur. Bunun doğuracağı yüksek sıcaklık problemine, çözüm olarak cam imalatçı firmaları, renksiz iki ince cam tabakası arasına altın veya gümüş metalden mikron mertebesinde film sıvayarak güneşin görünür dalga boyundaki ışınlarını geçiren fakat enfraruj ışınlarını yansıtan camlar geliştirmişlerdir. Bunun maliyeti ise normal cam maliyetinin % 50 üzerindedir.

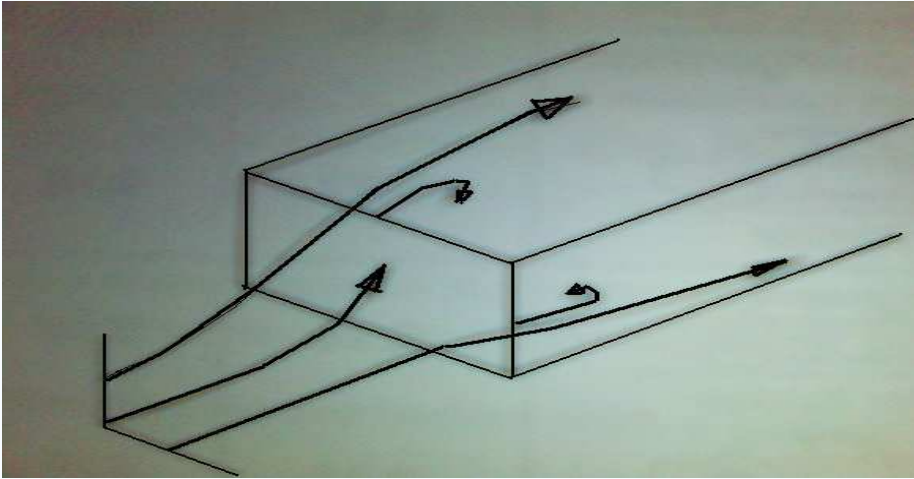
$C_D$  değerini azaltma çalışmalarının sonucu olarak şu söylenebilir. Geliştirilen farklı önlemler sayesinde direnç kaybı, oldukça düşürülebilmektedir ve hatta daha da düşürülebilir ancak, bu amaç için uygulanacak ilave önlemlerin doğurabileceği maliyet artışı  $C_D$  değerinin küçültülmesi sonucu ortaya çıkacak avantajı aşacağından bu gibi önlemler, şimdilik sadece deneme, geliştirme ve yarış gibi özel amaçlı araçlara uygulanabilmektedir. Binek otolarında  $C_D$  değeri 0.25 ile 0.6 arasında değişirken bu tür numunelerde  $C_D$  değeri 0.20'ye düşebilmektedir.

Bu konuda rekor 0.182 ile Mercedes'in C111 serisinin 1985'de geliştirdiği C111/4 modelindedir. Zaman değerlerini alt üst 1936 yapımı geliştirilmiş Mercedes W125 0.20'lik  $C_D$  değeri ile damla formuna en yakın araçlardan biridir.

### 2.4.1 Taşıt Ön Formunda Aerodinamik Direnci Düşürmeye Yönelik Yapılan Çalışmalar

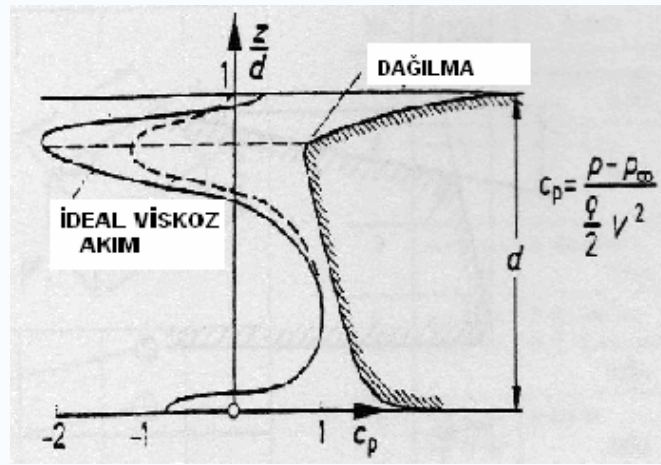
Bu çalışmada taşıt ön formundaki değişimin taşıt performansına ve yakıt tüketimine etkileri analizlerle incelendiğinden, burada benzer çalışmalara yer verilecektir.

Taşıt ön formunu kabaca dikdörtgenler prizmasına benzetilecek olunursa, Şekil 2.24’de gösterildiği üzere hava akımı prizmanın çevresinden geçmektedir. Şekilde prizmanın ön kısmında ölü nokta oluşmaktadır. Bunun nedeni, prizmanın alt yüzeyinin yola yakınlığı olup, hava akımının, aracın alt tarafı yerine aracın üst ve yan taraflarına doğru akma eğilimi içerisinde olmasındandır. Hava akımının ön tarafından üst ve yan yüzeylere geçişte kaput, çamurluklar ve ön yüzeylerle olan kesişim bölgeleri olan, köşelerde hava akımında önemli derecede sapmalar meydana gelmektedir.



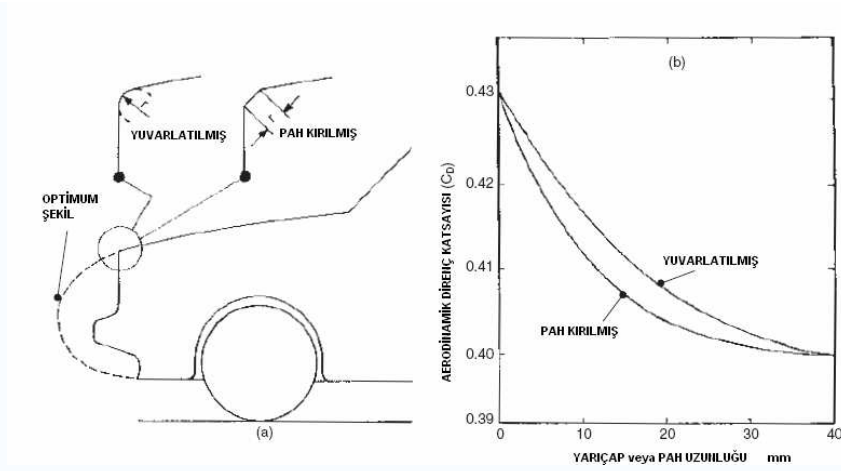
Şekil 2.24 Otomobilin ön formu dikdörtgenler prizması şeklinde temsil edilişi

Özel ölçülemeler hariç bu tür bir akış, akımda sapmalara neden olacaktır. Yani bu durum, taşıtın ön tarafının köşelerine yakın yerlerde ki basınç dağılımı, ideal akış formundan sapmasına neden olacaktır. Şekil 2.25 de otomobilin ön formunda ideal vizkoz akışına göre, gerçek basınç dağılımı gösterilmiştir.(HUCHO 1998)



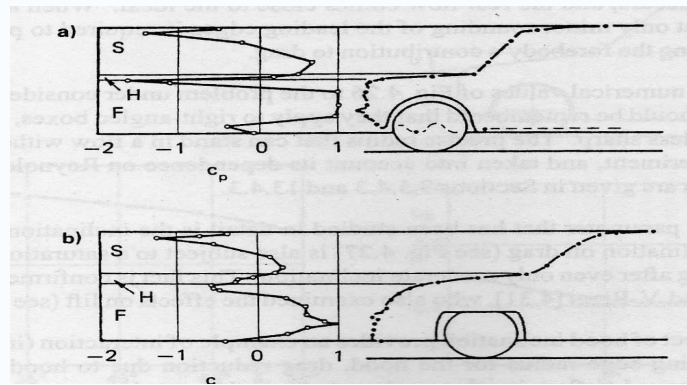
Şekil 2.25 Otomobil ön formuna göre dikine gerçek dağılımlı akım için ve ideal akım için basınç dağılımı

Bu akım sonucu taşıtın ön formunda oluşan basınç kuvveti ideal akış esnasında meydana gelenden daha büyüktür ve bunun sonucu direnç bileşenleri üretilir. Şekil 2.26.'da Taşıt ön formunun aerodinamik dirence etkisi görülmektedir.(HEISLER 2002)



Şekil 2.26 Taşıt ön formunda keskin köşe ve yuvarlatılmış köşenin  $C_D$ 'ye etkisi(HEISLER 2002)

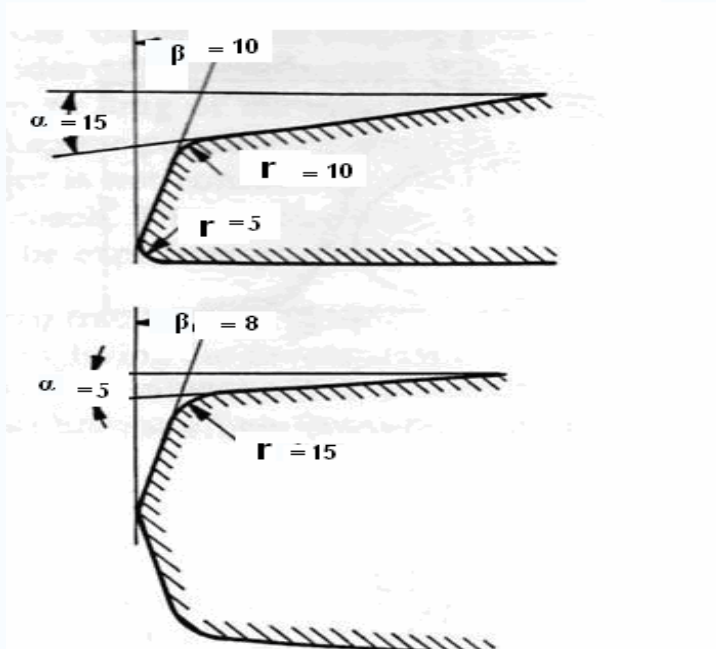
Basınç dağılım ölçüsünün taşıt geometrisinden nasıl etkilendiği Şekil 2.27'deki araç formlarından görülebilir.



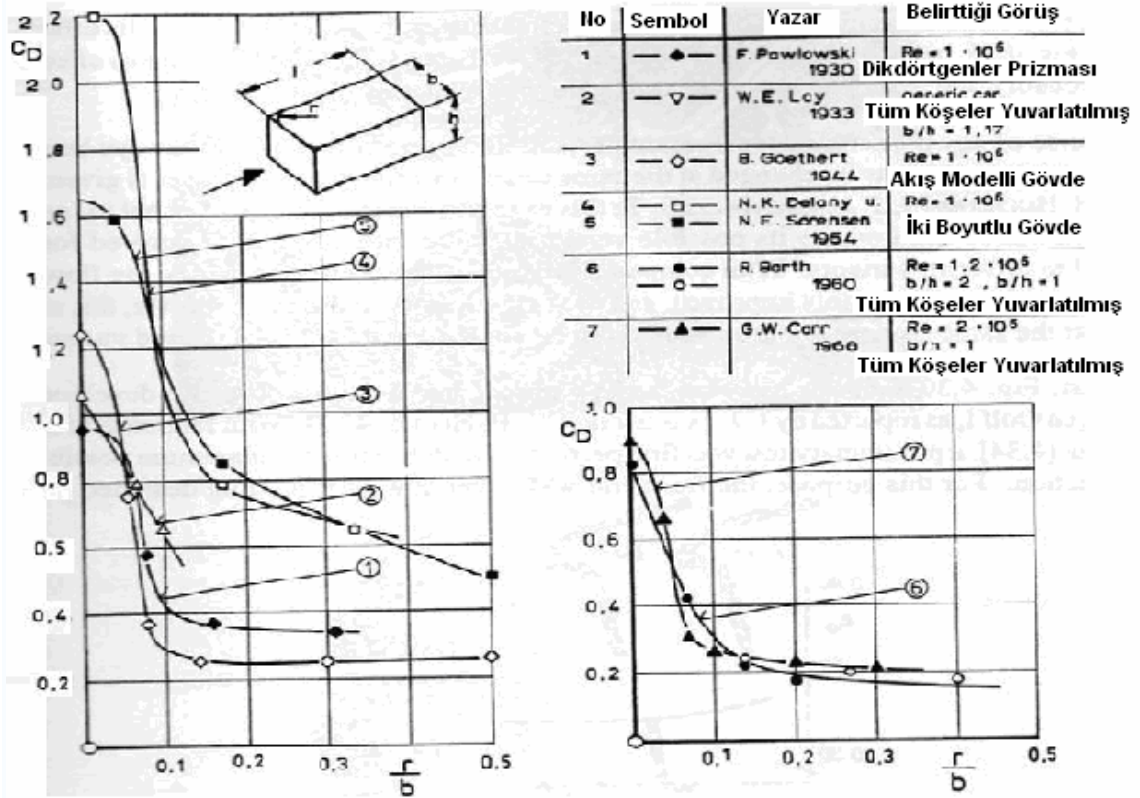
Şekil 2.27 Dikine kesite basınç dağılımı a) keskin köşeli form, b) ön tarafı Yuvarlatılmış forma sahip araç(HUCHO 1998)

Şekil 2.28’ de ise hava akımının dağılımına, etki eden taşıtın ön formuna ait olan dikey kesiti, verilmiştir. Burada basınç dağılımına etki eden faktörlerden tampon ve spoiler(rüzgar dağıtıcı) hariç araç ön formun sağa doğru yaptığı açı, kaput eğimi ve kaputla ön yüzey arasında ki köşenin yarıçap değerleri basınç dağılımını doğrudan etkileyen şekilsel faktörlerdir.

Bu parametrelerden köşe yarıçapı bilindiği takdirde gerekli datalar kolayca elde edilebilir. Bununla ilgili olarak Şekil 2.29’da köşe yarıçapıyla  $C_D$  nin değişimi, deneysel sonuçlardan elde edilmiş ve özetlenmiştir. Şekil incelenirse yarıçapın artmasıyla konuyla ilgili şekle ait direncin ilk olarak hızlıca düştüğü, belirli bir noktadan sonra ise direncin sabit kaldığı görülmektedir. Bu sonuçlardan; elde edilen dataları otomobile uyguladığımızda otomobil ön formundaki keskin köşelerin yuvarlatılması hava direncini bir aşamaya kadar önemli ölçüde düşürmektedir.

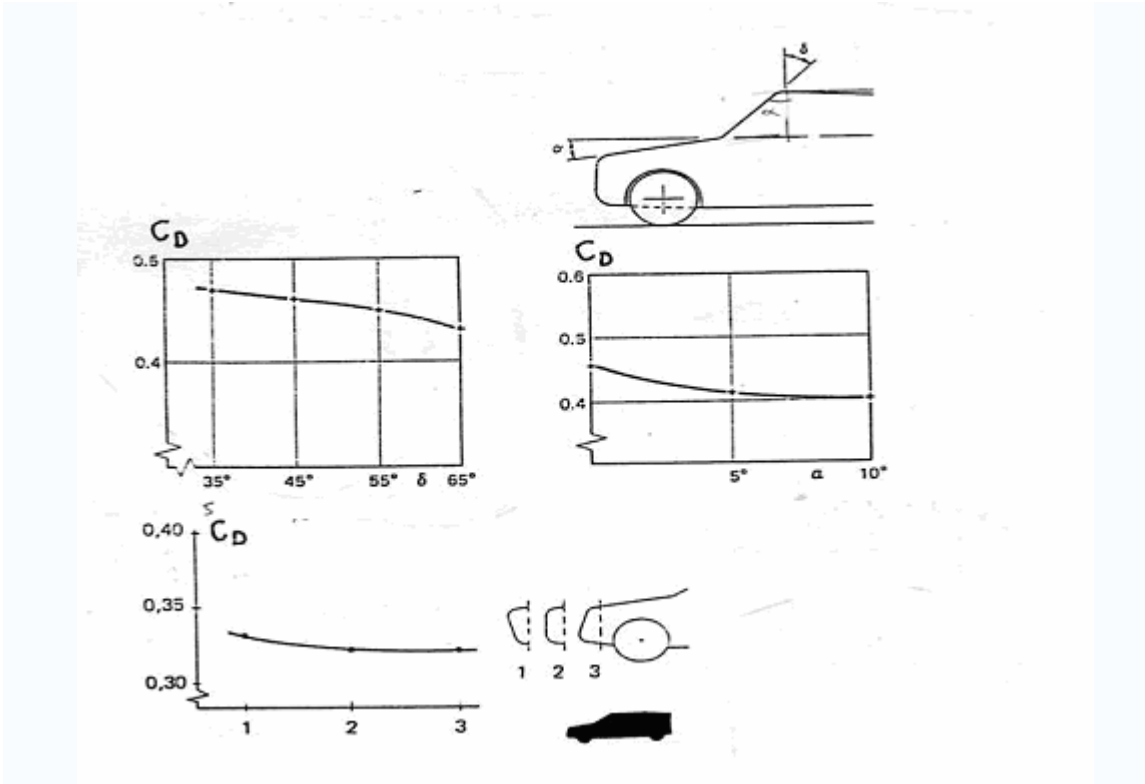


Şekil 2.28 Basınç dağılımını etkileyen ve taşıt ön formunu oluşturan tampon ve spoiler hariç parametreler



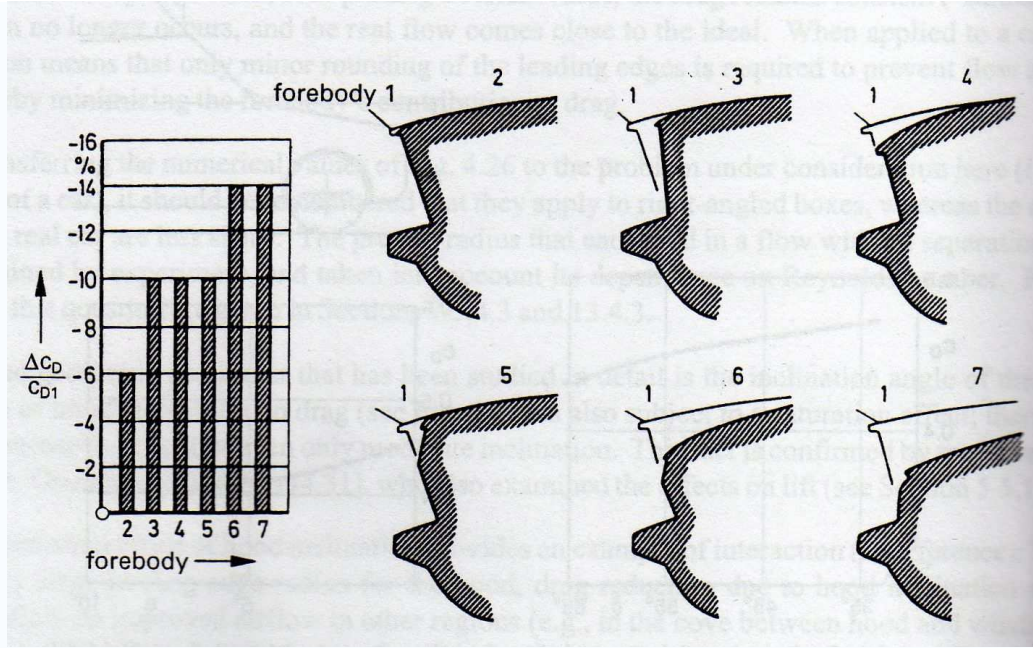
Şekil 2.29 Dikdörtgenler prizması formundaki şeklin aerodinamik direncinin köşe yarıçaplarıyla değişimi(HUCHO 1998)

İkinci geometrik parametre ise kaput eğim açısıdır. Bu parametrenin aerodinamik dirence etkisi şekil 2.30'da gösterilmiştir. Burada belirli bir açıdan sonra aerodinamik dirençte başka bir azalma olmaz. Ayrıca Şekil 2.30'da taşıt ön yüzey şekline göre, direnç değişimi verilmiştir.

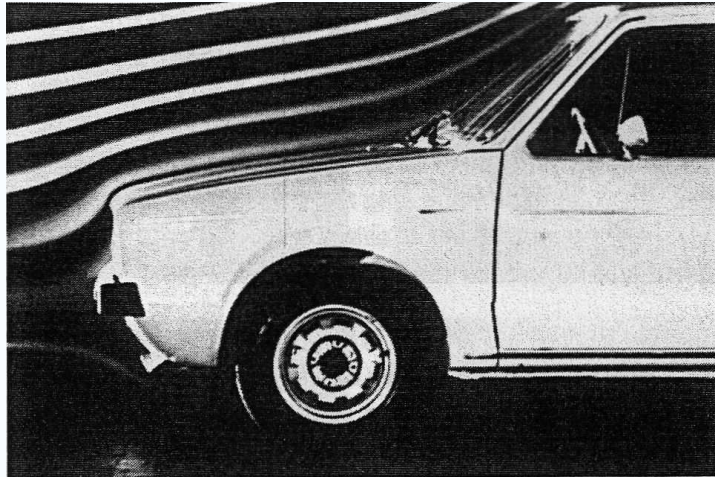


Şekil 2.30 Direnç kuvveti katsayısının otomobil ön formuyla değişimi(HUCHO 1998)

Bir başka çalışma ise W.H.HUCHO tarafından yapılan çalışmadır. Bu çalışma şekil 2.31'de gösterilmiştir. Bu çalışmaya göre temel şekil olarak bir otomobil ön formu seçilmiş ve ön formunda küçük değişiklikler yapılmıştır. Bu değiştirilmiş formların testinden elde edilen direnç miktarları Şekil 2.31'de gösterilmiştir. Bunun dışında yine benzer bir çalışmayı Volkswagen firması Golf marka otomobillerinde uygulamıştır. Bununla ilgili direnç katsayılarındaki değişim şekil 2.32'de gösterilmiştir.



Şekil 2.31 Otomobil Ön Formundaki Değişikliklerin  $C_D$  değişimine etkisi (HUCHO, 1998).



Şekil 2.32 Volkswagen Golf otomobilinin ön tarafının optimizasyonu (HUCHO, 1998).



## BÖLÜM 3

### HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

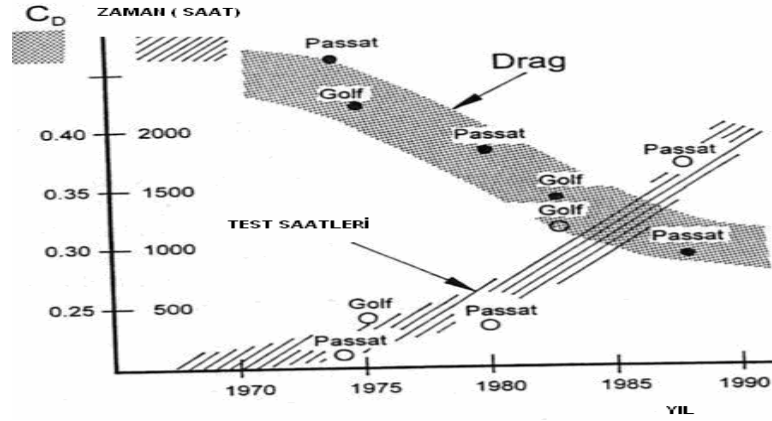
Endüstride, otomobil aerodinamiğini geliştirmede kullanılan geleneksel kestirimci yöntemler, rüzgar tünelleri ve yol testleridir. Gerçek boyutlara sahip araçlar için yapılan rüzgar tünellerini inşa etmek ve işletmek oldukça pahalı bir yöntemdir.

Yol testleri araç sürüş şartları içinde son derece gerçekçi sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte gözlemlenen deneysel çalışmalarda değişen rüzgar koşulları sağlıklı ve kesin sonuçlar almayı zorlaştırmaktadır.

Tüketici talepleri doğrultusunda rekabet içersinde olan üreticiler, bugün hızla büyüyerek daha ekonomik, daha güvenli ve daha konforlu araçlar geliştirmek zorundadır. Yalnızca rüzgar tüneli ve yol test tekniklerini kullanmak uzun geliştirme periyotlarına yol açar buda araştırma geliştirmede zaman kaybına yol açar. Bundan dolayı araştırma geliştirmede bilgisayarlar ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği(CFD) kullanımına ağırlık verilmiştir. Bu metotla rüzgar tüneli testleri, simule edilmiştir. Sonuç olarak CFD yavaşça aerodinamik dizaynın temel aracı haline gelmektedir. Rüzgar tünelleri ve CFD simülatörlerini karşılaştırsak rüzgar tüneli analog, CFD ise dijitaldir. Karakteristikleri ve farklılıkları birbirleri ile rekabet etmekten çok birbirlerini tamamlayıcı roledirler. Birbiriyle ilişkili bu simülasyon teknikleri ihtiyaçlar doğrultusunda zaman içersinde değişecektir.

CFD yakın zaman içersinde otomobil aerodinamiğinin problemlerinin çözümünde önemli roller oynamıştır. Bu etkileyici performansından sonra havacılık endüstrisinde kullanılan yöntemlerden rüzgar tüneli ve uçuş testleri arasına girerek vazgeçilmezler arasına girmiştir.

Ekonomik boyutuyla ilgili olarak modern otomobillerin geliştirmesinde kullanılan rüzgar tünellerinde ki test sürelerinin artması Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Burada CFD rüzgar tünellerine göre oldukça ekonomik görünmektedir. Her ne kadar rüzgar tünellerinde uzun test süreleri olsa da diğer test tekniklerine göre, elde edilen veriler sağlamlık açısından daha iyidir ve gelişen bilgisayar teknolojisiyle birlikte, daha ekonomik hale gelmiştir.



Şekil 3.1 Direnç katsayısına göre rüzgar tüneli test saatlerinin değişim süreci (HUCHO 1998)

Özetleyecek olursak CFD bilgisayar ortamında yapılan bir simülasyon ve tasarım programıdır. CFD akışkanları (gazlar,sıvılar), ısı iletimini ve bunlara bağlı olarak kimyasal tepkileri, bilgisayar ortamında analiz eder. CFD tekniği çok güçlü bir çalışma programıdır ve geniş bir kullanım alanını kapsar. Sisteme dışarıdan dahil edilen bir CAD paketinde bulunan veya yeni tasarlanan bir geometri programı CFD prosesinin başlangıcıdır. 3 boyutlu CAD çalışılacak çerçeveyi oluşturur ve bu çerçeve içine bir ağ tasarlanır. Bir yarış aracı tasarımında küçük hücrelerden milyonlarca bulunabilir. Daha sonra bir CFD kodu akışkanın belirleyici Navier-Stokes denklemlerini (Navier -Stokes Denklemleri, akışkanların tanımını yapan temel üçüncü derece denklemlerdir) ağındaki tüm hücrelere uyarlar.(HUCHO 1998)

Bu denklemler

- Lineer metotlar (vortex kafes ve panel metotları)
- Nonlineer Metotlar(1.Euler Metotları, Kararlı Akış, Kararsız akış metotları)

Bilgisayar prosesi, tüm hücreler arasında çaprazlama haberleşip, bilgi iletir ve sorunları çözene kadar, bunu tekrarlayıcı olarak yapar. Bu işlemlerden sonra tüm akışkan etki alanının ve her bir hücre yapısının içinde güçler ve kütle akışkanlığı dengelenir. Hesaplama tamamlandığında, CFD çözümü, incelenen parçanın yüzeyinde ve yüzeye yakın alanlarda oluşan tüm basınçları ve hızları içerir ve bu genelde milyonlarca sayıdan oluşur. (HUCHO 1998)

Bu sayıların oluşturduğu data büyüklüğü anlamsız gelebilir ama bilgisayar görselliği (Canlandırma) bu devasa alanla başa çıkmak için geliştirilmektedir.

CFD kodları tarafından oluşturulan data zenginliği etkileşimini, araştırmak için mühendisler bilgisayar ortamında modern canlandırma programlarına gereksinim duyarlar. Canlandırma CFD potansiyelini, tam ortaya çıkarmakta, anahtar rol üstlenir. Maksimum aerodinamik verimlilik araştırmalarında, CFD nin hızlı tasarım analizi, hava akımlarının daha iyi anlaşılmasıyla birlikte performans artışı ve rekabet ortamı, verimi yüksek ürünlerin oluşmasına yol açmaktadır.

### 3.1 Diferansiyel Denklemler

Diferansiyel denklemler, uygulamalı matematiğin çok önemli kollarından biri olup, bir çok pratik problemin çözümünde önemli bir araçtır. Bu problemlere örnek olarak salınım problemleri, roket, uydu ve gezegenlerin hareketleri, kimyasal reaksiyonlar, radyoaktif maddelerin parçalanması problemleri vb. gösterilebilir.

Diferansiyel denklemler temel olarak iki kola ayrılırlar:

#### 3.1.1 Normal diferansiyel denklemler (veya adi diferansiyel denklemler)

Tek değişkenli fonksiyonların türevlerini ilişkilendiren diferansiyel denklem çeşididir. Adi diferansiyel denklemler adı daha yaygındır. Kapalı olarak  $f(y', y'', \dots, y^{(n)}, y) = 0$  şeklinde gösterilirler. Bu ifadede  $n$  denklemin derecesini gösterir. Denklemler yapılarına göre doğrusal veya doğrusal olmayan şekilde sınıflandırılabilir.

Bir diferansiyel denklemin çözümü sonsuz sayıdadır, ancak başlangıç koşulları veya sınır değerleri verilerek çözümde teklik sağlanır. Her bir türetme bir belirsizlik yaratacağından denklemin çözümünün tekliği için, denklemin derecesinden küçük olmak kaydıyla, türev sayısı kadar başlangıç veya sınır koşulu olmalıdır.

### 3.1.2 Kısmi diferansiyel denklemler .

Diferansiyel denklemler bilinmeyenlerin birbirleri ve katsayılarla ilgili konumlarına göre, lineer diferansiyel denklemler, lineer olmayan diferansiyel denklemler olarak da gruplanmaktadır. Lineer denklemlerin teorisi gelişmiş olmasına rağmen doğrusal olmayan denklemlerin keyfiyet analizi zordur ve bazen mümkün değildir. Bu durumlarda sayısal analiz teknikleri uygulanır.

### 3.1.3 Navier-Stokes denklemleri

Bu denklemler; akışkan içerisindeki birim kütleye etki eden momentum (ivmelenme) değişimlerinin, basınç değişimleri ve sürtünme kayıplarına neden olan viskoz kuvvetlerin (sürtünmeye benzer) toplamına eşit olduğunun doğruluğunu ortaya koymaktadır. Bu viskoz kuvvetler moleküller arası etkileşimlerden meydana gelmekte ve akışkanın ne kadar yapışkan (viskoz) olduğunu göstermektedir. Böylece, Navier-Stokes denklemlerinin, verilen akışkanın herhangi bir bölgesindeki kuvvetler dengesinin dinamik ifadesi olduğu söylenebilir.

Bu denklemler en kullanışlı denklemlerin başında gelmektedirler. Çünkü, gerek akademik gerekse ekonomik birçok fenomenin fiziğini açıklamaktadır. Hava akımları ve okyanus akıntılarının, boru içindeki su akışının, galaksideki yıldız hareketlerinin, kanat etrafındaki hava akımlarının modellenmesinde ve hesaplarında sıkça kullanılırlar

Navier-Stokes denklemlerinin detayına girmeden önce, akışkanlar hakkında bazı kabuller yapılması gereklidir. Öncelikle akışkanın sürekli olduğu kabul edilir. Yani akışkanın tamamının aynı özellikte olduğu içinde farklı biçimler (formlar) bulunmadığı kabul edilir. Bir başka gerekli kabulde konu ile ilgili tüm alanların basınç, hız, yoğunluk, sıcaklık vs. , diferansiyel olduğudur. (faz değişimleri olmadan)

Denklemler, momentum ve enerji ve kütle korunumunun temel prensiplerinden elde edilir. Bunun için, bazı hallerde kontrol hacmi adı verilen, rastgele seçilmiş sonlu bir hacim belirlemek gereklidir, bu hacim üzerinde bu prensipler kolayca uygulanabilir. Bu sonlu hacim  $\Omega$  ile gösterilir ve yüzeyi sınırlandırılır. Kontrol hacmi, sabit kalabilir veya akışkan ile hareket edebilir. Temel kabuller bunlardır, bununla beraber, farklı uygulamalarda özel kabullerde yapılabilir.

### 3.2 Gerçek Türev

Hareket eden akışkanın özelliklerinin değişiminin ölçülebilmesi için iki yol vardır. Örneğin dünya atmosferindeki rüzgar hızının değişimleri ele alınacak olursa; bu değişiklikler bir meteoroloji istasyonu ölçüm cihazı (anemometre) veya bir hava balonu yolu ile ölçülebilir. Şüphesiz, ilk durumdaki anemometre boşlukta sabit bir nokta boyunca geçiş yapan tüm hareketli parçacıkların hızını ölçerken, ikinci durumda bahsedilen aygıt akışkan ile beraber hareket ederken hızdaki değişimi ölçer.

Aynı durumda, yoğunluk, sıcaklık vb. değişimlerde ölçümü etkileyecektir. Bu nedenle, bu iki hal için bir ayırım yapılmalıdır. Bir alanın boşluktaki sabit bir pozisyona göre türevi *uzaysal (spatial)* veya *Euleryen türev (Eulerian derivative)* olarak adlandırılır. Hareketli bir parçacığın izlenmesi türevi *gerçek (substantive)*, *Lagrangyan (Lagrangian)* veya *maddi (material)* türev olarak adlandırılır.

Gerçek türev şu şekilde tanımlanır:

$$\frac{D}{Dt} (*) \equiv \frac{\partial (*)}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla (*) \quad (3.1)$$

Burada  $\mathbf{V}$  akışkanın hızıdır. Denklemin sağ tarafındaki ilk terim alışılmış Euleryen türevi (sabit bir referans üzerindeki türev) iken, ikinci terim akışkan hareketi ile oluşan değişiklikleri ifade eder. Bu etki adeksiyon olarak adlandırılır.

### 3.3 Korunum Kanunları

*Navier-Stokes denklemleri*, aşağıdaki korunum kanunlarından türetilir:

- Kütle
- Enerji
- Momentum
- Açısal momentum

Ek olarak, akışkan için bir durum denklemleri bağıntısı kabulü yapılması gereklidir

En genel biçimde, bir korunum kanunu şunu ifade eder, bir kontrol hacmi üzerinde tanımlanmış hacim özelliği (bulk property) değişiminin oranı  $L$  hacim sınırları boyunca hareket eden akışkanın dışarı taşıdığı kayıp ve artı kontrol hacminin iç tarafındaki kazançlar ve kayıplara eşit kabul edilir. Bu, aşağıdaki integral denklemi ile ifade edilir.

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} L d\Omega = - \int_{\partial\Omega} Lv \cdot d\partial\Omega + \int_{\Omega} Q d\Omega \quad (3.2)$$

Bu denklemde  $\mathbf{v}$  akışkanın hızı ve  $Q$  akışkan içindeki kazançlar ve kayıplar olarak ifade edilir.

Eğer kontrol hacmi boşluk içinde sabitlenmiş ise bu integral denklemden aşağıdaki şekilde bir ifade yazılabilir.

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} L d\Omega = - \int_{\Omega} \nabla \cdot (Lv) d\Omega + \int_{\Omega} Q d\Omega \quad (3.3)$$

Ayrıca, kontrol hacminin içinde, bu son denklemde elde edilmiş olan sağ taraftaki ilk terimin ifade edilmesi için diverjans teoremi kullanılmıştır. Böylece:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} L d\Omega = - \int_{\Omega} (\nabla \cdot (Lv) - Q) d\Omega \quad (3.4)$$

Yukarıdaki ifade boşlukta sabit kalan bir kontrol hacminde  $\Omega$  için geçerlidir. Çünkü  $\Omega$  zaman içinde sabittir, değişmez. Bu sayede " $\frac{d}{dt}$ " ve " $\int_{\Omega} d\Omega$ " ifadeleri birbirinin yerine yazılabilir. Böylece ifade *tüm* alanlar için geçerli olur, ve integral çıkartılabilir.

Gerçek türev,  $Q = 0$  olduğunda (kazanç ve kayıp yokken) elde edilir.

$$\frac{\partial}{\partial t} L + \nabla \cdot (Lv) = \frac{D}{Dt} L + L(\nabla \cdot \mathbf{v}) = 0 \quad (3.5)$$

### 3.4 Süreklilik Denklemi

Kütlenin korunumu şu şekilde yazılır:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) &= 0 \\
 &= \frac{\partial}{\partial t} + \rho \nabla \cdot v + v \cdot \nabla \rho \\
 \frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot v &= 0
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Burada  $\rho$  kütle yoğunluğu (birim hacim başına kütle),  $v$  akışkanın hızıdır.

Sıkıştırılamaz bir akışkan için  $\rho$  akış hattı boyunca değişmez ve denklem şu hale indirgenir:

$$\nabla \cdot v = 0 \tag{3.7}$$

### 3.5 Momentumun Korunumu

Momentumun korunumu, yoğunluk yerine momentumun vektör bileşenleri ve akışkan üzerine etkiyen kuvvetler ile, süreklilik denkleminde benzer bir yaklaşım yapılarak ifade edilir. Süreklilik denkleminde  $\rho$  yerine belirli bir yönde birim hacim başına net momentum yazılır,  $\rho v_i$ , burada  $v_i$  hızın  $i^{th}$  bileşenidir. (hız  $x$ ,  $y$  veya  $z$  yönleri boyunca olmak üzere)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + \nabla \cdot (\rho v_i v) = \rho f_i \tag{3.8}$$

$\rho f_i$ , akışkan üzerine etkiyen kuvvetin  $i^{th}$  bileşenidir (her birim hacim başına gerçek kuvvet). Genel kuvvetler yerçekimi ve basınç gradyenlerini kapsar. Bu şu şekilde de ifade edilebilir:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \nabla \cdot (\rho v \otimes v) = \rho f \tag{3.9}$$

Ayrıca,  $\mathbf{V} \otimes \mathbf{V}$  bir tensor'dür,  $\otimes$  tensor çarpımını ifade eder.

Süreklilik denkleminin kullanımı daha da basitleştirilebilir ve şu hale gelir:

$$\rho \frac{Dv_i}{Dt} = \rho f_i \quad (3.10)$$

Genel kullanımda aşağıdaki gibi de yazılabilir

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho f \quad (3.11)$$

Bu bağlamda  $\mathbf{F} = \rho \mathbf{a}$  ifadesi doğrulanmış olur.

### 3.6 Denklemlerin Elde Edilişi

Momentumun korunumu için Navier-Stokes denklemlerinin genel biçimi :

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \nabla \cdot \mathbb{P} + \rho \cdot f \quad (3.12)$$

Burada  $\rho$  akışkan yoğunluğu,  $v$  hız vektörü ve  $f$  kütle kuvvet vektörüdür.

$\mathbb{P}$  tensörü, akışkan parçacığı üzerine uygulanmış yüzey kuvvetleri olarak tanımlanır (gerilme tensörü). Akışkan girdap gibi bağımsız bir eğme bükme hareketi yapmadıkça,  $\mathbb{P}$  simetrik bir tensördür. Genel olarak, biçim:

$$\mathbb{P} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{xx} + p & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} + p & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} + p \end{pmatrix}$$

Burada  $\sigma$  normal gerilmeler,  $\tau$  teğetsel gerilmeler (kesme gerilmeleri) ve  $p$  gerilme tensörünün izotropik parçası ile birleştirilmiş statik basınçtır.

$\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}$  matris izi (İng. *trace*) akışkanın dengede olup, olmadığı mutlaka tanımlanması (hacim vizkozitesi (bulk viscosity) olmadıkça) ile *daima*  $-3p$ 'dir.

Sonuç olarak:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbb{T} + \rho \cdot f \quad (3.15)$$

Burada  $\mathbb{T}$ ,  $\mathbb{P}$  'nin izsiz (traceless) parçasıdır.



Bu denklemler hala tamamlanmamıştır. Tamamlamak için,  $\mathbb{P}$  'nin şekli üzerinde bir varsayım yapılmalıdır, şöyleki, gerilme tensörü için aşağıda gösterildiği gibi bir süreklilik kanununa ihtiyaç vardır.

Akış, sürekli ve diferansiyel kabul edilmiş ve korunum kanunları çerçevesinde kısmi diferansiyel denklemler ile ifade edilmiştir. Akışın sıkıştırılmaz (sabit yoğunluk) olduğu durumda, değişkenler, basınç ve hız bileşenleri için çözülmüştür. Bu değişkenler, *Navier-Stokes denklemlerinin* üç bileşeni, kütle korunumu (süreklilik denklemi) ilave edilerek, kapalı bir sistem için kısmi diferansiyel denklemler ile, sınır şartlarına uygun olarak çözülebilir. Sıkıştırılmaz akış durumunda, yoğunluk sistem için diğer bir bilinmeyen haline gelir, sistem için bir durum denklemi ilavesi ile saptanır. Durum denkleminde genelde akışkanın sıcaklığı için içine girer, o yüzden denklem enerjinin korunumu için de mutlaka çözülmelidir. Bu denklemler non-lineer'dir (yani lineer değildir) ve kapalı formdaki analitik çözümleri sadece çok basit sınır şartları için bilinir.

Denklemler, akım ve girdap fonksiyonu ikinci değişkenleri için Wilkinson denklemlerine dönüştürülebilir. Çözüm akışkan özelliklerine (viskozite, özgül ısı ve ısı iletkenlik gibi) ve çalışma alanındaki sınır şartlarına bağlıdır.

### 3.6.1 Denklemlerin özel formları

Denklemler akışkanlarla ilgili problemlerin çözümü için, genel bazı durumlar için sadeleştirilip, genelleştirilerek kullanılabilir.

Newtonyen (Newtonian) akışkanlar

Newtonyen akışkanlar için:

$$p_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \nabla \cdot \mathbf{v} \right) \quad (3.17)$$

Burada

$\mu$  akışkanın vizkozitesidir.

$\delta_{ij}$  ise Kronecker delta olarak adlandırılan matematik işlemini ifade eder.(1 için  $i=j$ ; 0 için  $i \neq j$ ).

Buradan denklemi türetebilmek için, öncelikle denge hali ifade edilir,  $p_{ij} = -p\delta_{ij}$ . Newtonyen bir akışkan için, bu denge değerinden gerilim tensörünün sapması, hızın gradyeni içinde lineerdir. Galile sabiti (Galilean covariance) nedeni ile açık şekilde hız üzerinde bağımlı değildir. Diğer bir ifade ile,  $p_{ij} + p\delta_{ij}$ ,  $\partial_i v_j$  de lineerdir. Akışkanların dönme sabiti belirlenir (*sıvı kristal (liquid crystal) olmayanlar*).  $p_{ij} + p\delta_{ij}$  izli ve izsiz simetrik tensörlerine ayrılır. Benzer olarak  $\partial_i v_j$  izli, izsiz simetrik ve antisimetrik tensorlere ayrılır. Antisimetrik parça sıfıra gider, izli parça ve izsiz simetrik parçaya uygun iki katsayı vardır.  $\partial_i v_j$  nin izsiz simetrik parçası,

$$\partial_i v_j + \partial_j v_i - \frac{2}{d} \delta_{ij} \partial_k v_k \quad (3.18)$$

dir, burada  $d$  uzaysal ölçü sayısıdır ve izli parça  $\delta_{ij} \partial_k v_k$  dir. Bu nedenle, en genel lineer dönme sabiti şu şekilde verilir;

$$p_{ij} + p\delta_{ij} = \mu \left( \partial_i v_j + \partial_j v_i - \frac{2}{d} \delta_{ij} \nabla \cdot v \right) + \mu_B \delta_{ij} \nabla \cdot v \quad (3.19)$$

$\mu$  ve  $\mu_B$  bazı katsayılarıdır.  $\mu$  kesme viskozitesi (shear viscosity) ve  $\mu_B$  hacim viskozitesi (bulk viscosity) olarak adlandırılır. Bu ampirik (deneysel) bir incelemedir, hacim viskozitesi çoğu akışkan için ihmal edilebilir, bu nedenle çoğu zaman ihmal edilir.

Denklem içinde  $-2/3$  ile çarpım görünmesi bununla açıklanır. Bu çarpım, 1 veya 2 uzaysal boyut içinde değiştirilebilir.

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v \right) = \rho \cdot f - \nabla p + \mu \left( \nabla^2 v + \frac{1}{3} \nabla (\nabla \cdot v) \right) \quad (3.20)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{1}{3} \frac{\partial^2 v_j}{\partial x_i \partial x_j} \right) \dots \quad (3.21)$$

Burada, *Einstein notasyonu* kullanılmıştır.

Tamamı için yazıldığında, bu karmaşık denklem şu hali alır:

Momentumun korunumu:

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = k_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \cdot \left( 2 \cdot \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \cdot (\nabla \cdot v) \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.21)$$

Kütleinin korunumu:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} = 0 \quad (3.22)$$

Yoğunluk bilinmediği zaman, diğer bir denklem gereklidir.

Enerjinin korunumu:

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial e}{\partial t} + u \frac{\partial e}{\partial x} + v \frac{\partial e}{\partial y} + w \frac{\partial e}{\partial z} \right) = \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) \\ - p \cdot (\nabla \cdot v) + k \cdot v + \rho \cdot q_s + \mu \cdot \Phi \end{aligned} \quad (3.23)$$

İdeal gaz kabul edilir:

$$e = c_p \cdot T - \frac{p}{\rho} \quad (3.24)$$

Altı bilinmeyen (u, v, w, T, e and  $\rho$ ) ve altı denklemden oluşan yukarıdaki gibi bir çözüm sistemi elde edilmiş olur.

### Bingham akışkanları

Bingham akışkanlarında, bazı yerlerde durum biraz daha farklıdır:

$$\tau_{ij} = \tau_o + \mu \frac{\partial v_i}{\partial x_j}, \frac{\partial v_i}{\partial x_j} > 0 \quad (3.25)$$

Bunlar, akış başlamadan önce bir miktar kesme dayanım kabiliyetleri olan akışkanlardır. Örnek olarak, *diş macunu* verilebilir.

### Güç yasası (Power-law fluid)

Bu akışkan, kesme gerilimi için, ideal hal almış akışkandır,  $\tau$  şu şekilde verilir;

$$\tau = K \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^n \quad (3.26)$$

Bu form, hemen hemen genel akışkanların tüm çeşitlerine uygulanır.

### Sıkıştırılmaz akışkanlar

Navier-Stokes denklemleri,

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ 2\mu \left( e_{ij} - \frac{\Delta \delta_{ij}}{3} \right) \right] \quad (3.25)$$

momentumun korunumu ve kütle korunumu için

$$\nabla \cdot v = 0$$

Burada

$\rho$  yoğunluk,

$u_i$  ( $i = 1,2,3$ ) hızın üç bileşeni,

$f_i$  gövde kuvvetleri (yerçekimi gibi),

$p$  basınç,

$\mu$  akışkanın o noktadaki dinamik viskozitesi;

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad (3.26)$$

$\Delta = e_{ii}$  diverjans,

$\delta_{ij}$  Kronecker delta.

Eğer,  $\mu$  akışkan üzerinde eşit dağılmış ise, momentum denklemi üzerinde şu basitleştirmeler yapılır:

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{1}{3} \frac{\partial \Delta}{\partial x_i} \right) \quad (3.27)$$

(Eğer  $\mu = 0$  fakat akışkan sıkıştırılabilir ise sonuçta Euler denklemleri olarak bilinen denklemler elde edilir; burada, önemli olan sıkıştırılabilir akış ve akış içindeki şok dalgalarıdır.

Ek olarak, eğer  $\rho$  sabit farzedilirse şu sistem elde edilir:

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) &= \mu \left[ \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x \\ \rho \left( \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) &= \mu \left[ \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y \\ \rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &= \mu \left[ \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z \end{aligned} \quad (3.28)$$

Süreklilik denklemi (sıkıştırılamazlık kabulü ile):

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (3.29)$$

Silindirik koordinatlar

Navier-Stokes Süreklilik denklemi silindirik koordinatlar için şöyledir:

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (3.30)$$

Silindirik koordinatlar için Navier-Stokes denklemleri de şu şekilde yazılır:

momentum:

$$\rho \left( \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\theta^2}{r} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left[ \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right] + F_r \quad (3.30a)$$

$\theta$  momentum:

$$\rho \left( \frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_r u_\theta}{r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu \left[ \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right] + F_\theta \quad (3.30b)$$

$z$  momentum:



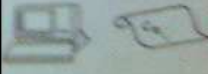
$$\rho \left( \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[ \frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right] + F_z \quad (3.30c)$$

Navier-Stokes denklemleri, akışkan akışını sadece yaklaşık olarak tanımlayabilir ve çok küçük ölçeklerde veya sıradışı şartlarda, gerçek akışkanlar diğer maddeleri ve molekülleri içeren karışımlardır, Navier-Stokes denklemleri ile homojen ve sürekli akışlar modellenmiş ve bunun üzerinden sonuçlar elde edilmiştir. Bununla beraber Navier-Stokes denklemleri pratikteki problemlerin çözümü için, geniş bir aralıkta faydalı olur.

### 3.7 CFD Hesaplamasının Temel Adımları

Temel adımları üç ana grup altında toplanırsa

- a) Hesaplanacak alan, hacim vb.(ön işlem)
- b) Aerodinamik hesaplama (çözümleme)
- c) Nümerik sonuçların grafiksel gösterimi (son işlem)

a	Ağ Yapısının Oluşturulması	Ön İşlem	
b	Çözümleme	Bilgisayar	
c	Analiz	Sonuçlar	

Şekil 3.2 CFD hesaplamasının temel adımları

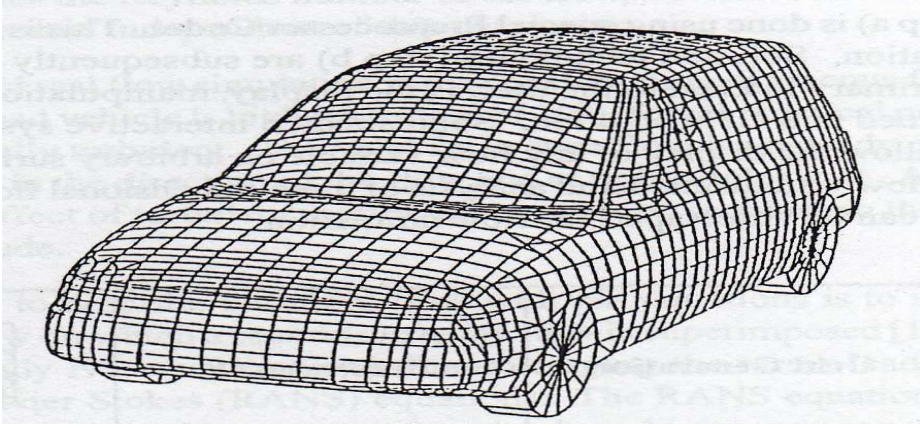
#### 3.7.1 Üç Boyutlu ağ yapısının oluşturulması

CFD hesaplamasından önce en önemli ihtiyaç kullanılabilir uygun bir ağ yapısı(grid ,mesh) hazırlamaktır. Bu ağ veya ızgara, küçük parçacıklardan meydana gelen bir yapıdır ve bu yapı akışkanın içinden geçeceği boşluğu doldurur.

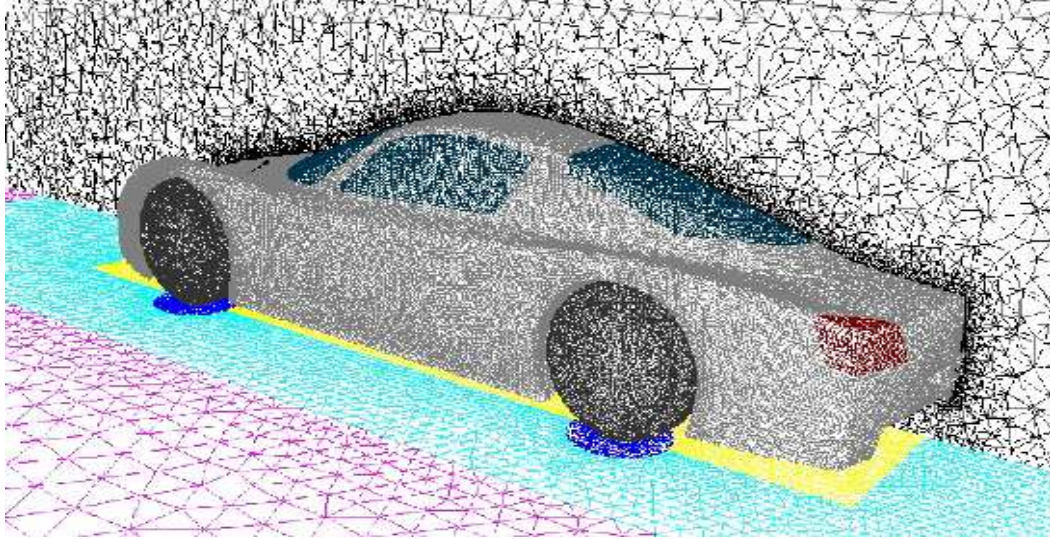
Ağ yapısının oluşturulması aerodinamikle ilgili olmayıp, akış çözümü esnasında kullanılacak olan geometrik bilgileri içerir.

Lineer metotlardan panel metot şekil 3.3' te otomobil CAD modeli yapılmış yüzeyinde ağ tabakası oluşturulmuştur.

Şekil 3.4'te ise otomobil sınır tabakayla birlikte ağ yapısı oluşturulmuş, burada sadece otomobil değil, otomobilin çevre sınır tabakasında oluşturduğu etkileri de hesaplanabilir. Bu tezde buna benzer bir yaklaşım sergilenmiştir.



Şekil 3.3 Otomobil yüzeyinde ağ yapısı oluşturulmuş



Şekil 3.4 Otomobilin sınır tabakayla birlikte uzaysal ağ yapısının Euler veya Navier-Stokes yöntemlerine göre hesaplanması

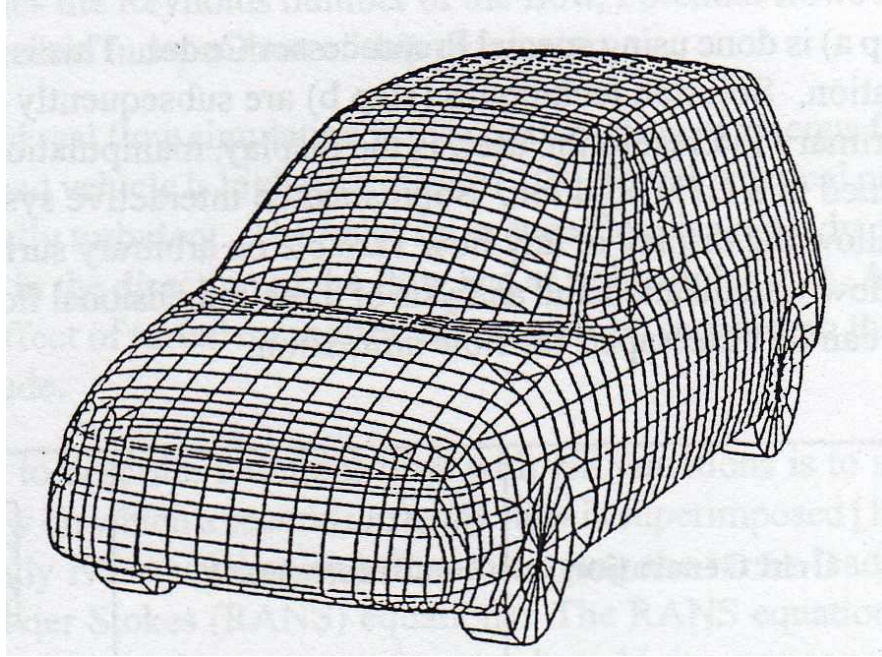


### 3.7.2 Lineer CFD metodu

Vortex kafes yapısı ve panel metotları nümerik çözümleri Laplace denklemleri ile yapılır. Sınırlamalarına rağmen(sıkıştırılmayan bağlı akış), bu metotlar endüstride oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Endüstride panel metot kullanımına örnek Şekil 3.5 de gösterilmiştir. Volkswagen üretimi otomobilin kaput paneli üzerine etkiyen basınç NASTRAN da kodlanıp hesaplanmıştır.

Nastran'da kodlanan hava yükü deformasyonu girdileri sütun A da yer almaktadır. Alternatif olarak ölçülen ve Nastrana girdi olarak kullanılan kodlar yüzey basınç değerleri Sütun B de gösterilmiştir. Elde edilen değerler sapma açısı altında ilişkilendirilmiştir.



Şekil 3.5 VW Üretimi otomobilin kaput panelinin hava yüklemesi yapıp panel yöntemiyle deformasyon miktarı Nastranda incelenmiştir

### 3.7.3 Lineer Olmayan CFD Metodu

Nümerik tasarımlar Euler ve NS denklemlerinin temelini oluşturan üç tip yaklaşımla çözümlür. Bunlar Sonlu farklar yöntemi, sonlu hacimler yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemi olarak üç kısımda incelenir.

Sonlu farklar yöntemi ilk geliştirilen tekniktir. Kompleks formların hesaplanabilmesi için ağ tabakası üzerinde bazı sınırlamalara ihtiyaç vardır. Özenle hazırlanmış cebirsel dönüşümlerde model ortogonal bir hesaplamalı bir ağ yapısı içersinde planlanır.

Bazı dönüşümler belirli geometriler için uygun olmayabilir. Kartezyen koordinat sisteminde açıklanan bu eşitliklerin üretilmesi için diferansiyel düzenlemelere ihtiyaç vardır. Sonlu farkları özetleyecek olursak grid nodul noktalarındaki cebirsel diferansiyel denklemlerle ve kısmi türevlerle diferansiyel denklemlerin türetilmesi olarak ifade edebilir. Benzer birçok zorluluklardan dolayı sonlu farklar yöntemi otomobil CFD sinde nadiren kullanılır.

#### 3.7.3.1 Sonlu hacimler metodu

Sonlu hacimler yöntemi kısmi diferansiyel denklemlerin türetilmesinde oldukça başarılıdır. Burada hesaplanan alan içersindeki her hücre için hesaplamalı hacimler yöntemi uygulanabilir. Bu hücreler belli bir düzende olabileceği gibi rasgele bir şekilde de sahip olabilirler. Düzenli formlar mesela kübik, tetrahedra, hekzahedra vb. biçimleri daha çok tercih edilir. Sonlu hacimler yönteminin esas avantajı bağımsız ağ yapısı ile çözüm prosedüründen oluşmasıdır. Ayrıca sonlu farklar metodu için gerekli olacak hücreleri oluşturan noktalardaki denklem dönüşümlerine ve uygulama prosedürlerine ihtiyaç yoktur. Bu durum hacim için uygun ağ yapısının oluşturulmasında çok büyük imkanlar sunmaktadır. Günümüzde kullanılan CFD kodlarının birçoğu, ayrıca otomobil aerodinamiği uygulamalarında sonlu hacimler yöntemi kullanılmaktadır.

Şekil 3.6 da iki boyutlu akış süreklilik denklemi için sonlu hacimler yöntemine örnek olarak gösterilmiştir.

Aşağıda ABCD ye ait süreklilik denklemi yer almaktadır.

$$\int_{ABCD} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dx dy = 0 \quad (3.31)$$

Green teoremini uygularsak

$$\int_{ABCD} \vec{H} \cdot \vec{n} ds = 0 \quad (3.32)$$

$\vec{H} = (u, v)$  kartezyen koordinatları içerisinde yerine koyarsak

$$\vec{H} \cdot \vec{n} ds = u dy - v dx$$

$$\int_{ABCD} (u dy - v dx) = 0 \quad (3.32a)$$

(3.2a) yı değerlendirecek olursak

$$\sum_{ABCD} (u \Delta y - v \Delta x) = 0 \quad (3.33)$$

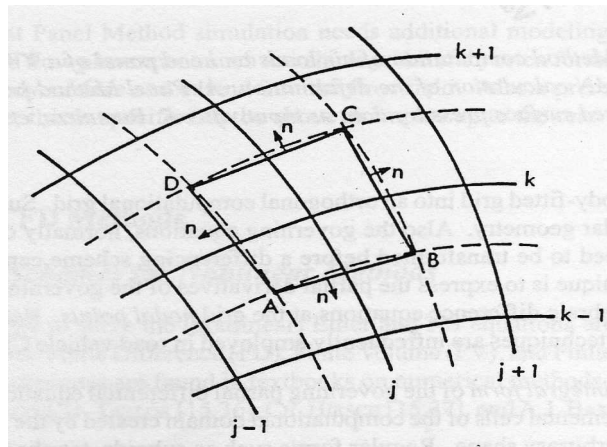
Buradan;

$$\Delta y_{AB} = y_B - y_A$$

$$\Delta x_{AB} = x_B - x_A$$

$$u_{AB} = (u_{j,k-1} - u_{j,k}) / 2 \quad (3.33a)$$

$$v_{AB} = (v_{j,k-1} - v_{j,k}) / 2$$



Şekil 3.6 İki Boyutlu Akış İçin Sonlu hacimler Uygulaması

Yukarıda verilen denklemlerle (3.31) deki kısmi diferansiyel denklem basit cebirsel denkleme indirgenmiştir. (3.33a) dan hücre içindeki akım miktarları (burada  $u$  ve  $v$  hızlardır) ile hücre çevresindeki değerler birbiri ile uygundur.

### 3.7.4 Modelleme ve analiz

Bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişmelere paralel olarak geliştirilen genel amaçlı paket programlar sonlu hacimler metodunun mühendislik problemlerinde yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır.

ANSYS, MARC, NASTARN, CATIA, ABAQUS, GAMBİT, FLUENT vb. modelleme, analiz ve sonuçların grafik değerlendirilmesi bakımından tercih edilen programlardır.

Bu projede kullanılan programlar

- Modelleme : Catia
- Meshing : Gambit
- Analiz : Fluent

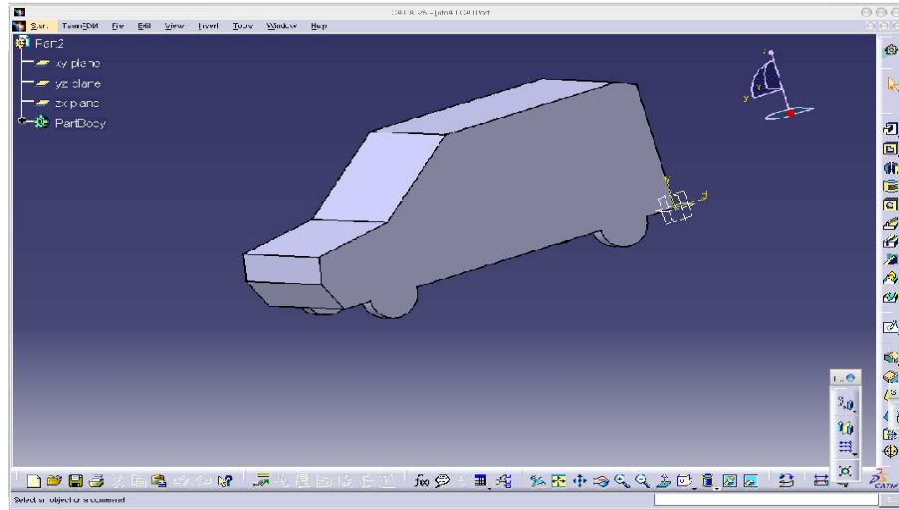
Programları kullanılmıştır.

### 3.7.5 Katı modelin oluşturulması

Bu projede Renault-Kangoo marka hafif ticari araç, üzerinde çalışmalar yapılmıştır. CFD' de ilk adım katı modellemedir. Analizler fluent programında yapılmıştır. Fluent programı gambit programıyla özdeşik çalışmaktadır. Modelleme, meshing ve sınır koşullarının tayini, gambitte yapılırken analiz ve sonuçları çıktısı fluent programında gerçekleştirilmektedir. Fakat gambit programında kompleks model oluşturmak oldukça zor bir işlemdir. Bundan dolayı CAD programlarından katı modellemede en çok kullanılan ve modellemenin kolay olduğu CAD programlarının kullanılması zaman kaybını, minimuma indirmekle birlikte daha detaylı hacim ve yüzeyler elde etme şansı artacaktır. Bu projede Cad programı Catia V5 kullanılmıştır.

Burada katı modelin oluşturulmasından fazla bahsedilmeyip, model oluşturulup igs formatında gambit programına gönderildikten sonraki sınır şartlarının belirlenmesi, meshing işleminin tamamlanması, fluente gönderilmesi ve fluentte yapılan işlemlerden bahsedilecektir.

Şekil 3.7'de görüldüğü üzere taşıt katı modeli, catia programında yapılmıştır. Buradan gambit programında, meshing ve sınır koşulları belirlenmesi için igs formatında kaydedilip gambitten import edilmiştir.



Şekil 3.7 Aracın Catia Programındaki Katı Modelinin Bitmiş Hali

### 3.7.6 Mesh oluşturulması ve sınır koşullarının belirlenmesi

Gambit, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ve Sonlu Elemanlar (SE) analizlerinde kullanılabilen genel amaçlı bir ön işlemdir.

Gambit, HAD ve SE analizlerinin üzerinde en fazla vakit harcanan kısmı olan model hazırlama ve sayısal ağ oluşturma işlemlerini, bünyesinde barındırdığı araçların da yardımıyla, kolaylaştırma ve hızlandırmayı amaçlayan bir yazılımdır.

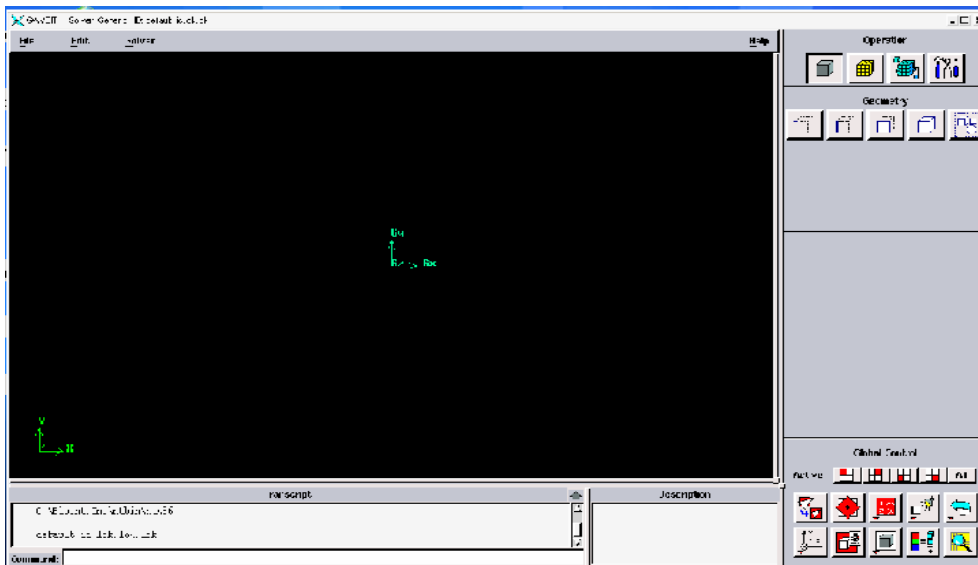
Gambit, sunduğu araçlarla, kullanıcıya kaliteli bir çözüm için gerekli ilk şart olan kaliteli sayısal ağa sahip olma imkanı tanır.

Diğer ön işlemcilerin aksine Gambit, sahip olduğu katı modelleme araçları sayesinde hem orta derecede karmaşık geometrilerin oluşturulmasına hem de gelişmiş geometri alım kapasitesi sayesinde UNIGRAPHICS, I-DEAS, Pro/ENGINEER, CATIA, SOLIDWORKS gibi profesyonel katı modelleme programlarından model alımına olanak tanıyarak kullanıcıya büyük bir esneklik sağlar (2007 Anova).

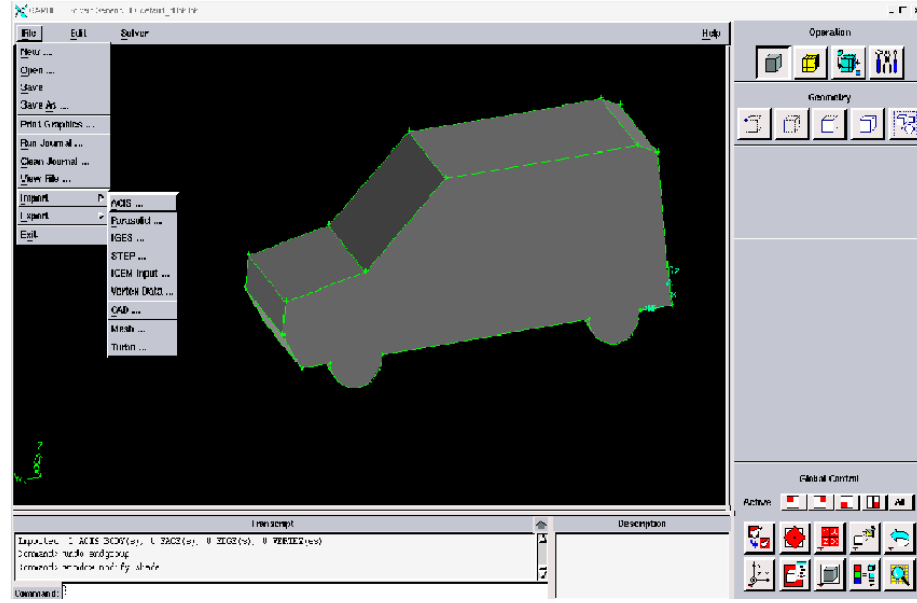
Ayrıca kendisine ait “sanal geometri” kavramıyla dışarıdan alınmış modellerdeki en büyük sorun olan, geometri temizleme işlemini, kolaylaştırarak sayısal ağ oluşumuna uygun modellerin elde edilmesine olanak sağlar.

Şekil 3.8’de gambit programının açılış ekranı görülmektedir. Siyah bölüm modellemenin yapıldığı grafik ekranıdır. Sağ bölümde gerekli komutlar bulunur. Alt bölümde ise komut açıklamaları ve programın bize verdiği mesajlar bulunmaktadır.

Gambit, iki boyutta dörtgen ve üçgen elemanların, üç boyutta ise altı yüzlü, dört yüzlü ve geçiş elemanları olarak kama tipi ve piramit tipi elemanların kullanımına izin vererek istenilen tipteki sayısal ağın basit ve hızlı bir şekilde oluşturulmasına imkan verir. Bununla beraber, “boyut fonksiyonu” ve “sınır tabaka aracı” gibi araçları yardımıyla model içinde ve kritik noktalarda eleman yoğunluğunun ve kalitesinin kontrol altında tutulmasına olanak sağlar



Şekil 3.8 Gambit Açılış Penceresi



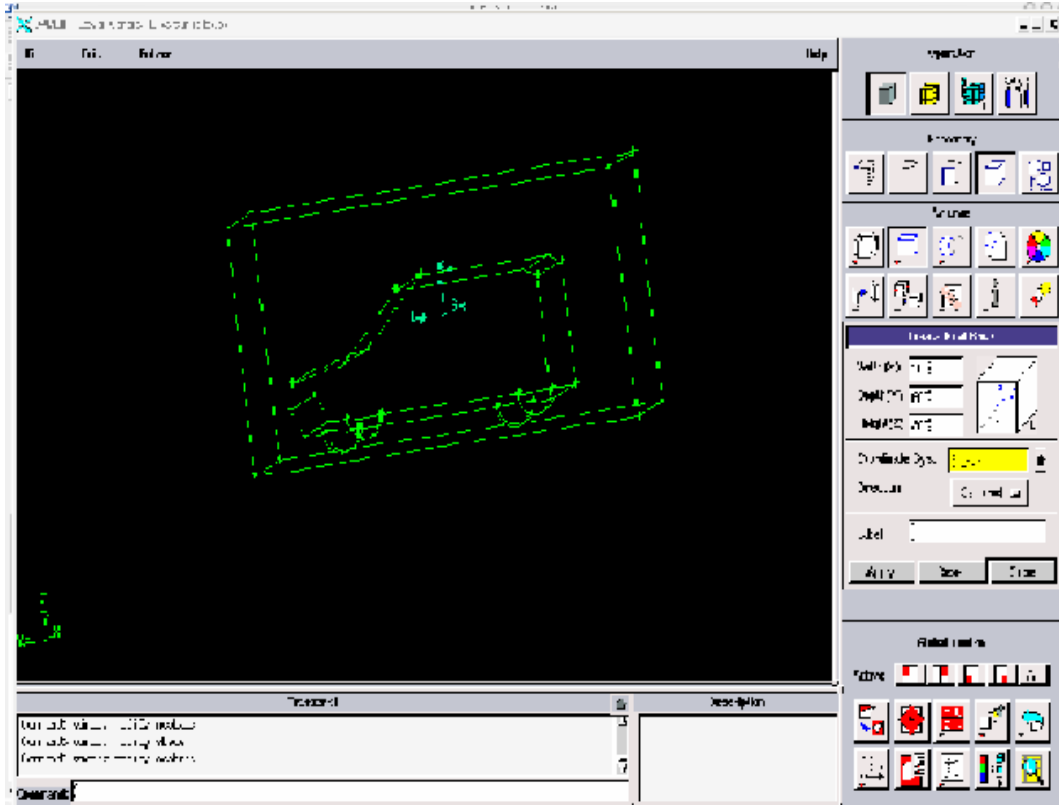
Şekil 3.9 IGS formatında kaydedilen modelin import edilmesi

Daha önce catia'da modelleyip igs formatında kaydedilen model gambite import edildiğinde şekil 3.9'daki ekran gelir.

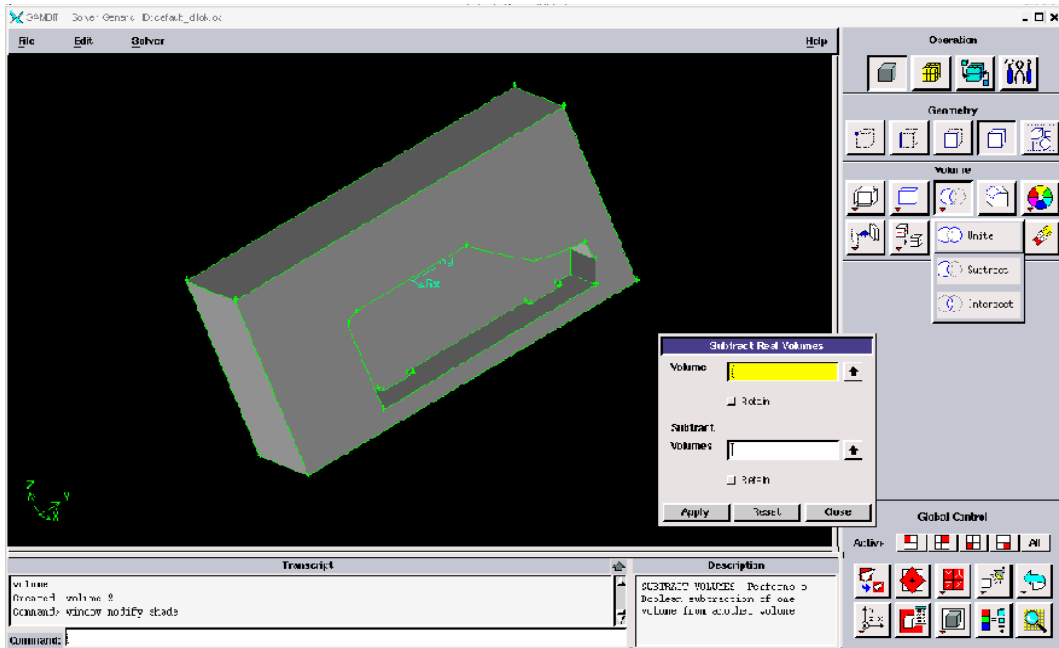
Bundan sonra analiz edilecek ortamı(hava) oluşturmak için Geometry kısmından belirlenen ölçülerde bir hacim oluşturulur.

Fluent de analiz yaparken simetri özelliğinden yararlanmak için model genişliğinin tam ortasından geçecek ve hacimsel olarak modelin yarısını kapsayacak şekilde bir dikdörtgenler prizması oluşturulur. Daha sonra oluşturulan bu hacimden (prizmadan) Subtract komutuyla taşıt modeli çıkarılır. Böylece modelleme işlemi bitmiş olur.

Modelleme işlemi sonrasında modelin ağ yapısı oluşturulur, yani meshing yapılır. Shift tuşu yardımıyla önce yüzeysel meshing yapılır. Dıştan içe doğru sıklaştırılarak meshing yapılması tercih edilir. Spacing bölümüne ne kadar küçük rakam yazılırsa okadar sık mesh noktası oluşturulur. Fakat bu durum meshing işlemiyle birlikte Fluent'de analizin süresini uzatır. Yüzeysel olarak yapılan meshlerde element tipi üçgen olarak ayarlanır ve spacing kısmına dıştan içe sıklaşacak şekilde mesh değerleri verilir. Şekil 3.10, 3.11, 3.12, 3.13'de bu işlemler gösterilmiştir. Yüzey mesh işlemi bittikten sonra hacim mesh yapılır.

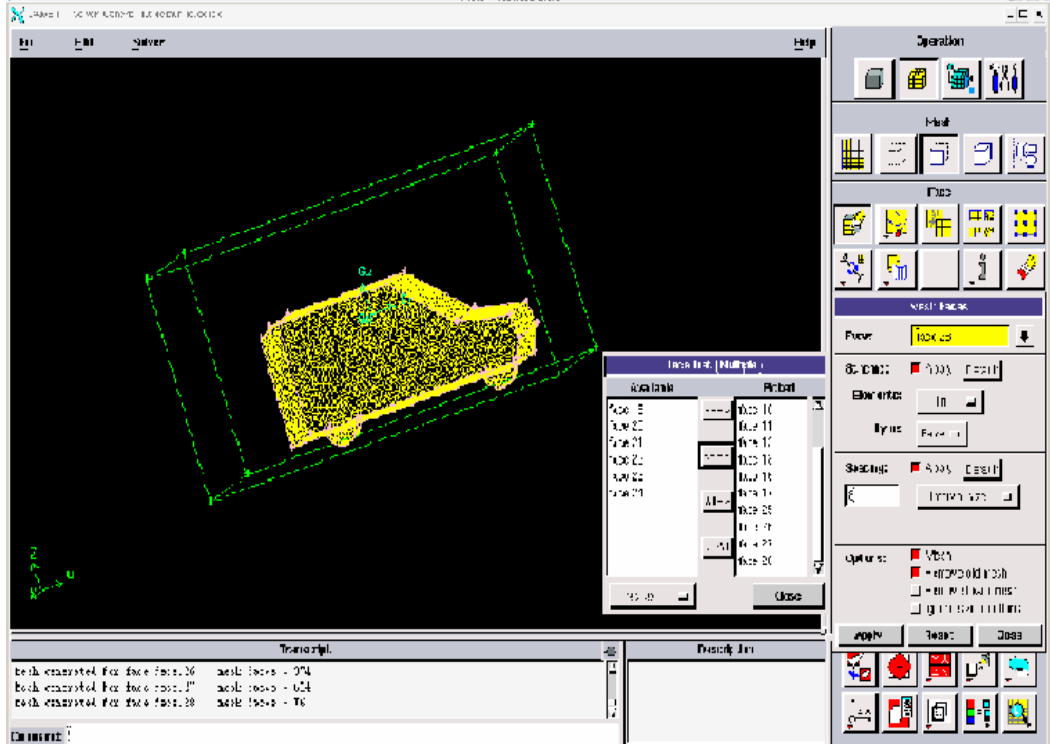


Şekil 3.10 Taşıtın bulunduğu ortamın modelinin gambit'te oluşturulması



Şekil 3.11 Subtract komutunun kullanılması ile iki hacmin ayrılması





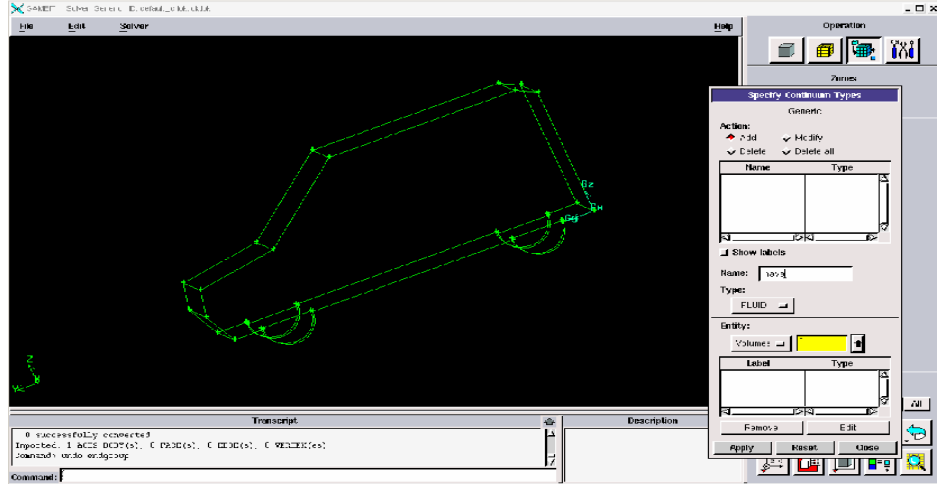
Şekil 3.12 Yüzey ağ yapısının oluşturulması yapılması

Meshing işlemi bittikten sonra sınır koşullarının belirlenmesine sıra gelir. *Operation* bölümünde *Zones Command Buton* komutunda *Specify Boundary Types Command* Butonu ile yüzey özelliklerini hava girişi, hava çıkışı, duvar yüzeyi, simetri yüzeyi gibi özelliklerin seçilebileceği bölüme giderek istenilen yüzeylere özellikleri ve isimleri girilebilir. Ancak daha önce *Solver* menüsünden *Fluent 5-6* seçilmelidir.

Sınır koşullarını belirlerken *Type* bölümünden yüzey için istenilen özellik seçilir, *Name* bölümüne bu seçilen yüzeyin Fluent içinde hangi isimle görülmesi isteniyorsa o isim girilir. Bu işlem esnasında kolaylık olması açısından ağ yapısının görünmesi istenmiyorsa *Specify Model Display Attributes* komutuyla modelde istenilen özellik görünür veya görünmez hale getirilebilir.

Son olarak *Specify Continuum Types Command Button* tuşu ile hacimlerin ne tür olduğu girilir. *Type* bölümünde katı ise *solid* akışkan ise *Fluid* seçilir ve Fluent de görmek istenilen isim girilerek oluşturulur.

Gambit'te işlem bittikten sonra File → Export → Mesh komutuyla Fluent'e mesh dosyası olarak aktarılacak şekilde export edilir.



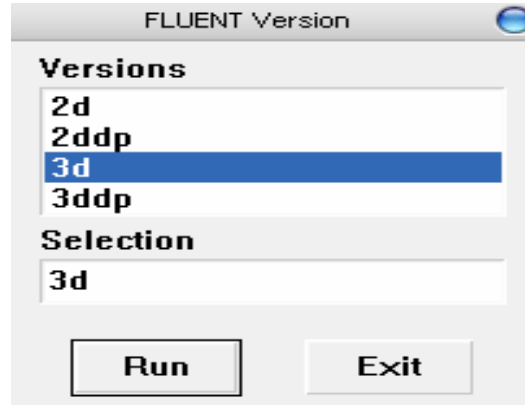
Şekil 3.13 Hacmin türünün belirlenmesi

### 3.8 Fluent İle Analiz

Fluent sonlu hacimler yöntemini kullanan bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımıdır. 1983' ten bu yana dünya çapında bir çok endüstri dalında kullanılan ve günden güne gelişerek tüm dünyadaki HAD piyasasında en çok kullanılan yazılım durumuna gelen Fluent, en ileri teknolojiye sahip ticari HAD yazılımı olarak kullanıcılarının en zor problemlerine kolay ve kısa sürede elde edilen çözümler sunmaktadır.(Anova, 2007)

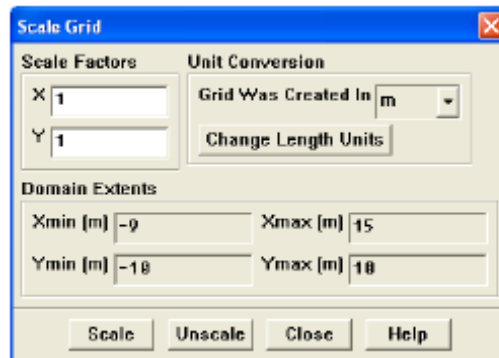
Fluent, genel amaçlı bir HAD yazılımı olarak, otomotiv endüstrisi, havacılık endüstrisi, beyaz eşya endüstrisi, turbo makine (fanlar, kompresörler, pompalar, türbinler v.b.) endüstrisi, kimya endüstrisi, yiyecek endüstrisi gibi birbirinden farklı bir çok endüstriye ait akışkanlar mekaniği ve ısı transferi problemlerinin çözümünde kullanılabilir. Bu özelliği sayesinde kullanıcılarına birbirinden farklı bir çok probleme aynı arayüzü kullanarak çözüm alma olanağı sağlar. (Anova, 2007)

Fluent'te açılışta ilk olarak karşımıza şekil 3.14 de ki pencere çıkar. Burada model eğer 3 boyutlu ise 3d, iki boyutlu ise 2d seçilir ve Run tuşuna basılır.



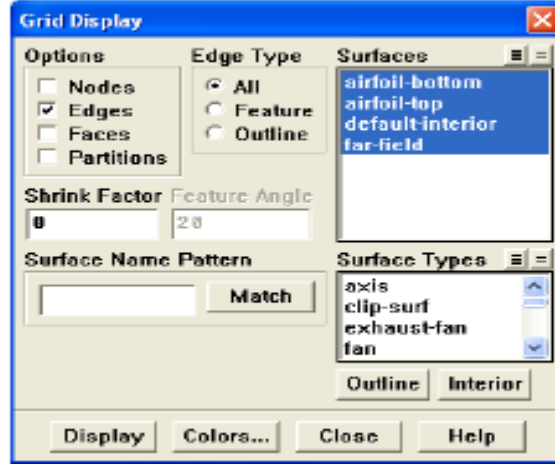
Şekil 3.14 Fluent açılış seçenekleri

Açılış ekranında *File* → *Read* → *Case ...* komutu ile Gambit' de msh formatında export edilen dosya seçilir ve böylece Fluent verileri okumaya başlar. *Grid –Check* komutuyla modelde hatalar olup olmadığı kontrol edilir. Şekil 3.15'de modeli istenilen boyut ölçü birimine çevrilir.



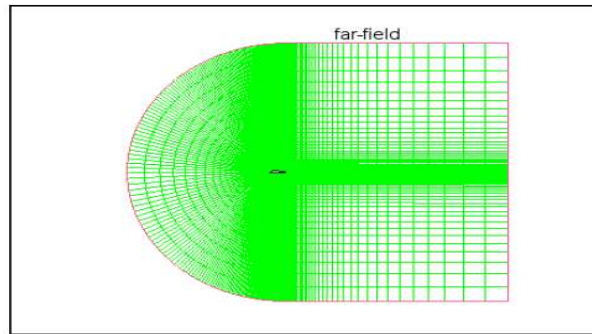
Şekil 3.15 Modelin ölçülendirilmesi

Fluent'e yüklenen modeli görmek için Şekil 3.16'da *Grid* → *Display* model ve sınır tabaka görülür. Burada görmek istenilen kısımlar seçilebilir.

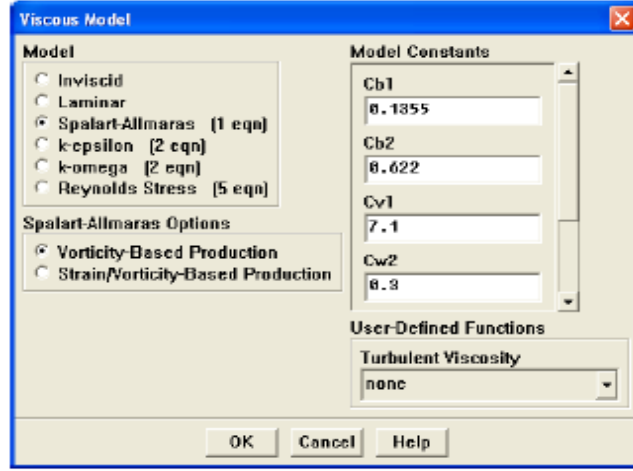


Şekil 3.16 Modelin görüntülenmesi

Define → Models bölümünde modelin hangi şartlarda analiz edileceğini belirleyen komutlar bulunur. Display komutuna basıldığında Şekil 3.17'de ki model görüntülenir. Define → Models → Solver komutu ile modeldeki özellikler değiştirilebilir. Define → Models → Vicious ile modellenen sisteme akış cinsine göre yapılacak hesap türü belirlenir. Şekil 3.18 da bu menü gösterilmiştir.



Şekil 3.17 Grid görünümü

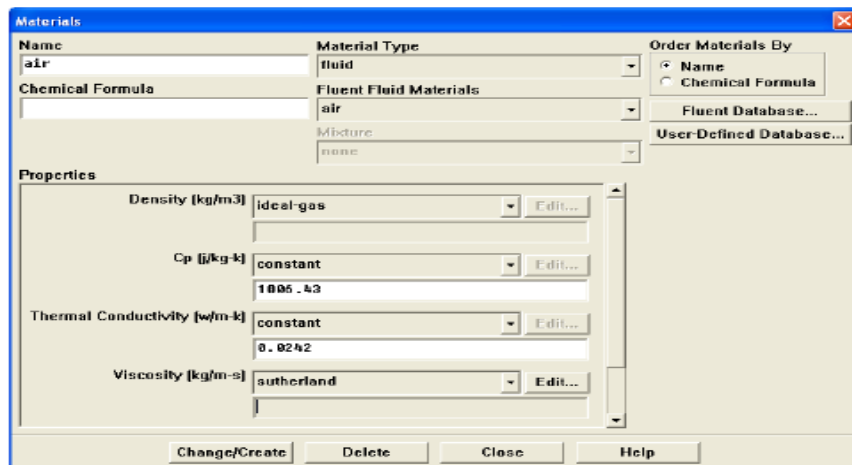


Şekil 3.18 Akış modellerinin seçilmesi

Burada akış modeli belirlenirken Reynold sayısına bakılır. Eğer Re sayısı 500000 den küçükse laminer, büyükse spart-Allmaras kullanılır.

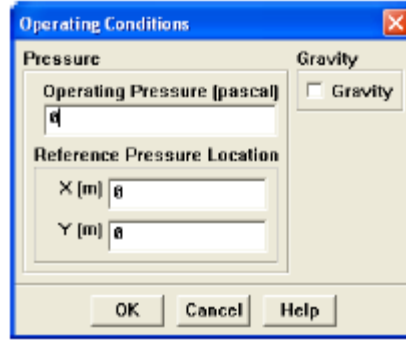
Spart-Almaras yöntemi, havacılık ve aerodinamik uygulamaları için geliştirilmiş, olumlu ve hassas sonuçlar veren bir yöntemdir.

Üçüncü adım malzeme özelliklerinin tanımlanmasıdır. Şekil 3.19'da *Define* → *Materials* komutuyla akışkan varsa katı model özellikleri tanımlanır yada değiştirilir.



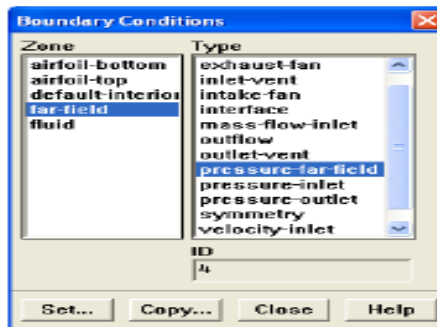
Şekil 3.19 Materials özellikleri

Dördüncü adım operasyon koşullarının tanımlanmasıdır. Şekil 3.20' de Define → Operating Conditions komutu ile analizin işletme koşulları sisteme girilir.



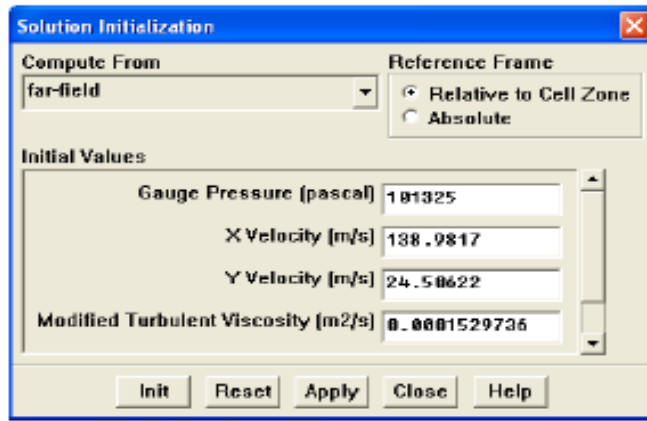
Şekil 3.20 Operasyon Koşullarının tanımlanması

Beşinci adım sınır koşullarının tanımlanmasıdır. Sınır koşulları Şekil 3.21' de Define → Boundary Conditions komutu ile model üzerinde Gambit programında belirlenen modelin özellikleri tek tek seçilerek sınır koşulları belirlenir.



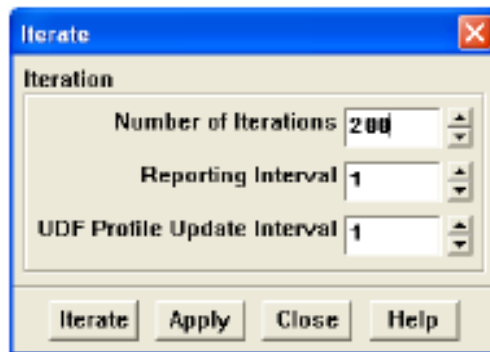
Şekil 3.21 Sınır Koşulları

Altıncı adım çözümelemdir. Şekil 3.22' de gösterildiği üzere Solve → Initialize → Initialize komutu ile malzeme özellikleri ve sınır koşullarından girilen veriler burada değerlendirilir. Hesaplama kullanacağı değerleri hangi veriden alacaksa Compute From kısmından seçilir. Init komutu ile belirlenen girdiden hesaplama yapılır.



Şekil 3.22 Initialize özellikleri

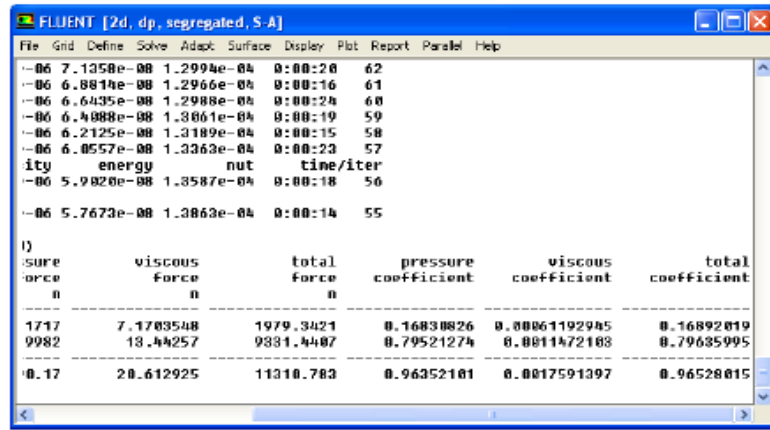
Şekil 4.23' de Solve → Iterate komutu ile *Number of iterations* bölümüne, iterasyonu kaç adımda yapacaksa o sayı yazılır. *Iterate* tuşuyla iterasyon başlar. Şekil 4.24' de iterasyon değerlerini grafiksel olarak görülebilir.



Şekil 3.23 İterasyon özellikleri

Bu işlem sonunda hesaplanan değerleri (basınç, kuvvet vb.) görmek için *Report* → *Forces* komutuyla bu sınır ve operasyon şartlarında model üzerine etkiyen kuvvet basınç gibi değerleri elde edilir. Şekil 4.24'de elde edilen değerler görülebilir.

Bunun dışında hesaplama kriterlerini gördüğümüz şekil 4.25'de *Solve* → *Controls* → *Solution* komutlarıyla basınç, yoğunluk gibi sabit parametrelerin belirlendiği kısımdır. *First order Upwind* ve *Second Order Upwind* komutlarıyla hesaplama hassasiyeti ayarlanır.



FLUENT [2d, dp, segregated, S-A]

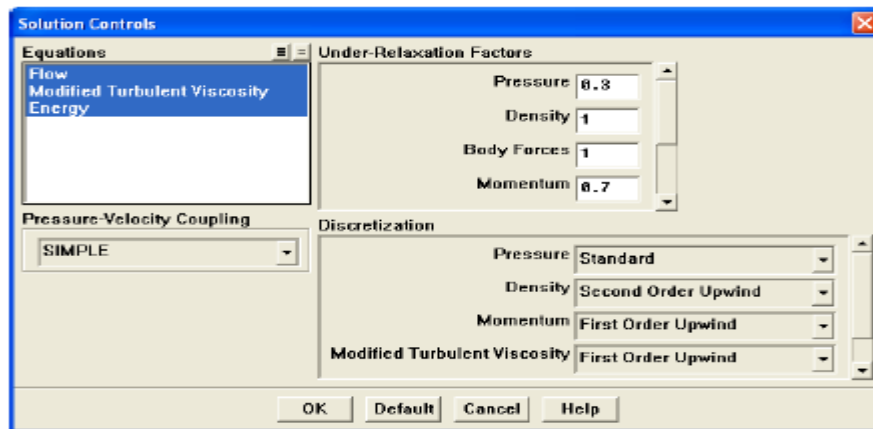
```

File  Grid  Define  Solve  Adapt  Surface  Display  Plot  Report  Parallel  Help
--06 7.1258e-08 1.2994e-04 0:00:20 62
--06 6.8814e-08 1.2966e-04 0:00:16 61
--06 6.6435e-08 1.2988e-04 0:00:24 60
--06 6.4988e-08 1.3061e-04 0:00:19 59
--06 6.2125e-08 1.3189e-04 0:00:15 58
--06 6.0557e-08 1.3263e-04 0:00:23 57
ity energy nut time/iter
--06 5.9820e-08 1.3587e-04 0:00:18 56
--06 5.7673e-08 1.3863e-04 0:00:14 55

```

Pressure force	viscous force	total force	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
1717	7.1703548	1979.3421	0.16830826	0.00061192945	0.16892019
9982	18.44257	9331.4407	0.79521274	0.0011472183	0.79635995
0.17	20.612925	11310.783	0.96352181	0.0017591397	0.96528015

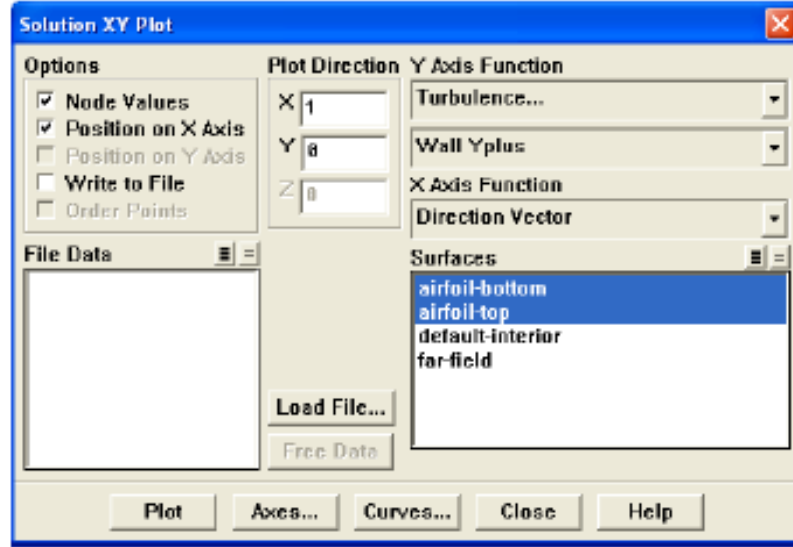
Şekil 3.24 İterasyon sonucunda elde edilen veriler



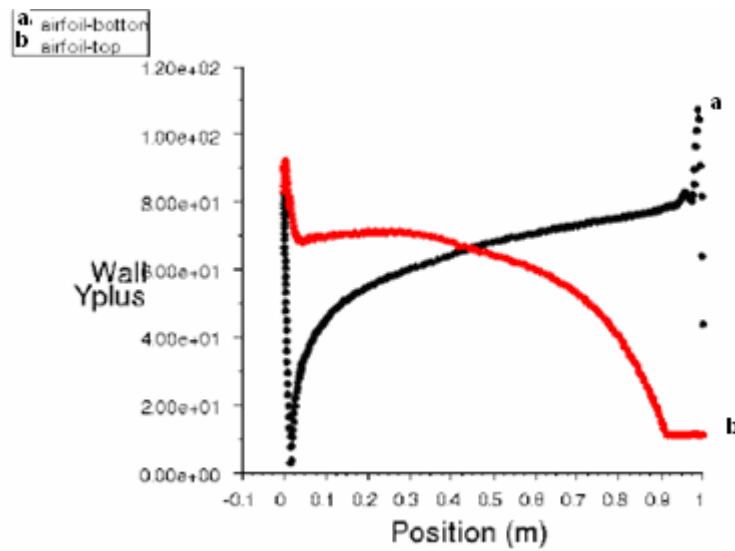
Şekil 3.25 Çözüm kontrolü



Yedinci aşama postprocessing kısmıdır. Burada sonuçlar alınır, grafiksel olarak gösterilir ve yorum yapılır. Kordinat düzleminde gösterim *Plot*→*Vectors* komutuyla istenilen parametrelerin birbirine göre değişimi, etkileşimi incelenebilir. Şekil 3.26 ve Şekil 3.27’de bu durum gösterilmiştir.

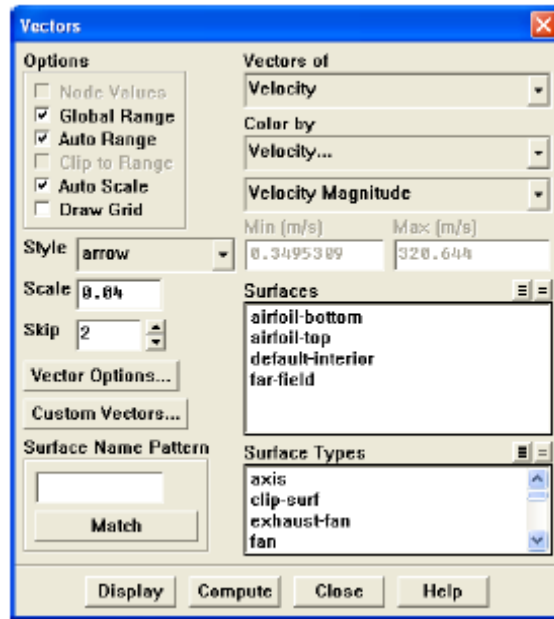


Şekil 3.26 Koordinat düzleminde sonuçların gösterimi

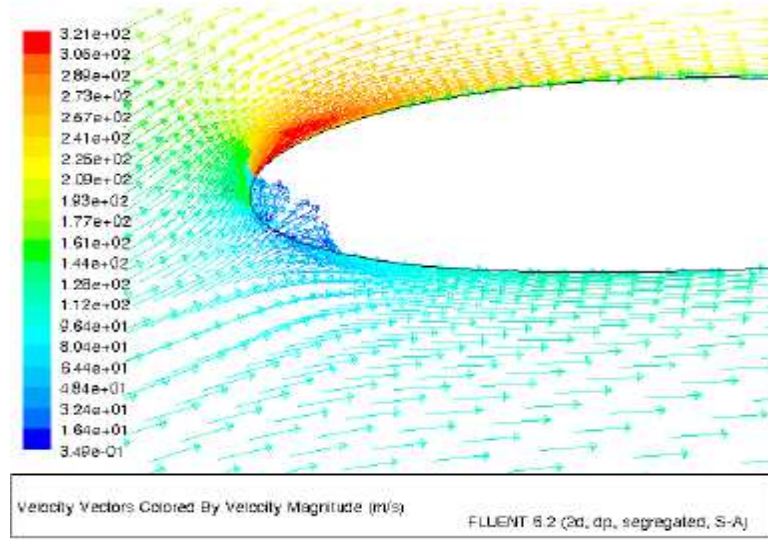


Şekil 3.27 Y düzlemindeki Türbülans değişimi

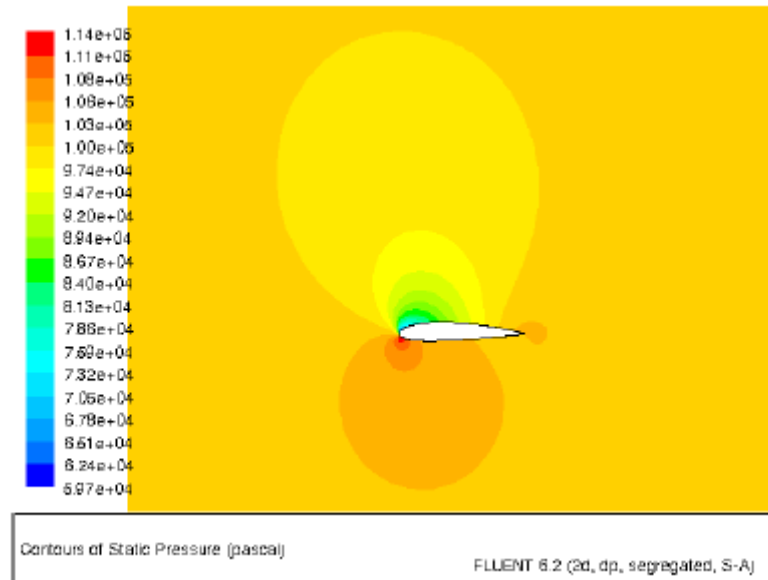
Bunun dışında hız, basınç, gibi büyüklüklerin grafiksel olarak gösterimi Şekil 3.28, Şekil 3.29 ve Şekil 3.30' da renklendirilmiş olarak gösterilir. Koyu renkler o bölgelerdeki basınç veya hız gibi büyüklüklerin arttığını gösterir. *Display* → *Vektors* komutuyla menüden, hangi büyüklük görüntülemek isteniyorsa o seçilir.



Şekil 3.28 Vektörel gösterim



Şekil 3.29 Hız vektörlerinin gösterimi



Şekil 3.30 Statik basınç bölgelerinin gösterimi

Elde edilen grafiksel ve sayısal verilerden problem çözümü doğrultusunda yorum yapılır.

## BÖLÜM 4

### SONLU HACİMLER YÖNTEMİ ile ANALİZ

Burada, Renault-kangoo modelindeki hafif ticari aracın ön formundaki değişimlerin hava direncine etkisi, sonlu hacimler yöntemi ile Fluent programında incelenmiştir. Taşıtın ön kaput ve ön cam formları değiştirilerek, aerodinamik dirençteki değişimler incelenmiş ve daha önce yapılan benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

#### 4.1 Modeller

Renault-kangoo ticari aracın orijinal ölçüleri elde edilmiş ve bu ölçülerde aracın katı modeli Catia programında oluşturulmuştur. Şekil 4.1’de Catia programında yapılan katı model görünmektedir.

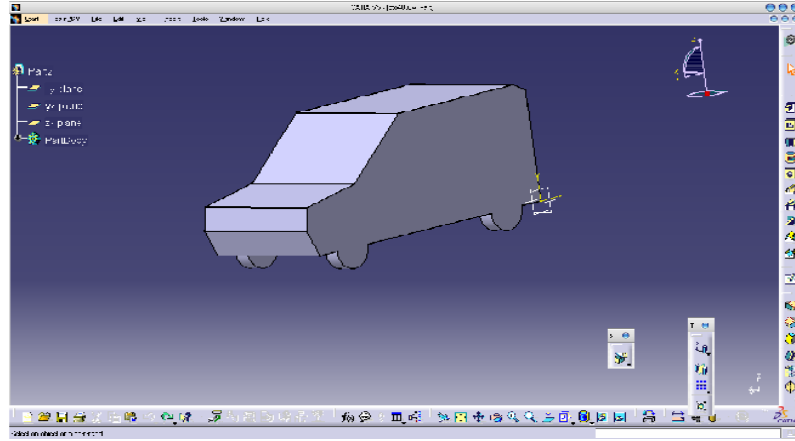
Bundan sonra inceleyeceğimiz taşıt ön kaput ve ön cam formlarına açısal değişiklikler verilerek ayrı ayrı modeller oluşturulmuştur.

##### 4.1.1 Ön cam form değişiklikleri

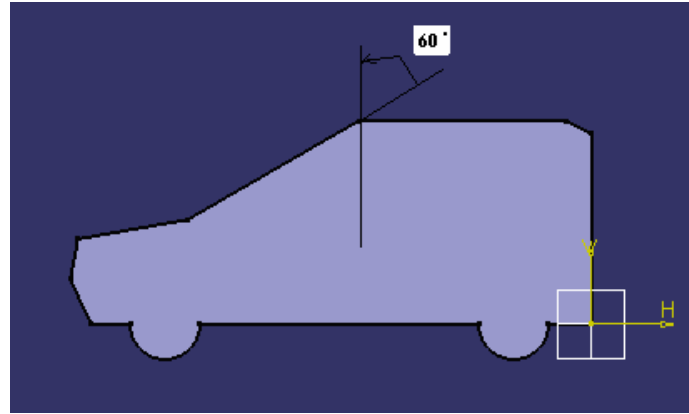
Ön cam için derece cinsinden 20, 30, 40, 50, 60 olmak üzere beş adet model Catia da oluşturulmuş ve igs formatında kaydedilmiştir. Şekil 4.2 a-b de 60 ve 40 derece için modeller gösterilmiştir.

##### 4.1.2 Kaput form değişiklikleri

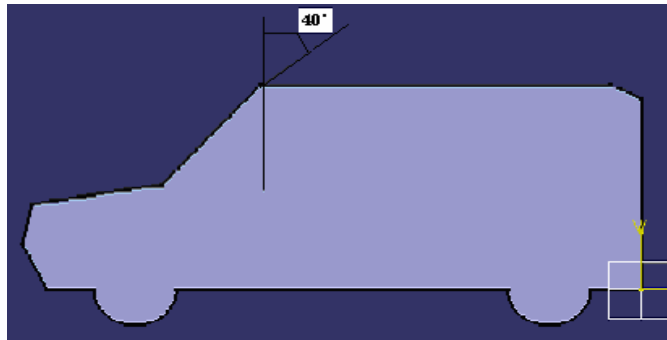
Burada kaput eğimi değiştirilerek 0, 5, 10, 15, 20 derecelik eğim açıları verilerek modellemeler yapılmıştır Şekil 4.3a ve Şekil 4.3b’de 15° ve 0° lik kaput eğim açısına sahip modellemeler gösterilmiştir.



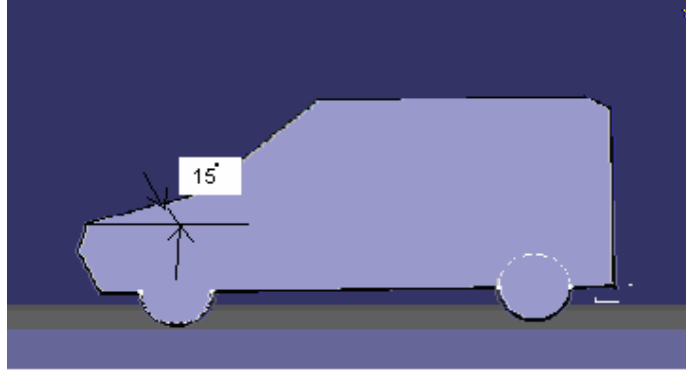
Şekil 4.1 Catia programında modellenen Renault-Kangoo



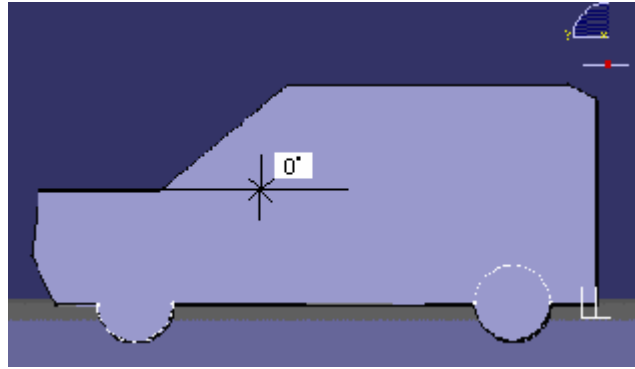
Şekil 4.2 a Ön cam açısı  $60^{\circ}$  olan model



Şekil 4.2b Ön cam açısı  $40^{\circ}$  olan model



Şekil 4.3a Kaput açısı 15 derece olan taşıt modeli



Şekil 4.3b Kaput açısı 0 derece olan taşıt modeli

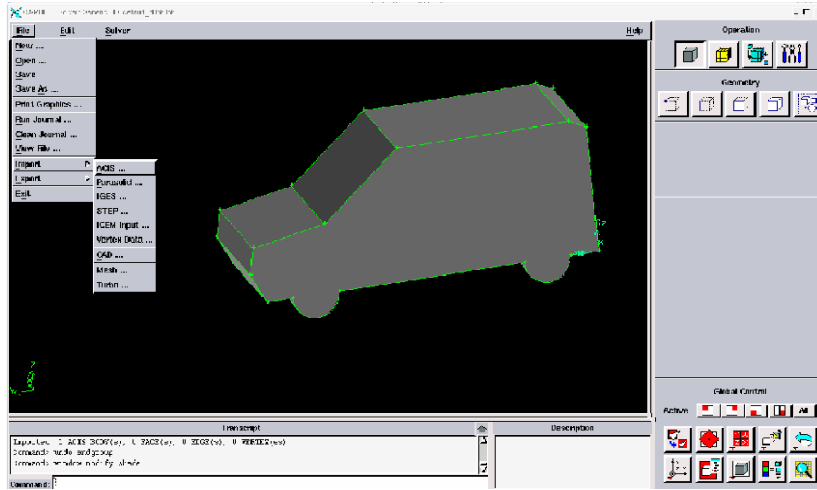
## 4.2 Gambit'de Modelleme

Bundan sonra anlatılacak işlemler hem kaput, hem ön cam modelleri için ortak olup gambit'te hepsi için aynı işlemler yapılmıştır.

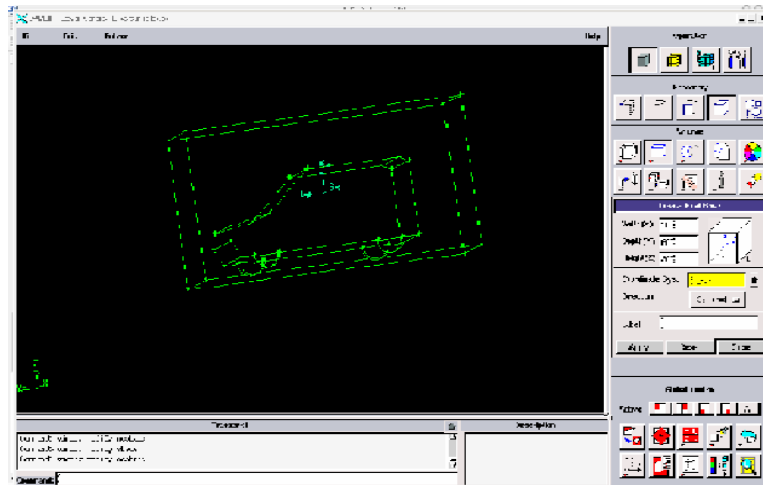
Bu modeller igs formatında kaydedilip *Meshing* işlemi için gambit programından import edilmiştir. Fluent için sınır şartları ve *meshing* işlemleri daha sonra yapılır. Meshing işleminden önce taşıtın çevresinden akan havanın modellenmesi gerekmektedir. Şu koşullarda gambit taşıtı *volume1* olarak algılamaktadır. Gambit'de import edilen Şekil 4.4'de bir örneği gösterilen modellerin çevresinde aynı rüzgar tüneline olduğu gibi sanal bir hava ortamı oluşturmak gerekmektedir.

Bunun için *operation* kısmından havayı temsilen dikdörtgenler prizması şeklinde bir hacim oluşturulur..Şekil 4.5’de gösterildiği gibi taşıtın simetri özelliğinden yararlanmak için, taşıtın enine tam yarısını kapsayacak şekilde oluşturulmasına dikkat edilmiştir. Bu durumda gambit’te iki adet hacim bulunacaktır. Oluşturulan hacim ölçüleri  $X=168$ ,  $Y=600$ ,  $Z=300$  cm boyutlarına sahiptir.

Hacim ve taşıt konumları gerçeğe benzer şekilde *Move* komutuyla birbirine göre ayarlanmıştır.

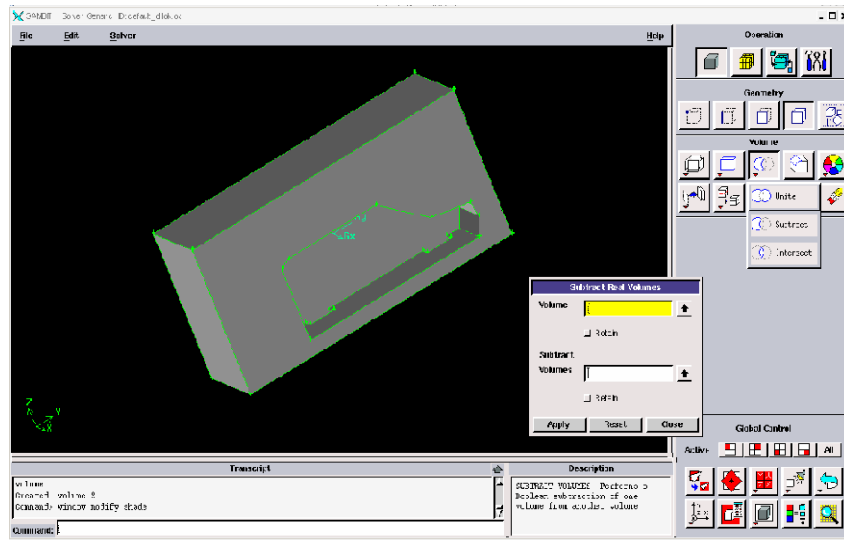


Şekil 4.4 Gambit’e import edilen taşıt modeli



Şekil 4.5 Taşıt etrafını saran havanın modellenmesi

Taşıtın etrafını saran hava modellenip konumu aracın tam simetri ekseninden geçecek şekilde ayarlanır. Daha sonra, inceleyeceğimiz havanın belirlediğimiz koşullarındaki durumu olduğu için, *Operation* kısmındaki *Subtract* komutu ile hava hacmi içersinden taşıt hacmi çıkarılır. Şekil 4.6’da bu işlem gösterilmiştir.



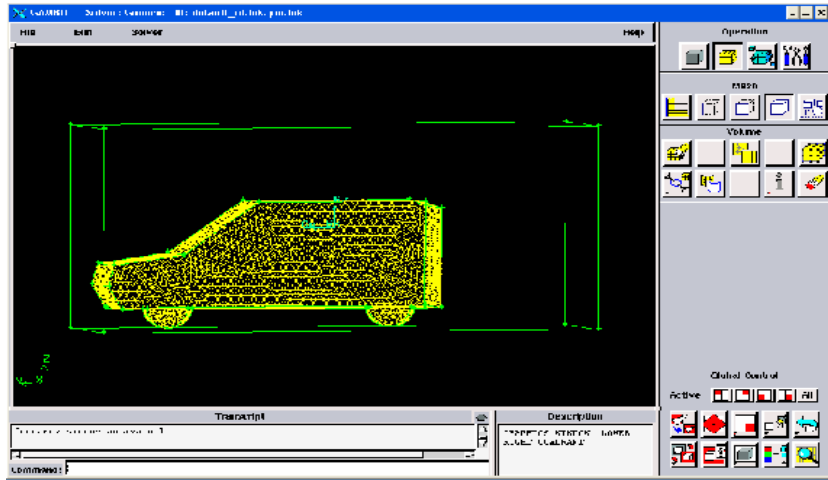
Şekil 4.6 Akışkan hacminden taşıt hacminin çıkarılması

Bu işlem bittikten sonra elimizde tek bir hacim kalır. Bu hacim, meshing işlemi için hazır haldedir.

Meshing işlemi, önce yüzey alanları ile başlar, en son olarak hacimsel mesh yapılır. Yüzeysel mesh’de, dış hacim yüzeyinden, taşıtın çıkarıldığı taşıt formunun, olduğu yüzeye doğru yapılır. Bu tezdeki bütün modeller için, yüzey meshleri, üçgen tipinde olup hacmin dış yüzeyleri Spacing kısmı 15, iç taşıt yüzeyi spacing 8 alınmıştır. Dıştan içe doğru mesh yapısı sıklaşmıştır. Bu işlemler bittikten sonra hacimsel mesh yapılır. Şekil 4.7’de meshing kısmı gösterilmiştir.

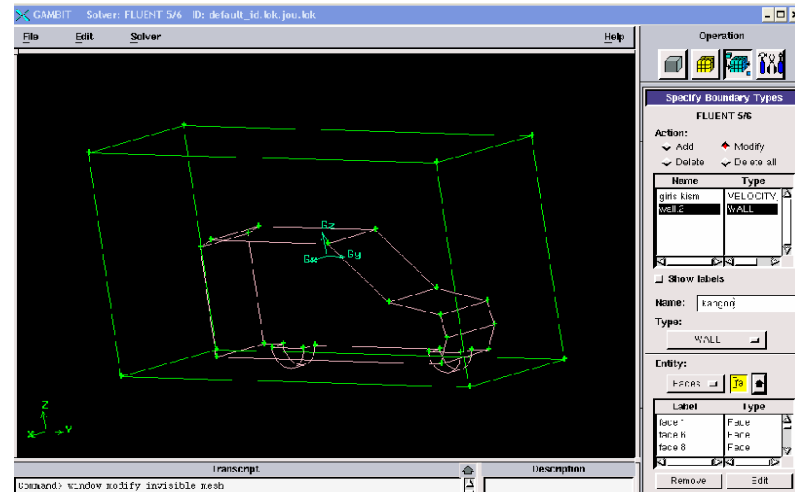
Meshing yaptığımız modellerin sınır şartlarını belirlemeye sıra geldi. Bundan önce solver menüsünden Fluent 5/6 seçeneği işaretlenir. Bundan sonra *Operation*→*Zones*→*Specify Boundary Types* kısmında Shift tuşu yardımıyla yüzeyler seçilerek sınır şartları belirlenir ve yeniden adlandırılabilir.. Şekil 4.8’de bu gösterilmiştir.





Şekil 4.7 Meshing işlemi yapılmış taşıt

Bundan sonra yine aynı kısımda akışkanın tanımlanması gelmektedir. *Operation*→*Zones*→*Specify Continuum Types* kısmında akışkan hacmi tanımlanır.



Şekil 4.8 Sınır şartlarının tanımlanması

Şimdiye kadar anlatılan bütün adımlar, tüm modeller için aynı işlem sırasında gerçekleşmiştir.

Burada tüm formlar(cam ve ön kaput) bu safhalardan geçirip fluent programında analiz edebileceğimiz hale yani meshing dosyası haline getirilir. Bu dosyalar fluent programında analiz edilmeye hazır haldedir.

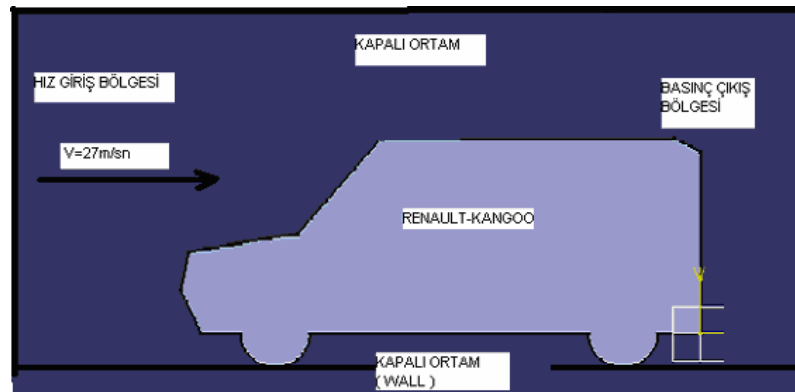
Bu safhadan sonra oluşturduğumuz her model için ayrı bir analiz yapıp bunların Aerodinamik dirençleri elde edilecek ve birbirleri ile karşılaştırılacaktır.

### 4.3 Problemin Oluşturulması

Buraya kadar problemlerde kullanılacak modelleri incelendi. Bundan sonra Fluent programında modelleri, belli operasyon ve sınır şartlarında analiz ederek her bir araca etkiyen toplam aerodinamik direnç kuvvetleri, sonuç olarak  $C_D$  katsayıları bulunacaktır.

Öncelikle hafif ticari aracın bulunduğu ortamda, bazı kabuller yapılır. Şekil4.9'dan görüleceği üzere, taşıtın bulunduğu ortam, normal atmosfer koşulları olup, ortam akışkanı havadır. Bundan başka araç 100km/h hızda gittiği ve taşıtı çevreleyen havanın hızının sıfır olduğu kabulleri yapılacaktır.

Taşıt bu hızda ve bu şartlarda hareketi esnasında taşıt formundan kaynaklanan ve taşıta etkiyen toplam kuvvet ne kadardır bu soruya cevap verilmeye çalışılacaktır.

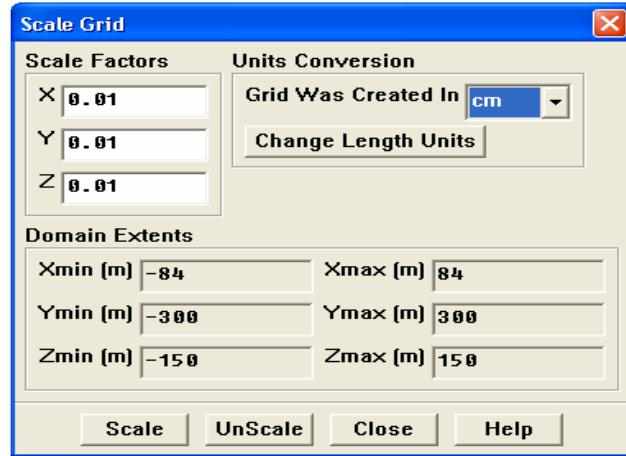


Şekil 4.9 Taşıt deney düzeneği modeli

#### 4.4 Ticari Aracın Fluent'te Analizi

Gambit programında, ağ yapısını ve sınır şartları oluşturulan modelleri mesh dosyasına çevrilmiştir. Bu dosyaları *File*→*Read*→*Case*→*Oto30.mesh* şeklinde fluent ortamına taşınır.

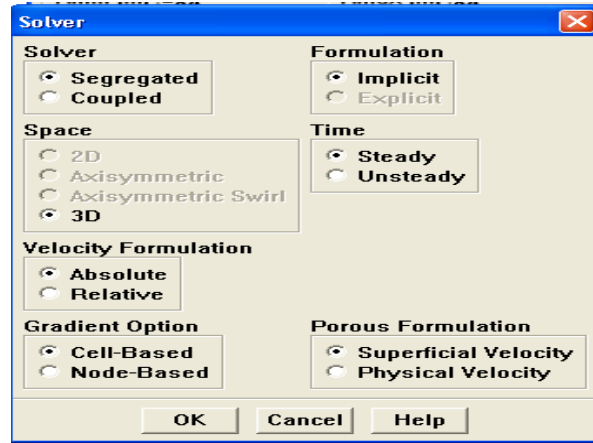
Modeller, Renault-Kangoo standart ölçüleri doğrultusunda *Grid*→*Scale* komutu ile hangi uzunluk biriminde isteniyorsa, o birimde boyutlandırılır. Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



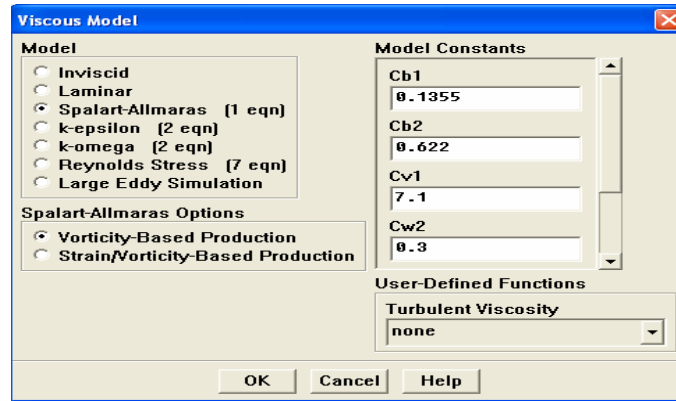
Şekil 4.10 Model cm olarak ölçülendirilir.

Bundan sonra modeli ve problemi fluent'te tanımlamaya sıra gelmektedir. Şekil 4.11'de *Define*→*Models*→*Solver* menüsünde bir değişiklik yapılmadan default değerleri ile ok tuşuna basılır. Ardından *Define*→*Models*→*Viscous* komutlarıyla akış modeli seçilir. Oluşturulan sistemde, *Spart-Allmaras* modeli seçilmiştir. Şekil 4.12'de fluent'de akış modeli seçimi gösterilmiştir.

*Spart-Allmaras* modeli, türbülanslı akımlar için kullanılan, basit birinci dereceden denklemlerden oluşur. *Spart-Allmaras* modeli, havacılık uygulamaları için oluşturulmuş ve gerçekçi sonuçlar veren bir yöntemdir. .



Şekil 4.11 Solver özellikleri



Şekil 4.12 Akış modelinin seçilmesi

Bu yönteme karar vermek için Reynold sayısına bakılması gerekir. Buna göre

$$Re < 5 \times 10^5$$

olursa burada Laminer modeli seçmemiz gerekecektir. Buna göre oluşturulan modelde Reynold değerinin bulunması gerekmektedir. Buna göre Reynold sayısı formülü;

$$Re = \frac{V_{hava} \cdot L_{Taşas}}{\nu_{hava}} \quad .. \quad (4.1)$$

$$V_{Hava} = 27 \text{ m/sn}$$

$L_{\text{Taşıt}}=4 \text{ m}$  ve  $\nu_{\text{hava}}=1.789 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m-s}$

Bu verilere göre hesaplırsak

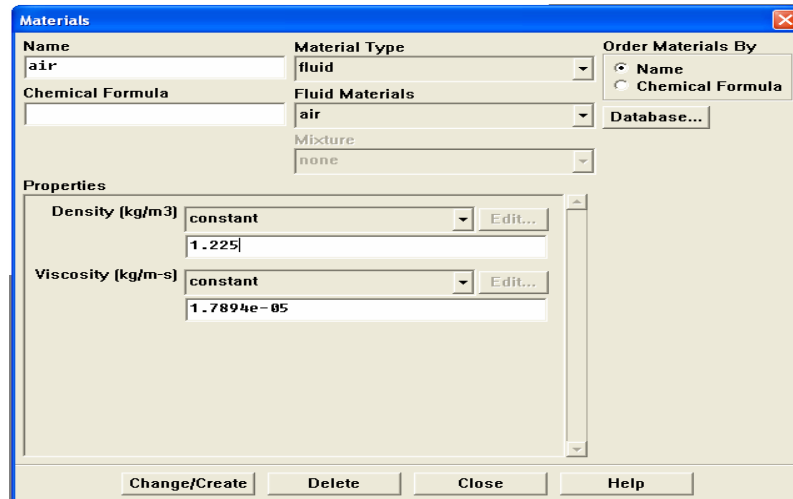
$$Re = \frac{27.4}{1.789 \cdot 10^{-5}}$$

$$Re = 6036892 > 5 \cdot 10^5$$

Olduğu için *Spart-Almaras* yöntemi seçilir.

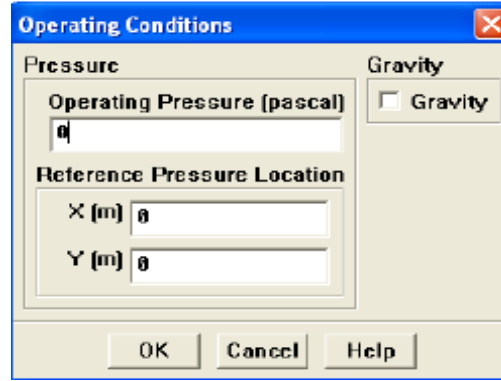
Daha sonra ki adım malzeme akışkan özelliklerinin tanıtılmasıdır. Bunun için

*Define* → *Materials* komutları ile şekil 4.13'de gösterildiği üzere default değerleri ile bırakılır ve *Close* ile menü kapatılır.



Şekil 4.13 Materials özelliklerinin tespiti

Operasyon koşullarının tanımlanmasında, *Define* → *Operating Conditions* komutları ile, şekil 4.14'de gösterildiği üzere operasyon basıncı, sıfır olarak alınır. Sıkıştırılabilir akışkanlarda basınç değişimlerinden dolayı oluşan hataları minimize etmek için basınç set değeri sıfır alınır. X, Y, Z değerleri sıfır alınır herhangi bir değişiklik yapılmaz.



Şekil 4.14 Operasyon Koşulları

Daha sonra *Define*→*Boundary Conditions* komutları ile sınır şartları tanımlanır. Şekil 4.15’de gösterildiği gibi sınır şartları görülebilir. Gambit’de belirlenen sınır koşulları bu menüden değiştirilebilir. Burada giriş olarak programa tanıttığımız *Velocity-inlet* ve çıkış olarak isimlendirilen *Pressure-outlet* sınır koşullarını, *Set* tuşu ile menü açılır. Şekil 4.16’dan da görüldüğü üzere belirlenmesi gereken giriş hızı büyüklüğü ve Türbülans hesaplama yöntemi seçilir. Hız büyüklüğü 27 m/s olarak girilir, *Turbulence Specification Method* ile yöntem *Intensity and Length Scale* seçilir. Burada *Intensity* taşıt uzunluğuna göre oluşan turbülans yüzdesidir. Bunun hesaplaması (4.2) de belirtilmiştir.

$$I = 0,16 \cdot (Re)^{-1/8} \quad (4.2)$$

I= Intensity

Re= Reynold sayısı

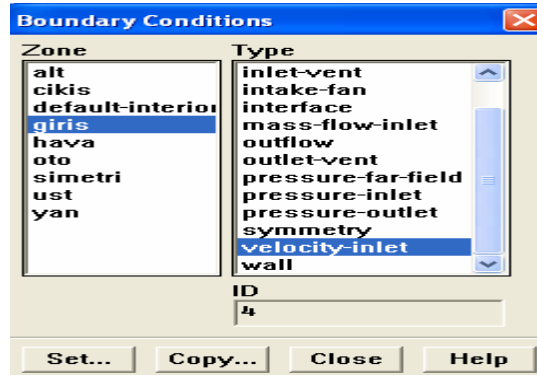
Bulunan bu değerleri kullanarak I değerini (4.2) ye göre buluruz.

$$I = 0,16 \cdot (6036892)^{-1/8}$$

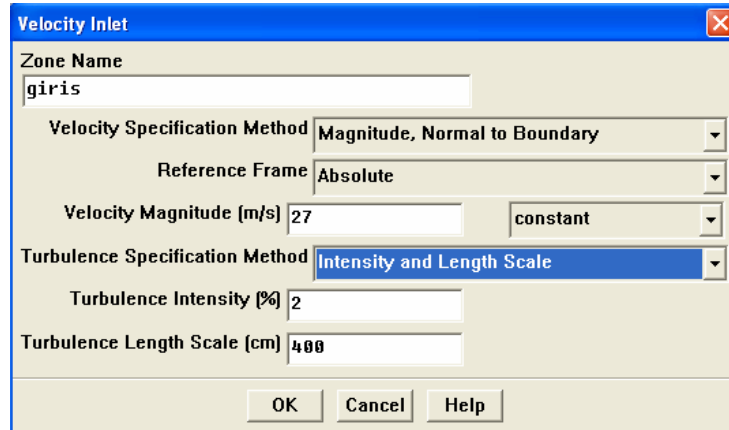
I= % 2 değeri elde edilir.

*Length* değeri ise taşıt uzunluğu olup 400 cm olarak girilmiştir. Aynı işlemler çıkış kısmı içinde yapılır.

Diğer Zone sınır şartlarında bir değişiklik yapılmaz. Böylece *Bondary Conditions* kısmı tamamlanmış olur.

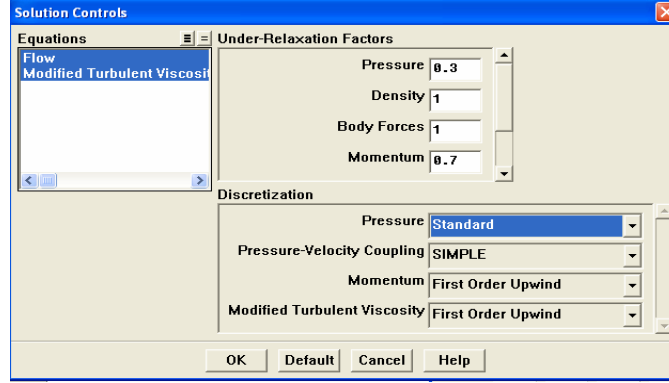


Şekil 4.15 Sınır koşullarının belirlenmesi



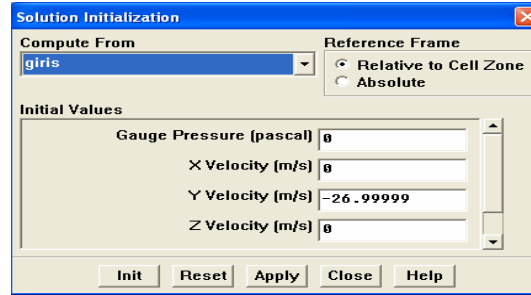
Şekil 4.16 Giriş ve çıkış zone değerlerinin set edilmesi

*Solution* kısmında, *Solve*→*Controls*→*Solution* komutlarıyla, çözümlene kısma geçilir. Buradaki değerleri, default olarak bırakılır. Şekil 4.17’de üzere basınç, yoğunluk, momentum gibi büyüklükler verilmekte bu değerleri değiştirmeden aynen bırakılır.



Şekil 4.17 Çözümleme kontrol menüsü

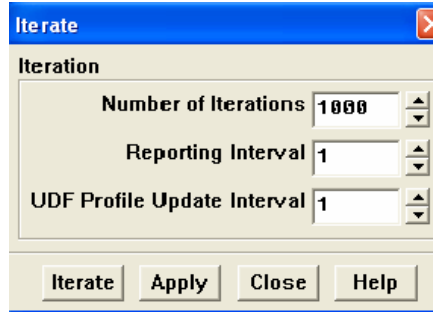
*Solve*→*Initialize* kısmında Fluent yapacağı hesaplamaları, hangi verileri kullanarak yapacağı, bu kısımdan belirlenir. Şekil 4.18’de görüldüğü üzere *Compute from* kısmından giriş seçilir. Giriş seçildiği zaman *Initial Values* değerleri otomatik olarak değişir, operasyon şartı olarak belirlenen 27m/s hızın etkime yönünde değerler hesaplanır. *Init* komutuyla iterasyonun başlaması ile istenilen değerler hesaplanır. Bundan sonra menü *Close* la kapatılır.



Şekil 4.18 Çözümleme başlangıç değerlerinin girişi

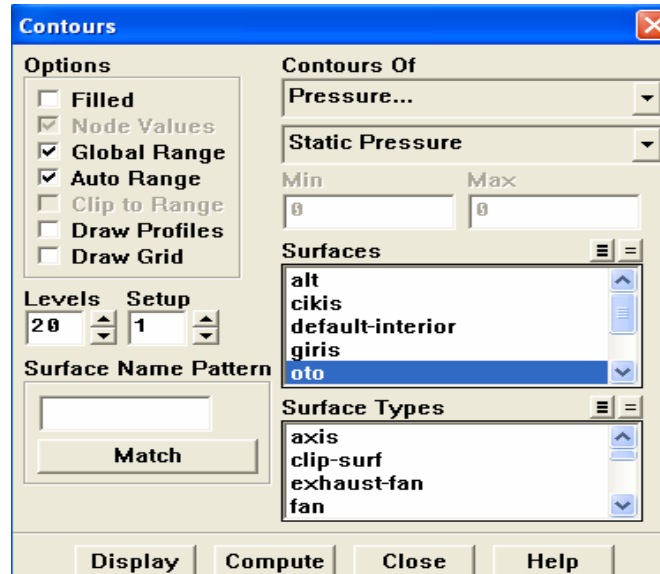
Tanımlama işlemleri bittikten sonra tanımlanan sınır koşulları ve operasyon şartları altında iterasyonla hesaplamaya başlanır. Bunun için *Solve* →*iterate* komutuyla *Number of iterations* bölümüne iterasyonun kaç basamağa kadar hesaplama yapacağı yazılır ve *iterate* tuşuyla iterasyon başlar. Şekil 4.19’da iterasyon adımları gösterilmiştir.





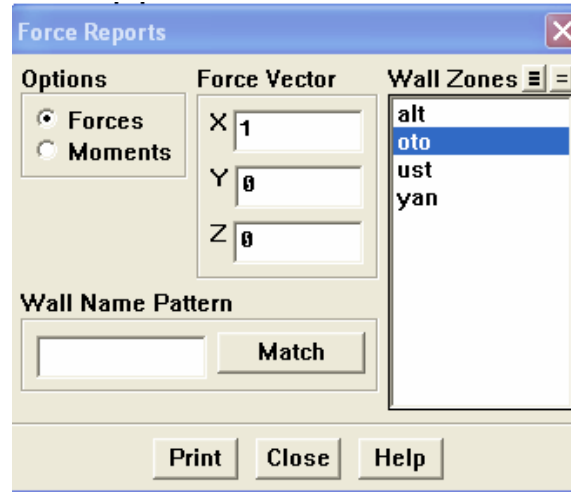
Şekil 4.19 İterasyon başlangıç ekranı

İterasyon işlemi, tamamlandıktan sonra, simülasyon olarak görmek istenilen sonuçlar, *Display*→*Contours* komutuyla *Surfaces* bölümünden, görmek istenilen bölümler *display* tuşuna basılarak görülebilir. Şekil 4.20’de *Display* menüsü gösterilmektedir.



Şekil 4.20 Display contours

Şekil 4.21’de *Report*→*Forces* ile analiz sonucunda taşıt üzerine etkileyen tüm kuvvetler görülebilir. Burada oto seçilip *Print*’e basıldığında, Şekil 4.22’deki ekran gelmektedir.



Şekil 4.21 Force Report

Force vector: (1 0 0)

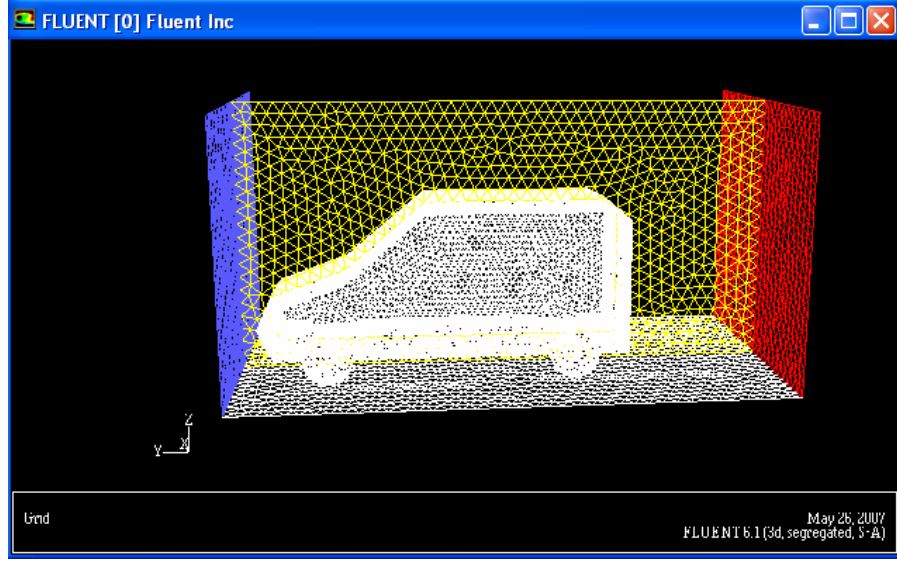
zone name	pressure force n	viscous force n	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
oto	-1357.2974	-1.4826618	-1358.78	-2215.9957	-2.4206724	-2218.4164
net	-1357.2974	-1.4826618	-1358.78	-2215.9957	-2.4206724	-2218.4164

Şekil 4.22 Analiz sonucu taşıta etkiyen kuvvetlerin çıktısı

Şekil 4.22 de görülen toplam kuvvet değerini, aerodinamik direnç katsayısı  $C_D$  yi bulmak için kullanılır. Buraya kadar yapılan işlem adımları, hazırlanan on model içinde geçerlidir.

$$C_D = \frac{2F_T}{\rho v^2 A} \quad (4.3)$$

Burada her model için bulunan toplam kuvvet değerleri, denklem (4.3)'de yerine konarak, her modelin  $C_D$  katsayıları bulunur.



Şekil 4.23 Otomobil, simetri yüzeyi, velocity-inlet, pressure outlet ve alt yüzeyi.

## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

#### 5.1 Analiz Sonuçları

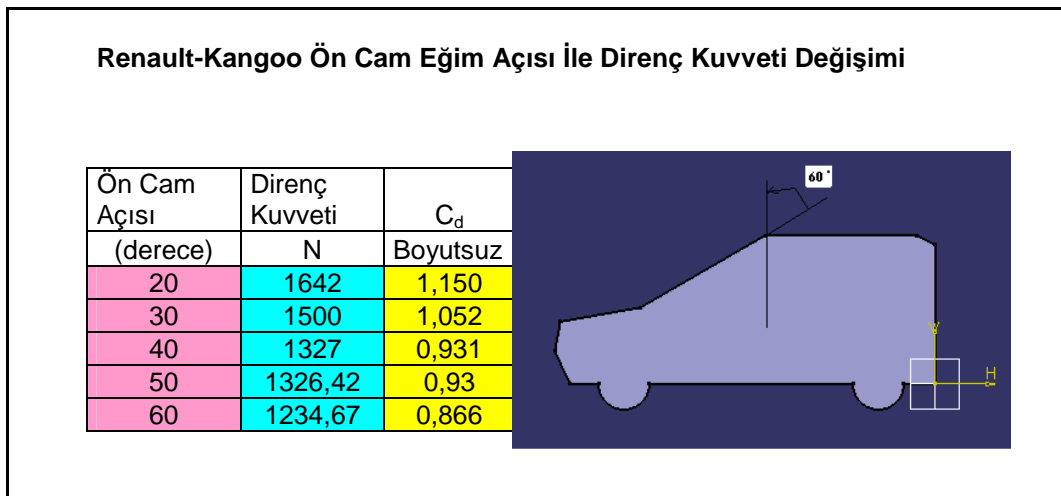
Çalışma kapsamında, Bölüm 4’de anlatılan işlem adımları toplam on model için ayrı ayrı yapılmıştır. Analizde, Renault-Kangoo marka hafif ticari araç modeli gerçek boyutlarda modellenmiş olup, boyutları 4x5x6 m olan taşıt, sanal ortamda yaklaşık 100 km/h ’lik hızda, sabit rüzgarsız bir ortamda olduğu kabulüyle birlikte analiz edilmiş ve sonuçları aşağıda verilmiştir.

Aşağıda Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de Renault-Kangoo ön formunda yapılan değişikliklerle elde edilen sonuçlar yer almaktadır.

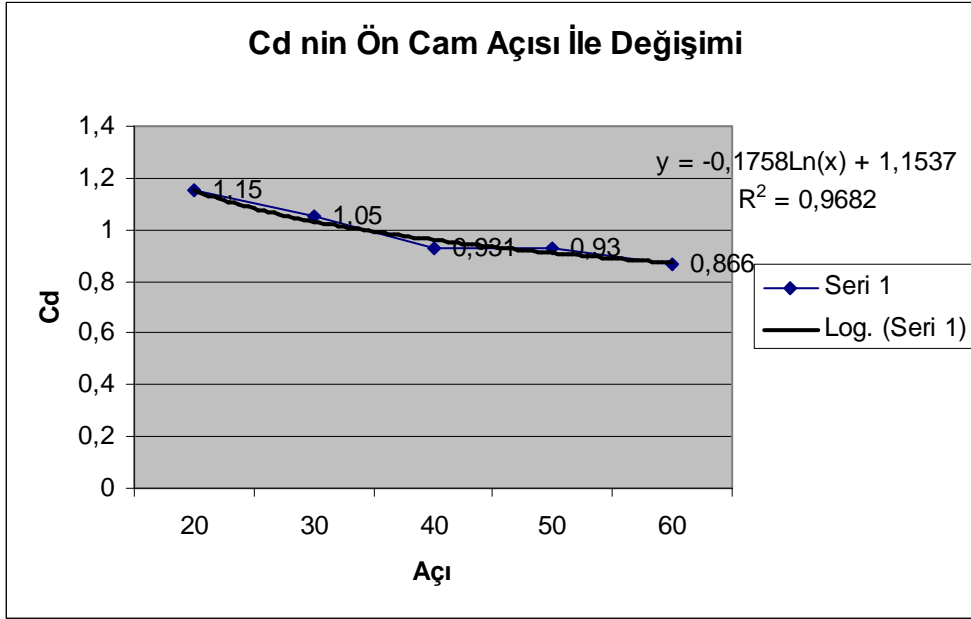
##### 5.1.1 Ön cam formları

Çizelge 5.1’de, taşıt ön cam açılarına karşılık gelen Fluent’den elde edilen taşıt üzerine etkileyen toplam kuvvetler verilmiştir.

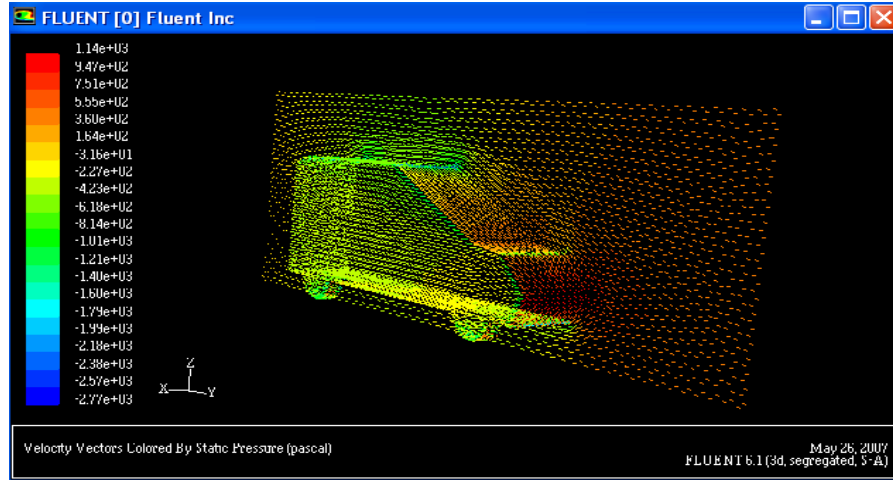
Çizelge 5.1 Taşıt Ön cam formuna göre değişen direnç kuvveti ve  $C_D$



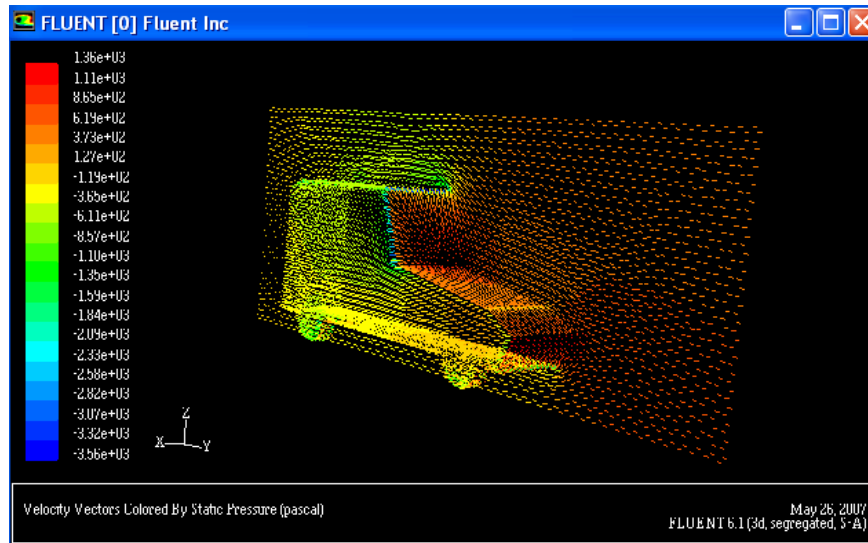
Tablolarda verilen değerlerler dikkate alındığında, ön cam açısı değişimi ile aerodinamik direnç katsayısı arasındaki değişim, Şekil 5.1'deki gibi olmaktadır. Bu grafiklerden, direncin hangi açılarda arttığı ve hangi açılarda minimum olduğu gözlemlenmektedir.



Her bir grafik ayrı ayrı incelenecek olursa, Şekil 5.1'de ön cam açısının  $20^\circ$  olduğu durumda, taşıta etkiyen direnç kuvveti katsayısı maksimum olduğu ve  $40^\circ$  değerine kadar azaldığı,  $40^\circ - 60^\circ$  arasında daha küçük bir eğimle azaldığı anlaşılmaktadır. Taşıtin ön form değişimi ile basınç değişimini  $20^\circ$  ve  $60^\circ$  için karşılaştırırsak,  $C_D$  değerlerindeki değişimi görsel olarak daha iyi görülecektir. Bunun için Fluent programından yararlanarak, taşıta etkiyen basınç kuvvetlerini grafiksel olarak görebiliriz. Şekil 5.2a ve Şekil 5.2b'de  $60^\circ$  ve  $20^\circ$  lik cam açısına sahip modellere etkiyen basınç değişimleri görülmektedir.



Şekil 5.2a 60° lik Ön cam açısına sahip taşıta etkiyen hava direnci



Şekil 5.2b 20° lik Ön cam açısına sahip taşıta etkiyen hava direnci

## 5.1 Kaput formları

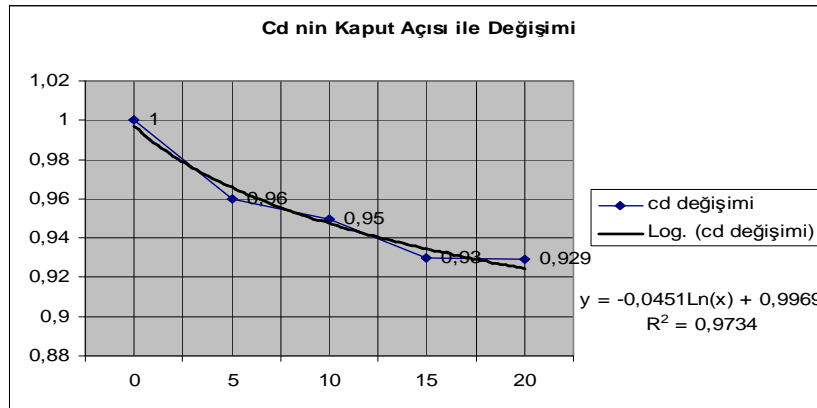
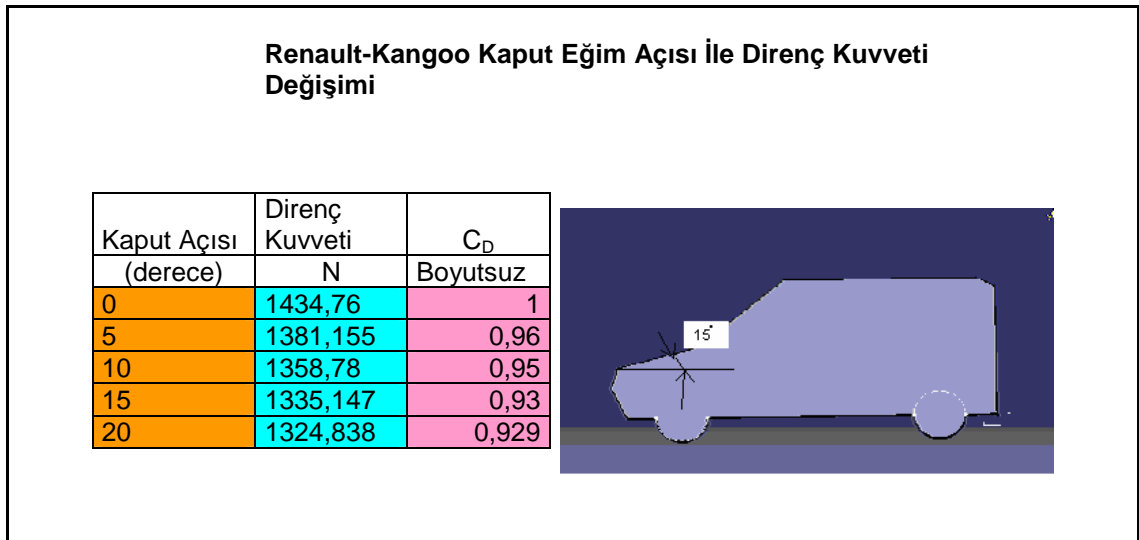
Şekil 5.2b deki 20° lik ön cam formuna etkiyen direnç, koyu kırmızı renklere de anlaşılacağı üzere Şekil 5.2a daki 60° lik ön cam formuna etkiyen dirençten oldukça fazladır. Bu durum araç ön camında yapılan değişimin, taşıta etkiyen dirençlerde, önemli etkiler yaptığını göstermektedir.

Şimdiye kadar ön cam için incelenen analiz sonuçları, aynı şekilde ön kaput formu içinde incelendiğinde çizelge 5.2 deki sonuçlar elde edilir.

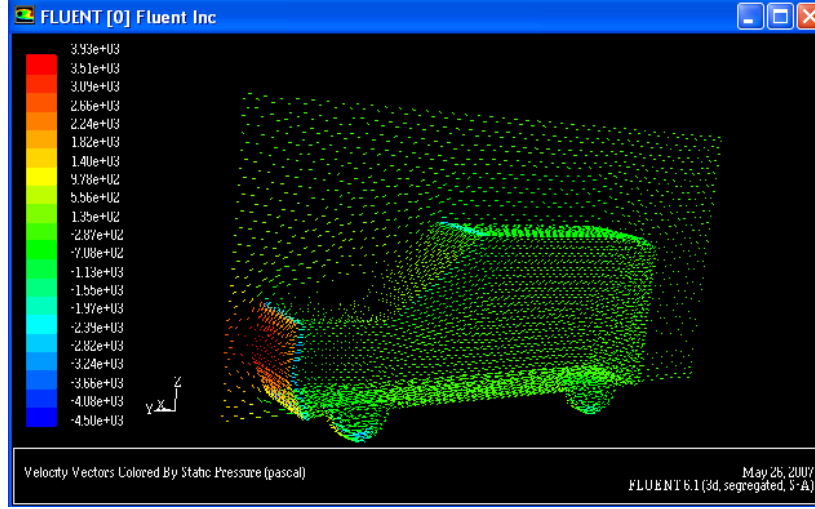
Çizelge 5.2 de kaput formundaki eğim açısının değişimi ile elde edilen aerodinamik direnç kuvvetleri ve direnç katsayıları yer almaktadır. Çizelgeden de görüldüğü üzere  $0^\circ$  den  $15^\circ$  kadar bir azalma varken,  $15^\circ$  ve  $20^\circ$  de  $C_D$  değeri, fazla değişmemekte sabit bir değer almaktadır.

Ön cam formunda incelenen modeller, gibi kaput formundan da  $0^\circ$  ve  $20^\circ$  için Fluent programında Direnç vektörleri grafiksel olarak Şekil 5.4a ve Şekil 5.4b de görülebilir.

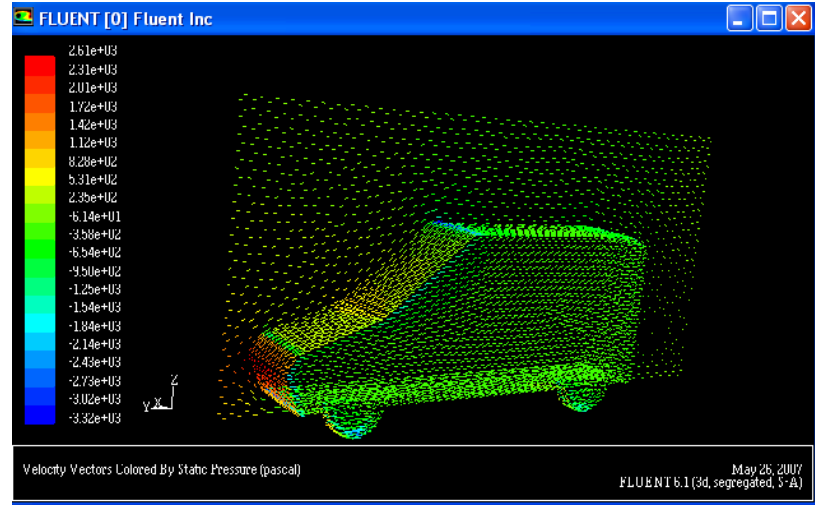
Çizelge 5.2 Taşıt kaput formuna göre değişen direnç kuvvetleri ve  $C_D$



Şekil 5.3  $C_D$  nin kaput açısı ile değişimi



Şekil 5.4.a  $0^\circ$  lik kaput açısına sahip taşıta etkiyen hava direnci



Şekil 5.4.b  $20^\circ$  lik kaput açısına sahip taşıta etkiyen hava direnci

Şekil 5.3b de gösterilen  $20^\circ$  lik kaput açısına sahip taşıta etkiyen hava direnci ön tarafında renklerden de anlaşılacağı üzere  $0^\circ$ ye göre renkte açılma meydana gelmektedir. Buna göre  $0^\circ$ den  $20^\circ$ 'ye doğru dirençte azalma eğilimi görülmektedir.



## 5.2 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çalışma sonucunda; en uygun aerodinamik direnç kuvveti katsayısını veren modeller, kaput için 20°'lik model ve ön cam için 60°'lik model olmaktadır. Ayrıca, çalışma kapsamında, en kötü aerodinamik direnç kuvveti katsayısının kaput için 0°'lik modelde ve ön cam için 20°'lik modelde gerçekleştiği anlaşılmıştır.

Aerodinamik direnç kuvveti katsayıları, bir taşıtın enerji sarfiyatı açısından önem taşımakta ve bu açıdan iyilik derecesini simgelemektedir. Bu çalışma kapsamında incelenen modellerin, aynı şartlar altındaki yakıt sarfiyatlarının hesaplanması, elde edilen sonuçların uygulamadaki değerini vurgulayacaktır:

Renault-Kangoo Teknik özellikleri;

Kütle: 1120 kg

Deney hızı: 27 m/sn

İz Düşüm Alanı: 3,1 m<sup>2</sup>

Yuvarlanma Direnci: 0,02

Kat ettiği mesafe :1000 m

Mevcut Şartlarda Ürettiği Güç: 70 KW

olarak alınırsa, M kütleindeki bir taşıt durgun halden V hızına çıkartılmasında yapılan iş, ikinci bölümde bahsedildiği gibi denklem (2.23) den.

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

$$E_1 = \frac{1}{2} \cdot 1120 \cdot 27^2 = 408240 \text{ Joule olacaktır.}$$

Bu sırada s kadar yol kat edildiyse, yuvarlanma direncine karşı yapılan iş (aerodinamik kaldırma kuvveti=0 için) denklem (2.24) den yararlanarak

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

$$E_2 = 40 \cdot 0,02 \cdot 1000 = 800 \text{ joule olur.}$$

Buraya kadar olan hesaplamalar, incelenen her model için aynı olup, aerodinamik dirence harcanan enerji miktarında değişiklikler olmaktadır.

Buna göre, toplam enerji

$$E_{\text{Toplam}}=E_1+E_2+E_3 \quad (5.1)$$

Bağıntısından elde edilir. Aynı mesafe için aerodinamik direnç kuvvetine karşı yapılan iş, denklem (2.25)'den

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

$$E_3=0,5 \cdot 1,225 \cdot 27^2 \cdot 3,1 \cdot C_D \cdot 1000$$

$$E_3=1384188,75 \cdot C_D$$

olarak bulunacaktır. Burada,  $E_3$  ifadesinde  $C_D$  yerine Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'deki değerler yerine yazılır ve aşağıdaki toplam enerji büyüklükleri bulunur:

Ön Cam Formları İçin Bulunan Toplam Enerji Değerleri:

$E_{c_{20}}= 1591817 \text{ J}$	$E_T= 2000857 \text{ J}$
$E_{c_{30}}= 1453398 \text{ J}$	$E_T= 1862438 \text{ J}$
$E_{c_{40}}= 1288680 \text{ J}$	$E_T= 1697720 \text{ J}$
$E_{c_{50}}= 1287296 \text{ J}$	$E_T= 1696336 \text{ J}$
$E_{c_{60}}= 1198707 \text{ J}$	$E_T= 1607747 \text{ J}$

Kaput Formları İçin Bulunan Toplam Enerji Değerleri:

$E_{k_0}= 1384189 \text{ J}$	$E_T= 1793229 \text{ J}$
$E_{k_5}= 1328821 \text{ J}$	$E_T= 1737861 \text{ J}$
$E_{k_{10}}= 1314979 \text{ J}$	$E_T= 1724019 \text{ J}$
$E_{k_{15}}= 1287296 \text{ J}$	$E_T= 1696336 \text{ J}$
$E_{k_{20}}= 1285911 \text{ J}$	$E_T= 1694951 \text{ J}$

Toplam enerji değerleri, Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de verilen  $C_D$  değişimine paralel olarak azalmaktadır.

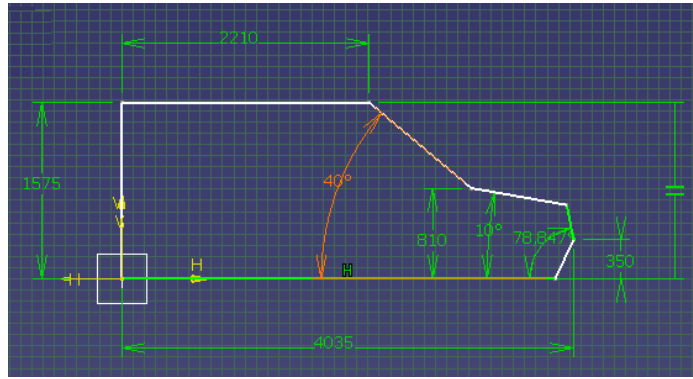
Bu veriler ışığında, aerodinamik dirence en az maruz kalan taşıtın ön formu  $20^\circ$ lik kaput ve  $60^\circ$ lik ön cam açısına sahip modellerdir. Aerodinamik dirence en çok maruz kalan modeller,  $0^\circ$ lik ön kaput açısı ve  $20^\circ$ lik ön cam açısına sahip modellerdir.

Araştırma sonucu elde edilen verilerden, aerodinamik açıdan en iyi ve en kötü formlar arasındaki enerji farkı

$$\begin{aligned}
 E_{\text{Fark}} &= E_{C20} - E_{k20} & (5.2) \\
 &= 2000857 - 1694951 \\
 E_{\text{Fark}} &= 305906 \text{ Joule}
 \end{aligned}$$

. Bu da, 1000 m'lik yoldaki enerji tasarrufu miktarını göstermektedir.

Oysa, orijinal Renault-Kangoo ölçüleri, Şekil 5.4'den de görüleceği üzere, bu optimum değerlerden farklıdır.



Şekil 5.5 Renault-Kangoo orijinal ölçüleri

Ön formun değiştirilmesi ile elde edilen enerji tasarrufu, en kötü form için, taşıtın 100 km/h hızla giderken yolda harcadığı enerjinin % 15'ine karşılık gelmektedir.

Bu değer, günümüzde hiç küçümsenmeyecek değerdir. Özellikle giderek artan hafif ticari araç talebi dikkate alındığında, resmi verilere göre 21 900 hafif ticari araç sadece ocak-şubat 2007 yılında satılmıştır. Hafif ticari araçları almaya hızla iten nedenlerin başında, bunların, kamyon vb. ticari araçlara oranla daha az yakıt sarfiyatına sahip olmasıdır. Bunun dışında, otomobilin verdiği konforun ve taşıma kapasitelerinin kamyonet ve benzerlerinin yük taşıma kabiliyetlerine yaklaşması, bu araçları daha cazip kılmaktadır. Hızla artan talep, benzer tipteki diğer markalara bakıldığında, aynı şekilde aerodinamik direnci düşürecek bazı değişiklikler ihmal edilmiştir.

Yukarıda verilen ölçüler, minimum direnç değerlerini sağlayacak formlar olmayıp ortalama değerlerdir. Ticari aracın, minimum yakıt sarfiyatı sağlayacak model olmamasının ana nedeni, yük taşıma kapasitesinin arttırılması için iç hacmin buna paralel olarak arttırılması zorunluluğudur. Bunun dışında, Türkiye’de Renault-Kangoo, Ford-Transit, Fiat-Doblo vb. hafif ticari araçların, binek otomobil vergi dilimine girmesi, bu taşıtlara olan ilgiyi arttırmaktadır.

Bu araştırma gösteriyor ki; hafif ticari araçlarda, taşıt ön formu için elde edilen minimum aerodinamik dirence sahip değerlerden, kaput formuna genelde yakın ya da aynı değerleri kullanılmakta, iç hacmin arttırılması gibi nedenlerden dolayı ise, ön cam açılarında aerodinamik direncin artmasına göz yumulmaktadır. Fakat, bu durum sonucu artan yakıt sarfiyatı; hafif ticari araç yerine alternatif olarak kamyon, kamyonet vb taşıtların kullanılması sonucu oluşan fazla yakıt sarfiyatı ve günümüzde kullanılan hafif ticari araçların binek otomobil sınıfı vergi dilimine girmesi düşünüldüğünde, kabul edilebilir görünmektedir. Her ne kadar bu durum, daha büyük ticari araçlarla karşılaştırıldığında ihmal edilebilir gibi görünse de, araç sayısı göz önüne alındığında, oluşan yakıt sarfiyatı çok büyük değerlere ulaşmaktadır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar genel olarak irdelendiğinde; hafif ticari araç tasarımcılarının, tasarımlarında sadece yük taşıma kapasitelerine odaklanmalarının yeterli olmadığı, yakıt sarfiyatını da dikkate alarak daha optimum forma sahip tasarımlara yönelmelerinin gerekli olduğu ortaya çıkmaktadır.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

Albayrak, K, Çetin, T.A. ve Gümüşlüol, Ü. 2006, Geçiş Durumundaki Taşıtların Aerodinamik Etkileşimlerinin Deneysel İncelenmesi, Mühendis ve Makine Dergisi 561 28-35

Bienz, C, Larsson, T, and Ullbrand, B. 2003, In front Of The Grid-Cfd at SAUBER PETRONAS F1 Leading the Aerodynamic Development, 1st European Automotive Cfd conference, 51-60

Fluent Inc. 2000 FLUENT 6.0 User's Guide, <http://www.fluent.com>

Heisler, H., 2002, Advanced Vehicle Technology, Second Edition, Reed Educational and Professional Publishing Ltd., Oxford, 663 p

Hucho, W.H., 1998, Aerodinamics of Road Vehicles, Fourth Edition, SAE Inc., Harbound, 896 p

Kleber, A.,2003, Cfd as an Integrated Part of The Aerodynamic Development of the Opel ECO-Speedster, 1st European Automotive Cfd conference, 27-36

Koca, M., 1998, Akışkanlar Mekaniği, Palme Yayıncılık, Erzurum, 231 s

Kurulay, N.S., 2002, Motorlu Taşıtların Temel Esasları, DEÜ.Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi, İzmir, 59 s

Özdamar, A.,2005, Otomobil Aerodinamiği Ders Notları, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir,19 s

White,F.M.(Çev. KırıkKöprü. K, Ayder. E), Akışkanlar Mekaniği, Literatür Yayınları:110, İstanbul

Englar, Robert J., 2000 “Development of PneumaticAerodynamic Devices to Improve the Performance,Economy and Safety of Heavy Vehicles,” SAE Paper 2000-01-2208,

## **EKLER**

Ek.1 Taşıt Ön Camına Etkiyen Direnç Kuvvetlerinin Fluent Çıktıları

Ek.2 Taşıt Kaputuna Etkiyen Direnç Kuvvetlerinin Fluent Çıktıları

## Ek.1 Ön Cama Etkiyen Direnç Kuvvetlerinin Fluent Çıktıları

Reading "D:\yüksek lisans tezi\tez son hali\fluent\Cam cas ve dat\oto30.dat"...

Done.

Force vector: (1 0 0)

zone name	pressure force n	viscous force n	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
yan	-709.40045	0	-709.40045	-1158.2048	0	-1158.2048
alt	0	0.15905598	0.15905598	0	0.25968323	0.25968323
ust	0	-0.026161091	-0.026161091	0	-0.042711986	-0.042711986
oto	1766.8611	0.7739237	1767.635	2884.6712	1.2635489	2885.9347
net	1057.4606	0.90681858	1058.3675	1726.4663	1.4805201	1727.9469

Reading "D:\yüksek lisans tezi\tez son hali\fluent\Cam cas ve dat\0T040.dat"...

Done.

Force vector: (1 0 0)

zone name	pressure force n	viscous force n	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
yan	-514.09241	0	-514.09241	-839.33454	0	-839.33454
alt	0	0.12799434	0.12799434	0	0.20897036	0.20897036
ust	0	-0.033824358	-0.033824358	0	-0.055223442	-0.055223442
oto	1849.4706	0.67026579	1850.1408	3019.5438	1.0943115	3020.6381
net	1335.3782	0.76443578	1336.1426	2180.2093	1.2480584	2181.4573

Reading "D:\yüksek lisans tezi\tez son hali\fluent\Cam cas ve dat\oto50.dat"...

Done.

Force vector: (1 0 0)

zone name	pressure force n	viscous force n	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
yan	-71.331848	0	-71.331848	-116.46016	0	-116.46016
alt	0	-0.0090266932	-0.0090266932	0	-0.014737458	-0.014737458
ust	0	-0.066518001	-0.066518001	0	-0.10860082	-0.10860082
oto	1781.1292	0.76657635	1781.8957	2907.966	1.2515532	2909.2175
net	1709.7973	0.69103166	1710.4883	2791.5058	1.1282149	2792.634

Reading "D:\yüksek lisans tezi\tez son hali\fluent\Cam cas ve dat\oto70.dat"...

Done.

Force vector: (1 0 0)

zone name	pressure force n	viscous force n	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
yan	1635.2777	0	1635.2777	2669.8412	0	2669.8412
alt	0	-0.15580155	-0.15580155	0	-0.25436988	-0.25436988
ust	0	0.012698263	0.012698263	0	0.020731858	0.020731858
oto	1576.2661	0.02023573	1577.0863	2573.4957	1.3391604	2574.8349
net	3211.5438	0.67713244	3212.221	5243.3369	1.1052224	5244.4424

Reading "D:\yüksek lisans tezi\tez son hali\fluent\Cam cas ve dat\oto90.dat"...

Done.

Force vector: (1 0 0)

zone name	pressure force n	viscous force n	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
yan	1989.83	0	1989.83	3248.702	0	3248.702
alt	0	-0.15008806	-0.15008806	0	-0.24504173	-0.24504173
ust	0	-0.026772631	-0.026772631	0	-0.043710419	-0.043710419
oto	1703.8508	0.86687315	1704.7177	2781.7973	1.4153031	2783.2126
net	3693.6808	0.69001246	3694.3708	6030.4992	1.1265509	6031.6258

## Ek.2 Taşıt Kaputuna Etkiyen Direnç Kuvvetlerinin Fluent Çıktıları

Reading "D:\yüksek lisans tezi\tez son hali\fluent\kaput cas ve dat\kaput0.dat"...

Done.

Force vector: (1 0 0)

zone name	pressure force n	viscous force n	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
yan	1864.1733	0	1864.1733	3043.5483	0	3043.5483
alt	0	-1.939698	-1.939698	0	-3.1668538	-3.1668538
ust	0	-0.14754261	-0.14754261	0	-0.2408859	-0.2408859
oto	-1433.2709	-1.4968307	-1434.7677	-2340.0341	-2.4438052	-2342.4779
net	430.90247	-3.5840713	427.31839	703.51423	-5.851545	697.66268

Reading "D:\yüksek lisans tezi\tez son hali\fluent\kaput cas ve dat\kaput5.dat"...

Done.

Force vector: (1 0 0)

zone name	pressure force n	viscous force n	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
yan	1784.1216	0	1784.1216	2912.8516	0	2912.8516
alt	0	-1.7021078	-1.7021078	0	-2.7789515	-2.7789515
ust	0	-0.1607669	-0.1607669	0	-0.26247657	-0.26247657
oto	-1379.6737	-1.4817559	-1381.1555	-2252.5285	-2.4191932	-2254.9477
net	404.44788	-3.3446305	401.10325	660.32306	-5.4606213	654.86244

Reading "D:\yüksek lisans tezi\tez son hali\fluent\kaput cas ve dat\kaput10.dat"...

Done.

Force vector: (1 0 0)

zone name	pressure force n	viscous force n	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
yan	1742.0372	0	1742.0372	2844.1424	0	2844.1424
alt	0	-1.5286955	-1.5286955	0	-2.4958293	-2.4958293
ust	0	-0.17747557	-0.17747557	0	-0.28975604	-0.28975604
oto	-1357.2974	-1.4826618	-1358.78	-2215.9957	-2.4206724	-2218.4164
net	384.73987	-3.1888329	381.55104	628.14672	-5.2062578	622.94047

Reading "D:\yüksek lisans tezi\tez son hali\fluent\kaput cas ve dat\kaput15.dat"...

Done.

Force vector: (1 0 0)

zone name	pressure force n	viscous force n	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
yan	1705.074	0	1705.074	2783.7942	0	2783.7942
alt	0	-1.3642204	-1.3642204	0	-2.2272986	-2.2272986
ust	0	-0.18421564	-0.18421564	0	-0.30076022	-0.30076022
oto	-1333.7336	-1.4133351	-1335.147	-2177.5243	-2.3074859	-2179.8318
net	371.34033	-2.9617711	368.37856	606.26993	-4.8355447	601.43439

Reading "D:\yüksek lisans tezi\tez son hali\fluent\kaput cas ve dat\kaput20.dat"...

Done.

Force vector: (1 0 0)

zone name	pressure force n	viscous force n	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
yan	1679.5189	0	1679.5189	2742.0717	0	2742.0717
alt	0	-1.0914313	-1.0914313	0	-1.7819286	-1.7819286
ust	0	-0.19191934	-0.19191934	0	-0.3133377	-0.3133377
oto	-1323.4462	-1.3921028	-1324.8383	-2160.7284	-2.272821	-2163.0013
net	356.07275	-2.6754534	353.3973	581.34327	-4.3680872	576.97518