İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞIR YÜK TAŞITLARININ AERODİNAMİK ŞEKİL DİRENÇ KATSAYILARININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR MEKANİĞİ YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Cengiz Şahin

Anabilim Dalı: MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Programı: OTOMOTİV

MAYIS 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞIR YÜK TAŞITLARININ AERODİNAMİK ŞEKİL DİRENÇ KATSAYILARININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR MEKANİĞİ YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Cengiz ŞAHİN
503041725

Tezin Enstitüye verildiği Tarih: 05.05.2008
Tezin Savunulduğu Tarih: 17.06.2008

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Doğan GÜNEŞ
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Ertuğrul ARSLAN
Prof.Dr. Rüstem ASLAN

MAYIS 2008

ÖNSÖZ

Aerodinamik direnç ağır vasıtalarda yakıt tüketimini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Bu taşıtlarda aerodinamik direncin düşürülmesiyle yakıt tüketimi ciddi oranda düşebilecektir. Bunun için taşıtlar etrafındaki akışın özellikleri iyi bilinmeli ve bununla paralel olarak tasarımlar gerçekleştirilmelidir.

Bu çalışmada bir ağır vasıtanın etrafındaki akış hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle incelenmiş ve aracın aerodinamik direnç katsayıları belirlenmiştir.

Öğrenim hayatım boyunca benden desteğini esirgemeyen aileme ve bu çalışmada bana değerli görüşleriyle yol gösteren tez danışmanı Doç Dr. Doğan GÜNEŞ ‘e sonsuz teşekkürler ederim.

Mayıs 2008 **Cengiz ŞAHİN**

İÇİNDEKİLER **Sayfa No**

ÖNSÖZ **ii**

KISALTMALAR **vi**

TABLO LİSTESİ **vii**

ŞEKİLLER LİSTESİ **viii**

SEMBOL LİSTESİ **xi**

ÖZET **xiii**

SUMMARY **xiv**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Giriş 1

1.2. Literatür Taraması 2

2. AERODİNAMİĞİN TEMELLERİ **4**

2.1. Hava Akışının Özellikleri 4

2.1.1. Sınır Tabaka 4

2.1.2. Ventüri Etkisi 5

2.1.3. Taşıt Etrafındaki Basınç Dağılımı 6

2.1.4. Laminer ve Türbülanslı Sınır Tabaka Gelişimi 8

2.1.5. Sürtünme Direncinin Oluşumu 9

2.1.6. Akışın Ayrılması 10

2.1.7. Basınç Direncinin Oluşumu 10

2.2. Aerodinamik Kuvvetler 11

3. TİCARİ TAŞITLARIN AERODİNAMİK ÖZELLİKLERİ **1**

3.1. Taşıt Üzerine Etki Eden Dirençler ve Yakıt Tüketimi 1

3.1.1. Aerodinamik Direnç ve Yakıt Tüketimi 2

3.2. Çeşitli Ticari Araçların Aerodinamik Direnç Katsayıları 3

3.3. Aerodinamik Direnci Oluşturan Bölgeler 4

3.3.1. Rüzgâr Hücum Açısının Aerodinamik Direnç Üzerindeki Etkisi 4

4. DENEYSEL YÖNTEMLER 6

4.1. Yol Deneyleri 6

4.1.1. Aerodinamik Direncin Ölçülmesi 7

4.1.2. Aerodinamik Kaldırmanın Ölçülmesi 8

4.1.3. Yüzey Basıncının Ölçülmesi 8

4.1.4. Akışın Görüntülenmesi 9

4.2. Rüzgâr Tüneli Deneyleri 10

4.2.1. Rüzgâr Tünelinin Yapısı 11

4.2.2. Rüzgâr Tünelinde Kullanılan Modeller 11

4.2.3. Rüzgâr Tüneli Deneylerinde Karşılaşılan Bazı Sorunlar 12

4.2.4. Blokaj Sorunu 12

4.2.5. Yolun Temsili ve Tekerleklerin Dönmesi Sorunu 14

5. SAYISAL YÖNTEMLER 17

5.1. Yöneten Denklemler 17

5.1.1. Momentum Korunumu Denklemi 18

5.1.2. Genel Diferansiyel Denklem 18

5.1.3. Türbülans Modelleri 18

5.2. Hesap Alanının Ayrıklaştırılması Ve Ayrıklaştırma Denklemleri 23

5.2.1. Toplam Akı Değerinin Gösterimi 25

5.2.2. Süreklilik Denkleminin Ayrıklaştırılması 26

5.2.3. Ayrıklaştırma Denkleminin Son Hali 27

5.2.4. Sınır Şartları 28

5.2.5. Ayrıklaştırma Denklemlerinin Çözümü 28

5.2.6. Yakınsama Katsayıları 28

5.2.7. Akış Hesabı 28

5.2.8. Ayrıklaştırma Denklemlerinin Hassasiyeti 29

5.2.9. Birinci ve İkinci Mertebe Ayrıklaştırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması 32

6. BİR AĞIR VASITA TAŞIT MODELİNİN AERODİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN HAD İLE BELİRLENMESİ 33

6.1. Çalışmada İncelenen Geometri 33

6.2. Geometrinin Sonlu Eleman Modeli 34
6.3. Çalışmada İncelenen Çözüm Alanının Sonlu Eleman Modeli 35
6.4. Sınır şartları 36
6.5. Taşıt Etrafindaki Akış Çözümlemeleri 37
6.5.1. Koşu 1: 37
6.5.2. Koşu 2 38
6.5.3. Koşu 3 39
6.5.4. Sonlu Eleman Ağının İyileştirilmesi 40
6.5.5. Koşu 4 40
6.5.6. Koşu 5 41
6.5.7. Koşu 6 41
6.5.8. Koşu 7 42
6.5.9. Koşu 4–5–6–7 karşılaştırması 42
6.5.10. Koşu 8 45
6.5.11. Koşu 9 46
6.5.12. Koşu 10 47
6.5.13. Koşu 11 47
6.5.14. Koşu 8, 9, 10, 11 karşılaştırılması 48
KAYNAKLAR **51**
ÖZGEÇMİŞ **53**

KISALTMALAR

HAD : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

SAE : Society of Automotive Engineers

GTS : Ground Transportation System

LES : Large Eddy Simulation

U.S. DOE : United States Department of Energy

TABLO LİSTESİ

Tablo 5.1: k-e türbülans modelinde kullanılan katsayılar 21

Tablo 5.2: RNG k-e türbülans modelinde kullanılan katsayılar 22

Tablo 5.3: k-ω türbülans modelinde kullanılan katsayılar 23

Tablo 5.4: A(Pe) fonksiyonunun hesabı için kullanılan çeşitli yaklaşımlar 26

Tablo 6.1: 4–5–6–7 koşularının test sonuçlarıyla karşılaştırılması 42

Tablo 6.2: Hassas sonlu eleman modeli için türbülans modellerinin direnç katsayılarının karşılaştırılması.....50

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1: Sınır tabaka hız gradyenti 4

Şekil 2.2: Ventüri 5

Şekil 2.3: Hareket halindeki taşıtın üst profilindeki bağıl hava hızı ve basınç koşulları 6

Şekil 2.4: Taşıt geometrisi üzerindeki akış dağılımı 6

Şekil 2.5: İnce düz bir levha üzerindeki sınır tabaka oluşumu 8

Şekil 2.6: Laminer ve türbülanslı akışların illüstrasyonu 9

Şekil 2.7: Bir gövde üzerindeki direncin belirlenmesi 10

Şekil 2.8: Sınır Tabakası ayrılmasının şematik gösterimi 10

Şekil 2.9: Silindir şeklindeki bir gövde üzerindeki basınç dağılımı ve akım çizgileri 11

Şekil 2.10: Toplam aerodinamik kuvvet ve bileşenleri 12

Şekil 3.1: Yuvarlanma direnci ve aerodinamik direncin hıza göre değişimi 1

Şekil 3.2: Taşıt üzerine etkiyen dirençlerin farklı yol koşullarında ve farklı hızlarda değişimi 2

Şekil 3.3: Bir ağır vasıtanın aerodinamik direncinin azaltılmasının yakıt tüketimi üzerindeki etkisi 2

Şekil 3.4: Çeşitli sınıftaki taşıtların izdüşüm alanlarının karşılaştırılması 3

Şekil 3.5: Çeşitli sınıflardaki taşıtların aerodinamik direnç katsayıları 3

Şekil 3.6: Ağır vasıtalarda basınç direncinin yüksek olduğu bölgeler 4

Şekil 3.7: Rüzgâr hücum açısı ve bağıl rüzgâr hızı vektör diyagramı 4

Şekil 3.8: Çeşitli araçlar için yan rüzgâr açısının direnç katsayısı üzerindeki etkisi .. 5

Şekil 4.1: Deney taşıtı için hız-zaman diyagramı 7

Şekil 4.2: Taşıt yüzeyine yerleştirilen bir basınç alıcısının şematik görünümü 9

Şekil 4.3: Taşıt etrafındaki akışın rüzgâr tünelinde duman kullanılarak görüntülenmesi 10

Şekil 4.4: Açık devreli bir rüzgâr tünelinin şematik görünümü.....11

Şekil 4.5: Kapalı devreli rüzgâr tünelinin şematik görünümü 12

Şekil 4.6: BMW $10m^2$ 'lik akustik rüzgâr tünelinin lülesi içindeki zeminin simetri ekseni üzerindeki basınç dağılımı. Modelin lüle çıkışına çok yakın yerleştirilmesi durumunda, N konumundaki statik basınç yükselmektedir. 14

Şekil 4.7: Deney odası uzunluğu ile kollektör kesit alanının lüle kesit alanına oranının, ölçülen C_D değerine etkisi 14

Şekil 4.8: Rüzgâr tünelinde yol simülasyonu için uygulanabilecek çeşitli yöntemler 15

Şekil 5.1: İki boyutlu bir hesap alanı için ağ sistemi ve kontrol hacimleri 24

Şekil 5.2: Tipik bir kontrol hacminin görünümü 24

Şekil 5.3: Kaymalı ağ sistemi ve kontrol hacimlerinin genel görünümü 29

Şekil 6.1: Çalışmada kullanılan kamyon geometrisi katı modeli.....33

Şekil 6.2: 1/8 ölçekli modelin boyutları 34

Şekil 6.3: Geometri yüzey sonlu eleman modeli 34

Şekil 6.4: Aracın ön yüzündeki hassaslaştırılmış çözüm bölgesi 35

Şekil 6.5: Çalışmada taşıt modeli etrafındaki akışın incelendiği çözüm bölgesi.....35

Şekil 6.6: Araç geometrisi etrafında kurulan çözüm alanı boyutları.....36

Şekil 6.7: Taşıt ve çözüm alanı için belirlene sınır şartı bölgeleri 37

Şekil 6.8: Koşu 1 için çözüm alanının görünümü 38

Şekil 6.9: Koşu 2 için çözüm alanının görünümü 38

Şekil 6.10: 3. koşu için çözüm alanının görünümü 39

Şekil 6.11: İlk üç koşu için hata yakınsama eğrileri.....39

Şekil 6.12: İyileştirilmiş sonlu eleman modeli.....40

Şekil 6.13: Koşu 4 hata yakınsama eğrileri 41

Şekil 6.14: Koşu 5 hata yakınsama eğrileri 41

Şekil 6.15: Koşu 6 hata yakınsama eğrileri 42

Şekil 6.16: Koşu 7 için hata yakınsama eğrileri.....42

Şekil 6.17: Koşu 4 (RNG k-e) için Statik basınç konturları 43

Şekil 6.18: Koşu 5 (St. k-e) için Statik basınç konturları.....43

Şekil 6.19: Koşu 6 (SST-Menter k-w) için Statik basınç konturları 43

Şekil 6.20: Koşu 7 (k-w Wilcox) için Statik basınç konturları.....43

Şekil 6.21: Taşıtın alt yüzeyi için simetri ekseninde basınç katsayılarının deney sonuçlarıyla karşılaştırması(Kaba sonlu eleman modeli) 44

Şekil 6.22: Taşıtın alt yüzeyi için simetri ekseninde basınç katsayılarının deney sonuçlarıyla karşılaştırması(Kaba sonlu eleman modeli) 44

Şekil 6.23: Taşıt etrafındaki eş hız büyüklüğü konturları.....45

Şekil 6.24: Taşıtın arkasındaki hız vektörleri (Koşu 8).....46

Şekil 6.25: Taşıt etrafındaki eş hız büyüklüğü dağılımı konturları (Koşu 9) 46

Şekil 6.26: Taşıtın etrafında oluşan hız vektörleri (Koşu 9).....46

Şekil 6.27: Taşıt etrafındaki eş hız büyüklüğü dağılımı konturları (Koşu 10) 47

Şekil 6.28: Taşıtın arka kısmındaki hız vektörleri (Koşu 10).....47

Şekil 6.29: Taşıt etrafındaki eş hız dağılım konturları (koşu 11).....48

Şekil 6.30: Taşıtın arka tarafındaki hız vektörleri (Koşu 11) 48

Şekil 6.31: Simetri ekseninde taşıt alt yüzeyindeki basınç katsayısının taşıt boyunca değişimi 49

Şekil 6.32: Simetri ekseninde taşıt üst yüzeyindeki basınç katsayısının taşıt boyunca değişimi 49

SEMBOL LİSTESİ

$\boldsymbol{D}$: Direnç Kuvveti

$\boldsymbol{L}$: Kaldırma Kuvveti

$\boldsymbol{S}$: Yanal Kuvvet

$\boldsymbol{C_D}$: Aerodinamik Direnç Katsayısı

$\boldsymbol{C_L}$: Kaldırma kuvveti katsayısı

$\boldsymbol{C_S}$: Yanal kuvvet katsayısı

$\boldsymbol{\rho}$: Havanın yoğunluğu (20^oC 'de 1.204 kg/m^3)

$\boldsymbol{A}$: İzdüşüm alanı

$\boldsymbol{V}$: Taşıtın havaya göre bağıl hızı

$\boldsymbol{V_x}$: x yönündeki hız

$\boldsymbol{V_y}$: y yönündeki hız

$\boldsymbol{V_z}$: z yönündeki hız

$\boldsymbol{\delta}$: Sınır tabaka kalınlığı

$\boldsymbol{P}$: Statik Basınç

$\boldsymbol{q}$: Dinamik basınç

$\boldsymbol{\tau}$: Kayma gerilmesi

$\boldsymbol{\mu}$: Kinematik viskozite

$\boldsymbol{\nu}$: Dinamik viskozite

$\boldsymbol{V_\infty}$: Serbest akış hızı

$\boldsymbol{P_\infty}$: Atmosfer basıncı

$\boldsymbol{q_\infty}$: Serbest akış dinamik basıncı

$\boldsymbol{Re}$: Reynolds sayısı

$\boldsymbol{l}$: Karakteristik uzunluk

$\boldsymbol{F_p}$: Basınç direnci kuvveti

$\boldsymbol{F_f}$: Sürtünme direnci kuvveti

$\boldsymbol{F}$: Kuvvet

$\boldsymbol{m}$: Kütle

$\boldsymbol{t}$: Zaman

$\boldsymbol{a}$: İvme

θ : Yan rüzgâr açısı

ψ : Hücum açısı

C_p : Basınç katsayısı

C_f : Sürtünme direnç katsayısı

Γ : Difüzyon terimi

S : Kaynak terimi

ϕ : genel bağımlı değişken

Pe : Peclet sayısı

F_e : e yüzeyinden geçen kütlesel debi

D_e : e yüzeyindeki difüzyon iletimi

J : Akı

k : Türbülans Kinetik Enerjisi

ε : Türbülans Kinetik Enerjisi Harcanma Oranı

ω : Spesifik Kinetik Enerji Harcanma Oranı

Ağır Yük Taşıtlarının Aerodinamik Şekil Direnç Katsayılarının Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği Yöntemi İle Analizi

ÖZET

Günümüzde fosil yakıtlarının tüm dünyada bitme noktasına geldiği ve bu yüzyılın ilk yarısında yakıt kıtlığının yaşanacağı ortadadır. Bu durumun önüne geçmek için yakıt tüketimini azaltıcı önlemler alınmaktadır. Bu çerçevede yapılan çalışmalardan biri motor ve yanma veriminin yükseltilmesi çalışmaları bir diğeri de taşıta seyir halinde etki eden dirençlerin azaltılması çalışmalarıdır.

Taşıtlara etkiyen direnç kuvvetlerinden biri özellikle yüksek hızlarda önem kazanan ve yakıt tüketimini arttıran aerodinamik dirençtir. Tipik bir ağır vasıta için 80 km/sa hıza kadar yuvarlanma direnci ve diğer yükler için gereken güç aerodinamik direnci yenmek için gereken kuvvetten büyüktür. Ancak örnek olarak 113 km/sa hızda böyle bir ağır vasıtanın hareketi esnasında aerodinamik direnci yenmek için harcadığı güç toplam yakıt tüketiminin %65 'ine tekabül etmektedir. Aerodinamik dirençte %25 'lik bir düşüşle %10–15 'lik bir yakıt tüketiminin sağlanacağı hesaplanmaktadır.

Bu çalışmada öncelikle hava akışının özelliklerinden, aerodinamik direnç kuvvetinin oluşumundan bahsedilecektir. Bundan sonraki aşamada ticari taşıtların aerodinamik özelliklerine değinilecektir.

Aerodinamik özelliklerin deneysel olarak ölçülmesinde kullanılan yöntemler ve buralarda karşılaşılan sorunların anlatılmasından sonra sayısal yöntemlerle aerodinamik özellikleri bulunması çalışmaları anlatılacaktır.

Sayısal yöntemlerin akış çözümünde kullandığı sonlu hacimler yöntemi ve çözüm alanının sonlu elemanlara ayrıklaştırılması ve burada kullanılan fiziksel kurallardan bahsedilecek ve HAD yöntemlerinde kullanılan türbülans modelleri anlatılacaktır.

Bundan sonraki aşamada ticari taşıt modeli etrafındaki akışın özellikleri ve taşıtın aerodinamik direnç katsayıları hesaplanacaktır. Çalışmada kullanılan taşıt modeli 1996 yılında Sandia Ulusal laboratuarlarında geliştirilen Ground Transportation System (GTS) modelidir. Model üzerinde şimdiye kadar çeşitli deneysel ve HAD çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada da bu geometrinin seçilmesinin sebebi model üzerinde 1996 yılında Gutierrez ve diğ[2]. tarafından yapılan deneyle çalışmada uygulanan sayısal yöntemleri doğrulamaktır.

Çalışmada öncelikle geometri üzerine kullanılan sonlu eleman ağının hassasiyetinin aerodinamik özelliklere etkisi incelenmiş daha sonra akış bölgesinde oluşan çeşitli türbülans bölgelerinde iyileştirmeler gerçekleştirilerek HAD hataları en aza indirilmeye çalışılmıştır. Daha sonra daha hassas bir çözüm ağıyla çözümler gerçekleştirilmiştir. Burada HAD yöntemlerinde kullanılan türbülans modellerinin etkisi incelenmiştir.

Prediction of Aerodynamic Drag Coefficient for Heavy Vehicles with Computational Fluid Dynamics Method

SUMMARY

It's clear that the world is running out the oil and it's predicted that the oil shortage will be in place in the first half of this century. To avoid this situation many precautions is being done. One of these is to raise the engine and combustion efficiency and the other one is to reduce the resistances on the vehicles while moving.

One of the resistances is the aerodynamic resistance which is taking place in high vehicle speeds. For a typical heavy vehicle up to 80 km/h the power need to overcome rolling resistance and other frictions is greater than the power required to overcome the aerodynamic resistance. However for example for a heavy vehicle speed at 110 km/h the power need to overcome aerodynamic resistance is % 65 of the fuel consumption. It is estimated that a 25% reduction in aerodynamic drag would yield a 10-15% reduction in fuel consumption

In this study the fundamentals of aerodynamics and the production of aerodynamic forces will be explained. Then the aerodynamic characteristics of the heavy vehicles will be mentioned.

The experimental methods and the problems in experimental measurements will be explained and then computational methods will be mentioned.

In computational methods section the finite volume method, discretization techniques then the equations governing the fluid motion and the turbulence model used in computational methods will be explained.

In the next section some properties of the flow and the aerodynamic coefficients of vehicle model are calculated. The vehicle model used in the study is Ground Transportation System (GTS) model which is developed in 1996 in Sandia National Laboratories. So far several experimental and computational studies made on the model. The reason to prefer this model is to verify the results taken for this study with the experimental results made 1996 by Gutierrez etc.[2].

First mesh quality and its effect to calculate aerodynamic coefficients accurately investigated the made some mesh refinements. After that the effect of turbulence models studied.

1. GİRİŞ

1.1. Giriş

Günümüzde fosil yakıtlarının tüm dünyada bitme noktasına geldiği ve bu yüzyılın ilk yarısında yakıt kıtlığının yaşanacağı ortadadır. Buna ek olarak soluduğumuz havanın da giderek kötüleşmesi toplumlarda büyük bir endişe yaratmaktadır. Devletler de yerel ve küresel anlamda motorlu taşıtların egzoz emisyonlarına büyük sınırlamalar getirmektedir. Günümüzde taşıtlarda kullanılan en yaygın olarak kullanılan tahrik kaynağı içten yanmalı motordur ve bu motorlarda da fosil yakıtlar kullanılmaktadır. İçten yanmalı motora getirilen alternatifler hala verimlilik ve uygulanabilirlik anlamında içten yanmalı motorlarla yarışamamaktadırlar. Bu durumda bu motorlarda kullanılan yakıtın verimli olarak kullanılması önem kazanmaktadır. Bunun için yapılan çalışmalardan biri motor ve yanma veriminin yükseltilmesi çalışmaları bir diğeri de taşıta seyir halinde etki eden dirençlerin azaltılması çalışmalarıdır.

Taşıtlara seyirleri esnasında çeşitli direnç kuvvetleri etki etmektedir. Taşıtlara etki eden direnç kuvvetlerini kütle kuvvetleri ve dış kuvvetler olarak sınıflandırabiliriz. Kütle kuvvetleri taşıtın kütlesi ve doğrusal ve açısal hızlarındaki değişimden doğan kuvvetler; dış kuvvetler ise kütle ile doğrudan ilişkisi olmayan taşıtın hareketini sağlayan ya da hareketine karşı koyan dirençlerdir. Bu direnç kuvvetleri taşıtın hareketi için gereken enerjiyi belirlediklerinden, taşıtın yakıt tüketimini de belirlerler.

Taşıtlara etkiyen direnç kuvvetlerinden biri özellikle yüksek hızlarda önem kazanan ve yakıt tüketimini arttıran aerodinamik dirençtir. Tipik bir ağır vasıta için 80 km/sa hıza kadar yuvarlanma direnci ve diğer yükler için gereken güç aerodinamik direnci yenmek için gereken kuvvetten büyüktür. Ancak örnek olarak 113 km/sa hızda böyle bir ağır vasıtanın hareketi esnasında aerodinamik direnci yenmek için harcadığı güç toplam yakıt tüketiminin %65 ‘ine tekabül etmektedir. Özellikle seyirlerinin büyük bölümünü şehir dışında yüksek hızlarda gerçekleştiren ağır vasıta taşıtları için aerodinamik direnç önemli yer tutmaktadır.

Bu çalışmada öncelikle aerodinamik direnç kuvveti ve aerodinamiğin temellerinden bahsedilecek ardından ağır ticari taşıtların aerodinamik özelliklerine değinilecektir. Deneysel olarak aerodinamik ölçümlerden sonra sayısal yöntemlerle yapılan çalışmalar ve bu çalışmada yapılan uygulama anlatılacaktır.

Çalışmanın yapılmasında, Cd-Adapco grubunun ticari Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı Star-CCM+ kullanılmıştır. Çalışmada Sandia Ulusal Laboratuarlarında geliştirilen ve deneyleri yapılan Sandia GTS modeli kullanılacak ve yapılan sayısal analiz çalışmasının sonuçları deneylerle karşılaştırılarak doğruluğu kontrol edilecektir.

Sandia GTS geometrisi, Catia V9R15 yazılımında çizilmiş, Star-CCM+ programıyla geometri üzerine sonlu eleman ağı kurulmuş ve daha sonra analiz gerçekleştirilmiştir. Böylece GTS geometrisi etrafında ve çözüm alanındaki farklı kesitlerde akış, akım çizgileri, hız vektörleri, hız ve basınç dağılımları incelenmiş ve geometrinin basınç, aerodinamik direnç katsayıları elde edilmiştir. Elde edilen değerler daha önce aynı geometriyle yapılan deneyler ve HAD sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

1.2. Literatür Taraması

Gutierrez ve diğ. (1996), yaptıkları çalışmada, Sandia Ulusal Laboratuarlarında geliştirilen, basitleştirilmiş kamyon geometrisi şekline sahip, Ground Transportation System (GTS), modeli üzerinde deneysel ve HAD çalışmaları gerçekleştirmişlerdir.

Yaptıkları çalışmada 1/8 ölçekli GTS modeli etrafındaki akışın incelemişler, rüzgar tüneli deneyleri gerçekleştirmişler ve Navier-Stokes denklemleri temelli HAD çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Bunun yanında GTS geometrisine ağır vasıtalar için aerodinamik direnci azaltıcı parçalar ekleyerek etkilerini incelemişlerdir. Yalpa açısı ψ = 0 ve -10 için deney ve HAD sonuçları (basınç katsayısı değerleri, hız vektörü dağılımları) karşılaştırılmış ve HAD kodlarının isabeti araştırılmıştır.

McCallen 1999 da, 1/8 GTS modeliyle NASA Ames rüzgâr tünelinde HAD çalışmalarına kaynak olması amacıyla deneyler gerçekleştirmiş ve taşıt etrafındaki akışın görüntülenmesini iyileştiren yeni teknolojiler denemişlerdir. 2000 yılında geliştirdikleri çalışmada McCallen GTS kamyon geometrisi üzerindeki kararsız akış alanını araştırmıştır. Bunun yanında Large Eddy Simülasyon (LES) kullanarak buldukları sonuçlara göre ağır vasıtalarda kullanılacak, kamyonun arkasındaki

kısmındaki basıncı arttıracak ve türbülans miktarını azaltacak donanımları tartışmışlardır.

K.Salari ve diğ., 2004 yılında yaptıkları çalışmada GTS etrafındaki akışın sayısal yöntemlerle incelenebilirliğini ve yöntemlerin doğruluğunu araştırmışlardır. Değişik türbülans modellerini ve birinci derece ayrıklaştırma ile ikinci derece ayrıklaştırma yöntemlerinin etkilerini araştırmışlardır.

Ağır vasıtalar için aerodinamik direncin azaltılması çalışmaları A.B.D. Enerji Bakanlığı (U.S.DOE) tarafından desteklenmiş ve bu çerçevede 2001–2004 yılları arasında yapılan, ağır vasıtalar için aerodinamik direnç katsayısının azaltılması ile ilgili çalışmaların özeti U.S DOE 2005 raporunda bulunabilir.

Bununla beraber Rose McCallen, Fred Browand ve James Ross ağır vasıtalarla ilgili yapılan aerodinamik çalışmaları, "The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses and Trains 2004 (Ağır Vasıtaların Aerodinamiği: Kamyonlar, Otobüsler ve Trenler 2004)" isimli bir kitapta yayınlamışlardır.

2. AERODİNAMİĞİN TEMELLERİ

Yakıt tüketimini iyileştirme ihtiyacı, daha yüksek taşıt performansı ve yol tutuşu isteği, rüzgâr gürültüsünün azaltılması istekleri taşıt üreticilerini değişik çalışma koşullarında çalışan değişik şekillere cisimlere havanın uyguladığı direncin ayrıntılarını araştırmaya itmiştir.

Aerodinamik, hava ortamı içinde ilerleyen katı kütle ve bu kütlenin yüzeyleri ile etrafını çevreleyen havanın değişik hızlarda ve rüzgâr yönlerinde ilişkilerinin incelenmesidir. Bu ilişki sonucunda aerodinamik kuvvetler (sürtünme direnci, kaldırma direnci), yalpa ve gürültü gibi etmenler oluşmaktadır.

2.1. Hava Akışının Özellikleri

2.1.1. Sınır Tabaka

Hava belirli bir viskoziteye sahiptir ve bitişik hava katmanları arasında sürtünme vardır. Hava hareket ediyorsa diğer bir değişle havanın bitişik katmanları arasında bağıl bir hareket söz konusu ise enerji harcanımı gerçekleşir.

Hiçbir akış ayrılmasının bulunmadığını kabul edersek, akışkan içerisinde bütün viskoz etkilerin araç yüzeyinin hemen üzerinde oluşan ve sınır tabaka adı verilen birkaç milimetrelik ince bir tabaka içerisinde kısıtlandırılmış olduğunu düşünebiliriz.



Şekil 2.1: Sınır tabaka hız gradyeni

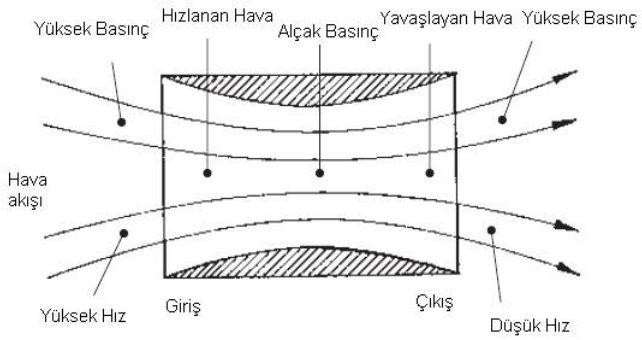
Hava herhangi bir yüzey üzerinde hareket ederken, sınır tabakanın yüzeye en yakın bölgesinde yüzey ve havanın ana akış alanı arasında bağıl hız sıfırdır. Havanın yüzeye en yakın olan katmanında hız çok düşükken; yüzeyden uzaklaşarak hava

katmanlarının hızı artmakta ve herhangi bir engelle karşılaşmadığı ana akış bölgesinde en yüksek haline ulaşmaktadır.

Hava bir yüzey üzerinde hareket ederken sınır tabaka içinde yüzey boyunca oluşan dirençler yüzey sürtünmesi olarak adlandırılır. Yüzey sürtünmesi, havanın üzerinde hareket ettiği yüzey alanına, yüzeyin pürüzlülüğüne ve havanın hızına bağlıdır.

Hava parçacıkları temas ettikleri yüzeyle temas halinde kalmaya eğilimlidir. Bundan dolayı yüzeye yakın olan hava katmanlarının hareketi sınırlıdır. Sınır tabakasının kalınlığı yüzeyin pürüzlülüğüne bağlıdır. Pürüzlü yüzeylerde sınır tabakası kalınlığı daha fazladır.

2.1.2. Ventüri Etkisi

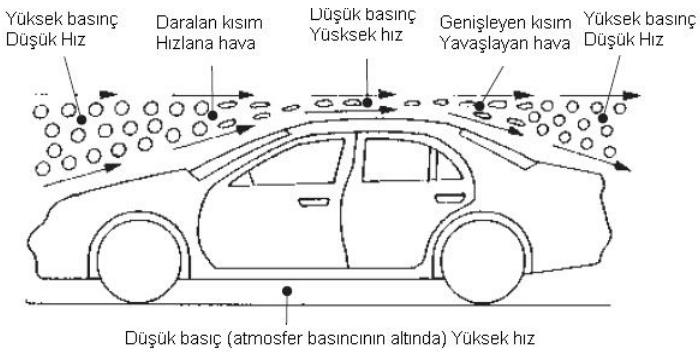


Şekil 2.2: Ventüri

Hava ventürinin daralan ve genişleyen kısımları arasında hareket ederken hızı ve basıncı değişir. Girişte engellenmemiş hava atmosferik şartlardadır ve basıncı en yüksek değerindeyken hızı en düşük değerindedir.

Hava ventürinin daralan kısımlarına doğru hareket ederken hava moleküllerinin hızı artarken basıncı düşüş gösterir. Genişleyen kısımda ise hız düşerken basın artar.

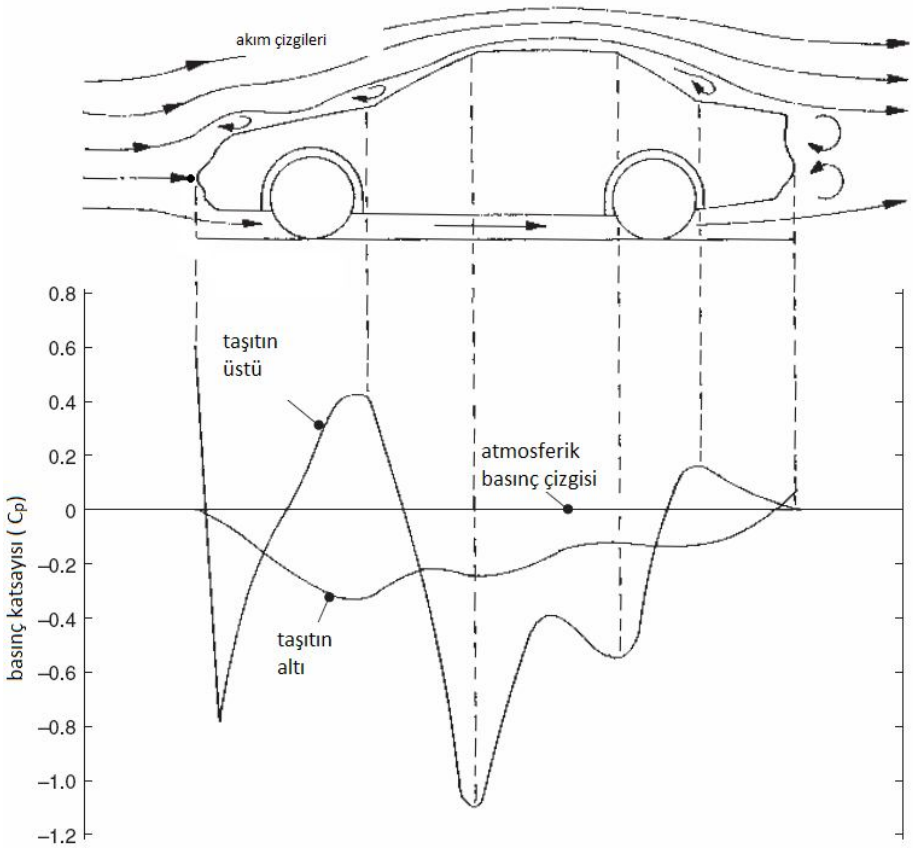
Hareket halindeki bir taşıtın üst profiliyle yatay akım çizgileri arasındaki kısım ventüri etkisi gibi davranmaktadır. Yatay akım çizgileriyle arasındaki alan büyük olan taşıtın ön ve arka kısımları ventürinin genişleyen bölgesi; alanın dar olduğu kabin üstü bölge ise ventürini dar bölgesi gibi davranır. Ön ve arka kısımlarda basınç yüksek ve hız düşükken orta kısımda basınç düşük hız yüksektir.



Şekil 2.3: Hareket halindeki taşıtın üst profilindeki bağıl hava hızı ve basınç koşulları

2.1.3. Taşıt Etrafındaki Basınç Dağılımı

Şekilde bir taşıt geometrisi üzerindeki iki boyut akış şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.4: Taşıt geometrisi üzerindeki akış dağılımı

Bu iki boyutlu akış taşıt üzerindeki ve içindeki üç boyutlu akımın kabul edilebilecek şekilde basitleştirilmiş halini göstererek, aracın simetri ekseninde bulunan kesit alanı üzerindeki ve içindeki akışı temsil etmektedir. Şekil 2.4' de üst kısımdaki şekil taşıt üzerindeki akış çizgilerini göstermekte, alt kısım ise basınç katsayısı C_p değerinin değişimini göstermektedir. Basınç katsayısının hesaplanması aşağıdaki gibi olmaktadır:

Boyutsuz basınç katsayısı

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{\rho V_\infty^2}{2}} \tag{2.1}$$

$$P + \frac{V^2}{2g} = P_\infty + \frac{V_\infty^2}{2g} = sabit \tag{2.2}$$

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{\rho V_\infty^2}{2}} = 1 - \frac{V^2}{V_\infty^2} \tag{2.3}$$

Aracın alt yüzeyindeki basınç değerleri serbest akış basınç değerinden daha düşük olduğu için basınç katsayısı sıfırdan küçüktür ($C_p<0$). Aracın üst yüzeyinde ise kaputla ön camın kesiştiği bölge civarında yüksek basınç değerleri görülmektedir. Bu bölgede basınç katsayısı değeri sıfırdan büyüktür ($C_p>0$). Ancak özellikle taşıtın tavan kısmında düşük basınç bölgeleriyle ortaya çıkan düşük basınç katsayısı değerleri bulunmaktadır. Bu bölgelerdeki basınç katsayısı değerleri sıfırdan küçüktür ($C_p<0$). Taşıtın arkasına doğru gidildikçe basın arttığından dolayı C_p değeri negatif kalmakla birlikte yükseliş göstermektedir. Arka camda basın artışı yükseldiğinden burada pozitif C_p ortaya çıkmaktadır ($Cp>0$).

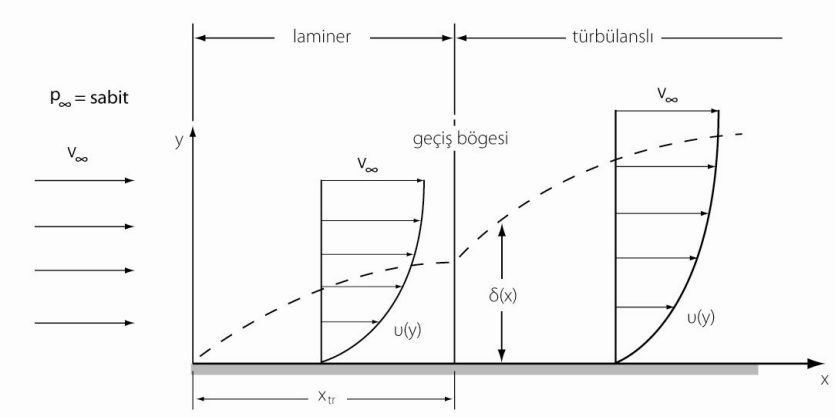
Şekil 2.4 ‘deki basınç dağılımından da anlaşılacağı üzere aracın ön kısmında üst yüzey üzerinde gözlemlenen basınç seviyeleri aracın alt yüzeyindeki basınç seviyelerine oranla daha düşüktür. Bu veriden yola çıkarak araç üzerindeki basınç dağılımı sebebiyle aracın ön kısmının bir aerodinamik kaldırma kuvvetine maruz kalacağı aşikârdır.

Benzer şekilde aracın arka kısmında ise aracın geometrik özellikleri sebebiyle aracın üst yüzeyinde gözlenen basınç seviyeleri alt yüzeye oranla daha yüksektir. Dolayısıyla aerodinamik kuvvetler aracın arka kısmına yer çekimi yönünde bir bası kuvveti uygulamaktadır.

Şekil 2.4 ‘ten aynı zamanda taşıt içindeki akış karakteristikleri de anlaşılabilmektedir. Burada havanın taşıt içine giriş noktası ve girişten sonraki yönelimi değerlendirilerek söz konusu araç için en uygun hava giriş ve çıkış noktaları kolaylıkla belirlenebilmektedir. Hava giriş noktası olarak en yüksek basınç

bölgesi aracın burnu ve hava çıkış noktası olarak en düşük basınç bölgesi yani emme bölgesi olan taşıtın tavanı seçilebilir.

2.1.4. Laminer ve Türbülanslı Sınır Tabaka Gelişimi



Şekil 2.5: İnce düz bir levha üzerindeki sınır tabaka oluşumu

Yukarıda düzlem üzerine etki eden sabit V_∞ hızında ve P_∞ basıncında akış çizgileri gösterilmektedir. Düzlem üzerinde oluşan ince sınır tabaka içerisindeki viskoz akışın düzlem üzerinde kaymadığı kabulü yapılmaktadır.

Bu kabuller eşliğinde düzlem ön kısmındaki sınır tabaka içindeki akış kararlı ve düzleme genelde paraleldir. Bu tip akış özellikleri gösteren akımlara laminer akım adı verilmektedir.

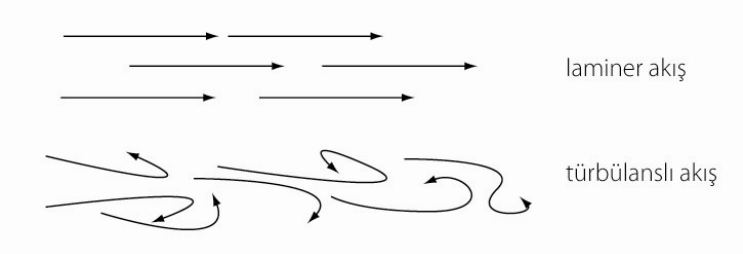
Sınır tabaka kalınlığı akış eksenindeki mesafenin ve kinematik viskozite ile doğru orantılı olarak artarken; serbest akış hızı ile ters orantılı olarak değişim göstermektedir.

$$\delta = \sqrt{\frac{\nu_x}{V_\infty}} \tag{2.4}$$

Sınır tabaka bölgesinin Laminer akış bölgesindeki akım herhangi bir dış etken bulunmaması halinde kararlı akım özelliklerini koruyacaktır. Ancak düzlemin akışkanla temas noktasından sonraki kritik x_{kr} noktasından itibaren laminer akışın yerini türbülanslı akış almaktadır. Laminer akıştan türbülanslı akışa geçişi belirleyen en önemli parametre akış koşullarına ait karakteristik Reynolds sayısıdır. Düz bir yüzey için Laminer akıştan türbülanslı akışa geçişin Reynolds sayısı yaklaşık olarak:

$$\mathrm{Re}_{x_{kr}} = \frac{V_\infty x_{kr}}{\nu} = 5x10^5 \tag{2.5}$$

Ancak yukarıda bulunan Reynolds sayısı değeri sadece basınç gradyenlerinin ihmal edilebileceği durumlar için geçerlidir. Basınç gradyenlerinin etkin olduğu dış akış koşullarında laminer akıştan türbülanslı akış geçiş noktası öngörülenden daha önce gelişebilmektedir. Ayrıca laminer akıştan türbülanslı akışa geçiş noktası farklı çevre koşullarından, örnek olarak yüzey pürüzlülüğü gibi şartlardan etkilenebilmektedir.



Şekil 2.6: Laminer ve türbülanslı akışların illüstrasyonu

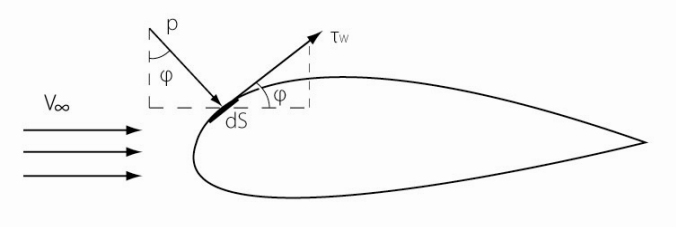
Genellikle ortalama Reynolds sayısına sahip akış koşullarında laminer akıştan türbülanslı akışa geçiş minimum basınç bölgelerinde gerçekleşmektedir ve Reynolds sayısının artışı ile geçiş bölgesi daha üst bölgelerde gerçekleşmektedir.

Araç yüzeyinin hemen üzerinde oluşan sınır tabaka bölgesinin oldukça ince olmasına rağmen, taşıt üzerindeki akışı alanının gelişiminde viskoz akış özelliklerinin büyük etkisi vardır. İki boyutlu herhangi bir yüzeyde sıkıştırılamaz bir akışkan sebebiyle oluşan sürtünme direncinin en önemli oluşma sebebi de viskoz etkilerdir.

2.1.5. Sürtünme Direncinin Oluşumu

Bir gövde üzerindeki viskoz akış sırasında yüzeyin hemen üzerinde du/dy hız gradyeni bulunur. Bununla beraber Şekil 2.7' den de görüldüğü gibi gövde yüzeyinin her noktasında moleküler sürtünme sebebiyle ortaya çıkan kayma gerilmeleri bulunmaktadır. Söz konusu kayma gerilmelerinin serbest akış yönündeki bileşenlerinin tüm gövde yüzeyi boyunca integrasonu sonucu elde edilen kuvvete, sürtünme direnci (F_f) adı verilmektedir.

$$F_f = \int \tau_W \cos\varphi dS \tag{2.6}$$



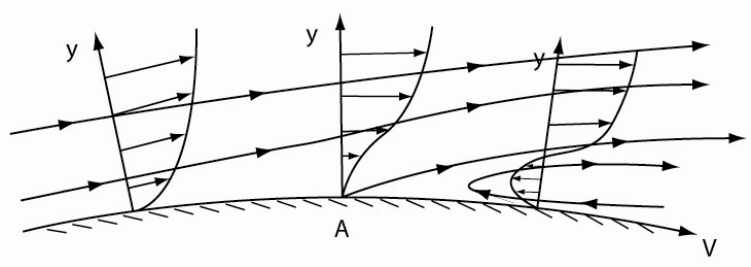
Şekil 2.7: Bir gövde üzerindeki direncin belirlenmesi

Gövde üzerindeki akış sırasında herhangi bir akış ayrılması gözlenmiyorsa gövde üzerine etki eden direnç kuvvetinin ana sebebi sürtünme dirençleridir.

2.1.6. Akışın Ayrılması

Laminer ve türbülanslı akış bölgelerinin her ikisinde de, sınır tabakası hemen üzerindeki dış akışta meydana gelen basınç değişikliklerine oldukça hassastır. Akış yönünde gerçekleşen herhangi bir basınç artışı neticesinde sınır tabaka akışının, özellikle yüzeye yakın bölgelerdeki akışın hızı kesilir ve ters akışlar oluşabilir. Söz konusu durum Şekil 2.8 'de gösterilmektedir.

Şekilden de görülebileceği üzere ileri ve geri akış arasındaki bir bölücü akış çizgisi keskin bir şekilde yüzeyden ayrılmaktadır. Söz konusu akım çizgisinin yüzeyden kopmasıyla ortaya çıkan duruma akışın ayrılması denilmektedir. A noktasındaki dikey eksen hız bileşeni akıştaki ayrılma sebebiyle sıfıra eşittir ($du/dy = 0$).

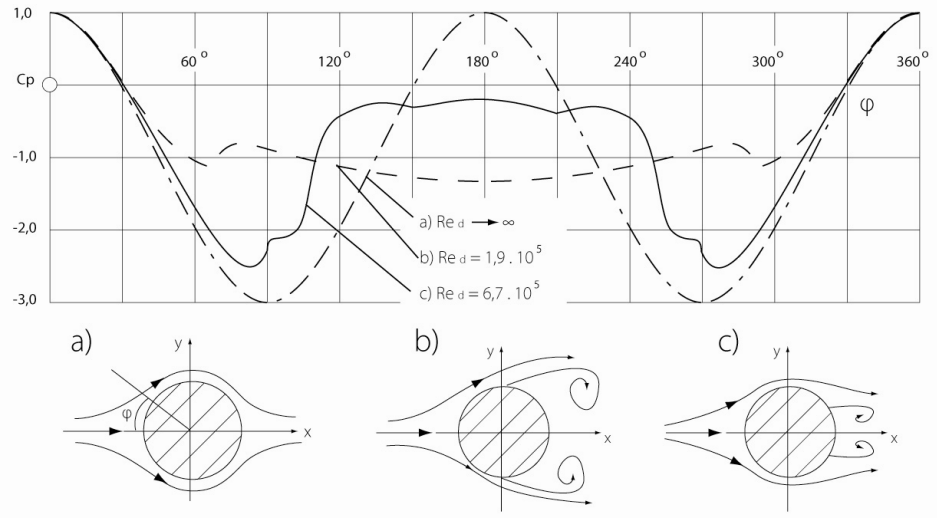


Şekil 2.8: Akış ayrılmasının şematik gösterimi

2.1.7. Basınç Direncinin Oluşumu

Küre, silindir ya da benzeri yuvarlatılmış geometriler üzerindeki akışta ortaya çıkan direnç karakteristiği düz levha üzerinde oluşandan farklılık göstermektedir. Söz konusu yuvarlatılmış geometrilerin arka kısmında basınç gradyenlerinin etkisiyle akış ayrılmaları gözlenmektedir. Şekil 2.9 'de yuvarlatılmış bir cismin arka tarafındaki akış ayrılmaları ve ayrılmalar sonucunda oluşan girdaplar açıkça görülmektedir. Oluşan girdaplar oluşan geometrilere ait toplam direnç katsayısının yüksekliğini göstermektedir. Optimize edilmiş bir geometri üzerindeki akış ayrılma

noktalarının azlığı çok önemlidir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken nokta sıfır ayrılmayı sağlamaya çalışmak olmamalıdır.



Şekil 2.9: Silindir şeklindeki bir gövde üzerindeki basınç dağılımı ve akım çizgileri
a)Sürtünmesiz akış b)Sınır tabakası laminer c) Sınır tabakası türbülanslı

Yuvarlatılmış bir cisim üzerindeki akış sırasında cismin ön kısmında yüksek basınçlar oluşmaktadır. Ancak cismin arka kısmındaki ayrılmalar nedeniyle negatif basınç bölgesi oluşmaktadır. Söz konusu negatif basınç alanı cismin arkasında bir emme etkisi yaratmaktadır.

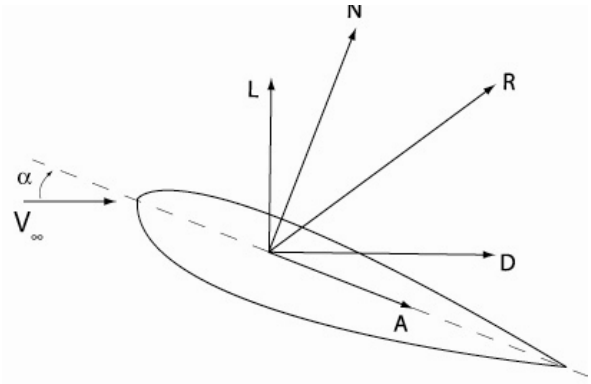
Şekil 2.9 'den görüldüğü üzere cisim üzerindeki basınç dağılımı y eksenine göre asimetriktir. Cisim üzerine basınç dağılımı sebebiyle etki eden basınç kuvvetinin serbest akış yönündeki bileşenlerinin cismin yüzey alanı boyunca integrasyonu sonucunda bulunan kuvvete basınç direnci denilmektedir.

$$F_p = \int P \sin\varphi dS \tag{2.7}$$

Yuvarlatılmış cisimler üzerinde dış akış sebebiyle oluşan basınç direnci aynı akış sırasında cisme etki eden sürtünme dirençlerine oranla çok daha baskındır.

2.2. Aerodinamik Kuvvetler

Basınç gerilmesi p yüzeye dik olarak, kayma gerilmesi τ ise teğetsel olarak etkimektedir. p ve τ gerilmeleri dağılımlarının yüzeydeki net etkisi toplam aerodinamik kuvvet R ve moment M olarak etkimektedir.



Şekil 2.10: Toplam aerodinamik kuvvet ve bileşenleri

Şekil 2.10 'te toplam aerodinamik kuvvet ve bileşenleri görülmektedir. V_∞ serbest akış hızı, R toplam aerodinamik kuvvettir. Ayrıca: L, Kaldırma kuvveti (R' nin V_∞ ile dik bileşeni); D, Direnç kuvveti (R' nin V_∞ ile paralel bileşeni) olarak tanımlanır. ρ_∞ ve V_∞ sırasıyla yoğunluk ve hız olmak üzere serbest akış için dinamik basınç aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.[10]

$$q_\infty = \frac{1}{2}\rho_\infty V_\infty^2 \tag{2.8}$$

S referans alan olmak üzere boyutsuz kaldırma ve direnç kuvveti katsayıları aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

Kaldırma katsayısı: $$C_L = \frac{L}{q_\infty S} \tag{2.3}$$

Direnç katsayısı: $$C_D = \frac{D}{q_\infty S} \tag{2.4}$$

Yukarıdaki katsayılarda kullanılan S referans alanı farklı yüzeyler için farklı tanımlanır. Örnek olarak küre için S, kesit alanıdır.

Bunun yanında basınç ve sürtünme direnci katsayıları da:

Basınç direnç katsayısı: $$C_p = \frac{p - p_\infty}{q_\infty} \tag{2.5}$$

Sürtünme direnç katsayısı: $$c_f = \frac{\tau}{q_\infty} \tag{2.6}$$

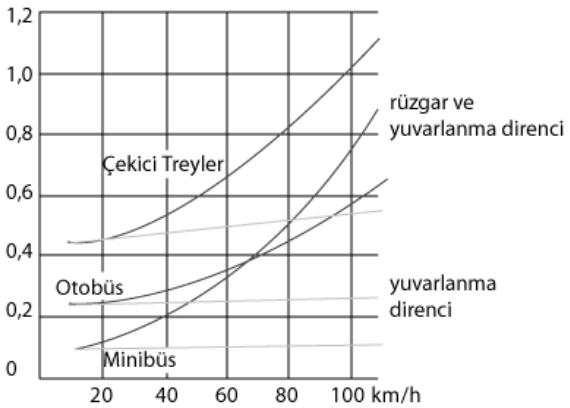
Burada p_∞ serbest akış basıncı ve q_∞ ise dinamik basınçtır.

3. TİCARİ TAŞITLARIN AERODİNAMİK ÖZELLİKLERİ

Artan yakıt fiyatları ve günümüzün rekabetçi ortamı ticari araç üreticilerini daha az yakıt sarfiyatıyla çalışan araçlar üretmek konusunda her geçen gün daha da fazla zorlamaktadır. Bu bağlamda çalışmalarını hızla sürdüren ticari araç üreticilerinin en hassas olduğu nokta ise aracın aerodinamik verimliliği; yani aerodinamik iyileştirmenin kullanıcıya sağladığı yakıt tüketimindeki azalma miktarıdır. Yüksek süratli, şehirlerarası ve uzun yol araçlarında aerodinamik direncin toplam yakıt tüketimine olan etkisi yadsınamayacak kadar yüksektir.

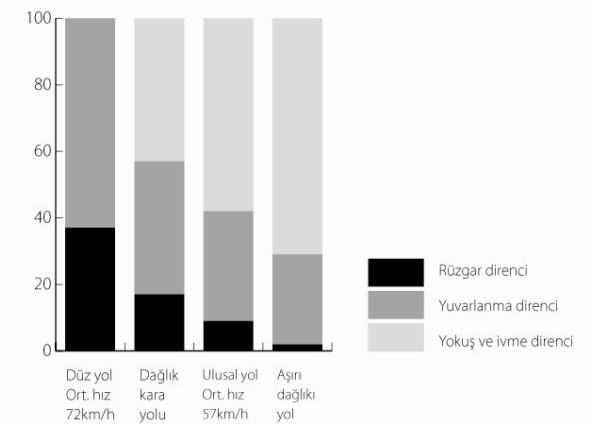
3.1. Taşıt Üzerine Etki Eden Dirençler ve Yakıt Tüketimi

Herhangi bir araç geometrisi üzerinde gerçekleştirilen aerodinamik iyileştirmeler neticesinde, yakıt tüketiminde gözlenen değişim miktarı incelenirken araca ait diğer direnç bileşenlerinin de (yuvarlanma direnci, yokuş direnci) toplam direnç miktarı üzerindeki etkisi incelenmelidir. Genellikle düz bir yolda düşük hızlarda seyreden bir ticari araçtaki yuvarlanma direnci seviyeleri aerodinamik direnç değerine göre oldukça yüksektir. Ancak taşıt hızı yükseldikçe, taşıt hızının karesiyle doğru orantılı olarak artan aerodinamik direnç kuvveti yuvarlanma direncinden daha yüksek değerler alabilmektedir. Şekil 3.1 'de yuvarlanma direnci ve aerodinamik direnç değerlerinin hıza göre değişimi gösterilmektedir.



Şekil 3.1: Yuvarlanma direnci ve aerodinamik direncin hıza göre değişimi

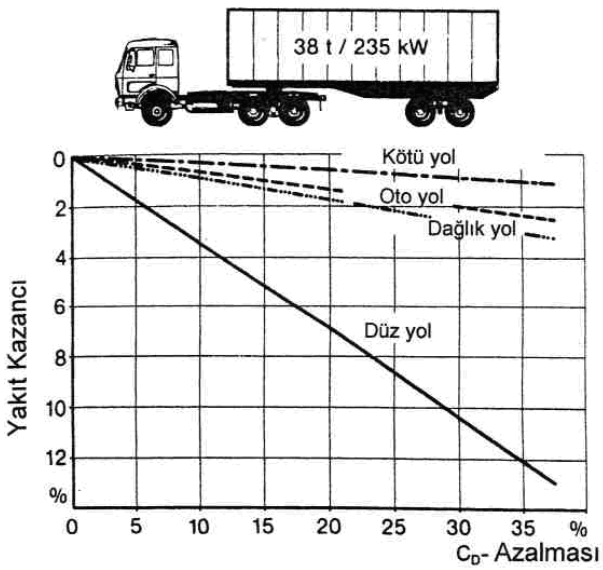
Uygulamada aracın seyrettiği bütün yolların düz olmadığı gerçeği göze alınırsa yokuş ve ivmelenme dirençleri de aerodinamik direnç iyileştirilmesinin yakıt tüketimine olan etkisinde dikkate alınması gereken birer parametredir. Şekil 3.2' de arkasına treyler bağlı bir çekici üzerine etki eden dirençlerin farklı yol koşullarında ve farklı hızlarda değişimi incelenmiştir.



Şekil 3.2: Taşıt üzerine etkiyen dirençlerin farklı yol koşullarında ve farklı hızlarda değişimi

3.1.1. Aerodinamik Direnç ve Yakıt Tüketimi

Direnç azaltılması ile elde edilebilecek yakıt sarfiyatındaki azalma değeri tipik bir araç üzerinde ve belirli yol şartlarında incelenmelidir. Şekil 3.3 'te 40 tonluk bir çekicinin aerodinamik direnç değerinin iyileştirmesi sonucunda elde edilecek yakıt sarfiyatı iyeleştirilmesi miktarı çeşitli yol koşullarında gösterilmiştir.



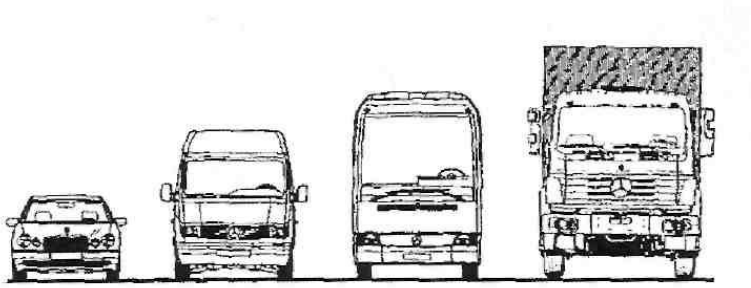
Şekil 3.3: Bir ağır vasıtanın aerodinamik direncinin azaltılmasının yakıt tüketimi üzerindeki etkisi

Görüldüğü üzere düz bir yolda hareket eden çekicinin rüzgâr direnç katsayısının %15 iyileştirilmesi halinde taşıtın yakıt tüketiminde % 5 civarında azalma sağlanmaktadır.

Aracın toplam direnç katsayısındaki iyileştirmelerin yakıt tüketimi üzerindeki etkisi, taşıtın daha yüksek hızlarda seyrettiği düz yollarda daha yüksektir. Buna sebep yüksek hızlarda aerodinamik direncin yüksek olmasıdır. Engebeli yollarda ise taşıt yüksek hızlarda seyretmediğinden aerodinamik direnç azalmakta ve direnç katsayısındaki düşüşün yakıt tüketimine etkisi de azalmaktadır.

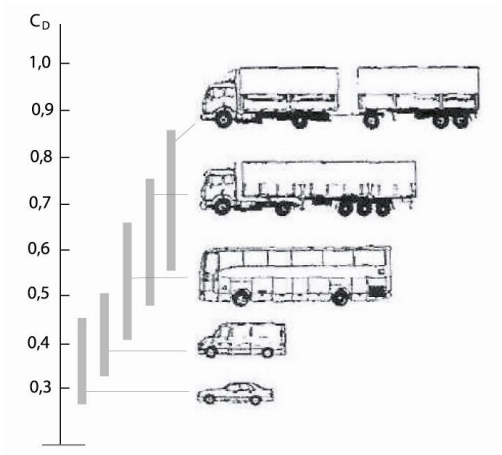
3.2. Çeşitli Ticari Araçların Aerodinamik Direnç Katsayıları

Kamyon, otobüs ya da hafif ticari araçların karakteristik izdüşüm alanlarının binek araçlara göre çok daha yüksek olması ve geometrik düzgünsüzlükleri sebebiyle ticari araçlar üzerine etki eden aerodinamik direnç kuvvetleri binek araçlara oranla daha yüksektir. Şekil 3.4 'te görüldüğü üzere ortalama büyüklükteki bir çekici kamyonun karakteristik izdüşüm alanı ortalama büyüklükteki bir binek aracın karakteristik izdüşüm alanının beş kati civarındadır.



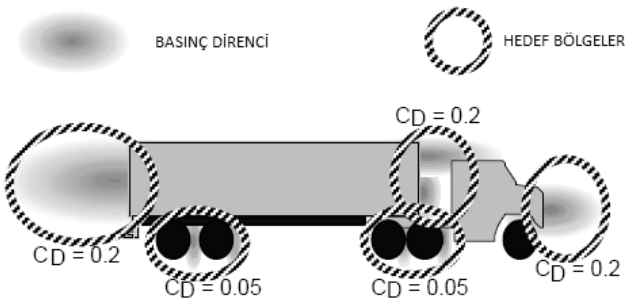
Şekil 3.4: Çeşitli sınıftaki taşıtların izdüşüm alanlarının karşılaştırılması

Aşağıdaki şekilde farklı tipteki taşıtların direnç katsayıları karşılaştırılmaktadır.



Şekil 3.5: Çeşitli sınıflardaki taşıtların aerodinamik direnç katsayıları

3.3. Aerodinamik Direnci Oluşturan Bölgeler

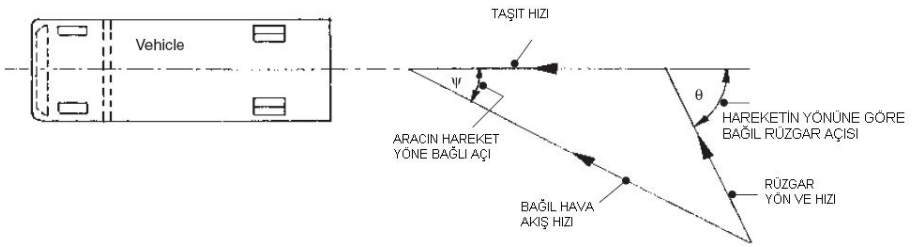


Şekil 3.6: Ağır vasıtalarda basınç direncinin yüksek olduğu bölgeler

Şekil 3.6' da ağır vasıtalarda basınç direncini oluşturan bölgeler ve tipik olarak direnç katsayısına etkileri görülmektedir. Basınç direncinin büyük miktarda oluştuğu ön yüzey, tekerlekler, çekici ve treyler arasındaki boşluk ve taşıtın arkasıdır. Burada özellikle çekici-treyler boşluğu, treylerin altı ve treylerin arka kısmındaki direnç değişik aerodinamik parçalarla azaltılmaya çalışılmaktadır.[11]

3.3.1. Rüzgâr Hücum Açısının Aerodinamik Direnç Üzerindeki Etkisi

Herhangi bir taşıtın aerodinamik özellikleri incelenirken araç üzerine gelen rüzgârın hücum açısının dikkate alınması gerekir. Küçük taşıtlar için yan rüzgarın aerodinamik dirence etkisi küçük kalırken daha büyük taşıtlar için ihmal edilemeyecek kadar büyük değerler almaktadır. Şekil 3.7' de hücum açısının oluşumu ve hesaplanması gösterilmektedir[5]

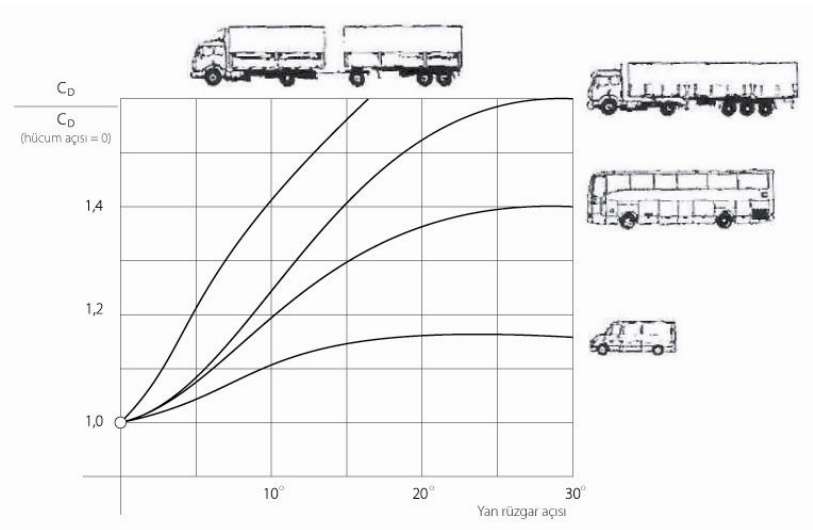


Şekil 3.7: Rüzgâr hücum açısı ve bağıl rüzgâr hızı vektör diyagramı

Rüzgârın hücum açısının sıfırdan farklı olması halinde araç üzerine etki eden yan kuvvet etkisi aracın direnç katsayısı değerini oldukça değiştirmektedir. Şekil 3.8' de rüzgar hücum açısının değişik taşıtların direnç katsayısı değerlerine etkisi görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi rüzgâr hücum açısı ve araç büyüklüğü arttıkça direnç katsayısındaki artış da artmaktadır. 20 derecelik bir rüzgâr hücum

açısı otomobilin direncini 1,08 katına çıkartırken; çekici-römork tipindeki bir ağır vasıtanı direnci 1,7 katına çıkarmaktadır.

Aşağıdaki şekilde rüzgâr hücum açısının aracın aerodinamik direnç katsayısı üzerindeki etkisi gösterilmektedir.



Şekil 3.8: Çeşitli araçlar için yan rüzgâr açısının direnç katsayısı üzerindeki etkisi

4. DENEYSEL YÖNTEMLER

Taşıtların aerodinamik özeliklerinin belirlenmesi, tasarım sürecinde taşıtların geometrisinde yapılacak olan değişikliklerin saptanması açısından oldukça büyük önem arz etmektedir. Bilinmesi istenen bazı aerodinamik özelikler şunlardır:

- Aerodinamik direnç ve kaldırma katsayıları gibi toplam aerodinamik katsayılar
- Taşıt yüzeyi üzerindeki basınç dağılımı
- Akış görünümü verileri vs.

Bunların tespiti için kullanılacak olan yöntemlerden biri de deney yolu ile yapılan ölçümlerdir. Deneyler, yolda gerçek bir taşıt üzerinde yapılacağı gibi, rüzgâr tünelinde gerçek bir taşıt veya taşıtın ölçekli bir modeli üzerinde yapılabilir.

4.1. Yol Deneyleri

Yol deneylerinin en büyük faydası, gerçek yol şartlarında gerçek bir taşıtın denenmesidir. Bu nedenle yol deneyleri taşıt aerodinamiği incelemelerinde önemli bir yer tutmaktadır.

Deney esnasında, deney ortamında denenen taşıt ve ölçümleri yapacak bir donanıma gereksinim vardır. Taşıtın hareketli olması durumunda, ancak sınırlı sayıda ölçü aleti taşıt üzerinde taşınabilir. Bu problem farklı iki taşıt geometrisinin denenmesi sırasında ortaya çıkmakta olup, ölçü donanımının bir araçtan diğerine aktarılması zorunludur. Farklı taşıt burnu gibi model değişiklikleri ölçü donanımı için sorun çıkarabilmekte; yol ve deney şartlarının tekrarlanabilirliği açısından güçlük arz etmektedir. Bu nedenle, yol deneylerinin tekrarlanabilirliği, ölçü aletlerinin hassas olarak taşınabilme yeteneğiyle sınırlı olup, kontrol edilemeyen çevreye (rüzgârlar) de bağımlıdır. Ayrıca, aerodinamik yükler rüzgâr tünelinde sabit bir ölçü donanımı ile ölçülürken, yol deneylerinde benzer ölçümler için dolaylı yöntemler kullanılmaktadır.

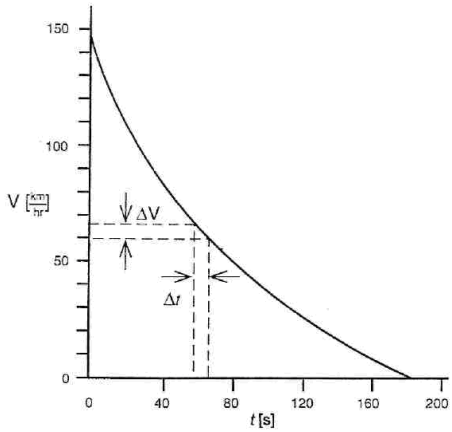
4.1.1. Aerodinamik Direncin Ölçülmesi

Yol deneylerinde, aerodinamik direncin ölçülmesi, aerodinamik dirence ilaveten seyir hattı sürtünmesi ve tekerlek yuvarlanma direncinin de bulunmasından ötürü güçlük arz etmektedir. Yol deneylerinde, aerodinamik direncin ölçülebilmesi için yuvarlanma direncinin bilinmesine gerek vardır. Yuvarlanma direncinin tespiti için Şekil 4.1 'deki gibi bir deney düzenlenebilir. Burada taşıt kendisini çevre havasından ayıran bir kutu içerisine geçirilir. İçteki kuvvetölçerler, direnç kuvvetini ölçerler (burada aerodinamik direnç bileşeni yoktur). Tekerlek yuvarlanma direnci ve mekanik sürtünme değerlerinin bilinmesi ile aerodinamik direnç kuvvetinin değeri, taşıt uzunluğu doğrultusundaki toplam direnç kuvvetinin ölçülmesi ile hesaplanabilir.

Bazı deneylerde toplam seyir kuvveti, seyir milindeki momentin ölçülmesi ile hesaplanmaktadır. Özel strain-gauge' ler mil üzerine yapıştırılmakta ve seyir momenti nedeniyle oluşan birim sekil değiştirme, sabit bir alıcıya manyetik olarak iletilmektedir.

Bu bilgi toplam seyir kuvvetinin ayarı için kullanılır. Tekerlek yuvarlanma direncinin, toplam seyir kuvvetinden çıkarılması ile aerodinamik direnç kuvveti bulunur.

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



Şekil 4.1: Deney taşıtı için hız-zaman diyagramı

Şekil 4.1 ’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 de tekerleklerin yuvarlanma direnci ile aerodinamik direnç kuvvetinin toplamına eşittir. Küçük bir zaman aralığı için, ivme değeri $\frac{\Delta V}{\Delta t}$'den hesaplanır. Bu ilkeden hareketle aşağıdaki denklemlerden toplam direnç kuvveti hesaplanır. Bu değerden tekerleklerin yuvarlanma direnci çıkarılır ve tekerleklerin dönüşünden ötürü oluşan atalet etkisi de hesaba katılır.

$$m.a = F \tag{4.1}$$

$$F = -m.\frac{\Delta V}{\Delta t} \tag{4.2}$$

Aerodinamik direnç katsayısı, (2.4) denkleminden hesaplanır. Burada dinamik basıncın ve dolayısıyla taşıt hızının bilinmesine gerek vardır. Bu ölçüm pitot tüpü ile yapılır. Ölçüm, taşıt nedeniyle akışta tedirginliklerin oluşmadığı bölgede (taşıttan yeterince uzak ön-yukarı bölgede) yapılmalıdır [10].

4.1.2. Aerodinamik Kaldırmanın Ölçülmesi

Yol deneylerinde, genelde kaldırma etkisi, aerodinamik yük nedeniyle süspansiyondaki sekil değişimi veya yer değişiminin ölçülmesi ile belirlenmektedir. Her bir tekerleğin süspansiyon yer değişimi ölçülüp, buna tekabül eden süspansiyon bileşenleri eşdeğer bir kaldırma değerine dönüştürülmektedir. Bu yöntemin faydalı yönü tekerleklerin yük dağılımının biliniyor olması, mahzurlu yönü ise tekerleklerin kendine ait kaldırma değerinin bilinmiyor olmasıdır. Ancak kıyaslama çalışmaları için iyi sonuç vermektedir.

Süspansiyondaki aerodinamik yük, yaylar üzerine yerleştirilmiş şekil değiştirme ölçen aletler ile veya optik seyir yüksekliğini ölçen aletler ile de ölçülebilmektedir.

4.1.3. Yüzey Basıncının Ölçülmesi

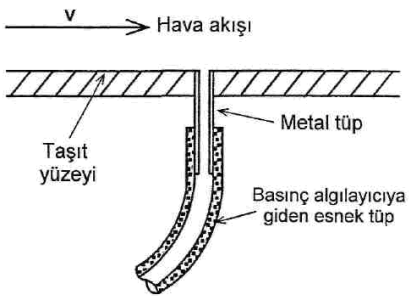
Şekil 4.2 ’de görüldüğü gibi yüzey basıncının ölçümü için taşıt yüzeyi üzerine küçük bir delik açılır ve burası bir basınç algılayıcıya bağlanır. Delik düz ve yüzeye dik olmalıdır. Bu yöntemle yerel statik basınç ölçülür. Buna tekabül eden basınç katsayısı C_p' nin hesabı için, dinamik basınç da gerekli olup, o da pitot tüpü ile

ölçülür. Statik basınç katsayısının matematiksel ifadesi denklem (4.3)'de verilmektedir.

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} \tag{4.3}$$

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

Yol deneylerindeki yüzey basıncı ölçümlerinde, 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.



Şekil 4.2: Taşıt yüzeyine yerleştirilen bir basınç alıcısının şematik görünümü

4.1.4. Akışın Görüntülenmesi

Taşıt yüzeyi üzerinden akış ayrılmalarının ve akış dolaşımlarının olduğu bölgeler ile akış yönünün tespiti için akışın görüntülenmesi yöntemleri kullanılır.

Akışın görüntülenmesi yöntemleri, taşıt yüzeyi üzerinde ve taşıtın üstündeki akışın görüntülenmesi olmak üzere başlıca iki kısma ayrılabilir. Birincisi için, akış yönü ile kolayca bükülebilen püsküller (bir ucundan yüzeye yapıştırılmış kısa pamuk veya yün iplikleri) sıkça kullanılır. Taşıt yüzeyine bitişik akış durumunda püsküller akış yönünde stabil olarak durmaktadır. Akış ayrılmalarının olduğu durumlarda ise püsküller hızlıca salınım yapmaya başlamakta ve beklenen akış yönüne uzak bir konum almaktadır.

Benzer bulgular, viskoz bir akışkanın (genellikle boya katilmiş yağlar) akım çizgilerinin gözlemlenmesi ile de elde edilebilir.

İkinci kısımda yer alan taşıt üstündeki (çevresindeki) akışın görüntülenmesi için, en çok rüzgâr tünellerinde taşıt üzerine yollanan dumanın akim çizgileri gözlemlenir. Şekil 4.3 'te duman çizgileri taşıt modeli önüne yerleştirilen tüplerle oluşturulmaktadır. Yol deneylerinde akışın görüntülenmesinin sonuçlan taşıt üzerine veya gözlemleyen bir başka araba üzerine yerleştirilmiş televizyon kamerası ile kaydedilir. Gözlemci bir araba kullanılması durumunda iki taşıt arasındaki etkileşim ve kameranın stabilizasyonu esas zorunluluğu oluşturmaktadır.



Şekil 4.3: Taşıt etrafindaki akışın rüzgâr tünelinde duman kullanılarak görüntülenmesi

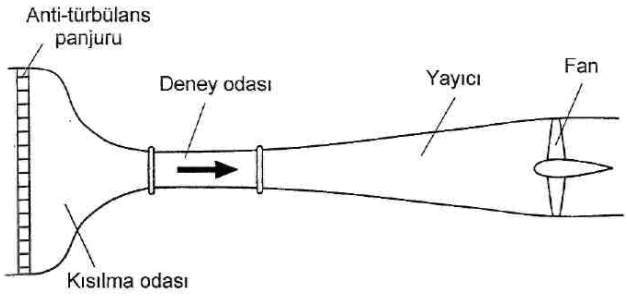
Ayrıntılı yol deneyleri, genel olarak rüzgâr tünelleri deneylerine göre daha pahalı olup, sadece taşıtın tam ölçekli modeli üzerinde deney imkânı mevcuttur. Bu nedenle, ayrıntılı aerodinamik yol deneyleri daha az popülerdir fakat birçok deney programında, kısmi aerodinamik deneyler sıkça uygulanabilmektedir. Birçok yol deneyinde aerodinamik yüklerin mutlak değerlerinin tam doğru olarak elde edilmesi zor olmakla beraber, artım (bağıl) değerlerinin elde edilmesi yeterince hassas olarak kabul edilmektedir.

4.2. Rüzgâr Tüneli Deneyleri

Rüzgâr tüneli deneyleri, gözlemci olarak uçan bir uçak veya hareketli bir araba kullanıp, bunlarla beraber ölçü aletlerini taşımaktansa; denenen 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.

4.2.1. Rüzgâr Tünelinin Yapısı

Rüzgâr tünelinin basit bir şeması Şekil 4.4 ’te verilmiştir. Burada fan havayı hareket ettirmektedir. Havanın yoğunluğu hemen hemen sabit olduğundan, denenen modelin yerleştirildiği en dar kesitte (deney odası), hava en yüksek hiza erişir. Deney odası dikdörtgensel, dairesel, oval veya benzer biçimlerde olabilir. Deney odasının önünde girişteki kısılma odası bulunup, akışı düzgünce, deney odasına yönlendirip, deney odasında uniform bir hız elde edilir.



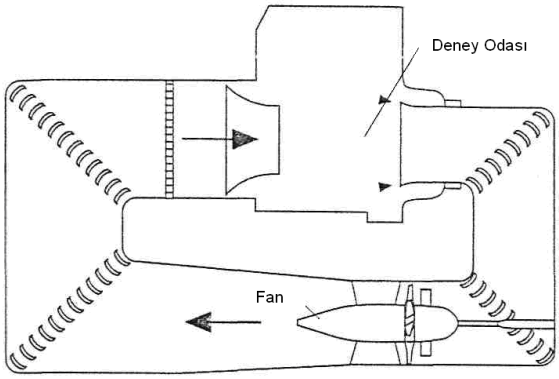
Şekil 4.4: Açık devreli bir rüzgâr tünelinin şematik görünümü

Girişte bulunan panjurun amacı dışarıdaki rüzgârın etkilerini azaltıp, iç akışı düzleştirmek ve olabildiğince uniform olmasını sağlamaktır. Deney odasının arkasında yer alan genişleme odasında (yayıcı), fana gelen akış hızı düşürülür.

Şekil 4 'teki rüzgâr tüneli açık devreli tiptir. Eğer fandan sonra bir geri dönüş kanalı bağlanırsa, kapalı devreli tip elde edilir (Şekil 4.5). Böylece havanın sahip olduğu momentum dışarı atılmamış olur ve fan sadece duvarlar ile modelin yarattığı sürtünmelere karşı iş yapar [10].

4.2.2. Rüzgâr Tünelinde Kullanılan Modeller

Tarihsel olarak binek taşıtlarının rüzgâr tünelindeki deneyleri küçük ölçekli modelleri üzerinde başlamıştır. Küçük ölçekli modelin faydası, tam ölçekliye oranla daha ucuz olması, kontrolünün kolay olması ve üzerine yapılacak değişikliklerin hızlıca yapılabilmesidir. Bunlara ilaveten, daha küçük tünellerin yeterli olması ile deneyin daha ucuza mal olmasıdır.



Şekil 4.5: Kapalı devreli rüzgâr tünelinin şematik görünümü

Günümüzde, eskiye oranla küçük ölçekli model deneyleri daha az uygulanmaktadır. Bunun başlıca iki sebebi vardır. Birincisi, küçük ölçekli modellerin deney sonuçları tam ölçekli modellerinki gibi yeterince hassas sonuç vermemektedir. Bu farklılık kısmen modeller arasındaki geometrik benzerliğin tam olmayışı, kısmen de Reynolds sayısının tahmin edilemeyen etkisinden kaynaklanmaktadır. Ancak model benzerliği esas sorun olmayıp, model yapıcısının hüneri ve dikkati ile alakalıdır. Reynolds sayısının farklılığı da, rüzgar tünelindeki türbülans derecesinin yapay olarak arttırılması ile giderilebilir. Bu sebeple, küçük ölçekli deneyler bazı taşıt üreticileri tarafından tekrar kullanılır hale gelmiştir.

İkinci sebep ise küçük ölçekli modelin aerodinamik olmayan yapısıdır. Taşıt dış tasarımı tam ölçek için yapılır çünkü küçük ölçekli modelin üzerinde şekiller yeterince estetik yapılamaz. Bu nedenle tam ölçekli model her zaman mevcut olup, eğer gerçekçi bir şasi üzerine inşa edilmişse, mesela evvelki yılın modeli üzerine, rüzgâr tüneli modeli olarak da kullanılabilir.

4.2.3. Rüzgâr Tüneli Deneylerinde Karşılaşılan Bazı Sorunlar

Karayolu taşıtları rüzgâr tünelinde denenirken baslıca iki sorun ortaya çıkar. Birincisi, taşıtın küt bir cisim olmasından ötürü tünelin deney odasında akışın önemli derecede rahatsız edilmesi; ikincisi de, taşıt ve yol arasındaki bağıl hareket ile dönen tekerleklerin canlandırılması çok zor olup, genelde ihmal edilmektedir. Ancak her iki sorunun üstesinden gelebilme konusunda önemli ilerlemeler kat edilmiştir.

4.2.4. Blokaj Sorunu

Taşıtın önden bakıştaki kesit alanının, tünel lülesinin çıkış kesit alanına oranına blokaj oranı denmektedir. Genel olarak %5'in altındaki blokaj oranlan, binek taşıtları

için uygun olarak kabul edilmektedir. Bu durumda tünelin deney odasının kesit alanı, tipik bir binek taşıtı için 40 m^2 civarında olmalıdır. Ancak Avrupa' da son yıllarda 25 m^2 değeri kullanılmaktadır.

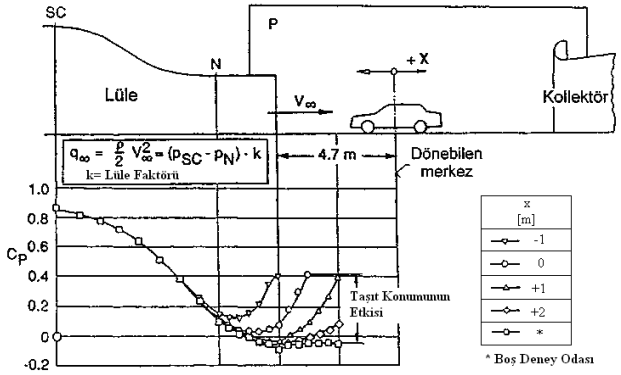
Deney odasının hava akışı sınırlarına göre üç farklı tünel tipi mevcuttur. Bunlar sırasıyla; kapalı deney odalı rüzgâr tüneli, açık deney odalı rüzgâr tüneli ve ilk ikisinin karması olan rüzgâr tüneli. İlk tipte taşıt üzerine yollanan hava jetinin etrafı duvarlar ile sınırlandırılmaktadır. İkincisinde taşıtın üzerinde bulunduğu zemin haricinde kalan diğer üç sınır açık olup daha hassastır. Üçüncü tipte ise sınır duvarlarında yarıklar mevcuttur.

Deney, açık deney odalı tünelde taşıtın küt seklinden ötürü üç şekilde etkilenmektedir:

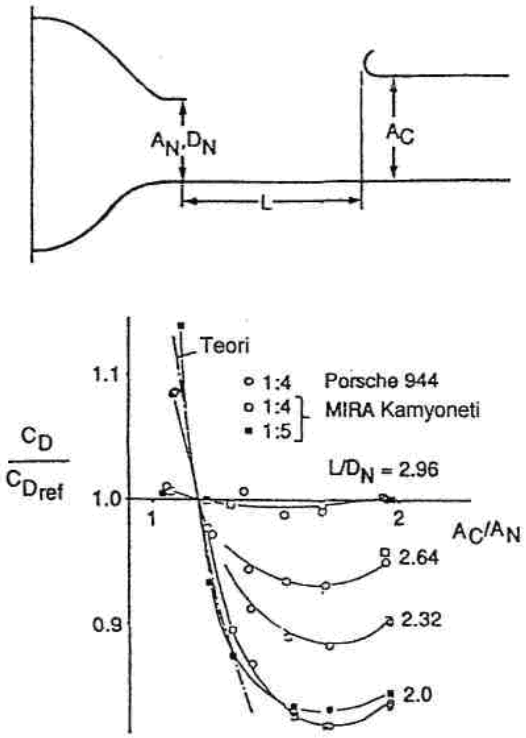
1. Rüzgâr hızının belirlenmesi hatalı olabilir. Eğer model lüle çıkısına çok yakın ise, modelin akışta oluşturduğu tedirginlik lüleye kadar uzanabilmekte ve lüle içerisindeki basınç alıcılarının olduğu yerlerde basınç değişmektedir (Şekil3.8).
2. Deney odası uzunluğunun (L) yeterli olmaması ve kollektor kesit alanının (*Ac*) lüle kesit alanına oranla çok küçük olması durumlarında, kollektöre olan akışta, tedirginlikler oluşabilmektedir.
3. Taşıt civarındaki akim çizgileri, sonsuz kesit alanlı hava akışına göre daha fazla açılmaktadır. Sonuç olarak, daha düşük bir C_D değeri oluşur. Sadece bu etki blokaj düzeltmesine tabii tutulur.

Açık deney odalı tünellerde, üçüncü etki için genel olarak geçerli olan bir blokaj düzeltmesi mevcut değildir. Ancak bu etkinin küçük olduğu kabulü yapılarak genelde ihmal edilir[8].

Kapalı deney odalı tünellerde yapılan deneylerde taşıt gövdesinin küt şekli öncelikli olarak blokaja neden olmaktadır. Açık deney odalı tünelin tersine burada akim çizgilerinin açılması, sonsuz genişlikli akıma göre daha azdır. Bu durum, sonsuz genişlikli akıma göre daha büyük bir C_D değeri oluşturur. Bu farklılık açık deney odalı tünele göre çok daha fazladır.



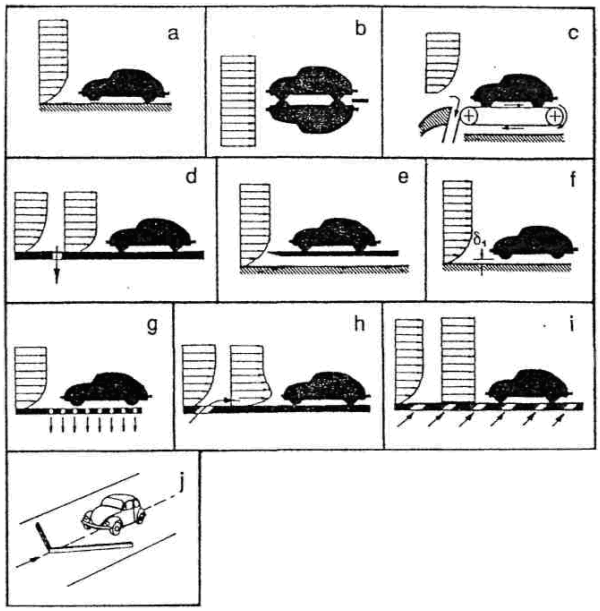
Şekil 4.6: BMW 10m^2 'lik akustik rüzgâr tünelinin lülesi içindeki zeminin simetri ekseni üzerindeki basınç dağılımı. Modelin lüle çıkışına çok yakın yerleştirilmesi durumunda, N konumundaki statik basınç yükselmektedir.



Şekil 4.7: Deney odası uzunluğu ile kollektör kesit alanının lüle kesit alanına oranının, ölçülen C_D değerine etkisi

4.2.5. Yolun Temsili ve Tekerleklerin Dönmesi Sorunu

Rüzgâr tünelinde yolun simülasyonu için, çeşitli yöntemler Şekil 4.8 'da gösterilmiş olup, uygulamada daha çok su dördü kullanılmaktadır: Sinir tabaka kontrolü olmayan durağan kati zemin (a), teğetsel üflemeli (b), sinir tabaka emmeli (d ve g), hareketli kayış ile sinir tabakanın emiliminin beraber kullanıldığı tüneller.



Şekil 4.8: Rüzgâr tünelinde yol simülasyonu için uygulanabilecek çeşitli yöntemler

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

Hareketli kayış kullanımı, yol simülasyonu için en iyi yöntem gibi gözükmektedir. Günümüzde, çok sayıda hareketli kayışın kullanıldığı rüzgâr tünelleri mevcut olup, buralarda genelde Formula 1 yarış arabaları ve kısmi ölçekli modeller denenmektedir. Ancak bu tünellerde, kayışın taşıt ağırlığını karşılayabilme sorunu vardır. Bu nedenle birçoğunda taşıt, kuvvet dengesi olacak şekilde düşey veya yatay duran bir desteğe asili olarak durmaktadır. Bu çubukların aerodinamik etkisi de göz önüne alınıp ayarlanmalıdır.

Hareketli kayış üzerindeki dönmeyen tekerlekler için kayış ve tekerlek arası boşluğa gerek olup, bu da C_D ve Q değerlerinde hata oluşumuna neden olur. Bu nedenle, bütün hareketli kayışın kullanıldığı tünellerde, tekerlekler kayışa temas halinde olup tekerlekler döndürülmektedir. Dönen tekerlekler, dönmeyen olanına göre C_D değerini biraz Q değerini önemli derecede arttırırlar.

Sekil 3.11'den görüldüğü üzere sabit zemin üzerinde teğetsel üfleme yöntemi, hareketli zemin simülasyonuna yakindir. Tekerleklerin dönüşü için, özel tekerlek altlıkları kullanılır. Minyatür kayış veya her bir tekerlek altına tambur konularak uygun çözümler elde edilebilir.

Bazı sabit zeminli rüzgâr tünellerinde, sınır tabaka emilimi uygulanmaktadır. Hava, lüle çıkısında 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. Ancak, nereden ne miktarda emme yapılması gerektiği tam olarak kesin değildir. Teğetsel üfleme durumunda ise üfleme debisi, bos tünelde taşıt ön tekerleklerinin bulunacağı yerde sıfır kalınlıklı sınır tabaka oluşturacak şekilde, deneysel olarak belirlenmekte ve elde edilen sonuçlar, hareketli kayış halindeki ile oldukça iyi uyuşmaktadır [8].

5. SAYISAL YÖNTEMLER

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) aerodinamik özelliklerin belirlenmesinde güçlü bir araç haline gelmektedir. Sayısal algoritmalardaki gelişmeler, geometrik modellemeler, ağ oluşturma yöntemleri ve bilgisayarlardaki gelişmeler buna olanak sağlamaktadır.

Geometrik modelin bilgisayar ortamında oluşturulması gerçeğini veya ölçekli modelini üretmeye göre daha kolay olduğundan ve taşıt üzerine yapılacak kısmi değişikliklerin de rüzgâr tünelinde denenen modelin üzerinde değişiklikler yapmaya göre daha kolay ve hızlı olduğundan süre açısından avantalar sağladığı ortadadır. Yapılan hesaplama ile bu tür değişikliklerin ne tur etkiler yaratacağı hakkında hızlı bir biçimde bilgi sahibi olunabilir. HAD ile taşıt yüzeyi ve üzerindeki havanın hız ve basınç dağılımı ayrıntılı bir biçimde elde edilir.

Günümüzde HAD ile akışkan davranışlarını yöneten akış denklemlerinde geçmişteki gibi çok fazla basitleştirmeler yapmadan çözüme ulaşılabilmektedir.

HAD yöntemlerinin günümüzde deneysel yöntemlere göre tamamen tercih edilebilir olabilmesi için HAD yöntemlerinin akış alanını yeterli olarak çözebilmesi, kısa sürede anlamlı sonuçlar verebilmesi ve maliyetinin de düşük olması gerekmektedir. Bunun yanında alınan sonuçların da güvenilir olabilmesi gerekmektedir.

HAD yöntemlerinin güvenilirliğini sınırlayan etmenler; akış alanını yöneten denklemlerin uygunluğu, düzgünleştirmeler ve yakınsama hızlandırıcıları gibi algoritmalar, olay fiziğini tam anlamıyla yansıtamayan ağ çözünürlüğü, türbülanslı akış gibi olayın çözümü ile ilgili anlaşılamayan parametrelerdir. Bu etmenler HAD yönteminin güvenirliğini kanıtlaması gereken alanlardır[12].

5.1. Yöneten Denklemler

Akışkan akışı, ısı transferi, kütle transferi, türbülans ve bunlarla ilgili olaylar; kütle, enerji momentum ve kimyasal türlerin korunumu prensipleri ile yönetilir. Bu prensipler kısmi diferansiyel denklemler şeklinde ifade edilip, bunların genel bir

sekli de mevcuttur. Çözüme gitmek için sayısal yöntem, bağımlı değişken ϕ için yazılmış genel diferansiyel denklem üzerinde uygulanmaktadır.

Diferansiyel denklemler burada kartezyen koordinatlarda ifade edilmektedir. Üç uzaysal koordinat *x, y, z* (veya x_i,) olarak ve buna tekabül eden hız bileşenleri de *u, v, w* (veya u_i,) olarak gösterilmektedir.

5.1.1. Momentum Korunumu Denklemi

Newton akışkanı için j yönündeki momentum korunumu aşağıdaki biçimde ifade edilir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \frac{\partial p}{\partial x_j} + B_j + V_j \tag{5.1}$$

Burada μ viskoziteyi, p basıncı, B_j j yöndeki birim hacme gelen kütle kuvvetini göstermektedir. V_j ise denklemin sağ tarafındaki ilk terimin dışında kalan viskoz terimleri içerir.

5.1.2. Genel Diferansiyel Denklem

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i}) + S \tag{5.2}$$

Yukarıdaki denklemdeϕ genel bağımlı değişken olup genel halde, $\phi = \phi(x, y, z, t)$ şeklinde ifade edilir. Γ genel difüzyon katsayısını S ise kaynak terimini göstermektedir. Yukarıdaki denklem ayrıklaştırılmış formda ifade edilirse;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + div(\rho u \phi) = div(\Gamma grad\phi) + S_\phi \tag{5.3}$$

Denklemdeki dört terim sırasıyla zamana bağlı terim, konveksiyon terimi, difüzyon terimi ve kaynak terimidir. Yukarda ifade edilen akış denklemleri akışın laminer hali

5.1.3. Türbülans Modelleri

Türbülanslı akışlar çalkantılı bir hız alanına sahip olup, taşınım denklemlerindeki bütün özellikler bu durumdan etkilenmektedir. Bu çalkantılar küçük ölçekli ve yüksek frekanslı olduklarından bunların doğrudan çözümü oldukça zordur. Bunun

yerine yöneten denklemler akış özelliklerinin zamansal veya Reynolds ortalaması cinsinden yazılarak bulunur.

Türbülans modellemeleri için genel diferansiyel denklemde ifade edilen ϕ değişkeni iki bileşenli olarak yazılır. Bunlar ortalama akış bileşeni $\bar{\phi}$ ve zamana bağlı salınım (çalkantı) bileşeni ϕ''dir.

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \tag{5.4}$$

$$u = \bar{u} + u' \tag{5.5}$$

Akış özellikleri yukarda yazılan şekliyle daimi olmayan (zamana bağlı) süreklilik ve momentum denklemlerine yerleştirilip, istatiksel ortalaması alınırsa, istatiksel ortalamalı momentum denklemleri elde edilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{5.6}$$

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial ui}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\overline{\rho u_i' u_j'}\right) \tag{5.7}$$

Yukarıdaki denklemlere Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemleri denir. Burada denklemin sonuna yeni bir terim (Reynolds gerilmeleri) gelmiştir.

Reynolds gerilmeleri ile ortalama akış gradyenlerini ilişkilendirmek amacıyla Boussinesq yaklaşımı kullanılmakta olup, aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)$$

5.1.3.1. Standart k-ε Modeli

Standart k-ε modeli türbülans kinetik enerjisi k ve türbülans kinetik enerjisi harcanma hızı ε 'a dayalı yarı deneysel bir modeldir. Modelde kullanılan taşınım denklemleri aşağıda verilmiştir:

Türbülans Kinetik Enerjisi:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\rho u_j k-\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]= \\ \mu_t(P+P_B)-\rho\varepsilon-\frac{2}{3}\left(\mu_t\frac{\partial u_i}{\partial x_i}+\rho k\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_i}+\mu_t P_{NL} \tag{5.8}$$

Burada,

$$P=S_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{5.9}$$

$$P_B=-\frac{g_i}{\sigma_{h,t}}\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial x_i} \tag{5.10}$$

$$P_{NL}=-\frac{\rho}{\mu_t}\overline{u_i'u_j'}\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\left[P-\frac{2}{3}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i}+\frac{\rho k}{\mu_t}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right] \tag{5.11}$$

Lineer modeller için $P_{NL}=0$ 'dır ve burada σ_k türbülanslı Prandtl sayısıdır.(5.4) denkleminde sağ taraftaki ilk terim kayma gerilmeleri ve normal gerilmeler dolayısıyla oluşan türbülansı ve havanın kaldırma kuvvetlerini; ikinci terim viskoz harcanma hızını; üçüncü terim sıkıştırtabilme etkilerini ve son terim ise lineer olmayan durumlarla ilgilidir.

Türbülans Harcanma Hızı:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\rho u_j\varepsilon-\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]= \\ C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}\left[\mu_t P-\frac{2}{3}\left(\mu_t\frac{\partial u_i}{\partial x_i}+\rho k\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right]+C_{\varepsilon 3}\frac{\varepsilon}{k}\mu t P_B)- \\ C_{\varepsilon 2}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+C_{\varepsilon 4}\rho\varepsilon\frac{\partial u_i}{\partial x_i}+C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}\mu_t P_{NL} \tag{5.12}$$

Burada σ_ε türbülans Prandtl sayısı ve $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, $C_{\varepsilon 3}$, $C_{\varepsilon 4}$ katsayılardır. Türbülans viskozitesi aşağıdaki bağıntıyla ifade edilmektedir:

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \tag{5.13}$$

Aşağıdaki tabloda standart k-ε modelinde kullanılan katsayılar görülmektedir.

Tablo 5.1: k-e türbülans modelinde kullanılan katsayılar

C_μ	σ_k	σ_ε	σ_h	σ_m	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	$C_{\varepsilon 4}$	κ	E
0,09	1,0	1,22	0,9	0,9	1,44	1,92	0 veya 1,44	-0,33	0,419	9,0

5.1.3.2. RNG k-ε Modeli

RNG k-ε Modeli, daimi olmayan Navier-Stokes denklemlerinden renormalizasyon denilen matematiksel teknikle türetilmiştir. Standart k-ε modelinde tek türbülans büyüklük oranı kullanılabilirken RNG modelinde farklı oranlar modellenebilir.

Türbülans Kinetik Enerjisi:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\rho u_j k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] = \mu_t (P + P_B) - \rho\varepsilon - \frac{2}{3}\left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \tag{5.14}$$

Türbülans Harcanma Hızı:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\rho u_j \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] = C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}\left[\mu_t P - \frac{2}{3}\left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right] + C_{\varepsilon 3}\frac{\varepsilon}{k}\mu t P_B - C_{\varepsilon 2}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 4}\rho\varepsilon\frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \frac{C\mu\eta^3(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}\frac{\rho\varepsilon^2}{k} \tag{5.15}$$

Burada $\eta = S\frac{k}{\varepsilon}$

Ve η_0, β deneye dayalı katsayılardır. RNG k-ε türbülans modelinde kullanılan katsayılar aşağıdaki tabloda görülmektedir.

Tablo 5.2: RNG k-e türbülans modelinde kullanılan katsayılar

C_μ	σ_k	σ_ε	σ_h	σ_m	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	$C_{\varepsilon 4}$	κ	E	η_0	β
0,085	0,719	0,719	0,9	0,9	1,42	1,68	0 veya 1,42*	-0,387	0,4	9	4,38	0,012

5.1.3.3. k-ω Türbülans Modeli

k-ω türbülans modeli iki denklemli bir modeldir. Burada k türbülans kinetik enerjisini ifade ederken, ω birim türbülans kinetik enerjisi için özgü harcanma oranıdır.

Türbülans Viskozitesi:

$$\upsilon_T = \frac{k}{\omega} \tag{5.16}$$

Türbülans Kinetik Enerjisi:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* k\omega + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\upsilon + \sigma^* \upsilon_T)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \tag{5.17}$$

Özgül Harcanma Hızı:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial w}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta\omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\upsilon + \sigma_\omega \upsilon_T)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] \tag{5.18}$$

* $P_B>0$ ise $C_{\varepsilon 3}=1,42$ olarak kullanılır. Aksi taktirde $C_{\varepsilon 3}=0$ 'dır

Tablo 5.3: k-ω türbülans modelinde kullanılan katsayılar

α	β	β^*	σ	σ^*	ε
5/9	3/40	9/100	½	1/2	$\beta^*\omega k$

5.1.3.4. SST(Menter) k-ω Modeli

Standart k-ω modeline ek olarak k-ω türbülans modellerinin serbest hava akımı/hız giriş şartlarındaki duyarlılığını azaltıcı düzenlemeler yapılmış halidir. Bu düzenlemeyle birlikte bu tür sınır şartlarında k-ε modeli gibi davranmaktadır.

Türbülans viskozitesi:

$$\upsilon_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1, \omega, \Omega F_2)} \tag{5.19}$$

Türbülans Kinetik Enerjisi:

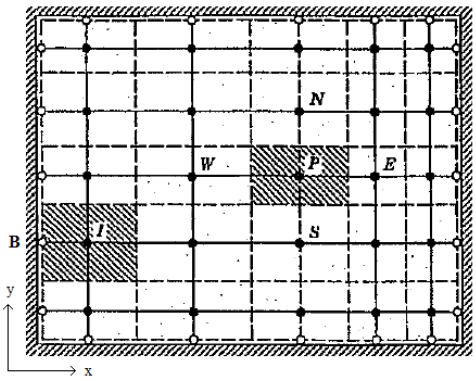
$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k\omega + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\upsilon + \sigma_k \upsilon_T)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \tag{5.20}$$

Özgül Harcanma Hızı:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial w}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta\omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\upsilon + \sigma_\omega \upsilon_T)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] + 2(1 - F_1)\sigma_{\omega 2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial \omega}{\partial x_i} \tag{5.21}$$

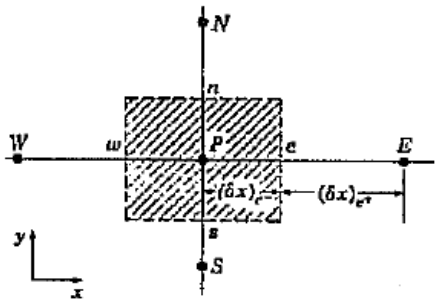
5.2. Hesap Alanının Ayrıklaştırılması Ve Ayrıklaştırma Denklemleri

Yapılan çalışmada kullanılan sayısal yöntemde kontrol hacimleri yöntemi kullanılmaktadır. Kontrol hacimleri yönteminde hesaplanacak çözüm bölgesi çözüm ağını oluşturan sonlu sayıda kontrol hacmine bölünmektedir. Akışı kontrol eden denklemlerin ayrıklaştırılmış şekilleri çözüm ağını oluşturan her bir kontrol hacmine uygulanmaktadır. Kontrol hacimlerinin her bir noktasında (düğüm noktaları) hız ve basınç değerleri hesaplanmaktadır.



Şekil 5.1: İki boyutlu bir hesap alanı için ağ sistemi ve kontrol hacimleri

Şekil 5.1' de dörtgensel elemanlı kontrol hacimlerinden oluşan iki boyutlu bir çözüm alanı görülmektedir. Şekilde kesikli çizgiler kontrol hacminin yüzeylerini, koyu kesiksiz çizgiler ise ağ çizgilerini göstermektedir.



Şekil 5.2: Tipik bir kontrol hacminin görünümü

Tipik bir kontrol hacminin görünümü Şekil 5.2 'de görülmektedir. Merkezdeki P noktası çevresindeki dört E(doğu), S (güney), W (batı) ve N (kuzey) noktalarıyla komşuluk içindedir.

Genel diferansiyel denklemin kontrol hacmi üzerindeki integrasyonu için konveksiyon ve difüzyon akılarını beraber almak gerekir. J_i, i yönündeki toplam akı olmak üzere;

$$J_i = \rho u_i \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \tag{5.22}$$

(5.2) denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\partial \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial J_i}{\partial x_i} = S \tag{5.23}$$

e, w,n ve kontrol hacminin yüzeylerini göstermek üzere denklemin kontrol hacmi üzerindeki integrasyonu aşağıdaki ifadeyi verir.

$$(\rho_P\phi_P - \rho_P^0\phi_P^0)(\frac{\Delta V}{\Delta t}) + J_e A_e - J_w A_w + J_n A_n - J_s A_s + J_t A_t - J_b A_b = \overline{S}\Delta V \qquad (5.24)$$

0 üssü, p ve ϕ' nin t anındaki bilinen değerlerini; üssü bulunmayan değerler $t+\Delta t$ anındaki değerlerini gösterir. ΔV kontrol hacminin hacmini, A 'lar kontrol hacminin yüzeylerin alanları, S' de kaynak terimini göstermektedir.

5.2.1. Toplam Akı Değerinin Gösterimi

Kontrol hacminin doğu yönündeki toplam akı ele alınsın. P ve E noktaları arasında 1 boyutlu konveksiyon-difüzyon problemi çözülmekte ise, kesin analitik çözüm olarak ekponansiyel profile sahip ϕ eğrisi elde edilir. Bu profilden elde edilen toplam akı aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$J_e A_e = F_e(\phi_P + \frac{\phi_P - \phi_E}{\exp(Pe_e) - 1}) \qquad (5.25)$$

Peclet sayısı P_e boyutsuz bir büyüklük olup konveksiyon ile iletimin difüzyon ile iletime oranıdır.

$$Pe = \frac{F_e}{D_e} \qquad (5.26)$$

F_e, e yüzeyinden geçen kütlesel debi; D_e de difüzyon iletimidir. Eğer Γ her bir kontrol hacmi için uniform ise;

$$F_e = (\rho u)_e A_e \qquad (5.27)$$

$$D_e = A_e\left[\frac{(\delta x)_{e-}}{\Gamma_P} + \frac{(\delta x)_{e+}}{\Gamma_E}\right]^{-1} \qquad (5.28)$$

Şeklinde tanımlanır.

(5.19) denkleminde verilen akı denklemi sayısal yöntemin formüle edilmesinde kullanılır. Ancak içeriğindeki ekponansiyel fonksiyonun hesabı oldukça zor olduğundan akı ifadesinin hesabı için belli yaklaşımlar kullanılır.

$$J_e A_e = F_e \phi_e + \left\{ D_e A(|Pe_e|) + \|- F_e, 0\| \right\} (\phi_P - \phi_E) \tag{5.29}$$

(5.232) denklemindeki $A(Pe)$ fonksiyonunun hesabı için çeşitli yaklaşımlar Tablo 5.4 'da gösterilmektedir.

Tablo 5.4: A(Pe) fonksiyonunun hesabı için kullanılan çeşitli yaklaşımlar

Yöntem Adı	**Matematiksel formülasyon**
Merkezsel farklar	$1 - 0{,}5\|Pe\|$
Öne doğru farklar	1
Hibrid	$\|0{,}1 - 0{,}5\|Pe\|\|$
Üstel	$\|0, (1 - 0{,}1\|Pe\|)^5\|$
Eksponansiyel (analitik)	$\dfrac{\|Pe\|}{[\exp(\|Pe\|) - 1]}$

Buradaki $\|a, b\|$ ifadesinde a ve b' den büyük olanı kullanılmaktadır.

Kaynak terimi S, ϕ ' nin kendisine bağlı olabilir. Eğer bu bağımlılık lineer değilse kaynak terimi ϕ_P ' nin lineer fonksiyonu olarak ifade edilir.

$$\overline{S} = S_C + S_P \phi_P \tag{5.30}$$

Burada S_P negatif olmalıdır.

5.2.2. Süreklilik Denkleminin Ayrıklaştırılması

Akış alanını çözümlemek için kullanılan taşınım denklemleri süreklilik denklemini de sağlamalıdır. Kontrol hacminin yüzeylerinden geçen akış debisi, süreklilik

denkleminin ayrıklaştırılmış halini sağlamalıdır. Süreklilik denkleminin kontrol hacmi üzerindeki integrasyonu aşağıdaki ifadeyi verir:

$$(\rho_P - \rho_P^0)\frac{\Delta V}{\Delta t} + F_e - F_w + F_n - Fs + F_t - F_b = 0 \tag{5.31}$$

5.2.3. Ayrıklaştırma Denkleminin Son Hali

Toplam akı terimleri ve kaynak terimi (5.18) denklemine yerleştirildiğinde (5.26) denklemi elde edilmektedir.

$$a_P\phi_P = a_E\phi_E + a_W\phi_W + a_N\phi_N + a_S\phi_S + a_T\phi_T + a_B\phi_B + b \tag{5.32}$$

$$a_E = D_e A(|Pe_e|) + \|F_e, 0\| \tag{5.33}$$

$$a_W = D_w A(|Pe_w|) + \|F_w, 0\| \tag{5.34}$$

$$a_N = D_n A(|Pe_n|) + \|F_n, 0\| \tag{5.35}$$

$$a_S = D_s A(|Pe_s|) + \|F_s, 0\| \tag{5.36}$$

$$a_T = D_t A(|Pe_t|) + \|F_t, 0\| \tag{5.37}$$

$$a_B = D_b A(|Pe_b|) + \|F_b, 0\| \tag{5.38}$$

$$b = S_C \Delta V + a_P^0 \phi_P^0 \tag{5.39}$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_T + a_B + a_P^0 - S_P \Delta V \tag{5.40}$$

a_P^0 katsayısı zamana bağlı terimden ötürü oluşup değeri:

$$a_P^0 = \rho_P^0 \frac{\Delta V}{\Delta t} \tag{5.41}$$

(5.26) denklemi daha kompakt olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$a_P \phi_P = \sum a_{nb} \phi_{nb} + b \tag{5.42}$$

5.2.4. Sınır Şartları

Sınırda bulunan ϕ_B değeri ya doğrudan verilir ya da verile sınır akısı değeri üzerinden hesaplanır.

5.2.5. Ayrıklaştırma Denklemlerinin Çözümü

Kontrol hacmi denklemleri iç düğüm noktalarındaki bilinmeyen ϕ değerlerine bağlı simültane lineer denklem takımı oluşturmaktadır. Bu denklem takımı 1-boyutlu durumda Gauss eliminasyon yöntemi ve bunun neticesinde oluşan Thomas algoritmasıyla kolayca çözülebilmektedir. Ancak 2 ve 3-boyutlu durumlarda direkt yöntemlerle güçlü bilgisayarlara ve uzun hesaplama sürelerine ihtiyaç duyulduğundan iteratif yöntemler daha elverişlidir. İteratif yöntem olarak çizgi-çizgi tekniği ile blok düzeltme metodu beraber kullanılabilmektedir.

5.2.6. Yakınsama Katsayıları

(5.36) denklemi aşağıdaki biçimde de yazılabilir.

$$\phi_P = \phi_P^* + \left[\frac{\sum a_{nb} + b}{a_P} - \phi_P^* \right] \tag{5.43}$$

Burada ϕ_P^*, ϕ_P' nin bir önceki iterasyondaki değeri, köşeli parantez içindeki terimler ise ϕ_P' nin içinde bulunan iterasyondaki değerini ifade etmektedir. İki iterasyon arasındaki değişim miktarını azaltmak için yakınsama katsayısı $\alpha (0 < \alpha < 1)$ kullanılmaktadır. α değeri sıfıra yakın bir değerse ϕ' nin değişimi çok yavaş olur.

$$\phi_P = \phi_P^* + \alpha \left[\frac{\sum a_{nb} + b}{a_P} - \phi_P^* \right] \tag{5.44}$$

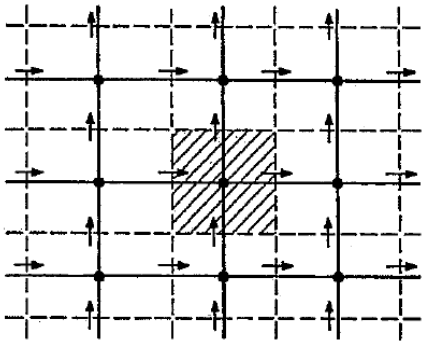
5.2.7. Akış Hesabı

Yukarıda genel diferansiyel denklem, akış alanı ρu_i'nin bilinmesi hali için ayrıklaştırma denklemine dönüştürülmüştü. Ancak momentum denklemleri genel diferansiyel denklemin özel bir hali olmasına rağmen, önemli bir kaynak terimi

olarak basınç gradyeni $\partial p / \partial x_j$ içermekte ve bu terim hız bileşenleri u, v, w ile ifade edilememektir. Basınç gradyeni bilinmedikçe momentum denklemleri çözülemez.

Basınç alanı dolaylı olarak süreklilik denklemi tarafından belirlenebilmektedir. Fakat bu dolaylı belirleme sayısal çözümlemede kullanışlı değildir. Ayrıca hız bileşenleri ve basınç aynı düğüm noktasında hesaplanıyorsa gerçekçi olmayan çözümler elde edilebilir. Bu durumu engellemek için kaymalı ağ sistemi kullanılır(

Şekil 5.3). Hız bileşenleri kontrol hacimlerinin yüzeylerinde buralara dik olacak biçimde yerleştirilir. Basınç ve diğer bağımlı değişkenler kontrol hacimlerinin merkezindeki düğüm noktalarında hesaplanır.



Şekil 5.3: Kaymalı ağ sistemi ve kontrol hacimlerinin genel görünümü

$$a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b + A_e (p_P - p_E) \tag{5.45}$$

b basınç gradyeni dışındaki kaynak terimlerini, A_e basınç kuvvetinin etkidiği yüzeyi gösterir. Momentum denklemlerinin çözümü için SIMPLE algoritması kullanılabilir[15].

5.2.8. Ayrıklaştırma Denklemlerinin Hassasiyeti

Yöneten denklemlerdeki $\partial\phi / \partial x$ ve $\partial\phi / \partial y$ gradyen terimlerinin hesabında kullanılan terimler Taylor serisinin açılımından elde edilip, ayrıklaştırma denklemleri oluşturulmaktadır. Ayrıklaştırma denklemlerinin hassasiyetleri ayrıklaştırma mertebeleri ile belirlenir.

5.2.8.1. Birinci Mertebeden Ayrıklaştırma

$\phi(x)$ Fonksiyonu için, $\phi(x + \Delta x)$' in i noktası civarında x' de Taylor serisine açılımı (5.40) denklemindeki gibidir.

$$\phi(x+\Delta x)=\phi(x)+(\frac{\partial\phi}{\partial x})_x\Delta x+(\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2})_P\frac{\Delta x^2}{2}+... \quad (5.46)$$

Burada $\phi(x)$ ve $\phi(x+\Delta x)$ için yukarıdaki kısımlarda kullanılan ϕ_P ve ϕ_E ayrıklaştırma değerleri kullanılarak (5.40) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\phi_E=\phi_P+(\frac{\partial\phi}{\partial x})_P\Delta x+(\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2})_P\frac{\Delta x^2}{2}+... \quad (5.47)$$

(5.41) denklemi yeniden düzenlenerek aşağıdaki ifade elde edilir.

$$(\frac{\partial\phi}{\partial x})_P\Delta x=\phi_E-\phi_P-(\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2})_P\frac{\Delta x^2}{2}-... \quad (5.48)$$

$$(\frac{\partial\phi}{\partial x})_P=\frac{\phi_E-\phi_P}{\Delta x}-(\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2})_P\frac{\Delta x}{2}-... \quad (5.49)$$

Δx çarpanını ihtiva eden terimlerin ihmal edilmesiyle (5.43) ifadesi aşağıdaki gibi yazılır:

$$(\frac{\partial\phi}{\partial x})_P\approx\frac{\phi_E-\phi_P}{\Delta x}. \quad (5.50)$$

(5.44) denkleminde kesilen terimlerin ihmaliyle oluşan hata Δx'in küçültülmesiyle (ağ sisteminin iyileştirilmesi) sağlanabilir. Genel olarak sonlu fark ifadelerinde bulunan Δx^n terimindeki *n* üssü Δx' li hata değerinin ne oranda sıfıra yaklaştığını kontrol ettiğinden, buradaki n üssüne sonlu fark yaklaşımının mertebesi denilmektedir. Bu şekilde (5.44) denklemi birinci mertebeden olu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$(\frac{\partial\phi}{\partial x})_P=\frac{\phi_E-\phi_P}{\Delta x}.+0(\Delta x) \quad (5.51)$$

(5.45) ifadesinde $\partial\phi/\partial x$ gradyen teriminin hesabında *E* ve *P* noktaları kullanıldığından (Şekil 5.1 'deki $x_E>x_P$) bu denkleme *P* noktasına göre ileriye dönük fark formülü denilmektedir. Benzer biçimde *P* noktasındaki $\partial\phi/\partial x$ gradyen

teriminin hesabı için geriye dönük fark formülü olan (5.47) denklemi, (5.46) denkleminin yazılmasıyla oluşturulur.

$$\phi(x-\Delta x)=\phi(x)-(\frac{\partial\phi}{\partial x})_x\Delta x+(\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2})_x\frac{\Delta x^2}{2}+... \tag{5.52}$$

$$(\frac{\partial\phi}{\partial x})_P=\frac{\phi_p-\phi_W}{\Delta x}.+0(\Delta x) \tag{5.53}$$

(5.45) ve (5.47) denklemleri her ikisi de birinci mertebe hassasiyetinde olup, her ikisinde de ϕ değeri iki noktada tanımlıdır.

5.2.8.2. İkinci Mertebeden Ayrıklaştırma

(5.39) denkleminden (5.46) denkleminin çıkartılması ile $(\partial\phi/\partial x)_P$ için (5.49) denklemi elde edilir.

$$\phi(x+\Delta x)-\phi(x-\Delta x)=2(\frac{\partial\phi}{\partial x})_x\Delta x+(\frac{\partial^3\phi}{\partial x^3})_x\frac{\Delta x^3}{3!}+... \tag{5.54}$$

$$(\frac{\partial\phi}{\partial x})_P=\frac{\phi_p-\phi_W}{2\Delta x}.+0(\Delta x^2) \tag{5.55}$$

(5.43) denkleminde kullanılan E ve W noktaları, aralarında bulunan P noktasındaki gradyen değerini hesaplamada kullanıldığından, bu denkleme merkezsel fark formülü denmekte olup ikinci mertebe hassasiyettedir. Δx değerine olan karesel bağımlılık nedeniyle, ağ sisteminin iyileştirilmesi durumunda oluşan hata değeri, birinci mertebe birinci mertebe yaklaşıma göre daha az olacaktır.

Bölüm 5.2 ‘de sonlu hacimler ayrıklaştırmasında kullanılan kontrol hacminin e yüzeyindeki gradyen teriminin hesabı (5.50) denklemindeki gibidir.

$$(\frac{\partial\phi}{\partial x})_e=\frac{\phi_E-\phi_P}{\Delta x}.=\frac{\phi_E-\phi_P}{2(\Delta x/2)} \tag{5.56}$$

Burada e noktası E ve P noktalarının orta noktası olup merkezsel fark yöntemi kullanılmakta ve hassasiyet ikinci mertebedendir.

5.2.9. Birinci ve İkinci Mertebe Ayrıklaştırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması

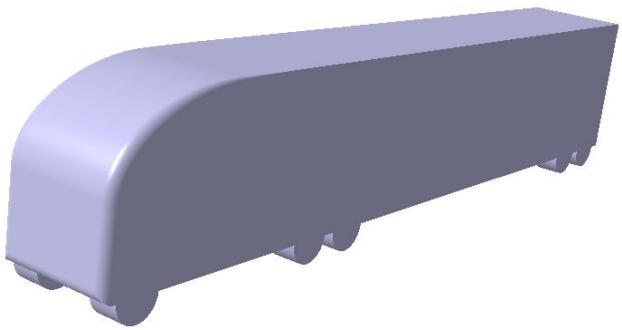
Dikdörtgen bir kanal içerisindeki laminer akışta olduğu gibi akışın, eleman ağı tarafından düzenli olarak temsil edilebildiği akışlar için Birinci Mertebeden Ayrıklaştırma yöntemi kullanılması kabul edilebilir. Ancak akışın eleman ağı tarafından tam anlamıyla temsil edilemediği akışlar için birinci mertebeden konvektif ayrıklaştırma sayısal ayrıklaştırma hatasını arttıracaktır. Kurulan sayısal modelde kullanılan elemanların üçgensel ya da tetrahedral kullanılması gibi durumlarda akışın eleman ağı tarafından yeterli olarak temsil edilememesi dolayısıyla bu tarz modellerde daha gerçekli sonuçlar elde edilebilmesi için İkinci Mertebeden Ayrıklaştırma yöntemi kullanılır.

6. BİR AĞIR VASITA TAŞIT MODELİNİN AERODİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN HAD İLE BELİRLENMESİ

Çalışmada basitleştirilmiş bir ağır vasıta geometrisi incelenmiştir. Geometri 1996 yılında Sandia Ulusal Laboratuarlarında geliştirilerek üzerinde deneysel ve HAD çalışmaları yapılmıştır. Çalışmada GTS geometrisinin kullanılmasının sebebi yapılan HAD çalışmasının sonuçlarının, Sandia Ulusal Laboratuarlarında yapılan deneysel çalışmanın sonuçlarıyla doğrulanması hedefidir. Böylelikle çalışmadaki sonlu eleman modelinin gerçek koşulları yansıtabilme miktarı bulunmuş olacaktır.

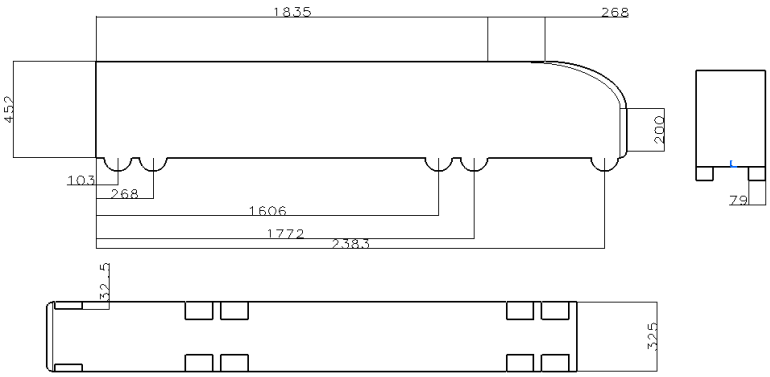
6.1. Çalışmada İncelenen Geometri

Ağır vasıta taşıtının etrafındaki akışın HAD yöntemiyle incelenebilmesi için geometrinin Catia V5R15 yazılımında katı modeli oluşturulmuştur.



Şekil 6.1: Çalışmada kullanılan kamyon geometrisi katı modeli

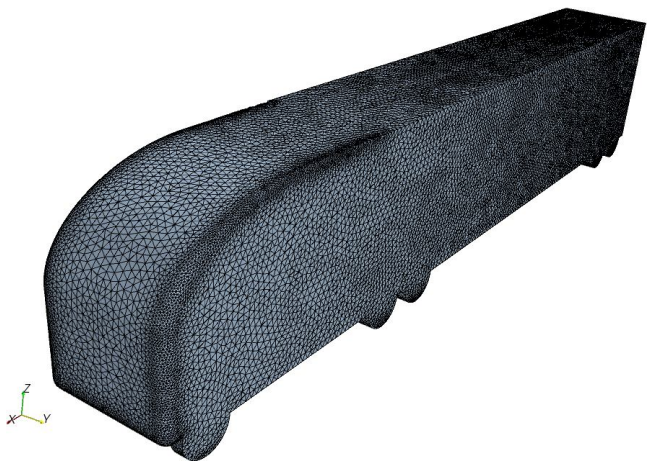
Model gerçek taşıt modelinin 1/8 boyutlarında hazırlanmıştır. Geometrinin boyutları 960906 makalelerinden alınmıştır. Şekil 6.2 'de kullanılan 1/8 boyutlu geometrinin ölçüleri görülmektedir.



Şekil 6.2: 1/8 ölçekli modelin boyutları

6.2. Geometrinin Sonlu Eleman Modeli

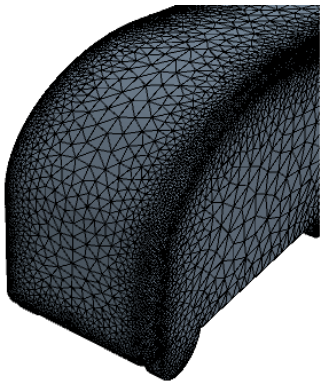
Katı modeli oluşturulan araç geometrisi üzerindeki akış koşullarının sonlu eleman yöntemiyle incelenebilmesi için öncelikle yüzeydeki sonlu eleman ağı oluşturulmuştur.



Şekil 6.3: Geometri yüzey sonlu eleman modeli

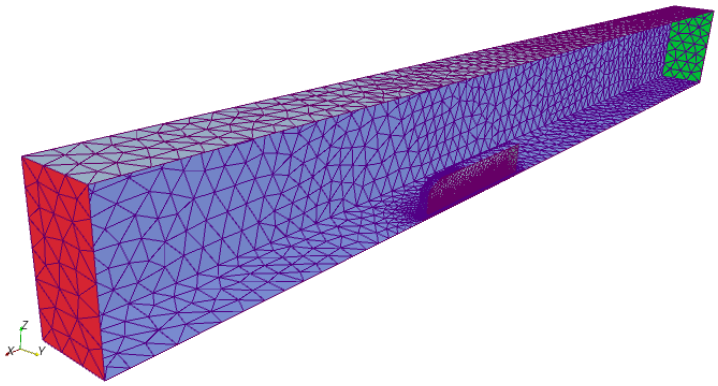
Araç yüzeyindeki sonlu eleman modeli kurulurken yüzeye üçgen eleman ağı kurulmuştur. Sonlu eleman modeli kurulurken bu geometrinin üçgen elemanlarla doğru olarak temsil edilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla seçilen üçgen elemanların büyüklüklerinin küçük seçilmesi gerekmektedir. Buna karşın elemanların çok küçük seçilmesi de hesaplama için gereken bilgisayar hafızasını çok arttırdığından burada bir optimizasyon gereklidir. Geometrinin üçgensel elemanlarla temsilinde eğrisel kısımlarda elemanların büyüklükleri küçültülerek çözüm hassasiyeti arttırılmıştır. Şekil 6.4 'te eğri yüzeylerin çok olduğu aracın ön kısmındaki hassaslaştırılmış elemanlar görülmektedir.

Sonlu eleman yöntemlerinde eleman sayısı ve düğüm noktaları önemlidir. Buna bağlı olarak bu elamanların sayısı çözüm hassasiyetini de doğrudan etkilemektedir. Çalışmada değişik hassasiyette yüzey sonlu eleman modelleri kullanılmış ve etkileri incelenmiştir.



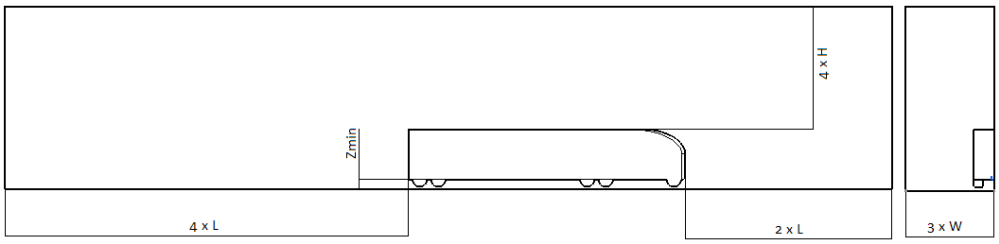
Şekil 6.4: Aracın ön yüzündeki hassaslaştırılmış çözüm bölgesi

6.3. Çalışmada İncelenen Çözüm Alanının Sonlu Eleman Modeli



Şekil 6.5: Çalışmada taşıt modeli etrafındaki akışın incelendiği çözüm bölgesi

Çalışmada basitleştirilmiş ağır vasıta taşıtı geometrisi olan GTS etrafındaki akış incelenmiştir. Bunun için geometri rüzgâr tünelini temsil eden bir kutu içerisine yerleştirilmiştir. Şekil 6.5 'te akışın incelendiği çözüm alanı görülmektedir. Bilgisayar hafıza gereksinimlerini azaltmak amacıyla taşıt yarım olarak modellenmiştir. Burada kurulan sonlu eleman ağındaki elemanlar, hesaplamaların hızı için taşıttan uzak kısımlarda büyük; aynı zamanda çözümün doğruluğu için taşıt ve taşıt etrafında hassaslaştırılmıştır. Araç etrafındaki kutunun boyutları aracın boyutlarına göre oransal olarak belirlenmiştir. Çözüm alanının boyutları Şekil 6.6 'da görülmektedir.



Şekil 6.6: Araç geometrisi etrafında kurulan çözüm alanı boyutları

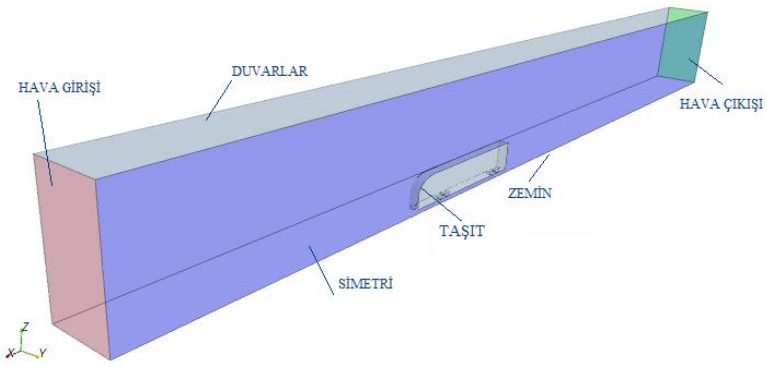
Çözüm alanının boyutları; L,taşıt uzunluğu, W taşıt genişliği, H taşıt yüksekliği olmak üzere belirlenmiştir:

- Aracın önündeki çözüm alanı uzunluğu :2L
- Aracın arkasındaki çözüm alanı uzunluğu :4L
- Aracın üzerindeki çözüm alanı uzunluğu :4H
- Aracın altındaki çözüm alanı uzunluğu :Z_{min}
- Aracın iki yanındaki çözüm alanı uzunluğu :3W

Burada önceki bölümlerde bahsedilen ve rüzgar tünellerinde karşılaşılan blokaj etkisi göze alınarak boyutlar seçilmiştir. Boyutların büyük alınmasıyla blokaj etkisinin gerçekleşmesinin önlenmesi amaçlanmış ve böylelikle taşıtın gerçek bir yoldaki hareketi temsil edilmeye çalışılmıştır. Ancak gerçek yol şartlarından farklı olarak burada rüzgâr tüneli deneylerinde olduğu gibi taşıt sabittir ve taşıt etrafındaki hava hareket eder. Buna ek olarak tekerleklerin dönmesi ve zemin hareketi gibi etkiler göz ardı edilmektedir.

6.4. Sınır şartları

Çözüm bölgesinde tanımlanan sınır şartları şekil de görülmektedir. Taşıt duvar sınır şartıyla tanımlı bir kutu içinde yer almaktadır. Ön tarafından hava girişi olmakta ve arka tarafından hava çıkışı gerçekleşmektedir. Modelde tanımlanan sınır şartları Şekil 6.7 ‘de görülmektedir.



Şekil 6.7: Taşıt ve çözüm alanı için belirlene sınır şartı bölgeleri

- **Çözüm alanına hava girişinin gerçekleştiği sınır:** Hız girişi sınırı şartı. Giriş sınır şartı için hızın büyüklüğü ve yönü; türbülans şartları belirlenmelidir.
- **Çözüm alanından havanın çıktığı sınır:** Akış çıkış sınır şartı. Bu sınır şartı için akışın ayrılma oranı ve statik basınç değerleri tanımlanmalıdır.
- **Çözüm alanının sınırları:** Duvar sınır şartı. Duvar şartı için kaymanın gerçekleşip gerçekleşmediği belirlenmelidir. Çalışmada çözüm alanı sınırlarını belirleyen cidarlar için kayma koşulu tanımlanmıştır. Böylece bu duvarlarda hız yüzeye paralel halde hareket etmekte ve yüzey sürtünmesi gerçekleşmemektedir.
- **Taşıt yüzeyinin sınırları:** Duvar sınır şartı olarak tanımlanmıştır. Taşıt yüzeyi sınır şartı için kayma tanımlanmamış böylece viskoz kuvvetler etkindir. Buna bağlı olarak yüzey üzerinde sürtünme kuvvetleri oluşmaktadır.
- **Çözüm alanı zemini:** Duvar sınır şartı olarak belirlenmiştir. Burada kayma tanımlanmamış böylece zemin üzerinde de sürtünme kuvvetleri oluşmaktadır.

6.5. Taşıt Etrafındaki Akış Çözümlemeleri

6.5.1. Koşu 1:

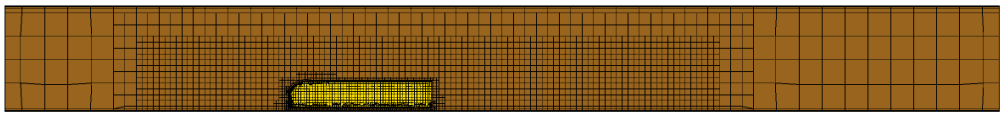
İlk üç koşuda kaba bir çözüm alanı ile çözüm alanında kullanılan ağ tiplerinin etkisi incelenecektir. Çözüm alanı kurulken değişik eleman tipleriyle 400 mm temel boyuttaki elemanlar seçilmiştir. Buna ek olarak minimum eleman büyüklüğü olarak temel büyüklüğün %10 ‘i seçilmiştir. Buna ek olarak kamyon geometrisi için minimum elman büyüklüğü temel büyüklüğün %8’i ve hedef eleman büyüklüğü olara %16 büyüklüğünde elemanlar seçilmiştir. Üç koşuda bu değerler sabit kalmakta sadece eleman tipi değiştirilmektedir.

Bunun yanında ilk üç koşuda sınır şartlarındaki koşullar aşağıdaki gibidir:

- Giriş: Hız, taşıta doğru 30 m/s, türbülans kinetik enerjisi k=0.3375, türbülans kinetik enerjisi harcanma oranı - ε=6,81927
- Çıkış: Ayrılma oranı=1(ayrılma yok)
- Taşıt: Kayma yok
- Duvar: Kayma var.
- Zemin: Kayma yok

Türbülans modeli olarak RNG k-ε modeli kullanılmıştır. Çözücü olarak ayrık çözücü kullanılmış hız ve basınç yakınsama katsayıları için sırasıyla 0,7 ve 0,3 alınmıştır.

Birinci koşu için çözüm alanı ve taşıt etrafında hassaslaştırılmış sonlu eleman modeli Şekil 6.8 'de görülmektedir. Bu koşuda çözüm alanı dörtgensel elemanlarla kurulmuştur. Çözüm alanında 89991 eleman ve 101648 düğüm noktası bulunmaktadır.

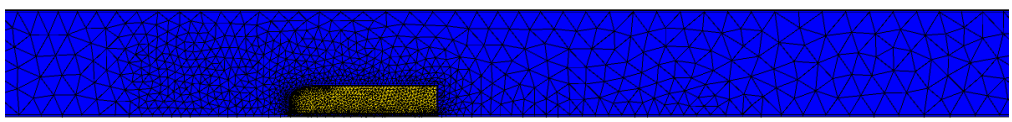


Şekil 6.8: Koşu 1 için çözüm alanının görünümü

Analiz bu koşullarla 900 iterasyon ve maksimum hata yakınsama toleransı=10^{-3} için gerçekleştirilmiştir.

6.5.2. Koşu 2

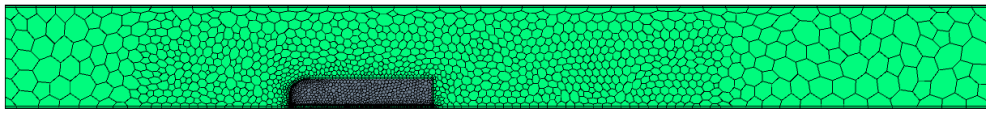
2. koşuda üçgensel elemanlar kullanılmıştır. Temel eleman boyutu ve diğer özelleştirmeler 1. koşudaki gibi aynen kullanılarak çözüm alanı 189539 adet elaman ve 39873 adet düğüm noktasıyla tanımlanmıştır. Çözüm alanının görünümü Şekil 6.9 'da görülmektedir.



Şekil 6.9: Koşu 2 için çözüm alanının görünümü

6.5.3. Koşu 3

Koşuda çokgensel elmanlar kullanılmıştır. Çözüm alanında 41349 çokgensel eleman, 206169 düğüm noktası tanımlanmıştır. Çözüm alanı ve elemanların görünümü Şekil 6.10 'da görülmektedir.

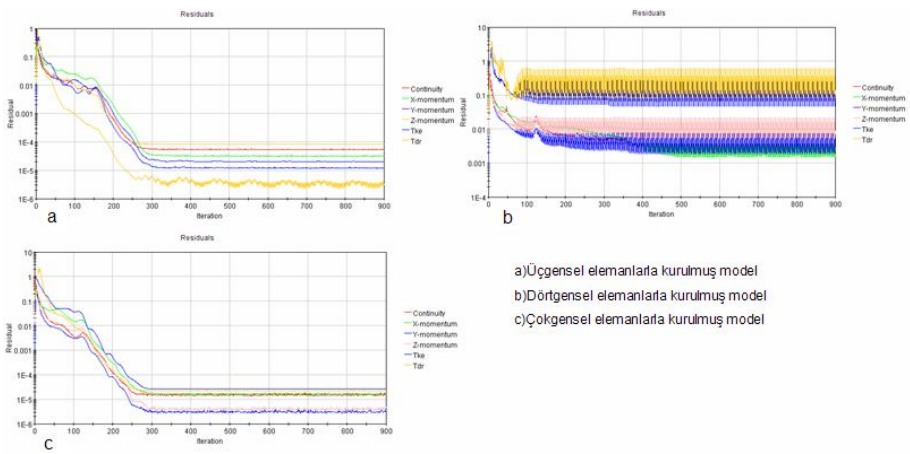


Şekil 6.10: 3. koşu için çözüm alanının görünümü

İlk üç koşu sonunda değişik eleman tipleriyle akış araştırılmıştır. Üç koşudaki eleman tiplerinin karşılaştırılmasında direnç katsayıları:

- Dörtgensel elemanlarda : C_D= 0.52
- Üçgensel elemanlarda : C_D= 0,549
- Çokgensel elemanlar için : C_D= 0.561

Olarak bulunmuştur Gutierrez ve diğerleri yaptıkları deneyde direnç katsayısını 0,35 olarak bulmuşlardır. Buna göre dörtgensel elemanların sonuca diğerlerine daha çok yaklaştığını söyleyebiliriz. Ancak üç analizdeki hata yakınsama eğrileri incelenirse çokgensel elemanlı modelde salınımların çok küçük olduğunu görmekteyiz (Şekil 6.11). Şekildeki hata yakınsama eğrilerinden ve koşularda kullanılan eleman sayılarından da görülebildiği gibi çokgensel üçgensel ve dörtgensel elemanlara göre çok daha az sayıda elemanla yaklaşık olarak aynı sonuçlara ulaşabilmektedir. Buna ek olarak çokgensel elemanlarla her eleman için komşu elemanların sayısı fazla olduğundan eleman sayısının arttırılmasıyla basınç ve hız gradyenleri daha iyi bulunabilmektedir.[15]



Şekil 6.11: İlk üç koşu için hata yakınsama eğrileri

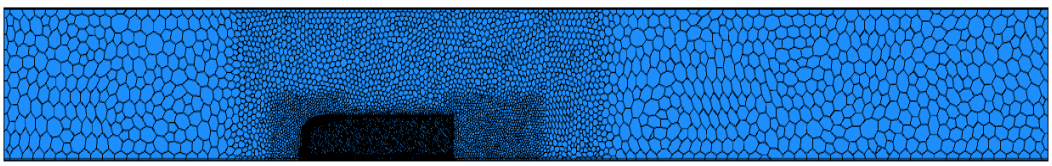
Buna göre doğru sonuçlara daha az eleman ve dolayısıyla daha hızlı olarak ulaşabilmek için çalışmanın ileriki aşamalarında çokgensel elemanların kullanılması uygun görülmüştür.

6.5.4. Sonlu Eleman Ağının İyileştirilmesi

Ağır vasıta taşıtları için türbülans ve akış ayrılmalarını oluştuğu bölgeler Bölüm 3.3 de anlatılmıştı. Bu bilgiler ışığında çözüm alanındaki eleman ağının kalitesinin iyileştirilmesinde

- Taşıtın arka kısmında oluşan türbülansın yoğun olarak oluştuğu kuyruk akımını incelemek için buradaki eleman ağının iyileştirilmesi
- Ön kısmında oluşan yüksek basınç bölgesindeki ve taşıtın üstü ile alt köşelerindeki akış ayrılma bölgelerindeki basınç ve hız gradyenlerinin hesaplanmasındaki hataların en aza indirilebilmesi için ön bölgede iyileştirme
- Taşıtın alt kısmındaki düzensizliklerden doğan düzensiz hava akımını iyi bir şekilde ölçmek için bu bölgede iyileştirmeler yapılmıştır.

Bu iyileştirme işlemleri sonrasında oluşan sonlu eleman modeli Şekil 6.12'de görülmektedir.



Şekil 6.12: İyileştirilmiş sonlu eleman modeli

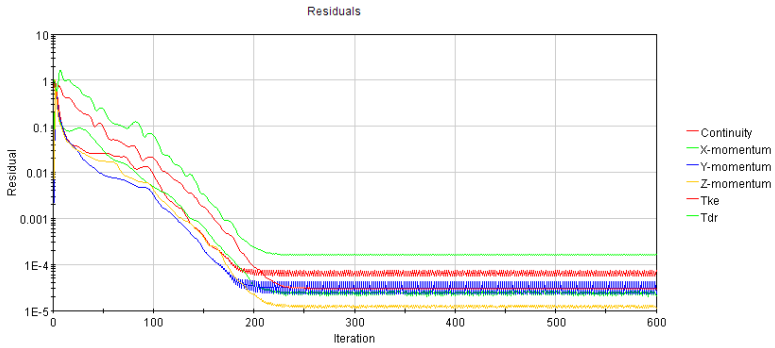
İyileştirmeler sonunda kaba ve hassas olmak üzere iki tip sonlu eleman ağı kurulmuştur. Temel eleman büyüklükleri sırasıyla 400 mm ve 200 mm olarak seçilmiştir.

- Kaba modelde : 40846 çokgensel eleman ve 163517 düğüm noktası
- Hassas modelde 177995 çokgensel eleman ve 849489 düğüm elemanı bulunmaktadır.

6.5.5. Koşu 4

4, 5 ve 6. ve 7. koşularda iyileştirmeler yapılmış kaba modelde türbülans modellerinin aerodinamik özelliklere etkisi incelenecektir.

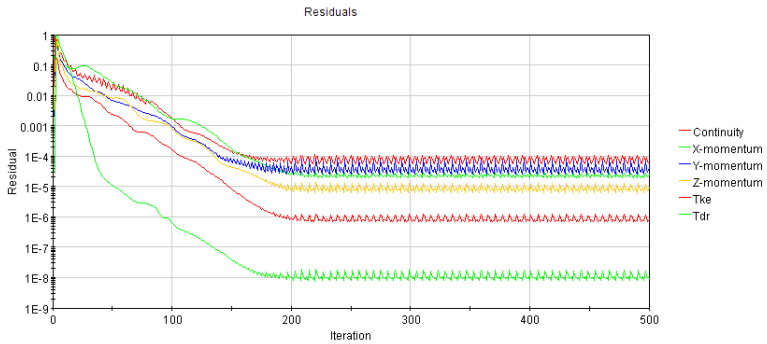
4. koşuda 40846 elemanlı ve 163517 düğüm noktalı sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Tanımlanan sınır şartları 1. koşudakilerle aynı olmak üzere burada RNG k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. 600 iterasyon sonrasında hata yakınsama oranları yeterli yakınsamaya ulaşmışlardır (Şekil 6.13). 4. koşu için direnç katsayıları C_D=0,462 ve C_l=0.097 olarak bulunmuştur.



Şekil 6.13: Koşu 4 hata yakınsama eğrileri

6.5.6. Koşu 5

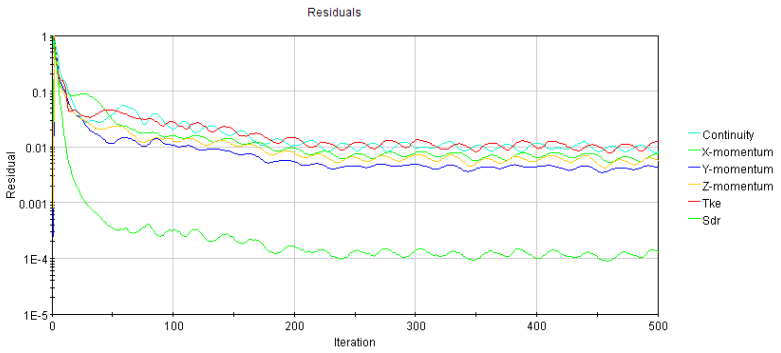
5. koşuda standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Sonlu eleman modeli 4. koşudakiyle aynı olmak üzere 600 iterasyon sonrasında hata yakınsama eğrileri yeterli yakınsamaya ulaşmışlardır. (Şekil 6.14). 5. koşu için aerodinamik direnç katsayıları C_D=0,486 ve C_l=0,100 olarak bulunmuştur.



Şekil 6.14: Koşu 5 hata yakınsama eğrileri

6.5.7. Koşu 6

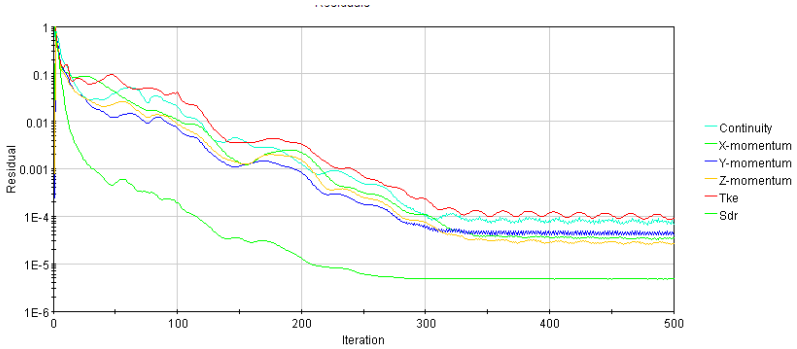
6. koşuda SST (Menter) k-ω türbülans modeli kullanılmıştır. Sonlu eleman modeli koşu 4 ve 5 ile aynı olmak üzere 600 iterasyon sonucunda hata yakınsama eğrileri Şekil 6.15 'de görülmektedir. Hata yakınsama eğrileri özgül kinetik enerji harcanım oranı dışındaki parametrelerde 10^{-2} civarında kalmışlardır. Aerodinamik direnç katsayıları C_D=0,486 ve C_l=0,146 olarak bulunmuştur.



Şekil 6.15: Koşu 6 hata yakınsama eğrileri

6.5.8. Koşu 7

Koşu 7'de k-ω Wilcox türbülans modeli kullanılmıştır. Sonlu eleman modeli 4,5,6 ile aynı olmak üzere 600 iterasyon sonucunda yeterli yakınsama sağlanmıştır (Şekil 6.16). Aerodinamik direnç ve kaldırma katsayıları; C_D=0,470 ve C_l=0,124 olarak bulunmuştur.

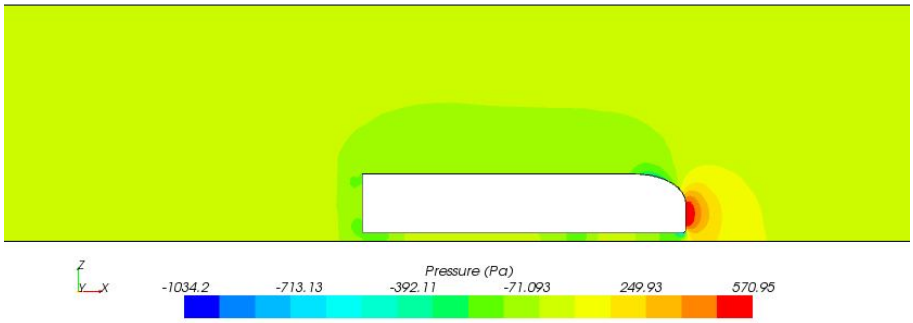


Şekil 6.16: Koşu 7 için hata yakınsama eğrileri

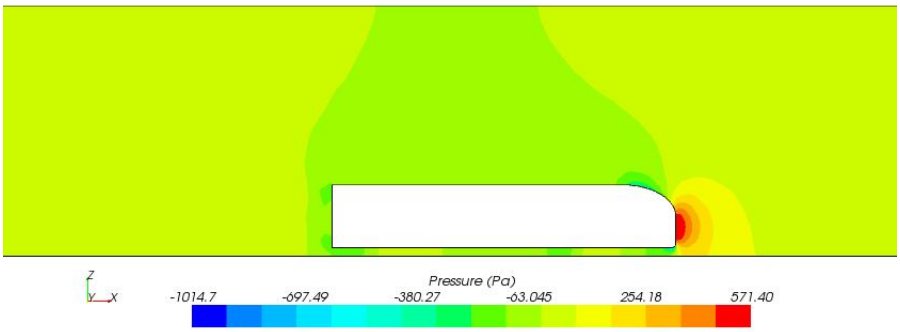
6.5.9. Koşu 4–5–6–7 karşılaştırması

Tablo 6.1: 4–5–6–7 koşularının test sonuçlarıyla karşılaştırılması

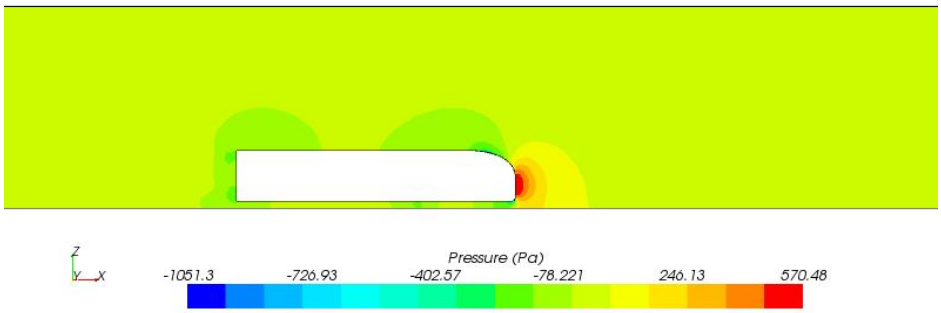
	C_D	Hata oranı
Test sonuçları	0.35	
Koşu 4	0.462	%32,0
Koşu 5	0.486	%38,9
Koşu 6	0.486	%38,9
Koşu 7	0,470	%34,3



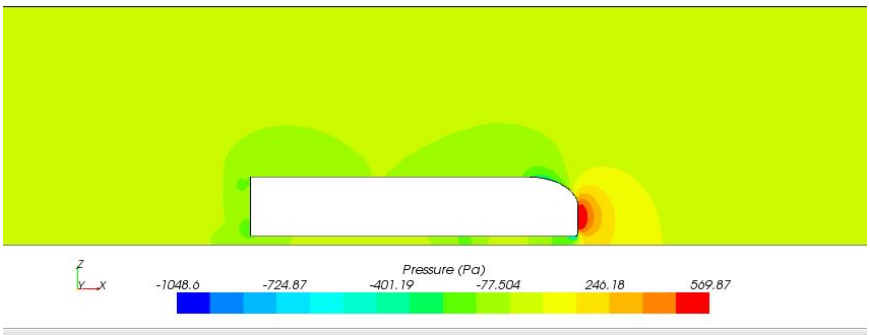
Şekil 6.17: Koşu 4 (RNG k-e) için Statik basınç konturları



Şekil 6.18: Koşu 5 (St. k-e) için Statik basınç konturları



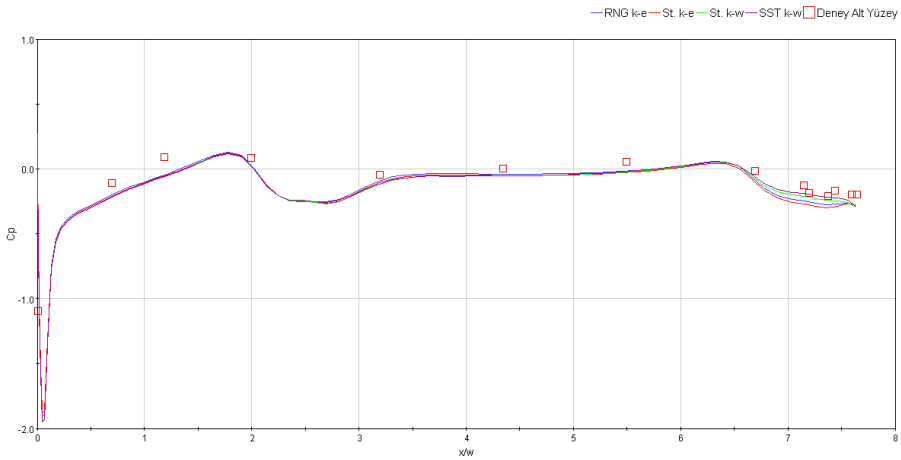
Şekil 6.19: Koşu 6 (SST-Menter k-w) için Statik basınç konturları



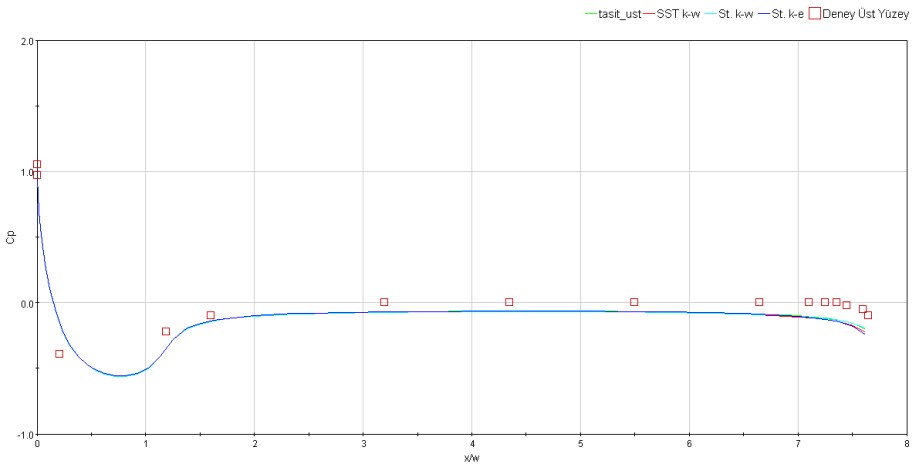
Şekil 6.20: Koşu 7 (k-w Wilcox) için Statik basınç konturları

Koşulara ait simetri eksenindeki statik basınç konturları Şekil 17–20 'de görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi taşıtın ön kısmında yüksek basınç bölgesi üst kısmında oluşmuştur. Üst ve arka ve alt kısımlarda basınç düşüktür.

Taşıtın üst ve alt ön kısımlarında oluşan yüksek hızlardan dolayı basınç düşüşü yüksek olmuştur. Şekil 6.21 ve 6.22 'de taşıtın üst ve alt yüzeyindeki basınç katsayısı değişimleri görülmektedir. Taşıtın üst yüzeyi olarak taşıtın üst kısmındaki eliptik yüzeyin başlangıç noktasından taşıtın arkasına kadar olan kısım ve taşıt alt yüzeyi olarak taşıtın ön ve altındaki yuvarlatılmış kenarın taşıtın önüyle birleştiği noktadan başlayarak taşıtın arkasına kadar olan kısım alınmıştır.



Şekil 6.21: Taşıtın alt yüzeyi için simetri ekseninde basınç katsayılarının deney sonuçlarıyla karşılaştırması(Kaba sonlu eleman modeli)



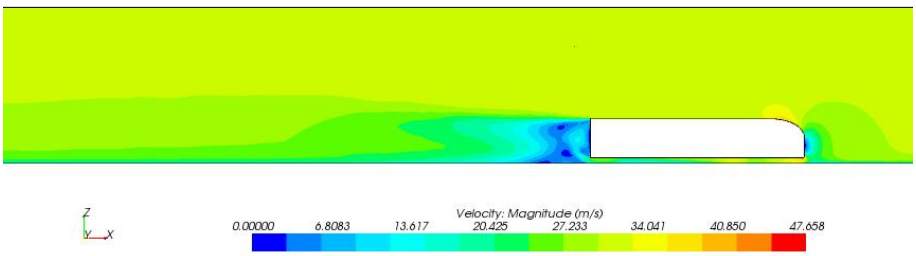
Şekil 6.22: Taşıtın alt yüzeyi için simetri ekseninde basınç katsayılarının deney sonuçlarıyla karşılaştırması(Kaba sonlu eleman modeli)

Taşıt üst yüzeyi için ön yüzeydeki durma seviyesine gelmiş hızlar nedeniyle buralardaki dinamik basınç statik basınca dönüşmüş ve c_p değerleri çok yüksek çıkmıştır. Daha sonra eliptik yüzeyde hava hızı yükselmiş ve buradaki c_p değerini düşürmeye başlamıştır. Eliptik yüzeyle taşıtın üst yüzeyinin birleştiği noktada taşıtın üst yüzeyi için en yüksek hızlar oluşmakta ve burada akış ayrılmaları meydana gelmektedir. Burada c_p değeri üst yüzey için en düşük değerini almaktadır. Bu

bölgeden taşıtın arkasına doğru gidildikçe basınç katsayısı akışın tekrar birleştiği bölgede yükseliş göstererek sıfıra yaklaşmaktadır. Buradan arkaya doğru gidildikçe basınç katsayısı yaklaşık olarak sıfıra yakın ancak negatif değerler almaktadır. Genel olarak türbülans modelleri için trend aynı olmakla beraber deney sonuçlarına göre alt ve üst yüzey için özellikle taşıtın ön ve arka kısmında düşük değerler bulunmuştur. Tablo 1 'den görüldüğü gibi test sonuçlarındaki aerodinamik direnç katsayısına en çok RNG k-ε türbülans modeliyle yaklaşılmıştır.

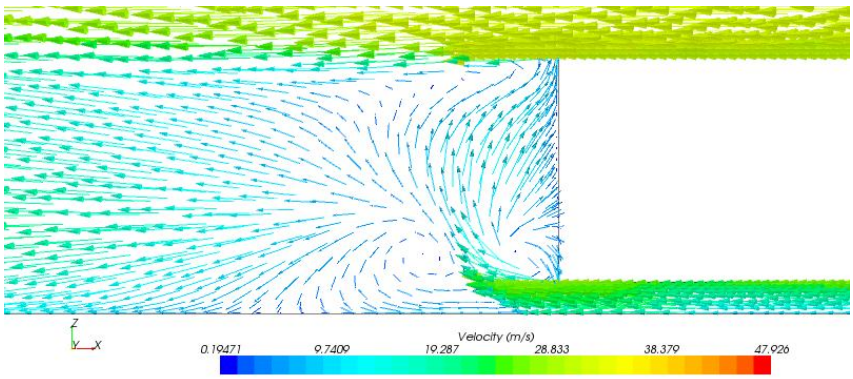
6.5.10. Koşu 8

Bu koşuda 176697 eleman sayılı ve 848463 düğüm noktalı hassas model kullanılmıştır. Türbülans modeli olarak RNG k-e modeli kullanılmıştır. Sınır şartları olarak koşu 1 de kullanılan şartlar uygulanmıştır. 600 iterasyon sonunda yeterli yakınsama sağlanmıştır.8. koşu için aerodinamik katsayılar basınç direnç katsayısı C_{DP}= 0,416, sürtünme direnç katsayısı C_{Df}= $6{,}2.10^{-4}$ ve C_D=0,4167 olarak bulunmuştur.



Şekil 6.23: Taşıt etrafındaki eş hız büyüklüğü konturları

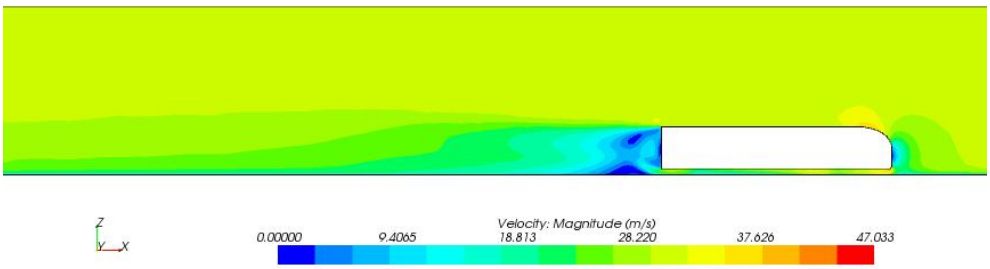
Şekil 6.23 ' te taşıt etrafındaki hız büyüklükleri dağılımları görülmektedir. Taşıtın önündeki durma noktası, üst ve alt köşelerdeki yüksek hızlar ve buna bağlı oluşan akış ayrılmaları görülmektedir. Taşıtın arka tarafındaki düşük hızlar sebebiyle burada hava burgaçları oluşmaktadır. Şekil 6.24 'te aracın arka tarafındaki kuyruk akımı ve buradaki türbülanslı bölge görülmektedir.



Şekil 6.24: Taşıtın arkasındaki hız vektörleri (Koşu 8)

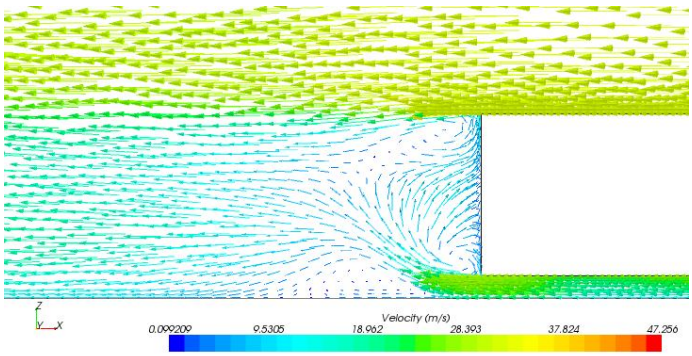
6.5.11. Koşu 9

Bu koşuda hassas model kullanılmıştır. Türbülans modeli olarak standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Sınır şartları değiştirilmeden analiz gerçekleştirilmiştir. 600 iterasyon sonunda yeterli yakınsama sağlanmıştır. Aerodinamik basınç direnci C_{DP}=0,426 ve sürtünme direnci C_{Df}=0,00303 olarak toplam direnç C_D=0,429 bulunmuştur.



Şekil 6.25: Taşıt etrafındaki eş hız büyüklüğü dağılımı konturları (Koşu 9)

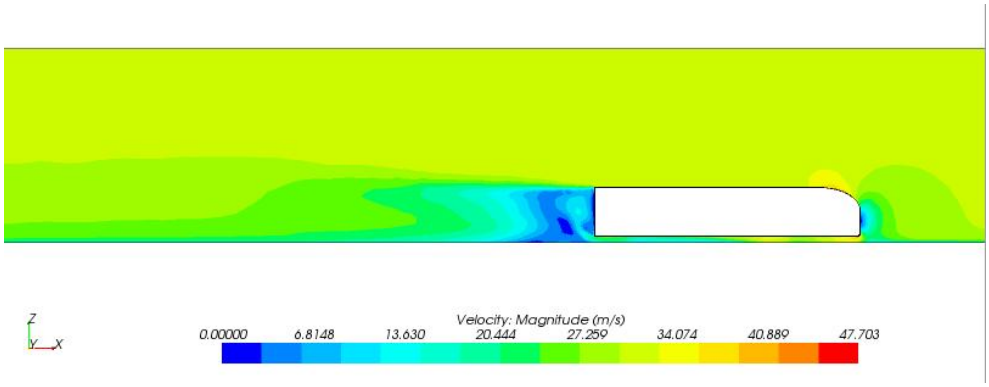
Şekil 6.23 'te taşıt etrafındaki eş hız büyüklüğü dağılımları görülmektedir. Taşıtın arkasında oluşan türbülans bölgesi ve düşük hızların karakteri burada görülebilmektedir. Şekil 6.24'teki hız vektörleri dağılımdan da taşıtın arkasındaki hava hareketleri ve oluşan burgaçların şekli görülmektedir.



Şekil 6.26: Taşıtın etrafında oluşan hız vektörleri (Koşu 9)

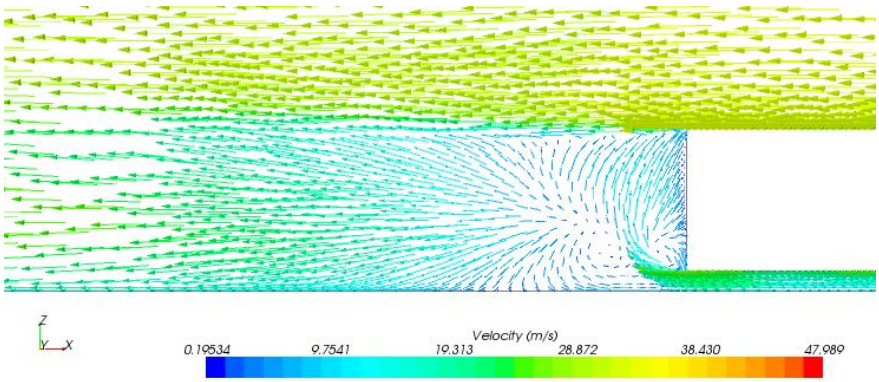
6.5.12. Koşu 10

10. koşuda hassas model ve aynı sınır şartları kullanılmış ve türbülans modeli olarak Standart k-ω (Wilcox) Türbülans modeli kullanılmıştır. k=0,3375 ve $\omega=10^{-4}$ olarak belirlenmiş ve 600 iterasyon sonunda 0,001 ve 0,0001 arasında yakınsama sağlanmıştır.



Şekil 6.27: Taşıt etrafındaki eş hız büyüklüğü dağılımı konturları (Koşu 10)

Taşıtın ön kısmındaki hız dağılımı 8 ve 9 numaralı koşularla benzer iken aracın arka kısmındaki kuyruk akımında değişiklikler gözlenmektedir.



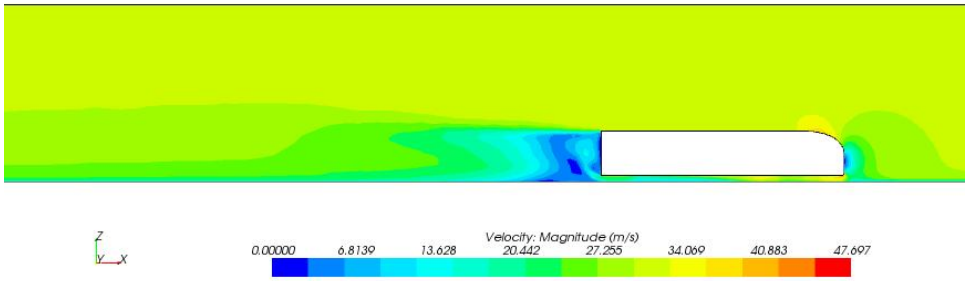
Şekil 6.28: Taşıtın arka kısmındaki hız vektörleri (Koşu 10)

Aracın arkasındaki kuyruk akımının karakteri burada görülebilmektedir.

Bu koşuda k-ω Wilcox türbülans modeli için aerodinamik direnç katsayıları basınç direnci $C_{D,P}$=0,4075 ve $C_{D,f}$= -5,0.10^{-5} olarak toplam CD= 0,4074 bulunmuştur.

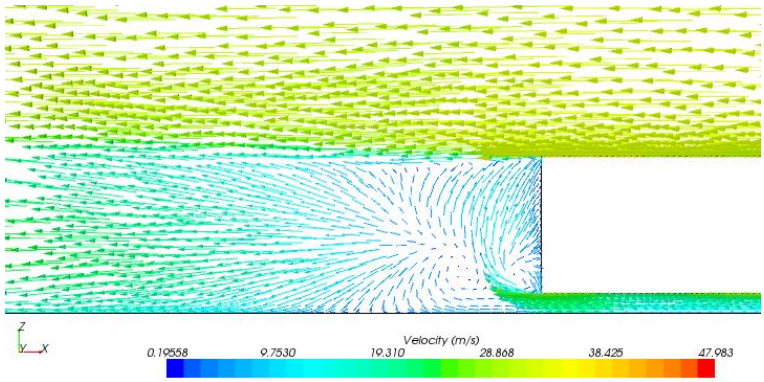
6.5.13. Koşu 11

Bu koşuda hassas model kullanılmış ve türbülans modeli olarak SST (Menter) k-ω kullanılmıştır. K=0,3375 ve $\omega= 10^{-4}$ alınmıştır. 600 iterasyon sonucunda 0,01 ile 0,001 arasında yakınsama sağlanabilmiştir.



Şekil 6.29: Taşıt etrafındaki eş hız dağılım konturları (koşu 11)

Eş hız büyüklüğü konturlarından görüldüğü gibi on kısmındaki hareketler diğer türbülans modelleriyle aynıyken arka tarafta k-ω Wilcox modeliyle benzerlik göstermektedir. k-ε türbülans modelleriyle farklı kuyruk akışı oluşmaktadır.



Şekil 6.30: Taşıtın arka tarafındaki hız vektörleri (Koşu 11)

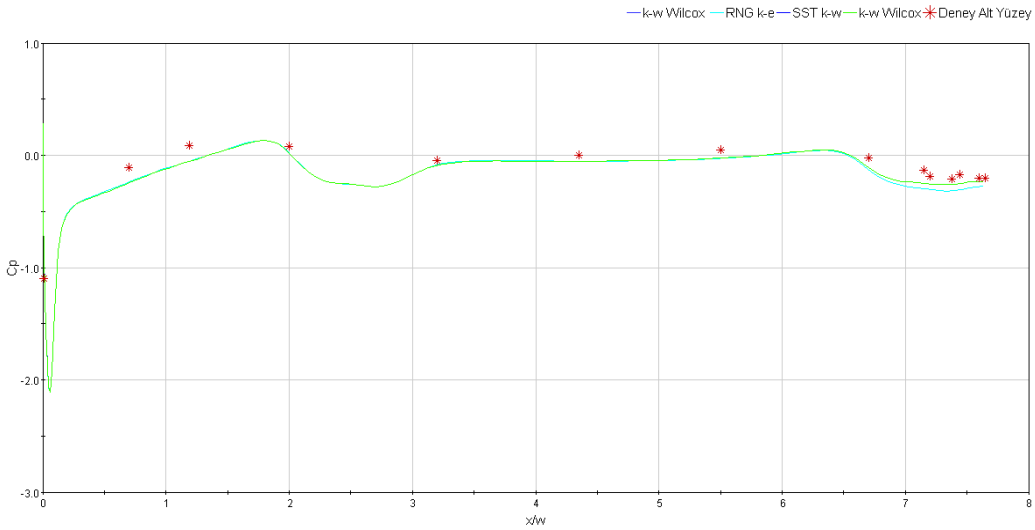
Koşu 11 'de aerodinamik direnç katsayıları; basınç direnç katsayısı $C_{D,P}$= 0,4074 ve $C_{D,f}$= -5.02.10^{-5} olarak toplam C_D= 0,4073hesaplanmıştır.

6.5.14. Koşu 8, 9, 10, 11 karşılaştırılması

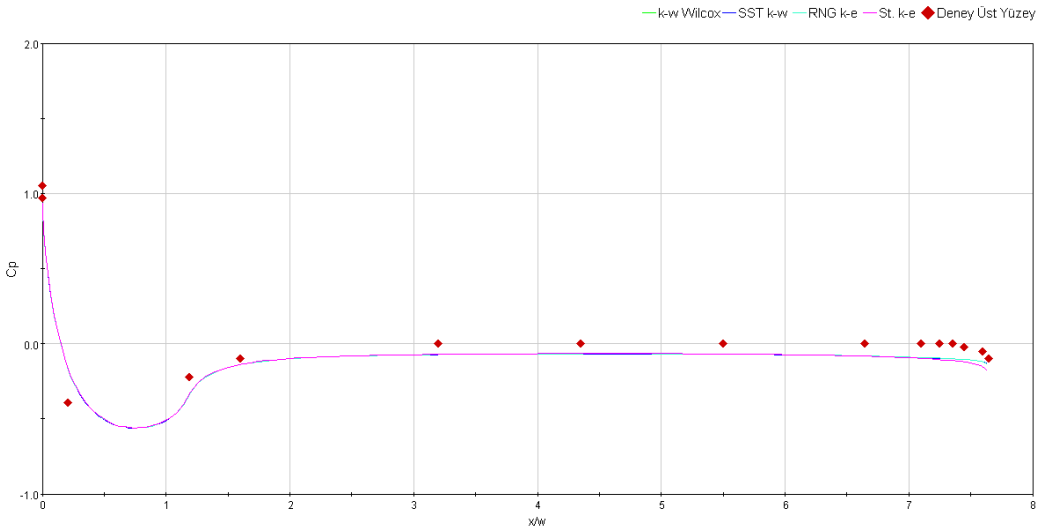
8, 9, 10 ve 11 numaralı koşularda hassas sonlu eleman modeli farklı türbülans modelleriyle incelenmiştir.

Şekil 6.31 ve 6.32 de simetri ekseninde taşıtın alt ve üst yüzeylerindeki basınç katsayısının taşıt boyunca değişimi görülmektedir. Grafiklerden de görülebildiği gibi çalışmada incelenen türbülans modelleri test sonuçlarını yakalayamamışlardır. Dördü de taşıt boyunca yaklaşık değerler göstermekteyken aracın arka tarafında k-ω türbülans modelleri test sonuçlarına daha yaklaşık cevaplar vermişlerdir.

Koşularda taşıt etrafındaki basınç ve hız dağılımları yaklaşık olarak aynı değerlerde seyretmesine karşılık karakterleri farklılıklar göstermektedir. Bu farklar k-ε ve k-ω türbülans modellerinin sınır tabaka çözümlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 6.31: Simetri ekseninde taşıt alt yüzeyindeki basınç katsayısının taşıt boyunca değişimi



Şekil 6.32: Simetri ekseninde taşıt üst yüzeyindeki basınç katsayısının taşıt boyunca değişimi

Tablo 6.2 'den görüldüğü gibi k-ω türbülans modelleri için sürtünme direnç katsayıları negatifken k-ε türbülans modelleri için pozitif değerler almaktadır. Tablodan görüldüğü gibi k-ω türbülans modelleri Sandia Test sonuçlarına daha yakın sonuçlar vermişlerdir.

.

Tablo 6.2: Hassas sonlu eleman modeli için türbülans modellerinin direnç katsayılarının karşılaştırılması

	Koşu 8 (RNG k-e)	Koşu 9 (Standart k-ε)	Koşu 10 (k-ω Wilcox)	Koşu 11 (SST k-ω)
Basınç direnci($C_{D,P}$)	0,416	0,426	0,4075	0,4074
Sürtünme direnci($C_{D,f}$)	$6{,}2.10^{-4}$	0,00303	$-5{,}0.10^{-5}$	$-5{,}02.10^{-5}$
Direnç katsayısı(C_D)	0,4167	0,429	0,4074	0,4073
Sandia Test Sonuçları	0,35	0,35	0,35	0,35
Hata Oranı (%)	19,1	22,6	16,4	16,4

KAYNAKLAR

[1] Gillespie, T.D., 1992. Fundamental of Vehicle Dynamics, SAE Move, Pennsylvania

[2] Gutierrez, W.T., Basil, H., Croll, R.H. and Rutlege, W.H., 1996 Aerodynamics overwiew of the Ground Transportation Systems (GTS) Project for Heavy Vehicle Drag Reduction, SAE Technical Paper, 960906

[3] Gutierrez, W.T., Basil, H., Croll, R.H. and Rutlege, W.H., 1996. Aerodynamics overview of the Ground Transportation Systems (GTS) Project for Heavy Vehicle Drag Reduction, SAE Technical Paper, 960906

[4] K. Salari, J.M. Ortega, P.J. Castellucci, 2004, Computational Prediction of Aerodynamic Forces for a Simplified Integrated Tractor-Trailer Geometry, AIAA Fluid Dynamics Meeting, Portland, June 28-July 1, 2004

[5] Heisler, H., 2002. Advanced Vehicle Technology, Butterworth-Heinemann, Oxford

[6] Ahmed, S.R., 1984, Influence of Base Slant on the wake Structure and Drag of Road Vehicles, Jou.Fluids Engineering, 105,429-434

[7] Çağan, M., 2000, Taşıt Aerodinamik Özelliklerinin Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

[8] Hucho, W.H. and Sovran, G., 1996, Vehicle Aerodynamics: An overview in Aerodynamics of Road Vehicles, Spec. Publ. SAE Move, Pennsylvania, SP-1145

[9] Anderson, J.D., 2007, Fundamentals of Aerodynamics, McGraw-Hill, Boston

[10] Katz, J.,1995. Race Car Aerodynamics, Robert Bentley Inc., Cambridge

[11] Wood, R.M. and Bauer, S.X.S., 2003, Simple and Low Cost Aerodynamic Drag Reduction Devices for Tractor-Trailer Trucks, SAE Technical Paper, 2003–01–3377

[12] Henne P.A., 1990, Applied Computational Aerodynamics, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington

[**13] Lajos, T.,Perzler, L. and Finta, L.,** 1988, Styling and Aerodynamics of Buses, International Journal of Vehicle Design

[14] Arslan, M.Ö., 2005, Ticari Taşıt Aerodinamiğinin Temelleri ve Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

[15] Peric, M. and Ferguson, S., The advantage of polyhedral meshes, CD-adapco <http://www.cd-adapco.com/press_room/dynamics/24/testVspoly.html>

[16] Star-CCM+User's Manual

ÖZGEÇMİŞ

Cengiz ŞAHİN 1981 yılında Kırcaali – Bulgaristan ‘ da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Bursa ‘da tamamladıktan sonra 1996 yılında yine Bursa ‘da Bursa Ali Osman Sönmez Fen Lisesine başladı. Buradan 1999 yılında mezun olduktan sonra Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünü kazanarak yüksek öğrenimine başladı. 2004 yılında burayı tamamladıktan sonra 2005 yılında İstanbul teknik üniversitesi makine mühendisliği anabilim dalı otomotiv programına girmiş ve burada öğrenim hayatına devam etmektedir.