

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BİR ARAÇ MODELİNİN AERODİNAMİK ANALİZİ  
VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE SİMÜLASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mak. Müh. Tayfur Kerem DEMİRCİOĞLU**

**Balıkesir, Ağustos–2007**

T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BİR ARAÇ MODELİNİN AERODİNAMİK ANALİZİ  
VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE SİMÜLASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Tayfur Kerem DEMİRCİOĞLU

Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. İlker EREN

Sınav Tarihi: 23.08.2007

Jüri Üyeleri: Yrd.Doç.Dr. İlker EREN (Danışman-BAÜ)

Yrd.Doç.Dr. Semin KAYA (BAÜ)

Yrd.Doç.Dr. Nuray GEDİK (BAÜ)

Balıkesir, Ağustos-2007

Bu yüksek lisans alışması, Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi 2007/03 nolu Araştırma Projesi tarafından desteklenmiştir.

## ÖZET

### BİR ARAÇ MODELİNİN AERODİNAMİK ANALİZİ VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE SİMÜLASYONU

Tayfur Kerem DEMİRCİOĞLU

Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

(Yüksek Lisans Tezi / Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr.İlker EREN)

Balıkesir, 2007

Otomotiv endüstrisinin ana konulardan bir tanesi, sayısal yöntemlerle sürüklenme katsayısını azaltmak için taşıt tasarımı aerodinamiğinin iyileştirilmesi olmuştur.

Bu çalışmada, SOLIDWORKS 'te tasarlanan Ferrari F1 yarış aracı üzerinde ANSYS CFX yazılımı (k-epsilon modeli) kullanılarak üç-boyutlu SAD (Sayısal Akışkanlar Dinamiği) hava akış simülasyonu uygulandı. "CFX-mesh" te ağ yapısı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturuldu. "CFX-pre" de sınır şartları olarak serbest akış hızı (130 km/h) ve hava akış özellikleri belirlendi. Hesaplama esnasında sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri gözlemlendi. Kuvvet değerlerinin yakınsama davranışı ortalama bir seviyeye eriştiği zaman, "CFX-solver" durduruldu. Kaldırma ve sürüklenme katsayıları gibi aerodinamik karakteristikler "CFX-post" kullanılarak hesaplandı. Aracın yüzeyinde ve çevresindeki hız ve basınç dağılımları akış çizgileri, vektörler ve eş büyüklük eğrileri şeklinde grafik olarak gösterildi.

Taşıt için çok daha sık ağ yapısı ve daha yüksek "iterasyon" sayıları elde etmek istenirse ve karmaşık eğrili yüzeylerin çözünürlüğüne bağlı olarak daha gerçekçi geometriler kullanılırsa, daha yüksek kapasiteli bilgisayara ihtiyaç vardır. Aksi takdirde simülasyondaki hesaplamalar uzun zaman alır.

Sonuç olarak önerilir ki, analiz hesap sonuçları ile rüzgar tüneli deneysel verileri arasında kıyaslama yapılması, bu arabanın optimum tasarımı için faydalı olacaktır.

**ANAHTAR SÖZCÜKLER:** aerodinamik / rüzgar tüneli / sayısal akışkanlar dinamiği / sürüklenme katsayısı

## **ABSTRACT**

### **AERODYNAMIC ANALYSIS OF A VEHICLE MODEL AND ITS SIMULATION WITH FINITE ELEMENT METHOD**

**Tayfur Kerem DEMİRCİOĞLU**

**Balıkesir University, Institute of Science  
Department of Mechanical Engineering**

**(M. Sc. Thesis / Supervisor: Assist. Prof. Dr. İlker EREN)**

**Balıkesir, 2007**

The improvement of the aerodynamics of car designs for reduction of drag coefficients with numerical methods has become one of the main topics of the automotive industry.

In this study, three-dimensional CFD (Computational Fluids Dynamic) simulation of airflow using ANSYS CFX software (k- $\epsilon$  model) was performed on a Ferrari F1 racing car designed in SOLIDWORKS. Mesh generation was produced by using finite element method in CFX-mesh. Free stream velocity (130 km/h) and air properties were determined in CFX-pre as boundary conditions. Lift and drag forces monitored during calculation. When the convergent behavior of the force values in an average manner was achieved, CFX-solver was stopped. The aerodynamic characteristics such as lift and drag coefficients were calculated by using CFX-post. Velocity and pressure distributions on the surface and around of the car were presented as graphically with streamlines, vectors and contours.

If more fine mesh generation for vehicle and higher iteration numbers are desired to obtain and the realistic geometries due to the resolution of the complex curved surfaces are used, there is needed higher computational requirements. Otherwise, the calculations in simulations take more time.

Finally, it is suggested that when the some comparisons are made between computational results and wind tunnel experimental values, it will be useful for the optimum design of this car.

**KEY WORDS:** aerodynamics / wind tunnel / computational fluids dynamic / drag coefficient

<b>İÇİNDEKİLER</b>	<b>Sayfa</b>
<b>ÖZET, ANAHTAR SÖZCÜKLER</b>	ii
<b>ABSTRACT, KEY WORDS</b>	iii
<b>İÇİNDEKİLER</b>	iv
<b>SEMBOL LİSTESİ</b>	vi
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	vii
<b>ÖNSÖZ</b>	ix
<b>1. GİRİŞ</b>	1
1.1 Literatür Araştırması	2
1.2 Çalışmanın Amacı	4
<b>2. TAŞITLARDA AERODİNAMİK</b>	5
2.1 Otomobillerdeki Kayıplar	5
2.2 Aerodinamik Kuvvetler	6
2.2.1 Sürüklenme Kuvveti (drag force) ( $F_D$ )	8
2.2.2 Kaldırma Kuvveti (lift force) ( $F_L$ )	9
2.2.3 Yanal Kuvvet ( $F_Y$ )	11
2.3 Aerodinamik Momentler	11
2.3.1 Yunuslama Momenti (pitching) ( $M_P$ )	12
2.3.2 Yuvarlanma Momenti (rolling)( $M_R$ )	12
2.3.3 Yana Kayış Momenti (yaw)( $M_Y$ )	12
2.4 Aerodinamik Dirence Etki Eden Faktörler	13
2.4.1 Sürüklenme Katsayısını Azaltmak İçin Yapılan Çalışmalar	14
2.4.2 Taşıtın Tasarımında İdeal Aerodinamik Şekil	15
2.4.3 Taşıtın Alt Hava Akımı	18
2.4.4 Kanatlar (Spoiler)	20
2.4.5 Yer Etkisi	22
<b>3. KARAYOLU TAŞITLARINDA AERODİNAMİK ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİ</b>	23
3.1 Aerodinamik Özelliklerin Deneysel Olarak Belirlenmesi	23
3.1.1 Yol Deneyleri	23
3.1.1.1 Aerodinamik Direncin Ölçülmesi	23

3.1.1.2 Aerodinamik Kaldırmanın Ölçülmesi	25
3.1.1.3 Yüzey Basıncının Ölçülmesi	25
3.1.1.4 Pitot Tüpü ile Hızın Ölçülmesi	26
3.1.2 Rüzgâr Tüneli Deneylei	27
3.1.2.1 Rüzgâr Tünelinin Yapısı	28
3.1.2.2 Rüzgâr Tünelinde Kullanılan Modeller	30
3.1.2.3 Blokaj Sorunu	30
3.1.2.4 Yolun Temsili ve Tekerleklerin Dönmesi Sorunu	32
3.2 Aerodinamik Özelliklerin Sayısal Yöntemlerle Belirlenmesi	34
3.2.1 Benzerlik	34
3.2.1.1 Geometrik Benzerlik	34
3.2.1.2 Kinematik Benzerlik	35
3.2.1.3 Dinamik Benzerlik	36
3.2.2 II Teoremi (Buckingham Teoremi) ve Otomobil Üzerindeki Akışın Boyut Analizi	37
3.3 Taşıt Çevresindeki Hava Akımı ve Görüntülenmesi	41
<b>4. SAYISAL AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (SAD) ANALİZİ</b>	<b>44</b>
4.1 Aracın Bilgisayar Destekli Tasarımı (CAD)	44
4.2 Akışkanın Hacminin Sonlu Elemanlara Ayrılması (Mesh)	46
4.3 Sınır Şartlarının Tanımlanması	49
4.3 Çözümün Elde Edilmesi	51
4.4 Sonuçların Değerlendirilmesi	53
<b>5. SONUÇ VE TARTIŞMA</b>	<b>58</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>60</b>

## SEMBOL LİSTESİ

Simge	Simge Adı	Birimi
$C_D$	Sürüklenme katsayısı	
$C_L$	Kaldırma katsayısı	
$C_P$	Statik basınç katsayısı	
$C_{MP}$	Yunuslama momenti katsayısı	
$C_{MR}$	Yuvarlanma momenti katsayısı	
$C_{MY}$	Yana kayış momenti katsayısı	
$Re$	Reynolds sayısı	
$F_D$	Sürüklenme kuvveti (drag force)	N
$F_L$	Kaldırma kuvveti (lift force)	N
$F_Y$	Yanal kuvvet	N
$M_P$	Yunuslama momenti (pitching)	Nm
$M_R$	Yuvarlanma momenti (rolling)	Nm
$M_Y$	Yana Kayış momenti (yaw)	Nm
$L$	Taşıtın karakteristik uzunluğu	m
$A$	Taşıt kesit alanını	$m^2$
$V$	Taşıtın rüzgâra göre bağlı hızı	m/s
$g$	Yerçekimi ivmesi	$m/s^2$
$a$	İvme	$m/s^2$
$m$	Kütle	kg
$\rho$	Yoğunluk	$kg/m^3$
$t$	Zaman	s
$P$	Statik basınç	pa
$H$	Toplam basınç	pa
$q$	Dinamik basınç	pa
$\mu$	Dinamik viskozite	pas
$\nu$	Kinematik viskozite	$m^2/s$



## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa
Şekil 2.1	Otomobil üzerinde oluşan aerodinamik kuvvet momentler ile basınç, ağırlık merkezlerinin şematik görünümü.	7
Şekil 2.2	Taşıtın kesit (referans) alanı	9
Şekil 2.3	(a) Ferrari F1 1/1 Prototip, (b) Ferrari F1 1/14 Model Araç .	13
Şekil 2.4	1936 yapımı Mercedes W125	15
Şekil 2.5	(a) Fastback otomobil, (b) normal binek otomobil	17
Şekil 2.6	Taşıtın lastik boşluklarında meydana gelen hava akımı ayrılmasının şekli	18
Şekil 2.7	Etek ve hava barajı	19
Şekil 2.8	Taşıtın altındaki kısımların hava akımına maruz kalışı	19
Şekil 2.9	Ferrari F50'nin alttan görünüşü	20
Şekil 2.10	Hava kanadının hava akımını yönlendirişi	21
Şekil 2.11	Yer etkisi oluşturmak için taşıtın alt kısmına yerleştirilen kanallar	22
Şekil 3.1	Tekerlek yuvarlanma direncinin ölçüm düzeneği	24
Şekil 3.2	Deney sırasındaki taşıta ait hız-zaman diyagramı	24
Şekil 3.3	Taşıt yüzeyine yerleştirilen bir basınç alıcısının şematik görünümü	26
Şekil 3.4	Pitot tüpü ölçme prensibi	27
Şekil 3.5	Rüzgâr tüneli	28
Şekil 3.6	Açık devreli bir rüzgâr tünelinin şematik görünümü	29
Şekil 3.7	Kapalı devreli rüzgâr tünelinin şematik görünümü	29
Şekil 3.8	10 m <sup>2</sup> 'lik rüzgâr tünelinin içindeki modelin lüle çıkışına çok yakın yerleştirilmesi durumunda, N konumundaki statik basınç yükselmesi	31
Şekil 3.9	Rüzgâr tüneline yol simülasyonu için uygulanabilecek çeşitli yöntemler	32
Şekil 3.10	Hareketli kayış mekanizması (rüzgâr tüneline yerleştirilmemiş)	33
Şekil 3.11	Geometrik benzer cisimler	34
Şekil 3.12	Kinematik benzer akışlar	35
Şekil 3.13	Sınır tabakası oluşumunun şematik görünümü	35
Şekil 3.14	Dinamik benzer akışlar	36
Şekil 3.15	Otomobilin üzerindeki akış yönüyle kolayca bükülebilen püsküller	41
Şekil 3.16	Taşıt üzerine duman püskürtülmesi	42
Şekil 3.17	Otomobilin üzerindeki akış çizgileri	42
Şekil 3.18	Rüzgâr tüneline Volkswagen otomobilin üzerindeki hava akış şekli	43

<b>Şekil 4.1</b>	Solidworks ile çizilen modelin farklı açılardan gerçeklik görüntüsü verilmiş hali (render)	45
<b>Şekil 4.2</b>	Solidworks ile tasarlanan modelin kısımları (a) katı, (b) tel kafes	45
<b>Şekil 4.3</b>	(a) F1 modelinin yarısı (b) Rüzgâr tünelinin hava ile dolu hacminin yarısından F1 aracının yarısının çıkarılmış hali	46
<b>Şekil 4.4</b>	Modelin sonlu elemanlara ayrılması	47
<b>Şekil 4.5</b>	Simetri yüzeyi ve modelin ağ yapısı	48
<b>Şekil 4.6</b>	(a) Simetri sınır bölgesinde prizma ve tetrahedra elemanların ağ yapısındaki yerleşimlerinin görünümü (b) Tetrahedra, prizma, piramit elemanlar	49
<b>Şekil 4.7</b>	Sınır şartlarının tanımlanması	50
<b>Şekil 4.8</b>	Simetri sınır şartının gösterilmesi	51
<b>Şekil 4.9</b>	Momentum-kütle diyagramı	51
<b>Şekil 4.10</b>	Türbülans değerleri	52
<b>Şekil 4.11</b>	Sürükleme (normal force on fl (Z)) ve kaldırma kuvvetleri (normal force on fl (Y))	52
<b>Şekil 4.12</b>	Hız değerleri akış çizgileri halinde ve renk skalası olarak görülmektedir (streamlines) (a) Aracın Ön Kısmı (b) Aracın Arka Kısmı (c) izometrik açıdan	54
<b>Şekil 4.13</b>	Yüzey akış çizgileri	54
<b>Şekil 4.14</b>	Akışın vektörel gösterimi	55
<b>Şekil 4.15</b>	Simetri yüzeyinde eş hız büyüklüğü dağılım eğrileri (contour)	55
<b>Şekil 4.16</b>	Simetri yüzeyinde eş basınç büyüklüğü dağılım eğrileri	56
<b>Şekil 4.17</b>	Aracın yüzeyindeki eş basınç büyüklüğü dağılım eğrileri (izometrik)	56
<b>Şekil 4.18</b>	Taşıtın projeksiyon alanı	57
<b>Şekil 4.19</b>	Hesaplamalar için formüllerin yazılması	57

## ÖNSÖZ

Tezimin beklenen yararı sağlaması dileğiyle, bu çalışmanın yapılması ve yürütülmesinde bilgi ve tecrübesi ile beni yönlendiren, ilmen ve fikren benden desteklerini esirgemeyen çok değerli hocalarım Yrd.Doç.Dr İlker EREN'e, Doç.Dr.İrfan AY'a ve birlikte çalıştığım tüm araştırma görevlisi arkadaşlarıma, programın temini, eğitimi ve desteği için FIGES firmasına, araç tasarımı için Muharrem BEYOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Çalışmalarım süresince beni sabırla bekleyen, en büyük destekçim. bugünlere gelmemdeki en büyük katkısı olan aileme teşekkürü borç bilirim.

Ağustos, 2007

Tayfur Kerem DEMİRCİOĞLU

## 1. GİRİŞ

Hava içerisinde hareket eden bir cisme etki eden kuvvet ve moment sisteminin, cismin etrafındaki akışa ait özelliklerinin ve dolayısıyla aerodinamik karakteristiklerin tayini aerodinamiğin en temel problemlerinden biridir.

Üretici firmalar, araçlarının insanın ayağını yerden kesmek yanında yüksek sürat, yüksek taşıma kapasitesi, ekonomi gibi üstün performans özelliklerine sahip olması gerektiğini fark ettiklerinden bu yana bir yandan motor tarafından sağlanan gücü artırma, diğer yandan da aracın sistemlerindeki ve bilhassa hava direncinden kaynaklanan kayıpları azaltma yolları aramışlardır. İlk binek otolarının bir telefon kulübesinden farkı yok iken günümüzdeki otomobil üreticileri araçlarının daha iyi aerodinamik özelliklere sahip olmaları amacıyla köklü form değişikliklerine gitmişlerdir ve bu konudaki Ar-Ge çalışmalarına büyük önem vermektedirler. Özellikle rekabet piyasasında daha geniş yer hedefleyen üreticiler araçlarının ekonomikliğini artırırken, ekonomikliği artırmada en büyük engel olan hava direnç kaybını azaltmak için bu tür araştırmalara gelirlerinin büyük miktarını ayırmaktadırlar.

Saatteki hızı 100 km olan bir binek otomobili, gücünün % 60'ını hava ile sürtünmeden kaynaklanan sürüklenme direnci kuvvetini (aerodinamik etki), % 20'sini tekerlek sürtünme kuvvetini, % 20'sini hareketi önleyen diğer kuvvetleri yenmek için harcar. Aracın aerodinamik özelliklerinin iyileştirilmesi ile yakıt sarfiyatından önemli ölçüde tasarruf sağlanır [1].

Bu çalışmada taşıtların aerodinamik özelliklerinden bahsedildikten sonra, sayısal akışkanlar dinamiği analizi yapılan F1 yarış aracının kaldırma ve sürüklenme katsayıları gibi aerodinamik karakteristiklerinin hesaplanması üzerinde durulacaktır.

## 1.1 Literatür Araştırması

Kieffer ve arkadaşları (2006) tarafından yapılan çalışmada Formula Mazda yarış aracının ön ve yan kanatları  $k-\varepsilon$  modelini kullanan Star-CD CFD (computational fluids dynamic) yazılımı ile analiz edilerek, akışı farklı hücum açıları ve yer etkisi için incelemiştir. Aracın yol tutuşu ve dengesi göz önünde bulundurulduğunda ön kanat tasarımının yer etkisi ile değerlendirilmesi ve her iki kanadın hidrodinamik performansının önemli ölçüde farklı hücum açıları tarafından etkilendiği sonucuna varmışlardır [2].

Beccaria ve arkadaşları 1999'da HIPERROAD (high performance road vehicle) adını verdikleri yazılım sistemini geliştirmişler ve bu yazılımı çok işlemcili bilgisayarlarda (parallel computing) kullanmışlardır. Araç tasarımının ilk safhalarında aerodinamik optimizasyon yapılabilmesini sağlayan bu sistem ile Ferrari F550 aracı test edildiğinde bilgisayar verileriyle ölçülen aerodinamik özelliklerin tutarlı olduğunu görmüşlerdir [3].

Gümüüslüol ve arkadaşları (2006) tarafından yapılan çalışmada geçiş durumunda olan taşıtların aerodinamik etkileşimleri rüzgâr tüneline deneysel olarak incelenmiş ve sollamanın başladığı pozisyonda, geçecek modelin önündeki yüksek basınçlı bölgenin, geçilecek modelin arkasında oluşan düşük basınçlı bölge ile etkileşmekte olduğunu böylece hem öndeki hem de arkadaki aracın üzerindeki kuvvetlerin tek aracın yalnız seyahatinde oluşan sürüklenme kuvvetinden daha az oluştuğu sonucuna varmışlardır [4].

Dong Sun ve arkadaşları (2006) aerodinamik deneyler sonucunda elektrikle çalışan küçük hava taşıtı geliştirmişlerdir. İki tip kanat gövdeli (üçgen ve kare) taşıt prototipini rüzgâr ve su tünellerinde test etmişlerdir. Üçgen modelin kareye oranla daha yüksek kaldırma katsayısına sahip olduğu, daha az girdap oluşturduğu ve böylelikle daha iyi dinamik performans gösterdiği sonucuna varmışlardır [5].

Bettle ve arkadaşları (2003) tarafından yapılan çalışmada, çapraz rüzgâr altında köprüyü geçen standart bir taşıma kamyonunun hızının aerodinamik

kuvvetlere etkisini CFD yöntemiyle incelemişler, sabit çapraz rüzgâr altında kamyonun hızıyla yuvarlama momentinin arttığını ve 45° lik yönelme açısıyla da neredeyse ikiye katlanmakta olduğu sonucunu ortaya çıkarmışlardır [6].

Konstantin ve arkadaşları (2007) çalışmalarında su üstü hibrit trimaran modelinin aerodinamik katsayılarını rüzgâr tüneline belirlemişler, farklı hücum açıları için “vortex-lattice” metoduna dayanan sayısal akışkanlar dinamiği (CFD computational fluids dynamic) bilgisayar kodları ile modelin aerodinamik analizini yapmışlar ve modelde kanadın basınçlı tarafına uygulanan interceptor’un (kaldırma yüzeyine dik yerleştirilen plaka) aerodinamik kaldırmada etkili bir yükselme doğurduğunu görmüşlerdir [7].

Hiroyuki Ozawa ve arkadaşları (1998) dünyanın en büyük güneş arabaları yarışmasına (World Solar Challenge) katılan 96 Honda güneş arabasını aerodinamik açıdan incelemişlerdir. Üst gövde kaporta tasarımının analizi için yüzeydeki basınç dağılımlarını dikkate alarak, sayısal akışkanlar dinamiğine dayanan MAC (Marker-and-Cell) metodunu kullanmışlardır. Aracın birçok yönde karmaşık aerodinamik kuvvet ve moment etkisinde kaldığını, sadece bir yöndeki hava akışının incelenmesinin gövde yüzeyi tasarımında en iyi sonucu vermeyeceği sonucunu çıkarmışlardır [8].

Ehab Fares (2006), lattice Boltzman metoduna göre PowerFLOW programında Ahmed modelini referans alarak yaptığı çalışmada taşıtın arkasındaki yaklaşık 30° kritik açıyı temsilen 25° ve 35° lik eğim açıları için çözümleme yapmış, durgun olmayan (unsteady) akışta farklı girdap ve ayrılma davranışları analiz sonuçlarının deneysel verilerle tutarlı olduğunu görmüştür [9].

Arief Suhariyono ve arkadaşları (2006) yaptıkları çalışmada küçük hava taşıtlarının aerodinamik karakteristiklerini (sürüklenme, kaldırma kuvvetleri ile yuvarlanma, yunuslama momentleri) test etmek için hassas bir ölçüm sistemini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak tasarlamışlar ve sistemin kalibrasyon değerleri ile analiz sonuçlarını karşılaştırdıklarında % 3.57 hata ile kabul edilebilir olduğunu görmüşlerdir. Bir kanat modelini rüzgâr tüneline ölçüm sistemi ile test edip

kanadın referans verileri ile deney sonuçları karşılaştırıldığında ölçüm sisteminin doğru sonuç verdiği ortaya çıkmıştır [10].

Masaru ve arkadaşları (2004) tarafından yapılan çalışmada sedan araçlarda aerodinamik sürüklenme direncine neden olan aracın arkasındaki akış ayrılmaları incelemişler, 50 m/s hız ile kapalı rüzgâr tüneline test ettikleri ve ayrıca akış alanının CFD analizini yaptıkları Mitsubishi Lancer Evolution aracının tavan kaporta kısmının bitimine yerleştirilen bombe şekilli girdap üreticilerle (vortex generators VG), sürüklenme ve kaldırma katsayılarında 0,006 düşüş gerçekleştirmişlerdir [11].

Kim ve Geropp (1998), çalışmalarında çeşitli araç yer arası mesafeler için hareketli ve sabit yer düzlemleri kullanarak yer etkisini incelemişler ve ölçülen taban basınçlarının her iki yer düzlemi için aynı olup, sürüklenme direncinin neredeyse aynı kaldığını, kaldırma kuvvetinin de hareketli yer düzlemi için önemli derecede farklılık gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca araç yer arası mesafe düşürüldüğü zaman aracın üst ve altı arasındaki basınç dağılım farkının yükselmekte olduğu sonucunu çıkarmışlardır [12].

Krajnović ve Davidson (2005) tarafından yapılan çalışmada, hareketli zeminin tipik bir fast-back araç etrafındaki akışa etkisini incelemişler, LES (large eddy simulation) sayısal yöntemi ile yer hareketinin etkisinin sürüklenme direncini % 8, kaldırmayı % 16 azalttığını bulmuşlardır. Aracın şekline ve yerden yüksekliğine bağlı olarak aerodinamik kuvvetlerin azalıp çoğalabileceğini, bu yüzden yerin hareket etkisi için genelleme yapmanın mümkün olmadığını sonucuna varmışlardır [13].

## **1.2 Çalışmanın Amacı**

Bu çalışmanın amacı otomobil prototipini gerçek boyutlarında üretmeden ve rüzgâr tüneline girmesine gerek kalmadan sayısal akışkanlar dinamiğine dayanan bilgisayar yazılımı kullanarak daha hızlı, kolay ve düşük maliyetle aracın aerodinamik karakteristiğini belirlemektir.

## 2. TAŞITLARDA AERODİNAMİK

### 2.1 Otomobillerdeki Kayıplar

Gerek taşıt gerekse hava mutlak olarak sabit olmayıp arada bir bağıl hız olacağından aerodinamik kuvvetler oluşur. Bu kuvvetlerin nedeni araç gövdesi üzerindeki dış akış ile motor, radyatör sistemi, araç içindeki ısıtma-soğutma, havalandırma maksadıyla oluşan iç akıştır. Oluşan direncin % 90'dan fazlası dış akıştıdır. Genel olarak sürüklenme katsayısı ( $C_D$ ), kaldırma katsayısı ( $C_L$ ), moment katsayısı ( $C_M$ ) otomobiller için aerodinamik karakteristikleri ifade eder. Bu katsayılar küçüldükçe aracın manevra, hızlanma, yol tutuş kabiliyeti gibi özelliklerinde de iyileşme görülür. Aracın hava sürtünmesini yenmek için harcayacağı enerji miktarı da küçüleceğinden yakıt sarfiyatında önemli bir azalma gözlenir.

$C_D$  değeri bir cismin dış formu sebebiyle düzgün doğrusal akım içinde oluşturduğu süresizlik ve türbülans gibi akım bozuntularının sonucu ortaya çıkar. Dış form itibarıyla cisim ne derece az bozuntuya sebep olursa sürüklenme katsayısı ve buna bağlı olarak sürüklenme kuvveti de o derece küçük olur. Hızı ve geometrik boyutları belli olan bir aracın hava direnç kaybını azaltmanın tek yolu aracın dış formuna bağlı olan sürüklenme katsayısı  $C_D$ 'yi azaltmaktır.

$C_D$  değerinin azaltılması; binek araçları için ekonomik açıdan, belli hıza çıkması istenen araca daha küçük motor takılabilmesi anlamına gelir. Yarış arabalarında ise yüksek performans hedeflendiğinden motor gücü sabit bir aracın daha yüksek hıza erişebilmesi  $C_D$  değerinin önemini ortaya koyar.

Taşıtlarda motorca üretilen güç, hava direnci ve sistem içindeki kayıpları dengeler. Düşük hızlarda hava direnci diğer kayıplar yanında oldukça düşük mertebelindedir. Ancak hız 30-40 km/h değerine ulaşıncaya hava direnci önem kazanır



(Tablo 2.1). Bunun sebebi hava direncinin hızın karesiyle doğru orantılı olarak artmasıdır.

**Tablo 2.1** Benzin motorlu 1200 kg'lık bir otomobilde 90 km/h hızda yakıt enerjisinin % (yüzde) olarak kullanımı [14]

<b>Kayıplar</b>	<b>Kısmi yük (Sabit hız)</b>	<b>Tam yük (İvme veya yokuş)</b>
Termodinamik kayıplar	% 78	% 72
Yardımcı sistemler	% 5	% 5
Tekerlek yuvarlanma kaybı	% 4,6	% 2
İvme veya yokuş kaybı	% 0	% 14,3
<b>Aerodinamik kayıplar</b>	<b>% 10,6</b>	<b>% 5,9</b>
Transmisyon kaybı	% 1,8	% 0,8
Taşıta verilen toplam enerji	% 100	% 100

Sürüklenme katsayısı  $C_D$ 'nin azaltılabilmesi için araç formları gün geçtikçe aerodinamikteki adıyla damla formuna benzetilmeye çalışılmaktadır. En ideal şekil ise su damlası şekli olarak bilinen yatay eksene göre simetrik şekle aittir. Damla formunun özelliği doğrusal akımda bilinen en az bozuntuya sebep olan yapı olmasıdır.

## 2.2 Aerodinamik Kuvvetler

Bernoulli Teoremi (enerjinin korunumu) aynı akış yolunun her noktasındaki atmosferik ve dinamik basınçların toplamının sabit olacağını gösterir.

Aerodinamiğin temel yasası (2.1) bağıntısı ile aşağıdaki gibi gösterilir:

$$P + \frac{\rho V^2}{2} = H \text{ (sabit)} \quad (2.1)$$

Bu ifadede P atmosferik basıncı (statik basınç),  $\rho$  yoğunluğu, V hızı, q dinamik basıncı ( $\rho \cdot V^2/2$ ) ve H toplam basıncı göstermektedir.

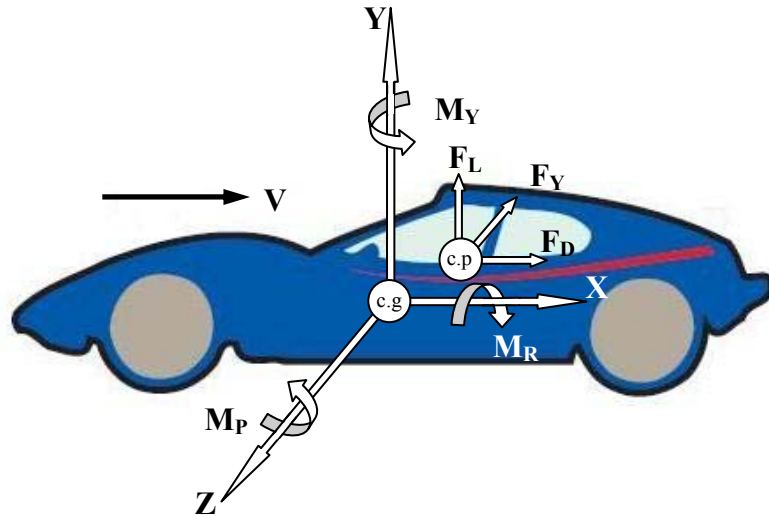
Buradaki toplam basınç henüz taşıtın hareket alanına girmemiş yani deforme olmamış hava ortamından hesaplanabilir. Havanın hızının değiştiği yerlerde dinamik basınç da değişir. Taşıt etrafındaki dış akış nedeniyle oluşan taşıt yüzeyindeki normal basınç dağılımı **şekil direncini**, kayma gerilmeleri de **yüzey sürtünmesini** oluşturmaktadır.

Denklem 2.2 den görüleceği gibi araç yüzeyindeki basınç dağılımının tüm taşıt yüzey alanına göre integre edilmesiyle, taşıt üzerinde rölatif hızdan dolayı oluşan F aerodinamik bileşke kuvveti bulunur.

$$F = \int (p - p_{\infty}) \cdot dA_y \quad (2.2)$$

Bu ifadede F bileşke kuvveti (taşıt yüzeyindeki yayılı kuvvet), p ortam basıncını,  $p_{\infty}$  işletme (atmosfer) basıncı,  $dA_y$  taşıt üzerinde akışa dik doğrultudaki alanı göstermektedir.

Basınç kuvvetlerinin taşıt üzerindeki belirli bir noktadan etkideği şeklinde bir idealleştirme yapılabilir. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi bu noktaya **basınç merkezi** (center of pressure, c.p.) denir. Bu nokta **ağırlık merkezi** (center of gravity, c.g.) ile aynı nokta değildir. Bu iki noktanın karşılaştırılması aerodinamik açıdan oldukça büyük faydalar sağlar.



**Şekil 2.1** Otomobil üzerinde oluşan aerodinamik kuvvet momentler ile basınç, ağırlık merkezlerinin şematik görünümü

### 2.2.1 Sürüklenme Kuvveti (drag force) ( $F_D$ ):

Araç üzerine etki eden aerodinamik kuvvetin serbest akış hızına ve yere paralel, taşıtın ileri hareket yönüne zıt yöndeki direnç kuvvetidir.

Karayolu taşıtlarına etkiyen en büyük aerodinamik kuvvet bileşeni genellikle aerodinamik sürüklenme kuvvetidir. Bir binek taşıtı için oluşan aerodinamik sürüklenme kuvvetinin ( $F_D$ ) % 90'dan fazlası şekil direnci nedeniyle oluşmaktadır.

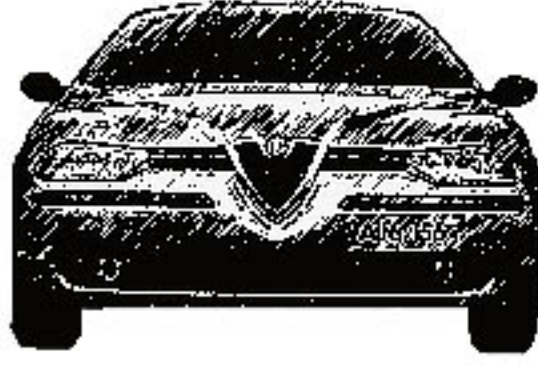
Aerodinamik sürüklenme kuvveti motorun sağladığı çeki kuvveti ile karşılanmaktadır. Onun için sürüklenme kuvveti, gerekli motor gücünde ve dolayısıyla da yakıt tüketiminde etkilidir. Herhangi bir hızdaki yakıt tüketimi direkt olarak gerekli olan güç ile orantılıdır. Aerodinamik direnci yenmek için gerekli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

Aerodinamik sürüklenme kuvveti (2.3) bağıntısından hesaplanır:

$$F_D = q \cdot A \cdot C_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot C_D \quad (2.3)$$

A taşıt kesit alanını, V taşıtın rüzgâra göre bağıl hızını,  $\rho$  havanın yoğunluğunu ( $1,255 \text{ kg/m}^3$ ) göstermektedir.

Maksimum kesit, taşıtın projeksiyon alanı ile aynıdır ve genellikle referans alanı veya karakteristik alan olarak adlandırılır. Bu alan lastiklerin hava akımına karşı olan alanlarını da kapsar. Yaklaşık olarak göz ile görülebilir veya küresel açı etkilerini ihmal edebilecek kadar uzak bir mesafeden fotoğraf makinesi (veya kamera) ile Şekil 2.2 deki gibi görüntülenen alandır.



**Şekil 2.2** Taşıtın kesit (referans) alanı [15]

Geometrik boyutları araç dış formuna bağlı sürüklenme katsayısı belli olan bir araca herhangi bir hızda etkiyen sürüklenme kuvveti hesaplanabilir. Örneğin; hızı 30 m/sn (108 km/h) olan bir aracın projeksiyon alanı  $3\text{m}^2$  ve sürüklenme katsayısı  $C_D = 0,45$  ise bu araca etkiyen sürüklenme kuvveti denklem 2.3'ten aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$F_D = 0,5 \cdot 1,255 \cdot (30)^2 \cdot 3 \cdot 0,45 = 762,4 \text{ N} \cong 80 \text{ kgf}$$

### **2.2.2 Kaldırma Kuvveti (lift force) ( $F_L$ )**

Taşıt hareket (serbest akış hızı) doğrultusuna ve yere dik aerodinamik kaldırma kuvvetidir.

Otomobil aerodinamiğinde uçakların tersine kaldırma kuvvetinin küçük olması istenir. Kaldırma kuvvetinin düşük olması aracın yol tutuşunun iyileşmesine ve özellikle virajlarda savrulmamasına yardımcı olur. Ancak ters yönde etki edecek bir baskı kuvveti de, araç ve tekerlek arasındaki sürtünme kuvvetini artıracığı için yakıt sarfiyatında artışa ve hızlanma kabiliyetinde düşüğe neden olacaktır. Bu nedenle imalatçılar aerodinamik yapıyı kullanarak kaldırma kuvvetini belirli bir seviyede tutmayı amaçlarlar.

Tayfun veya hortum gibi şiddetli rüzgârların tehlikeli olmalarının bir nedeni çok alçaktan eserek yukarıya doğru basınç oluşturup herhangi bir kütleyi havaya

savurmasıdır. Benzer bir etki de hızlı kullanılan otomobillerde oluşmaktadır. Bu etki aracın üstünde oluşan emme, altında oluşan kaldırma kuvvetiyle daha çok artmaktadır.

Yüksek hızlı araçlarda aracın üst kaporta yüzeyinin kambur olması bu bölgede eğrilik sebebiyle bir akım karakteristiği taşıyan hava akımının hareket yönüne dik bir hız bileşeni kazanmasına neden olur. Böylece yeni bileşen sayesinde daha büyük değere sahip bir bileşke hız vektörü ortaya çıkar.

Kaldırma kuvveti denklem (2.4)'ten hesaplanır:

$$F_L = q.A.C_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A.C_L \quad (2.4)$$

$C_L$  kaldırma katsayısını ifade eder.

Aracın hızındaki artışa paralel olarak araç üstündeki basınç düşer ve araca yukarıdan emme etkisi yapar. Bu etki oluşurken bir yandan da aracın altından giren hava aracı yukarıya kaldırmak için basınç uygulamaktadır. Bu kaldırma ve emme kuvvetleri aracın tekerleklerindeki ağırlık kuvveti etkisini azaltarak kumandanın zorlaşmasına bilhassa viraj halinde aracın kolaylıkla savrulmasına ve hatta yerden havalanıp takla atmasına neden olur. Bu sebeple yarış otomobillerinin alt yapısına eğrilik verilerek yere basma kuvvetini artırmaya çalışılmıştır. Buna rağmen tam bir başarı sağlanamamıştır. Şöyle ki: olanca hızıyla giden bir yarış arabasını rüzgâr piste adeta yapıştırır, öte yandan arabanın karoseri rüzgâr direncini asgariye indirecek şekilde biçimlendirilmiştir. Rüzgâr bir yandan arabayı piste yapıştırırken, öte yandan arabanın altında oluşan hava cereyanı bir karşı güç oluşturur.

Öndeki otomobile fazla yanaşan bir yarış arabasının üzerindeki rüzgâr baskısı azalır, çünkü rüzgârın esas baskısını öndeki otomobil karşılar, arkadaki otomobilin sürati artar ancak ön tekerlerin piste olan teması zayıflar. Bu durumda saatte 300 km hızla giden araç birden bire açıkta kalıp esen rüzgârla karşı karşıya geldiğinde

arabanın altından giren hava tekerlerin yerle olan temasını keser ve aracı havalandırır[14].

Normal binek araçlarında tehlike bu boyutlarda olmamaktadır yine de savrulma riski vardır. Porsche 1966'dan 1969'a kadar ürettiği 911 marka araçlarda ağırlık artırımını yaparak soruna pratik bir çözüm bulmuştur. Saatte 225 km hızla giden araçlarının ön tarafına döküm demir sağ ile sol tarafa birer akü koyarak aracın yere yapışmasını sağlamıştır. Teknik açıdan daha akıllıca çözüm ise kanat (spoiler) kullanımını ile gelmiştir.

### 2.2.3 Yanal Kuvvet ( $F_Y$ )

Havanın hareketi taşıt şekline göre simetrik olmadığı zamanlarda oluşan aerodinamik kuvvetin yan bileşenidir. Bu kuvvet bileşeni sürüklenme ve kaldırma kuvveti ( $F_D$  ve  $F_L$ ) ile dik açı yapmaktadır.

Yanal kuvvet denklem (2.5)'ten hesaplanır:

$$F_Y = q.A.C_Y = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A.C_Y \quad (2.5)$$

### 2.3 Aerodinamik Momentler

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.

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

### 2.3.1 Yunuslama Momenti (pitching) ( $M_P$ )

Aerodinamik sürüklenme ve aerodinamik kaldırma kuvvetlerinden kaynaklanan aracın ön ve arkasından etki eden kaldırma kuvvetleri birbirine eşit olmadığında oluşan **yunuslama momenti**  $M_P$  dır. Basınç merkezinin, ağırlık merkezine göre rölatif pozisyonu  $x_c$  ve  $y_c$  uzaklığında olarak tanımlanırsa;

$$M_P = F_L \cdot x_c + F_D \cdot y_c = q \cdot A \cdot (C_L \cdot x_c + C_D \cdot y_c) = q \cdot A \cdot L \cdot C_{MP} \quad (2.6)$$

Burada  $L$  taşıtın karakteristik uzunluğudur ve binek taşıtlar için genellikle ön ve arka aks arasındaki uzunluk alınır.  $C_{MP}$  ise birimsiz yunuslama momenti katsayısıdır.

### 2.3.2 Yuvarlanma Momenti (rolling) ( $M_R$ )

Aracın sağ ve sol taraflarına etki eden yanal kuvvetler birbirine eşit olmadığında oluşan **yuvarlanma momenti**  $M_R$ ,  $y_c$  uzaklığında etkiyen aerodinamik yan kuvvetten kaynaklanmaktadır.  $C_{MR}$  birimsiz yuvarlanma momenti katsayısıdır

$$M_R = F_Y \cdot y_c = q \cdot A \cdot L \cdot C_{MR} \quad (2.7)$$

### 2.3.3 Yana Kayış Momenti (yaw) ( $M_Y$ )

Yanal rüzgârların aracın ön ve arkasına aynı şiddetle etki etmediği durumlarda oluşan aerodinamik **yana kayış momenti**  $M_Y$ ,  $x_c$  uzaklığında etkiyen aerodinamik yan kuvvetten kaynaklanmaktadır.  $C_{MY}$  birimsiz yana kayış momenti katsayısıdır.

$$M_Y = F_Y \cdot x_c = q \cdot A \cdot L \cdot C_{MY} \quad (2.8)$$

## 2.4 Aerodinamik Dirence Etki Eden Faktörler

Aerodinamik tasarım taşıtın performansı ile direkt olarak alakalıdır. Taşıtın aerodinamik yapısının değiştirilmesi tasarımcı, aerodinamik uzmanları, mühendisler ve üreticilerin birlikte çalışmalarıyla gerçekleştirilir. Taşıtın dış yüzeyi, yol tutuş kabiliyeti, güvenilirliği ve hepsinden önemlisi kolay üretilebilirliği gibi birçok konu göz önünde tutulmalıdır. Taşıtın dış yüzeyi ile ilgili aerodinamik araştırmalar oldukça uzun ve yorucu çalışmalardır bu yüzden gerekli teknik şartları sağlamakla birlikte piyasada müşterinin hoşuna gidecek nitelikleri de içermelidir. Taşıta son şekli verilmeden önce yapılan bir tasarım hatası sadece o kısmını değiştirilerek giderilemez. Bu yüzden ölçekli, birebir prototipler veya modeller kullanılır, hava tünellerinde deneyler ve analizler yapılır (Şekil 2.3). Aerodinamik sürüklenme ve kaldırma katsayısının düşürülmesi tasarımdaki iki önemli unsurdur. Diğer önemli bir hususta taşıtın yan kuvvetlere verdiği tepkidir [15]



(a)



(b)

Şekil 2.3 (a) Ferrari F1 1/1 Prototip [16], (b) Ferrari F1 1/14 Model Araç



### 2.4.1 Sürüklenme Katsayısını Azaltmak İçin Yapılan Çalışmalar

Aracın kaportası çevresinde akan havanın mümkün olduğunca kesintisiz ve pürüzsüz bir yüzey etrafında akması sağlanarak sürüklenme katsayısı daha da düşürülebilmektedir. Bu amaca yönelik araçlarda kapı camlarının ve farların kaporta ile aynı yüzeyde, ön ve arka camların daha yatık tasarlanması, yan aynaların formunun aerodinamik özellik taşıması, lastik oyuklarının genişletilmiş çamurluklarla örtülmesi, ön ve arka tekerlekler arasına etekler yerleştirilmesi, ön panel altına hava barajları (airdam) yerleştirilmesi, jant kapaklarının mümkün olduğunca aerodinamik yapıda imal edilmeleri, aracın altındaki düzensizlikleri alt kaplama takviyesi ile gizlenmesi gibi önlemlere rastlanmaktadır.

Bahsedilen önlemler sayesinde sürüklenme katsayısı; binek araçlarında 0,25'e, otobüslerde 0,5'e, motosikletlerde 0,4'e, kamyonlarda ise 0,65'e düşürülmüştür. 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.

Laboratuvar çalışmalarında bulunan sonuçlar normal trafikte tespit edilen sonuçlarla çoğunlukla uyuşmamaktadır. Çünkü araca etkiyen yan rüzgâr, yük durumu vb. faktörler sürüklenme katsayısına doğrudan tesir etmektedir.

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

$C_D$  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. Bu tür araçlarda  $C_D$  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 eden 1936 yapımı geliştirilmiş Mercedes W125 0.20'lik  $C_D$  değerleri ile damla formuna en yakın araçlardan biridir (şekil 2.4) [14].



**şekil 2.4** 1936 yapımı Mercedes W125 [17]

#### **2.4.2 Taşıtın Tasarımında İdeal Aerodinamik şekil**

Taşıtın şekli yolcu sayısı ve koltukların yerleşimine göre belirlenir. Taşıtın maksimum kesit alanına göre tasarım yapılır. Kesit alanına göre teorik olarak taşıtın aerodinamik sürükleme katsayısı bulunmaktadır. Günümüzün iyi tasarımılanmış spor ve yarış otomobilleri ancak 0,2 ile 0,3 arasında sürükleme katsayılarına sahiptir. Bu katsayı farkları çoğunlukla ideal şekilden sapmalardan (yolcu kabiniin şekli gibi) kaynaklanır. Tekerlekler arasındaki boşluk en önemli sapmayı gerçekleştirmektedir. Yolcu bölümü kısımlı sürücünün yolu görebilmesi için gereklidir fakat şekil üzerinde düzgünce ilerleyen hava akımına karşı bir engeldir.

## **Aerodinamik Direncin En Önemli Kaynakları:**

- **Gövde direnci;** Basınç dağılımının yatay bileşeninden dolayı oluşur.
- **Akışkan direnci;** Türbülansların oluşmasından ve aerodinamik kaldırma kuvvetinden dolayı oluşur.
- **Sürtünme direnci;** Taşıt dış yüzeyinin hava ile temasından dolayı oluşur
- **İç hava akımı;** Taşıt sistemi içindeki boşluklarda havanın dolaşmasından dolayı oluşur.

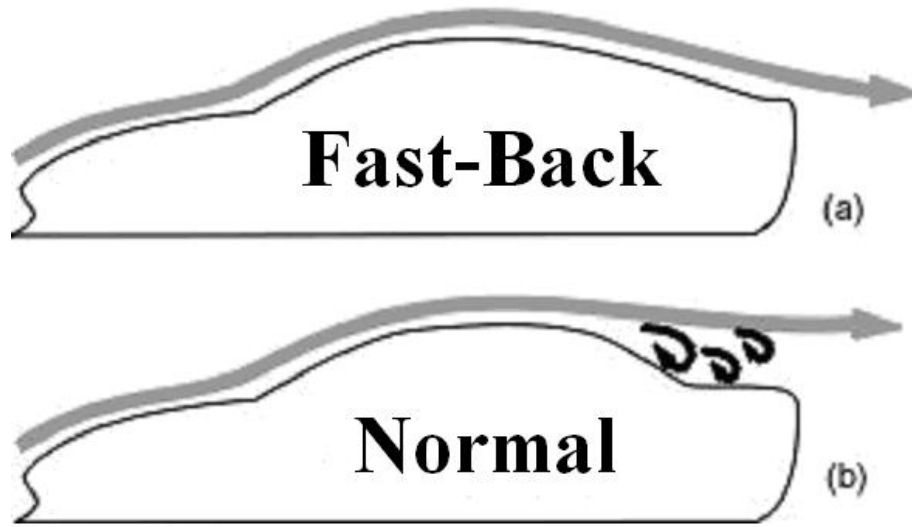
Tekerleklerin dönmesinden dolayı ve taşıtın altından geçen hava aerodinamik direnci arttırır. Akışın bölgesel olarak hızlanmasına ve yavaşlamasına sebep olan veya akışın yönünü değiştiren taşıt yüzeyindeki her şekil gövde direncine eklenir. Yolcu bölümünde hava ön cama geldiği zaman ivmelenir ve yön değiştirir bu yüzden taşıtın kesit alanındaki ani değişiklikler mümkün olduğu kadar azaltılmalıdır.

Hava akışının kanallardan iletilmesi işleminden kaçınılmalıdır. Bölgesel hava akışlarını taşıt üzerinden kolaylıkla ileten şekiller bölgesel hız artışlarına sebep olurlar. Bunun gibi bölgesel hava jetleri taşıtın üzerindeki ana hava akış şeklini keserler ve çevresindeki havadan daha hızlı hareket etmesinden dolayı türbülansa sebep olurlar, bu da gövde direncine eklenir.

Taşıtın arka tarafında, kesit alanındaki ani değişiklikten dolayı hava akışının yavaşladığı bir viskoz sınır tabaka vardır. Bu basıncın artmasına ve ayrılma noktasına kadar ya da hava akışı dış ortamın hava şartlarına uyana kadar akışın basınca karşı iş yapmasına yol açar. Ayrılma çizgisi (separation line) yüzey üzerindeki oldukça küçük objeler sebebiyle veya tasarımdaki ufak detaylardan dolayı aniden meydana gelebilir, bunun için bu bölgenin tasarımına oldukça dikkat edilmelidir.

Taşıtın arka tarafının tasarımının aerodinamik direncinin düşürülmesi; Deneysel ölçümlerden taşıtın arka kısmının bölgesel hava akışına göre negatif eğimli olması gerektiği görülür. Gelen hava akımındaki türbülans oranı veya yüzeyin pürüzlülüğü gibi durumlar kritik açının değerini belirler, taşıtın arka tarafında yüzeyin bölgesel hava akımına göre eğimi  $3^\circ$  ila  $5^\circ$  yi geçmemelidir, geçilirse hava

akışı ayrılışı tetiklenir. Bu fast-back olarak bilinen taşıt tasarımlarının ortaya çıkmasına sebep olmuştur (Şekil 2.5 a, b). Taşıtın yan kısımlarının tasarımı da gözönüne alındığı takdirde taşıtın arka yüzey alanı küçülür ve aerodinamik direnç düşer.

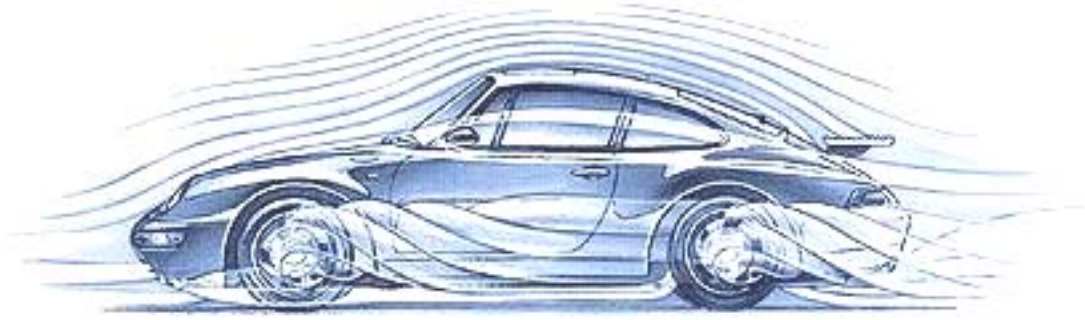


Şekil 2.5 (a) Fastback otomobil, (b) normal binek otomobil

Bu tasarım bize ayrılma çizgisinin hemen hemen taşıtın arka kenarında oluşmasından dolayı bir optimizasyon sağlar. Hava akışının ayrılmasına diğer bir etkende arka yüzeyler üzerine yerleştirilen çeşitli çıkıntılardır. Örnek olarak taşıt gövdesine iyi yerleştirilememiş camlar ayrılma çizgisini taşıtın arka kenarından daha önce olmasına yol açar ve aerodinamik direnci artırır.

Lastiklerin oluşturduğu ark, içinde buldukları boşluktan hava akışının geçmesiyle meydana gelmektedir. Lastiğin dönmesi ve alttan gelen hava ile karşılaşması ön ve arka tekerleklerde havanın lastik boşluğunu izlemesine ve türbülanslar oluşturarak uzaklaşmasına yol açar. Yağışlı bir gün sonrasında taşıtın ön ve arka çamurluklarına bakıldığında oluşan bölgesel türbülans, çamur ve diğer pisliklerin çamurluğa yapışmasına yardımcı olurlar.

Şekil 2.6 dan görüldüğü gibi ön lastikten sonra hava akımı, oluşan türbülanslarla taşıtın yan kenarı boyunca hareket ederken tekrar birleşirler. Arka lastiklerde meydana gelen hava akımı ayrılması genellikle taşıtın arka tarafındaki hava akımı ile birleşir. Bu durum arkada meydana gelen hava boşluğunun daha da büyümesine yol açar ve aerodinamik kuvveti artırır. Lastiklerin bulunduğu boşluğu kısmen veya tamamen kapatmak bu sorunu çözebilir. Arka lastiklerde tamamen kapatılabilmesine rağmen ön lastikler hareketli olduğu için çok zordur.



**Şekil 2.6** Taşıtın lastik boşluklarında meydana gelen hava akımı ayrılmasının şekli

Üstü açık spor otomobillerde hava akışının ayrılması genellikle ön camın bittiği noktada başlar. Taşıtın neredeyse tüm kesit alanında hava boşluğu meydana gelmesini sağlar ve oluşan aerodinamik direnç oldukça artar. Maksimum kesit alanını mümkün olduğunca azaltmak aerodinamik direnci düşürmenin en iyi yoludur.

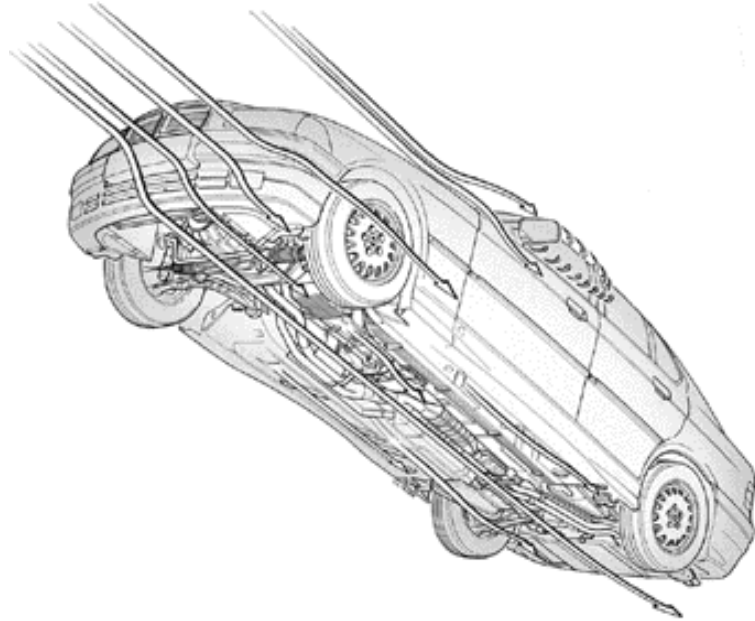
### **2.4.3 Taşıtın Alt Hava Akımı**

Şekil 2.7 de görüldüğü gibi taşıtın ön tamponuna yerleştirilmiş “hava barajı”, yan kısımlarının alt kenarına yerleştirilmiş “etek”, taşıtın alt kısmına gelen hava akımını başka kısımlarına yönlendirerek aerodinamik direnci ve kaldırmayı azaltır.



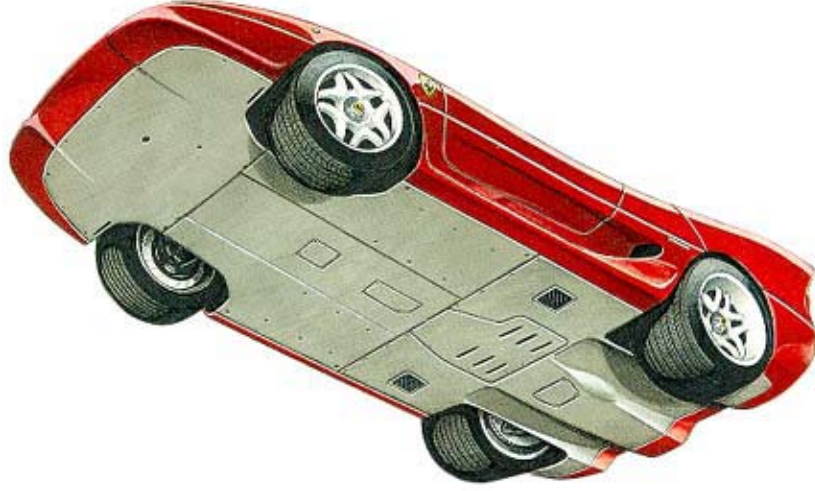
**Şekil 2.7** Etek ve hava barajı

Şekil 2.8 de görüldüğü gibi taşıtın altında motor, vites kutusu, şaft, diferansiyel ve egzoz boruları gibi birçok parça vardır ve bunların hepsi açıkta bulunmaktadır o yüzden bu bölgede hava akımı istenmeyen bir olaydır. Çünkü aerodinamik direnci artırır, türbülansa ve aynı zamanda hava akımını yavaşlatarak aerodinamik kaldırmaya yol açarlar.



**Şekil 2.8** Taşıtın altındaki kısımların hava akımına maruz kalışı

Taşıtın alt kısmındaki parçaların hava akımına maruz kalmayacak şekilde yerleştirmek veya altını tamamen kapatmak bu bölgedeki hava akımının etkisini azaltmanın bir yoludur (Şekil 2.9). Aracın altındaki düzgünsüzlüklerin alt kaplama ile kamufle edilmesi halinde  $C_D$  değeri 0.045 düşüş gösterir [14].



Şekil 2.9 Ferrari F50'nin alttan görünüşü

#### 2.4.4 Kanatlar (Spoiler)

Kelime anlamıyla spoiler bozucu veya dağıtıcıdır. Yapılan laboratuvar araştırmalarında aracın üstünden akan hava akımının kaportayı terk ettiği arka bölüme konulan spoiler bu bölgenin arkasında oluşturduğu hız düşüşü ve buna bağlı olarak ortaya çıkan basınç artışının araca ilave itme kuvveti sağladığı veya diğer bir deyişle aracın hava direnç kaybını azalttığını ortaya koymuştur. Aracın ön tarafına konulan spoilerin ne kadar alçak yerleştirilirse o kadar iyi sonuçlar elde edilebilir ve rüzgârı yönlendirerek yukarı doğru basınç yapmasını ve böylece otomobilin ön kısmının havalanmasını engeller. Bunu yarış otomobillerinde gerçekleştirmek mümkündür fakat binek otomobillerde kolay değildir [14].

Ferrari mühendisleri 1960'lı yılların başında taşıtın arka kısmının sonuna bir uçak kanadı modeli yerleştirildiğinde aerodinamik kaldırma kuvvetinin ciddi bir

biçimde düştüğünü, aerodinamik sürüklenme kuvvetin ise çok az artış gösterdiğini, aşağıya doğru bir net kuvvetin elde edilebildiğini gördüler.

Taşıtın tavanından ayrılan hava akımının büyük bir bölümünü arkaya gitmeden yönlendirme etkisine sahip olan kanat, eğer açısı arttırılırsa aşağı doğru aracı yere bastıran net bir kuvvet bile elde edilebilir (Şekil 2.10).



**Şekil 2.10** Hava kanadının hava akımını yönlendirişi

Hava kanadının altından geçen bir miktar hava akımı vardır. Bu fast-back olmayan taşıtlarda türbülansı engeller ve aerodinamik sürüklenme katsayısının aynı kalmasını sağlar.

Kanadın etkin olarak görevini yapabilmesi için mümkün olduğunca yüksek yerleştirilmelidir, fakat ne kadar yüksek yerleştirilirse kanadın oluşturduğu aşağı doğru net kuvvet, ağırlık merkezine göre o kadar büyük moment oluşturur. Bu moment taşıtın ön aksındaki normal kuvveti düşüreceği için ön tekerleklerin yere tutunması zorlaşacaktır, buda taşıt kontrolü azalacaktır. Formüla 1 gibi yarış otomobillerinde bu etkiyi ortadan kaldırmak için otomobilin ön kısmına da kanat yerleştirilerek her iki aksta da istenilen aşağı doğru net kuvvet (downforce) elde edilebilir. Yüklü ağırlığı 750 kg civarında olan bir Formüla 1 otomobili 290 km/h bir hıza çıktığı zaman bu kanatlar sayesinde yere etkiyen toplam normal kuvveti 2500 kg'a kadar çıkmaktadır.



Aerodinamik kanatlar kaldırma kuvveti için iyi bir çözüm olmasına rağmen yarış otomobilleri tasarlayan mühendisler için hala isteklerinden uzaktır. Normal bir Formüla 1 otomobili viraj alırken 4g'lik bir ivmeye maruz kalır ve bunu yenebilmek için lastikleri yere iyice tutunmasını sağlayacak yeterli normal kuvvete ihtiyacı vardır. Büyük kanatlar yerleştirmek bunu karşılayabilmesine karşın, aerodinamik sürükleme katsayısını oldukça artırmaktadırlar.

#### 2.4.5 Yer Etkisi

1970'lerde Collin CHAPMAN istenildiği kadar büyük normal kuvvet sağlayan yeni bir konu ortaya attı “**yer etkisi**”. CHAPMAN Lotus 72 yarış otomobilinin alt kısmına ön tarafta dar ve arkaya gittikçe genişleyen kanallar açtı. Taşıtın alt kısmın hemen hemen yere değmekte olduğundan bu kanallar neredeyse kapalı bir kanal gibi görünmekteydiler. Taşıt hareket halinde iken hava tünelin uç kısmından girip arkaya doğru genişlemektedir (Şekil 2.11). Bunun sonucu arka kısma doğru hava basıncı düşmektedir ve burada aşağı doğru net bir kuvvet oluşturmaktadır.



**Şekil 2.11** Yer etkisi oluşturmak için taşıtın alt kısmına yerleştirilen kanallar

Yer etkisinden faydalanılması yarışlarda kanatlara göre oldukça üstünlükler sağladı ve yarış komisyonu tarafından kullanımı yasaklandı. Bunun üzerine Gordon MURRAY aynı düşük basıncı elde etmek için taşıtın alt kısmının arka tarafına güçlü bir fan yerleştirdi ve aynı sonucu elde etti. Binek otomobiller yerden yüksek olduğundan bu prensibin kullanımı pek mümkün değildir [15].

### **3. KARAYOLU TAŞITLARINDA AERODİNAMİK ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİ**

#### **3.1 Aerodinamik Özelliklerin Deneysel Olarak Belirlenmesi**

Taşıtların geometrisinde yapılacak olan değişiklikler açısından aerodinamik özelliklerinin belirlenmesi, tasarım sürecinde çok önemlidir. İstenen bazı aerodinamik özellikler şunlardır:

- Aerodinamik katsayılar (sürüklenme ve kaldırma katsayıları)
- Taşıt yüzeyi üzerindeki basınç dağılımı
- Akış görünümü verileri vs.

Deneyler, yolda gerçek bir taşıt üzerinde yapılacağı gibi, rüzgâr tüneline gerçek bir taşıt veya taşıtın ölçekli bir modeli üzerinde yapılabilir.

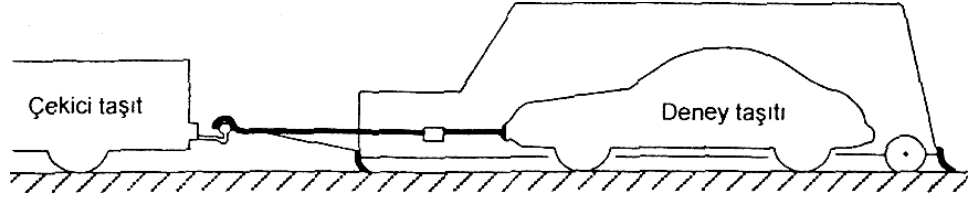
##### **3.1.1 Yol Deneyleri**

Yol deneyleri taşıt aerodinamiği incelemelerinde önemli bir yer tutmaktadır, çünkü gerçek yol şartlarında gerçek bir taşıtın denenmesidir. Deney esnasında, taşıta ve ölçümleri yapacak donanıma ihtiyaç vardır. Taşıtın hareketli ise üzerinde sınırlı sayıda ölçü aleti taşınabilir. Farklı iki taşıt geometrisi test edilecekse ölçü donanımının bir araçtan diğerine aktarılması gerekir. Ölçü donanımı farklı taşıt burnu gibi model değişiklikleri için sorun çıkarabilir, buda yol ve deney şartlarının tekrarlanabilirliği açısından güçlük doğurmaktadır. Yol deneylerinin tekrarlanabilirliği, ölçü aletlerinin hassas olarak taşınabilmesiyle sınırlı olup, kontrol edilemeyen çevre etkenlerine (rüzgârlar vb.) de bağlıdır.

##### **3.1.1.1 Aerodinamik Direncin Ölçülmesi**

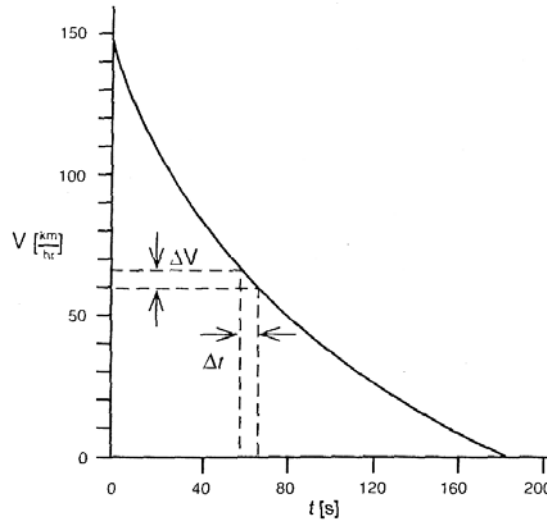
Yol deneylerinde aerodinamik direncin ölçülmesi, aerodinamik dirence ek olarak seyir hattı sürtünmesi ve tekerlek yuvarlanma direncinin de bulunmasından

ötürü zordur. Aerodinamik direncin ölçülebilmesi için tekerlek yuvarlanma direncinin bilinmesine gerek vardır. Tekerlek yuvarlanma direncinin tespiti için bir kutu içerisine alınan taşıt kendisini çevre havasından ayırır (Şekil 3.1). Kutu içindeki kuvvet ölçerler, aerodinamik direnç bileşeni olmadan direnç kuvvetini ölçerler. Aerodinamik direnç kuvvetinin değeri, mekanik sürtünme değerlerinin bilinmesi ile tekerlek yuvarlanma direncinin, taşıt uzunluğu doğrultusunda ölçülmüş olan toplam seyir kuvvetinden çıkarılmasıyla hesaplanabilir.



Şekil 3.1 Tekerlek yuvarlanma direncinin ölçüm düzeneği

Taşıtın belli bir başlangıç hızına getirilip daha sonradan yavaşlamaya bırakıldığı, yöntemler ile de iyi neticeler alınmaktadır.  $C_D$  katsayısı, yavaşlama ivmesi ve katedilen mesafenin ölçülmesi ile hesaplanır. Ayrıca atalet etkileri de değerlendirilmelidir. Bu yöntem sabit hızlı deneye göre daha fazla duyarlı (atmosferik olaylar açısından) olup, her bir veri noktası için çok sayıda tekrara ihtiyaç vardır.



Şekil 3.2 Deney sırasındaki taşıta ait hız-zaman diyagramı

Şekil 3.2 de örnek olarak, bir binek taşıtına ait deney sırasındaki hız-zaman diyagramı verilmiştir. Negatif ivme taşıt üzerine uygulanan kuvvetle doğru orantılı olup, bu taşıtı yavaşlatan dış kuvvet, tekerleklerin yuvarlanma direnci ile aerodinamik direnç kuvvetinin toplamına eşittir. İvmenin küçük bir zaman aralığındaki değeri  $\Delta V/\Delta t$  den hesaplanır.

Toplam direnç kuvvetinin hesaplanması:

$$F = m.a = m. \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (3.1)$$

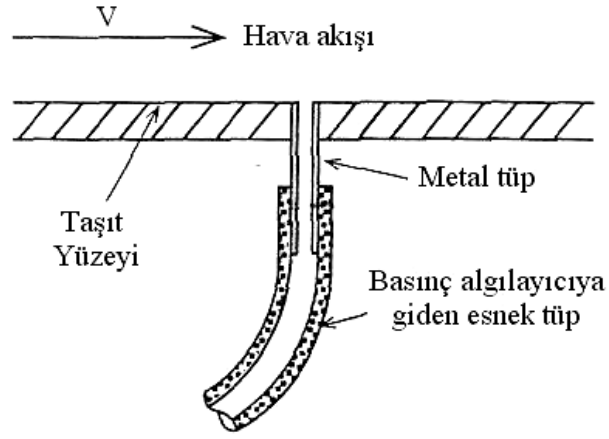
Burada dinamik basıncın ve dolayısıyla taşıt hızının bilinmesine gerek vardır. Bu hız ölçümü pitot tüpü ile yapılır [18].

### 3.1.1.2 Aerodinamik Kaldırmanın Ölçülmesi

Kaldırma etkisi, yol deneylerinde aerodinamik yük nedeniyle süspansiyondaki yer değişiminin ölçülmesi ile belirlenmektedir. Her bir tekerleğin süspansiyon yer değişimi ölçülüp, süspansiyondaki kaldırma kuvveti bileşenleri eşdeğer bir kaldırma değerine dönüştürülmektedir. Süspansiyondaki aerodinamik yük, yaylar üzerine yerleştirilmiş strain gauge'ler ile veya optik seyir yüksekliğini ölçen gauge'ler ile de ölçülebilmektedir.

### 3.1.1.3 Yüzey Basıncının Ölçülmesi

Şekil 3.3 te görüldüğü gibi yüzey basıncının ölçümü için taşıt yüzeyi üzerine küçük bir delik açılır ve burası bir basınç algılayıcıya bağlanır. Delik düz ve yüzeye dik olmalıdır. Bu yöntemle yerel statik basınç ölçülür. Buna tekabül eden statik basınç katsayısı  $C_p$ ' nin hesabı için, dinamik basınç da gerekli olup, o da pitot tüpü ile ölçülür.



**Şekil 3.3** Taşıt yüzeyine yerleştirilen bir basınç alıcısının şematik görünümü

Statik basınç katsayısı denklem (3.2)'den hesaplanır:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2} \quad (3.2)$$

Taşıt yüzeyi üzerinde ayrıntılı bir basınç dağılımı elde etmek için, çok sayıda basınç delikleri açılıp, bunlar merkezi bir ölçü ünitesine bağlanmalıdır.

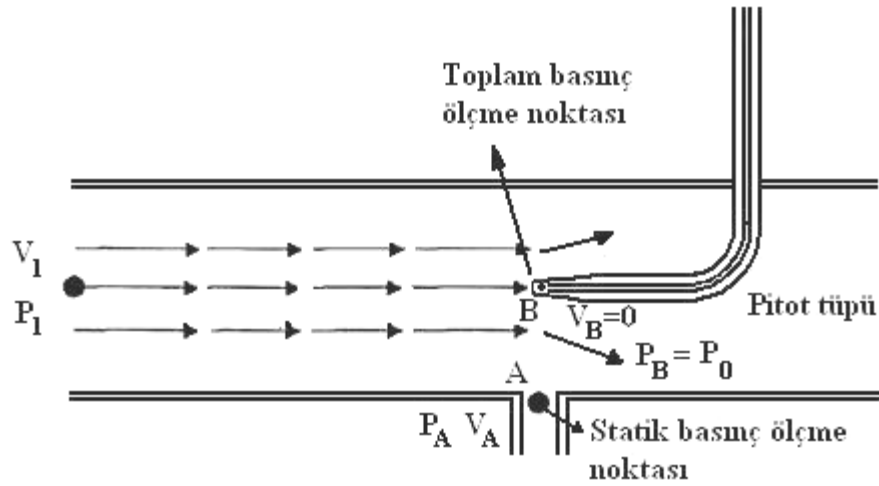
Yüzey basıncı ölçümlerinde, yol deneylerinde taşıt üzerindeki sınırlı hacim nedeniyle deney aletlerinin taşınması zorluk teşkil etmektedir. Ayrıca yolda yapılan bu ölçüm yönteminde deliklerin toz veya pislikler tarafından tıkanma olasılığının önüne geçilmelidir.

#### 3.1.1.4 Pitot Tüpü ile Hızın Ölçülmesi

Pitot tüpü, bir noktadaki akış hızını ölçer. Bu tertibat, rüzgâr tünellerinde otomobil ve uçak gövdeleri üzerinde yapılan testlerde hız ölçümlerinde kullanılmaktadır

Şekil 3.4 de  $V_1$  serbest akış hızı ve  $P_1$  basıncındaki akışkan molekülleri B noktasına geldiklerinde pitot tüpü içine girerek tüpün içini doldururlar ve bundan

dolayısı B noktadaki hızları 0 olacaktır. B noktasındaki basınca **durma noktası** veya **toplam basınç** denir. Hız B noktasında 0 olduğuna göre bu noktadaki basınç da  $P_1$  basıncından büyük olacaktır. Kanala A noktasından açılan bir delikten basınç ölçülürse  $P_1$  bulunacaktır. Bernoulli denklemi A ve B noktaları için uygulanarak statik basınç (serbest akış basıncı)  $P_1$  ile toplam basınç  $P_0$  arasındaki farktan akışın serbest hızı  $V_1$  bulunabilir (Denklem 3.3).



Şekil 3.4 Pitot tüpü ölçme prensibi [19]

$$P_A + \frac{1}{2}\rho V_A^2 = P_B + \frac{1}{2}\rho V_B^2 \Rightarrow P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_0 + 0 \Rightarrow V_1 = \sqrt{\frac{2(P_0 - P_1)}{\rho}} \quad (3.3)$$

Dinamik basınç ( $q$ ), toplam basınç ile statik basınç arasındaki farktan (3.4) bağıntısında görüldüğü gibi hesaplanır:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_0 \Rightarrow P_0 - P_1 = \frac{1}{2}\rho V_1^2 = q \quad (3.4)$$

### 3.1.2 Rüzgâr Tüneli Deneyleri

Rüzgâr tüneli deneyleri modeli ve ölçüm donanımını sabit tutup, havayı model üzerine hareket ettirme ilkesine dayanmaktadır. Rüzgâr tüneli, deney

şartlarının iyi kontrol edildiği ve dış atmosferik şartlardan bağımsız bir ortam sunmaktadır. (Şekil 3.5)



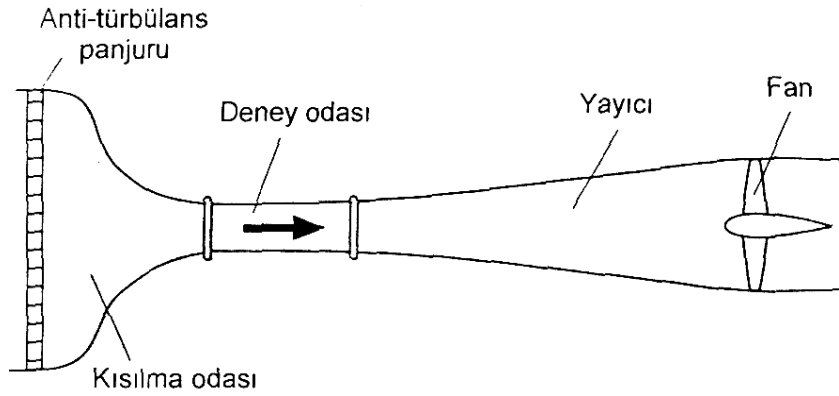
Şekil 3.5 Rüzgar tüneli

### 3.1.2.1 Rüzgâr Tünelinin Yapısı

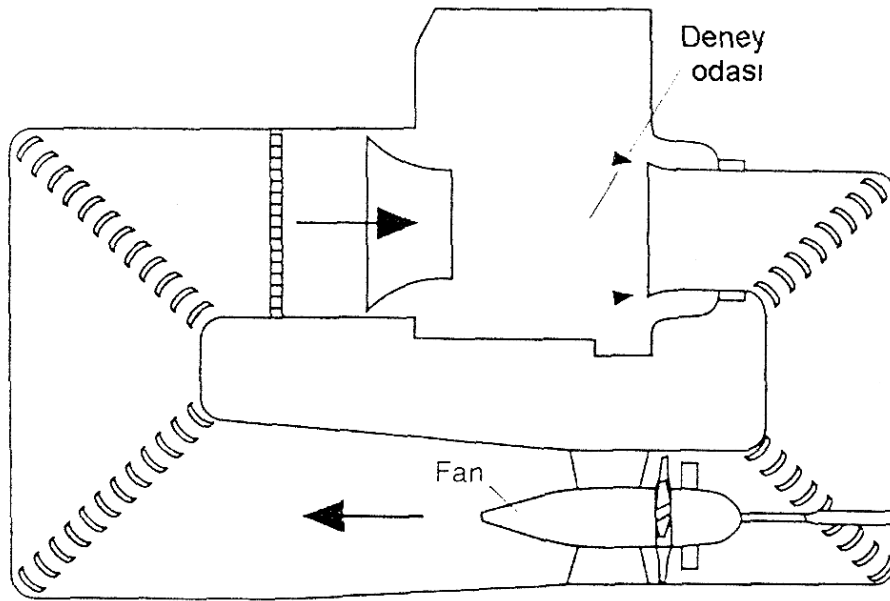
Cisimlerin durağan hava ortamında hareket etmeleri ile cismin hareket yönüne paralel yönde rüzgâra maruz kalması arasında bir fark yoktur. Bütün aerodinamik kuvvetler taşıt ile havanın birbirine göre yaptığı rölatif hareketten kaynaklanmaktadır. Bu nedenle cisimlerin aerodinamik karakteristiği, cisim sabit tutulup, rüzgâr tüneline hava akışına maruz bırakılarak üzerine etki eden kuvvet ve momentlerin ölçüldüğü deneylerle belirlenir. Bu amaçla kullanılan rüzgâr tünelleri kuvvet, moment ve basınç ölçümü yapılabilecek donanımlara sahiptirler.

Rüzgâr tüneline fan havayı hareket ettirmektedir. Denenen modelin yerleştirildiği en dar kesitte (deney odası) havanın yoğunluğu hemen hemen sabit

olduğundan hava en yüksek hıza erişir. Deney odasının kesiti dikdörtgen, daire, oval vb. biçimlerde olabilir. Deney odasında uniform bir hız elde etmek için kısılma odası bulunup, akış düzgünce deney odasına yönlendirir. Girişteki panjurun amacı dışarıdaki rüzgârın etkilerini azaltıp, iç akışın düzenli dağılmasını sağlamaktır. Fana gelen akış hızının düşürülmesi içinde deney odasının arkasında yayıcı diğer adı ile genişleme odası bulunur (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Açık devreli bir rüzgâr tünelinin şematik görünümü



Şekil 3.7 Kapalı devreli rüzgâr tünelinin şematik görünümü



Eğer fandan sonra bir geri dönüş kanalı bağlanırsa, kapalı devreli tip elde edilir (Şekil 3.7). Böylece havanın sahip olduğu momentum dışarı atılmamış olur ve fan sadece duvarlar ile modelin yarattığı sürtünmelere karşı iş yapar.

### **3.1.2.2 Rüzgâr Tünelinde Kullanılan Modeller**

Küçük ölçekli modelin faydası, birebir ölçeğe oranla daha ucuz, kontrolünün kolay olması, üzerindeki değişikliklerin hızlıca gerçekleştirilmesi ve daha küçük rüzgâr tünellerinin kullanılabilmesiyle deneyin daha ekonomik yapılabilmesidir.

Eskiye oranla günümüzde küçük ölçekli model deneyleri daha az uygulanmaktadır. Küçük ölçekli modellerin deney sonuçları tam ölçekli modellere göre yeterince hassas sonuç vermemektedir. Bu farklılık kısmen modeller arasındaki geometrik benzerliğin tam olmayışı (model yapıcısının hüneri ve dikkati ile ilgilidir) ve kısmen de Reynolds sayısının tahmin edilemeyen etkisinden kaynaklanmaktadır. Rüzgâr tünellerindeki türbülans derecesinin yapay olarak artırılması bu etkiyi giderebilir. Bu sebeple, küçük ölçekli deneyler bazı taşıt üreticileri tarafından tekrar kullanılır hale gelmiştir.

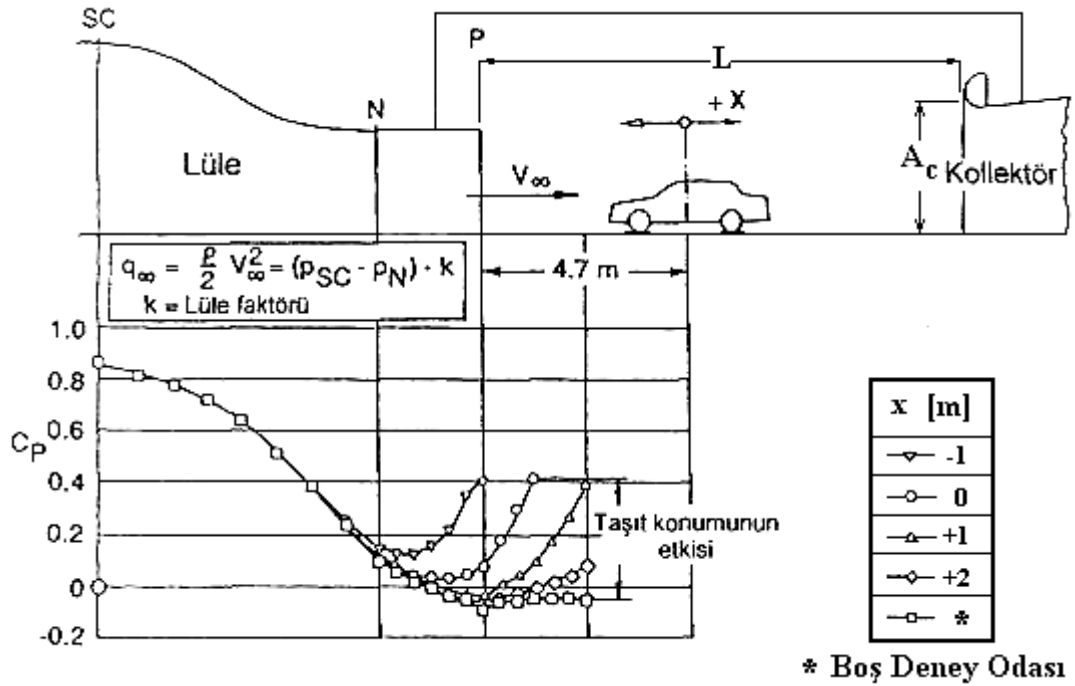
### **3.1.2.3 Blokaj Sorunu**

Blokaj oranı, model kesit alanının deney odası (lülenin çıkış) kesit alanına oranı olarak ifade edilir.

Blokaj oranı, değişik rüzgâr tünellerinde % 4 ile % 20 arasında değişir. Benzerlik şartı için bu oranın % 10 veya daha düşük seviyelerde olması kabul edilebilir. Tipik bir binek taşıtı için tünelin deney odasının kesit alanı 40 m<sup>2</sup> civarında olmalıdır. Avrupa'da son yıllarda 25 m<sup>2</sup> değeri kullanılmaktadır.

Açık deney odalı tünellerde taşıtın üzerinde bulunduğu zemin haricinde kalan diğer üç sınır açık olup, taşıtın küt şeklinden ötürü deney etkilenmektedir. Rüzgâr hızının belirlenmesi hatalı olabilir. Model lüle çıkışına çok yakın ise lüle içerisindeki basınç alıcıların olduğu yerlerde basınç değişmektedir (Şekil 3.8). Deney odası

uzunluğunun (L) yeterli olmaması ve kollektör kesit alanının ( $A_c$ ) lüle kesit alanına oranla çok küçük olması durumlarında, kollektöre giden akışta düzensizlikler oluşabilmektedir. Taşıt civarındaki akış çizgileri, sonsuz kesit alanlı hava akısına göre daha fazla açılmaktadır ve daha düşük bir  $C_D$  değeri elde edilmektedir. Bu etki için genel olarak geçerli olan bir blokaj düzeltmesi mevcut değildir. Bu etkinin küçük olduğu kabulü yapılarak genelde ihmal edilir.



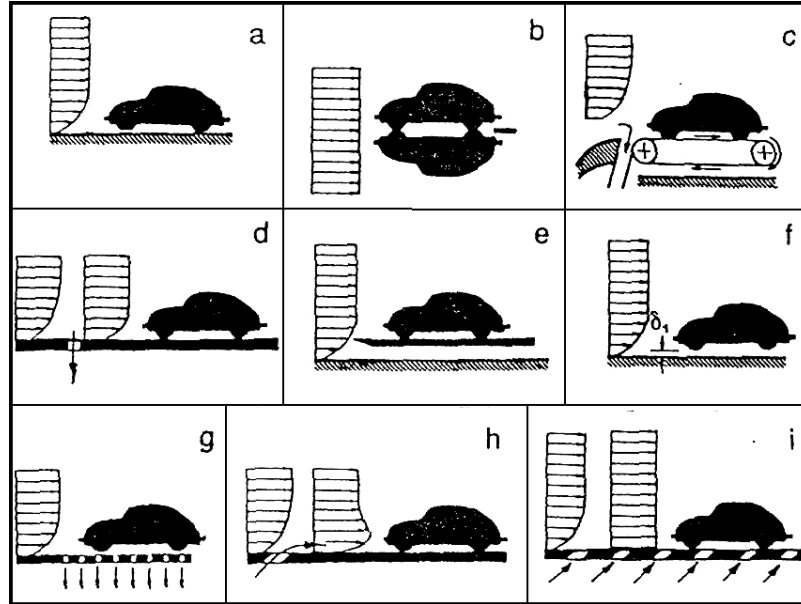
Şekil 3.8 10 m<sup>2</sup>'lik rüzgâr tünelinin içindeki modelin lüle çıkışına çok yakın yerleştirilmesi durumunda, N konumundaki statik basınç yükselmesi

Kapalı deney odalı tünellerde taşıt üzerine yollanan hava jetinin etrafı duvarlar ile sınırlandırılmaktadır. Burada yapılan deneylerde taşıt gövdesinin küt şekli öncelikli olarak blokaja neden olmaktadır. Açık deney odalı tünelin tersine burada akış çizgilerinin açılması, sonsuz genişlikli akışa göre daha azdır. Bu durum, sonsuz genişlikli akışa göre daha büyük bir  $C_D$  değeri oluşturur. Bu farklılık açık deney odalı tünele göre çok daha fazladır.

Tünel kesit alanı içerisinde model büyük bir alanı işgal ederse modelle tünel duvarı arasında kalan alan daralır ve akışkan hızını koruyarak bu dar alandan akıp geçmeden bloke olur ve sınır tabakanın üzerinde akış hızı serbest akış hızına eşit olamaz, akış düzeni bozularak blokaj hataları oluşur. Bunun sonucu olarak akış çizgilerinin gerçekte prototip üzerinde oluşan akış çizgileriyle paralellik şartı sağlanamaz. Deneyle elde edilen sonuçlar ölçülen serbest akış değeri doğru olmayacağından gerçeği yansıtmaz. Rüzgâr tüneli deneylerinde blokaj etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olabilmesi için blokaj oranının % 10 sınırının altında olması tavsiye edilir

### 3.1.2.4 Yolun Temsili ve Tekerleklerin Dönmesi Sorunu

Yolun simülasyonu için rüzgâr tünelinde sınır tabaka kontrolü olmayan durağan katı zemin (a), teğetsel üflemlerli (b), sınır tabaka emmeli (d ve g), hareketli kayış ile sınır tabakanın emiliminin beraber kullanıldığı tüneller en çok kullanılanlardır (Şekil 3.9) [18].



Şekil 3.9 Rüzgâr tünelinde yol simülasyonu için uygulanabilecek çeşitli yöntemler

Yolun temsili için en basit ve yaygın yöntem, durağan katı zemindir. Deney sırasında tekerlekler dönmeyecektir. Boş bir deney odasında sınır tabaka oluşumu, taşıt zemin açıklığının % 10'u kadar olup,  $C_D$  değeri 0.40 ve daha yukarı olan binek taşıtları için yeterlidir.

Hareketli kayış kullanımı, yol simülasyonu için en iyi yöntem gibi gözükmemektedir. Formüla 1 yarış arabaları ve kısmi ölçekli modeller hareketli kayışın kullanıldığı rüzgâr tünellerinde denenmektedir. Kayışın taşıt ağırlığını karşılayabilme sorunu nedeniyle taşıt, kuvvet dengesi olacak şekilde düşey veya yatay duran bir desteğe asılı olarak durmaktadır. Bu desteklerin aerodinamik etkisi de gözönüne alınıp yerleri ona göre belirlenmelidir.

Hareketli kayışın kullanıldığı tünellerde, tekerlekler kayışa temas halinde olup tekerlekler döndürülmelidir (Şekil 3.10). Tekerlekler hareketli kayış üzerinde dönmüyorsa kayış ve tekerlek arası boşluğa gerek vardır, bu da  $C_D$  ve  $C_L$  değerlerinde hata oluşumuna neden olur. Dönen tekerlekler, dönmeyen duruma göre  $C_D$  değerini biraz,  $C_L$  değerini önemli derecede artırır.



**Şekil 3.10** Hareketli kayış mekanizması (rüzgâr tüneline yerleştirilmemiş)

Sabit zemin üzerinde teğetsel üfleme yöntemi, hareketli kayış halindeki zemin simülasyonuna yakındır. Tekerleklerin dönüşü için minyatür kayış veya özel tekerlek altlıkları (tamburlar) kullanılır. Üfleme debisi, boş tünelde taşıt ön

tekerleklerinin bulunacağı yerde sıfır kalınlıklı sınır tabaka oluşturacak şekilde deneysel olarak belirlenir.

Bazı sabit zeminli rüzgâr tünellerinde, sınır tabaka emilimi uygulanmaktadır. Hava, lüle çıkışında delikli bir metal levha hattı boyunca emilir. Dağılı emme durumunda, taşıt önü ve altında geniş ve gözenekli bir zemin bulunmaktadır. Zemin üzerinde her bir emme odası için, konuma bağlı değişik emme debileri uygulanabilir.

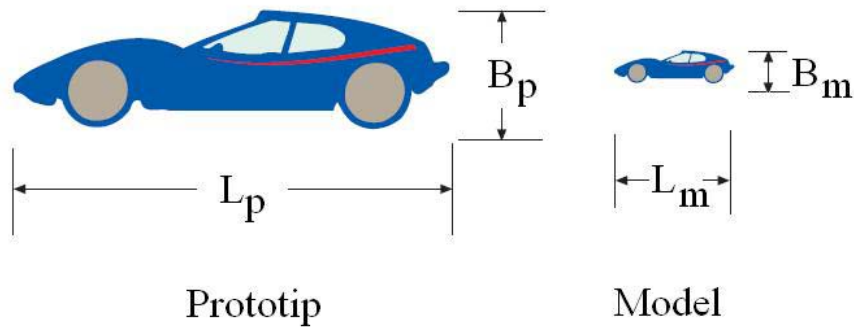
### 3.2 Aerodinamik Özelliklerin Sayısal Yöntemlerle Belirlenmesi

#### 3.2.1 Benzerlik

Gerçek prototipin boyutlarının büyüklüğü, deney teçhizatının maliyeti vs. gibi nedenlerle akışkanlar dinamiği ile ilgili deneysel çalışmalarda model kullanımı kaçınılmaz hale gelir. Sonuçların prototip üzerindekiye yakın olması için modelin belirli özelliklerinin prototipin özellikleri ile aynı veya yakın değerlerde olması şarttır. Prototip ve model arasında geometrik, kinematik, dinamik benzerlik şartı aranır.

##### 3.2.1.1 Geometrik benzerlik

Geometrik benzerliğin sağlanması için modelin boyutsal ölçüleri ile prototipin boyutsal ölçülerinin oranının sabit olması gerekir (Şekil 3.11).

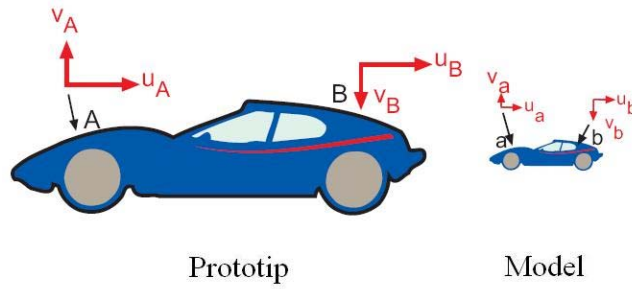


Şekil 3.11 Geometrik benzer cisimler [20]

$$\frac{L_p}{B_p} = \frac{L_m}{B_m} \quad (3.5)$$

### 3.2.1.2 Kinematik benzerlik

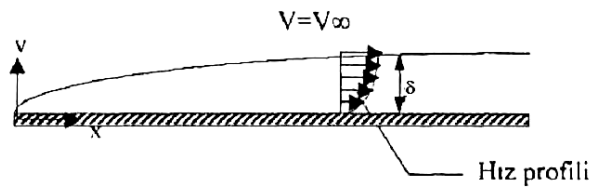
Kinematik benzerlik şartının sağlanması için prototip ve model üzerindeki hız vektörleri paralel ve mutlak değerlerinin oranlarının sabit olması gerekir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 Kinematik benzer akışlar [20]

$$\left( \frac{v_A}{u_A} \right)_{\text{prototip}} = \left( \frac{v_a}{u_a} \right)_{\text{model}}, \quad \left( \frac{v_B}{u_B} \right)_{\text{prototip}} = \left( \frac{v_b}{u_b} \right)_{\text{model}} \quad (3.6)$$

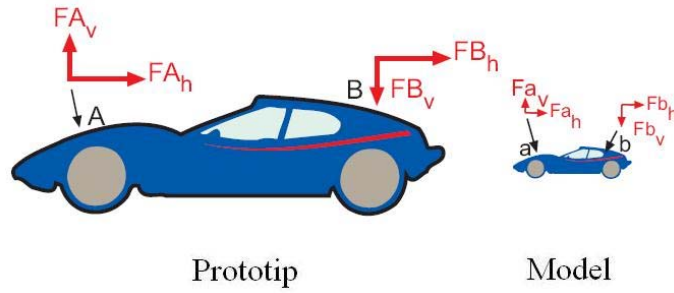
Kinematik benzerlik şartının sağlanması, akış çizgilerinin aerodinamik deneylerde model ve prototip için aynı olduğu anlamına gelir. Kinematik benzerliğin sağlanması blokaj etkisine de bağlıdır. Gerçekte durağan halden hareketli hale geçen otomobil çevresinde oluşan hava hareketi, aracın dış yüzeyinde bir sınır tabaka oluşmasına neden olur. Akışkanın sınır tabaka içindeki hızı plaka yüzeyinden yukarı doğru parabolik bir oranla artar, plaka yüzeyinden itibaren belirli bir  $\delta$  yüksekliğinde hız serbest akış hızına eşit olur. Bu  $\delta$  yüksekliğine "sınır tabakası kalınlığı" denir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 Sınır tabakası oluşumunun şematik görünümü

### 3.2.1.3 Dinamik benzerlik

Geometrik ve kinematik olarak benzer sistemlerde dinamik benzerliğin de sağlanması için, geometrik olarak benzer konumlardaki kuvvet vektörleri paralel ve mutlak değerleri oranları sabit olmalıdır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 Dinamik benzer akışlar [20]

$$\left( \frac{FA_v}{FA_h} \right)_{\text{prototip}} = \left( \frac{Fa_v}{Fa_h} \right)_{\text{model}}, \quad \left( \frac{FB_v}{FB_h} \right)_{\text{prototip}} = \left( \frac{Fb_v}{Fb_h} \right)_{\text{model}} \quad (3.7)$$

Dinamik benzerlik için analiz sonucunda elde edilen boyutsuz katsayıların model ve prototip için aynı olması gerekir. Otomobil üzerindeki akışın incelendiği bu çalışma için etkin kuvvetler atalet ve viskoz kuvvetlerdir. Denklem 3.8'de verilen Re sayısı atalet kuvvetlerinin, dinamik viskoziteye oranıyla elde edilir.

$$Re = \frac{\text{Atalet kuvveti}}{\text{dinamik viskozite}} = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} = \frac{V \cdot L}{\frac{\mu}{\rho}} = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (3.8)$$

$\nu$  = kinematik viskozite

Tam dinamik benzerliğin sağlanması için Re sayılarının model ve prototip için aynı olmaları gerekir. Ölçülen büyüklükleri ifade eden boyutsuz katsayılar, belirli bir hız değerinin üzerinde Reynolds sayısından etkilenmiyor ve Re sayısı arttıkça değişmiyorsa dinamik benzerlik sağlanmış demektir.

### 3.2.2 II Teoremi (Buckingham Teoremi) ve Otomobil Üzerindeki Akışın Boyut Analizi

Boyut analizi deneysel ölçümlerde bağımlı ve bağımsız deney değişkenleri arasındaki karmaşık ifadeleri belirlemede kullanılan bir yöntemdir. Deneylerde ölçülen fiziksel büyüklükler bir boyut ve bu boyutun standart birimi cinsinden ifade edilen bir şiddete sahiptirler. Temel boyutlar kütle, uzunluk ve zaman, olup bunlar sırasıyla M, L, T harfleriyle gösterilir. Diğer tüm fiziksel büyüklükler bu temel boyutlar cinsinden ifade edilebilir.

**Tablo 3.1** Temel mühendislik büyüklüklerinin bir kısmının temel boyutlar cinsinden ifadesi [21]

Fiziksel Büyüklük	Sembol	Boyut
<b>Uzunluk</b>	<b>L</b>	<b>L</b>
Alan	A	$L^2$
<b>Kütle</b>	<b>M</b>	<b>M</b>
<b>Zaman</b>	<b>T</b>	<b>T</b>
Yoğunluk	$\rho$	$ML^{-3}$
Dinamik viskozite	$\mu$	$ML^{-1}T^{-1}$
Kinematik viskozite	$\nu$	$L^2T^{-1}$
Hız	V	$LT^{-1}$
İvme	a	$LT^{-2}$
Basınç	p	$ML^{-1}T^{-2}$
Hacimsel debi	Q	$L^3T^{-1}$
Kuvvet	F	$MLT^{-2}$
İş	W	$ML^2T^{-2}$

Her araç için farklı büyüklüklerde kuvvet ve momentler oluşacağından taşıt üzerindeki aerodinamik kuvvet ve momentler kuvvet birimleri cinsinden ifade edildiğinde karşılaştırma yapmak güçtür. Bu büyüklüklerin boyutsuz hale getirilmesi için akışkanlar dinamiğinde incelenen parametreler üzerinde boyutsal analiz yöntemleri uygulanır.



Buckingham Pi teoremi kullanılarak, bağımlı bir değişkene etki eden bağımsız değişkenler boyutsuz sayılar olarak birleştirilerek analiz için gerekli olan değişken sayısı azaltılır.

Otomobil üzerine etki eden sürüklenme kuvveti,  $F_D$

- L karakteristik uzunluk,  
V serbest akış hızı,  
 $\rho$  akışkanın yoğunluğu,  
 $\mu$  akışkanın viskozitesine bağlıdır.

$F_D = f(V, L, \rho, \mu)$  şeklinde ifade edilebilir. Aşağıdaki işlemler uygulanarak boyutsuz gruplar oluşturulabilir

1. İlgili bütün değişkenlerin listesi yapılır.

$F_D, V, L, \rho, \mu$  ve buna göre  $n = 5$

Bütün değişkenler temel boyutlar cinsinden ifade edilir.

Tekrarlayan temel boyut sayısı  $r = 3$  bunlar M,L,T dir.

2. Listedeki  $\rho, V, L$  değişkenleri tekrarlanan değişkenler olarak seçilir. Buna göre  $m = r = 3$  bulunur. Geriye kalan parametreler ( $F, \mu$ ), tekrarlanan parametreler ile gruplanır. Boyutsuz grup sayısı  $n-m = 5-3 = 2$  olarak bulunur ve aşağıdaki fonksiyonel ilişkiler yazılabilir.

$$\pi_1 = f_1(\rho, V, L, F_D) \quad \pi_2 = f_2(\rho, V, L, \mu) \quad \pi_1 = f_3(\pi_2)$$

$$\pi_1 = \rho^a \cdot V^b \cdot L^c \cdot F_D \quad \pi_2 = \rho^d \cdot V^e \cdot L^f \cdot \mu$$

3.

$\pi_1 =$	$\rho^a$	$V^b$	$L^c$	$F_D$
	$(M/L^3)^a$	$(L/T)^b$	$L^c$	$ML/T^2$

$\pi_1$  boyutsuz bir sayı olduğundan eşitliğin sağ tarafının da boyutsuz olması gerekir.

$$M : a+1=0 \text{ buradan } a = -1$$

$$T : -b-2=0 \text{ buradan } b = -2$$

$$L : -3a-b+c+1=0 \text{ a ve b denklemde yerine konulursa } c=-2 \text{ bulunur.}$$

$$\text{Buna göre } \pi_1 = f_1(\rho, V, L, F_D) = \frac{F_D}{\rho \cdot V^2 \cdot L^2} \text{ elde edilir.} \quad (3.9)$$

4.

$\pi_2 =$	$\rho^d$	$V^e$	$L^f$	$\mu$
	$(M/L^3)^d$	$(L/T)^e$	$L^f$	$M/LT$

$\pi_2$  boyutsuz bir sayı olduğundan eşitliğin sağ tarafının da boyutsuz olması gerekir.

$$M : d+1=0 \text{ buradan } d = -1$$

$$T : -e-1=0 \text{ buradan } e = -2$$

$$L : -3d-e+f-1=0 \text{ d ve e denklemde yerine konulursa } f=-1 \text{ bulunur.}$$

$$\text{Buna göre } \pi_2 = f_2(\rho, V, L, \mu) = \frac{\mu}{\rho \cdot V \cdot L} \text{ elde edilir.} \quad (3.10)$$

ve tersi Reynolds sayısı olarak bilinir.

Bu iki boyutsuz katsayı  $\pi_1$  ve  $\pi_2$  arasında

$$\pi_1 = f_3(\pi_2) \text{ veya } \frac{F_D}{\rho \cdot V^2 \cdot L^2} = f_3\left(\frac{1}{Re}\right) \Rightarrow \frac{F_D}{\rho \cdot V^2 \cdot L^2} = f_4(Re) \text{ ilişkisi vardır.} \quad (3.11)$$

Denklem 3.11'de  $L^2$  iki boyutlu bir büyüklük olduğundan yerine otomobilin karakteristik alanını (A) koymakta ve  $1/2$  gibi bir katsayı ile çarpmakta sakınca yoktur. Böylece bu parametreyi akışa maruz kalan cismin akışa karşı gelen yüzeyine bağlı bir denklem olarak ifade edebiliriz. Karakteristik alan, cismin akışa karşı yüzeyinin harekete dik düzlem üzerindeki izdüşümü olarak tanımlanır.

$$\pi_1 = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho.V^2.A} = f_5(Re) = C_D \quad (3.12)$$

Denklem 3.12'de sürüklenme katsayısı ( $C_D$ ) olarak bilinir. Buna göre Re sayısı ve  $C_D$  katsayısı arasında  $C_D = f_5(Re)$  ilişkisi olduğu görülür.

Benzer şekilde otomobil üzerine etkiyen diğer aerodinamik kuvvet ve momentler de boyutsuz olarak ifade edildiğinde aşağıdaki eşitlikler elde edilir [19].

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho.V^2.A} \quad \text{Kaldırma kuvveti katsayısı} \quad (3.13)$$

$$C_Y = \frac{F_Y}{\frac{1}{2}\rho.V^2.A} \quad \text{Yanal kuvvet katsayısı} \quad (3.14)$$

$$C_{MP} = \frac{M_P}{\frac{1}{2}\rho.V^2.A.L} \quad \text{Yunuslama momenti katsayısı} \quad (3.15)$$

$$C_{MR} = \frac{M_R}{\frac{1}{2}\rho.V^2.A.L} \quad \text{Yuvarlanma momenti katsayısı} \quad (3.16)$$

$$C_{MY} = \frac{M_Y}{\frac{1}{2}\rho.V^2.A.L} \quad \text{Yana kayış momenti katsayısı} \quad (3.17)$$

$$C_P = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho.V^2} \quad \text{Basınç katsayısı} \quad (3.18)$$

### 3.3 Taşıt Çevresindeki Hava Akımı ve Görüntülenmesi

Taşıt yüzeyi üzerinden akış ayrılmalarının, dolanımlarının olduğu bölgeler ve akış yönünün tespiti için, taşıt yüzeyi üzerinde ve taşıtın üstündeki akışın görüntülenmesi olmak üzere başlıca iki kısma ayrılabilir.

Taşıt yüzeyine bir ucundan yapıştırılmış kısa pamuk veya yün iplikleri ile akış yönüyle kolayca bükülebilen püsküller sıkça kullanılır (Şekil 3.15). Taşıt yüzeyine bitişik akış durumunda püsküller akış yönünde durmaktadır. Akış ayrılmalarının olduğu durumlarda ise püsküller hızlıca salınım yapmaya başlamakta ve beklenen akış yönüne uzak bir konum almaktadır. Boya katılmış yağlar gibi viskoz bir akışkanın akış çizgileri gözlemlenirse benzer bulgular elde edilebilir.



**Şekil 3.15** Otomobilin üzerindeki akış yönüyle kolayca bükülebilen püsküller

Rüzgâr tünellerinde taşıt üstündeki veya çevresindeki akışın görüntülenmesi için, taşıt üzerine duman gönderilir ve dumanın akış çizgileri gözlemlenir (Şekil 3.16).



**Şekil 3.16** Taşıt üzerine duman püskürtülmesi

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

Hava partikülünü herhangi bir anda taşıtın belirli bir noktasından geçerken taşıta göre yerleştirilmiş bir koordinat eksenine göre rölatif bir hareket yapmaktadır ve bir yol izlemektedir. Şekil 3.17 de görüldüğü gibi partikülün izlediği bu yola **akış çizgisi (streamline)** denir. Taşıt üzerinde belirlenen bu noktaya gelen diğer tüm partiküllerde bir önceki partikülün izlediği yolu izleyecektir.



**Şekil 3.17** Otomobilin üzerindeki akış çizgileri [22]

Şekil 3.18’de görüldüğü gibi taşıtın şekline ve hızına bağlı olarak ve taşıt çevresinde akışyollarının oluşturduğu bütüne **hava akış şekli** denir.



**Şekil 3.18** Rüzgâr tüneline Volkswagen otomobilin üzerindeki hava akış şekli

Akış alanı içinde, araçtan çok uzaktaki akışa **serbest akış** denir. Henüz taşıtın hareket alanına girmemiş hava akımları paralel ve durgun durumdadır, hareket alanı içindikiler oldukça kompleks hareket sergilerler. Taşıt çevresinde deforme olmuş bölgede partikülün, rölatif hızı bazen taşıt hızından yavaş bazen de hızlı olacak şekilde oldukça değişir. Deforme olmamış bölgede partikül taşıt ile eşit rölatif hıza sahiptir.

Yol deneylerinde akışın görüntülenmesinin sonuçları taşıt üzerine veya gözlemleyen bir başka araba üzerine yerleştirilmiş kamera ile kaydedilir. Gözlemci bir araba kullanılması halinde taşıtlar arasındaki etkileşim ve kameranın sabitlenmesi esas zorluğu oluşturmaktadır. Yol deneylerinde taşıtın tam ölçekli modeli üzerinde deney imkânı mevcuttur. Yol deneyleri genellikle rüzgâr tünelleri deneylerine göre daha pahalıdır.

#### 4. SAYISAL AKIŞKANLAR DİNAMIĞI (SAD) ANALİZİ

Sayısal yöntemler aerodinamik özelliklerin belirlenmesi ve aracın etrafındaki akışın modellenmesi için kullanılmakta olup, bunun esas nedeni ürün geliştirme sırasında zamandan kazanmaktır. Sayısal yöntemler, olayın fiziğini yeteri kadar hassas oluşturabilmeli ve deneylerden daha hızlı olmalıdır.

İlk olarak incelenecek olan modelin geometrisi bilgisayar ortamında oluşturulmalıdır. Hesaplamaların yapılabilmesi için bu model sonlu elemanlara bölünerek bir ağ yapısı (mesh) oluşturulur. Gerekli sınır şartları tanımlanır ve çözüme geçilir. Buradaki akışkan havadır. Akışın tipi sıkıştırılamaz akış kabulü altında yoğunluk ve viskozite gibi akışkan özellikleri sabit olarak tanımlanmaktadır.

Taşıta uygulanan yöntemin bir defa yeteri kadar hassas ve geçerli olduğu kabul edilmesi durumunda, denenen model mevcut olsa bile, SAD (sayısal akışkanlar dinamiği) ile modelin aerodinamik özellikleri hakkında deneyden evvel bilgi sahibi olunabilir. Taşıt modelinin bilgisayar ortamında oluşturulması, üretmeye göre daha kolaydır. Taşıt üzerinde yapılacak kısmi değişiklikler, rüzgâr tüneline denenen modeldekine oranla daha kolay ve hızlıdır. Yapılan analiz ile değişikliklerin ne tür etkiler yaratacağı hakkında hızlı bir biçimde bilgi sahibi olunabilir. Süreklilik denklemi, momentum korunumu ve  $k$ - $\epsilon$  türbülans modelinin kullanılmasıyla taşıt yüzeyi ve üzerindeki havanın hız ve basınç dağılımı ayrıntılı bir biçimde elde edilir.

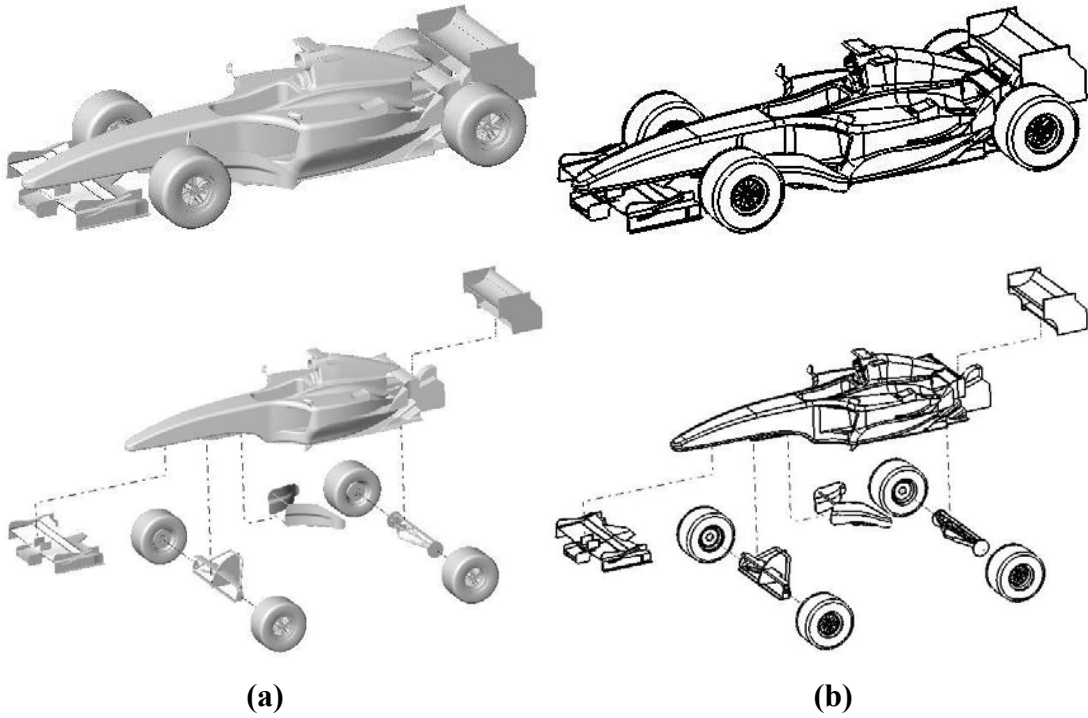
##### 4.1 Aracın Bilgisayar Destekli Tasarımı (CAD)

Ferrari F1 taşıtının fiziksel geometrisi “**Solidworks**” bilgisayar destekli tasarım programı yardımıyla oluşturulmuştur (Şekil 4.1 ve 4.2). F1 taşıtının karbüratörlerinin içinden geçen hava akışı olmadığı kabul edilmiş ve ona göre tasarımı yapılmıştır.





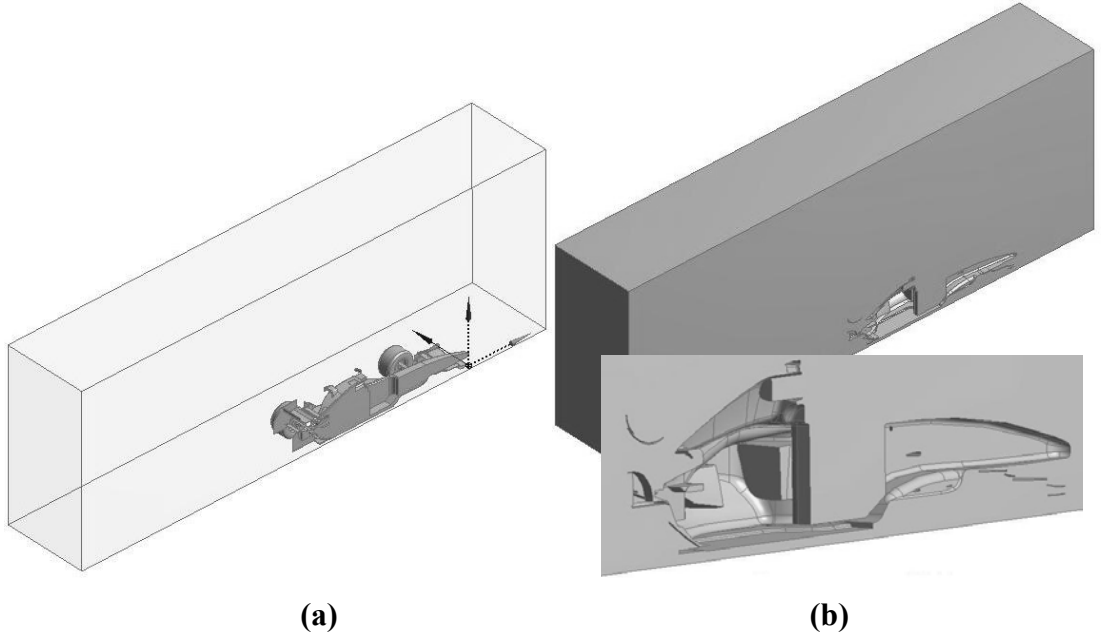
Şekil 4.1 Solidworks ile çizilen modelin farklı açılardan gerçeklik görüntüsü verilmiş hali (render)



Şekil 4.2 Solidworks ile tasarlanan modelin kısımları (a) katı, (b) tel kafes



Ansys Workbench altındaki “**Design Modeler**” da geometriyi sayısal akışkanlar dinamiği simülasyonuna (**Computational Fluids Dynamic - CFD**) hazırlamak için gerekli düzeltmelerin yapılması gereklidir. Fiziksel simetri avantajından yararlanarak rüzgâr tünelinin ve F1 modelinin yarısını kullanılmıştır. Rüzgâr tünelinin hava ile dolu hacminin yarısı katı olarak modellenir (4,2 x 2,1 x 12 m) ve F1 modelin yarısı bu hacimden çıkartılarak akışkanın hareket ettiği kısım elde edilmiş olur (Şekil 4.3 a ve b).

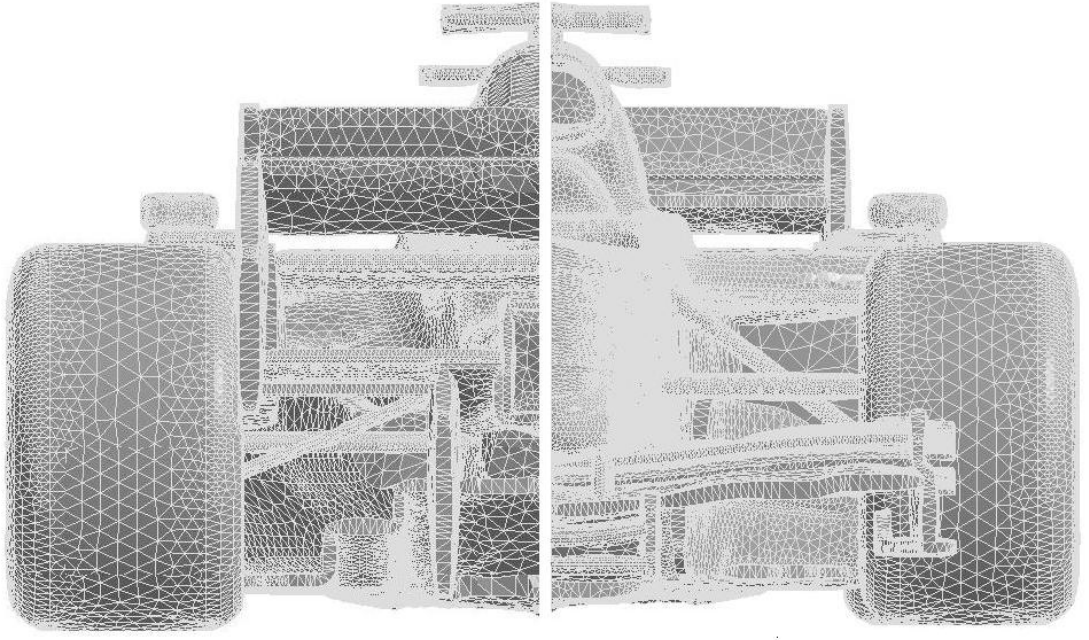


**Şekil 4.3 (a) F1 modelinin yarısı (b) Rüzgâr tünelinin hava ile dolu hacminin yarısından F1 aracının yarısının çıkarılmış hali**

Solidworks programına dönüp modelde herhangi bir değişiklik yaptığımız zaman design modeler programındaki modelde güncellenerek, aynı değişiklik otomatik olarak görülecektir. Bu parametrik çalışmalar için kolaylık sağlamaktadır.

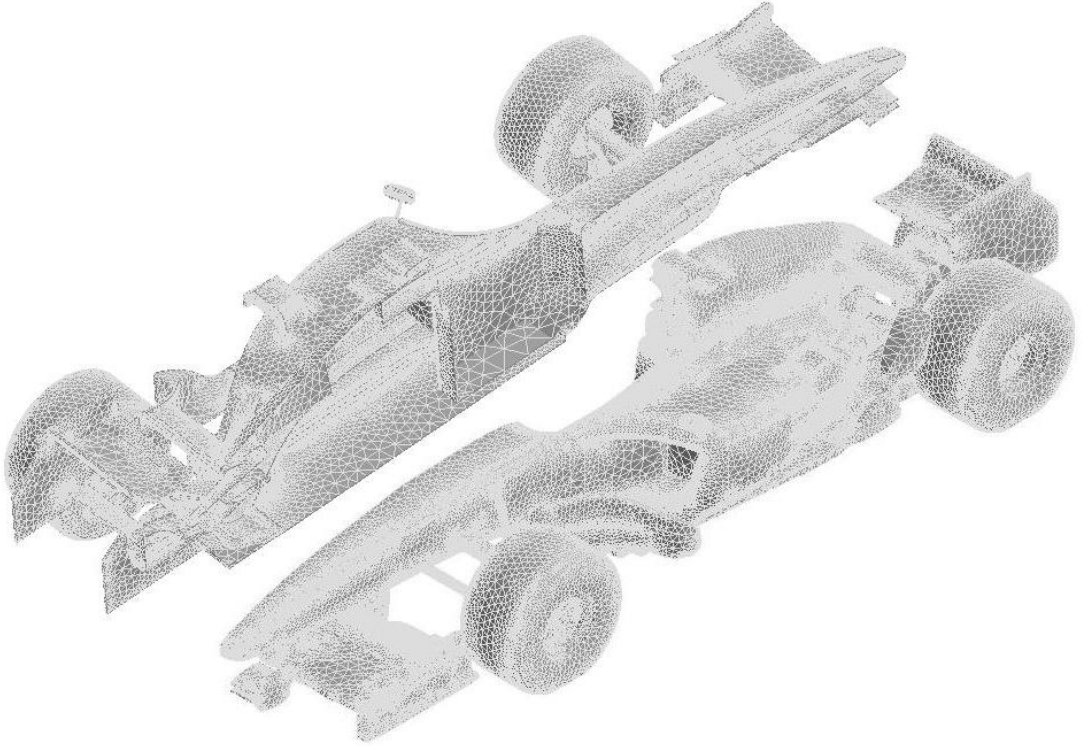
#### **4.2 Akışkanın Hacminin Sonlu Elemanlara Ayrılması (Mesh)**

Geometri tamamlandığında CFX-Mesh programında akışkanlar analizi için modelin sonlu elemanlara ayrılması gereklidir (Şekil 4.4 a,b,c ve 4.5). Burada ayrıca simetri, giriş-çıkış, duvarlar ve F1 modelinin yüzeyi kolaylık olması açısından isimlendirilir.



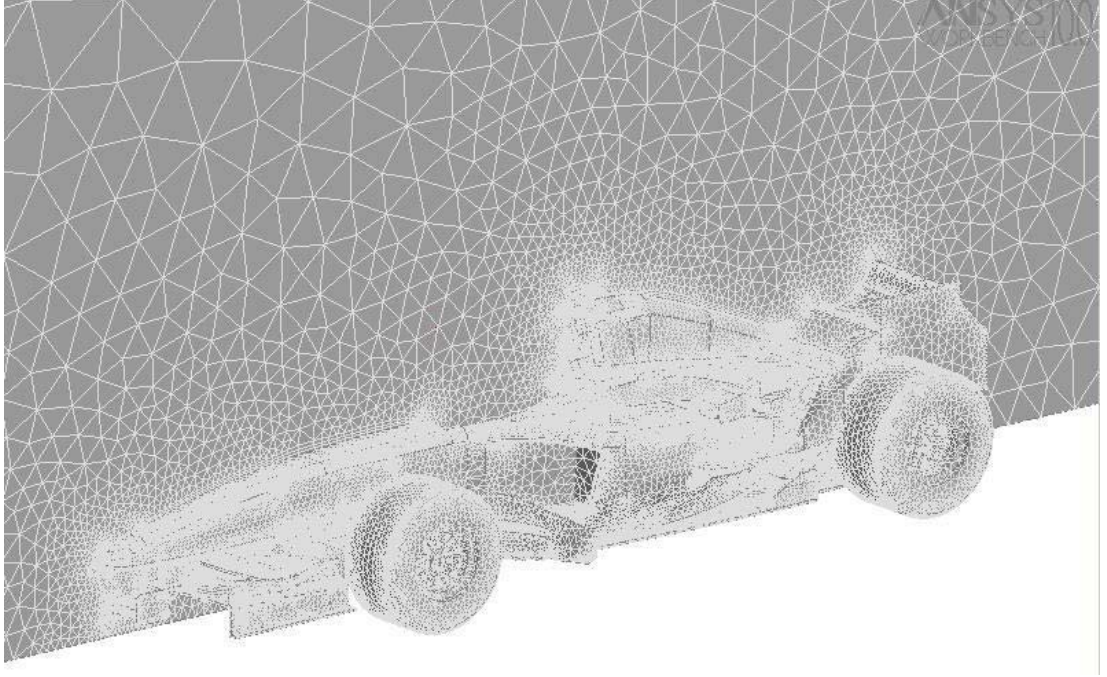
(a) arkadan görünüş

(b) önden görünüş



(c) izometrik açıdan görünüş

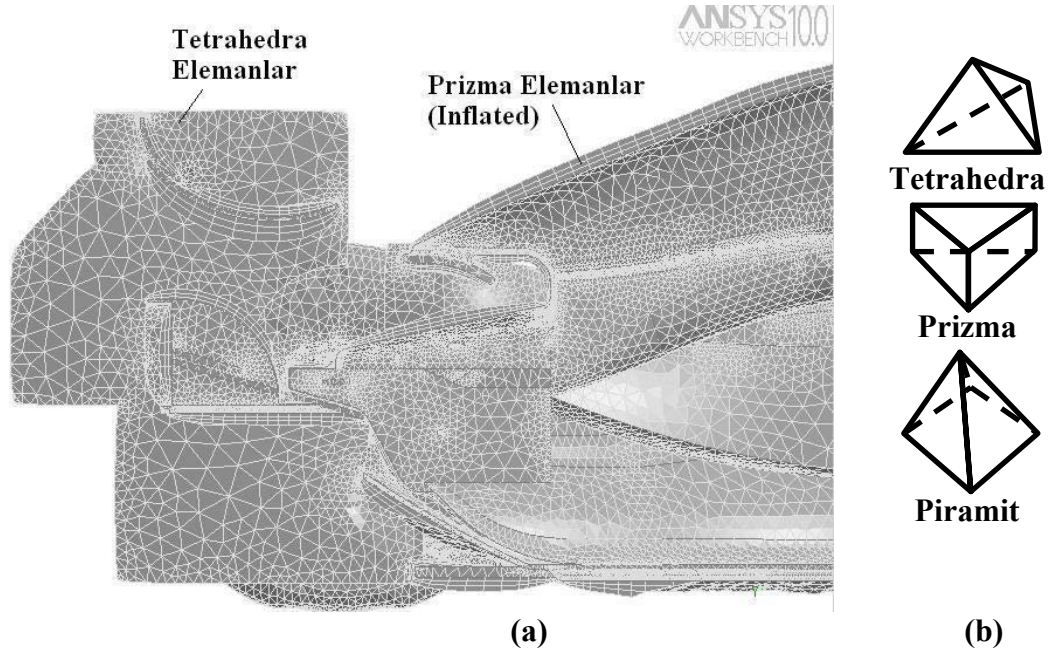
Şekil 4.4 Modelin sonlu elemanlara ayrılması



**Şekil 4.5** Simetri yüzeyi ve modelin ağ yapısı

Duvar yakınındaki ağ yapısını prizma elemanlardan oluşan katmanlarla iyileştirmek çözünürlüğünü arttırmak için “inflation boundary” uygulanır. Bu katmanların sayısı, kalınlığı ve büyüme oranı değiştirmek mümkündür.

Duvara yakın bölgelerde sınır tabaka etkileri, yüzeye dik gelen hız eğrilerinde (hız çok büyük) yükselmeye neden olacaktır. Yüzeyde yüksek derecede bozulmaya uğramış tetrahedra elemanların oluşmasından kaçınmak için yüksek kaliteli yüzey ağ yapısı gereklidir. CFX-Mesh duvara dik çok daha iyi çözülmüş ve duvarlara paralel daha kaba prizmalar kullanarak bu problemi çözebiliyor. 2D üçgen yüzey elemanlarını 3D prizma elemanlarına çevirerek istenilen duvar veya sınırlarda uygulanabilir. Bu elemanların boyutlarını ve duvara yakın bölgelere yayılımını belirlemek mümkündür (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 (a) Simetri sınır bölgesinde prizma ve tetrahedra elemanların ağ yapısındaki yerleşimlerinin görünümü, (b) Tetrahedra, prizma, piramit elemanlar

Tablo 4.1 Modelin Sonlu Elemanlar İstatistiği

<b>Nokta Sayısı</b>	<b>897657</b>
<b>Eleman Sayısı</b>	<b>3852011</b>
Tetrahedra	<b>3293001</b>
Piramit	<b>16876</b>
Prizma	<b>542134</b>

### 4.3 Sınır Şartlarının Tanımlanması

**Giriş (Inlet):** Akışkanın girdiği yüzey

**Çıkış (Outlet):** Akışkanın çıktığı yüzey

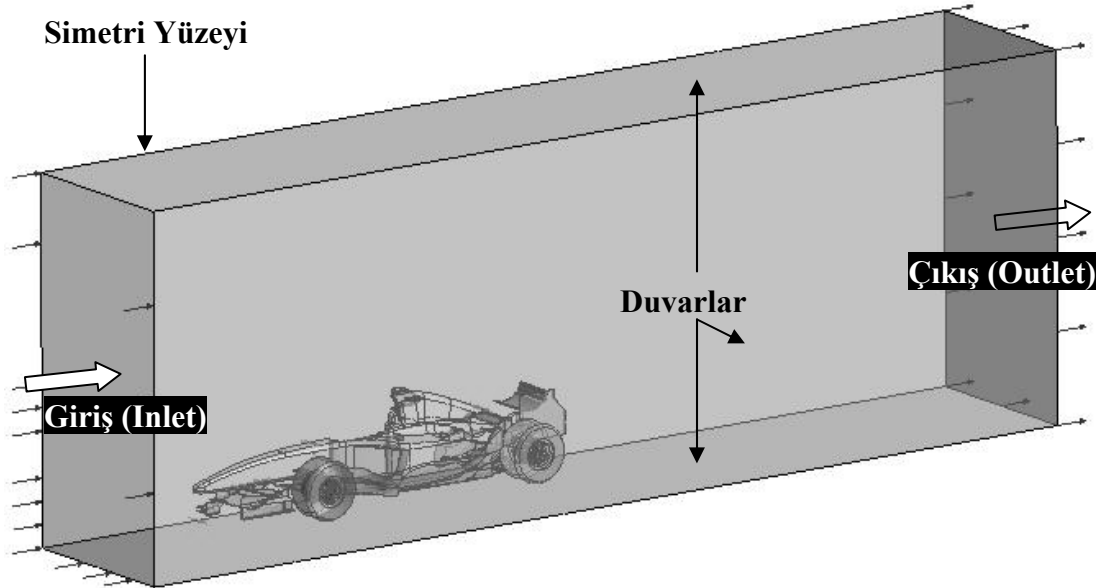
**Duvarlar (Walls):** Akışkanın akışına karşı katı sızdırmaz elemanlardır. Akışkanın geçemeyeceği sınır olarak da adlandırılabilir. “Free-slip” ve “noslip” olarak iki özellik verilebilir.

**Free-Slip:** Duvara paralel hız bileşeni bilgisayar tarafından hesaplanır. Duvara göre hızın normali ve kayma gerilmesi sıfırdır. Duvar yakınında akışkanın hızı, sürtünme etkileri ile yavaşlamaz.

**Noslip:** Akışkanın duvar sınırında hız değeri sıfırdır.

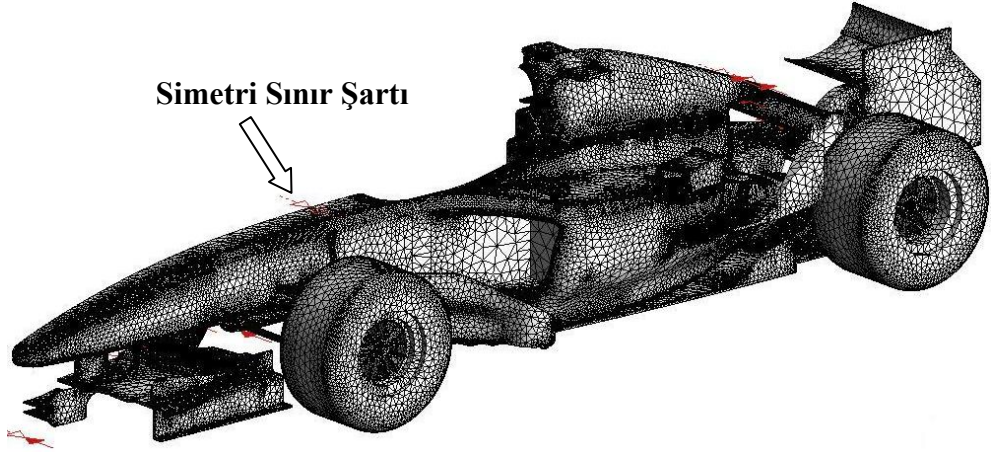
**Simetri (Symmetry):** Simetri yüzeyinin normalinde akışkan hızı sıfırdır [23].

Sonlu elemanlara bölünen model sınır şartlarının belirleneceği ve hız, basınç gibi fiziksel değerlerin girileceği CFX-pre ye aktarılır. Burada akışkan 25°C deki hava ( $\rho=1,185 \text{ kg/m}^3$ ), referans basınç değeri 1 atm, giriş hızı 130 km/h (36,111m/s), çıkıştaki yüzeyin basıncı 0 atm olarak girilir, türbülans modeli k-  $\epsilon$  olarak seçilir. Sınır şartları özellikleri; simetri, modelin yüzeyi (noslip), duvar (free-slip), giriş, çıkış daha önce CFX-mesh kısmında adlandırılan yüzeylerle ilişkilendirilerek tanımlanır. (Şekil 4.7). Bu işlemler bittikten sonra model CFX-solver a gönderilir.



Şekil 4.7 Sınır şartlarının tanımlanması





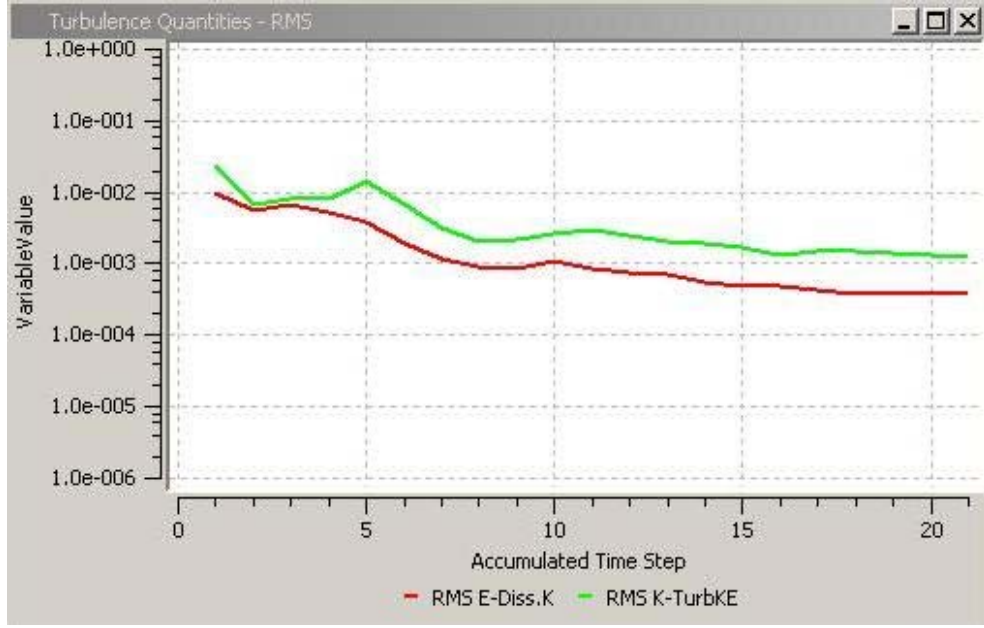
Şekil 4.8 Simetri sınır şartının gösterilmesi

### 4.3 Çözümün Elde Edilmesi

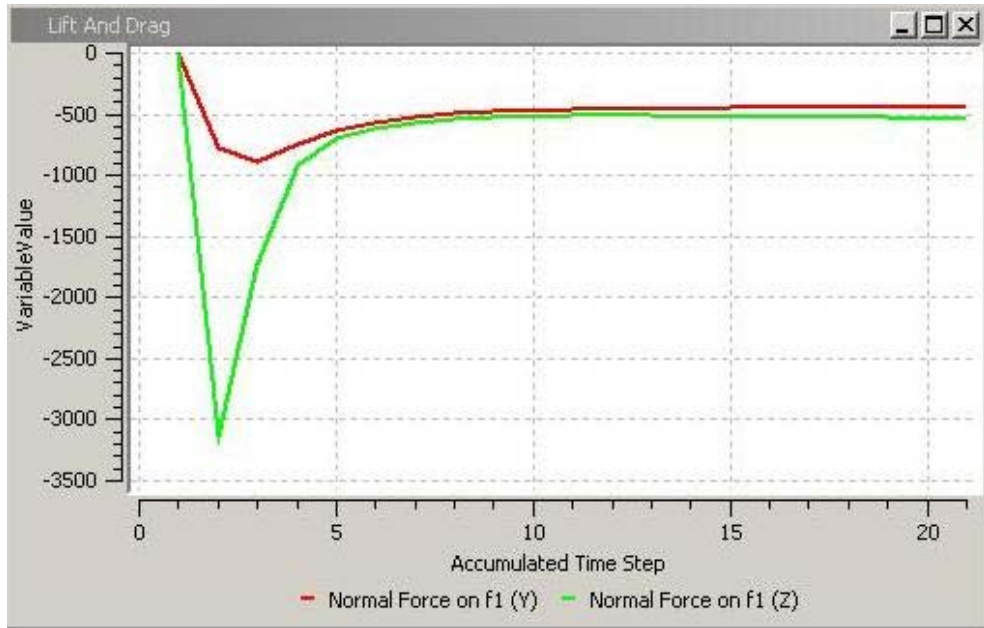
CFX-solver da çözümlene yapılırken eş zamanlı olarak, momentum ve kütle, türbülans miktarları, hava kaldırma kuvveti (lift) ve sürüklenme kuvveti (drag) grafikleri izlenebilir. Ortalama 20 iterasyon sonucunda kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri dengeye gelir, iterasyon boyunca sabitlenir. Çözümün yakınsaması, hata eğrilerinin ekrandan izlenmesi ile takip edilir. Bu eğriler yakınsama kriterinde tanımlanan değerlere eriştiğinde hesaplamalar durdurulabilir.(Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11)



Şekil 4.9 Momentum-kütle diyagramı



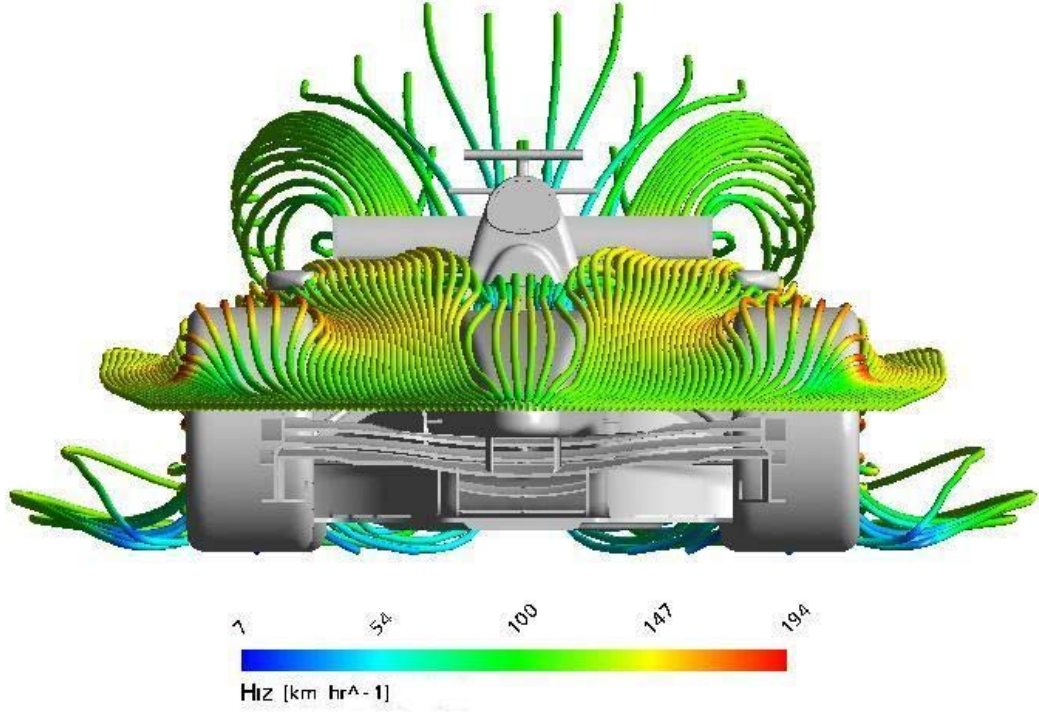
Şekil 4.10 Türbülans değerleri



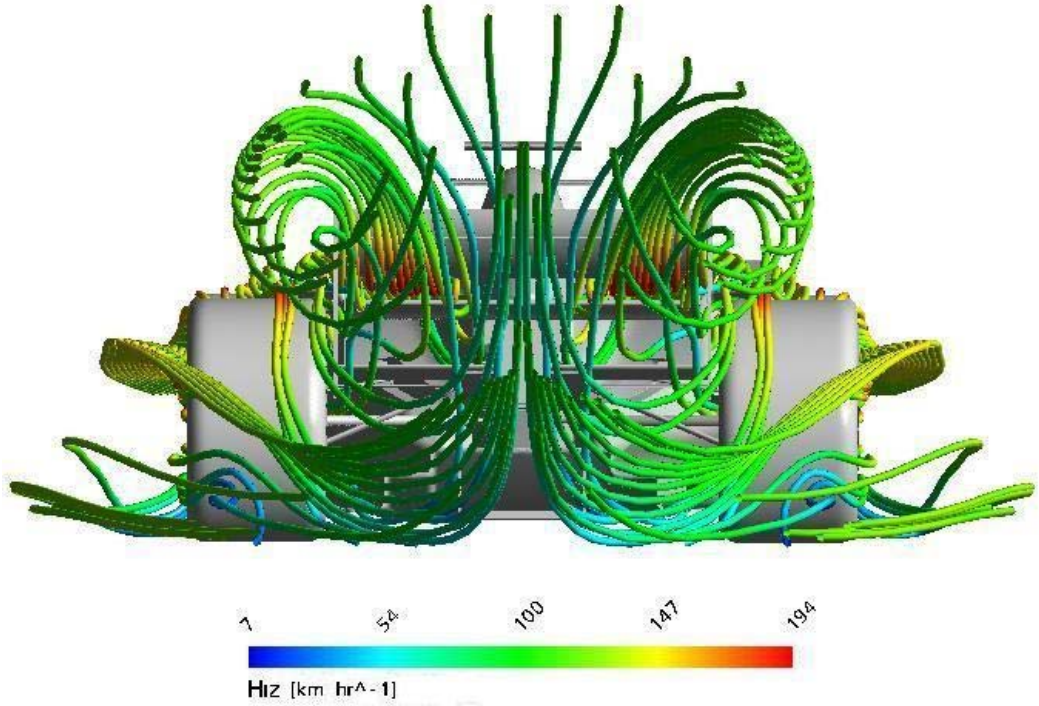
Şekil 4.11 Sürüklenme (normal force on f1 (Z)) ve kaldırma kuvvetleri (normal force on f1 (Y))

#### 4.4 Sonuçların Değerlendirilmesi

CFX-Solver da çözümlene bittiğinde çözüm, CFX-Post ta sonuçların incelenmesi için açılır. Hız değerleri akış çizgileri ve yüzey üzerindeki akış çizgileri (streamlines) halinde renk skalası olarak görülmektedir. (Şekil 4.12 a,b,c ve 4.13)

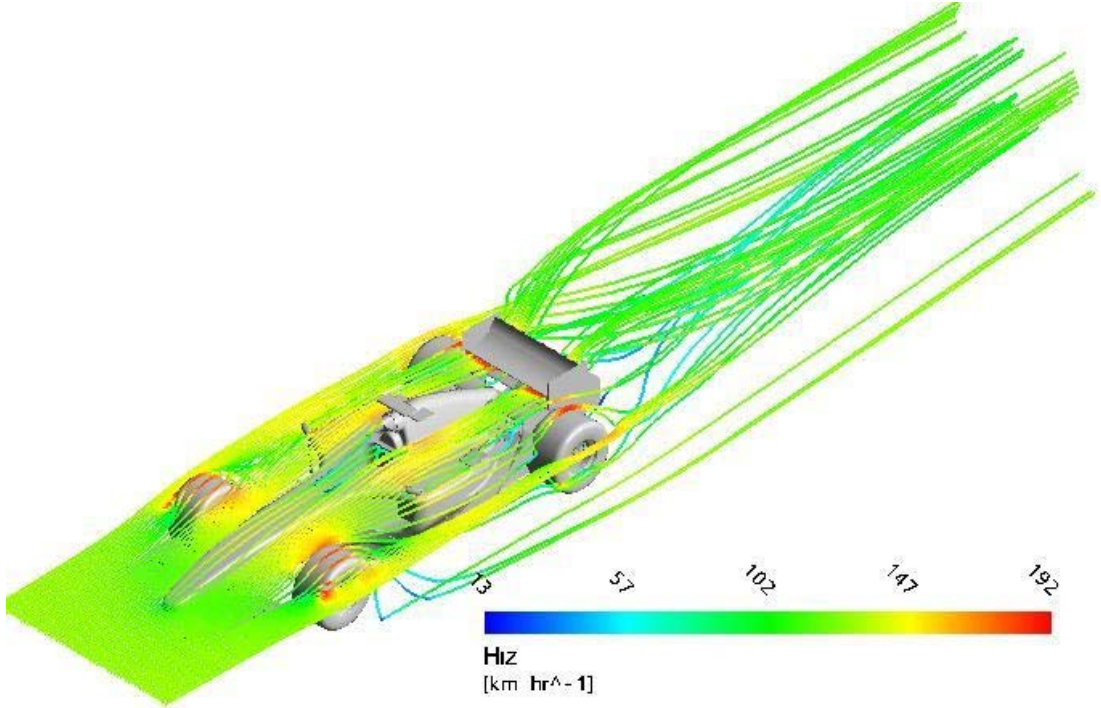


(a) Aracın Ön Kısmı



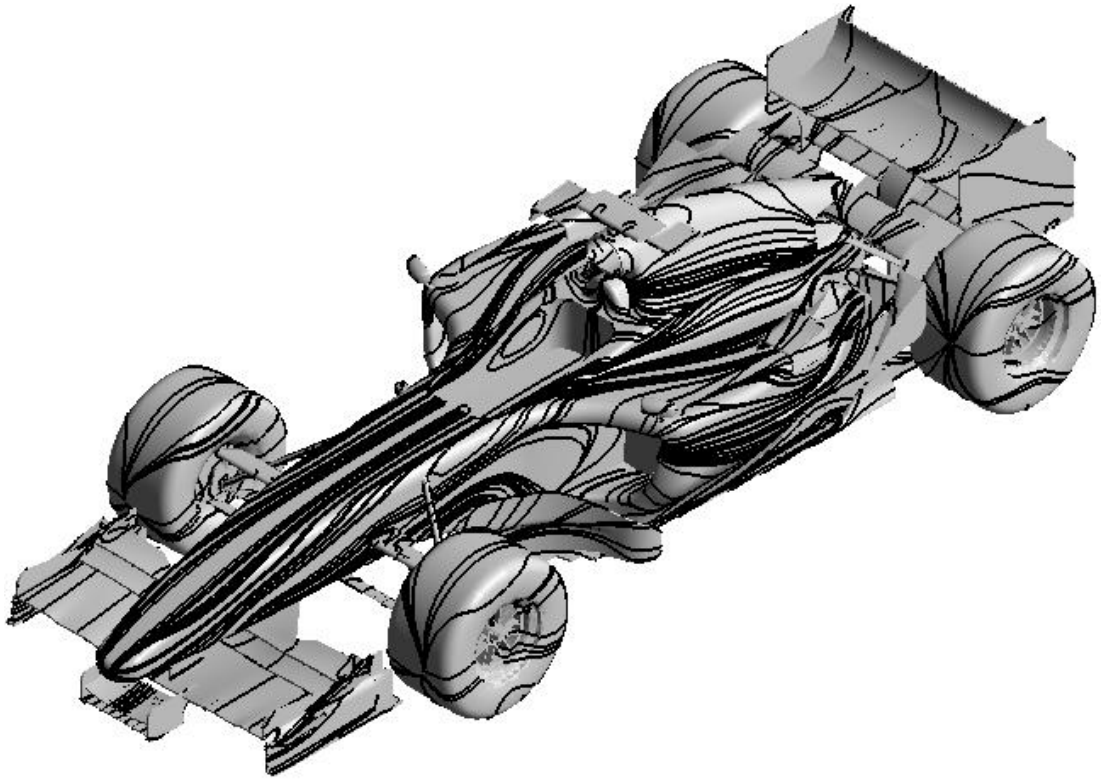
(b) Aracın Arka Kısmı



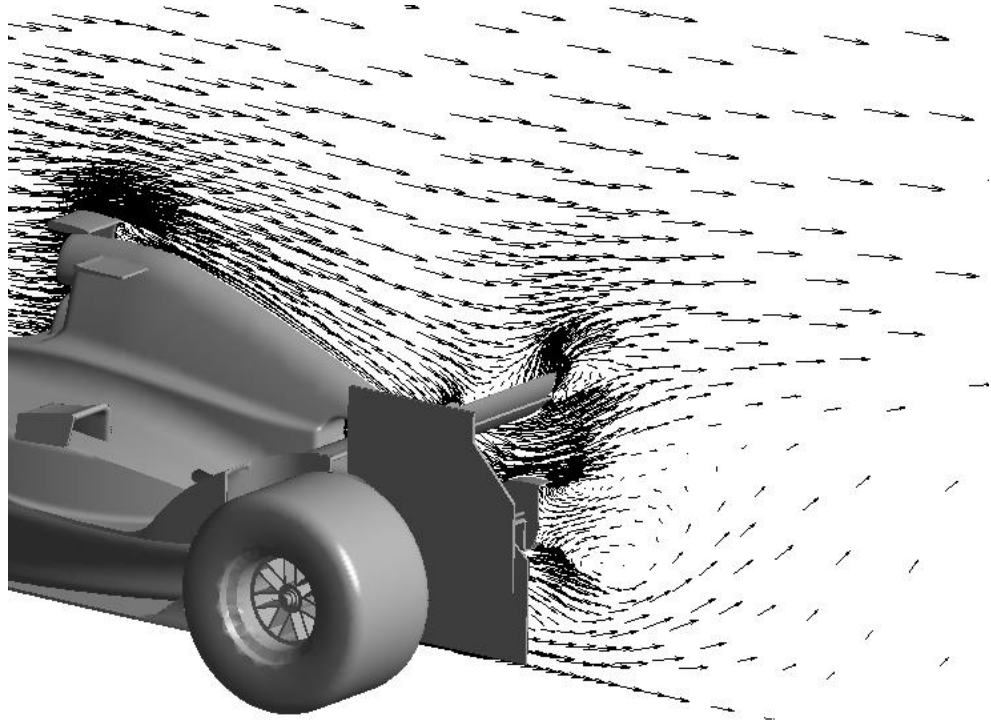


(c) izometrik açıdan

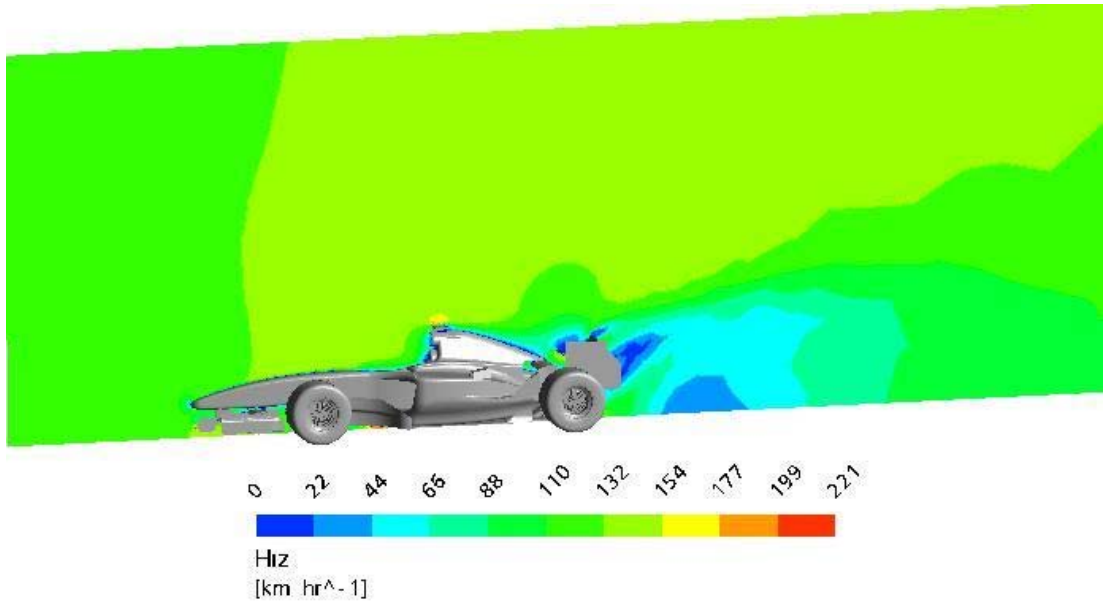
Şekil 4.12 Hız değerleri akış çizgileri halinde ve renk skalası olarak görülmektedir (streamlines)



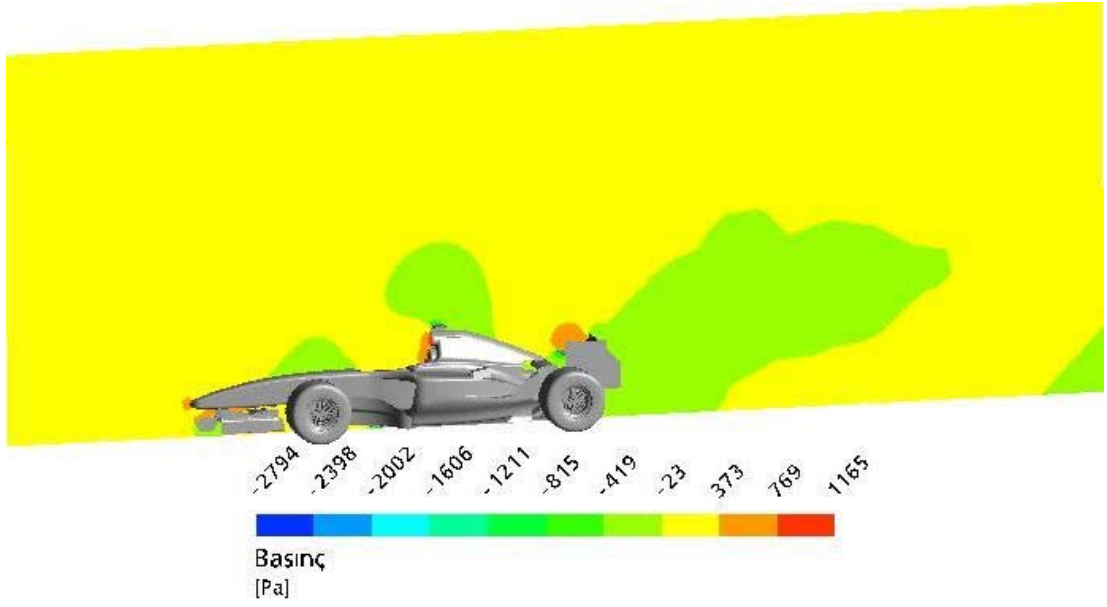
Şekil 4.13 Yüzey akış çizgileri



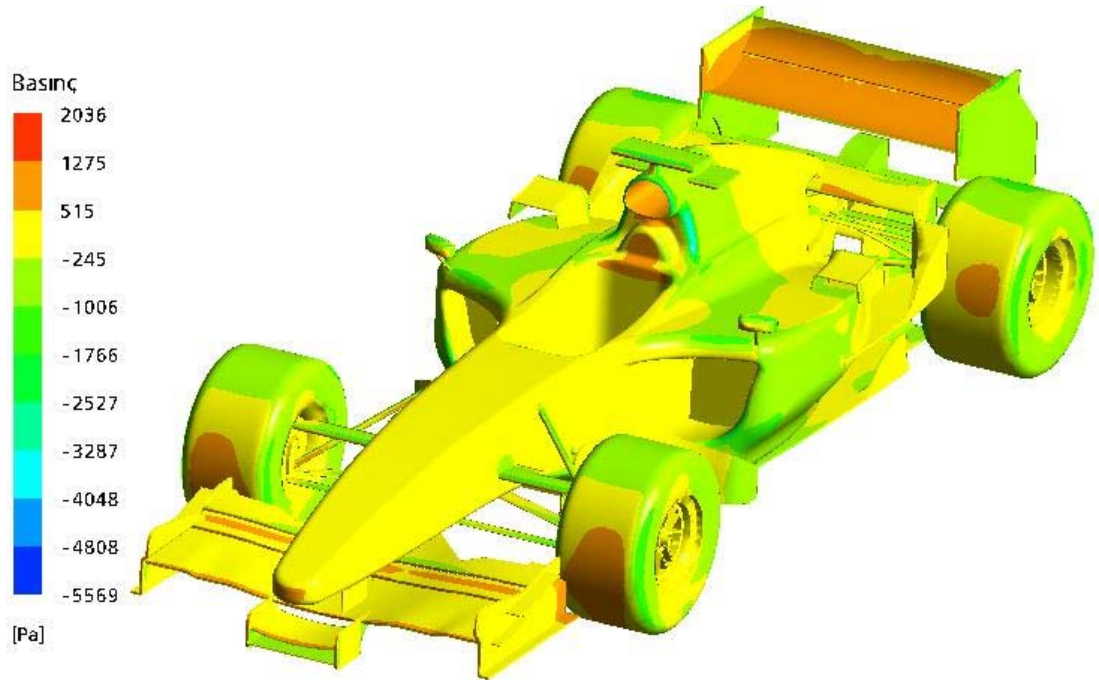
Şekil 4.14 Akışın vektörel gösterimi



Şekil 4.15 Simetri yüzeyinde eş hız büyüklüğü dağılım eğrileri (contour)

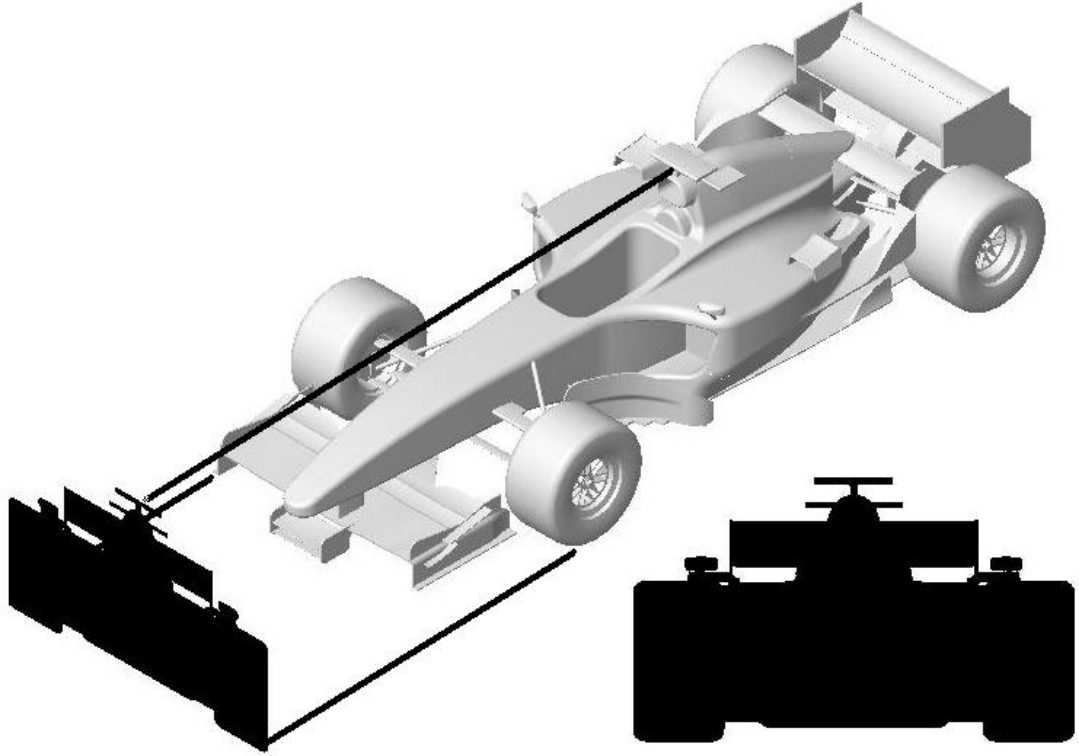


**Şekil 4.16** Simetri yüzeyinde eş basınç büyüklüğü dağılım eğrileri



**Şekil 4.17** Aracın yüzeyindeki eş basınç büyüklüğü dağılım eğrileri (izometrik)

Taşıtın projeksiyon alanı üç boyutlu modelin ön görünüşü üzerinden solidworks programında çizilerek alanı  $A=1,3981 \text{ m}^2$  olarak hesaplandı (Şekil 4.18)



Şekil 4.18 Taşıtın projeksiyon alanı

Taşıt için önceki bölümlerde bahsedilen  $C_D$  ve  $C_L$  katsayılarının hesaplanması için gerekli formüller CFX-solver da excel benzeri hesaplama cetveline yazılıp hesaplanarak,  $C_D=0,516$  ve  $C_L=0,425$  değerleri bulundu. Bu değerlerin gerçek F1 aracının değerlerine yaklaştığı söylenemez. Bununda nedeni gerçek F1 ile bu model arasındaki geometride olan farklılıklar, zaman ve bilgisayar gücü açısından çözümlene yapılabilmesi için modeli sonlu elemanlara bölerken daha kaba ve az eleman kullanımı ve modelde yapılan sadeleştirmeler olabilir. (Şekil 4.19)

Accumulated Time Step	-1	A	B	C
Area Section	1.3981 [m <sup>2</sup> ]	<b>F1 AERODINAMİK HESAPLAMALARI</b>		
atstep	Accumulated Time Step	1		
CD	DragForce/Pdynamic/Area Section	2		
CL	DownForce/Pdynamic/Area Section	3	Hız	36.111 [m s <sup>-1</sup> ]
ctstep	Current Time Step	4	Dinamik Basınc (q)	772.627 [Pa]
Current Time Step	-1	5	Tasit Kesit Alanı	1.398 [m <sup>2</sup> ]
DownForce	-force_y@f1	6		
DragForce	-force_z@f1	7	FD Direnc Kuvveti (Drag)	557.059 [N]
Free Stream	36.1111 [m s <sup>-1</sup> ]	8	FL Kalırma Kuvveti (Lift)	459.594 [N]
omega	Angular Velocity	9		
Pdynamic	0.5*1.185 [kg m <sup>-3</sup> ]*Free Stream <sup>2</sup>	10	CD Direnc Kaysayisi	0.516
Reference Pressure	1 [atm]	11	CL Kaldırma Kaysayisi	0.425
t	Time	12		
Time	0 [s]			

Şekil 4.19 Hesaplamalar için formüllerin yazılması

## 5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Yapılan uygulamada aerodinamik sürüklenme ve kaldırma katsayılarının gerçek değerlerden saptığı görülmektedir. Bunun sebebi ağ siteminde yeterli sayıda nokta sayısı veya eleman sayısı tayin edemememiz ve taşıtın analiz edildiği bölgede taşıt üstündeki, arkasındaki ve önündeki mesafelerin daha büyük modellenmesi ve hatta gerçek olayda olduğu gibi sonsuz olması gerekmektedir. Blokaj etkisinden kaçınmak için daha büyük akış alanı gereklidir.

Taşıt geometrisi gerçeğe daha da yakın modellenebilir. Bu da ayrıntıları attıracağı ve sonlu elemanlara bölme sırasında, ağ (mesh) yapısını oluştururken, çok sayıda eleman kullanılması güçlü bilgisayarlar gerektirmektedir ve hesaplama süresi artmaktadır. Akış çözümlerinde kaba elemanlı ağ sistemi daha küçük elemanlar kullanarak iyileştirildiğinde hesaplanan  $C_D$  değerinde düşüş gerçekleşecektir. Özellikle ard iz yapısının olduğu bölgeler daha küçük elemanlar ile incelenmelidir. Böylelikle sınır tabaka ile türbülanslı bölgelerdeki hız ve basınç değerleri daha hassas olarak çözümlenebilir ve hesaplanan  $C_D$  değeri daha çok doğru değere yaklaşır.

Bu çalışmada 3 boyutlu analiz yapılması 2 boyutluya oranla daha gerçekçi ve doğru sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Gerçek yol koşullarını temsil etmek amacıyla hava için modele göre bağıl hareket verildiği gibi zemine ve tekerleklerle hareket verilmelidir.

Daha hassas hesap yapılabilmesi için denklemlerin çözümünde kullanılan iterasyon sayılarının daha yüksek değerlerde seçilmesi gerekmektedir fakat bu değeri arttırmak bilgisayar kapasiteleri ile sınırlı kalmaktadır.

Bu analizde P4, 3 Ghz işlemcili, 1,5 GB RAM özellikli bilgisayar kullanılmıştır ve çözümlene kısmı yaklaşık 22 saat sürmüştür. Bunu süreyi kısaltmak model ve ağ yapısı üzerinde çalışılarak mümkündür.

Sayısal çözümler deneysel çalışmalarla birlikte yürütülmelidir. Modelin üzerinde yapılacak deneyler ile sayısal sonuçların doğruluk derecesi mutlaka karşılaştırılmalıdır. Bundan sonraki aşamada F1 Ferrari aracının 1/14 ölçekli modeli kullanılarak rüzgâr tüneli deneyinde renkli hava veya duman gönderilerek türbülanslar ve akış çizgileri gözlemlenecektir. Uygun ölçme donanımları kullanılarak sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri ölçülüp, analizle elde edilen verilerle karşılaştırılacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] Çakmak, M.A., "Kara Taşıtlarının Aerodinamik Bakımdan İncelenmesi", *Mühendis Makina*, 41, 489, (2000), 35.
- [2] Kieffer, W., Moujaes, S., and Armbya, N., "CDF study of section characteristics of formula mazda race car wings", *Mathematical and Computer Modelling*, 43, 11-12, (2006) 1275.
- [3] Beccaria, M., Buresti, G., Ciampa, A., Lombardi, G., Gentsch, W., Paap, H.-G. and Vicere, A., "High-performance road-vehicle optimised aerodynamic design: Application of parallel computing to car design", *Future Generation Computer Systems*, 15, 3, (1999) 323.
- [4] Gümüşlüol, Ü., Çetinkaya, T.A. ve Albayrak, K., "Geçiş durumundaki taşıtların aerodinamik etkileşimlerinin deneysel olarak incelenmesi", *Mühendis ve Makine*, 47, 561, (2006) 28.
- [5] Dong Sun, Huaiyu Wu, Chi Ming Lam and Rong Zhu, "Development of a small air vehicle based on aerodynamic model analysis in the tunnel tests", *Mechatronics*, 16, 1, (2006) 41.
- [6] Bettle, J., Holloway, A.G.L. and Venart, J.E.S., "A computational study of aerodynamic forces acting on a tractor-trailor vehicle on a bridge in cross-wind", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91, 5, (2003) 573.
- [7] Konstantin I. Matveev and Victor A. Dubrovsky, "Aerodynamic characteristics of a hybrid trimaran model", *Ocean Engineering*, 34, 3-4, (2007) 616.
- [8] Hiroyuki Ozawa, Sumio Nishikawa and Dai Higashida, "Development of aerodynamics for a solar race car", *JSAE Review*, 19, 4, (1998) 343.
- [9] Ehab Fares, "Unsteady flow simulation of the Ahmed reference body using a lattice Boltzmann approach", *Computers & Fluids*, 35, 8-9, (2006) 940.
- [10] Arief Suhariyono, Jong Hyun Kim, Nam Seo Goo, Hoon Cheol Park and Kwang Joon Yoon, "Design of precision balance and aerodynamic characteristic measurement system for micro aerial vehicles", *Aerospace Science and Technology*, 10, 2, (2006) 92.

- [11] Masaru, K., Tsunehisa, N. and Naoki, H., "Research on Aerodynamic Drag Reduction by Vortex Generators", *Mitsubishi Motors Technical Review*, 16, (2004) 11.
- [12] Kim, M. S. and Geropp, D., "Experimental investigation of the ground effect on the flow around some two-dimensional bluff bodies with moving-belt technique", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74-76, (1998) 511.
- [13] Krajnović, S. and Davidson L., "Influence of floor motions in wind tunnels on the aerodynamics of road vehicles", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93, 9, (2005) 677.
- [14] <http://tr.wikipedia.org/wiki/Aerodinamik>
- [15] <http://www.tkscientist.8m.com>
- [16] <http://cars.blogs.ca/images/Ferrari-F1-F2005.jpg>
- [17] <http://www.marksf1models.co.uk/CMC/M-052-leftside2med.jpg>
- [18] Çağan, M., Taşıt aerodinamik özelliklerinin sayısal yöntemlerle incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilimdalı, İstanbul, (2000).
- [19] Aka, H., Otomobillerin aerodinamik karakteristiğinin bir rüzgar tüneline incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilimdalı, Ankara, (2003).
- [20] <http://www.aeromech.usyd.edu.au/aero/dimension/node5.shtml>
- [21] [http://www.gidb.itu.edu.tr/staff/akman/dersler\\_2006.htm](http://www.gidb.itu.edu.tr/staff/akman/dersler_2006.htm)
- [22] <http://www.aerospaceweb.org/question/aerodynamics/drafting/streamline.jpg>
- [23] ANSYS CFX-Solver, Release 10.0: Theory, Boundary Conditions