

**TAŞIT AERODİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN
SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

TC. YÜKSEK ÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANASYON BİRİMİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Markos ÇAĞAN
F0398Y079**

10/2/5 101215

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Haziran 2000

Tezin Savunulduğu Tarih : 23 Haziran 2000

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Cem SORUŞBAY
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Kadir KIRKKÖPRÜ
Doç.Dr. Doğan GÜNEŞ

HAZİRAN 2000

ÖNSÖZ

Günümüzde yakıt rezervlerinin azalması ve artan çevre kirliliği nedeniyle taşıtlardaki yakıt tüketiminin azaltılmak istenmesi önemli bir araştırma konusudur. Bunun yanında toplu taşımacılık özendirilerek kişi başına düşen yakıt tüketimi azaltılmak istenmektedir. Ülkemiz şartlarında en yaygın toplu taşımacılık taşıtının otobüs olması nedeniyle, bu çalışmada otobüse etkiyen en önemli direnç olan aerodinamik direnç konusu işlenmiştir. Otobüsün aerodinamik özellikleri sayısal yöntemler yardımıyla incelenmiştir.

Öğrenim hayatım boyunca bana sonsuz yardım ve desteklerini sunan sevgili aileme; bu çalışmam sırasında bana değerli görüşleriyle yol gösteren sevgili hocalarım, Prof.Dr. Cem Soruşbay ve Doç.Dr. Doğan Güneş'e; otobüs geometrisini temin eden Mercedes Benz Türk A.Ş.'den Dr. Şevket Kocaaydın ve Y.Müh. Gökhan Lokman'a teşekkürleri bir borç bilirim.

Haziran 2000

Markos ÇAĞAN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. KARAYOLU TAŞITLARI AERODİNAMİĞİ	3
2.1. Karayolu Taşıtlarına Etkiyen Direnç Kuvvetleri	3
2.1.1. Tekerlek Direnci	3
2.1.2. Yokuş Direnci	4
2.1.3. İvme Direnci	5
2.2. Karayolu Taşıtlarına Etkiyen Aerodinamik Direnç Kuvvetleri	6
2.2.1. Aerodinamik Kuvvet ve Moment sistemi	6
2.2.2. Aerodinamik direnç kuvveti	7
2.2.3. Diğer Aerodinamik Kuvvet Bileşenleri ve Taşıtların Stabilitesi	9
2.3. Bazı İşlevsel (Fonksiyonel) Etkiler	10
2.3.1. Taşıtların Gövdeleri Üzerindeki Kuvvetler	10
2.3.2. Rüzgar Gürültüsü	10
2.3.3. Taşıtların Yüzeyinde Su Akışı ve Çamurlanma	10
2.3.4. İç akış sistemi	11
2.4. Taşıtların Yüzeyindeki Akış ve İşlevsel Etkiler ile Etkileşimi	11
2.5. Aerodinamik Kuvvetlere Etkiyen Faktörler	13
2.5.1. Taşıtların Şekli	13
2.5.2. Çevre Rüzgarı	22
2.5.3. İşletme Şartları	24
3. KARAYOLU TAŞITLARINDA AERODİNAMİK ÖZELLİKLERİN DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ	28
3.1. Yol Deneyleri	28
3.1.1. Aerodinamik Direncin Ölçülmesi	29
3.1.2. Aerodinamik Kaldırmanın Ölçülmesi	31
3.1.3. Yüzey Basıncının Ölçülmesi	31
3.1.4. Akışın Görüntülenmesi	32
3.2. Rüzgar Tüneli Deneyleri	33

3.2.1. Rüzgar Tünelinin Yapısı	33
3.2.2. Rüzgar Tünelinde Kullanılan Modeller	35
3.2.3. Rüzgar Tüneli Deneylerinde Karşılaşılan Bazı Sorunlar	36
3.2.3.1. Blokaj Sorunu	36
3.2.3.2. Yolun Temsili ve Tekerleklerin Dönmesi Sorunu	38
4. KARAYOLU TAŞITLARINDA AERODİNAMİK ÖZELLİKLERİN SAYISAL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ	41
4.1. Yöneten Denklemler	42
4.1.1. Momentumun Korunum Denklemi	42
4.1.2. Genel Diferansiyel Denklemi	43
4.1.3. Türbülans Modelleri ve Denklemleri	43
4.1.3.1. Standart k-ε Modeli	44
4.1.3.2. RNG k-ε Modeli	45
4.2 Hesap Alanının Ayırıklaştırılması ve Ayırıklaştırma Denklemleri	45
4.2.1. Toplam Akı Değerinin Gösterimi	47
4.2.2. Süreklilik Denkleminin Ayırıklaştırılması	48
4.2.3. Ayırıklaştırma Denkleminin Son Hali	49
4.2.4. Sınır Şartları	50
4.2.5. Ayırıklaştırma Denklemlerinin Çözümü	50
4.2.6. Yakınsama Katsayıları (Underrelaxation faktörleri)	50
4.2.7. Akış Hesabı	50
4.2.8. Ayırıklaştırma Denklemlerinin Hassasiyeti	51
4.2.8.1. Birinci Mertebeden Ayırıklaştırma	52
4.2.8.2. İkinci Mertebeden Ayırıklaştırma	53
5. AERODİNAMİK ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİNDE KULLANILAN BİLGİSAYAR YAZILIMLARININ İNCELENMESİ	55
5.1. GAMBIT Yazılımının Kullanımı	55
5.2. FLUENT Yazılımının Kullanımı	56
5.2.1. Akışa ait Fiziksel Modelin Tanımı	56
5.2.2. Akışkan Özelliklerinin Tanımlanması	57
5.2.3. Sınır Şartlarının Tanımlanması	57
5.2.4. Çözümün Elde Edilmesi	57
5.2.5. Sonuçların Değerlendirilmesi	58
6. AERODİNAMİK ÖZELLİKLERE ETKİ EDEN ETKENLERİN İNCELENMESİ	63
6.1. 2-Boyutlu Akış Çözümleri	63
6.1.1. Koşu 1	63
6.1.2. Koşu 2	70
6.1.3. Koşu 3	72

6.1.4. Koşu 4	76
6.1.5. Koşu 5	77
6.1.6. Koşu 6	78
6.1.7. Koşu7	79
6.1.8. Koşu 8	79
6.1.9. Koşu 9	80
6.1.10. Koşu 10	83
6.1.11. Koşu 11	83
6.1.12. Koşu 12	85
6.1.13. Koşu 13	85
6.1.14. Koşu 14	88
6.1.15. Koşu 15	88
6.1.16. Koşu 16	91
6.2. 3-Boyutlu Akış Çözümleri	95
6.2.1. Koşu 17	96
6.2.2. Koşu 18	100
7. SONUÇLAR	104
7.1. Koşu 19	104
7.2. Koşu 20	113
7.3. Koşu 21	114
7.4. Koşu 22	118
7.5. Koşu 23	120
7.6. Koşu 24	122
8. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	125
KAYNAKLAR	131
ÖZGEÇMİŞ	133

KISALTMALAR

KN : Koşu numarası
SAD : Sayısal akışkanlar dinamiği



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Bir binek taşıtına ait aerodinamik direnç katsayısının bileşenleri.....	18
Tablo 4.1. $A(Pe)$ fonksiyonunun hesabı için kullanılan çeşitli yaklaşımların matematiksel ifadeleri.....	48
Tablo 6.1. İlk sekiz koşuya ait hesaplanan C_D değerleri	80
Tablo 6.2. 9, 10, 11, 12, 13, 14 numaralı koşulara ait hesaplanan C_D değerleri	88
Tablo 6.3. Koşu 12 ve 16'ya ait hesaplanan C_D değerleri.....	95
Tablo 6.4. 2-boyutlu koşu 5 ve 6 ile 3-boyutlu koşu 17 ve 18'e ait C_D değerleri	102
Tablo 7.1. Koşu 21, 22, 23, 24'e ait C_D değerleri	124
Tablo 8.1. Kutu etrafındaki akış çözümlemelerine ait C_D değerleri ve hesap alanı boyutları.....	126
Tablo 8.2. Otobüs etrafındaki akış çözümlemelerine ait C_D değerleri ve hesap alanı boyutları	128

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>SayfaNo</u>
Şekil 2.1 : Yokuş direncinin oluşması.	4
Şekil 2.2 : Otomobillerde λ 'nın çeşitli hızlarda aldığı değerler.	6
Şekil 2.3 : Otomobiller ve ağır ticari taşıtlarda λ 'nın çeşitli hızlarda aldığı değerler.....	6
Şekil 2.4 : Aerodinamik kuvvet sistemi.....	7
Şekil 2.5 : Orta büyüklükteki bir binek taşıtı için, C_D değerinin düşüşünün yakıt ekonomisine olan etkisi.	8
Şekil 2.6 : Bir kamyon (çekici+yarı römork) için C_D değerindeki düşüşün yakıt kazancına olan etkisi.	9
Şekil 2.7 : Bir binek taşıtı etrafındaki akış ve başlıca akış ayrılmaları	12
Şekil 2.8 : Radyo anteninin oluşturduğu rüzgar gürültüsü.	13
Şekil 2.9 : Taşıt tasarımındaki etkili unsurlar.	14
Şekil 2.10: Taşıt üzerinde yapılan kısmi değişiklikler ile C_D değerinin düşürülmesi.	14
Şekil 2.11: Zemine yakın cisimlerin uzunluk/genişlik oranına bağlı C_D katsayıları.	15
Şekil 2.12: Yuvarlatma oranının C_D değerine etkisi.	15
Şekil 2.13: Bir binek taşıtı için ön kısım şeklinin C_D değerine etkisi.....	16
Şekil 2.14: Taşıt ön ucu tasarımının C_D değerine etkisi.	17
Şekil 2.15: Taşıt ön camı eğikliğinin C_D değerine etkisi.....	17
Şekil 2.16: C_D değerinin fastback taşıtta arka üst kısım eğim açısı α 'ya göre değişimi ve kritik durumun oluşması a) taşıta benzer basit bir cisim b) binek taşıtı.	19
Şekil 2.17: Fastback için kritik arka üst eğim açısında (C durumu) ard izin aldığı şekil	19
Şekil 2.18: Notchback arabada C_D değerinin araç arka şekline olan bağımlılığı ve ard izin yapısı.	20
Şekil 2.19: Bir binek taşıtında arka spoiler tasarımının C_D ve C_L değerlerine etkisi.....	20
Şekil 2.20: Bir binek taşıtında ön spoiler tasarımının C_D ve C_L değerlerine etkisi.	21
Şekil 2.21: Bir kamyon için, taşıt gövdesi üzerine yerleştirilmiş ilave aygıtların C_D değerine olan etkisi.	22
Şekil 2.22: C_D değerinin tarihsel gelişimi.....	22
Şekil 2.23: Rüzgar hücum açısının çeşitli taşıtlarda C_D değeri artışına olan etkisi.	23
Şekil 2.24: Ağır ticari taşıtlarda (çekici+yarı römork) her bir kısma ait C_D değerinin değişik rüzgar hücum açılarındaki değişimi.....	23
Şekil 2.25: Ağır ticari taşıtlarda (kamyon+römork) her bir kısma ait C_D değerinin değişik rüzgar hücum açılarındaki değişimi.....	24

Şekil 2.26: Değişik hücum açılarında, bir kamyonun (çekici+yarı römork) C_D değerinin ilave aygıtlarla değişimi.	24
Şekil 2.27: Taşıtın boylamasına ekseninin yatayla yaptığı açı α_a 'ya göre C_D ve C_L değerlerinin değişimi.	25
Şekil 2.28: Bir binek taşıtı için, taşıt yükünün C_D ve C_L değerlerine etkisi.	25
Şekil 2.29: Bir binek taşıtı için, zemin açıklığının C_D ve C_L değerlerine etkisi	26
Şekil 2.30: Taşıt geometrisi ile alakalı değişik işletme faktörlerinin C_D değerine etkisi.....	26
Şekil 2.31: Taşıtların birbirleri arkasından seyir etmeleri durumunun C_D değerine etkisi.	27
Şekil 3.1 : Tekerlek yuvarlanma direncinin ölçüm şeması.	29
Şekil 3.2 : Deney sırasındaki taşıta ait hız-zaman diyagramı.	30
Şekil 3.3 : Taşıt yüzeyine yerleştirilen bir basınç alıcısının şematik görünümü.....	32
Şekil 3.4 : Taşıt etrafındaki akışın rüzgar tüneline duman kullanılarak görüntülenmesi.	33
Şekil 3.5 : Açık devreli bir rüzgar tüneline şematik görünümü.	34
Şekil 3.6 : Açık devreli rüzgar tüneline şematik görünümü.	34
Şekil 3.7 : Kapalı devreli rüzgar tüneline şematik görünümü.	35
Şekil 3.8 : BMW 10 m ² 'lik akustik rüzgar tüneline lülesi içindeki zeminin simetri eksenindeki basınç dağılımı.....	37
Şekil 3.9 : Deney odası uzunluğu ile kollektör kesit alanının lüle kesit alanına oranının, ölçülen C_D değerine olan etkisi.....	38
Şekil 3.10: Rüzgar tüneline yol simülasyonu için uygulanabilecek çeşitli yöntemler.	39
Şekil 3.11: Farklı üç zemin simülasyonunda, taşıt altındaki simetri ekseninde dinamik basınç [$C_{pt}=(P_t - p_\infty)/q_\infty$] dağılımı.....	40
Şekil 4.1 : İki boyutlu bir hesap alanı için ağ sistemi ve kontrol hacimleri.....	45
Şekil 4.2 : Tipik bir kontrol hacminin (denetim elemanı) görünümü.	46
Şekil 4.3 : Kaymalı ağ sistemi ve kontrol hacimlerinin genel görünümü.	51
Şekil 5.1 : Kutu etrafındaki akışa ait, düzgün olmayan yapıli üçgensel elemanli ağ sistemi.	56
Şekil 5.1 : Kutu etrafındaki akışa ait, düzgün olmayan yapıli üçgensel elemanli ağ sistemi.....	56
Şekil 5.2 : Hata eğrilerinin hesaplama sırasında iterasyon adımları ile değişimi.....	58
Şekil 5.3 : Geometrik modelin (dikdörtgen kutu) etrafındaki akışa ait eş toplam basınç büyüklüğü dağılımı eğrileri (içi dolu).....	59
Şekil 5.4 : Kutu etrafındaki akışa ait eş toplam basınç büyüklüğü dağılımı eğrileri (içi boş).	59
Şekil 5.5 : Kutu etrafındaki akışa ait eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (içi dolu)..	60
Şekil 5.6 : Kutu etrafındaki akışa ait eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (içi boş). ..	60
Şekil 5.7 : Kutu etrafındaki akışa ait eş k büyüklüğü dağılımı eğrileri (içi boş).	61
Şekil 5.8 : Kutu önü ve üstündeki akım çizgilerinin görünümü.	61
Şekil 5.9 : Kutu alt ve üst yüzeylerindeki basınç katsayısının değişimi.....	62
Şekil 5.10: Giriş ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısının değişimi.	62
Şekil 6.1 : Hesap alanının genel görünümü (koşu numarası 1= KN 1).....	64
Şekil 6.2 : Kutuya yakın bölgelerdeki ağ sisteminin görünümü (KN1).	64
Şekil 6.3 : Hata eğrilerinin iterasyon adımları boyunca değişimi (KN1)	65
Şekil 6.4 : Kutuya yakın kısımlardaki akışa ait eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN1).	65
Şekil 6.5 : Kutuya yakın bölgelerdeki akım çizgilerinin görünümü (KN1).	66

Şekil 6.6 : Kutu önü, giriş kısmındaki akışa ait 0 - 0.35 arasındaki basınç katsayısı değerine sahip konumlar (KN1).....	67
Şekil 6.7 : Kutunun yakın çevresinde ve arka kısmındaki akım çizgilerinin görünümü (KN1).	67
Şekil 6.8 : Kutunun ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN1).	68
Şekil 6.9 : Giriş ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısı değişimi (KN1).....	68
Şekil 6.10: Kutu üst yüzeyindeki basınç katsayısı değişimi (KN1)	69
Şekil 6.11: Kutuya yakın bölgelerdeki, etrafındaki akışa ait eş toplam basınç büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 1).	69
Şekil 6.12: Kutuya yakın bölgelerdeki eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 2) ...	71
Şekil 6.13: Giriş kısmındaki, 0-0.35 arasındaki basınç katsayısına sahip konumlar (KN 2).	71
Şekil 6.14: Kutunun ön ve arka yüzeyindeki basınç katsayısı dağılımı (KN 2).	72
Şekil 6.15: Kutunun yakın çevresinde ağ sisteminin görünümü (KN 3).....	73
Şekil 6.16: Kutu önü ve üstündeki akım çizgilerinin görünümü (KN 3)	73
Şekil 6.17: Kutunun arka bölgesindeki akım çizgilerinin görünümü (KN 3).....	74
Şekil 6.18: Kutu ön ve alt kısmındaki akışa ait eş hız büyüklüğü eğrileri dağılımı (KN 3).	74
Şekil 6.19: Kutunun alt ve üst yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 3).....	75
Şekil 6.20: Kutunun ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 3). ..	75
Şekil 6.21: Kutunun alt ve üst yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 4).....	76
Şekil 6.22: Kutunun ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 4). ..	76
Şekil 6.23: Kutunun alt ve üst yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 5).....	77
Şekil 6.24: Kutunun ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 5). ..	78
Şekil 6.25: Kutu alt ve üst yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 6).	78
Şekil 6.26: Kutu ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 6).	79
Şekil 6.27: Hesap alanının tümü üzerindeki eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 9).....	81
Şekil 6.28: Giriş kısmındaki, 0-0.2 arasındaki basınç katsayısına sahip konumlar (KN 9).	81
Şekil 6.29: Giriş ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısının değişimi (KN 9).....	82
Şekil 6.30: Kutu üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 9).	82
Şekil 6.31: Kutu ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 9).	82
Şekil 6.32: Giriş ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısı değişimi (KN 11).....	83
Şekil 6.33: Kutu ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 11).	84
Şekil 6.34: Kutu üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 11).	84
Şekil 6.35: Giriş ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısı değişimi (KN 13).....	86
Şekil 6.36: Hesap alanının tümü üzerindeki eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 13).	86
Şekil 6.37: Kutu alt ve üst yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 13).	87
Şekil 6.38: Kutu ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 13).	87
Şekil 6.39: Hesap alanının tümü üzerindeki eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 15).	89
Şekil 6.40: Giriş ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısının değişimi (KN 15).....	89
Şekil 6.41: Durma hattı boyunca basınç katsayısının değişimi (KN 15).	90
Şekil 6.42: Kutu ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısının değişimi (KN 15). ..	90
Şekil 6.43: Kutu üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısının değişimi (KN 15).....	91
Şekil 6.44: Ağ sisteminin iyileştirilmiş halinin kutuya yakın kısımlardaki görünümü (KN 16)	92

Şekil 6.45: Giriş ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısı değişimi (KN 12).....	92
Şekil 6.46: Giriş ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısı değişimi (KN 16)	93
Şekil 6.47: Kutu üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 12).	93
Şekil 6.48: Kutu üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 16).	94
Şekil 6.49: Kutu ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 12).	94
Şekil 6.50: Kutu ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 16).	95
Şekil 6.51: Simetri düzlemi üzerinde kutuya yakın bölgelerdeki eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 17).....	97
Şekil 6.52: Simetri düzlemi üzerinde kutunun yakın çevresindeki bölgelerde eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 17).	97
Şekil 6.53: Giriş (giriş+ön duvar) ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısı değişimi (KN 17).....	98
Şekil 6.54: Kutu alt ve üst yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 17).	98
Şekil 6.55: Kutu ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 17).	99
Şekil 6.56: Simetri düzlemi üzerinde kutunun yakın çevresindeki bölgelerde eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 18).	100
Şekil 6.57: Giriş (giriş+ön duvar) ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısı değişimi (KN 18).....	101
Şekil 6.58: Kutu üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 18).	101
Şekil 6.59: Kutu ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 18).	102
Şekil 6.60: 2-boyutlu durum için eş k büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 6).	103
Şekil 6.61: 3-boyutlu durum için, simetri düzlemindeki eş k büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 18).	103
Şekil 7.1 : Otobüsün yakın çevresindeki ağ sisteminin görünümü (KN 19).	105
Şekil 7.2 : Hesap alanının tümü üzerindeki eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 19).	105
Şekil 7.3 : Otobüsün yakın çevresindeki eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 19).	106
Şekil 7.4 : Otobüs ön ve üst bölgelerindeki akım çizgilerinin görünümü (KN 19).	106
Şekil 7.5 : Kutu ön ve üst bölgelerindeki akım çizgilerinin görünümü (KN 11)....	107
Şekil 7.6 : Otobüs ön ve üst bölgesindeki hız vektörlerinin görünümü (KN 19). ..	108
Şekil 7.7 : Otobüs arka bölgesindeki akım çizgilerinin görünümü (KN 19).....	108
Şekil 7.8 : Kutu arka bölgesindeki akım çizgilerinin görünümü (KN 11)	109
Şekil 7.9 : Otobüs arka bölgesindeki hız vektörlerinin görünümü (KN 19)	109
Şekil 7.10: Otobüsün yakın çevresindeki eş k büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 19)	110
Şekil 7.11: Kutunun yakın çevresindeki eş k büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 11).	111
Şekil 7.12: Otobüs üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 19). ...	111
Şekil 7.13: Otobüs ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 19). ..	112
Şekil 7.14: Giriş ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısı değişimi (KN 19).....	112
Şekil 7.15: Otobüs üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 20)....	113
Şekil 7.16: Otobüs ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 20) ..	114
Şekil 7.17: Hesap alanının tümü üzerindeki eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 21).	115
Şekil 7.18: Otobüsün yakın çevresindeki eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 21).	115
Şekil 7.19: Otobüsün yakın çevresindeki eş statik basınç büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 21).	116

Şekil 7.20: Giriş ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısı değişimi (KN 21).	116
Şekil 7.21: Otobüs üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 21)	117
Şekil 7.22: Otobüs ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 21)...	117
Şekil 7.23: Otobüsün yakın çevresindeki iyileştirilmiş ağ sisteminin görünümü (KN 22).	118
Şekil 7.24: Otobüsün yakın çevresindeki eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 22).....	119
Şekil 7.25: Otobüs üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 22)....	119
Şekil 7.26: Otobüs ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 22)..	120
Şekil 7.27: Otobüsün yakın çevresinde iyileştirilmiş ağ sisteminin görünümü (KN 23).	121
Şekil 7.28: Otobüs üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 23).	121
Şekil 7.29: Otobüs ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 23)..	122
Şekil 7.30: Otobüs üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 24)....	123
Şekil 7.31: Otobüs ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 24)...	123



SEMBOL LİSTESİ

a	: İvme
A	: Alan
C_D	: Aerodinamik direnç katsayısı
C_L	: Aerodinamik kaldırma katsayısı
C_p	: Basınç katsayısı
D	: Difüzyon akısı
F	: Konveksiyon akısı
F_B	: İvme direnci
F_D	: Aerodinamik direnç kuvveti
F_L	: Aerodinamik kaldırma kuvveti
F_R	: Yuvarlanma direnci
f_R	: Yuvarlanma direnci katsayısı
F_S	: Aerodinamik yanlama kuvveti
F_{st}	: Yokuş direnci
G	: Taşıt ağırlığı
k	: Türbülans kinetik enerjisi
m	: Taşıt kütlesi
p	: Basınç
p_∞	: İşletme (atmosfer) basıncı
Pe	: Peclet sayısı
PM	: Yunuslama momenti
RM	: Yuvarlanma momenti
r	: Statik tekerlek yarıçapı
R	: Dinamik tekerlek yarıçapı
S	: Kaynak terimi
t	: Zaman
V	: Hız
YM	: Yanlama momenti
α	: Yolun yatayla yapmış olduğu açı; yakınsama katsayısı
ε	: Türbülans disipasyon hızı
φ	: Genel bağımlı değişken
λ	: İvme direnci katsayısı
μ	: Viskozite
ρ	: Yoğunluk
Γ	: Difüzyon katsayısı

TAŞIT AERODİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

ÖZET

Karayolu taşıtlarına seyirleri esnasında çeşitli direnç kuvvetleri etkimektedir. Özellikle yüksek seyir hızlarında bu direnç kuvvetleri arasındaki en önemli bileşen aerodinamik direnç olmaktadır. Son 25-30 yıl içerisinde yakıt tüketiminin düşürülmesi ve egzoz emisyonlarının azaltılması önemli bir araştırma konusu olmuştur. Bu nedenle aerodinamik direncin düşürülmesi büyük bir önem arz etmektedir. Buna ilaveten kişi başına düşen yakıt tüketimi ve egzoz emisyonu miktarını düşürmek maksadıyla toplu taşımacılık özendirilmektedir.

Bu çalışmada ilk olarak karayolu taşıtlarının aerodinamik özelliklerinden bahsedilmektedir. Daha sonra bu aerodinamik özelliklerin saptanmasında kullanılan deneysel ve sayısal yöntemlerden söz edilmektedir. Taşıt aerodinamik özelliklerinin saptanması amacıyla yapılan uygulamalar ise sayısal yöntemler yardımı ile yapılmaktadır.

Ülkemiz şartlarında en çok kullanılan toplu taşımacılık aracı otobüstür. Bu nedenle burada otobüs etrafındaki akışın çözümlemesi yapılmaktadır. Otobüs aerodinamiğinin incelenmesi amacıyla kurulacak olan sayısal modelleme yaklaşımı, ilk olarak otobüse benzer boyutlara sahip bir kutu üzerinde yapılmaktadır. Kutunun aerodinamik özelliklerinin incelenmesi aşamasında elde edilen sonuçlar doğrultusunda geliştirilen sayısal modelleme yaklaşımı, daha sonra otobüs etrafındaki akışa uygulanmaktadır. Bu şekilde otobüs etrafındaki akışın yapısı ve otobüsün aerodinamik özellikleri hakkında veriler toplanmaktadır.

Kutu etrafındaki akış çözümlemelerinde, kutu ön yüzeyinin küt bir şekil olmasından ötürü, kutu önünde önemli derecede statik basınç yükselmesi ve durma noktası gözlemlenmektedir. Kutunun ön kısmındaki sivri köşelerden ötürü kutu üst

yüzeyinin ön kısmında akış ayrılmaları ve negatif basınç değerleri oluşmaktadır. 2-boyutlu durum için akış ayrılması bütün üst yüzey boyunca devam ederken, 3-boyutlu durum için üst yüzeyin arka kısmında akış yeniden yüzeye temas etmektedir. Kutu altındaki akışta oluşan yüksek hızlar nedeniyle negatif basınç dağılımı oluşmaktadır. Kutunun arka bölgesinde ise üst ve alt kısımlardan gelen akışlar kutu arka yüzeyinden ayrılmakta ve burada karışmaktadır. Oluşan akış ayrılmaları ve türbülans hareketleri bu bölgede negatif basınç değerleri yaratmaktadır. Kutu önündeki pozitif basınç ve kutu arkasındaki negatif basınç değerleri kutu üzerine bir aerodinamik direnç kuvveti oluşturmaktadır.

Burada otobüs aerodinamiği 2-boyutlu olarak incelenmektedir. Otobüs etrafındaki akış, otobüs ön yüzeyinin daha eğimli ve yuvarlak hatlara sahip olmasından ötürü daha farklı bir hal almaktadır. Otobüs ön yüzeyinin aşağısında basınç yükselmesi ve durma noktası gözlemlenmektedir. Otobüs ön üst köşesinde oluşan çok yüksek hızlar nedeniyle bu bölgede ani basınç düşüşü olmaktadır. Otobüs ön üst köşesinin yuvarlaklığı nedeni ile akış daha az dağılmakta ve üst yüzeyde, kutudaki gibi akış ayrılmaları olmamaktadır. Otobüs altındaki akışta ise kutuya göre çok yüksek hızlar oluşmakta ve negatif basınç dağılımı görülmektedir. Otobüs arka bölgesinde ise üst ve alttan gelen akışlar karışmaktadır. Oluşan akış ayrılmaları ve türbülans nedeniyle negatif basınç oluşmaktadır. Kutu modelinde olduğu gibi ön kısımdaki pozitif basınçlar ile arka kısımdaki negatif basınçlar otobüs üzerine bir aerodinamik direnç kuvveti yaratmaktadır. Ancak ön kısımdaki basınç yükselmesinin azalması nedeni ile, oluşan aerodinamik direnç katsayısı değeri kutununkine göre çok daha düşüktür.

Buradaki hesaplamalara göre model geometrisi üzerinde yapılan kısmi değişiklikler, model etrafındaki akışı ve aerodinamik direnç katsayısı değerini oldukça etkilemektedir.

Hesaplanan aerodinamik direnç katsayısı değeri ve akışın yapısı oluşturulan sayısal model ile de alakalıdır. Blokaj etkisinin azalması için hesap alanının yüksekliği, otobüs önündeki basınç yükselmesinin giriş sınırına kadar varmaması için giriş kısmı mesafesi ve ard iz yapısının tam olarak çözümlenebilmesi için çıkış kısmı mesafesi uzun tutulmaktadır. Yolun taşıta göre bağlı hareketini temsil amacıyla zemine hareket verilmektedir. Otobüs yüzeylerindeki basınç dağılımının hassas olarak

özömlenebilmesi için, otobüs yüzeylelerine yakın bölgeler ile ard iz bölgesindeki ağ sistemi elemanlarının boyutları küçültölerek çözüm iyileştirmesi yapılmaktadır.

Sayısal model oluşturulurken yukarıdaki dikkat edilecek hususlar yanında 3-boyutlu özömleme yapılması ve dönen tekerleklerin simöle edilmesi daha doğru sonuçlar verecektir.



INVESTIGATION OF VEHICLE AERODYNAMICS BY NUMERICAL METHODS

SUMMARY

There are different kinds of resistance forces acting onto vehicles, when vehicles are moving. Especially at high speeds, aerodynamic drag force becomes most important component, among those resistance forces. Last decades, reducing fuel consumption and exhaust emissions have been very important research areas. Therefore reducing the aerodynamic resistance (drag) force has great importance. Additionally, to reduce the fuel consumption and exhaust emissions per person, public transportation is incited.

In this study, firstly, the aerodynamic characteristics of road vehicles are mentioned. After that, experimental and numerical methods specifying those aerodynamic characteristics are explained. The applications of specifying vehicle aerodynamic characteristics are made by using numerical methods.

Busses are common public transportation vehicles in our country. Because of this, the flow around a bus is analyzed here. The numerical simulation to analyze the bus aerodynamics is firstly applied to the flow around a brick, which has similar dimensions with the bus. The numerical simulation is developed from the results of the brick aerodynamic analysis. After that, this numerical approach is applied to analyze the flow around the bus. In this way, some data is obtained about the flow structure around the bus and the bus aerodynamic characteristics.

In the analysis of flow around the brick, there is pressure increase and stagnation point in front of the brick, because of its bluff shape. At the leading edge of upper surface there is flow separation and negative pressure values because of brick's sharp leading edge. In the case of 2-dimensional computation, the flow separation is maintained on the whole upper surface. However, in the case of 3-dimensional

computation, the flow reattaches at the downstream. Negative pressure distribution is developed at the lower surface of the brick because of high flow velocities. The flows coming from up and down separate from the rear surface and are mixing in the behind of brick. The flow separation and turbulent motion creates negative pressure distribution in that region. The positive pressure in front of the brick and the negative pressure in the behind of brick generate a drag force onto the brick

Here, bus aerodynamics is analyzed for 2-dimensional case. The flow around the bus creates a different case, because the front face of the bus has slopped and rounded contours. It is observed that there is a pressure increase and stagnation point at the lower part of the front surface. The pressure drops sharply, at the upper edge of the front surface, because of very high velocities in that region. The flow is less dispersed, because of having rounded form at the upper edge of the front surface. In this case, there is no flow separation above the upper surface. There are much more high velocities under the bus according to brick. As a result, negative pressure distribution is generated at the lower surface of the bus. In the behind region of the bus, the flows coming from up and down separate from the rear surface and are mixing. That can generate negative pressure distribution because of flow separation and turbulent motion. Positive pressure distribution at the front and negative pressure distribution at the rear surface generates a drag force onto the bus body. However, the drag forces acting onto the bus much less than the case of brick. Because the pressure increase in front of the bus much less than the pressure increase in front of the brick.

According to the computation of this study, the modifications applied to the body geometry affects the flow around the body and drag coefficient very much.

Computed drag coefficient and the flow structure are also related to the computational model. To reduce the blockage effect, the height of the computational domain is taken long. To reduce the propagation of pressure increase in front of the bus to the inlet boundary, the inlet section is taken long. To solve the flow wake structure completely the outlet section is also taken long. Moving ground condition is applied to simulate the relative motion of the ground to the bus. To predict the pressure distribution at the bus surfaces accurately, the mesh resolution of the regions around the bus and the flow wake are refined.

While the computational model is being built aside from the points above, 3-dimensional computation and the simulation of rotating tires will give better results.



1. GİRİŞ

Karayolu taşıtlarına seyirleri esnasında çeşitli direnç kuvvetleri etmektedir. Taşıtı harekete geçirebilmek için bu direnç kuvvetlerini yenmek gereklidir. Günümüzde en çok kullanılan tahrik kaynağı içten yanmalı motorlar olup, bu motorlarda hava ile yakıt karışımının yakılması ile elde edilen enerji taşıtı harekete geçirir. Yakıt belli bir ekonomik bir değer ifade ettiğinden ötürü, yakıt tüketiminin düşürülmesi, aynı görevi daha ucuza yerine getirme anlamına gelmektedir. 1970’li yıllarda başgösteren petrol krizi nedeniyle taşıtların yakıt ekonomisi önemli bir gündem maddesi olmuş ve bu konudaki araştırma-geliştirme çalışmaları hız kazanmıştır.

Bunun yanında yakıtın yanması sonucu açığa çıkan zararlı egzoz gazı emisyonu da insan sağlığını ve doğal çevreyi tehdit eder hale gelmiştir. CO₂ emisyonu da insan sağlığını direkt olarak tehdit etmemekle beraber, atmosferdeki CO₂ konsantrasyonunun artımı sera etkisi denilen küresel ısınmaya yol açmakta; bu da iklimlerin değişmesine ve doğanın dengesini bozucu bir etkiye neden olmaktadır. Bu sebeplerden ötürü egzoz gazı emisyonlarına da son yıllarda sınırlandırmalar getirilmiştir. Bu sınırlandırmaların sağlanabilmesi için gerek motordaki yanma performansının geliştirilmesi gerekse de yakıt tüketiminin düşürülmesi gerekmektedir. Bunlara ilaveten birim kişi başına yakıt tüketimi ve egzoz emisyonu miktarını düşürebilmek maksadıyla toplu taşımacılık da özendirilmelidir.

Taşıta etkiyen direnç kuvvetleri ne kadar az olursa enerji gereksinimi de o oranda daha az olacaktır. Bu nedenle direnç kuvvetlerinin değerini azaltmak önemli bir araştırma konusudur. Öncelikli olarak bu direnç kuvvetlerinin değerlerini ve enerji gereksimine etkiye mertebeleri tesbit edilmelidir. Özellikle son otuz yıl içerisinde artan seyir hızı kabiliyeti nedeniyle aerodinamik direnç, yakıt tüketimindeki en önemli bileşen olmuştur. Çünkü aerodinamik direnç kuvveti seyir hızının karesi ile artmakta olup, özellikle şehir dışındaki otoyollarda önemli mertebelere ulaşmaktadır.

Bu çalışmada karayolu taşıtlarına etkiyen direnç kuvvetlerinden kısaca bahsedildikten sonra, karayolu taşıtlarının aerodinamik özelliklerinin incelenmesi üzerinde durulacaktır. Bu inceleme deneysel ve sayısal yöntemlerle yapılmakla beraber, burada daha çok sayısal yöntemler üzerinde durulmakta ve otobüs aerodinamiği üzerinde uygulamalar yapılmaktadır. Otobüs aerodinamiğinin incelenmesi amacıyla kurulacak olan sayısal modelleme yaklaşımı, ilk olarak otobüse benzer boyutlara sahip bir kutu üzerinde yapılmaktadır. Kutu etrafındaki akışın yapısı ve kutunun aerodinamik özelliklerinin incelenmesi aşamasında elde edilen sonuçlar doğrultusunda geliştirilen sayısal modelleme yaklaşımı, daha sonra otobüs etrafındaki akışa uygulanmaktadır. Bu şekilde otobüs etrafındaki akışın yapısı ve otobüsün aerodinamik özellikleri hakkında veriler toplanmaktadır.

Ele alınacak olan geometrik modellerin oluşturulması GAMBIT yazılımında yapılmaktadır. Bu modellerin aerodinamik çözümlemesi de FLUENT yazılımında yapılmaktadır. Bu çözümlemede, model etrafındaki akışın şekli, akım çizgileri, hız vektörleri, hız ve basınç dağılımları, model yüzeyi üzerindeki basınç katsayısı dağılımı ve modele etkiyen aerodinamik direnç katsayısının değerleri elde edilmektedir. Elde edilen sonuçlar literatürde bulunan daha önceki çalışmalarla beraber değerlendirilmektedir.

Otobüs etrafındaki dış akış çözümlemesi; otobüs geometrisinin akışa daha uygun hale getirilmesi, aerodinamik direnç katsayısı değerinin düşürülmesi, akış nedeniyle oluşan taşıt yüzeyi kirlenmesi ve rüzgar gürültüsü gibi rahatsızlıkların azaltılması ile otobüs içi ısıtma ve havalandırma konularındaki geliştirme çalışmalarına yardımcı olmaktadır.

2. KARAYOLU TAŞITLARI AERODİNAMİĞİ

Karayolu taşıtları aerodinamiği denildiğinde akla gelen aerodinamik özellikler; taşıta etkiyen aerodinamik kuvvetler ve katsayıları, taşıt etrafındaki akışın şekli olup bunların yakıt ekonomisi, taşıt stabilitesi ve seyir konforu ile olan ilişkisi önemli bir araştırma konusudur.

2.1 Karayolu Taşıtlarına Etkiyen Direnç Kuvvetleri

Karayolu taşıtları hareketleri esnasında çeşitli direnç kuvvetlerine maruz kalır. Bu direnç kuvvetleri tahrik tekerleklerinde ihtiyaç duyulan moment ve güç gereksiniminin ve dolayısıyla yakıt tüketiminin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Aşağıdaki kısımlarda bu hareket dirençleri teker teker ele alınıp incelenmektedir.

2.1.1 Tekerlek Direnci

Kuru bir zeminde düz hareket eden tek bir tekerleğin direnci yaklaşık olarak yuvarlanma direncine eşit olmaktadır. F_R yuvarlanma direnci olmak üzere, taşıtın toplam tekerlek direnci,

$$F_R = \sum_{j=1}^n f_{Rj} F_{Zj} \quad (2.1)$$

olmaktadır. Burada f_R yuvarlanma direnci katsayısını, F_Z de tekerlek yükünü ifade etmektedir. Genellikle bir taşıtın bütün tekerleklerinin yuvarlanma direnci katsayıları yaklaşık olarak eşit kabul edilebilir. Tekerlek yükleri F_{Zj} 'lerin toplamı da düz yolda G toplam taşıt ağırlığına (eğimli zeminde $G \cdot \cos \alpha$ ' ya) eşit olduğundan,

$$F_R = f_R \sum_{j=1}^n F_{Zj} = f_R \cdot G \cdot \cos \alpha \quad (2.2)$$

olarak yazılır. Ayrıca yolların eğimlerinin pek olmadığı düşünülürse taşıtın toplam tekerlek direnci yaklaşık olarak,

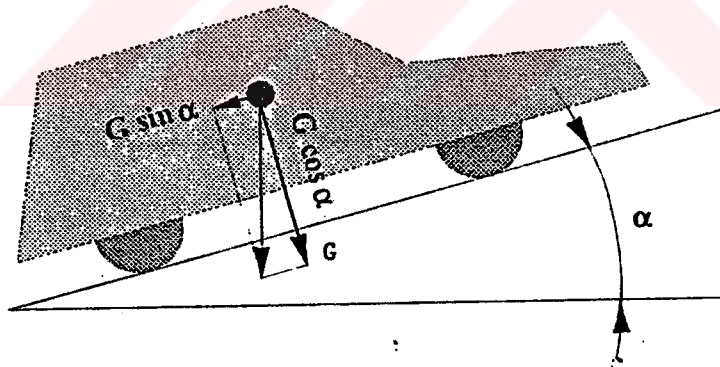
$$F_R = f_R \cdot G \quad (2.3)$$

şeklinde yazılabilir.

Yuvarlanma direnci daha çok lastik zemin etkileşimi sırasında oluşan sönümlenme kayıplarına dayanmaktadır. Bu nedenle, lastiğin hava basıncı, lastiğin tipi ve zeminin sertliği gibi parametrelerden etkilenmektedir. Yuvarlanma direnci, 100 km/h hıza kadar hızdan bağımsız olarak kabul edilmektedir. Ancak bu hızdan sonra lastiğin şekil değiştirme işi ile lastik yapısındaki titreşimlerin artması nedeniyle, yuvarlanma direnci az da olsa artmaktadır.

2.1.2 Yokuş Direnci

Karayolu taşıtlarının yokuşlarda hareket etmeleri durumunda zemine dik tekerlek kuvvetleri ağırlık kuvvetlerini tam olarak karşılayamazlar. Geriye şekil 2.1'den görüldüğü gibi, yokuş direnci F_{st} olarak adlandırılan $G \sin \alpha$ bileşeni kalmaktadır.



Şekil 2.1: Yokuş direncinin oluşması.

$$F_{st} = G \cdot \sin \alpha \quad (2.4)$$

Bu ifade de G taşıtın ağırlığı, α yolun yatayla yapmış olduğu açıdır. α açısının ufak olması nedeni ile $\sin \alpha$ yerine $\tan \alpha$ ve de dolayısıyla ona eşit olan p değeri konularak

hesaplamalar kolaylaştırılabilir. Burada p yokuş olarak tanımlanmakta olup, yollarda % olarak verilmektedir.

$$\sin \alpha \cong \tan \alpha = p \quad (2.5)$$

$$F_{st} = G \cdot p \quad (2.6)$$

2.1.3 İvme Direnci

Bir taşıtın hızını değiştirmek için gerekli kuvvet yalnız kütlesi ile ivmesini çarpmakla elde edilemez. Çünkü taşıtta çeşitli hızlarda dönmekte olan parçalar varolup, taşıtın hızının değişmesi bunların da dönme hızını değiştirir. İvme direnci aşağıdaki gibi tarif edilir.

$$F_B = \left(m + \sum_{j=1}^n \frac{I_{Rj}}{r_j R_j} \right) a \quad (2.7)$$

Burada, F_B ivme direncini, m taşıt kütlelerini, I_R aks atalet momentini, r statik tekerlek yarıçapını, R dinamik tekerlek yarıçapını j aks numarasını göstermektedir.

$$F_B = m \left(1 + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^n \frac{I_{Rj}}{r_j R_j} \right) a \quad (2.8)$$

Parantez içerisindeki ifade dönen kütlelerin etkisi sonucu ortaya çıkan ilave bir terim olup, kolaylık olması açısından λ ile gösterilir ve ivme direnci katsayısı adını alır.

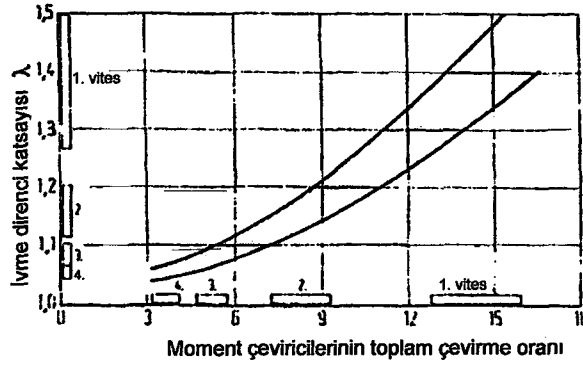
$$F_B = \lambda m a \quad (2.9)$$

Bu ifadenin anlamı, taşıta bir a ivmesi kazandırmak için gerekli kuvvetin sadece ma olmadığı, bunun λ katı kadar daha büyük olduğudur.

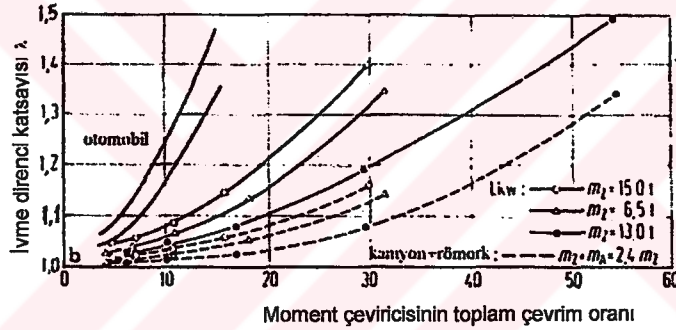
λ sayısının büyüklüğü için şekil 2.2'ye bakıldığında çevrim oranının en büyük olduğu küçük viteslerde λ en büyük değerleri almaktadır. Ticari taşıtlarda çevrim oranı büyük olmasına rağmen, motor ve dolayısı ile dönen kütlelerin bütün kütleye

oranı otomobillere göre daha küçük olduğundan (Erzi, 1997) maksimum λ aynı düzeylerde kalmaktadır (şekil 2.3).

Karayolu taşıtlarına etkiyen bu direnç kuvvetlerinin dışında aerodinamik kuvvetler de mevcuttur. Aşağıdaki bölümde bu kuvvetler üzerinde durulmaktadır.



Şekil 2.2: Otomobillerde λ 'nın çeşitli viteslerde aldığı değerler.



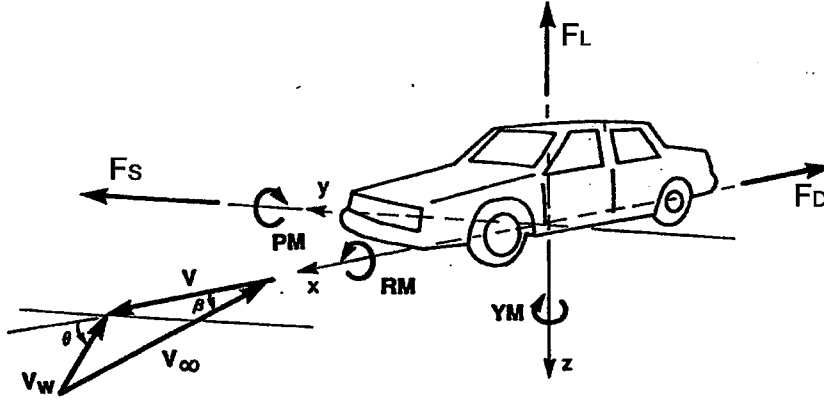
Şekil 2.3: Otomobiller ve ağır ticari taşıtlarda λ 'nın çeşitli viteslerde aldığı değerler.

2.2 Karayolu Taşıtlarına Etkiyen Aerodinamik Kuvvetler

2.2.1 Aerodinamik Kuvvet ve Moment sistemi

Karayolu taşıtları hava ortamı içinde hareket ederler. Gerek taşıt gerekse hava mutlak olarak sabit olmayıp arada bir bağlı hız olacağından aerodinamik kuvvetler oluşur. Bu kuvvetler hem araç gövdesi üzerindeki dış akış ile hem de motor, radyatör sistemi ve araç içindeki ısıtma soğutma, havalandırma maksadıyla oluşan iç akış nedeniyle türemektedir. Ancak oluşan direncin %90 dan fazlası dış akış nedeniyle oluşmaktadır.

Şekil 2.4’de aerodinamik kuvvet sistemi gösterilmiştir. Taşıta x doğrultusunda aerodinamik direnç kuvveti, y doğrultusunda aerodinamik yanlama kuvveti, z doğrultusunda aerodinamik kaldırma kuvveti etmektedir. Aynı zamanda taşıta x eksenini etrafında yuvarlanma momenti, y eksenini etrafında yunuslama momenti, z eksenini etrafında yanlama momenti etmektedir.



Şekil 2.4: Aerodinamik kuvvet sistemi.

Ayrıca taşıt hızı ile rüzgar hızı aynı doğrultu üzerinde bulunmayabilir.

2.2.2 Aerodinamik Direnç Kuvveti

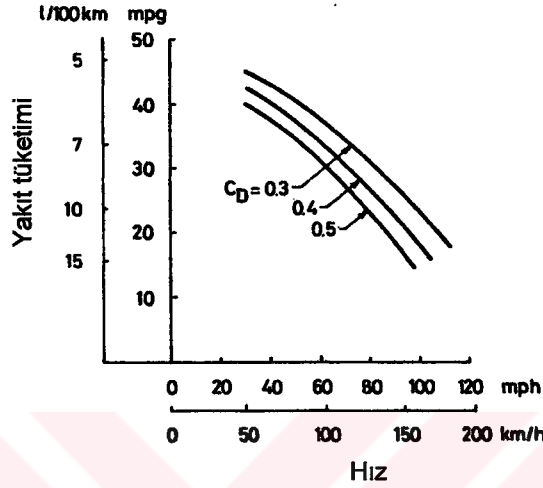
Karayolu taşıtlarına etkiyen en büyük aerodinamik kuvvet bileşeni genellikle aerodinamik direnç kuvvetidir. Taşıt etrafındaki dış akış nedeniyle oluşan taşıt yüzeyi üzerindeki normal basınç dağılımı şekil direncini, kayma gerilmeleri de yüzey sürtünmesini oluşturmaktadır. Bir binek taşıtı için oluşan aerodinamik direnç kuvvetinin %90’dan fazlası şekil direnci nedeni ile oluşmaktadır. Aerodinamik direnç kuvveti şu şekilde bulunabilir.

$$F_D = \int_A (p - p_\infty) dA_y \quad (2.10)$$

Burada p ortam basıncını, p_∞ da işletme (atmosfer) basıncını dA_y de taşıt üzerinde akışa dik doğrultudaki alan elemanını ifade eder. Buradan aerodinamik direnç katsayısı C_D şu şekilde tarif edilir.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (2.11)$$

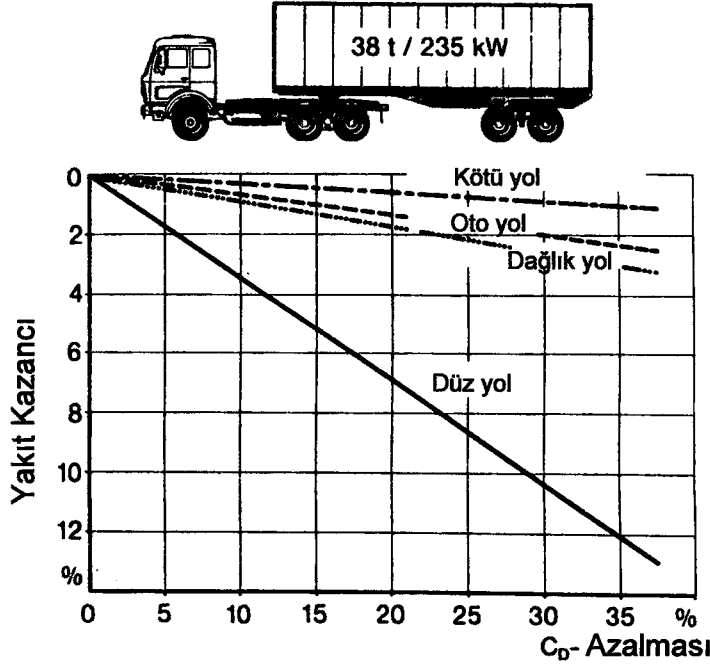
C_D katsayısı taşıtın şekline ve rüzgarın hücum açısına göre değişmektedir. Burada, ρ havanın yoğunluğunu, A taşıtın önden bakıştaki izdüşüm alanını V de taşıtın rüzgara göre bağıl hızını göstermektedir. Denklem (2.11)'den görüldüğü gibi aerodinamik direnç kuvveti hızın karesi ile artmakta ve bunu yenmek için gerekli güç de hızın kübü ile artmaktadır. Yani hız iki katına çıktığında bunu yenmek için gereken güç de sekiz katına çıkmaktadır.



Şekil 2.5: Orta büyüklükteki bir binek taşıtı için, C_D değeri düşüşünün yakıt ekonomisine olan etkisi.

Şekil 2.5'de 1060 kg kütleyle, 1.77 m^2 alın alanına ve radyal lastiklere sahip bir binek taşıtına ait C_D değeri düşüşünün daimi akış şartlarındaki yakıt tüketimine olan etkisi görülmektedir. 96 km/h'lik daimi hız şartında C_D değeri 0.5'den 0.3'e düşürüldüğünde yakıt ekonomisi %23 oranında iyileşmektedir.

Şekil 2.6'da bir kamyonu ait C_D değeri düşüşünün, değişik işletme şartlarındaki yakıt kazancına (tasarrufuna) olan etkisi görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, kamyon için C_D değerinin düşürülmesi yakıt kazancı üzerine en fazla düz yolda etkili olmaktadır (Wong, 1993). Bu nedenle taşıtların sahip oldukları C_D değerinin düşürülmesi büyük bir önem arz etmektedir.



Şekil 2.6: Bir kamyon (çekici+yarı römork) için C_D değerindeki düşüşün yakıt kazancına olan etkisi.

2.2.3 Diğer Aerodinamik Kuvvet Bileşenleri ve Taşıt Stabilitesi

Yere yakın küt cisimlerin hava içindeki hareketinde oluşan düşey kuvvet pozitif olup, cismi kaldırmaya yöneliktir. Tekerlek yükündeki bu azalma, taşıtın idaresi (kontrolü) açısından dezavantajlıdır. Çünkü lastiğin üreteceği maksimum yan kuvvet azalmaktadır. Ancak bu durum, yarış arabaları hariç, çoğu taşıt için, en azından makul seyir hızlarında, ihmal edilebilecek mertebededir. Tipik bir Avrupa arabası için aerodinamik kaldırma katsayısı C_L 0.3 olup, 60 mph da taşıt ağırlığının %3'ünden daha az kaldırma etkisi, 120 mph da ise %10 kadar kaldırma etkisi oluşmaktadır. Taşıt dinamiğinde, tekerlek yükleri dağılımını etkileyen yunuslama momenti, toplam kaldırma kuvvetinden daha etkilidir. Taşıtın, ön ve arka aks yük dağılımının değişmesi ile taşıtın yönlenme kabiliyeti değişmektedir. Artan hızla beraber negatif yunuslama momenti ile oluşan kafa vurma hareketi, taşıtın yönlenme kabiliyetini çok fazla artırmaktadır. Bu da istenmeyen bir durumdur. Ancak normal hızlarda bu etki fazla görülmez.

Bir yan rüzgar olması durumunda veya araçlar yan yana geçtiği sırada taşıta aerodinamik yanlama kuvveti, yanlama momenti ve yuvarlanma momenti etkir. Aynı zamanda aerodinamik direnç kuvveti ve kaldırma kuvveti bileşenleri ile yunuslama

momentinin değerleri değişmekte olup; normal şartlarda değerleri de artmaktadır. Yanlama kuvveti aracın ön aksı üzerine etkimektedir. Son yıllarda motor donanımı taşıtın ön kısmına yerleştirildiğinden ağırlık merkezi taşıtın ön kısmına doğru kaymıştır. Bۆylelikle oluşacak yanlama momentinin değeri dűřürűlműřtür (Hucho ve Sovran 1996).

2.3 Bazı İşlevsel (Fonksiyonel) Etkiler

Bir karayolu taşıtı etrafındaki akışta yalnızca aerodinamik kuvvet ve momentler oluşmamakta, aynı zamanda işlevsel terimi içerisine giren başka etkiler de vardır. Bu etkiler de tasarım esnasında en az kuvvet ve momentler kadar gözönüne alınır.

2.3.1 Taşıt Gۆvdesi Üzerindeki Kuvvetler

Taşıt gۆvdesi geniş ve dűz levhalardan yapılmakta olup bunlar aerodinamik zorlanmalara dayanmalıdır. Kaput ve bağaj kapakları, çerçevesiz pencereler her tűrlű koşul altında sağlam olabilmelidir. Modern hafif malzemeler titreşim yapmaya meyillidir. Ayrıca kullanılan bu malzemelerin geri kazanımları olmayıp, evre kirliliğine neden olmaktadır. Hava kanatları, spoyler vb. gibi, ilave kısımlara da özel bir dikkat gۆsterilmelidir.

2.3.2 Rűzgar Gűrűltűsű

Eskiden gűrűltűnűn esas kaynaęı olan motor ve lastik gűrűltűsű gűnűműzde azaltılmıřtır. Rűzgar gűrűltűsű, ۆzellikle binek taşıtları ve otobűsler için istenmeyen bir husustur. Gűnűműzde rűzgar gűrűltűsű oldukça azaltılmıřtır. Üst pencere (sun roof) ve yan pencerelerin açık olması dűřűk frekanslı gűrűltűye sebep olup, oldukça rahatsız edici boyuttur.

2.3.3 Tařıt Yűzeyinde Su Akıřı ve amurlanma

Tařıt yűzeyindeki su akıřı gۆrűř kabiliyetini azaltır. Ön-yan camlara sıçrayan ve biriken su temiz gۆrűřű engeller. amurlanma da farların iřlevini olumsuz etkiler. Otobűslerin yan kenarları reklam amaçlı kullanıldıęından, buraları temiz tutulmalıdır.

2.3.4 İç akış sistemi

Taşıt içinden geçen birkaç çeşit iç akış sistemi vardır. Binek ve yarış otoları için motor soğutma kanalları, artan motor hızı ve kaput altı boşluğunun küçüklüğü nedeniyle çok zor olmaktadır. Ayrıca yolcu bölümünün ısıtma ve havalandırması için de kanallar oluşturulmalıdır. Otobüslerde de hava değişim debisi yüksektir.

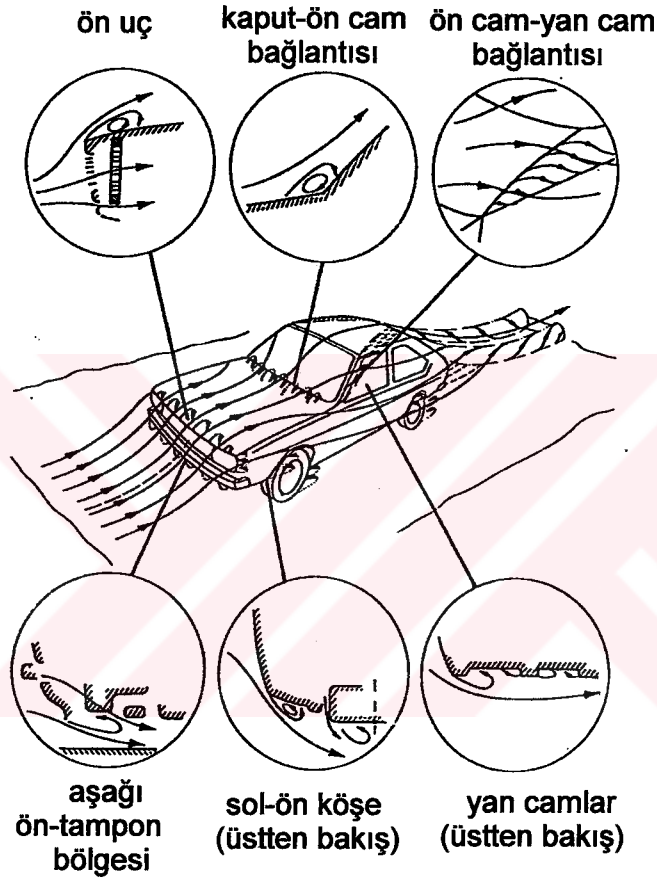
2.4 Taşıt Yüzeyindeki Akış ve İşlevsel Etkiler ile Etkileşimi

Taşıt yüzeyindeki akışın ayrıntılı olarak incelenmesi çeşitli nedenlere dayanmaktadır. Bunlar; hava girişi ve çıkışını sağlayan havalandırma açıklıklarının uygun yere yerleştirilmesi, taşıt gövdesinin bazı kısımlarında oluşacak kuvvetlerden sakınılması, rüzgar gürültüsü kaynaklarının saptanması ve yüzeylerdeki su akışı ve tozlanmanın kontrol edilebilmesi gibi nedenlerdir. Şekil 2.7’de bir binek taşıtı etrafındaki akış ve başlıca akış ayrılmaları görülmektedir.

Havalandırma kanalları yüksek basınç bölgelerine yerleştirilmektedir. Böylelikle motor soğutma havası giriş yeri, zaman içerisinde, daha alçak kaput eğrisi ile beraber aşağı doğru, durma noktasına yakın olacak şekilde kaydırılmıştır. Yolcu bölümü için havalandırma girişi yeri ön cam alt kısmının ortasına yerleştirilmekte, ancak bu durumda hava giriş debisi seyir hızına bağımlı hale gelmektedir. Hava girişinin taşıt simetri ekseninden uzağa sıfır basınç katsayısına sahip bölgeye yerleştirilmesi bu bağımlılığı ortadan kaldırmakta; ancak bu durumda sürekli çalışan bir fana gerek vardır.

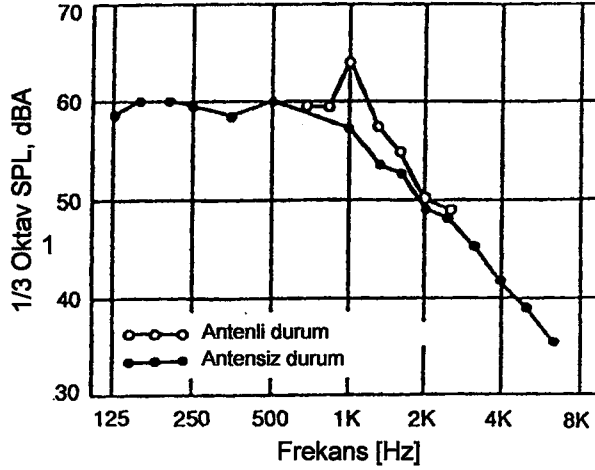
Havalandırma çıkış yerleri eskiden yüksek negatif basınç bölgelerine yerleştirilmekteydi. Bu durumda, yüksek akış hızı nedeniyle oluşan yerel rüzgar gürültüsü taşıt içerisinde gürültüye neden olur. Bu sorunu bertaraf etmek için havalandırma çıkışı yerleri düşük negatif basınç bölgelerine yerleştirilir. Ancak büyük çıkışlar görünmeyecek şekilde arka tamponun arkasına yerleştirilir. Rüzgar gürültüsü üç etkene bağlı olarak incelenir: Kaynağı, takip ettiği yol ve bunu hissedenler. Kaynaklar, pencereyi yalıyarak geçen akışlar, kaput üzerindeki büyük ölçekli ayrılma baloncuğu, yüksek hızlı akışlar veya iki kapı arasındaki boşluktaki küçük ölçekli ayrılmalar olabilir. Rüzgar gürültüsü, aynı zamanda, dış aynalar ve radyo anteni gibi taşıt gövdesi üzerindeki çıkıntılarda oluşan akış ayrılmaları

nedeniyle de oluşabilir (şekil 2.8). Gürültü yolu için işlevine göre uygulama yapılır. Saç levhalar malzemelerin absorbe edilmesiyle sönümlenir; ama pencereler için bu yapılamaz. Havalandırma açıklıkları açık kalmalıdır. Taşıtın ön kısmından kopan yüksek türbülanslı ayrılmış akış, daha geride taşıta bitişik hala gelince, bu bölgede titreşime neden olabilir. Kapı yanında bulunan dış aynalar buna örnek olarak verilebilir. Gürültüyü hissedenler de insanlar olup, gürültüye olan duyarlılıkları dikkate alınmalıdır.



Şekil 2.7: Bir binek taşıtı etrafındaki akış ve başlıca akış ayrılımları.

İçinde hareket edilen hava ortamı her zaman kuru ve temiz olmayabilir. Su damlacıkları ve tozlar havadan daha ağır olduğundan, akım çizgilerini takip edemezler. Sıçrayan su ve pislikler yalnız bunu oluşturan taşıt için rahatsız edici ve tehlikeli olmayıp, aynı zamanda civarında seyreden diğer taşıtlar için de rahatsız edici ve tehlikelidir. Bu durum özellikle kamyon ve tırlarda oluşmaktadır. Islak yollarda, kamyonların sıçrattığı su ve çamur yanından geçen bir binek taşıtının görüş kabiliyetini engeller. Bunu engellemek için akslara çamurluk takılır. Bu yöntemle



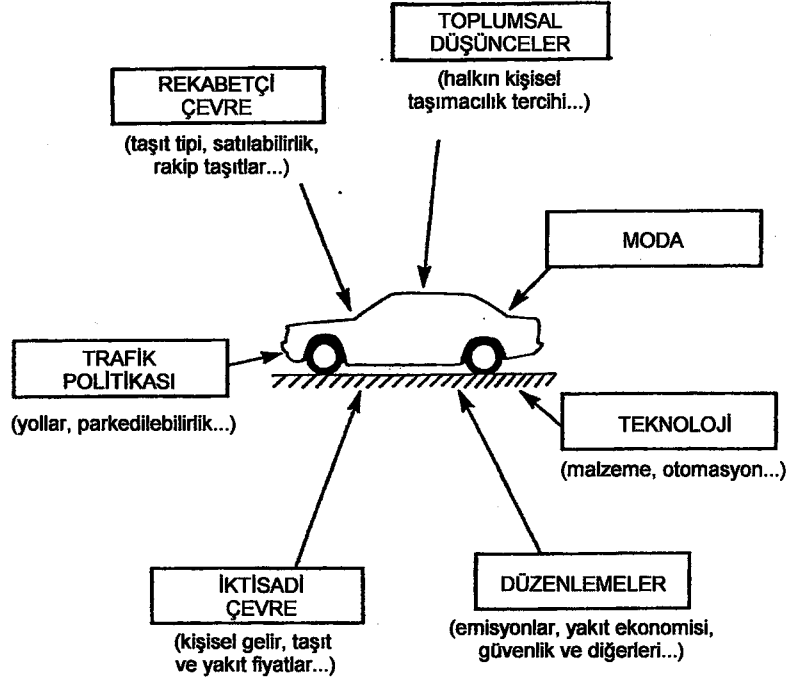
Şekil 2.8: Radyo anteninin oluşturduğu rüzgar gürültüsü.

özellikle yan rüzgarda aerodinamik direnç kuvvetinin değeri düşer ve aynı zamanda çarpışma esnasında binek taşıtlarının kamyonların altına girmesini engeller. Taşıtların kirlenmesinin önlenmesi oldukça zor olup, özellikle durma noktasına yakın yerler, mesala ön farlar, oldukça hassastır. Ancak ön farların aerodinamik olarak temiz kalabilmesi için bir yöntem bulunamamıştır (Hucho ve Sovran 1996).

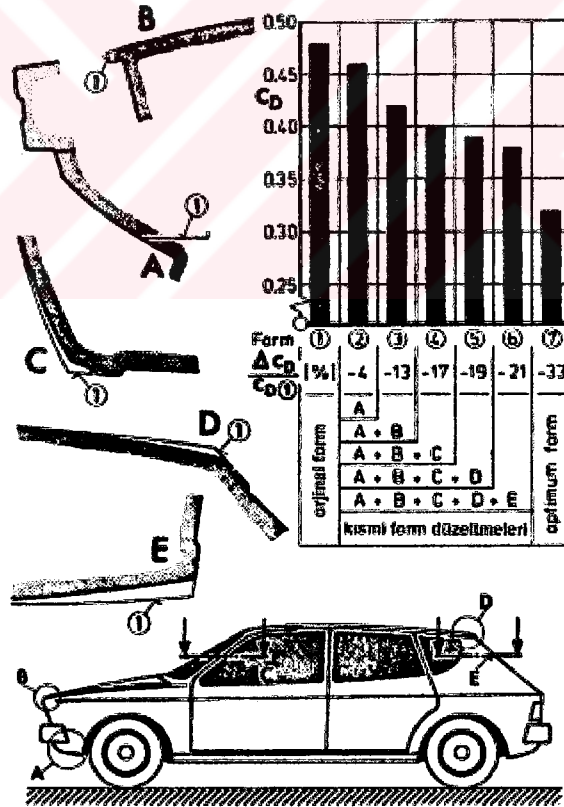
2.5 Aerodinamik Kuvvetlere Etkiyen Faktörler

2.5.1 Taşıt Şekli

Aerodinamik direnç katsayısı taşıt şekli ve işletme şartlarına göre değişmektedir. Akış ayrılmalarının olduğu yerlerde oluşacak vorteksler nedeniyle direnç artmaktadır. Bu nedenle, taşıt gövdesinin şekli; taşıt ön kısmı, arka kısmı, alt kısmı, tekerlekler, pencere çerçeveleri, dış aynalar, çamurluklar olmak üzere C_D değeri üzerine etkilidir. Taşıt tasarımı ilk olarak aerodinamikçiler tarafından yapılmayıp, stilistler tarafından yapılmaktadır. Bu nedenle taşıtın aerodinamik özellikleri, tasarımın bir sonucudur. Ayrıca taşıt tasarımı yapılırken şekil 2.9'da görülen çeşitli çevresel etkenler de vardır. Ancak taşıtın üzerinde kısmi küçük değişiklikler yapılarak aerodinamik özellikleri iyileştirilebilir (şekil 2.10).

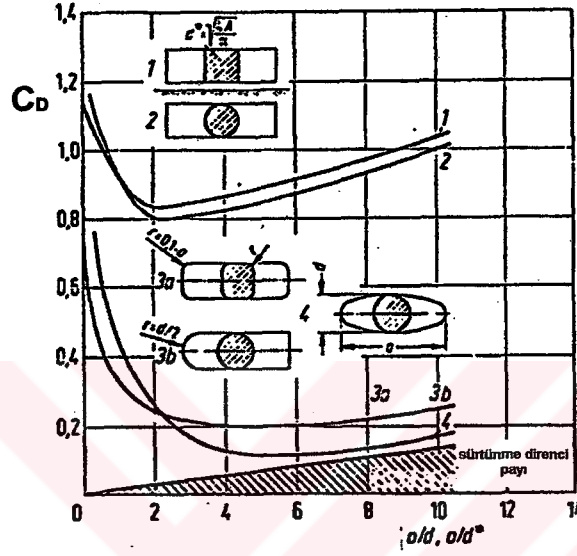


Şekil 2.9: Taşıt tasarımındaki etkili unsurlar.



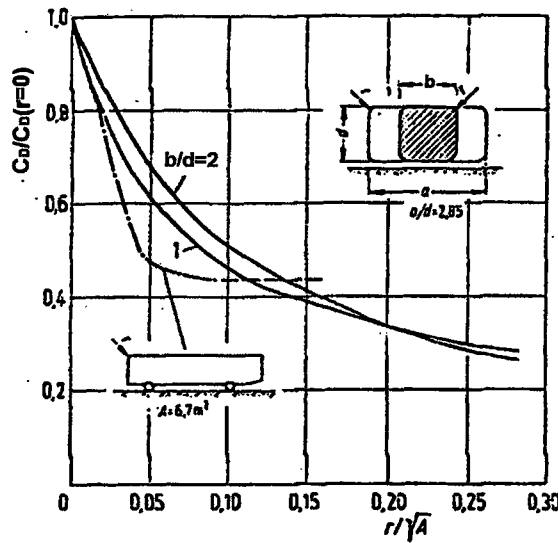
Şekil 2.10: Taşıt üzerinde yapılan kısmi değişiklikler ile C_D değerinin düşürülmesi.

Zemine yakın cisimlerin uzunluk/genişlik oranına bağlı C_D değerinin değişimi şekil 2.11'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi alnı yuvarlatılmış şekillerin C_D değerleri (3 ve 4 nolu cisimler) sivri köşelilere oranla çok daha düşüktür. Akışa uygun kış taraf akım çizgilerini düzgün tutacağından C_D değeri çok düşer (4 cismi). Ayrıca 2b ile 3b arasındaki büyük farktan görüldüğü gibi, alın şekli akışa uygun olmayan cisimlerde akım çizgilerinin daha alında dağılmasından ötürü akışa uygun bir kış formu bir işe yaramamaktadır (Güney, 1989).



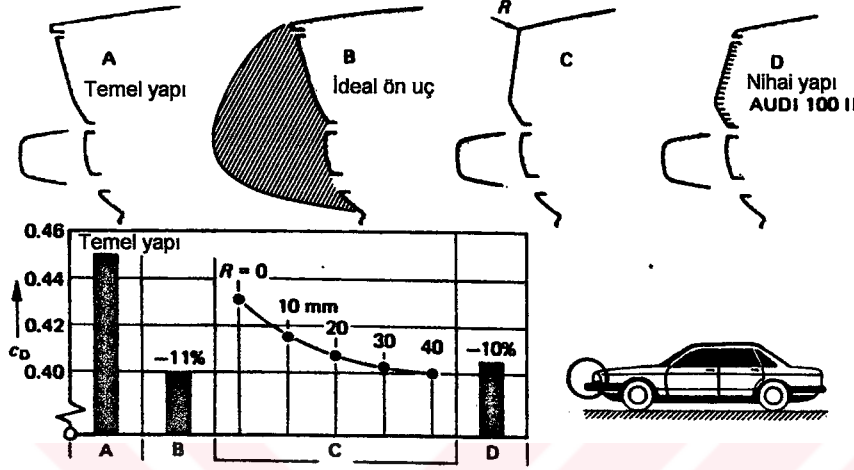
Şekil 2.11: Zemine yakın cisimlerin uzunluk/genişlik oranına bağlı C_D katsayıları.

C_D değeri cismin a uzunluğuna da çok bağlıdır. Levha şeklindeki uzunluğu olmayan cisimlerde C_D değeri yüksek iken, cisim uzadıkça C_D değeri düşer.



Şekil 2.12: Yuvarlatma oranının C_D değerine etkisi.

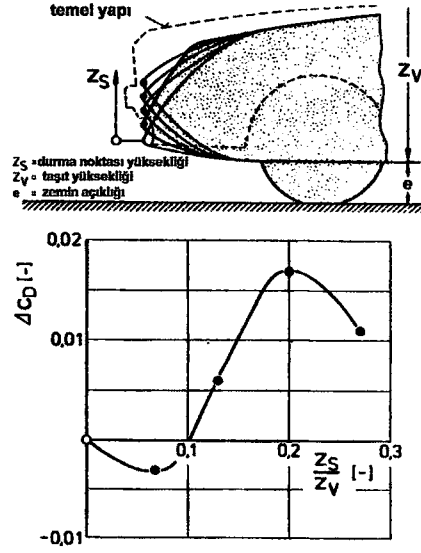
Şekil 2.12'ye göre yuvarlatmaların C_D değerini oldukça düşürdüğü görülmektedir. Ancak radyusların büyümesi kazancı azaltır. Büyük yuvarlatmaların faydalı alanı azaltacağı da unutulmamalıdır. Şekil 2.13'de bir binek taşıtına ait ön kısım şeklinin C_D değerine etkisi gösterilmekte ve burada da yuvarlatmaların C_D değerini düşürücü bir etki yaptığı gözlemlenmektedir.



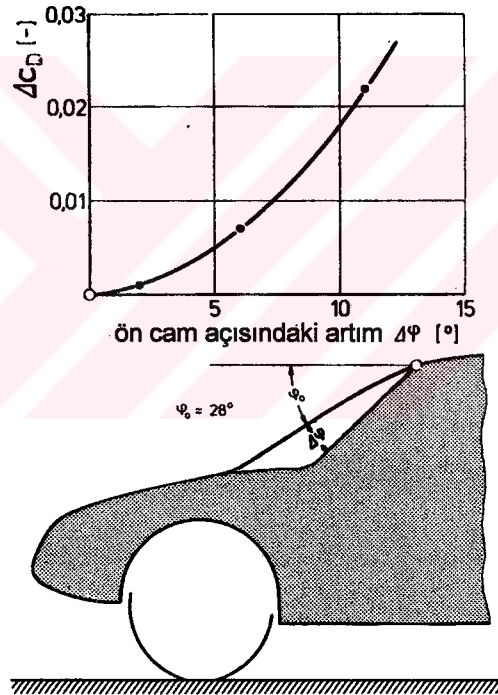
Şekil 2.13: Bir binek taşıtına ait ön kısım şeklinin C_D değerine etkisi.

Taşıt ön uç kısmının yuvarlaklığı genel olarak, aerodinamik direnci oluşturan dinamik basıncın etkiye alanını belirler. Şekil 2.14'de taşıt ön kenarının yüksekliğinin etkisini göstermekte ve bu noktanın yeri durma noktasından akan akım çizgilerinin yerini tayin etmektedir. Akım çizgileri taşıt üstü ve altındaki akış ayrılımlarını belirleyeceğinden ötürü önemlidir. Durma noktası, taşıt ön kısmı profilinde alçak konumda tutulduğunda en düşük aerodinamik direnç elde edilir. Ön kaput eğrisinin aşağıya doğru yuvarlatılması ile toplam aerodinamik direnç katsayısı değerinde %5-15 kadar düşüş elde edilir (Gillespie, 1992).

Şekil 2.15'de taşıt ön camı eğikliğinin C_D değerine olan etkisi görülmektedir. Taşıt ön camı, yataydaki taşıt damına olan akış yönünü ekilediğinden, ön camın yapmış olduğu açının özellikle kamyonlarda olmak üzere C_D değerine doğrudan etkisi vardır.



Şekil 2.14: Taşıt ön ucu tasarımının C_D değerine etkisi (ΔC_{Df} : C_D değerindeki azalma).



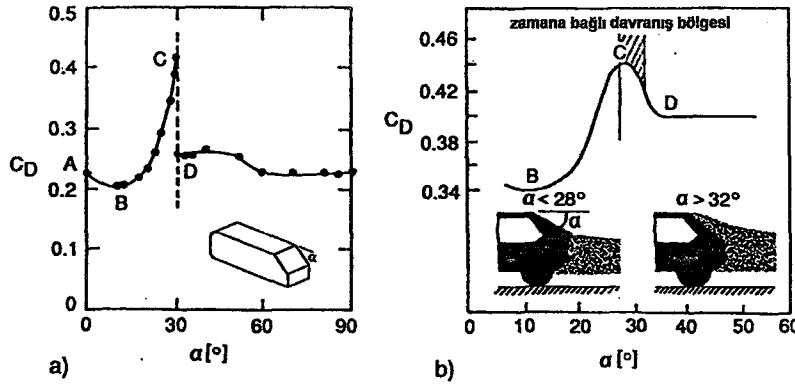
Şekil 2.15: Taşıt ön camı eğikliğinin C_D değerine etkisi.

Tablo 2.1'de bir binek taşıta ait aerodinamik direnç katsayısının bileşenleri ve olabilecek en küçük değerleri gösterilmektedir. Tablodan görüldüğü gibi C_D değerine olan en büyük katkıyı taşıt arka kısmı yapmaktadır. Bunun nedeni bu bölgede oluşan akış ayrılımlarıdır.

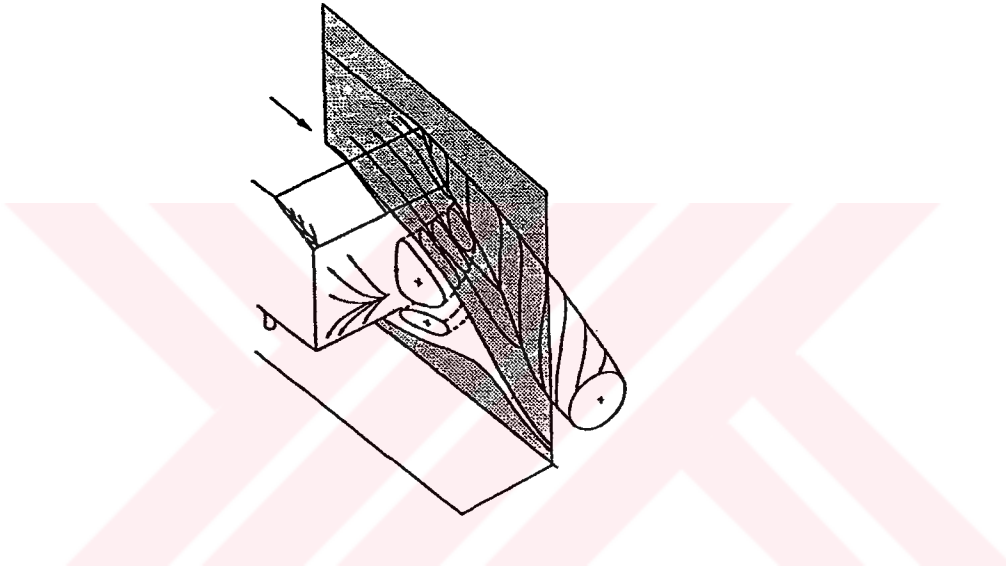
Tablo 2.1: Bir binek taşıta ait aerodinamik direnç katsayısının bileşenleri

C_D bileşenleri	Tipik değerleri	Olabilecek en küçük değerler
Taşıt önü	0.055	-0.015
Taşıt arkası	0.14	0.07
Taşıt altı	0.06	0.02
Yüzey sürtünmesi	0.025	0.025
Toplam gövde direnci	0.28	0.10
Tekerler	0.09	0.07
Su olukları	0.01	0
Pencere çerçeveleri	0.01	0.005
Dış ayna (bir adet)	0.01	0.005
Toplam çıkıntıların direnci	0.12	0.08
Soğutma sistemi	0.035	0.015
Toplam iç direnç	0.035	0.015
Bütünün toplam direnci	0.435	0.195

Taşıt üzerindeki ve arka üst yüzeyindeki akış için, taşıta benzer küt cisimlerin arka kısmındaki eğimli yüzeyler üzerine araştırmalar yapılmıştır. Akışın şekli şekil 2.16.a'da gösterilmiştir. Arka kısım düşeyde tamamen düz kare durumundan eğimli hale getirilirken, arka kenarlarda oluşan vorteksler direnç oluşturmaktadır. Ancak akışın, eğimli yüzeyin ortasından yüzeyi yalıyarak geçmesi, basınç toparlanması oluşturup, direnci düşürmektedir. Net etki direncin düşüşü yönündedir. 15° de (B noktası) direnç en düşük değerini almakta, ancak burada vorteks direnci minimum değildir. Nitekim, eğim açısı biraz daha artırıldığında net etki, akış eğimli yüzeyin ortasına bitişik olsa dahi, direncin artışı yönündedir. Aerodinamik direnç, C noktasında ise en büyük değerini almakta, biraz daha büyük açıda ve sonrasında kararsız bir bölge oluşmaktadır. D noktasında, akış eğimli yüzeyin ortasına bitişik olmayıp, tamamen ayrıdır. Bu cismin arkasındaki keskin kenarlar nedeniyle geçiş süresiz ve yönden bağımsızdır. C durumu için akış şekli, şekil 2.17'de gösterilmiştir (Ahmed, 1984).



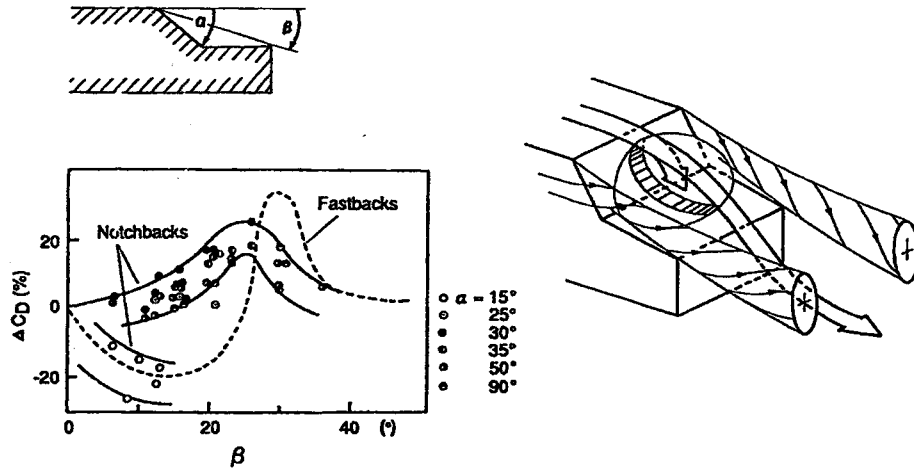
Şekil 2.16: C_D değerinin fastback taşıtta arka üst kısım eğim açısı α' ya göre değişimi ve kritik durumun oluşması a) taşıta benzer basit bir cisim b) binek taşıtı.



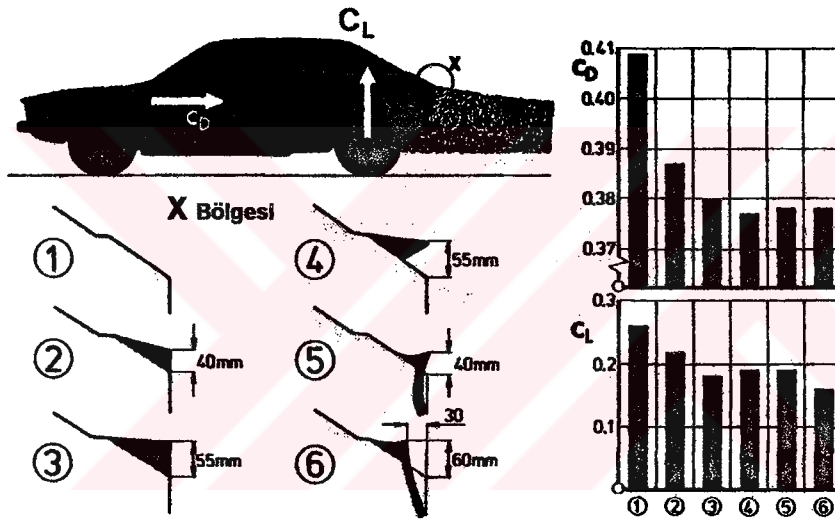
Şekil 2.17: Fastback için kritik arka üst eğim açısında (C durumu) ard izin aldığı şekil.

Şekil 2.16.b'de gerçek bir araba için (Hucho ve Sovran 1996) arkadaki akış görülmektedir. Burada eğimli yüzeyin üst kenarı yuvarlatılmış ve geçiş bölgesinde (C-D arası), D'ye doğru gidildikçe, kararsızlık gittikçe azalmaktadır. D'dekinden büyük açılarda ise açığa olan bağımlılık yok gibidir.

Şekil 2.18'de görülen notchback arabada, arka pencere açısı $\alpha \geq 25$ ve $\beta \approx 25$ için direnç en büyük olmaktadır. Bu açıda, ard izin yapısında, arka camın arkasında ayrılma baloncuğu ve vorteksler oluşmaktadır. Tasarımda, stilistler tarafından belirlenen, araç arka kısmının şekli aerodinamikçiler tarafından en düşük direnci yakalayacak şekilde düzeltilir.

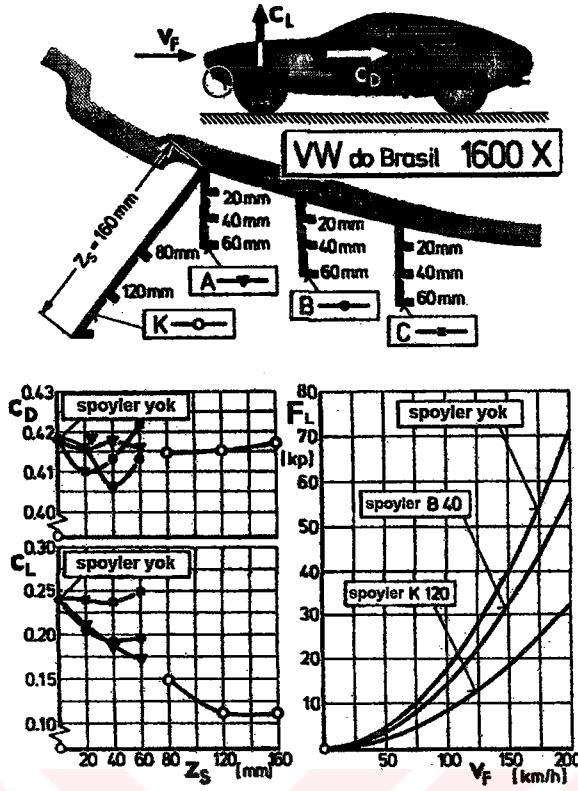


Şekil 2.18: Notchback arabada C_D değerinin araç arka şekline olan bağımlılığı ve ard izin yapısı.



Şekil 2.19: Bir binek taşıtında arka spoiler tasarımının C_D ve C_L değerlerine etkisi.

Aerodinamik kuvvetlerin düşürülebilmesi için, spoiler gibi ilave malzemeler kullanılır. Şekil 2.19'da taşıt arkasına yerleştirilen spoilerlar ile, şekil 2.20'de taşıt önüne yerleştirilen spoilerlar ile C_D ve C_L değerlerinde bir düşüş gözlemlenmektedir. Böylelikle binek taşıtlarında taşıt geometrisini çok değiştirmeden C_D ve C_L değerlerinde bir iyileşme gözlemlenmektedir (Gillespie, 1992).



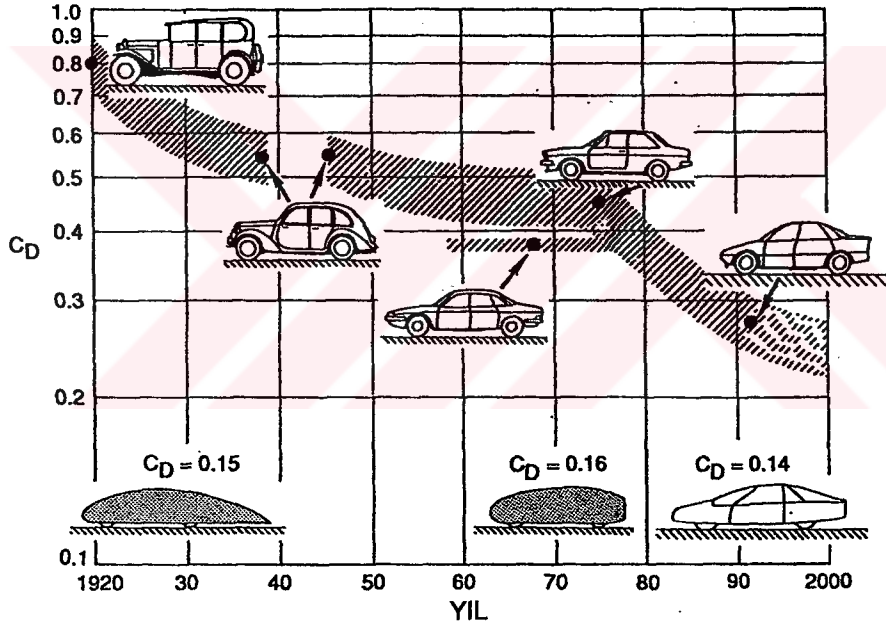
Şekil 2.20: Bir binek taşıtında ön spoiler tasarımının C_D ve C_L değerlerine etkisi.

Kamyon gibi ticari taşıtlar kutuya benzer şekillere sahip olduğundan daha yüksek C_D değerine sahiptir. Bunların C_D değerini düşürmek için hava saptırıcıları (hava deflektörleri) kullanılır. Şekil 2.21’de görülen 6 numaralı modelde en iyi saptırıcı kullanılmış ve C_D değeri %24 azalmıştır. 8 numaralı modelde çekici ve yarı römork arasındaki boşluğun doldurulması önemli bir fayda sağlamamıştır. 9 numaralı modelde ise dikey kenarların yuvarlatılması, yarı-römork gövdesinde düz panellerin kullanılması C_D değerini %22 düşürmüştür. Eğer bu model en iyi saptırıcı ile beraber kullanılırsa C_D değeri %34 azalmaktadır (Wong, 1993).

Geçmişte de düşük C_D değerine sahip taşıt şekilleri teoride bilinmesine rağmen düşük seyir hızlarından ötürü uygulamaya geçirilmemiştir. Ancak son otuz yıl içerisinde artan taşıt sayısı ve sanayi kuruluşları nedeniyle azalan yakıt rezervleri ve buna mukabil artan seyir hızları nedeniyle yakıt ekonomisi önemli hale gelmiştir. Buna ilaveten artan çevre kirliliği de emisyon sınırlamalarını gündeme getirmiştir. Bütün bu sebepler son otuz yıl içerisinde taşıtların C_D değerinin düşürülmesi üzerine önemli bir baskı unsuru olmuştur. Günümüzde binek taşıtları için C_D değeri 0.30 un altına inmiştir (şekil 2.22).

1		C_D 0.863	6		C_D 0.656
2		0.663	7		0.629
3		0.660	8		0.820
4		0.657	9		0.673
5		0.668	10		0.568

Şekil 2.21: Bir kamyon için, taşıt gövdesi üzerine yerleştirilmiş ilave aygıtların C_D değerine olan etkisi.



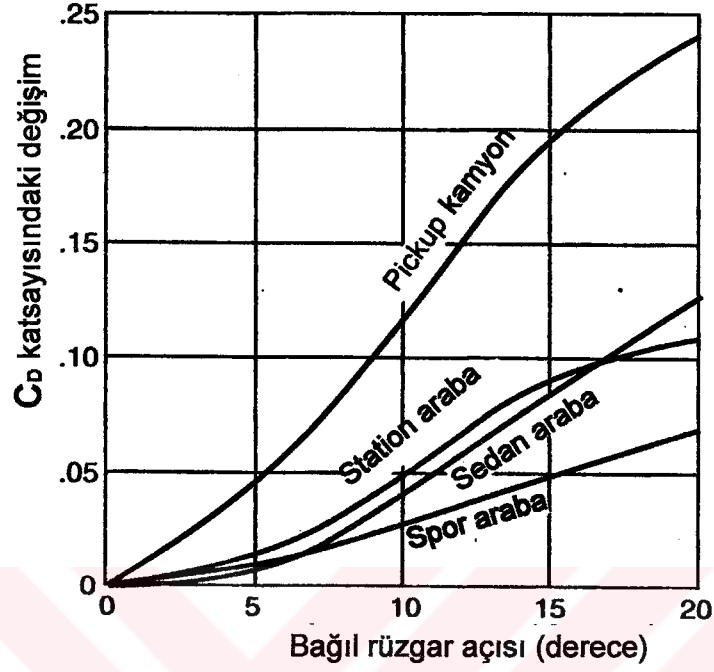
Şekil 2.22: C_D değerinin tarihsel gelişimi.

2.5.2 Çevre Rüzgarı

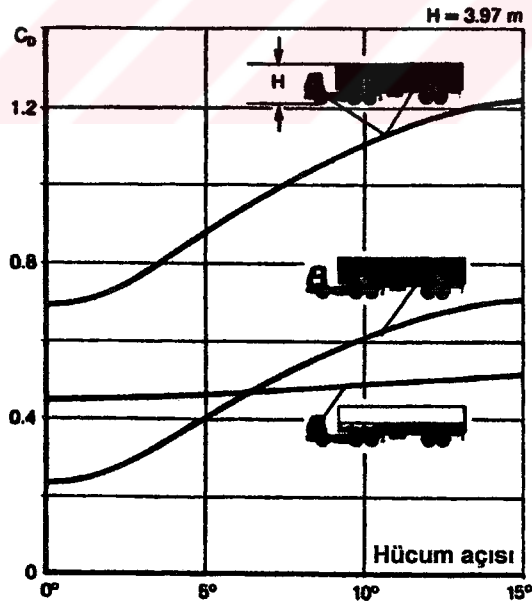
Gerçekte her zaman bir çevre rüzgarı varolup bunun hücum açısı da sıfır değildir. Genelde hücum açısı 10° 'den azdır. Yan rüzgar durumu C_D 'yi artırıcı etki yapar.

Binek taşıtlarına göre ağır ticari taşıtlar yan rüzgara karşı daha duyarlı olup, yan rüzgarla beraber C_D değerleri daha fazla artmaktadır. Şekil 2.23, 2.24 ve 2.25'de

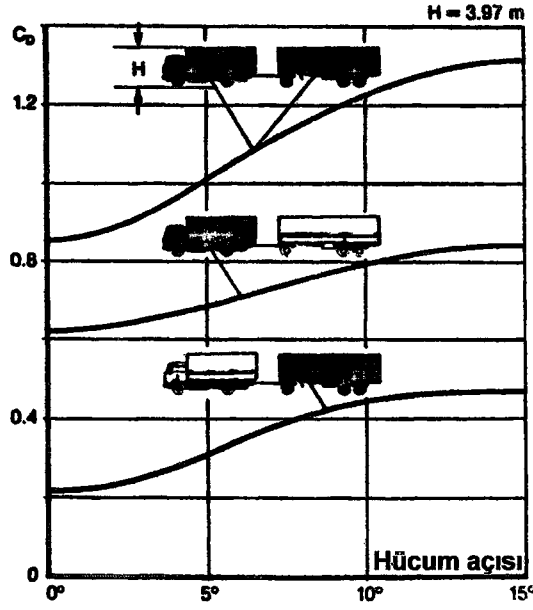
görüldüğü gibi çok sayıda ayırık aks ve römorkun bulunması akışı daha çok dağıttığından C_D değerini artırıcı etki yapmaktadır. Bu nedenle ağır ticari taşıtlar yan rüzgara karşı daha duyarlıdır.



Şekil 2.23: Rüzgar hücum açısının çeşitli taşıtlarda C_D değeri artışına olan etkisi.

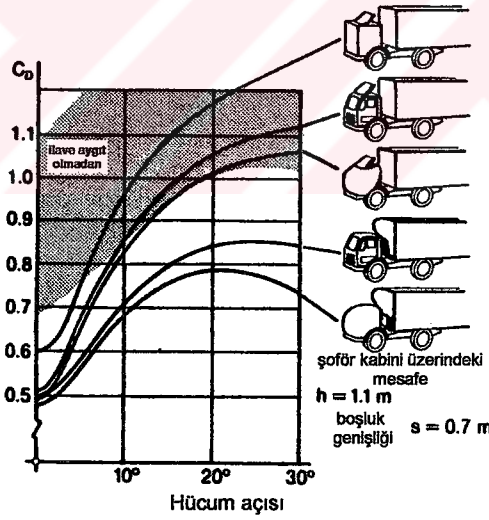


Şekil 2.24: Ağır ticari taşıtlarda (çekici+yarı römork) her bir kısma ait C_D değerinin değişik rüzgar hücum açılarındaki değişimi.



Şekil 2.25: Ağır ticari taşıtlarda (kamyon+römork) her bir kısma ait C_D değerinin değişik rüzgar hücum açılarındaki değişimi.

Ağır ticari taşıtlarda hava saptırıcıları vb. gibi ilave aygıtlar ile yan rüzgar durumundaki C_D değeri artışı azaltılabilir (şekil2.26).

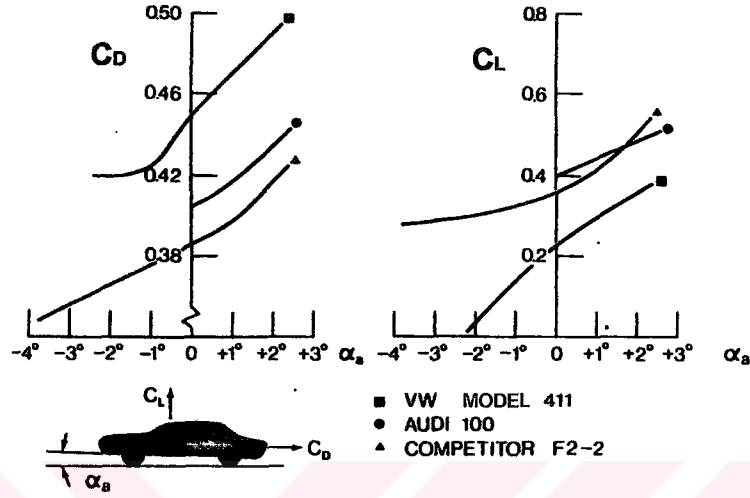


Şekil 2.26: Değişik hücum açılarında, bir kamyonun (çekici+yarı römork) C_D değerinin ilave aygıtlarla değişimi.

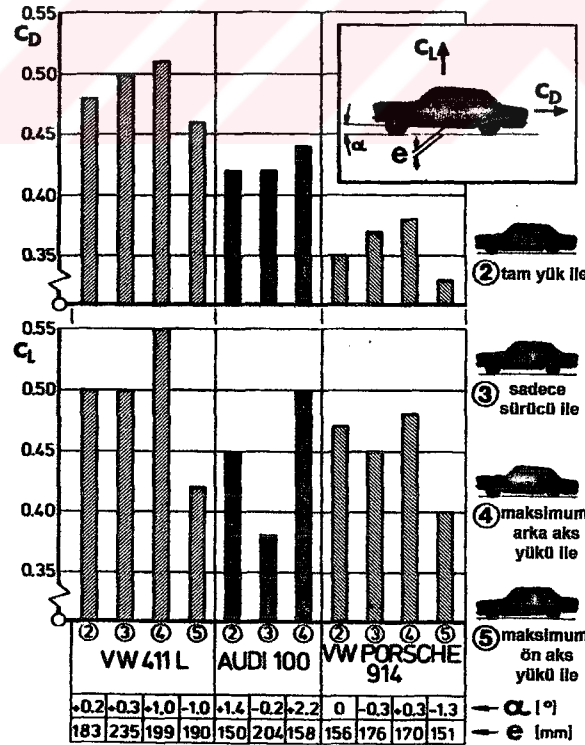
2.5.3 İşletme Şartları

Yan rüzgarın dışında, taşıtın seyri esnasındaki bazı işletme şartları da oluşan aerodinamik kuvvetleri etkilemektedir. Taşıtın boylamasına ekseninin yatayla yaptığı

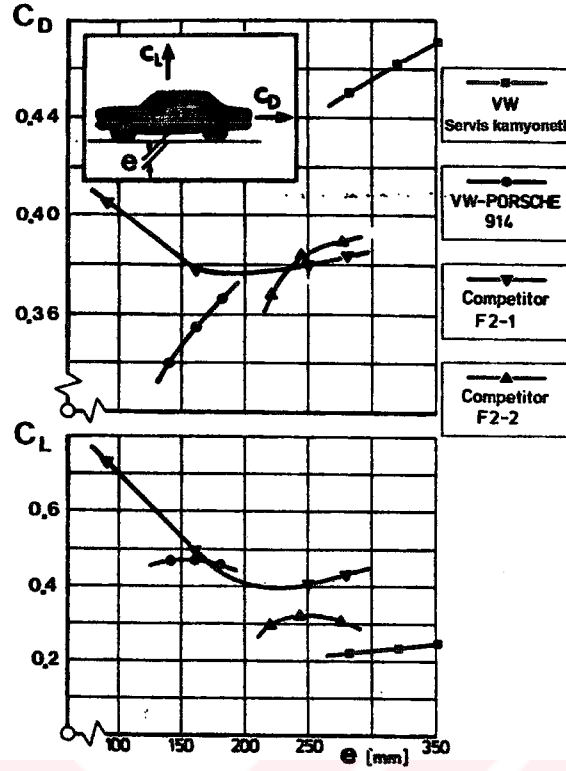
açı arttıkça C_D ve C_L değerlerinde bir artış gözlemlenmektedir (şekil 2.27). Şekil 2.28’de görüldüğü gibi değişik taşıt modelleri için, değişik yükleme tiplerinde C_D ve C_L değerleri farklı biçimde etkilenmektedir. Benzer biçimde taşıt tabanının zemine olan mesafesi farklı taşıt modelleri için C_D ve C_L değerlerini farklı etkilemektedir (şekil 2.29).



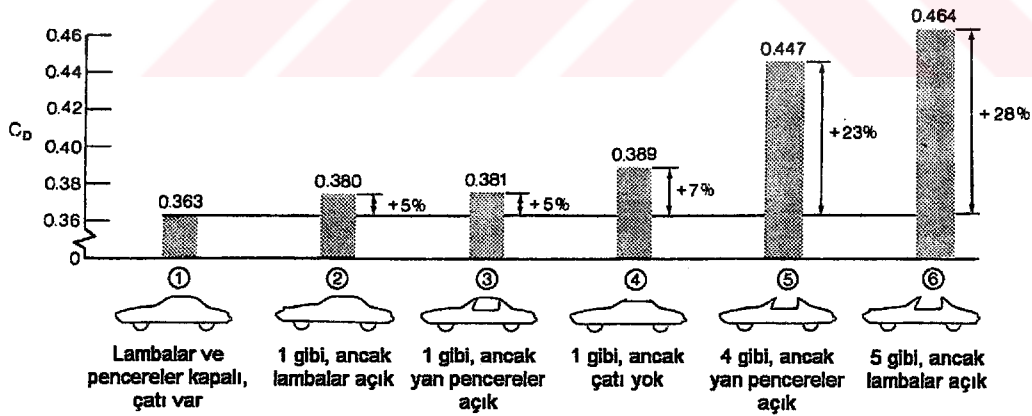
Şekil 2.27: Taşıtın boylamasına ekseninin yatayla yaptığı açı α_a 'ya göre C_D ve C_L değerlerinin değişimi.



Şekil 2.28: Bir binek taşıtı için, taşıt yükünün C_D ve C_L değerlerine etkisi.



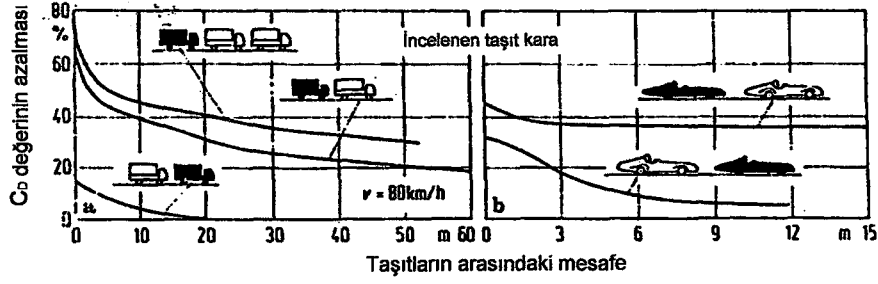
Şekil 2.29: Bir binek taşıtı için, zemin açıklığının C_D ve C_L değerlerine etkisi.



Şekil 2.30: Taşıt geometrisi ile alakalı değişik işletme faktörlerinin C_D değerine etkisi.

Pencerelerin açık veya kapalı olması gibi taşıt geometrisini değiştiren şartlarda akış şekli karmaşıklaşacağından C_D değeri artar (şekil 2.30). Taşıtların birbirleri arkasından seyir etmeleri durumlarında arkadaki taşıta etkiyen aerodinamik direnç kuvveti azalmaktadır (şekil 2.31). Çünkü öndeki taşıtın ard iz bölgesindeki düşük

basınçlar nedeniyle arkadaki taşıtın ön yüzeyine daha az basınç kuvveti etkimektedir. Arkadaki taşıtın çok yakın seyir etmesi durumunda, öndeki taşıtın ard iz bölgesindeki basınç düşüşünü azaltacağından, öndeki taşıta etkiyen aerodinamik direncin değerini biraz azaltır.



Şekil 2.31: Taşıtların birbirleri arkasından seyir etmeleri durumunun C_D değerine etkisi.

3. KARAYOLU TAŞITLARINDA AERODİNAMİK ÖZELLİKLERİN DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

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

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

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

3.1 Yol Deneyleri

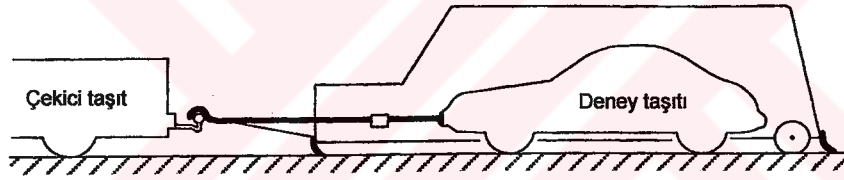
Yol deneylerinin en büyük faydası, gerçek yol şartlarında gerçek bir taşıtın denenmesidir. Bu nedenle yol deneyleri taşıt aerodinamiği incelemelerinde önemli bir yer tutmaktadır.

Deney esnasında, deney ortamında denenen taşıt ve ölçümleri yapacak bir donanım 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 (rüzgarlar) de bağımlıdır. Ayrıca, aerodinamik yükler rüzgar tüneline sabit bir ölçü donanımı ile ölçülürken, yol deneylerinde benzer ölçümler için dolaylı yöntemler kullanılmaktadır.

3.1.1 Aerodinamik Direncin Ölçülmesi

Yol deneylerinde, aerodinamik direncin ölçülmesi, aerodinamik dirence ilaveten seyirhattı sürtünmesi ve tekerlek yuvarlanma direncinin de bulunmasından ötürü güçlük arzirmektedir. Yol deneylerinde, aerodinamik direncin ölçülebilmesi için yuvarlanma direncinin bilinmesine gerek vardır. Yuvarlanma direncinin tesbiti için şekil 3.1'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.

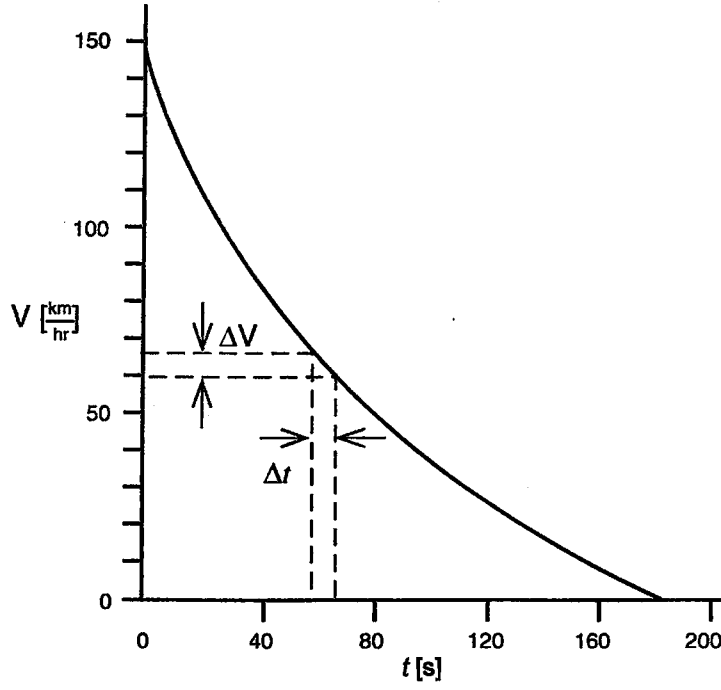
Bazı deneylerde toplam seyir kuvveti, seyir milindeki momentin ölçülmesi ile hesaplanmaktadır. Özel strain gauge'ler mil üzerine yapıştırılmakta ve seyir momenti nedeniyle oluşan birim şekil değiştirme, sabit bir alıcıya manyetik olarak iletilmektedir.



Şekil 3.1: Tekerlek yuvarlanma direncinin ölçüm şeması.

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 katedilen 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 3.2: Deney sırasındaki taşıta ait hız-zaman diyagramı.

Şekil 3.2’de örnek olarak, bir binek taşıtına ait deney sırasındaki hız-zaman diyagramı verilmiştir. Negatif ivme taşıt üzerine uygulanan kuvvetle doğru orantılı olup, bu taşıtı yavaşlatan dış kuvvet de tekerleklerin yuvarlanma direnci ile aerodinamik direnç kuvvetinin toplamına eşittir. Küçük bir zaman aralığı için, ivme değeri $\Delta V/\Delta t$ ’den hesaplanır. Bu ilkedен hareketle aşağıdaki denklemlerden toplam direnç kuvveti hesaplanır. Bu değerden tekerleklerin yuvarlanma direnci çıkarılır ve tekerleklerin dönüşünden ötürü oluşan atalet etkisi de hesaba katılır.

$$ma = F \quad (3.1)$$

$$F = -m \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (3.2)$$

Aerodinamik direnç katsayısı, (2.11) denkleminde hesaplanır. Burada dinamik basıncın ve dolayısıyla taşıt hızının bilinmesine gerek vardır. Bu ölçüm pitot tübü ile yapılır. Ölçüm, taşıt nedeniyle akışta tedirgiliklerin oluşmadığı bölgede (taşıttan yeterince uzak ön-yukarı bölgede) yapılmalıdır (Katz, 1995).

3.1.2 Aerodinamik Kaldırmanın Ölçülmesi

Yol deneylerinde, genelde kaldırma etkisi, aerodinamik yük nedeniyle süspansiyondaki şekil değişimi veya yerdeğişiminin ölçülmesi ile belirlenmektedir. Her bir tekerleğin süspansiyon yerdeğişimi 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 strain gauge'ler ile veya optik seyir yüksekliğini ölçen gauge'ler ile de ölçülebilmektedir.

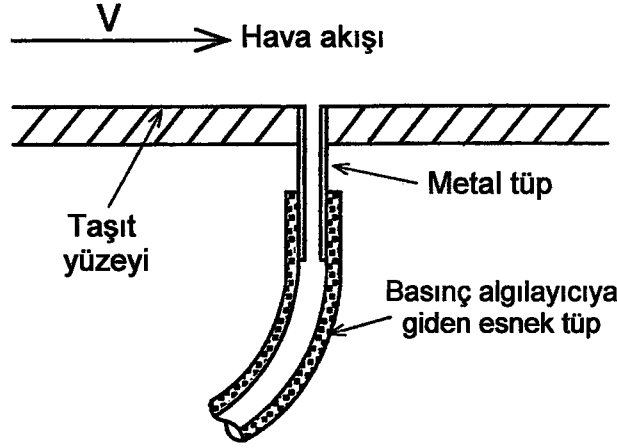
3.1.3 Yüzey Basıncının Ölçülmesi

Şekil 3.3'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 tübü ile ölçülür. Statik basınç katsayısının matematiksel ifadesi denklem (3.3)'de verilmektedir.

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} \quad (3.3)$$

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 3.3: Taşıt yüzeyine yerleştirilen bir basınç alıcısının şematik görünümü.

3.1.4 Akışın Görüntülenmesi

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

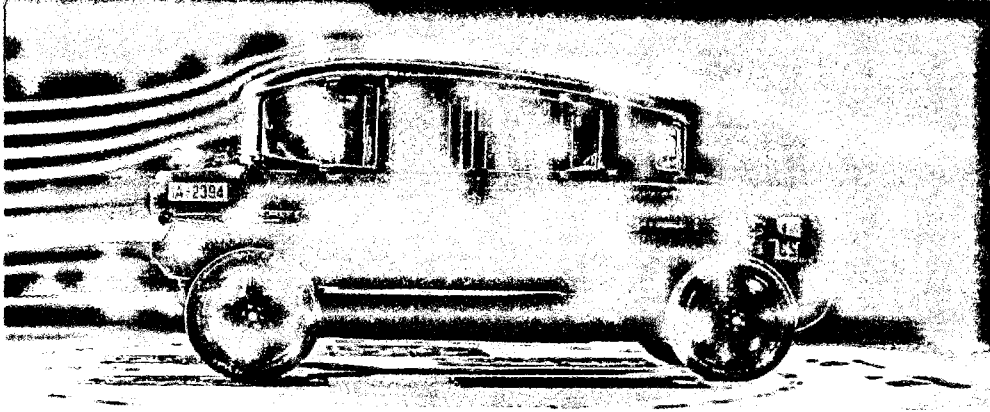
Akışın görüntülenmesi yöntemleri, taşıt yüzeyi üzerinde ve taşıtın üstündeki akışın görüntülenmesi olmak üzere başlıca iki kısma ayrılabilir. Birincisi için, akış yönü ile kolayca bükülebilen püsküller (bir ucundan yüzeye yapıştırılmış kısa pamuk veya yün iplikleri) sıkça kullanılır. Taşıt yüzeyine bitişik 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 katılmış yağlar) akım çizgilerinin gözlemlenmesi ile de elde edilebilir.

İkinci kısımda yeralan taşıt üstündeki (çevresindeki) akışın görüntülenmesi için, en çok rüzgar tünellerinde taşıt üzerine yollanan dumanın akım çizgileri gözlemlenir. Şekil 3.4’de duman çizgileri taşıt modeli önüne yerleştirilen tüplerle oluşturulmaktadır.

Yol deneylerinde akışın görüntülenmesinin sonuçları 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 zorluğu oluşturmaktadır.



Şekil 3.4: Taşıt etrafındaki akışın rüzgar tüneline duman kullanılarak görüntülenmesi.

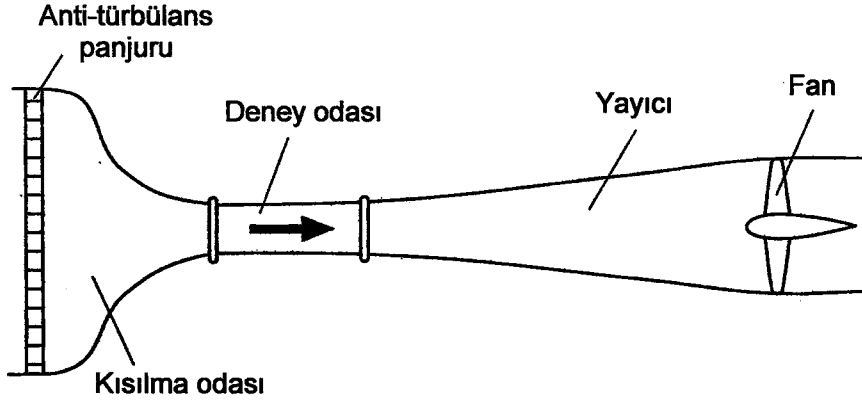
Ayrıntılı yol deneyleri, genel olarak rüzgar tünelleri deneylerine göre daha pahalı olup, sadece taşıtın tam ölçekli modeli üzerinde deney imkanı mevcuttur. Bu nedenle, ayrıntılı aerodinamik yol deneyleri daha az popülerdir fakat bir çok deney programında, kısmi aerodinamik deneyler sıkça uygulanabilmektedir.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

3.2 Rüzgar Tüneli Deneyleri

Rüzgar 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. Rüzgar tüneli, deney şartlarının iyi kontrol edildiği ve dış atmosferik şartlardan bağımsız bir ortam sunmaktadır.

3.2.1 Rüzgar Tünelinin Yapısı

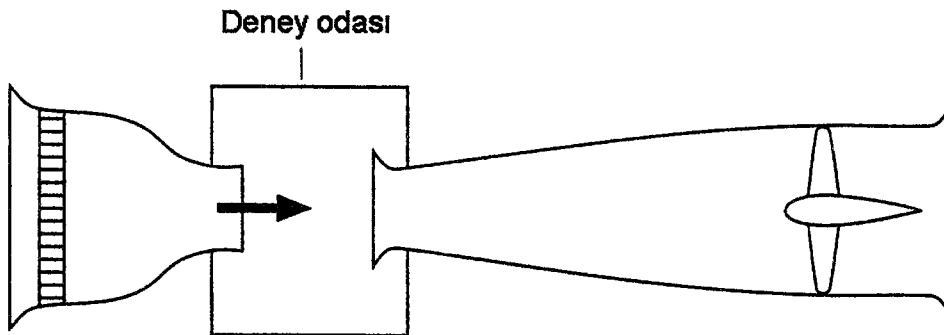
Rüzgar tünelinin basit bir şeması şekil 3.5’de verilmiştir. Burada fan havayı hareket ettirmektedir. Havanın yoğunluğu hemen hemen sabit olduğundan, denenen modelin yerleştirildiği en dar kesitte (deney odası), hava en yüksek hıza erişir. Deney odası



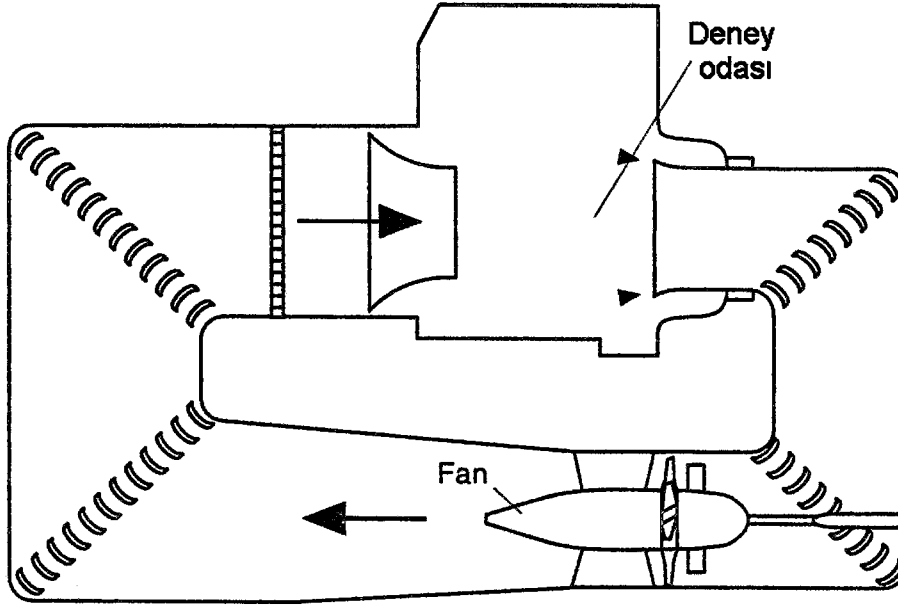
Şekil 3.5 : Açık devreli bir rüzgar tünelinin şematik görünümü.

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

Şekil 3.6'daki rüzgar tüneli açık devreli tiptir. Eğer fandan sonra bir geri dönüş kanalı bağlanırsa, kapalı devreli tip elde edilir (şekil 3.7). Böylece havanın sahip olduğu momentum dışarı atılmamış olur ve fan sadece duvarlar ile modelin yarattığı sürtünmelere karşı iş yapar (Katz, 1995).



Şekil 3.6: Açık devreli rüzgar tünelinin şematik görünümü.



Şekil 3.7: Kapalı devreli rüzgar tünelinin şematik görünümü.

3.2.2 Rüzgar Tünelinde Kullanılan Modeller

Tarihsel olarak binek taşıtlarının rüzgar tünelineki 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.

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 tünelineki türbülans dercesinin yapay olarak artırılması 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, mesala evvelki yılın modeli üzerine, rüzgar tüneli modeli olarak da kullanılabilir.

3.2.3 Rüzgar Tüneli Deneylerinde Karşılaşılan Bazı Sorunlar

Karayolu taşıtları rüzgar tüneline denenirken başlıca 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 katedilmiştir.

3.2.3.1 Blokaj Sorunu

Taşıtın önden bakıştaki kesit alanının, tünel lülesinin çıkış kesit alanına oranına blokaj oranı denmektedir. Genel olarak %5'in altındaki blokaj oranları, 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 rüzgar tüneli, açık deney odalı rüzgar tüneli ve ilk ikisinin karması olan rüzgar 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.

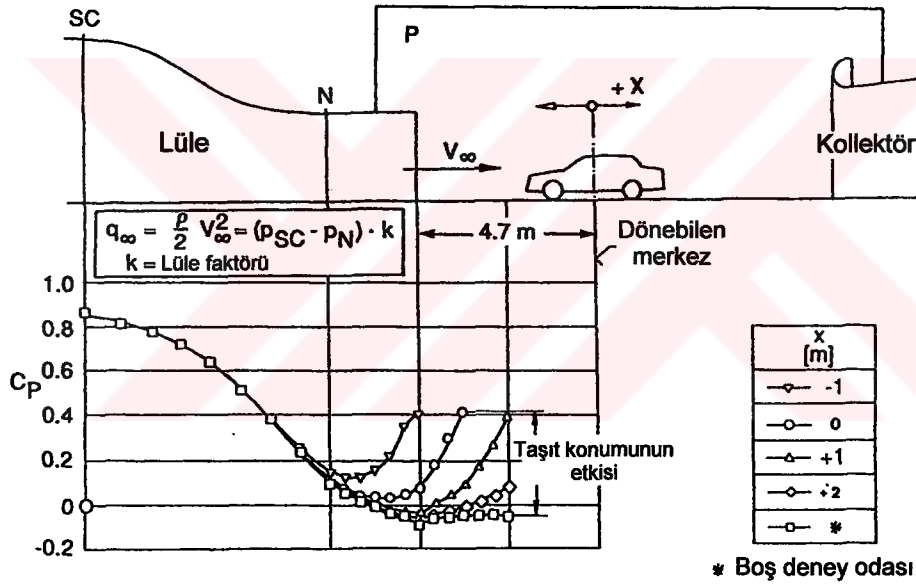
Deney, açık deney odalı tünelde taşıtın küt şeklinden ötürü üç şekilde etkilenmektedir:

1. Rüzgar hızının belirlenmesi hatalı olabilir. Eğer model lüle çıkışına çok yakın ise, modelin akışta oluşturduğu tedirginlik lüleye kadar uzanabilmekte ve lüle içerisindeki basınç alıcıların olduğu yerlerde basınç değişmektedir (şekil 3.8).
2. Deney odası uzunluğunun (L) yeterli olmaması ve kollektör kesit alanının (A_C) lüle kesit alanına oranla çok küçük olması durumlarında, kollektöre olan akışta, tedirginlikler oluşabilmektedir (şekil 3.9).

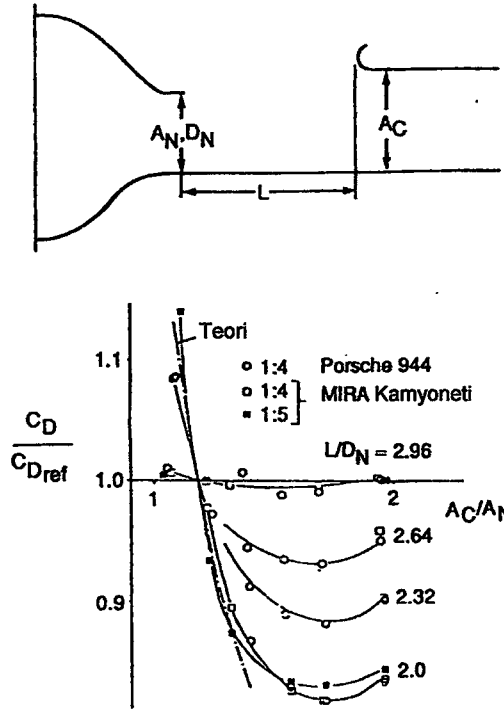
3. Taşıt civarındaki akım çizgileri, sonsuz kesit alanlı hava akışına göre daha fazla açılmaktadır. Sonuç olarak, daha düşük bir C_D değeri oluşur. Sadece bu etki blokaj düzeltmesine tabii tutulur.

Açık deney odalı tünellerde, üçüncü etki için genel olarak geçerli olan bir blokaj düzeltmesi mevcut değildir. Ancak bu etkinin küçük olduğu kabülü yapılarak genelde ihmal edilir (Hucho ve Sovran 1996).

Kapalı deney odalı tünellerde yapılan deneylerde taşıt gövdesinin küt şekli öncelikli olarak blokaja neden olmaktadır. Açık deney odalı tünelin tersine burada akım 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 3.8: BMW 10 m²'lik akustik rüzgar tünelinin lülesi içindeki zeminin simetri eksenindeki basınç dağılımı. Modelin lüle çıkışına çok yakın yerleştirilmesi durumunda, N konumundaki statik basınç yükselmektedir.



Şekil 3.9: Deney odası uzunluğu ile kollektör kesit alanının lüle kesit alanına oranının, ölçülen C_D değerine olan etkisi.

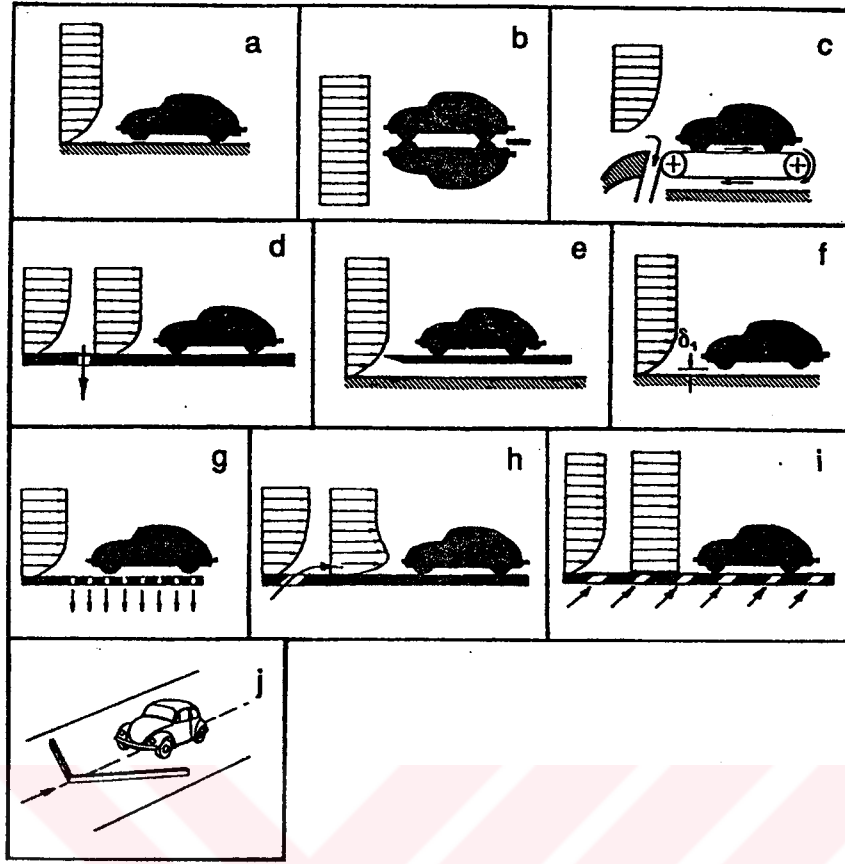
Kapalı deney odalı rüzgar tüneli için aşağıdaki blokaj düzeltme formülleri kullanılabilir (Shaw, 1988).

$$C_{p-\text{ölçüm}} = \frac{p - p_{\infty}}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2} \quad (3.4)$$

$$C_{p-\text{düzelt}} = 1 - \left(\left(1 - \left(\frac{A_v}{A_t} \right) \right)^2 (1 - C_{p-\text{ölçüm}}) \right) \quad (3.5)$$

3.2.3.2 Yolun Temsili ve Tekerleklerin Dönmesi Sorunu

Rüzgar tünelinde yolun simülasyonu için, çeşitli yöntemler şekil 3.10'da gösterilmiş olup, uygulamada daha çok şu dördü kullanılmaktadır: Sınır tabaka kontrolü olmayan durağan katı zemin (a), teğetsel üfleme (b), sınır tabaka emmeli (d ve g), hareketli kayış ile sınır tabakanın emmiliminin beraber kullanıldığı tüeller.



Şekil 3.10: Rüzgar tüneline yol simülasyonu için uygulanabilecek çeşitli yöntemler.

Yolun temsili için en basit ve yaygın yöntem, durağan, katı zemindir. Deney sırasında tekerlekler dönmeyecektir. Boş bir deney odasında sınır tabaka oluşumu, taşıt zemin açıklığının %10'u kadar olup, 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 gözükmemektedir. Günümüzde, çok sayıda hareketli kayışın kullanıldığı rüzgar 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 bir çoğunda taşıt, kuvvet dengesi olacak şekilde düşey veya yatay duran bir desteğe asılı olarak durmaktadır. Bu çubukların aerodinamik etkisi de gözönüne alınıp ayarlanmalıdır.

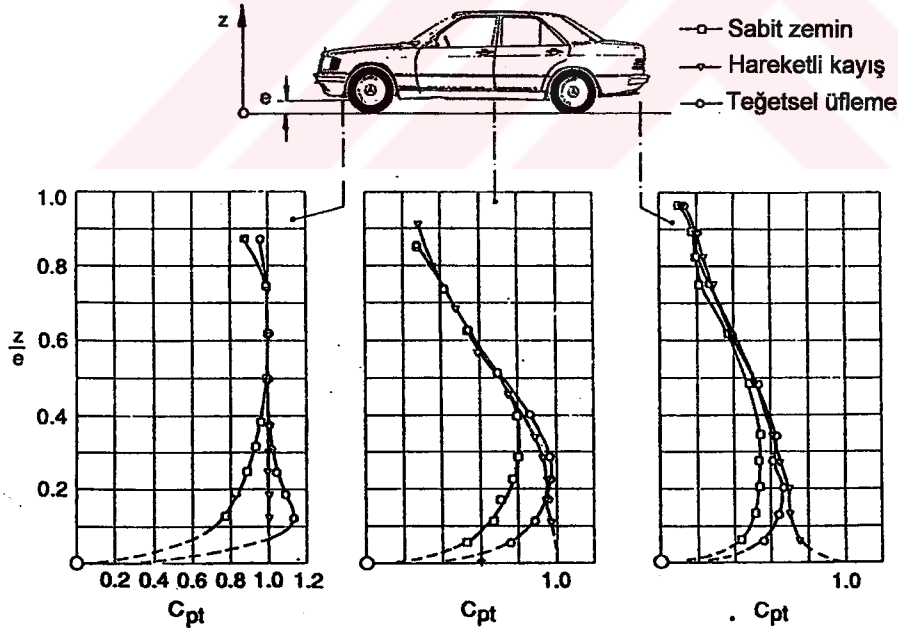
Hareketli kayış üzerindeki dönmeyen tekerlekler için kayış ve tekerlek arası boşluğa gerek olup, bu da C_D ve C_L değerlerinde hata oluşumuna neden olur. Bu nedenle, bütün hareketli kayışın kullanıldığı tünellerde, tekerlekler kayışa temas halinde olup

tekerlekler döndürülmektedir. Dönen tekerlekler, dönmeyen olanına göre C_D değerini biraz, C_L değerini önemli derecede artırır.

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

Bazı sabit zeminli rüzgar tünellerinde, sınır tabaka emilimi uygulanmaktadır. Hava, lüle çıkışında delikli bir metal levha hattı boyunca emilir.

Dağılı emme durumunda, taşıt önü ve altında geniş, ve gözenekli bir zemin bulunmaktadır. Zemin üzerinde, her bir emme odası için, konuma bağlı değişik emme debileri uygulanabilir. Ancak, nereden ne miktarda emme yapılması gerektiği tam olarak kesin değildir. Teğetsel üfleme durumunda ise üfleme debisi, boş 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 (Hucho ve Sovran 1996).



Şekil 3.11: Farklı üç zemin simülasyonunda, taşıt altındaki simetri ekseninde dinamik basınç [$C_{pt} = (P_t - p_\infty) / q_\infty$] dağılımı.

4. KARAYOLU TAŞITLARINDA AERODİNAMİK ÖZELLİKLERİN SAYISAL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

Karayolu taşıtlarında aerodinamik özelliklerin belirlenmesi için sayısal yöntemler de kullanılmakta olup, bunun esas nedeni ürün geliştirme sırasında zamandan kazanmaktır. Sayısal yöntemler, aşağıdaki iki koşulu yerine getirmelidir. Bunlardan ilki gerek koşul, ikincisi ise yeter koşuldur.

- Olayın fiziğini yeteri kadar hassas oluşturabilmelidir.
- Deneylerden daha hızlı olmalıdır.

Günümüzde, taşıtlara uygulanan sayısal yöntemlerin çok azı bu koşulları sağladığından, sayısal akışkanlar dinamiği (SAD) ürün geliştirme aracından çok hala bir araştırma konusudur. Ancak yine de sayısal yöntemlerin sağladığı faydalar vardır. Taşıta uygulanan yöntemin bir defa yeteri kadar hassas ve geçerli olduğu kabul edilmesi durumunda, denenen model mevcut olsa bile, SAD ile modelin aerodinamik özellikleri hakkında deneyden evvel bilgi sahibi olunabilir. Taşıt modelinin bilgisayar ortamında oluşturulması gerçeğini üretmeye göre daha kolay olduğundan, taşıt üzerine yapılacak kısmi değişikliklerin de rüzgar tüneline denenen modelin üzerinde değişiklikler yapmaya göre daha kolay ve hızlıdır. Yapılan hesaplama ile bu tür değişikliklerin ne tür etkiler yaratacağı hakkında hızlı bir biçimde bilgi sahibi olunabilir. SAD ile taşıt yüzeyi ve üzerindeki havanın hız ve basınç dağılımı ayrıntılı bir biçimde elde edilir.

Rüzgar tüneline karşılaşılan bazı sorunlar, sayısal yöntemde aza indirgenebilmektedir. Örneğin hesap alanı hesaplama süresini uzatmasına rağmen yeteri kadar artırılarak, rüzgar tünelineki blokaj etkisi azaltılabilir. Yol simülasyonu için de zemin ile taşıt arasındaki bağıl hareketin oluşturulması kolaylıkla uygulanabilir.

Karayolu taşıtlarına uygulanabilecek dört çeşit SAD yaklaşımı mevcuttur.

- Potansiyel akışlar
- Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemleri
- Direkt sayısal simülasyon
- Bölgesel modeller

Bu çalışmada Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemlerinin sonlu hacimler yöntemi ile çözümü üzerinde durulmaktadır.

4.1 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 şekli 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.

4.1.1 Momentumun Korunum Denklemleri

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_j} + B_j + V_j \quad (4.1)$$

Bu denklemde 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.

4.1.2 Genel Diferansiyel Denklem

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S \quad (4.2)$$

Bu denklemde ϕ genel bağımlı değişken olup, en genel halde $\phi = \phi(x, y, z, t)$ dir. Γ genel difüzyon katsayısını ve S kaynak terimini göstermektedir. Genel diferansiyel denklem dört terim içermekte olup bunlar sırasıyla; zamana bağlı terim, konveksiyon terimi, difüzyon terimi ve kaynak terimidir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho \mathbf{u} \phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + S_\phi \quad (4.3)$$

Yukarıdaki denklemler akışkan akışının laminar olma hali için geçerlidir. Ancak genelde akış türbülanslı olup, türbülans modellerine ve denklemlerine gerek vardır.

4.1.3 Türbülans Modelleri ve Denklemleri

Türbülanslı akışlar çalkantılı bir hız alanına sahip olup, taşınım denklemindeki bütün özellikler bu durumdan etkilenmektedir. Bu çalkantılar küçük ölçekli ve yüksek frekanslı olduklarından bunların doğrudan çözümü oldukça zordur. Bunun yerine yöneten (momentum) denklemler, akış özelliklerinin zamansal veya Reynolds ortalaması cinsinden yazılarak çözülür.

Bunun için özellikler iki bileşenli olarak yazılır. Bunlar ortalama akış bileşeni ϕ ve zamana bağlı salınım (çalkantı) bileşeni ϕ' 'dür.

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (4.4)$$

$$u = \bar{u} + u' \quad (4.5)$$

Akış özellikleri yukarıdaki yazılan şekliyle daimi olmayan (zamana bağlı) süreklilik ve momentum denklemlerine yerleştirilip, istatistiksel ortalaması alınırsa, istatistiksel ortalamalı momentum denklemleri elde edilmiş olur.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (4.6)$$

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u'_i u'_j}) \quad (4.7)$$

Yukarıdaki denklemlere Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemleri denir. Burada laminar akışa göre denklemin son kısmına yeni bir terim (Reynolds gerilmeleri) gelmiştir. Bu Reynolds gerilmeleri, çözüm için modellenmelidir.

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

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \quad (4.8)$$

Bu yaklaşım k-ε modelinde kullanılmaktadır.

4.1.3.1 Standart k-ε Modeli

Standart k-ε modeli türbülans kinetik enerjisi k ve türbülans kinetik enerjisinin disipasyon hızı ε'na dayalı yarı deneysel bir modeldir. k ve ε aşağıdaki taşınım denklemlerinden elde edilmektedir.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (4.9)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4.10)$$

Bu denklemlerde G_k ortalama akış gradyanları nedeniyle olan, G_b buoyancy nedeniyle olan türbülans kinetik enerjisi üretimini gösterir. Y_M sıkıştırılabilir

türbülansla, çalkantı dilitasyonunun, disipasyon hızına olan etkisini göstermektedir. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ ise sabitlerdir. σ_k , σ_ε ise k ve ε için türbülans Prandtl sayılarıdır.

4.1.3.2 RNG k-ε Modeli

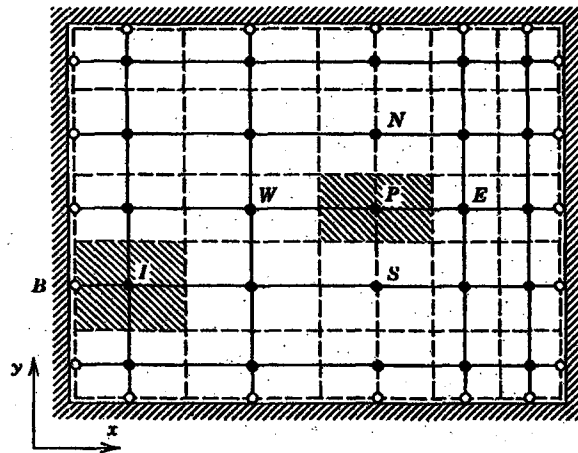
RNG k-ε modeli daimi olmayan Navier-Stokes denklemlerinden renormalizasyon grup yöntemi denilen bir matematiksel teknikle çıkarılmaktadır.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (4.11)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (4.12)$$

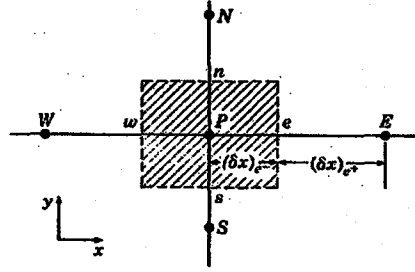
4.2 Hesap Alanının Ayırıklaştırılması ve Ayırıklaştırma Denklemleri

Buradaki sayısal yöntemde kontrol hacimleri yaklaşımı kullanılmaktadır. Diferansiyel denklemlere karşılık gelen cebirsel ayırıklaştırma denklemleri, kontrol hacmi denen küçük bir bölgede yöneten diferansiyel denklemin integre edilmesi ile çıkarılmaktadır. Kontrol hacimlerinin her bir noktasında (düğüm noktaları) hız ve basınç değerleri hesaplanmaktadır. Şekil 4.1'deki hesap alanı kolaylık olması amacıyla 2-boyutlu dörtgensel ve eşit büyüklükteki kontrol hacimlerine ayrılmıştır. Kesikli çizgiler kontrol hacminin yüzeylerini, koyu kesiksiz çizgiler ise ağ çizgilerini göstermektedir.



Şekil 4.1: İki boyutlu bir hesap alanı için ağ sistemi ve kontrol hacimleri.

Tipik bir kontrol hacminin şekli, şekil 4.2’de gösterilmiş olup merkezindeki P düğüm noktası dört düğüm noktası ile komşuluk halindedir. Bunlar; E (doğu), W (batı), N (kuzey), S (güney) ve 3-boyutlu durum için T (üst) ve B (alt) dır.



Şekil 4.2: Tipik bir kontrol hacminin (denetim elemanı) görünümü.

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

$$J_i = \rho u_i \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \quad (4.13)$$

(4.2) diferansiyel denklemi şu şekilde yazılabilir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \frac{\partial J_i}{\partial x_i} = S \quad (4.14)$$

e, w, n, s , küçük harfleri kontrol hacimlerinin yüzeylerini göstermektedir. (4.14) denkleminin kontrol hacmi üzerindeki integrasyonu aşağıdaki ifadeyi vermektedir.

$$\left(\rho_P \phi_P - \rho_P^0 \phi_P^0 \right) \left(\frac{\Delta V}{\Delta t} \right) + J_e A_e - J_w A_w + J_n A_n - J_s A_s + J_t A_t - J_b A_b = \bar{S} \Delta V \quad (4.15)$$

0 üssü ρ ve ϕ 'nin t anındaki bilinen değerlerini gösterir. Üssü bulunmayan bilinmeyen değerler $t + \Delta t$ anındaki değerleri gösterir. ΔV kontrol hacminin hacmini, A 'lar kontrol hacminin yüzeylerini, S de kaynak terimini göstermektedir.

4.2.1 Toplam Akı Değerinin Gösterimi

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

$$J_e A_e = F_e \left(\phi_P + \frac{\phi_P - \phi_E}{\exp(Pe_e) - 1} \right) \quad (4.16)$$

Peclet sayısı Pe boyutsuz bir büyüklük olup konveksiyon yolu ile iletimin difüzyon yolu ile iletme oranıdır.

$$Pe_e = \frac{F_e}{D_e} \quad (4.17)$$

F_e e yüzeyinden geçen kütleli debi, D_e de difüzyon iletimidir.

$$F_e = (\rho u)_e A_e \quad (4.18)$$

Eğer Γ her bir kontrol hacmi için uniform ise, D_e

$$D_e = A_e \left[\frac{(\delta x)_{e-}}{\Gamma_P} + \frac{(\delta x)_{e+}}{\Gamma_E} \right]^{-1} \quad (4.19)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

(4.16) denkleminde verilen akı ifadesi sayısal yöntemin formüle edilmesinde kullanılır. Ancak içeriğindeki eksponansiyel fonksiyonun hesabı oldukça zaman alıcı olup, külfetlidir. Bu nedenle akı ifadesinin hesabı için belli yaklaşımlar kullanılır.

$$J_e A_e = F_e \phi_e + \{D_e A(Pe_e) + \| -F_e, 0 \| \} (\phi_P - \phi_E) \quad (4.20)$$

(4.20) denklemindeki $A(Pe)$ fonksiyonun hesabı için çeşitli yaklaşımlar tablo 4.1'de verilmektedir.

Tablo 4.1: $A(Pe)$ fonksiyonun hesabı için kullanılan çeşitli yaklaşımların matematiksel ifadeleri

Yöntem adı	Matematiksel formülasyonu
Merkezsiz farklar	$1 - 0.5 Pe $
Öne doğru farklar	1
Hibrid	$\ 0, 1 - 0.5 Pe \ $
Üstel	$\ 0, (1 - 0.1 Pe)^5\ $
Eksponansiyel (analitik)	$\frac{ Pe }{\exp(Pe) - 1}$

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

Kaynak terimi S , ϕ' nin kendisine bağımlı olabilir. Eğer bu bağımlılık lineer değil ise kaynak terimi ϕ_p 'nin lineer fonksiyonu olarak ifade edilir.

$$\bar{S} = S_C + S_P \phi_p \quad (4.21)$$

Burada S_P negatif olmalıdır.

4.2.2 Süreklilik Denkleminin Ayırıştırılması

Akış alanını çözümlemek için kullanılan taşınım denklemleri süreklilik denklemini de sağlamalıdır. Kontrol hacminin yüzeylerinden geçen akış debisi süreklilik denkleminin ayırıştırılmış şeklini sağlamalıdır. Süreklilik denkleminin kontrol hacmi üzerindeki integrasyonu aşağıdaki ifadeyi verir.

$$(\rho_P - \rho_P^0) \frac{\Delta V}{\Delta t} + F_e - F_w + F_n - F_s + F_t - F_b = 0 \quad (4.22)$$

4.2.3 Ayırıklaştırma Denkleminin Son Hali

Toplam akı terimleri ve kaynak terimi (4.15) denkleminde yerleştirildiğinde (4.23) denklemi elde edilmektedir.

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_T \phi_T + a_B \phi_B + b \quad (4.23)$$

$$a_E = D_e A(Pe_e) + \| -F_e, 0 \| \quad (4.24)$$

$$a_W = D_w A(Pe_w) + \| F_w, 0 \| \quad (4.25)$$

$$a_N = D_n A(Pe_n) + \| -F_n, 0 \| \quad (4.26)$$

$$a_S = D_s A(Pe_s) + \| F_s, 0 \| \quad (4.27)$$

$$a_T = D_t A(Pe_t) + \| -F_t, 0 \| \quad (4.28)$$

$$a_B = D_b A(Pe_b) + \| F_b, 0 \| \quad (4.29)$$

$$b = S_C \Delta V + a_P^0 \phi_P^0 \quad (4.30)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_T + a_B + a_P^0 - S_P \Delta V \quad (4.31)$$

a_P^0 katsayısı zamana bağlı terimden ötürü oluşup, değeri,

$$a_P^0 = \rho_P^0 \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (4.32)$$

(4.23) denklemi daha kompakt bir formda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$a_P \phi_P = \sum a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (4.33)$$

4.2.4 Sınır Şartları

Sınırdaki bulunan hesap noktalarında ϕ_B değeri ya doğrudan verilir, ya da verilen sınır akısı değeri üzerinden hesaplanır.

4.2.5 Ayırıklaştırma 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 algoritması ile kolayca çözülebilmektedir. Ancak 2 ve 3-boyutlu durumlarda, direkt yöntemlerde güçlü bilgisayarlara ve uzun hesaplama sürelerine ihtiyaç duyulduğundan iteratif yöntemler daha elverişlidir. İteratif yöntem olarak çizgi-çizgi tekniği ile blok düzeltme metodu beraber kullanılabilir.

4.2.6 Yakınsama Katsayıları (Underrelaxation faktörleri)

(4.33) denklemi aşağıdaki biçimde de yazılabilir.

$$\phi_P = \phi_P^* + \left[\frac{\sum a_{nb} \phi_{nb} + b}{a_P} - \phi_P^* \right] \quad (4.34)$$

ϕ_P^* , ϕ_P 'nin bir önceki iterasyondaki değeri, köşeli parantez içindeki terimler ϕ_P 'nin içinde bulunulan iterasyondaki değişim miktarını ifade eder. Bu değişimi azaltmak için yakınsama katsayısı α ($0 < \alpha < 1$) kullanılmaktadır.

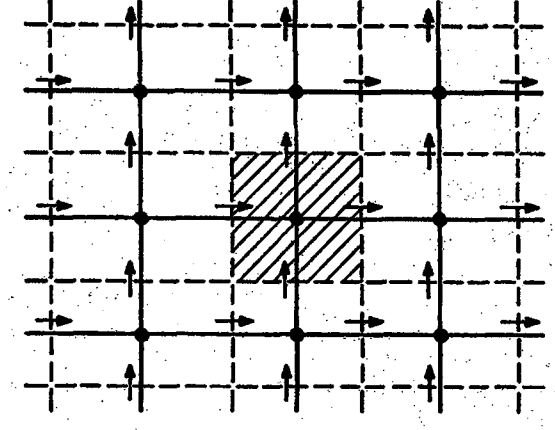
$$\phi_P = \phi_P^* + \alpha \left[\frac{\sum a_{nb} \phi_{nb} + b}{a_P} - \phi_P^* \right] \quad (4.35)$$

Eğer α sıfıra yakın bir değer ise ϕ 'nin değişimi çok yavaş olur.

4.2.7 Akış Hesabı

Yukarıda genel diferansiyel denklem, akış alanı ρu_i 'nin bilinmesi hali için ayırıklaştırma biçimine 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 edilememektedir. Basınç gradyeni bilinmedikçe momentum denklemleri çözülemez.



Şekil 4.3: Kaymalı ağ sistemi ve kontrol hacimlerinin genel görünümü.

Basınç alanı dolaylı olarak süreklilik denklemi tarafından belirlenebilmektedir. Fakat bu dolaylı belirleme sayısal çözümlemede kullanışlı değildir. Ayrıca hız bileşenleri ve basınç aynı düğüm noktalarında hesaplanıyor ise, gerçekçi olmayan çözümler elde edilebilir. Bunu önlemek için kaymalı ağ sistemleri kullanılır (şekil 4.3). Hız bileşenleri kontrol hacimlerinin yüzeylerinde buralara dik olacak biçimde yerleştirilir. Basınç ve diğer bağımlı değişkenler kontrol hacimlerinin merkezindeki düğüm noktalarında hesaplanır.

$$a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b + A_e (p_P - p_E) \quad (4.36)$$

b basınç gradyeni dışındaki kaynak terimlerini, A_e basınç kuvvetinin etki ettiği yüzeyi gösterir. Momentum denklemlerinin çözümü için SIMPLE algoritması kullanılabilir (Patankar, 1988).

4.2.8 Ayırıklaştırma Denklemlerinin Hassasiyeti

Yöneten denklemlerdeki $(\partial\phi/\partial x)$ ve $(\partial\phi/\partial y)$ gradyan terimlerinin hesabında kullanılan ifadeler Taylor serisinin açılımından elde edilip, ayırıklaştırma denklemleri oluşturulmaktadır. Ayırıklaştırma denklemlerinin hassasiyetleri ayırıklaştırma mertebeleri ile belirlenir.

4.2.8.1 Birinci Mertebeden Ayırıklaştırma

$\phi(x)$ fonksiyonu için, $\phi(x+\Delta x)$ 'in i noktası civarında x 'de Taylor serisi açılımı (4.37) denklemindeki gibidir.

$$\phi(x + \Delta x) = \phi(x) + \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_x \Delta x + \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right)_x \frac{\Delta x^2}{2} + \dots \quad (4.37)$$

Burada $\phi(x)$ ve $\phi(x+\Delta x)$ için yukarıdaki kısımlarda kullanılan ϕ_P ve ϕ_E ayırıklaştırma değerleri kullanılarak (4.37) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\phi_E = \phi_P + \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_P \Delta x + \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right)_P \frac{\Delta x^2}{2} + \dots \quad (4.38)$$

(4.38) denklemi yeniden düzenlenerek aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_P \Delta x = \phi_E - \phi_P - \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right)_P \frac{\Delta x^2}{2} - \dots \quad (4.39)$$

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_P = \frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta x} - \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right)_P \frac{\Delta x}{2} - \dots \quad (4.40)$$

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_P = \frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta x} + \text{kesilen terimler} \quad (4.41)$$

Δx çarpanını ihtiva eden kesilen terimlerin ihmal edilmesi ile (4.41) ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_P \approx \frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta x} \quad (4.42)$$

(4.42) denklemindeki kesilen terimlerin ihmal edilmesinden ötürü oluşacak hata Δx değerinin düşürülmesi (ağ sisteminin iyileştirilmesi) ile sağlanabilir. Genel olarak sonlu fark ifadelerinde bulunan Δx^n terimindeki n üssü, Δx 'li hata değerinin ne

oranda sıfıra yaklaştığını kontrol ettiğinden, bu n üssüne sonlu fark yaklaşımının mertebesi denmektedir. Bu şekilde, (4.42) denklemi birinci mertebeden olup aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_P = \frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (4.43)$$

(4.43) ifadesinde $(\partial\phi/\partial x)$ gradyan teriminin hesabında E ve P noktaları kullanıldığından (şekil 4.1'e göre $x_E > x_P$) bu denkleme P noktasına göre ileriye dönük fark formülü denmektedir. Benzer biçimde P noktasındaki $(\partial\phi/\partial x)$ gradyan teriminin hesabı için geriye dönük fark formülü olan (4.45) denklemi, (4.44) denkleminin yazılmasıyla, oluşturulur.

$$\phi(x - \Delta x) = \phi(x) - \left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_x \Delta x + \left(\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}\right)_x \frac{\Delta x^2}{2} + \dots \quad (4.44)$$

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_P = \frac{\phi_P - \phi_W}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (4.45)$$

(4.43) ve (4.45) denklemleri her ikisi de birinci mertebe hassasiyetinde olup, her ikisinde de ϕ değeri iki noktada tanımlıdır.

4.2.8.2 İkinci Mertebeden Ayrıklaştırma

(4.37) denkleminde (4.44) denkleminin çıkarılması ile $(\partial\phi/\partial x)_P$ için (4.47) denklemi elde edilir.

$$\phi(x + \Delta x) - \phi(x - \Delta x) = 2\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_x \Delta x + \left(\frac{\partial^3\phi}{\partial x^3}\right)_x \frac{\Delta x^3}{3!} + \dots \quad (4.46)$$

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_P = \frac{\phi_E - \phi_W}{2\Delta x} + O(\Delta x^2) \quad (4.47)$$

(4.47) denkleminde kullanılan E ve W noktaları ortalarında bulunan P noktasındaki gradyan değerini hesaplamada kullanıldığından, bu denkleme merkezsiz fark formülü denmekte olup, ikinci mertebe hassasiyettedir. Δx değerine olan karesel bağımlılık nedeniyle, ağ sisteminin iyileştirilmesi durumunda oluşan hata değeri, birinci mertebe yaklaşıma göre daha az olacaktır (Versteeg ve Malalasekera 1995).

Bölüm 4.2’de sonlu hacimler ayrıklaştırmasında kullanılan kontrol hacminin e yüzeyindeki gradyan teriminin hesabı denklem (4.48)’deki gibidir.

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e = \frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta x} = \frac{\phi_E - \phi_P}{2\left(\frac{\Delta x}{2}\right)} \quad (4.48)$$

Burada e noktası E ve P noktalarının orta noktası olup merkezsiz fark formülü kullanılmaktadır ve hassasiyeti ikinci mertebededir.

5. AERODİNAMİK ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİNDE KULLANILAN BİLGİSAYAR YAZILIMLARININ İNCELENMESİ

Bu çalışmada karayolu taşıtlarının etrafındaki akışın modellenmesi ve taşıta ait aerodinamik özelliklerin belirlenmesi amacıyla, sayısal modelleme yaklaşımlarını içeren belirli bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır.

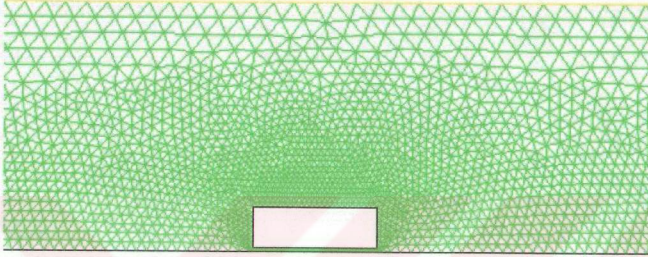
Sayısal çözümlemede ilk olarak incelenecek olan modelin fiziksel geometrisini içeren hesap alanı bilgisayar ortamında oluşturulmalıdır. Daha sonra da hesaplamaların yapılabilmesi amacıyla bu hesap alanı üzerine bir ağ sistemi yerleştirilir. Bu işlemler burada GAMBIT yazılımında yapılmaktadır. GAMBIT yazılımında oluşturulan bu ağ sistemine haiz geometrik model, sayısal çözümlemenin yapıldığı FLUENT yazılımına aktarılmaktadır. FLUENT yazılımında hesaplamalar sonlu hacimler yöntemiyle yapılmaktadır. Aşağıdaki kısımlarda bir karayolu taşıtının GAMBIT ve FLUENT yazılımları yardımı ile yapılan aerodinamik çözümlemesine dair açıklamalar bulunmaktadır.

5.1 GAMBIT Yazılımının Kullanımı

Burada ilk olarak çözümlemenin kaç boyutlu ortamda yapılacağına karar verilir. Daha sonra incelenecek olan taşıtın fiziksel geometrisi varolan ikonlar yardımıyla çizilerek oluşturulur. Buna ilave olarak deney şartlarına göre, taşıtın çevresine hesap alanının sınırları çizilir. Sayısal çözümlemenin yapılabilmesi için hesap alanının sonlu sayıda hacme bölünmesi gerekmektedir. Bu amaçla taşıt yüzeyi ve çevre havasının üzerine bir ağ sistemi oturtulur. Böylelikle hesaplamaların yapılacağı düğüm noktaları tanımlanmaktadır. Bu aşamada, çeşitli tiplerde ağ sistemleri yaratılabilir. Ağ sistemleri yapısal açıdan, düzgün yapılı ve düzgün olmayan yapılı ağ sistemleri olmak üzere ikiye ayrılır.

Ağ sistemi oluşturulurken 2-boyutlu durum için üçgensel veya dörtgensel elemanlar; 3-boyutlu durum için prizmatik elemanlar (hacimler) kullanılabilir. Hesap alanının

farklı kısımlarında farklı eleman tipleri de kullanılabilir. Ağ sisteminin eleman sıklığı veya çözünürlüğü istenildiği gibi ayarlanabilir. Bunun için kenar, yüzey ve hacim ağ oluşturulurken kullanılan aralık değerleri ile oynanır. Genel akış içerisinde gradyenlerin yüksek olması beklenen bölgeler ile katı yüzeylere komşu bölgelerde eleman sayısı artırılarak ağ sisteminin bu bölgelerdeki çözünürlüğü artırılır. Şekil 5.1’de düzgün olmayan yapıli üçgensel elemanlı bir ağ sistemi görölmektedir.



Şekil 5.1: Kutu etrafındaki akışa ait, düzgün olmayan yapıli üçgensel elemanlı ağ sistemi.

Ağ sisteminin oluşturulmasından sonra, gerekli sınır şartları tanımlanır. Her bir sınır için verilen sınır şartı tipi daha sonra, gerekli olması halinde, FLUENT ortamında değıştirilebilir. Bütün bu işlemler tamamlandıktan sonra oluşturulan dosya FLUENT’e aktarılır.

5.2 FLUENT Yazılımının Kullanımı

Çözümlemenin 2 veya 3-boyutlu olması durumuna göre program çalıştırılıp, oluşturulan ağ dosyası okutulur. Taşıt etrafındaki akışın modellenmesi ve taşıta ait aerodinamik özelliklerin belirlenmesine dair çözümler FLUENT ortamında yapılmaktadır.

5.2.1 Akışa ait Fiziksel Modelin Tanımı

Çözümlemenin ilk aşaması olarak akışın fiziğı modellenmelidir. Çözümleyici tipi olarak ayrık veya çiftli (coupled); zamansal açıdan zamana bağıli veya daimi; formülasyon açısından implisit veya eksplisit; hız formülasyonu açısından mutlak

veya bağıl seçeneklerinden biri kullanılabilir. Bu çalışmada ayrık çözüm, implisit formülasyon, daimi akış ve mutlak hız formülasyonu şartları altında çözümleme yapılmaktadır. Akışın viskoz modeli olarak da laminar veya türbülanslı çözüm yapılabilmekte ve burada türbülanslı akış kabulü altında standart $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılmaktadır.

5.2.2 Akışkan Özelliklerinin Tanımlanması

Buradaki akışkan havadır. Akışın tipi sıkıştırılabilir veya sıkıştırılamaz; akışkan özellikleri sabit veya sıcaklığa bağımlı olarak alınabilir. Burada sıkıştırılamaz akış kabulü altında yoğunluk ve viskozite gibi akışkan özellikleri sabit olarak tanımlanmaktadır.

5.2.3 Sınır Şartlarının Tanımlanması

Hesap alanı içerisinde bulunan her bir sınır için sınır şartları tanımlanmalıdır. Her bir sınır için işlevine göre sınır şartı tanımlanmaktadır. Daha önce GAMBIT ortamında verilen sınır şartları burada değiştirilebilmektedir. Her bir sınır için verilen sınır şartına göre, uygun veriler girilir. Bu çalışmada genel olarak kullanılan sınır şartları ve tanımlanan değişkenler şöyledir:

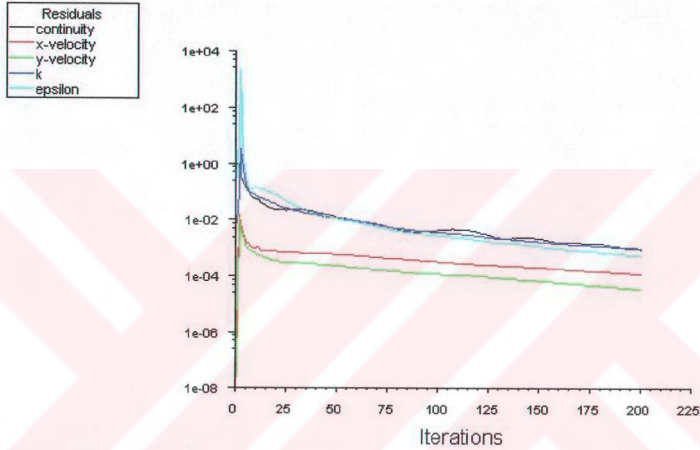
- Hesap alanına hava girişinin olduğu sınır - giriş sınırı: Hız sınırı şartı. Hızın büyüklüğü ve yönü, k ve ϵ değerleri girilir.
- Hesap alanından hava çıkışının olduğu sınır - çıkış sınırı: Basınç çıkışı şartı. Efektif basıncın değeri, türbülans tanımlama yöntemi ile k ve ϵ değerleri girilir.
- Taşıt yüzeyi ve yolun olduğu sınır - cidar sınırı: Cidar sınırı. Sınırın hareketli veya durağan olmasına göre, hareket tipi (öteleme), hız değeri, cidar pürüzlülük yüksekliği ve sabiti değerleri girilir.
- Hesap alanının üstündeki serbest sınır - serbest sınır: Simetri sınırı.

Burada yol için verilen hareketli cidar sınır şartı sayesinde, rüzgar tünellerinde zorluk teşkil eden hareketli zemin simülasyonu problemi ortadan kalkmaktadır.

5.2.4 Çözümün Elde Edilmesi

Çözümün elde edilmesi amacıyla yöneten denklemlerde (akış ve türbülans denklemleri) bulunan her bir değişken için kullanılan yakınsama katsayıları ile

ayrıklaştırma yöntemi ve mertebeleri belirlenir. Bu çalışmada birinci mertebeden öne doğru farklar yöntemi kullanılmaktadır. Çözüme başlamadan evvel hız bileşenleri, efektif basınç, k ve ϵ değerleri için ilk şartlar verilir. Ayrıca her bir değişkene ait oluşan hatalar (residuals) için yakınsama kriterleri belirlenir. Daha sonra iteratif bir biçimde hesaplamalara geçilir. Çözümün yakınsaması, hata eğrilerinin ekrandan izlenmesi ile takip edilir (Şekil 5.2). Bu eğrilerin tamamı yakınsama kriterlerinde tanımlanan değerlere eriştiğinde hesaplamalar durur.



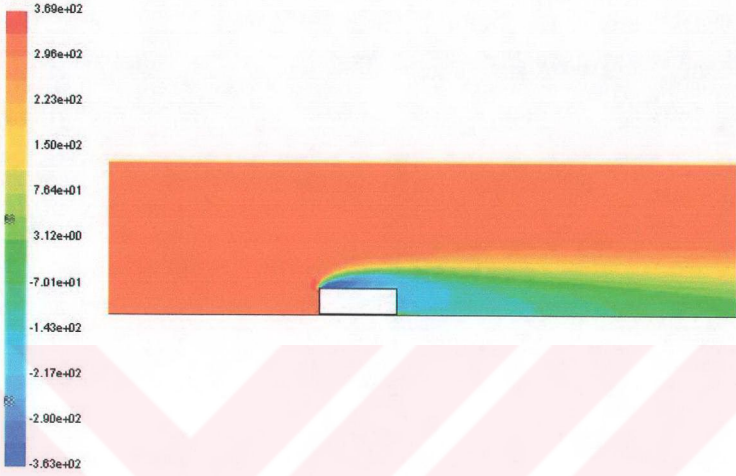
Şekil 5.2: Hata eğrilerinin hesaplama sırasında iterasyon adımları ile değişimi.

5.2.5 Sonuçların Değerlendirilmesi

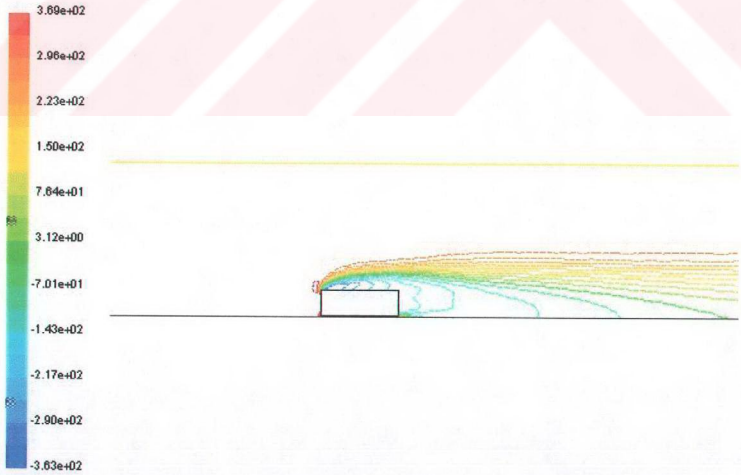
Hesaplamaların bitişi ile beraber yakınsamış çözümün değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, geometrik modelin etrafındaki akışa ait, her bir değişken için eş büyüklük dağılım eğrileri (contours), hesap alanı üzerinde çizdirilebilir. Şekil 5.3, 5.4, 5.5, 5.6'da görüldüğü gibi eş hız ve basınç büyüklüğü dağılım eğrileri, eğrilerin içi boş veya dolu olarak çizdirilebilir.

Akışa ait basınç değerleri için, basınç katsayısı, statik basınç, dinamik basınç, toplam basınç eğrileri; hız değerleri için de, hız büyüklüğü, yatay hız bileşeni, düşey hız bileşeni eğrileri ayrı ayrı çizdirilebilir. Bu eğrilerin incelenmesi ile akış içerisinde hangi bölgelerde bu değerlerin ne oranda değişim gösterdiği tesbit edilebilir. Gradyenlerin yüksek olduğu bölgelerde ağ sistemi iyileştirilerek (sıklaştırılarak)

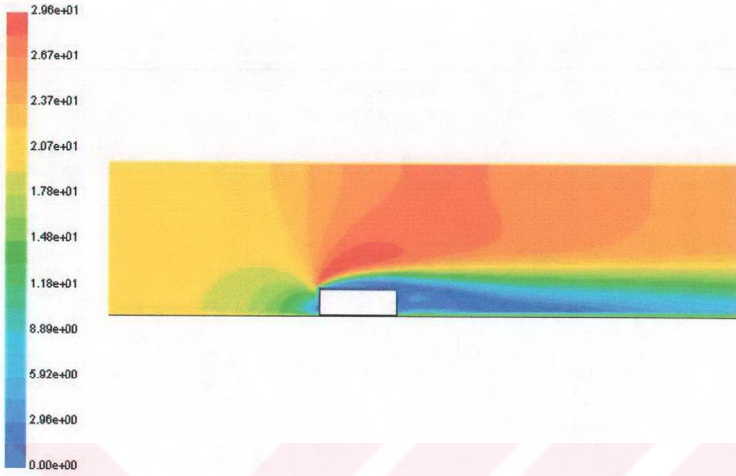
tekrar bir hesaplama daha yapılabilir. k ve ε gibi türbülans değişkenlerine ait dağılım eğrileri şekil 5.7'de görüldüğü gibi çizdirilebilir.



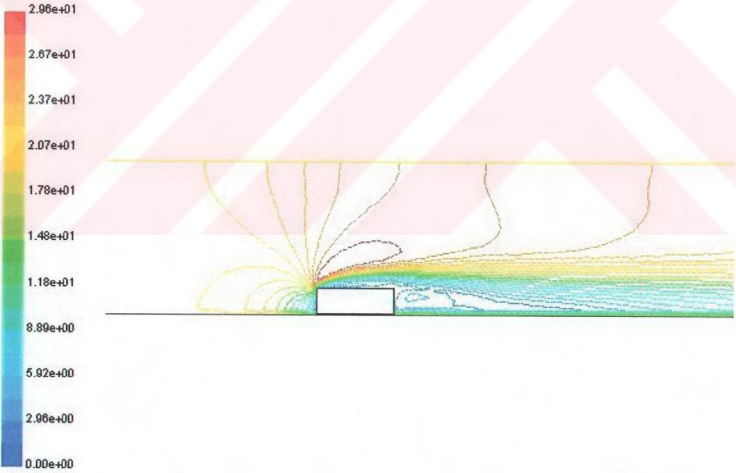
Şekil 5.3: Geometrik modelin (dikdörtgen kutu) etrafındaki akışa ait eş toplam basınç büyüklüğü dağılımı eğrileri (içi dolu).



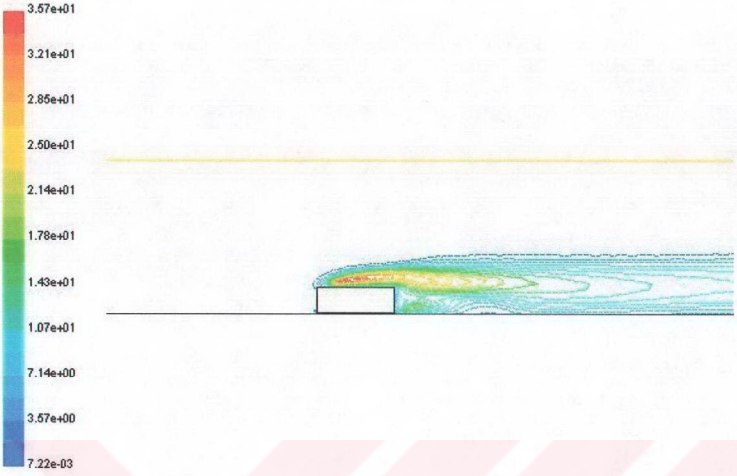
Şekil 5.4: Kutu etrafındaki akışa ait eş toplam basınç büyüklüğü dağılımı eğrileri (içi boş).



Şekil 5.5: Kutu etrafındaki akışa ait eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (içi dolu).

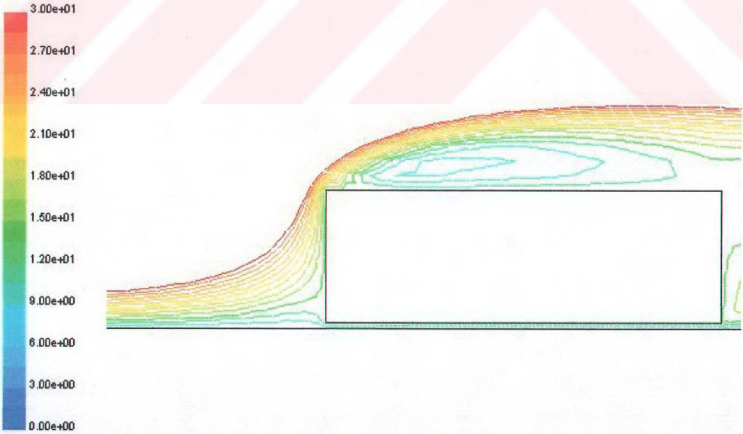


Şekil 5.6: Kutu etrafındaki akışa ait eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (içi boş).



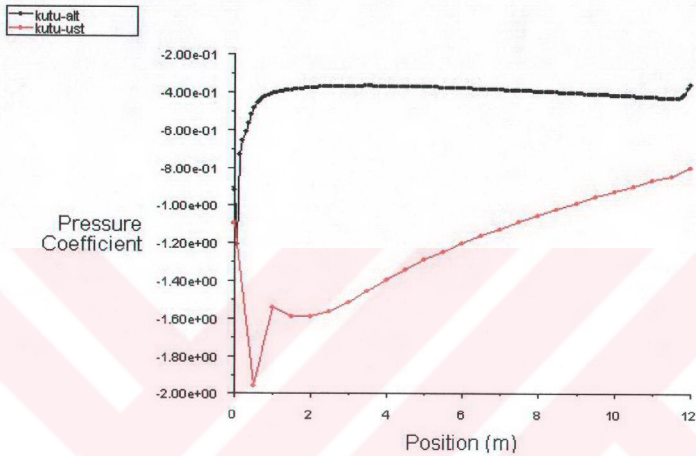
Şekil 5.7: Kutu etrafındaki akışa ait eş k büyüklüğü dağılımı eğrileri (içi boş).

Ayrıca 2-boyutlu çözümlemelerde şekil 5.8'de görüldüğü gibi akım çizgileri de çizdirilebilir. Böylelikle akışın izlediği yön ve akış ayrılmaları hakkında bilgi sahibi olunur.

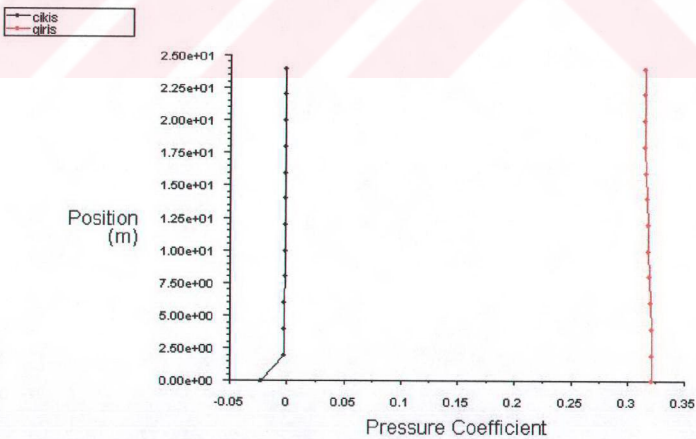


Şekil 5.8: Kutu önü ve üstündeki akım çizgilerinin görünümü.

Yukarıda anlatılan hesap alanı üzerinde akışa ait her bir değişken için çizdirilen eş büyüklük dağılım eğrileri dışında, her bir sınır için akışa ait değişkenlerin dağılım eğrisi iki boyutlu koordinat eksen takımı üzerinde çizdirilebilir. Şekil 5.9'da kutu modelinin üst ve alt yüzeylerindeki basınç değişimi; şekil 5.10'da ise giriş ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısı değişimi görülmektedir.



Şekil 5.9: Kutu alt ve üst yüzeylerindeki basınç katsayısının değişimi.



Şekil 5.10: Giriş ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısının değişimi.

6. AERODİNAMİK ÖZELLİKLERE ETKİ EDEN ETKENLERİN İNCELENMESİ

Bu çalışmada incelenen geometrik model ilk olarak, otobüse benzerliğinden ötürü, dikdörtgenler prizması şeklinde bir kutu olup, etrafındaki akışın çözümlemesi daimi akış kabulü ile 2-boyutlu ve 3-boyutlu durum için yapılmaktadır.

6.1 2-Boyutlu Akış Çözümlemeleri

Kutunun boyutları $H \times L = 4 \times 12$ 'dir (boyutlar metre cinsindendir). Değişik zemin açıklıkları ve hesap alanı boyutları ile zeminin hareketli veya durağan olması durumuna göre çeşitli koşullar yapılmıştır. Aşağıdaki kısımlarda yapılan her bir koşuya dair açıklamalar bulunmaktadır.

6.1.1 Koşu 1

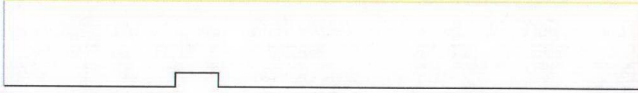
Hesap alanınının genel görünümü şekil 6.1'deki gibi olup, kutu zemine oturtulmuştur. İlk sekiz koşu için hesap alanının boyutları aşağıdaki gibidir.

- Kutu önündeki giriş kısmı uzunluğu: 4L
- Kutu arkasındaki çıkış kısmı uzunluğu: 10L
- Hesap alanının yüksekliği: 6H

İki boyutlu tüm koşullarda sınır şartları için verilen değerler şöyledir:

- Giriş: Hız girişi, $V=20\text{m/s}$ modele doğru, $k=10^{-2}$, $\epsilon=10^{-3}$
- Çıkış: Basınç çıkışı, $p=0$, $k=10^{-2}$, $\epsilon=10^{-3}$
- Üst sınır: Simetri
- Yer: Hareketli veya hareketsiz cidar
- Kutu yüzeyleri: Hareketsiz cidar

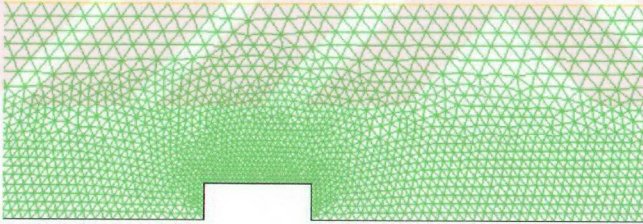
Bütün koşullarda standart k - ϵ türbülans modeli uygulanmaktadır. Koordinat eksen takımı da bütün koşullar için kutu ön alt köşesinde alınmaktadır.



Şekil 6.1: Hesap alanının genel görünümü (koşu numarası 1= KN 1).

Bu koşuda zemin hareketsizdir.

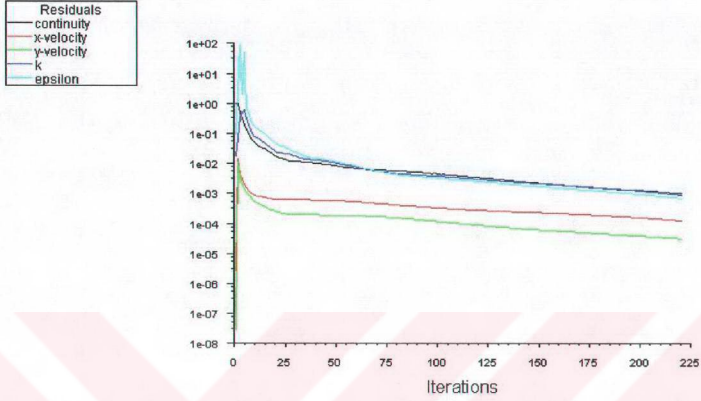
İşletme şartı olarak atmosfer basıncı 101325 Pa değeri giriş veya çıkış sınırının en üst noktasında tanımlanmalıdır. Çünkü bu noktalarda modelin akışı dağıtmasından ötürü oluşacak tedirginlikler en az seviyededir. Yine aynı şekilde taşıt önünde oluşacak basınç artışının giriş sınırına kadar ulaşmaması için taşıtın ön kısmındaki giriş kısmı mesafesi 3-boyutlu çözümlemelerde en az üç taşıt boyu kadar olmalıdır. Giriş sınırındaki kabul edilebilir C_p değeri 0.002 olarak tanımlanmaktadır (Axelsson ve diğ. 1998). Burada işletme basıncı giriş sınırının en üst noktasında tanımlanmaktadır. Giriş kısmı mesafesi 4L olarak alınmıştır. Kutu arkasındaki oluşacak iz bölgesinin yeterince çözümlenebilmesi için model arkasındaki mesafe 10L olarak alınmıştır. Ayrıca model etrafına üçgensel elemanlı ağ sistemi oluşturulmuş olup, kutuya yakın kısımlardaki genel görünümü şekil 6.2'deki gibidir.



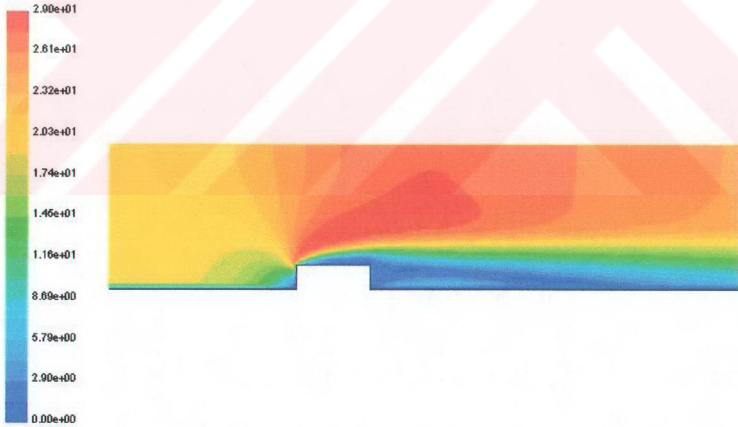
Şekil 6.2: Kutuya yakın bölgelerdeki ağ sisteminin görünümü (KN1).

Şekil 6.3'de görülen hata eğrileri için yakınsama kriteri olarak 10^{-3} değeri alınmakta, yakınsama katsayıları da basınç için 0.3, momentum için 0.7, k ve ϵ için 0.8 olup bütün kutu modeli koşullarında sabit kalmaktadır. Şekil 6.4'de görülen hız dağılımı eğrilerinde modelin blokaj etkisinden ötürü model üzerindeki hava hızı artmıştır. Bu etki üst sınıra kadar varmıştır. Yine aynı şekilde şekil 6.5'deki akım çizgileri

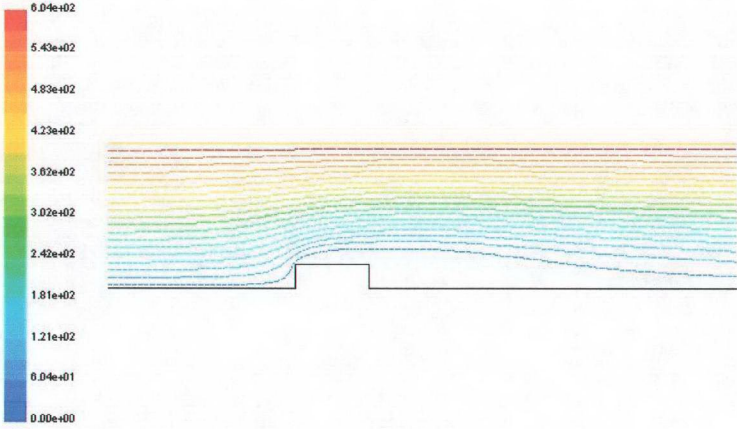
görünümünde, akım çizgilerinin üst sınıra yakın yerde düzleşmediği görülmektedir. Ayrıca akış aniden kutunun önünde durmaya zorlandığından burada bir basınç yükselmesi mevcuttur.



Şekil 6.3: Hata eğrilerinin iterasyon adımları boyunca değişimi (KN1)



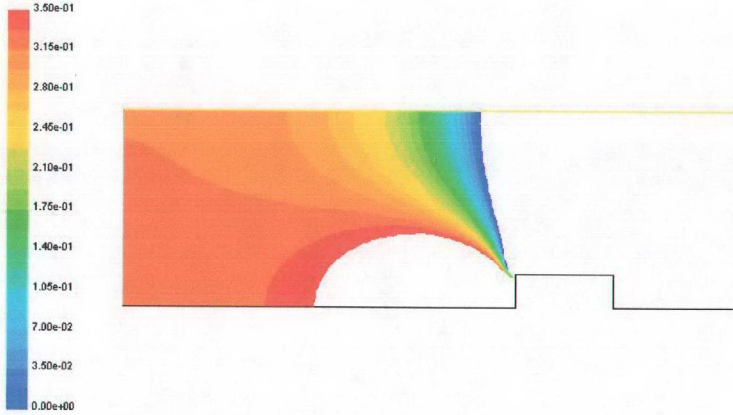
Şekil 6.4: Kutuya yakın kısımlardaki akışa ait eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN1).



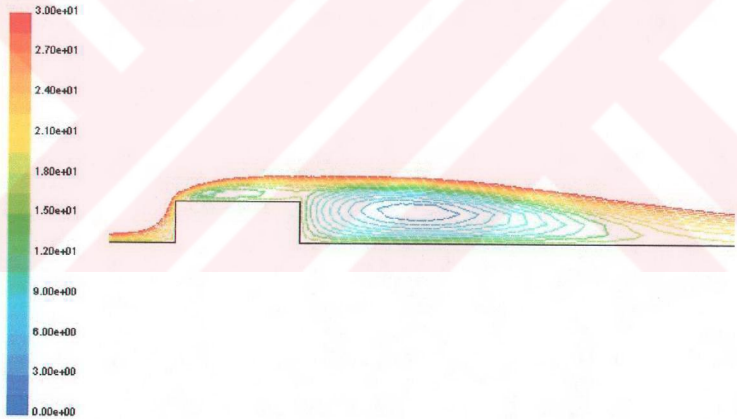
Şekil 6.5: Kutuya yakın bölgelerdeki akım çizgilerinin görünümü (KN1).

Şekil 6.6'da görüldüğü gibi bu etki giriş sınırına da varmaktadır. Şekil 6.8'de de kutunun ön yüzeyinde pozitif basınç katsayısı değeri gözlemlenmektedir. Blokaj etkisinin azaltılabilmesi için, üst sınırın daha yukarı çekilerek kesit daralmasının azaltılması ve giriş sınırındaki işletme basıncının yükselmemesi için, giriş kısmı mesafesinin uzatılması gerekmektedir. Ancak 2-boyutlu çözümlemede akış sadece kutu üstünden akmaya zorlandığından, hesap alanı boyutları artırılrsa bile blokaj etkisi düşük mertebelere indirilemeyebilir.

Kutunun arka tarafında ise ani kesit genişlemesi nedeniyle akış hızı azalmaktadır. Ayrıca şekil 6.7'deki akım çizgilerinden görüldüğü gibi çevri hareketleri de oluşmaktadır. Şekil 6.8'de basınç katsayısı değişimlerine bakıldığında, kutunun arka yüzeyinde negatif bir basınç oluşmaktadır. Bunun nedeni kutunun arka yüzeyindeki akış ayrılması ile oluşan çevri hareketleridir. Şekil 6.11'de de kutunun arka bölgesindeki toplam basınç değerinin düşük çıktığı görülmektedir. Çıkış sınırına doğru bir basınç toparlanması varolup, C_p değeri, burada sıfır değerini almaktadır (şekil 6.9). Kutu üst yüzeyinde de şekil 6.7'de görüldüğü gibi kutu alın kısmının küt ve ön köşelerinin sivri olmasından ötürü akış dağılmakta, akış ayrılması ve çevri hareketleri (türbülans) oluşmaktadır. Lajos ve diğ.(1988)'e göre de zemine oturmuş kutu etrafındaki akışta, kutunun sivri köşesinden ötürü üst kısmında akış ayrılması ve ayrılma baloncuğu bulunmaktadır.

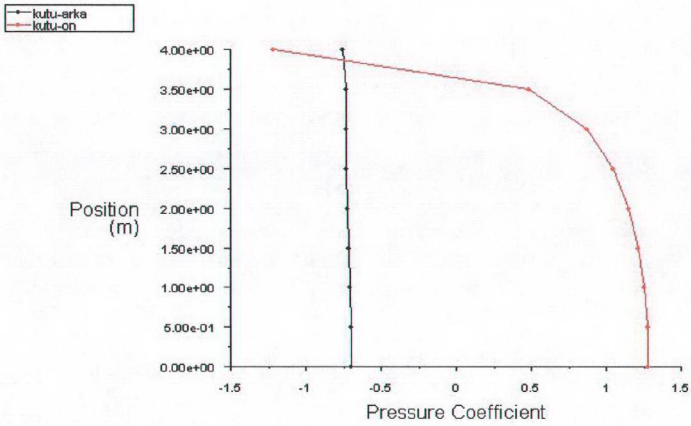


Şekil 6.6: Kutu önü, giriş kısmındaki akışa ait 0 - 0.35 arasındaki basınç katsayısı değerine sahip konumlar (KN1).

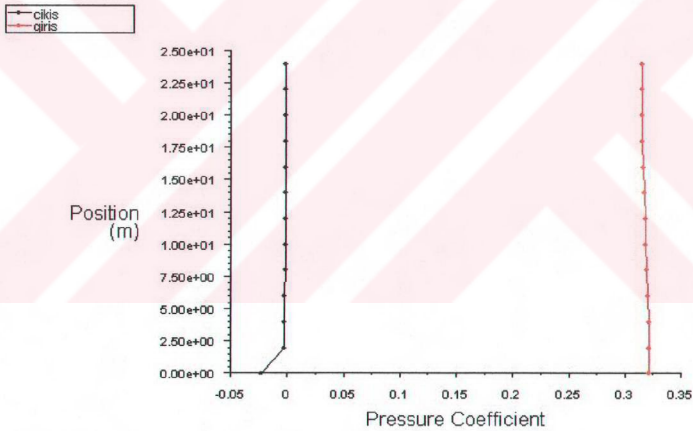


Şekil 6.7: Kutunun yakın çevresi ve arka kısmındaki akım çizgilerinin görünümü (KN1).

Bu akış ayrılması kutunun bütün üst yüzeyi boyunca devam ettiğinden burada da C_p değeri negatif çıkmaktadır (şekil 6.10). Önde oluşan akış dağılımı ve ayrılması arka tarafa kadar devam ettiğinden, arka kısımdaki akış hareketleri ve basınç dağılımı üzerinde de etkili olmaktadır.



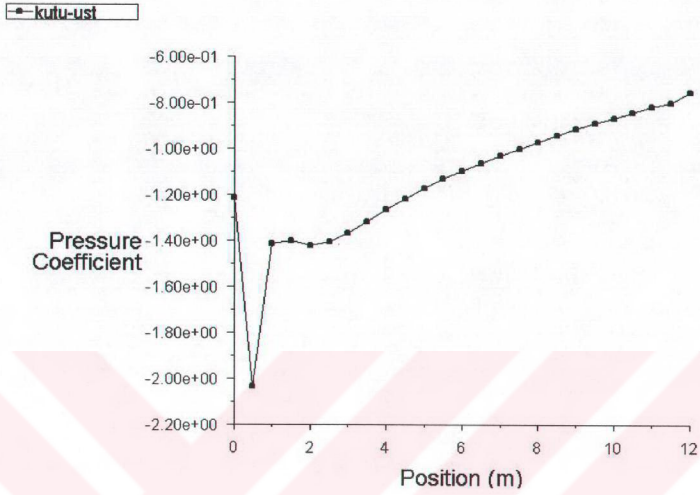
Şekil 6.8: Kutunun ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN1).



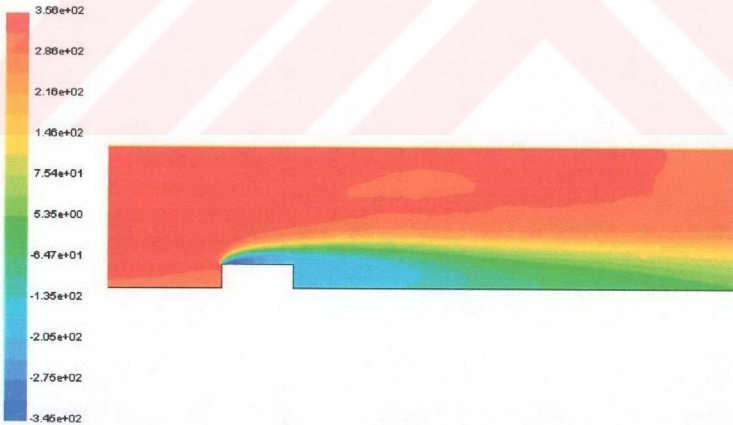
Şekil 6.9: Giriş ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısı değişimi (KN1).

Şekil 6.4'deki hız dağılımından görüldüğü gibi, zeminin hareketsiz olmasından ötürü bir sınır tabaka oluşmaktadır. Aynı zamanda kutu yüzeyleri de hareketsiz olduğundan burada da sınır tabaka oluşur. Bu sınır tabakasının kalınlığı ağ sistemindeki cidar sınırlarına komşu elemanların büyüklüğüne bağlıdır. Küçük eleman kullanılması halinde sınır tabaka kalınlığı küçülecektir. Bu sınır tabaka ile kutu arkasında oluşan

ard iz nedeniyle çıkış sınırında zemine yakın kısımda C_p sıfırdan farklı bir değer almaktadır.



Şekil 6.10: Kutu üst yüzeyindeki basınç katsayısı değişimi (KN1).



Şekil 6.11: Kutuya yakın bölgelerdeki, etrafındaki akışa ait eş toplam basınç büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 1).

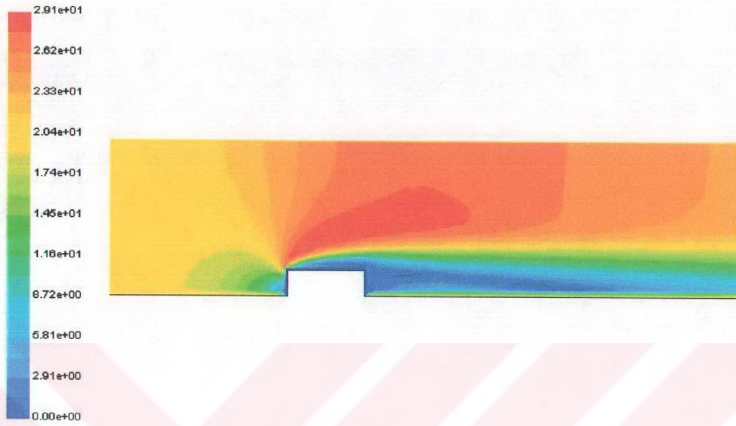
Hava akışından ötürü kutu, aerodinamik direnç kuvvetini oluşturan basınç kuvvetleri (şekil direnci) ile viskoz kuvvetlerin (yüzey sürtünmesi) etkisine maruz kalmaktadır. Bu model için aerodinamik direnç katsayısının değeri 1.725 olarak çıkmıştır. Bu değerin 1.728'si basınç kuvvetleri nedeni ile, -0.003'ü de viskoz kuvvetler nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle viskoz kuvvetlerin aerodinamik dirence olan etkisi ihmal edilebilir. Bu çalışmada sadece şekil direnci incelenmektedir. Kutunun ön ve arka yüzeyleri için C_D değerinin dağılımı sırasıyla 1.01 ve 0.71'dir. Kutunun üst yüzeyi yatayda, havaya paralel durduğundan yatay yönde bir basınç kuvveti etkimemektedir.

Denklem (2.11)'de tanımlanmış C_D değeri ile denklem (3.3)'de tanımlanmış C_p değeri iki boyutsuz katsayı olup bu model için aralarında ilginç bir ilişki bulunmaktadır. C_p değeri noktasal bir büyüklük olup yüzey boyunca değişmektedir. C_D değeri ise cisme (veya tek bir yüzeye) ait global tek bir değerdir. Bu kutu örneğinde akışa dik olan yüzeyler kutunun ön ve arka yüzeyleri olup, bunlar da düz levha şeklinde olduklarından sadece aerodinamik direnç kuvvetini oluşturan yatay kuvvete maruz kalırlar. Bu nedenle ön yüzeyin ortalama C_p değeri, ön yüzeyin C_D değerini verir (ön yüzeye etkiyen pozitif basınç $+x$ yönünde direnç oluşturur). Arka yüzeyin ortalama C_p değeri ise negatif olup, bunun mutlak değeri bu yüzeye ait C_D değerini verir (arka yüzeye etkiyen negatif basınç $+x$ yönünde direnç oluşturur). Ön ve arka yüzeylere ait bu iki C_D değerinin toplamı da kutunun toplam C_D değerini vermektedir. Kutunun üst ve alt yüzeyleri akışa paralel düz levhalar şeklinde olduğundan, buradaki C_p değerleri kutuya düşey yönde etkiyen kuvvetle ilişkili olup, C_D değeri için hesaba katılmazlar. Bu nedenle bu kutu örneği için C_D değerinin değişimi, kutunun ön ve arka yüzeylerindeki ortalama C_p değerinin değişimi demektir.

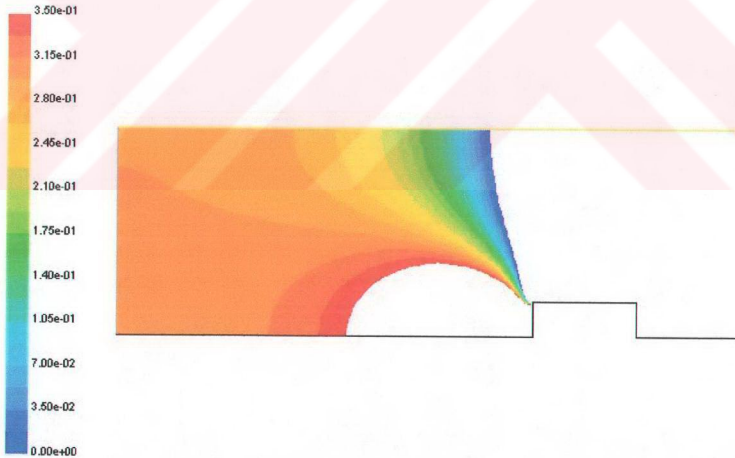
6.1.2 Koşu 2

Bu koşuda zemin ile model arasındaki bağıl hareketi temsil etmek amacıyla zemine hava hızı olan 20 m/s'ye bir hız verilmektedir. Kutu etrafındaki hız dağılımı Şekil.6.12'de gösterilmektedir.

Burada şekil 6.12'deki hız dağılımından görüldüğü gibi zeminin hareketinden ötürü zemin üzerinde sınır tabaka oluşmayıp sadece kutu üzerinde sınır tabaka mevcuttur.



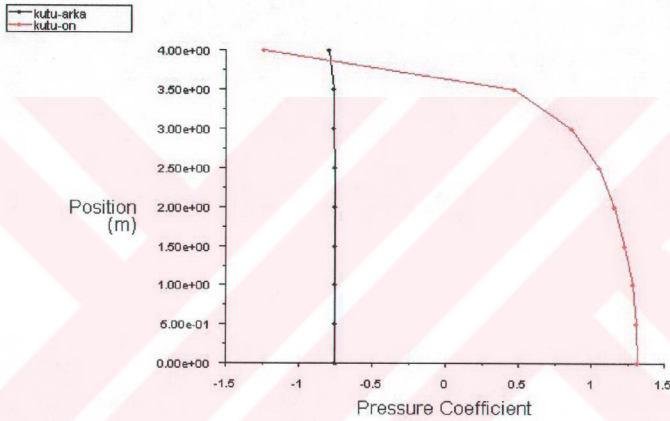
Şekil 6.12: Kutuya yakın bölgelerdeki eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 2).



Şekil 6.13: Giriş kısmındaki, 0 - 0.35 arasındaki basınç katsayısına sahip konumlar (KN 2).

Şekil 6.13'de görüldüğü gibi C_p değeri hareketsiz zemine oranla biraz düşmüştür. Bunun nedeni zemine yakın bölgedeki havanın zeminin hareketinden ötürü

yavaşlamayıp, sahip olduğu dinamik basıncın statik basınca olan dönüşümünün giriş sınırına yakın bölgede azalmasıdır. Ancak zemine yakın olan havanın kutu üzerine sürüklenmesi kutu ön yüzeyinde oluşan statik basıncı artırıp, buradaki C_p değerinin bir miktar artmasına sebep olmaktadır. (şekil 6.14). Bu değişimler aerodinamik direnç katsayısı değeri üzerinde de etkili olmaktadır. Bu model için C_D değeri 1.77 olup; 1.02'si kutu ön yüzeyine, 0.75'i de kutu arka yüzeyine aittir. Görüldüğü gibi kutu ön yüzeyi C_p değerindeki küçük artış buranın C_D değerini de biraz artırmış; kutu arka yüzeyindeki C_p değerinin negatifliğinin artışı buranın C_D değerini de biraz artırmıştır. Toplamda C_D değeri 0.05 artmıştır.



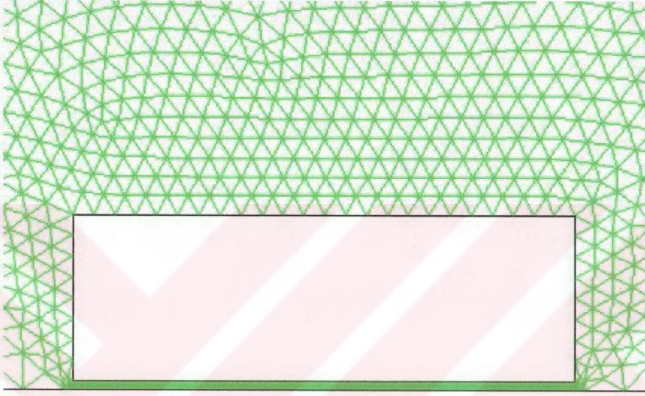
Şekil 6.14: Kutunun ön ve arka yüzeyindeki basınç katsayısı dağılımı (KN 2).

6.1.3 Koşu 3

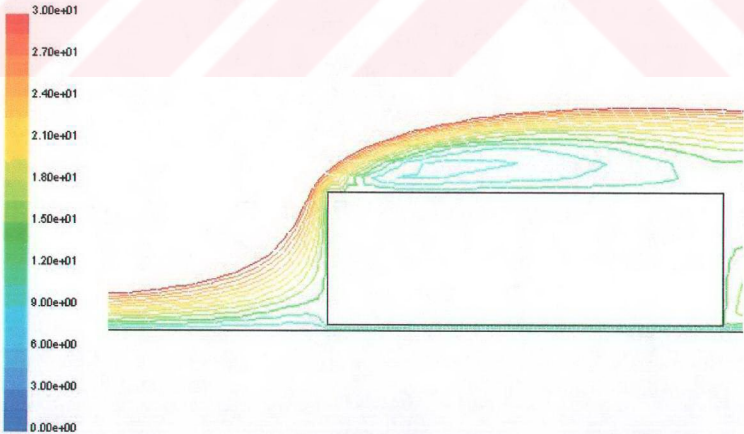
Bu koşuda kutu yerden 0.2 m yüksekliğe yerleştirilmiştir. Zemin ise hareketsizdir. Kutu altındaki akış çözümleyebilmek için, ağ sisteminin bu bölgesine şekil 6.15'den görüldüğü gibi daha küçük elemanlar yerleştirilmiştir.

Şekil 6.16'daki akım çizgilerinden görüldüğü gibi, kutu önünde bir durma noktası mevcut olup akış kutu altına ve üstüne olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kutunun üstünde de akış ayrılması mevcut olup, çevri hareketleri oluşmaktadır. Kutu altı dar bir boğaz (venturi) gibi çalışmakta olup, burada akış hızı yükselmektedir (şekil 6.18). Daha sonra bu alttaki akış kutunun arka tarafında üstten gelen akış ile birleşip, bu

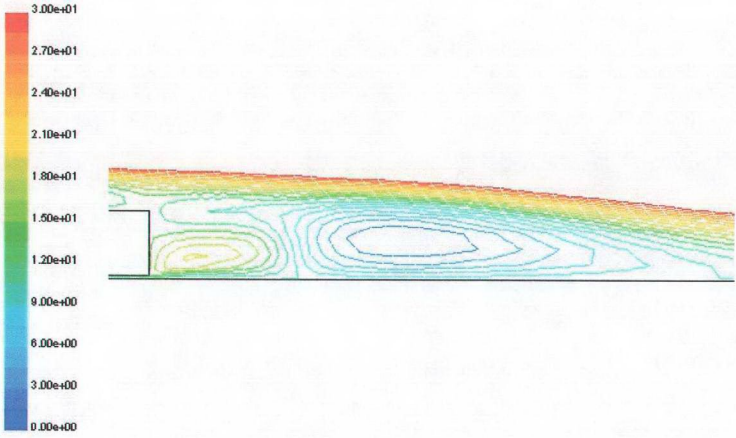
bölgede çevri hareketleri oluşturmaktadır (şekil 6.17). Bu nedenle şekil 6.19 ve 6.20'den görüldüğü üzere kutunun üst ve arka yüzeylerinde negatif C_p dağılımı elde edilir. Bu C_p değerleri zemin üzerine oturmuş kutuya göre biraz daha düşüktür. Buradaki kutu alt yüzeyindeki C_p dağılımı sıfıra yakın negatif değerler içermektedir. Bunun nedeni buradaki hızların 20 m/s civarında (biraz üzerinde) olması ve akış ayrılmalarının olmamasındandır.



Şekil 6.15: Kutunun yakın çevresinde ağ sisteminin görünümü (KN 3).



Şekil 6.16: Kutu önü ve üstündeki akım çizgilerinin görünümü (KN 3).

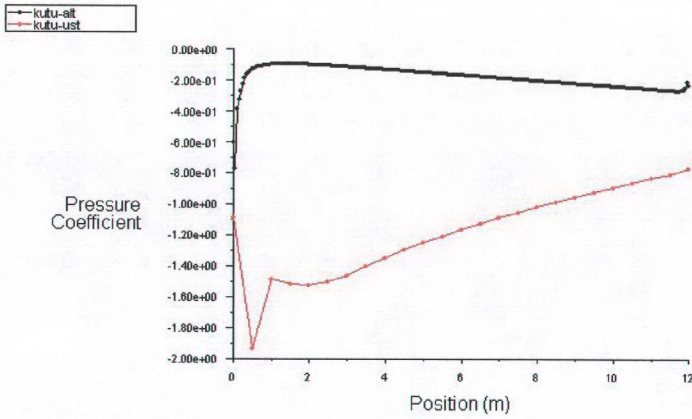


Şekil 6.17: Kutunun arka bölgesindeki akım çizgilerinin görünümü (KN 3).

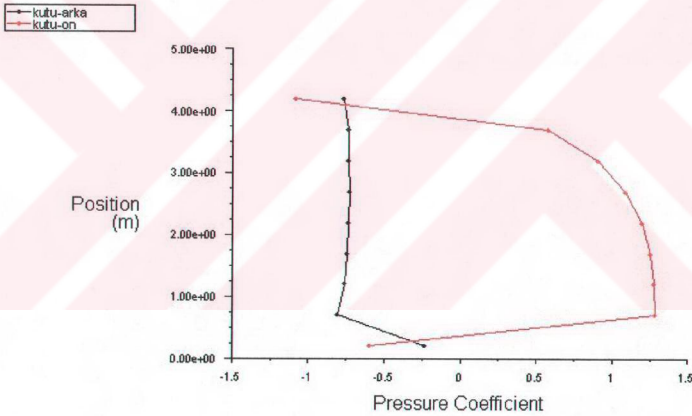


Şekil 6.18: Kutu ön ve alt kısmındaki akışa ait eş hız büyüklüğü eğrileri dağılımı (KN 3).

Şekil 6.18'den görüldüğü gibi kutu önündeki zeminde oluşan sınır tabaka, kutu altındaki sınır tabakadan daha yüksek olup, bunun nedeni kutu önündeki zemine komşu ağ sistemi elemanlarının kutu altındakinden daha büyük olmasıdır. Bu bölgede daha küçük elemanlar kullanılarak sınır tabaka inceltilebilir veya zemine hareket verilmesi ile tamamen ortadan kaldırılabilir.



Şekil 6.19: Kutunun alt ve üst yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 3).

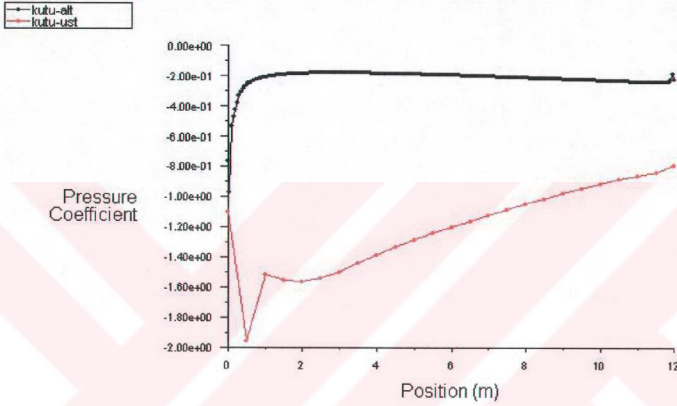


Şekil 6.20: Kutunun ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 3).

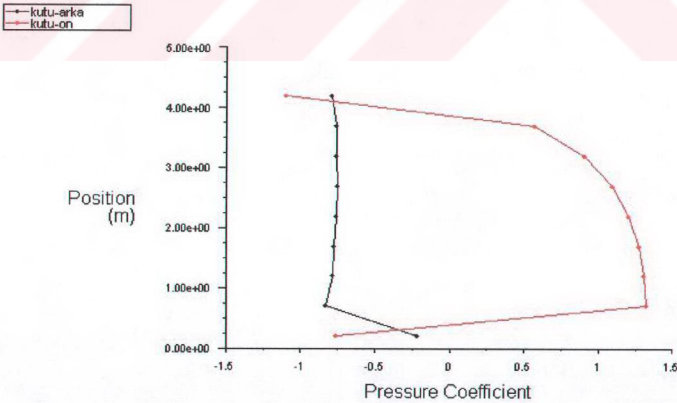
Bu model için C_D değeri 1.80 olarak çıkmıştır. Bunun 1.048'i kutu ön yüzeyinde, 0.752'si kutu arka yüzeyinde oluşmaktadır. Aerodinamik direnç değerindeki bu artışın nedeni, kutu altındaki akış nedeniyle kutu ön yüzeyindeki statik basıncın artışı ile arka yüzeyindeki statik basıncın düşmesidir.

6.1.4 Koşu 4

Bu koşuda kutu zeminden, koşu 3'deki gibi, 0.2 m yükseklikte olup zemin hareketlidir. Zeminin hareketli olmasından ötürü, koşu 3'e göre kutu ön yüzündeki statik basınç ve C_p dağılımı değerleri biraz artmıştır. Kutunun altındaki akışta ise zemindeki sınır tabaka kalktığından, buradaki statik basınç düşümü artmış ve kutu alt yüzündeki C_p dağılımı değerleri, koşu 3'e göre biraz daha düşmüştür (şekil 6.21).



Şekil 6.21: Kutunun alt ve üst yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 4).



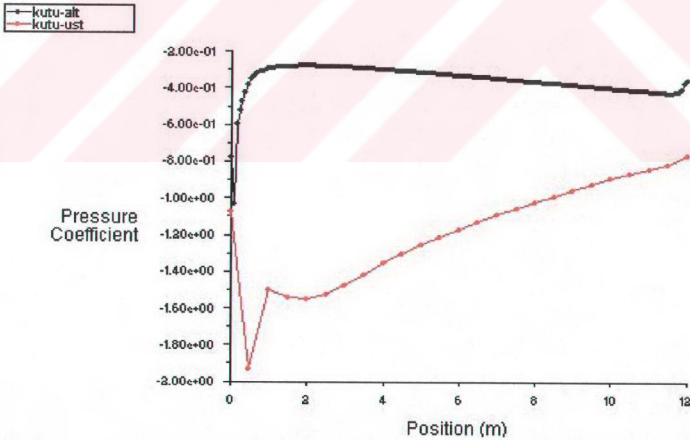
Şekil 6.22: Kutunun ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 4).

Ayrıca kutu altından gelen hızlı akış arkadaki çevri hareketlerini artırdığından, kutu arka yüzeyindeki C_p dağılımı değerleri de koşu 3'e göre biraz düşmüştür (şekil 6.22).

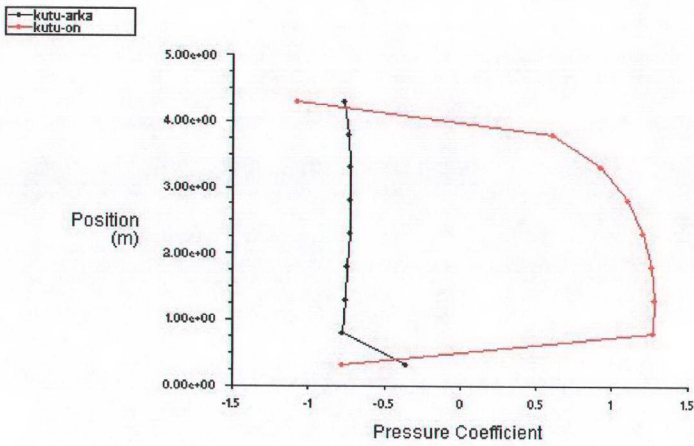
Bu model için C_D değeri 1.838 olarak çıkmıştır. Bunun 1.062'si kutu ön yüzeyine, 0.776'sı kutunun arka yüzeyine aittir. Bu artışların değeri yukarıda anlatıldığı üzere zeminin hareketinden ötürü oluşan kutu yüzeylerindeki statik basınç dağılımının değişmesidir.

6.1.5 Koşu 5

Bu koşuda kutu zeminden 0.3 m yüksekliğe yerleştirilmiştir. Zemin ise hareketsizdir. Zemin açıklığının artmasından ötürü, şekil 6.23'den görüldüğü üzere kutu alt yüzeyindeki C_p değerleri koşu 3'e göre biraz daha düşmüştür. Şekil 6.24'de ise kutu ön ve arka yüzeylerindeki C_p dağılımı gösterilmektedir. Bu model için C_D değeri ise 1.799 olup, koşu 3'ünki ile hemen hemen aynıdır. Bu değer 1.058'i kutu ön yüzeyine, 0.741'i de kutu arka yüzeyine aittir. Burada zemin açıklığının biraz artırılması ile ön yüzeydeki C_D değerini biraz artırmış, arka yüzeydeki C_D değerini biraz azaltmış; fakat toplam C_D değeri üzerine pek etki yapmamıştır.



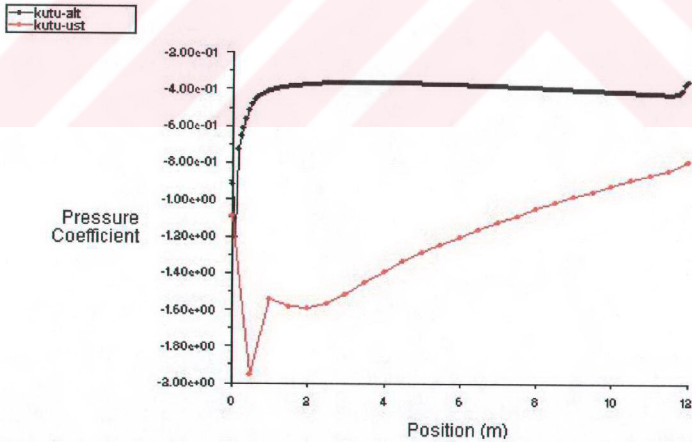
Şekil 6.23: Kutunun alt ve üst yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 5).



Şekil 6.24: Kutunun ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 5).

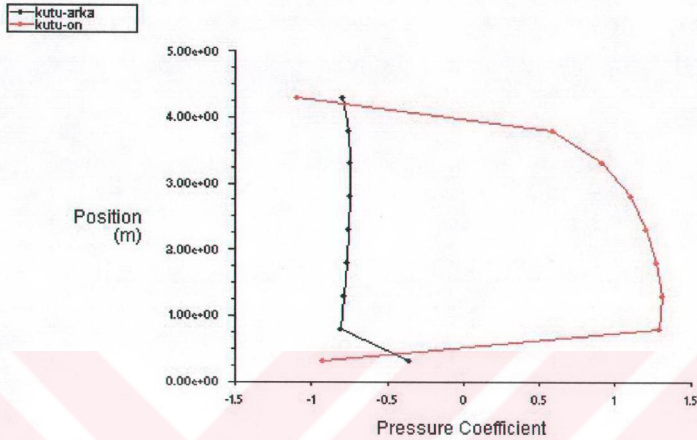
6.1.6 Koşu 6

Bu koşuda, kutu koşu 5' de olduğu gibi zeminden 0.3 m yüksekte olup zemin hareketlidir.



Şekil 6.25: Kutu alt ve üst yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 6).

Şekil 6.25’de kutu alt ve üst yüzeylerindeki, şekil 6.26’da ise kutu ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimleri görülmektedir.



Şekil 6.26: Kutu ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 6).

Bu model için C_D değeri 1.83 çıkmıştır. Bunun 1.064’ü kutu ön yüzeyine, 0.765’i de kutu arka yüzeyine aittir. Burada da zemin açıklığı artışının, hareketli zemin hali olan koşu 4 ve koşu 6’daki C_D değerlerine göre önemli bir farka sebep olmamıştır.

6.1.7 Koşu7

Bu koşuda kutu zeminden 0.4 m yüksekliğe yerleştirilmiştir. Zemin ise hareketsizdir. Bulunan C_D değeri 1.806 olup, bunun 1.075’i kutu ön yüzeyine, 0.731’i de kutu arka yüzeyine aittir. Hareketsiz zeminli önceki koşulara göre (koşu 3 ve 5) ön yüzeydeki C_D değeri biraz artmış, arka yüzeydeki ise biraz azalmıştır. Ancak toplam C_D değerinde pek bir artış olmamıştır.

6.1.8 Koşu 8

Bu koşuda kutu koşu 7’de olduğu gibi zeminden 0.4 m yükseklikte olup, zemin hareketlidir. Bulunan C_D değeri 1.833 olup, bunun 1.068’i kutu ön yüzeyine, 0.764’ü de kutu arka yüzeyine aittir. Hareketli zeminin kullanıldığı önceki koşulara göre

(koşu 4 ve 6) ön yüzeydeki C_D değeri biraz artmış, arka yüzeydeki ise biraz azalmıştır. Ancak toplam C_D değerinde pek bir artış olmamıştır.

İlk sekiz koşuya ait hesaplanan C_D değerleri tablo 6.1'de özetlenmiştir.

Tablo 6.1: İlk sekiz koşuya ait hesaplanan C_D değerleri.

Koşu numarası	$C_{D\text{ ön}}$	$C_{D\text{ arka}}$	$C_{D\text{ toplam}}$	Zemin açıklığı ve durumu
1	1.01	0.71	1.725	0m , Durağan
2	1.02	0.75	1.77	0m , Hareketli
3	1.048	0.752	1.80	0.2m, Durağan
4	1.062	0.776	1.838	0.2m, Hareketli
5	1.058	0.741	1.799	0.3m, Durağan
6	1.064	0.765	1.83	0.3m, Hareketli
7	1.075	0.731	1.806	0.4m, Durağan
8	1.068	0.764	1.833	0.4m, Hareketli

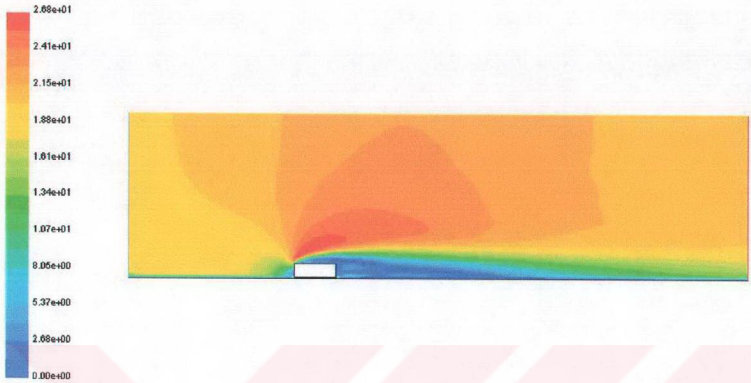
6.1.9 Koşu 9

Bu koşuda hesap alanının yüksekliği iki katına çıkarılarak (12H) blokaj etkisi azaltılmaya çalışılmıştır. Kutu yerden 0.3 m yükseklikte olup, zemin hareketsizdir.

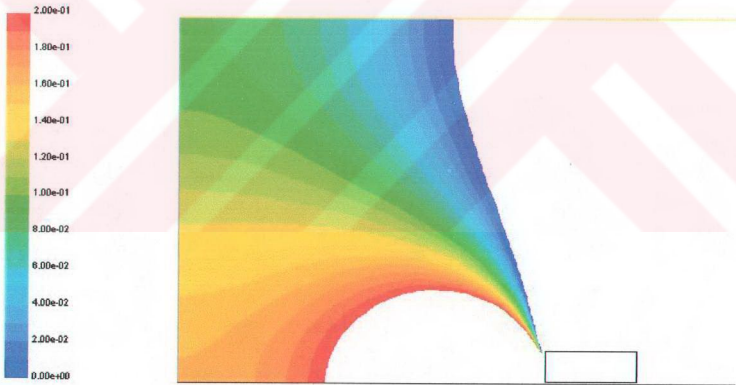
Şekil 6.27'deki hız dağılımına bakıldığında üst sınırdaki hızların büyüklüğü, blokaj etkisinin azalmasından ötürü, önceki koşulara göre azalmıştır. Aynı zamanda giriş sınırına kadar olan statik basınç artışı da şekil 6.28 ve 6.29'daki C_p dağılımlarından görüldüğü gibi, önceki koşulara göre azalmıştır. Ancak yine de blokaj etkisi çok düşük seviyelere çekilememiştir.

Blokaj etkisinin azalması kutu yüzeylerindeki C_p dağılımlarını da değiştirecektir. Şekil 6.30 ve 6.31'de gösterilen kutu yüzeylerindeki C_p dağılımlarına göre kutu ön yüzeyindeki statik basıncın değeri düşmüş, arka yüzeyde ise basıncın negatifliği azalmıştır (yükselmiş). Kutu üst yüzeyinde de basıncın negatifliği azalmıştır. Alt

yüzey ise pek etkilenmemiştir. Yani üç yüzeyde de C_p dağılımları mutlak değer olarak düşmüş olup, bu da C_D değerlerine yansiyacaktır. Bu model için C_D değeri

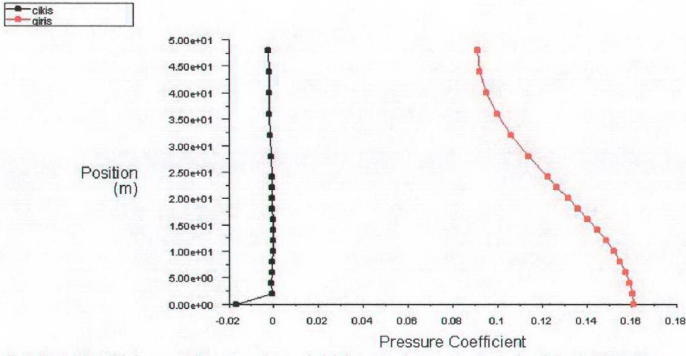


Şekil 6.27: Hesap alanının tümü üzerindeki eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 9).

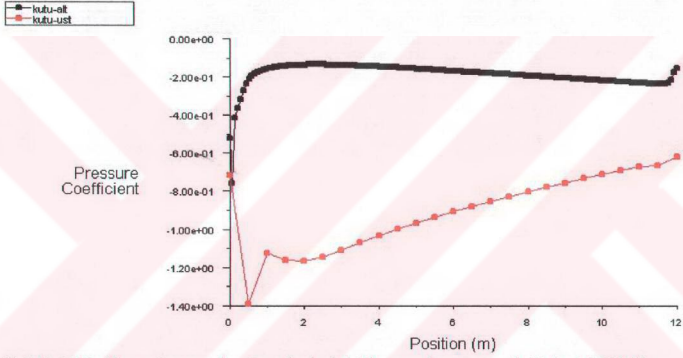


Şekil 6.28: Giriş kısmındaki, 0-0.2 arasındaki basınç katsayısına sahip konumlar (KN 9).

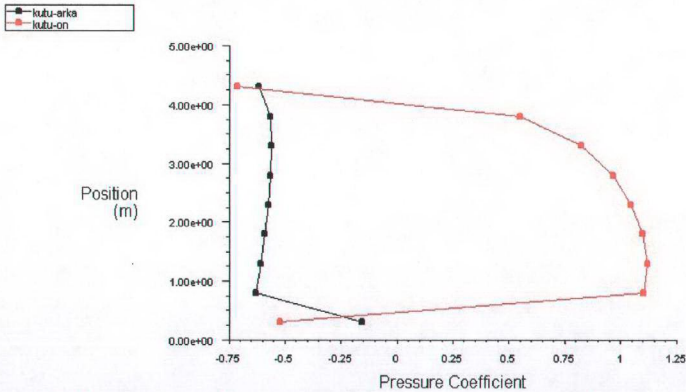
1.517 olup, bunun 0.93'ü ön yüzeye, 0.586'sı arka yüzeye aittir. Görüldüğü gibi blokaj etkisinin azalması hesaplanan C_D değeri üzerine çok etkili olmaktadır. Koşu 5 ile kıyaslama yapılır ise, C_D değerinin 0.282 kadar azaldığı görülmür.



Şekil 6.29: Giriş ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısının değişimi (KN 9).



Şekil 6.30: Kutu üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 9).



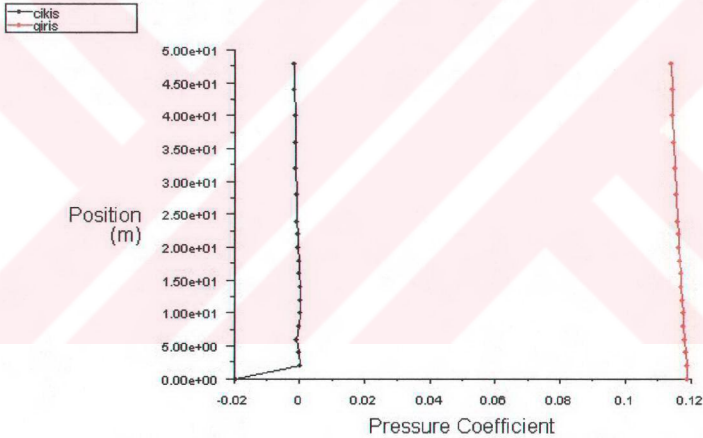
Şekil 6.31: Kutu ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 9).

6.1.10 Koşu 10

Burada, koşu 9'daki hesap alanı kullanılmış olup, zemine hareket verilmiştir. Bu model için C_D değeri 1.555 olarak çıkmıştır. Bunun 0.997'si ön yüzeye, 0.557'si arka yüzeye aittir. Bu koşuda, koşu 9'a göre zeminin hareketi ile ön yüzeyde artan C_D değeri ile arka yüzeyde azalan C_D değeri gözlemlenmiştir. Toplam aerodinamik direnç katsayısı ise koşu 9'a göre 0.038 artmıştır.

6.1.11 Koşu 11

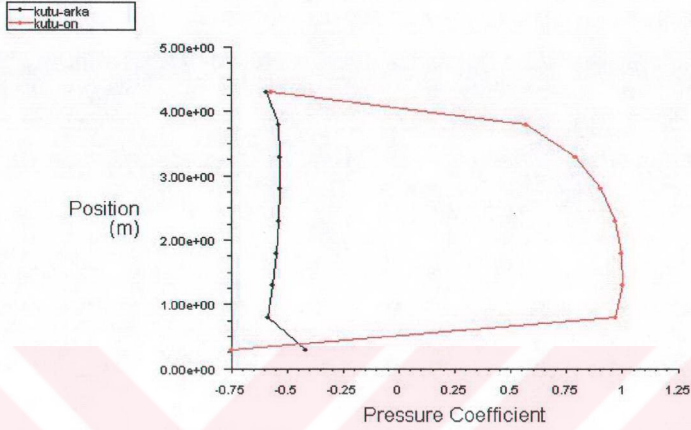
Bu koşuda blokaj etkisinin giriş sınırına olan etkisini azaltmak amacıyla, koşu 9'daki hesap alanının giriş kısmı iki kat artırılmış (8L); zemin de hareketsiz olarak kabul edilmiştir.



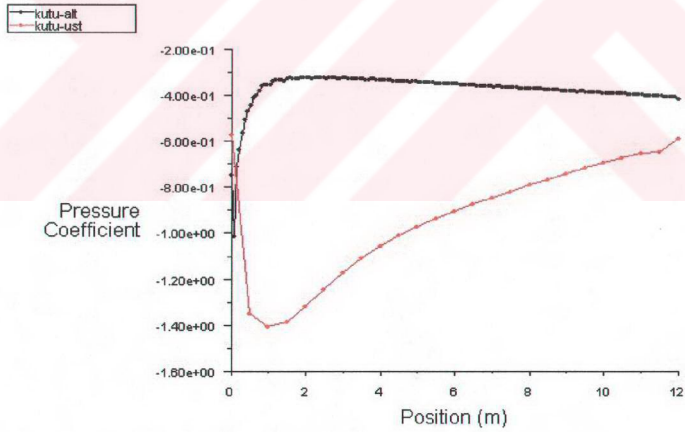
Şekil 6.32: Giriş ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısı değişimi (KN 11).

Şekil 6.32'den görüldüğü gibi giriş sınırındaki C_p değeri koşu 9'a göre daha da azalmıştır. Ancak yine de çok düşük seviyelere çekilemiştir. Giriş sınırındaki C_p değerinde oluşan bu azalma şekil 6.33'den görüldüğü gibi kutu ön ve arka yüzeylerindeki C_p dağılımını da değiştirmiş olup, ön yüzeydeki değerler düşmüş, arka yüzeydeki değerlerin negatifliği azalmıştır. Kutu üst yüzeyinde C_p değerleri biraz düşmüştür (şekil 6.34). Bunun nedeni kutu önünde oluşan statik basınç

yükselmesinin azalmasıdır. Kutu alt yüzeyinde alt yüzeyindeki C_p dağılımında önemli bir değişiklik olmamıştır.



Şekil 6.33: Kutu ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 11).



Şekil 6.34: Kutu üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 11).

Bu model için C_D değeri 1.410 olup, bunun 0.860'ı ön yüzeye, 0.549'u arka yüzeye aittir. Koşu 9'a göre toplamda C_D değeri 0.107 azalmıştır. Giriş sınırının geriye çekilmesi ile hesaplanan C_D değerinde düşüş gözlemlenmektedir.

6.1.12 Koşu 12

Bu koşuda koşu 11'deki modelin zemini hareketli hale getirilmiştir. C_p değerine ait grafikler koşu 16 ile kıyas yapılması amacıyla bölüm 6.1.16'da verilmektedir.

Bulunan C_D değeri 1.506 olup, bunun 0.924'ü ön yüzeye, 0.582'si arka yüzeye aittir. Bu koşuda hareketli zemin hali C_D değerini önemli bir miktarda, 0.096 kadar artırmaktadır.

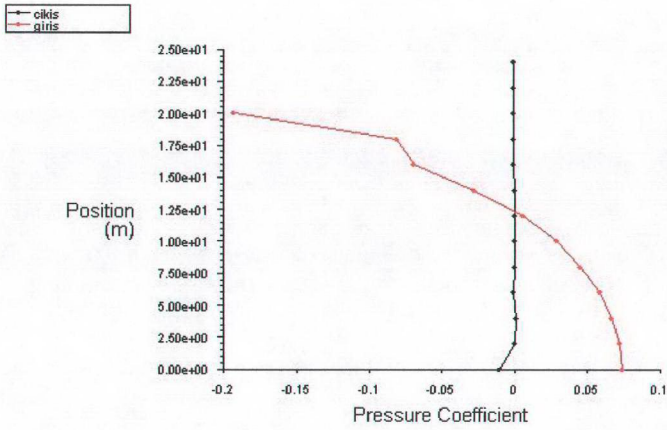
Ayrıca bu koşuda elde edilen bu sonuçlardan sonra, yakınsama kriteri 10^{-3} 'den 10^{-4} 'e çekilerek hesaplamalara devam edilmiştir. Bu şekilde yakınsama kriterinin C_D değerini ne oranda etkilediği gözlemlenmek istenmiştir. Çıkan C_D değerleri ise şu şekildedir: Toplam C_D değeri 1.505 olup, bunun 0.972'si ön yüzeye, 0.532'si arka yüzeye aittir. Ön ve arka yüzeylerin C_D değerleri biraz değişmesine rağmen, toplam C_D değerinde önemli bir değişim oluşmamıştır. Bu nedenle, yakınsama kriteri olarak atanan 10^{-3} değeri aerodinamik direnç katsayısı hesabı için yeterli gözükmektedir.

6.1.13 Koşu 13

Bu koşuda blokaj etkisini azaltmak amacıyla koşu 5'deki hesap alanı esas alınarak giriş sınırının 1/6'sı üst kısımda duvar olarak alınmış, aşağıdaki 5/6'lık kısımdan hava jeti yollarılmıştır. Zemin ise hareketsizdir.

Şekil 6.35'e bakıldığında C_p değeri giriş sınırının alt kısmında pozitif, üst kısmında ise negatif değer almaktadır. Bunun nedeni şekil 6.36'da görülen hız dağılımına göre, ani kesit genişlemesi nedeniyle giriş kısmının üst kesiminde oluşan hız düşüşü ve oluşan çevri hareketleri ile basıncın düşmesidir.

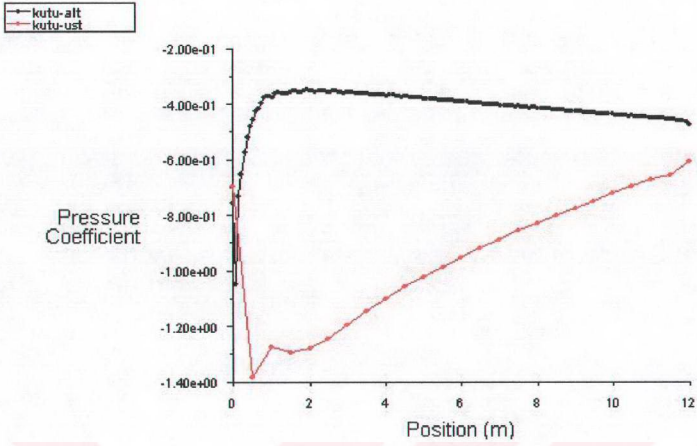
Girişteki C_p değerlerinin azalması kutu yüzeylerindeki C_p dağılımını ve dolayısıyla C_D değerini etkileyecektir. Şekil 6.37'den görüldüğü üzere kutu alt yüzeyindeki C_p değerleri negatif bölgede olup daha da düşmüştür. Kutu üst yüzeyinde de C_p değerleri biraz düşmüştür. Şekil 6.38'den görülen kutu ön ve arka yüzeylerindeki C_p dağılımında koşu 5'e göre ön yüzeyin pozitif olan C_p değerlerinde bir düşüş, arka yüzeyin C_p değerlerinde ise negatifliğin azaldığı gözlemlenmektedir. Bunun nedeni giriş kısmında oluşan statik basınç artışının azalmasıdır.



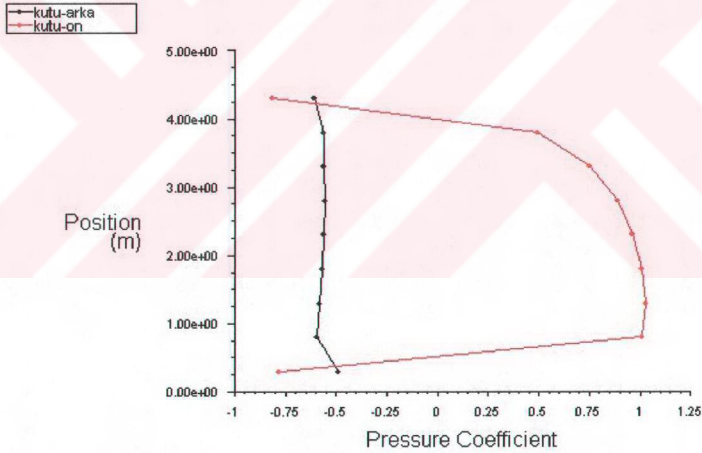
Şekil 6.35: Giriş ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısı değişimi (KN 13).



Şekil 6.36: Hesap alanının tümü üzerindeki eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 13).



Şekil 6.37: Kutu alt ve üst yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 13).



Şekil 6.38: Kutu ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 13).

Bu model için C_D değeri 1.436 olarak bulunmuş olup, bunun 0.853'ü ön yüzeye, 0.582'si arka yüzeye aittir. Görüldüğü gibi blokaj etkisinin azaltılması ile hesaplanan C_D değeri epey düşmüştür. Koşu 5'e göre 0.363 düşmüştür.

6.1.14 Koşu 14

Bu koşuda koşu 13'de kullanılan model zemini hareketli olarak çözümlenmiştir. Bulunan C_D değeri 1.468 olup, bunun 0.865'i ön yüzeye, 0.603'ü arka yüzeye aittir. Koşu 8'den sonraki altı koşuya (9 ile 14 arasındaki) ait C_D değerleri tablo 6.2'de özetlenmektedir.

Tablo 6.2: 9, 10, 11, 12, 13, 14 numaralı koşulara ait hesaplanan C_D değerleri.

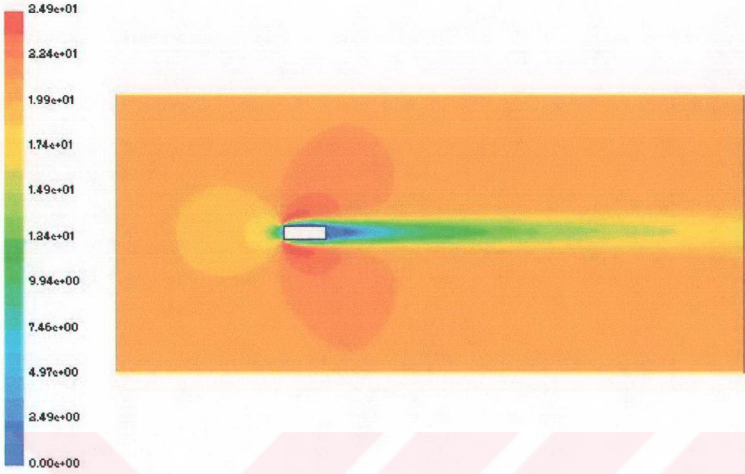
Koşu numarası	$C_{D\text{ ön}}$	$C_{D\text{ arka}}$	$C_{D\text{ toplam}}$	Giriş kısmı uzunluğu	Hesap alanı yüksekliği	Zemin durumu
9	0.930	0.586	1.517	4L	12H	Durağan
10	0.997	0.557	1.555			Hareketli
11	0.860	0.549	1.410	8L	12H	Durağan
12	0.924	0.582	1.506			Hareketli
13*	0.853	0.582	1.436	4L	6H	Durağan
14*	0.865	0.603	1.468			Hareketli

* Kısılmış hava jeti uygulanmaktadır.

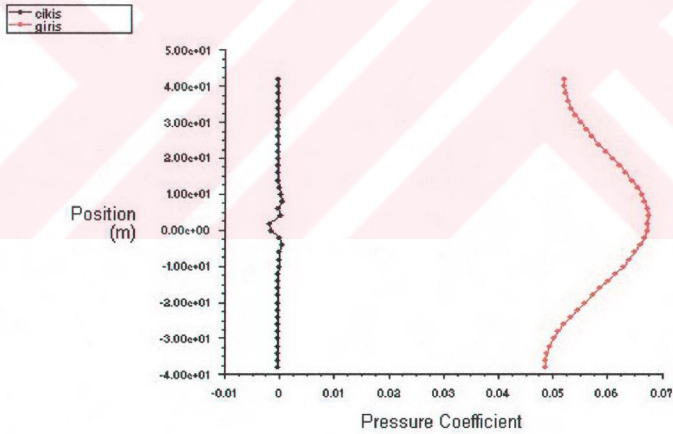
6.1.15 Koşu 15

Bu koşuda geometrik model altından bir zemin ile sınırlandırılmamıştır. Kutunun yataydaki simetri eksenini, 20H yüksekliğindeki hesap alanının yataydaki simetri eksenini üzerine gelecek şekilde kutu yerleştirilmektedir. Giriş sınırı ile kutu ön yüzeyi arasındaki mesafe 4L, çıkış sınırı ile kutu arka yüzeyi arasındaki mesafe 10L olarak alınmaktadır. Bu koşuda alt sınırda üst sınır gibi simetri sınır şartına haizdir. Diğer sınır şartları ise değişmemektedir. Buradaki amaç, katı bir yüzey tarafından sınırlandırılmayan kutu üzerine yollanan serbest hava jetinin modellenmesidir.

Şekil 6.39'da akışa ait hız dağılımı görülmektedir. Blokaj oranı 1/20 olduğundan üst ve alt sınırlara yakın bölgelerdeki hız artışı epey azalmıştır. Şekil 6.40'da görülen giriş ve çıkış sınırlarındaki C_p değerleri dağılımına göre giriş sınırındaki C_p değeri 0.1 civarında düşük değerlere inmiştir. Çıkış sınırında ise C_p değeri genelde sıfır civarında olup, ard izin uzantısı olan kısımda sıfırdan bir miktar saptamaktadır.



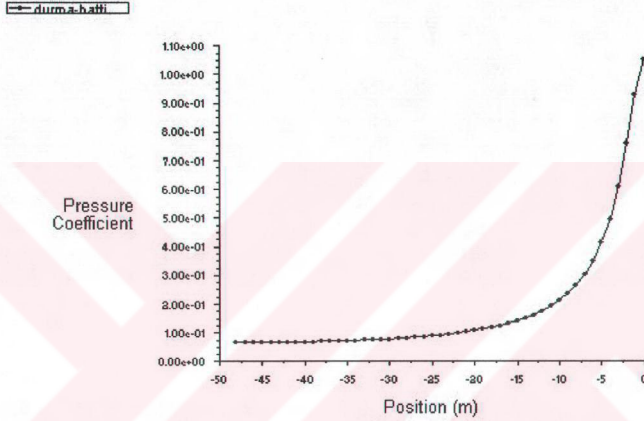
Şekil 6.39: Hesap alanının tümü üzerindeki eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 15).



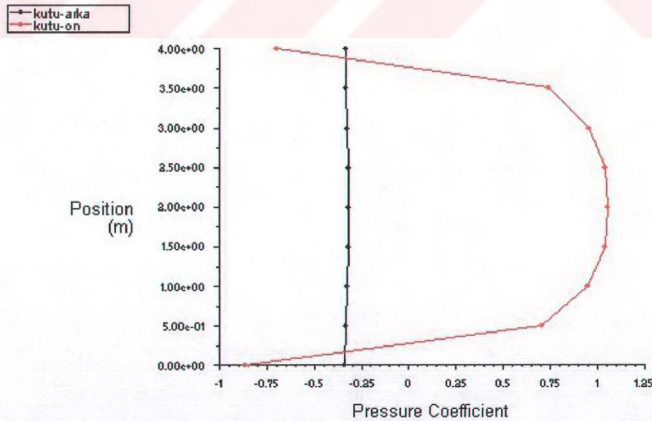
Şekil 6.40: Giriş ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısının değişimi (KN 15).

Şekil 6.41’de durma hattı boyunca olan C_p değişimi görülmekte olup, kutuya doğru ilerlendikçe C_p değerinin arttığı, durma noktasında ise 1 değerine eriştiği gözlemlenmektedir. Şekil 6.42’de ise kutu ön yüzeyinde beklendiği gibi simetrik bir C_p dağılımı elde edilmiş ve yüzeyin orta noktasında durma noktasının varlığı

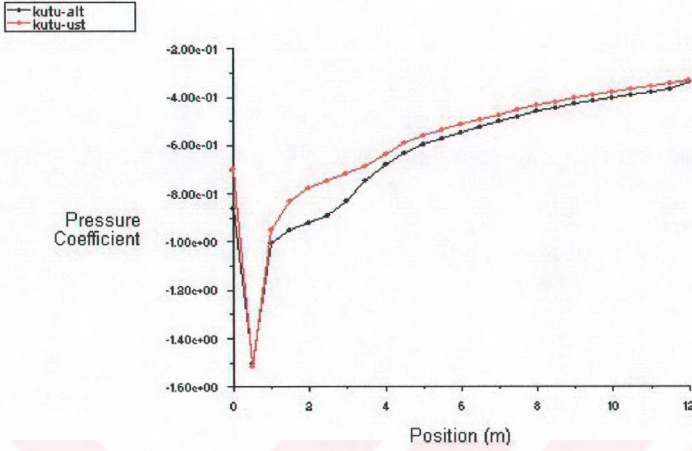
görülmektedir. Arka yüzeyde ise zeminli durumlara göre C_p değerinin negatifliği azalmıştır. Şekil 6.43'de görülen kutu üst ve alt yüzeylerindeki C_p dağılımı bu yüzeylerdeki akış ayrılması ve türbülans nedeniyle negatif çıkmıştır. Ancak akışın kutu altından da kaçabilmesi sebebiyle köşelerdeki akış dağılımı azalmakta üst ve alt yüzeylerin ön kısmında olan akış ayrılması arkaya doğru gidildikçe azalmaktadır. Bu nedenle üst yüzeydeki C_p değerlerinin negatifliği arkaya doğru ilerlendikçe azalmaktadır.



Şekil 6.41: Durma hattı boyunca basınç katsayısının değişimi (KN 15).



Şekil 6.42: Kutu ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısının değişimi (KN 15).



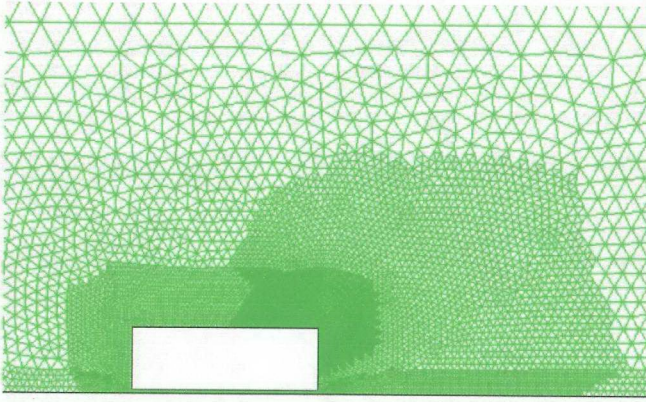
Şekil 6.43: Kutu üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısının değişimi (KN 15).

Bu model için C_D değeri 1.202 olup, bunun 0.876'sı kutu ön yüzeyine, 0.326'sı kutu arka yüzeyine aittir. Kutu altındaki zeminin kalkması ve blokaj oranının düşmesi ile hesaplanan C_D değeri büyük oranda düşmüştür.

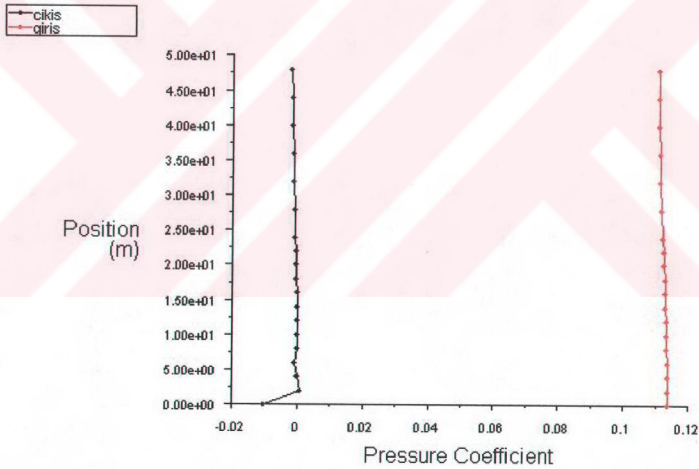
6.1.16 Koşu 16

Bu koşuda amaç çözüm iyileştirmesi yapmaktır. Bunun için koşu 12'deki hareketli zemine haiz modelin ağ sistemi üzerinde iyileştirme yapıp, sonuçlar koşu 12 ile kıyaslanmaktadır.

Şekil 6.44'de görüldüğü gibi ağ sisteminin cıdarlara komşu bölgelerindeki elemanların boyutları küçültülerek elemanlar sıklaştırılmıştır. Burada, kutunun ön ve arkasındaki zemine komşu ilk iki sıra, kutu ön ve üst yüzeyine komşu ilk 8 sıra, kutu arka yüzeyine komşu ilk 25 sıradaki elemanlar ikiye bölünerek ağ sistemi iyileştirilmiştir. Kutunun arka bölgesinde oluşan ard izin yapısını daha hassas çözümleyebilmek için bu bölgede daha fazla sayıda elemana iyileştirme yapılmıştır. Kutunun alt bölgesindeki elemanlar küçük olduğundan, bu bölgede iyileştirme yapılmamıştır.

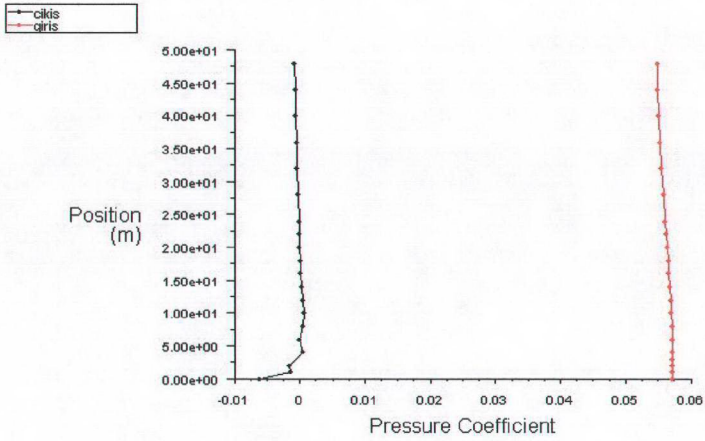


Şekil 6.44: Ağ sisteminin iyileştirilmiş halinin kutuya yakın kısımlardaki görünümü (KN 16).

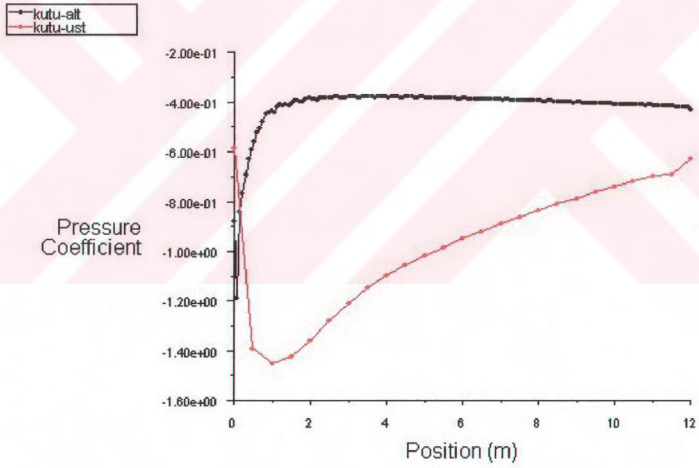


Şekil 6.45: Giriş ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısı değişimi (KN 12).

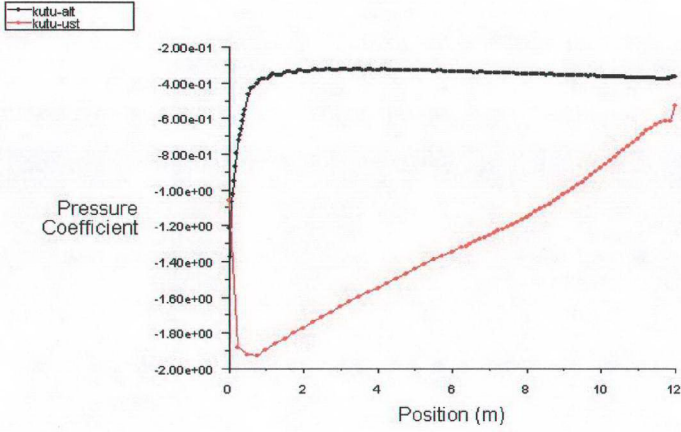
Kutu yüzeylerindeki sınır tabaka ile türbülanslı bölgelerdeki hız ve basınç değerlerinin daha küçük elemanlarla hesaplanması ile C_p değerlerinde değişim olmaktadır. Şekil 6.45 ve 6.46'dan görüldüğü gibi giriş sınırındaki C_p değeri koşu12'ye göre düşmüştür. Şekil 6.47 ve 6.48'e göre kutu alt yüzeyindeki C_p dağılımı pek değişmemiş, ancak üst yüzeydeki C_p değerleri epey düşmüştür.



Şekil 6.46: Giriş ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısı değişimi (KN 16).

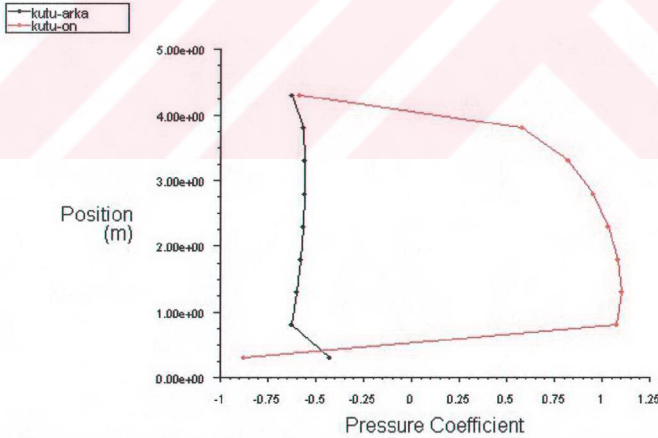


Şekil 6.47: Kutu üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 12).

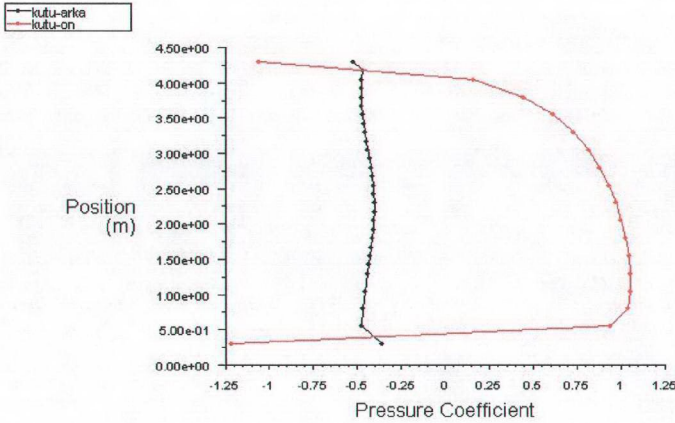


Şekil 6.48: Kutu üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 16).

Şekil 6.49 ve 6.50'ye göre ön yüzeydeki C_p değerleri bir miktar düşmüş, arka yüzeydeki C_p değerlerinin ise negatifliği azalmıştır. Bu da hesaplanan C_D değerinde bir düşüşe sebep olacaktır. Koşu 12 ve 16'ya ait C_D değerleri tablo 6.3'de verilmiştir.



Şekil 6.49: Kutu ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 12).



Şekil 6.50: Kutu ön ve arka yüzelerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 16).

Tablo 6.3: Koşu 12 ve 16'ya ait hesaplanan C_D değerleri

Koşu numarası	$C_{Dön}$	C_{Darka}	C_D
12	0.924	0.582	1.506
16	0.820	0.443	1.263

Tablo 6.3'den görüldüğü gibi ağ sisteminin iyileştirilmesi hesaplanan C_D değerlerini önemli derecede etkilemektedir. Özellikle arka kısımdaki C_D değeri düşüşü daha fazladır. Bu nedenle kaba elemanlı ağ sistemleri iyileştirilmelidir. Bu şekilde daha doğru çözümlere yaklaşılabılır.

6.2 3-Boyutlu Akış Çözümlemeleri

Bu kısımda kutu modelinin etrafındaki akışın 3-boyutlu olarak çözümlemesi yapıp, sonuçlar iki boyutlu çözümlemeler ile karşılaştırılacaktır. Ancak çözüm kolaylığı için, model simetrik olduğundan hesap alanının yarısı üzerinde çözüm yapılacaktır. Bu şekilde simetri kabulü ile yapılan çözümlemede, denenen geometrik modelin arkasında oluşan ard izin yapısı gerçekte tam simetrik olmayıp türbülanslı bir yapıya sahip olduğundan bir miktar hata oluşmaktadır (Perzon ve diğ. 1998). Ancak simetri

kabulü ile yapılan çözümlemede ağ sistemindeki eleman sayısı ve çözüm süresinden tasarruf edilmektedir.

Koşu 5'de yapılan 2-boyutlu çözümlemede kutu boyutları $H \times L = 4 \times 12$ ve hesap alanının yüksekliği $6H = 24$, kutu önü giriş kısmı uzunluğu $4L = 48$, kutu arkasındaki mesafe $10L = 120$ idi (boyutlar m cinsindendir). Ayrıca kutu yerden 0.3m yüksekliktedir. 3-boyutlu durum için kutu genişliği $B = 3$ olup, çözümleme simetrik akış kabulü ile yapılacağından, kutu kendi simetri düzleminden itibaren 1.5 m uzatılmaktadır. Hesap alanı genişliği ise kutu genişliğinin 4 katı olup, simetri düzleminden itibaren 6m uzatılmaktadır. Böylelikle koşu 5'de $4/24 = 1/6$ olan blokaj oranı, 3-boyutlu durumda $6/144 = 1/24$ olmaktadır.

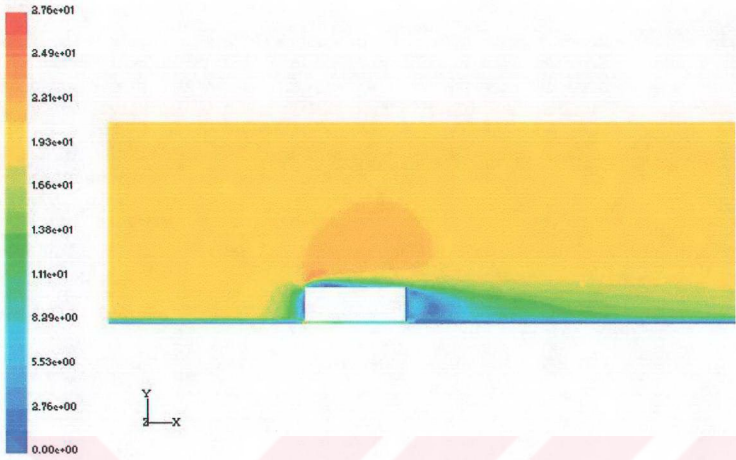
6.2.1 Koşu 17

Yukarıda tanımlanmış olan hesap alanı için sınır şartları aşağıdaki gibidir:

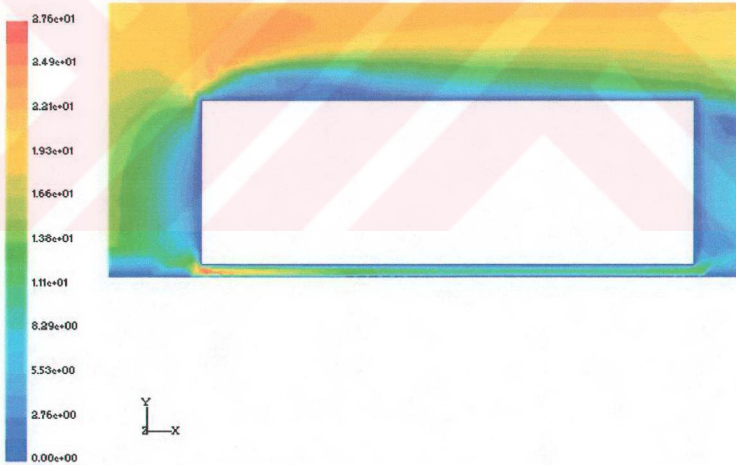
- Giriş sınırı: Hız girişi. $V = 20$ m/s , $k = 10^{-2}$, $\epsilon = 10^{-3}$
- Çıkış sınırı: Basınç çıkışı. $p = 0$, $k = 10^{-2}$, $\epsilon = 10^{-3}$
- Simetri düzlemi: Simetri sınırı
- Yanal düzlem: Simetri sınırı
- Üst sınır: Simetri sınırı
- Kutu yüzeyleri: Hareketsiz cidar

Kullanılan türbülans modeli standart k- ϵ modelidir. Zemin ise hareketsizdir.

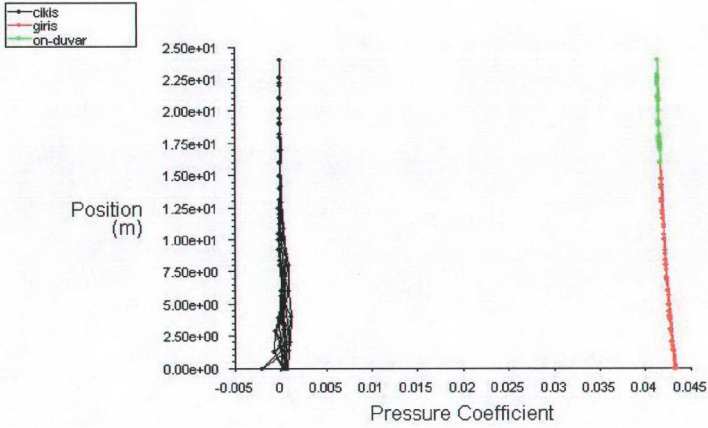
Şekil 6.51'de görülen hız dağılımına göre kutu üzerindeki hız artışları çok azalmıştır. Bunun nedeni, akışın hem kutunun üstünden hem de yan tarafından akması ile azalan blokaj etkisidir. Şekil 6.52'de görüldüğü gibi kutu altındaki akış düşük hızlıdır. Bunun sebebi ise, zeminin ve kutunun hareketsiz olmasından ötürü oluşan sınır tabaka ile ağ sisteminin bu bölgesindeki kullanılan elemanların yeterince küçük olmayışıdır. Şekil 6.53'de görülen giriş ve çıkıştaki C_p dağılımlarında, C_p değerinin giriş sınırında oldukça düşmüş olduğu görülür. Kutu önündeki basınç yükselişinin giriş sınırına daha az yansması daha az hatalı sonuçlar ortaya çıkması demektir.



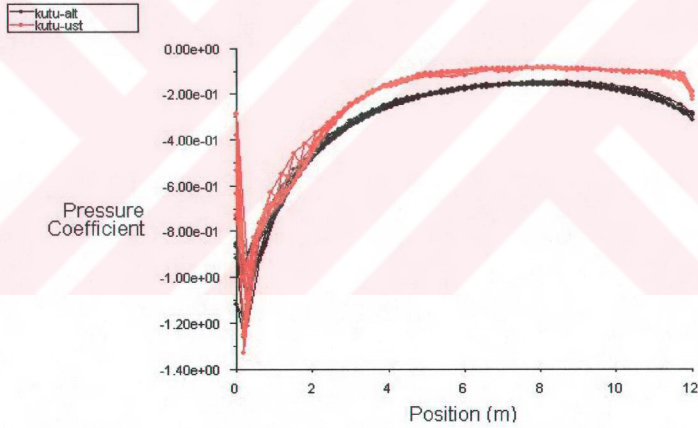
Şekil 6.51: Simetri düzlemi üzerinde kutuya yakın bölgelerdeki eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 17).



Şekil 6.52: Simetri düzlemi üzerinde kutunun yakın çevresindeki bölgelerde eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 17).



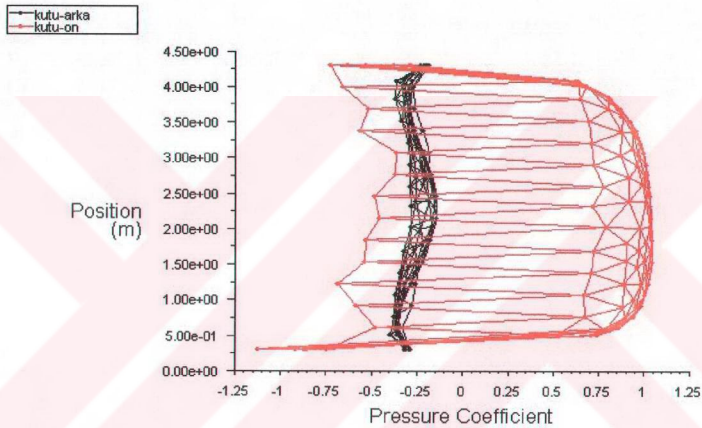
Şekil 6.53: Giriş (giriş+ön duvar) ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısı değişimi (KN 17).



Şekil 6.54: Kutu alt ve üst yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 17).

Şekil 6.54'de kutu üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı dağılımları görülmektedir. Kutu üst yüzeyindeki C_p değeri ön uca yakın kısımda negatif bölgede çok düşük değere sahip iken arka kısma doğru ilerlendikçe C_p değeri sıfıra yaklaşmakta, ancak yine de negatif değerde kalmaktadır. Bunun sebebi, kutu alınının küt olmasından ötürü akışın dağılıp, kutu üst yüzeyinden ayrılması, çevri hareketlerinin ve düşük hızların oluşmasıdır. Ancak üç boyutlu durumda kutu üst

yüzeyinin ön kısmında oluşan akış ayrılmasından sonra akış arka kısma doğru ilerlendikçe tekrar yüzeye yaklaşmakta ve düşük hızlı türbülanslı tabaka incelmektedir. Böylelikle bu kısımlarda statik basınç düşüşü azalacağından C_p değeri yükselip sifıra yaklaşmaktadır. Kutu alt yüzeyinde de C_p değeri ön kısımlarda ani bir düşüş gösterip negatif değerler almakta, ancak arkaya doğru ilerlendikçe C_p değeri yükselip, negatifliği azalmaktadır. Bunun nedeni kutu altına giren akışın ani kesit daralması ile birden bire hızlanıp statik basıncın düşmesidir. Arkaya doğru ilerlendikçe ise hız düştüğünden akışın dinamik basıncı statik basınca dönüşüp C_p değeri yükselişe geçmektedir.



Şekil 6.55: Kutu ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 17).

Şekil 6.55’de kutu ön ve arka yüzeylerindeki C_p değeri değişimi görülmektedir. Kutu ön yüzeyi simetri hattı boyunca C_p değeri 1 civarındadır. Çünkü bu bölge akışın aniden durmaya zorlandığı, durma bölgesini içermektedir. Kutu ön yüzeyinde yan kenara doğru gidildikçe C_p değeri düşmektedir. Kutu arka yüzeyinde ise koşu 5’e göre C_p değerlerinin negatifliği azalmıştır. Bunun nedeni yukarıda anlatıldığı gibi üstteki akışın, kutu üst yüzeyinden daha az miktarda ayrılıp tekrar yüzeye yaklaşması ile arkadaki türbülansın ve basınç düşüşünün azalmasıdır.

Bu model için hesaplanan C_D değeri 1.127 olup, bunun 0.839’u kutu ön yüzeyine, 0.288’i kutu arka yüzeyine aittir. Koşu 5’de 1.799 olan C_D değeri blokaj etkisinin azalması ile 0.672 gibi önemli bir miktarda düşüş göstermiştir.

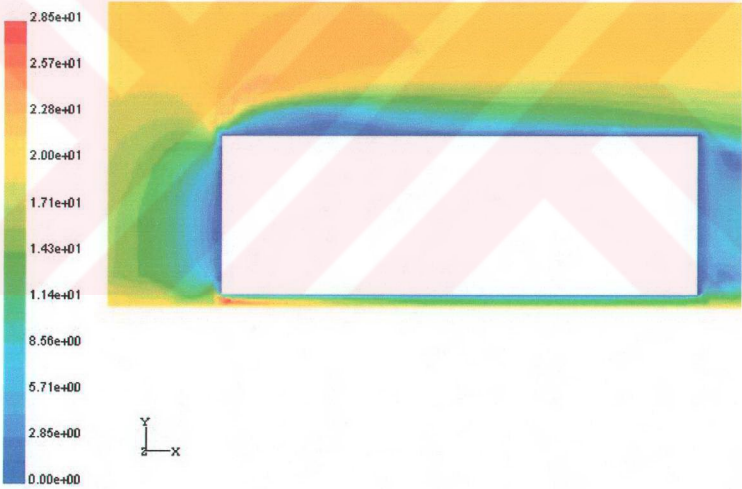
6.2.2 Koşu 18

Bu koşuda, koşu 17’de kullanılan modelin hareketli zemin hali kullanılacaktır.

Zeminin hareketli olması ile zeminde oluşan sınır tabaka ortadan kalkmıştır (şekil 6.56). Ayrıca kutu altındaki akışın hızı artmıştır. Zeminin hareketi ile giriş sınırındaki C_p değeri şekil 6.57’de görüldüğü gibi biraz daha düşmüştür.

Şekil 6.58 ve 6.59’da görülen kutu yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimlerine bakıldığında, zeminin hareketli olması durağan zemine göre ön yüzeyde önemli bir değişiklik yapmamış, arka yüzeyde negatifliği biraz düşürmüş, üst ve alt yüzeylerde ise negatifliği biraz azaltmıştır.

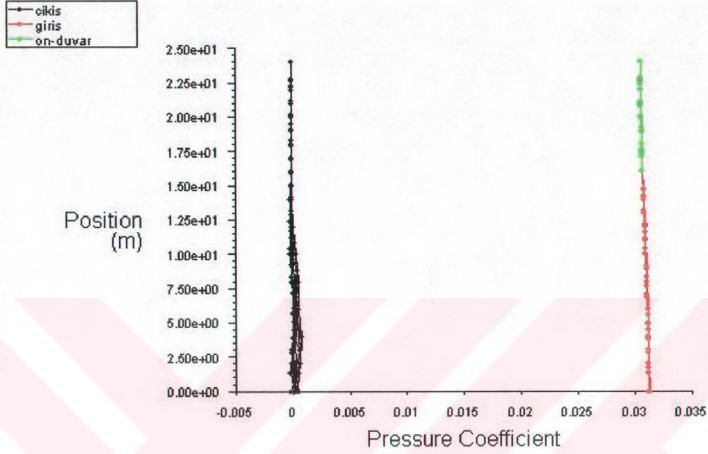
Bu model için hesaplanan C_D değeri 1.146 olup, bunun 0.838’i kutu ön yüzeyine, 0.307’si kutu arka yüzeyine aittir.



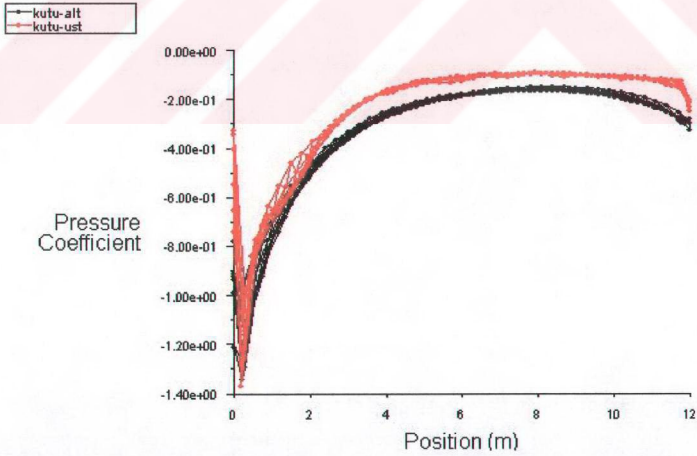
Şekil 6.56: Simetri düzlemi üzerinde kutunun yakın çevresindeki bölgelerde eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 18).

Tablo 6.4’de 2-boyutlu koşu 5 ve 6 ile 3-boyutlu koşu 17 ve 18’e ait C_D değerleri listelenmektedir. 2-boyutlu çözümlemeden 3-boyutlu çözümlemeye geçilirken, kutunun hem ön hem de arka yüzeyine ait C_D değerlerinde düşüş gözlemlenmektedir.

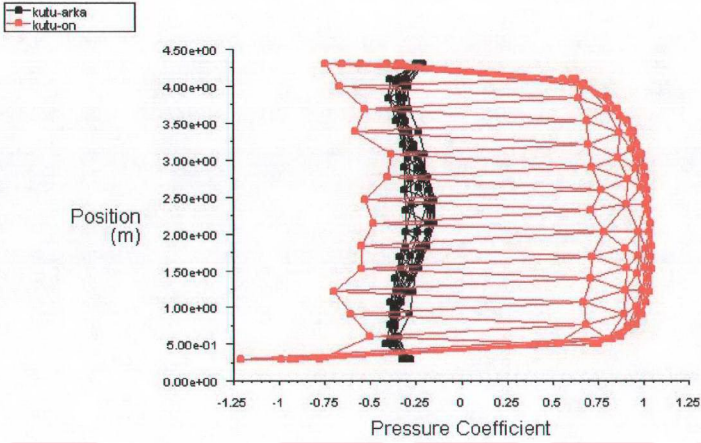
3-boyutlu durumda kutunun ön kısmında akış kutunun yan tarafından da akabilmesi nedeniyle buradaki statik basınç yükselmesi azalmış, bu nedenle bu yüzeye etkiyen aerodinamik direnç değeri de düşüş göstermiştir.



Şekil 6.57: Giriş (giriş+ön duvar) ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısı değişimi (KN 18).



Şekil 6.58: Kutu üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 18).



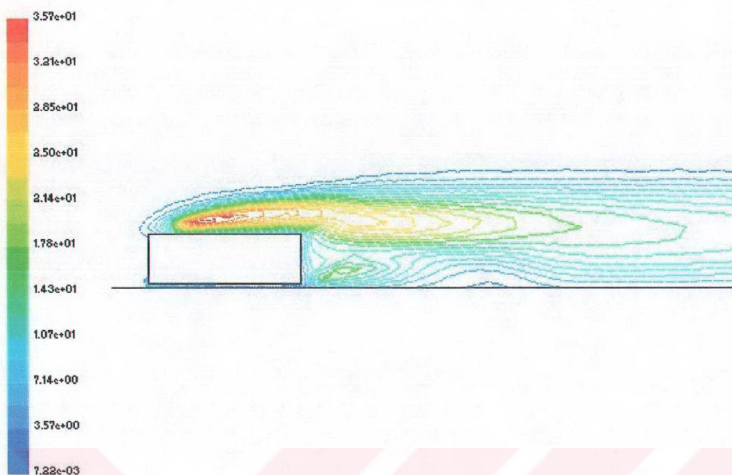
Şekil 6.59: Kutu ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 18).

Tablo 6.4: 2-boyutlu koşu 5 ve 6 ile 3-boyutlu koşu 17 ve 18'e ait C_D değerleri.

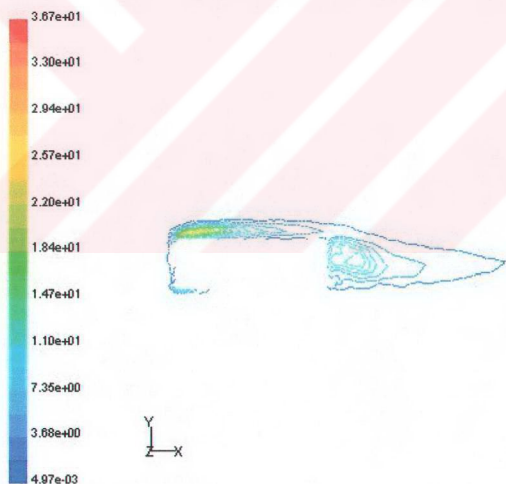
Koşu numarası	$C_{Dön}$	C_{Darka}	C_D	Zemin durumu
5	1.058	0.741	1.799	Durağan
17	0.839	0.288	1.127	
6	1.064	0.765	1.830	Hareketli
18	0.838	0.307	1.146	

Şekil 6.60 ve 6.61'e göre 3-boyutlu durumda türbülans kinetik enerjisinin yüksek olduğu bölgeler 2-boyutluya göre daha az olmaktadır. Çünkü akışın yana doğru da olmasından ötürü ön kısımdaki akış dağılımı 2-boyutlu duruma göre azalmakta ve kutu üstündeki akış ayrılmaları ile oluşan türbülans azalmaktadır. Kutu üstündeki akışın özellikleri kutu arka bölgesindeki akışı da etkilediğinden arka bölgedeki türbülanslı yapı 3-boyutlu durumda azalmaktadır. Bu nedenle kutu arka yüzeyindeki basınç düşüşü de azalmakta ve bunun neticesinde oluşan aerodinamik direnç değeri de düşüş göstermektedir. Tablo 6.4'den görüldüğü gibi 3-boyutlu çözümleme ile kutu arka yüzeyine ait C_D değeri ön yüzeyinkinden daha fazla düşüş göstermektedir.

Hareketli zemin için hesaplanan C_D değeri 3-boyutlu durumda, 2-boyutluya göre, $((1.830 - 1.146)/1.830) = 0.373 = \%37.3$ oranında azalmıştır.



Şekil 6.60: 2-boyutlu durum için eş k büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 6).



Şekil 6.61: 3-boyutlu durum için, simetri düzlemindeki eş k büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 18).

7. SONUÇLAR

Bu bölümde kutu modelinde oluşturulan sayısal çözümleme yaklaşımından faydalanılarak, Mercedes O403 otobüsü etrafındaki akış 2-boyutlu olarak çözümlenip, irdelenmektedir.

7.1 Koşu 19

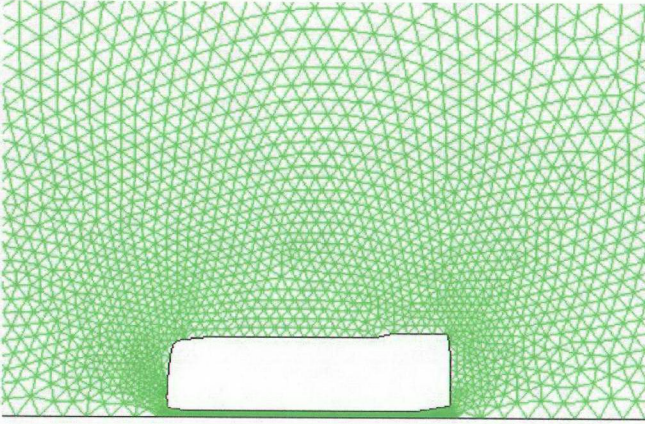
Bu koşuda otobüsün 2-boyutlu modeli koşu11'de oluşturulan hesap alanına yerleştirilecektir. Otobüsün yüksekliği $H_1=3.503$, uzunluğu ise $L_1=11.98$ m'dir. Hesap alanının boyutları ise kutu modelinin boyutları H ve L cinsinden aşağıdaki gibidir.

- Giriş kısmı uzunluğu: 8L
- Çıkış kısmı uzunluğu: 10L
- Hesap alanının yüksekliği: 12H
- Zemin açıklığı: 0.3 m

Otobüs etrafındaki akışın hesabı için kutu modelinin 2-boyutlu çözümlemesinde kullanılan sınır şartları uygulanmaktadır.

- Giriş: Hız girişi, $V=20\text{m/s}$ modele doğru, $k=10^{-2}$, $\epsilon=10^{-3}$
- Çıkış: Basınç çıkışı, $p=0$, $k=10^{-2}$, $\epsilon=10^{-3}$
- Üst sınır: Simetri
- Yer: Hareketli veya hareketsiz cidar
- Otobüs yüzeyleri: Hareketsiz cidar

Bu koşuda durağan zemin şartı uygulanmaktadır. Otobüs çevresindeki ağ sisteminin görünümü şekil 7.1'deki gibidir.

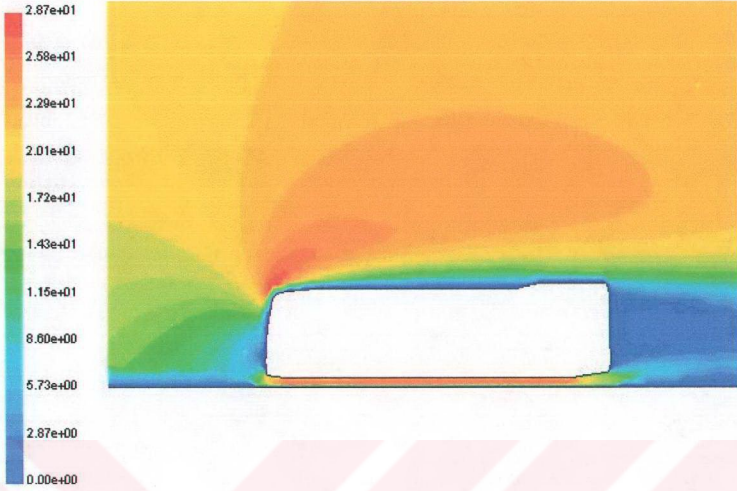


Şekil 7.1: Otobüsün yakın çevresindeki ağ sisteminin görünümü (KN 19).

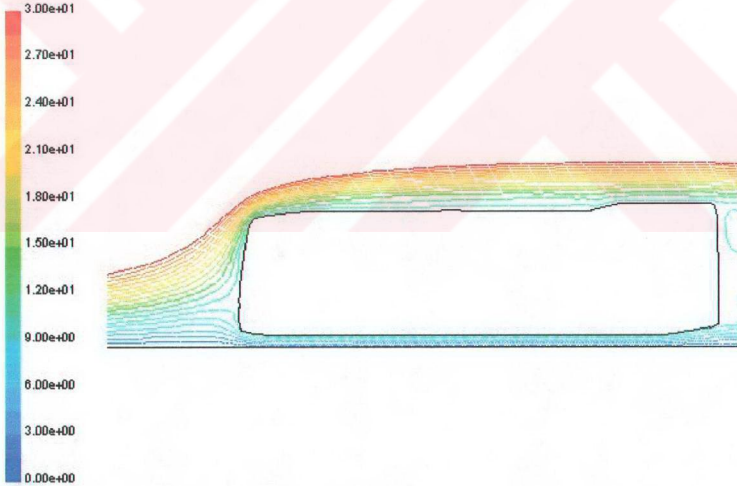
Hata eğrilerinin kararlı bir şekilde yakınsama kriterine ulaşabilmeleri için yakınsama katsayılarının değerleri ile oynanmıştır. Basınç için 0.3, momentum, k ve ε için 0.5 değerleri uygulanmıştır.



Şekil 7.2: Hesap alanının tümü üzerindeki eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 19).



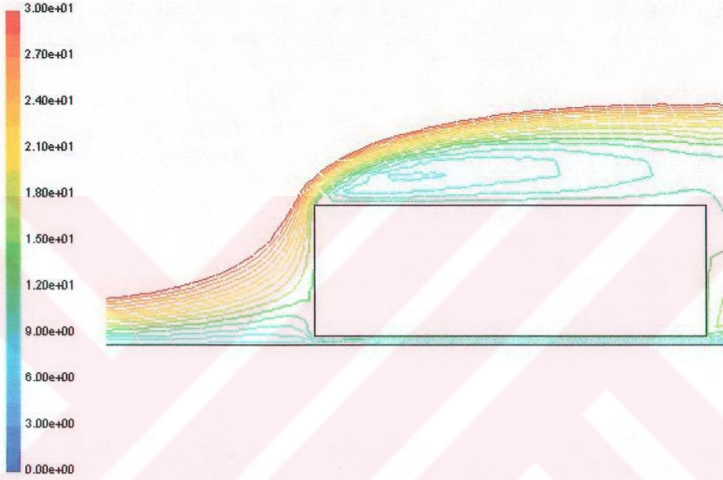
Şekil 7.3: Otobüsün yakın çevresindeki eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 19).



Şekil 7.4: Otobüs ön ve üst bölgelerindeki akım çizgilerinin görünümü (KN 19).

Şekil 7.2'de hesap alanının tümü üzerindeki eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri görülmektedir. Burada otobüs üzerindeki hız artışının, kutu modeline göre çok az

olduğu görülmektedir. Şekil 7.3'e göre maksimum hızlar otobüsün alt bölgesinde oluşmaktadır. Şekil 7.4'de görülen otobüs ön ve üst bölgelerindeki akım çizgilerine göre otobüs üst yüzeyinde, şekil 7.5'deki kutu modelinde olduğu gibi önemli akış ayrılmalarının olmadığı gözlemlenmektedir. Aynı durum şekil 7.6'daki hız vektörlerinin otobüs üst yüzeyine hemen hemen paralel olmasından da anlaşılmaktadır.

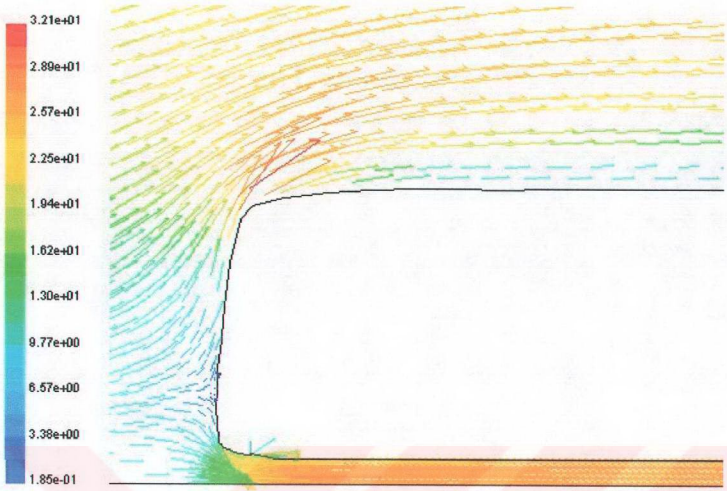


Şekil 7.5: Kutu ön ve üst bölgelerindeki akım çizgilerinin görünümü (KN 11).

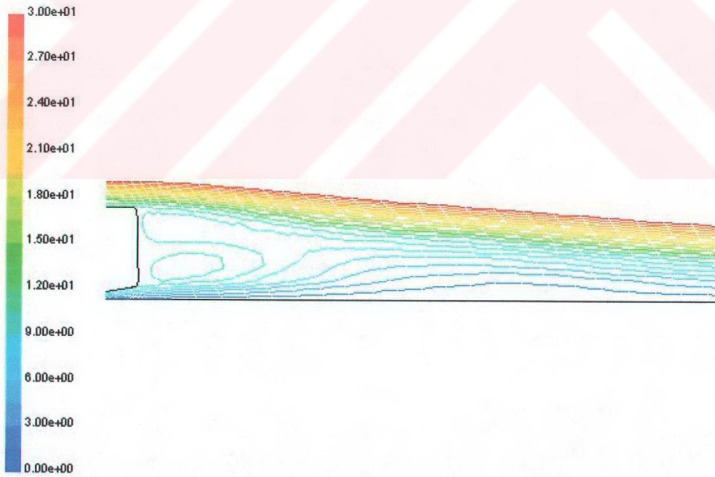
Şekil 7.7'de görülen otobüs arka bölgesindeki akım çizgilerinde akış ayrılmaları varolmasına rağmen, şekil 7.8'de görülen kutu arka bölgesindeki gibi fazla değildir. Çünkü otobüs üstündeki akış üst yüzeye daha yakın akmakta ve otobüs arka yüzeyindeki köşeler yuvarlak hatlara sahiptir. Otobüs arkasındaki çevri hareketleri ve düşük hızlar şekil 7.9'daki hız vektörlerinden de görülmektedir.

Şekil 7.10 ve 7.11'de görüldüğü gibi k değerleri otobüsün üst kısmında düşük, arka kısmında yüksek, kutuda ise üst kısımdan arka kısmına doğru yüksek olup, otobüsün k değerlerinden daha da yüksek çıkmaktadır.

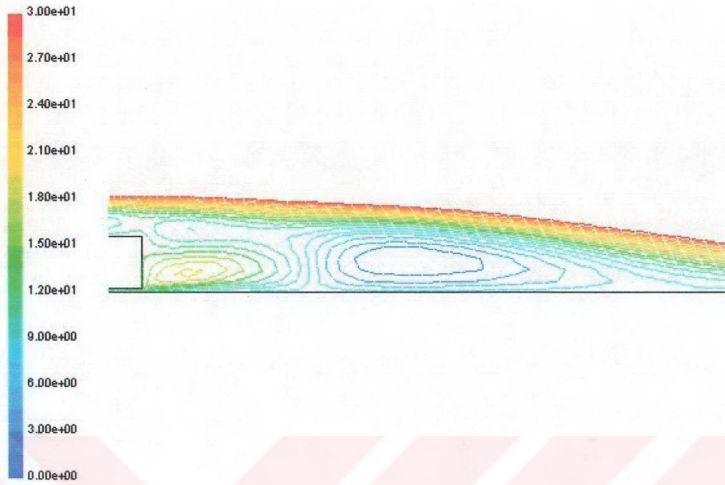
Otobüs çevresindeki bu akış yapısı, otobüs yüzeylerindeki C_p dağılımını etkilemektedir. Şekil 7.12'de görüldüğü gibi otobüs üst yüzeyindeki C_p değerlerinin kutu modeline göre negatifliği azalmıştır. Bunun nedeni daha önceden değinildiği



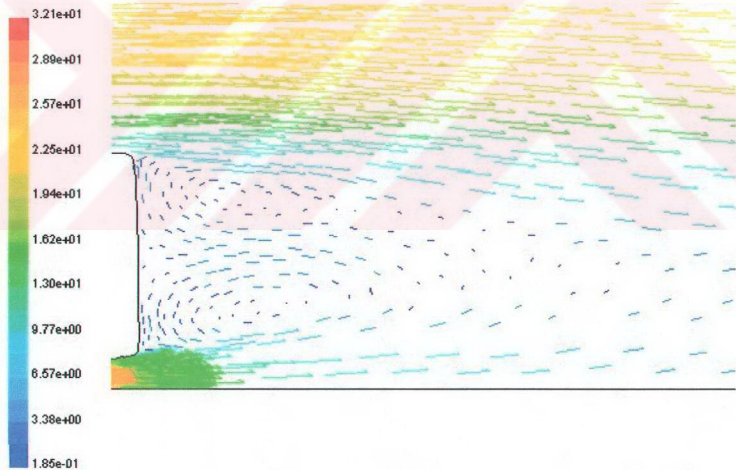
Şekil 7.6: Otobüs ön ve üst bölgesindeki hız vektörlerinin görünümü (Vektörler 50 kat büyük olarak çizdirilmiş ve hız büyüklüklerine göre renklendirilmiştir. KN 19).



Şekil 7.7: Otobüs arka bölgesindeki akım çizgilerinin görünümü (KN 19).



Şekil 7.8: Kutu arka bölgesindeki akım çizgilerinin görünümü (KN 11).

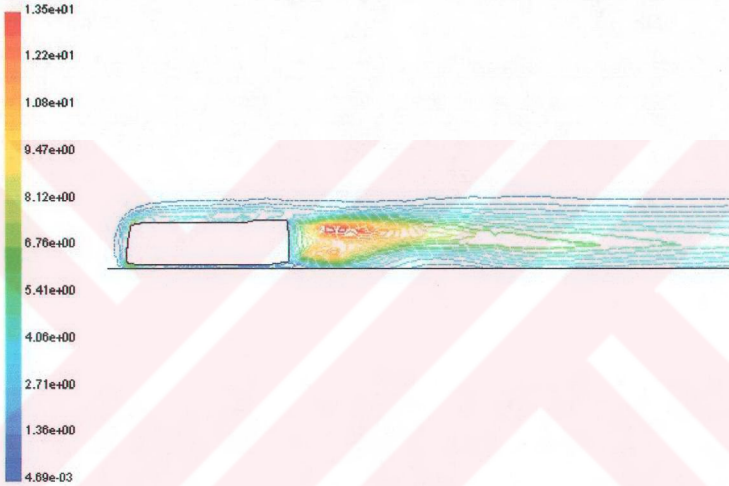


Şekil 7.9: Otobüs arka bölgesindeki hız vektörlerinin görünümü (Vektörler 100 kat büyük olarak çizdirilmiş ve hız büyüklüklerine göre renklendirilmiştir. KN 19).

gibi üst yüzeyde kutu modelindeki gibi akış ayrılmalarının olmamasıdır. Otobüs ön üst köşesinde oluşan çok yüksek hızlar nedeniyle buradaki C_p değerleri aniden çok

düşmektedir. Ancak üst yüzey üzerinde ileriye doğru gidildikçe C_p değerlerinin negatifliği azalmaktadır. Alt yüzeyde de oluşan çok yüksek hızlar nedeniyle statik basıncın dinamik basınca dönüşmesi ile C_p değerlerinin negatifliği artmıştır.

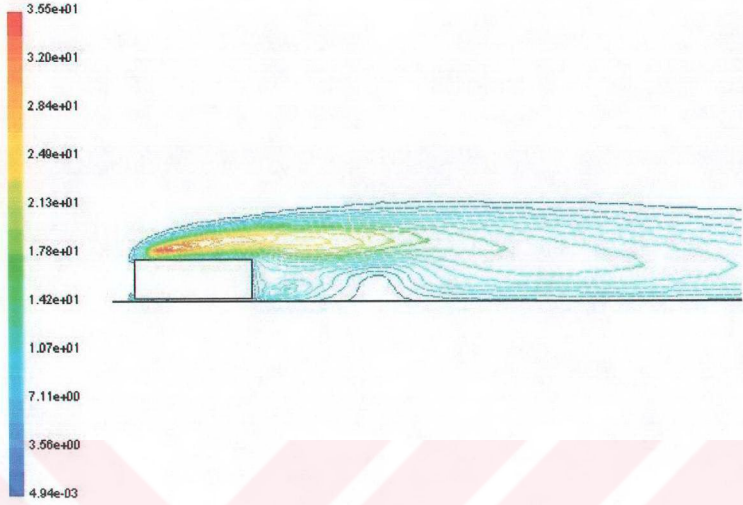
El-Sayed ve Nassief (1996) yaptıkları otobüs aerodinamiği incelemesinde, otobüs ön yüzeyinin üst kenarında ani basınç düşüşünü tespit etmişlerdir. Bunun yanında otobüs üst yüzeyi üzerinde ilerlerken negatif değerde olan basıncın yükselme eğilimine girdiğini gözlemlemişlerdir.



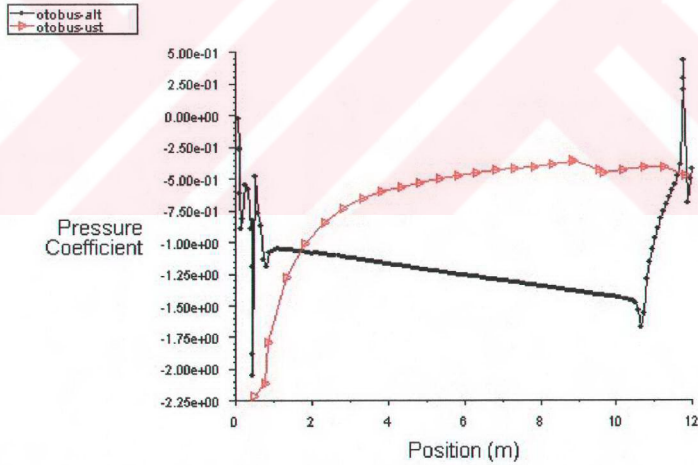
Şekil 7.10: Otobüsün yakın çevresindeki eş k büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 19).

Şekil 7.13'e göre C_p değerleri otobüs ön yüzeyinde durma noktasında 1 değerini almaktadır. Ön yüzeyde üste doğru çıkarken, eğimli yüzey ve yuvarlak köşe sebebiyle, kutu modeline göre akış yukarıya doğru daha kolay kaçtığından, statik basınç yükselmesi azalmakta ve C_p değerleri düşmektedir. Otobüs arka yüzeyinde ise akış ayrılması ve türbülans nedeniyle C_p değerleri negatif olmakta, ancak kutu modeline göre negatifliği daha azdır.

Şekil 7.14'de giriş sınırındaki C_p değerleri 0.06 civarında olup, kutu modelindeki 0.12 değerine göre düşüş göstermektedir. Bunun nedeni otobüs önündeki basınç yükselmesinin kutu modeline oranla daha az olmasıdır.



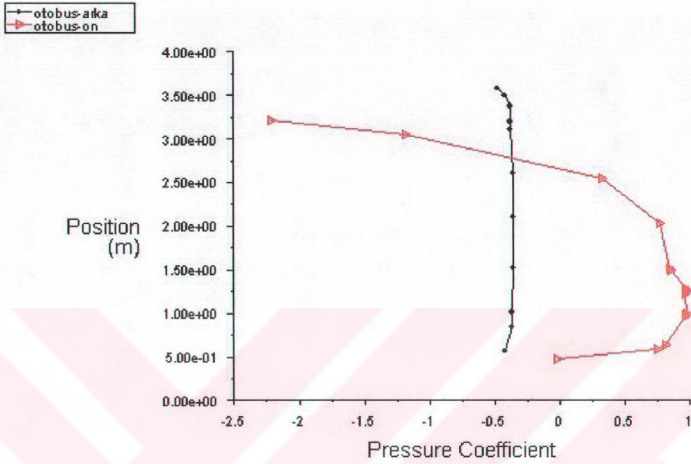
Şekil 7.11: Kutunun yakın çevresindeki eş k büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 11).



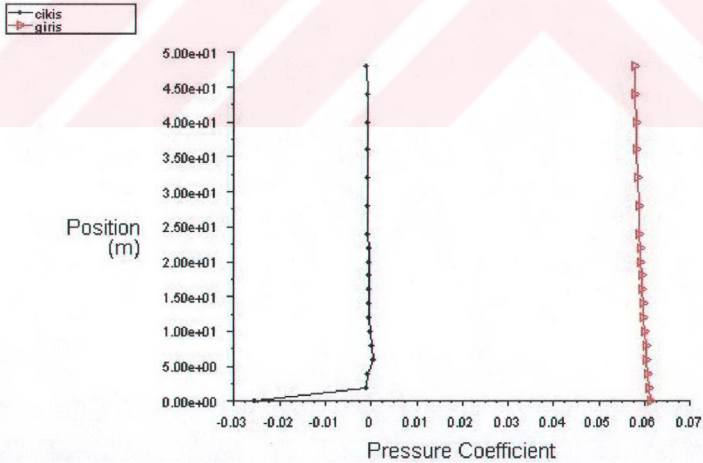
Şekil 7.12: Otobüs üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 19).

Bu koşuda basınç kuvvetleri nedeniyle oluşan C_D değeri 0.636'dır. Viskoz kuvvetler nedeniyle oluşan C_D değeri ise 0.021 olup kutu modeline göre daha yüksektir. Buna

rağmen viskoz kuvvetler ihmal edilip sadece basınç kuvvetleri (şekil direnci) gözönüne alınacaktır. Bu koşulda C_D değeri, koşu 11'deki kutu modelinin C_D değeri olan 1.410'a göre %54.8 düşüş göstermektedir.



Şekil 7.13: Otobüs ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 19).

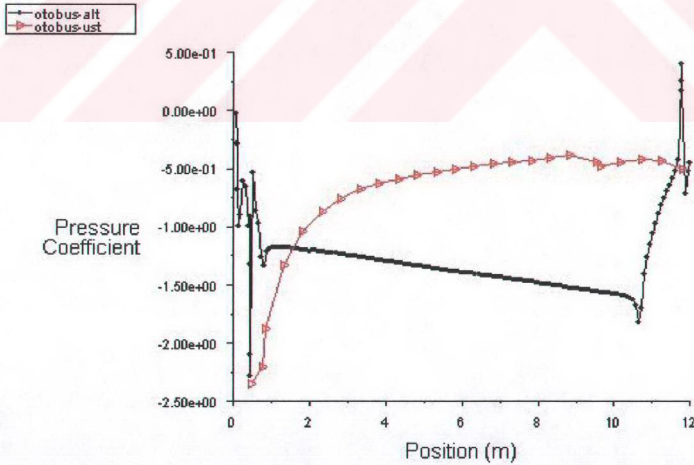


Şekil 7.14: Giriş ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısı değişimi (KN 19).

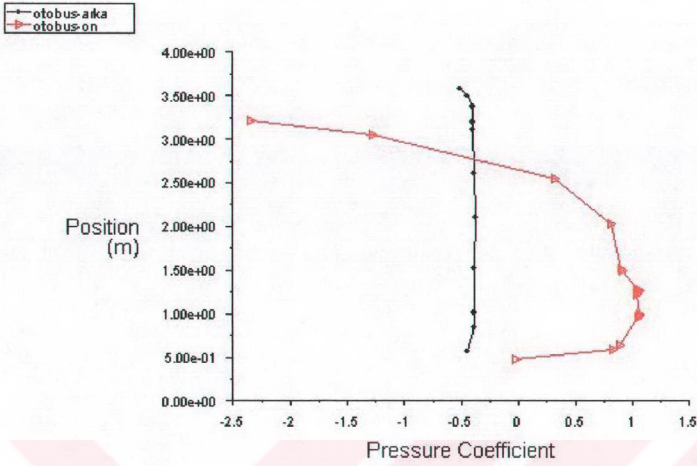
Buradan model ön yüzeyinin hafif eğimli hale getirilip, yuvarlak köşe hatlarının oluşturulması ile akış şeklinin ve aerodinamik direnç değerinin önemli derecede değiştiği anlaşılmaktadır. Otobüslerde ön yüzeye eğim verilmesi ve ön üst köşe kenarının yuvarlatılması veya spoiler kullanımı ile sahip oldukları aerodinamik direnç katsayısı değeri düşürülmektedir. Otobüs için C_D değeri ortalama 0.4-0.7 arasında değişmekte olup, bu değer 0.3'e kadar indirilebilmektedir (Lajos ve diğ. 1988). Taşıtların ön ve arka kısımlarının mermiye benzer sivri uçlu yapılması akım çizgilerini düzgün tutacağından, aerodinamik direnç değerini çok düşürmektedir. Ancak bu şekillerin tam olarak uygulanması mümkün değildir. Buna rağmen ön kısma eğim ve yuvarlatmalar verilebilmektedir. Arka kısmında birdenbire kesilmeyip, eğimli ve yuvarlatılmış bir şekilde yapılması halinde C_D değerleri çok düşürülmektedir. Gutierrez ve diğ. (1996a,b) kamyon üzerinde yaptıkları bu türden çalışmalarda olumlu sonuçlar alınmıştır.

7.2 Koşu 20

Bu koşuda, koşu 19'daki modele hareketli zemin şartı uygulanmaktadır. Şekil 7.15 ve 7.16'da otobüs üst, alt, ön ve arka yüzeylerine ait C_p dağılımları görülmektedir.



Şekil 7.15: Otobüs üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 20).



Şekil 7.16: Otobüs ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 20).

Burada da kutu modelindeki gibi hareketli zemin durumunda ön yüzeydeki C_p değerleri bir miktar artmakta, arka yüzeyde ise düşmektedir (negatifliği artmaktadır). C_D değeri 0.675 olup, durağan zemine göre 0.039 (%6.1) artış olmaktadır.

7.3 Koşu 21

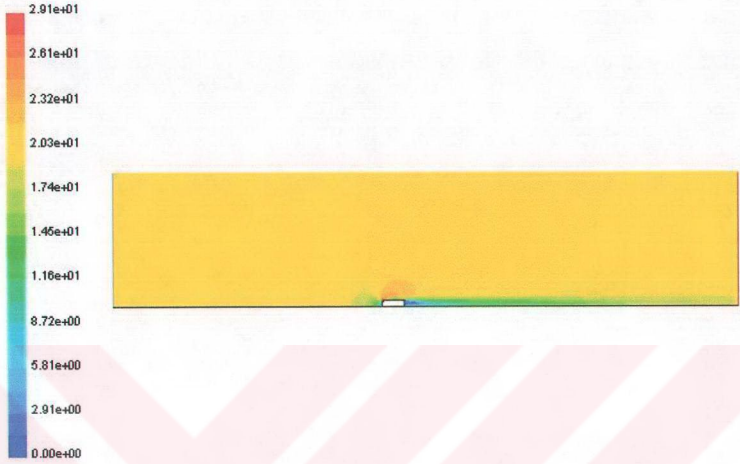
Bu koşuda hesap alanının boyutları daha da genişletilip, hareketli zemin şartı altında akış modellemesi yapılmaktadır. Hesap alanının boyutları aşağıdaki gibidir.

- Giriş kısmı uzunluğu: 12L
- Çıkış kısmı uzunluğu: 15L
- Hesap alanının yüksekliği: 18H
- Zemin açıklığı: 0.3 m

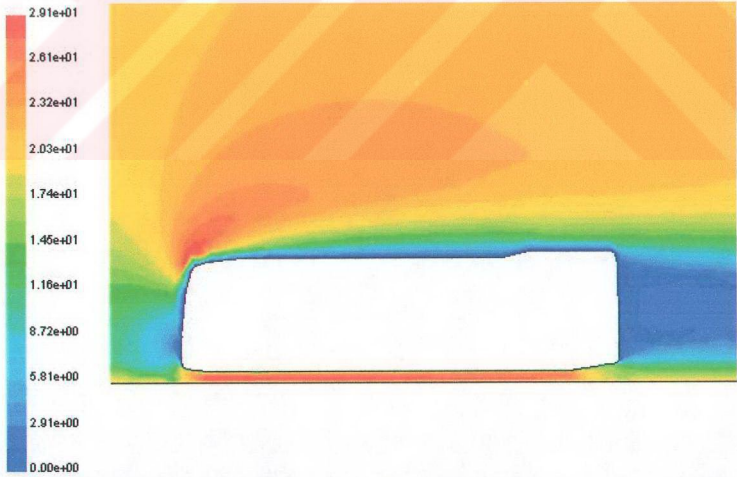
Bu koşuda yakınsama katsayıları basınç için 0.25, momentum için 0.45, k ve ϵ için 0.5 olarak alınmaktadır.

Şekil 7.17 ve 7.18'de hız dağılımları görülmektedir. Otobüs üstündeki hız artışları çok düşmekte, maksimum hızlar otobüs ön üst köşesi ile altındaki akışta açığa

çıkılmaktadır. Bu nedenle bu bölgelerde statik basınç çok düşmektedir (şekil 7.19). Otobüs ön bölgesinde durma noktası civarında statik basınç maksimum değerdedir.



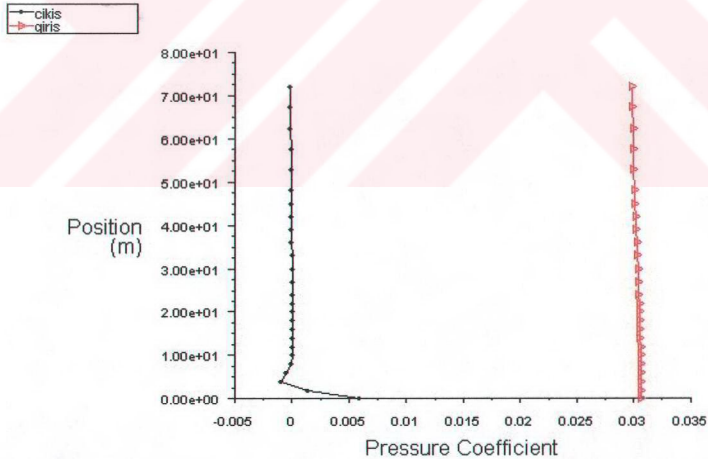
Şekil 7.17: Hesap alanının tümü üzerindeki eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 21).



Şekil 7.18: Otobüsün yakın çevresindeki eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 21).



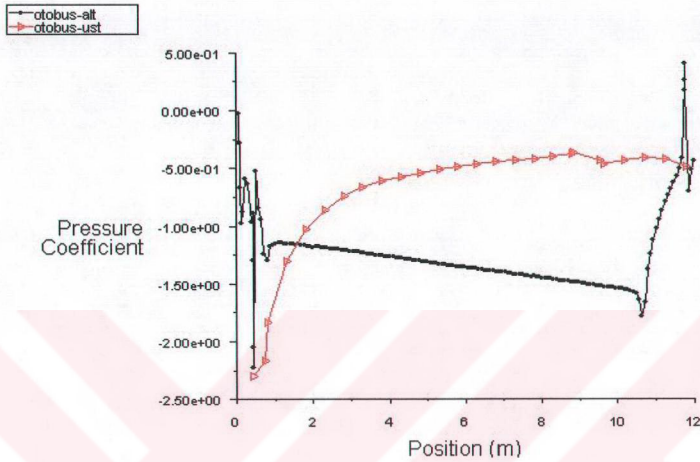
Şekil 7.19: Otobüsün yakın çevresindeki eş statik basınç büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 21).



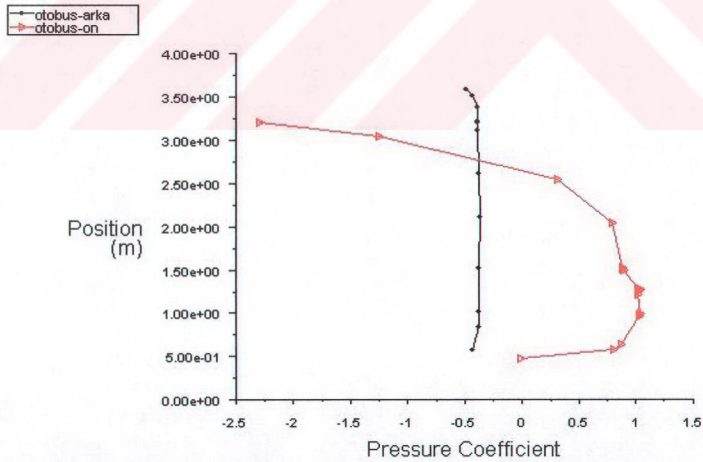
Şekil 7.20: Giriş ve çıkış sınırlarındaki basınç katsayısı değişimi (KN 21).

Üst sınırın daha yukarı çekilerek blokaj etkisinin azalmasıyla beraber giriş sınırının daha geriye çekilmesi ile, giriş sınırındaki C_p değeri koşu 20'ye göre daha da

düşmüştür (şekil 7.20). Şekil 7.21 ve 7.22’de otobüs üst, alt ön ve arka yüzeylerindeki C_p dağılımı görülmektedir. Otobüs ön yüzeyindeki durma noktası civarı dışında kalan tüm bölgelerde C_p değeri negatif olmaktadır.



Şekil 7.21: Otobüs üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 21).

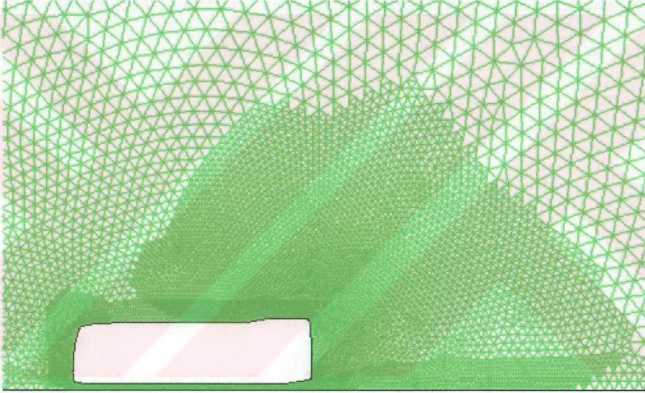


Şekil 7.22: Otobüs ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 21).

Bu koşuda hesaplanan C_D değeri 0.657'dir. Hesap alanının büyütülmesi ile C_D değeri koşu 20'ye göre 0.018 kadar azalmaktadır (%2.66azalma).

7.4 Koşu 22

Bu koşuda çözüm iyileştirmesi amacıyla koşu 21'deki modelin ağ sistemi üzerinde iyileştirme yapılmaktadır. Şekil 7.23'de iyileştirilmiş ağ sistemi görülmektedir. Otobüsün ön ve arka taraflarında kalan zeminden itibaren ağ sistemindeki ilk iki sıradaki elemanlar, otobüs ön yüzeyinden itibaren ilk 6 sıradaki elemanlar, otobüs üst yüzeyinden itibaren ilk 3 sıradaki elemanlar ve otobüs arka yüzeyinden itibaren ilk 25 sıradaki elemanlar ikiye bölünerek bu bölgelerdeki elemanlar sıklaştırılmıştır.

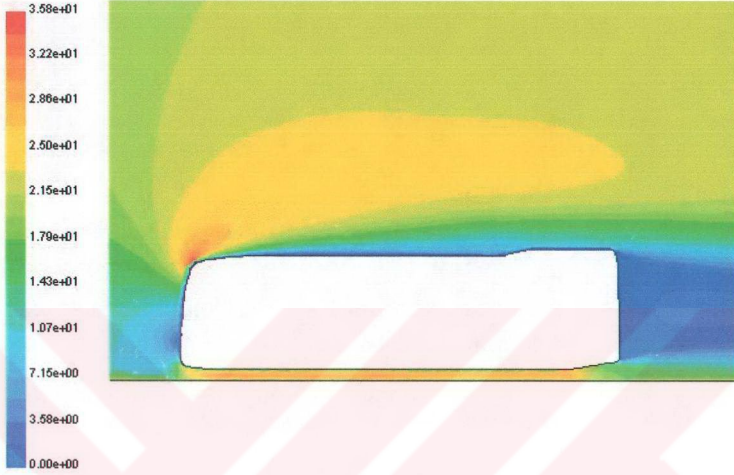


Şekil 7.23: Otobüsün yakın çevresindeki iyileştirilmiş ağ sisteminin görünümü (KN 22).

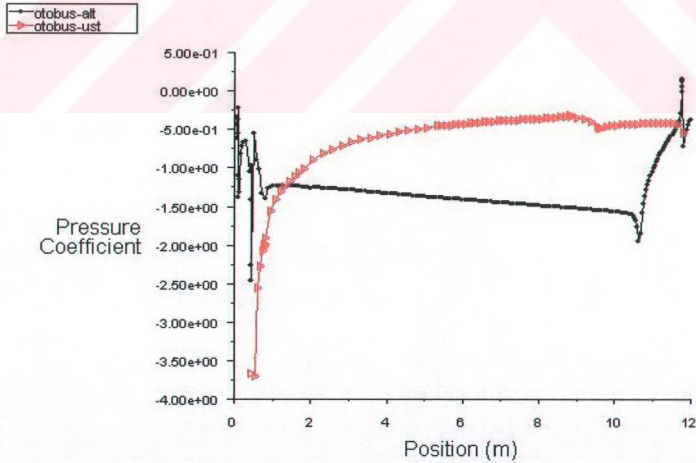
Şekil 7.24'de görülen hız dağılımlarına göre otobüs ön üst köşesinde oluşan maksimum hız değeri ile otobüs altındaki akışın hızları koşu 21'e göre artmaktadır. Bu nedenle bu bölgelerdeki statik basınç düşüşü fazlalaşmaktadır. Bu durum şekil 7.25 ve 7.26'daki otobüs üst, alt, ön ve arka yüzeylerindeki C_p dağılımlarında görülmektedir.

Bu koşuda hesaplanan C_D değeri 0.548 olup, koşu 21'e göre ağ sistemi iyileştirilmesi nedeni ile 0.109 azalmıştır. %16.59'luk bu düşüş önemli bir miktar olup, bu durum otobüs yüzeylerindeki sınır tabaka ile türbülanslı ard iz yapısının daha küçük boyutlu

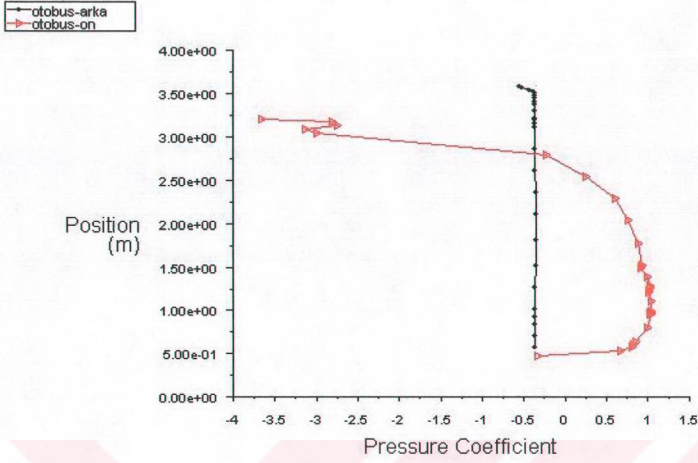
elemanlar ile incelenmesinden kaynaklanmaktadır. Böylelikle bu bölgelerdeki basınç ve hız hesaplamaları iyileşmekte ve otobüs yüzeyindeki basınç değerleri değişmektedir. Bu da doğrudan C_D değeri hesabına etkimektedir.



Şekil 7.24: Otobüsün yakın çevresindeki eş hız büyüklüğü dağılımı eğrileri (KN 22).



Şekil 7.25: Otobüs üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 22).



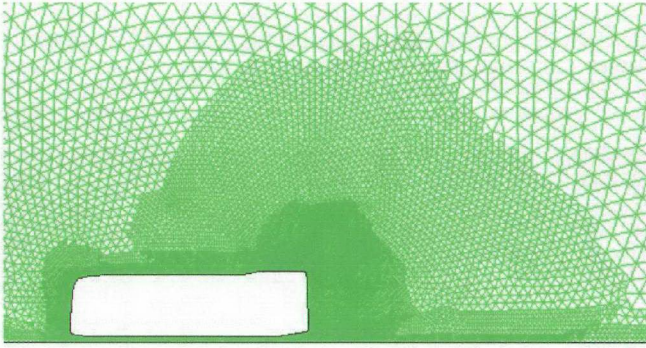
Şekil 7.26: Otobüs ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 22).

7.5 Koşu 23

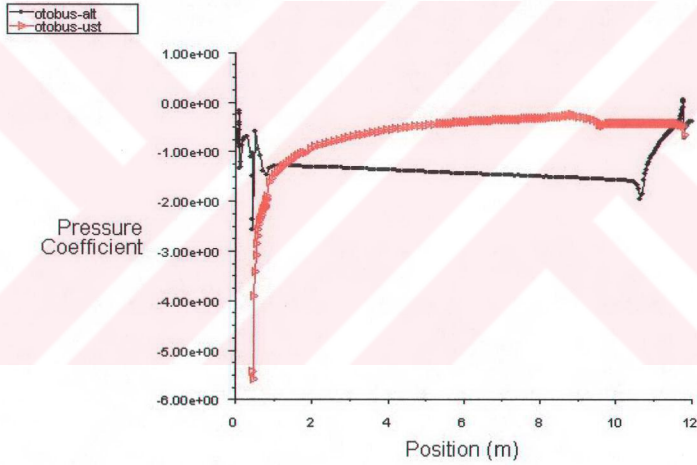
Bu koşuda, koşu 22'deki iyileştirilmiş ağ sistemi üzerine bir kere daha iyileştirme yapıp, otobüs etrafındaki akış çözümlenmektedir. İyileştirme yapılan bölgeler ve eleman sayıları koşu 22'deki gibidir. Böylelikle koşu 22'de iyileştirmeye tabi tutulan elemanların yarısı ikinci bir iyileştirmeye tabi tutulmaktadır. Ağ sisteminin otobüsün yakın çevresindeki görünümü şekil 7.27'de gösterilmektedir.

Bu koşuda hata eğrilerinin kararlı bir biçimde yakınsama kriterine ulaşabilmeleri için momentum, k ve ϵ için yakınsama katsayıları 0.4'e indirilmektedir.

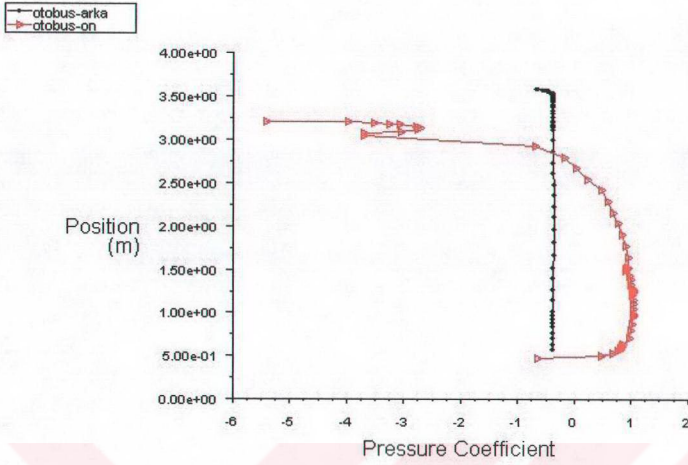
Şekil 7.28 ve 7.29'da otobüs üst, alt, ön ve arka yüzeylerindeki C_p dağılımları görülmektedir. Özellikle otobüs ön üst köşesindeki C_p değerlerinin çok düştüğü gözlemlenmektedir. C_p değerlerindeki bu değişim C_D değeri üzerine de etkili olmaktadır. Bu koşuda hesaplanan C_D değeri 0.526 olup, koşu 22'ye göre 0.022 azalmaktadır. Koşu 22'ye göre düşüş oranı %4.01 olup, koşu 22'deki iyileştirme nedeniyle elde edilen %16.59'dan daha azdır. Bu değişim miktarının azalması, çözümün doğru sonucu yaklaşımasından ileri gelmektedir.



Şekil 7.27: Otobüsün yakın çevresinde iyileştirilmiş ağ sisteminin görünümü (KN 23).



Şekil 7.28: Otobüs üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 23).



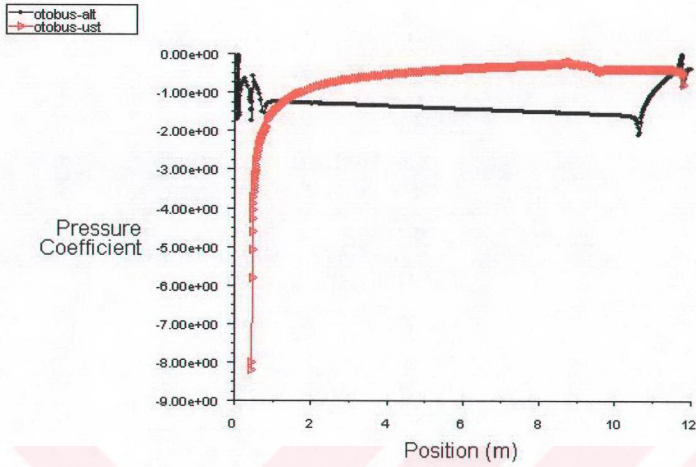
Şekil 7.29: Otobüs ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 23).

7.6 Koşu 24

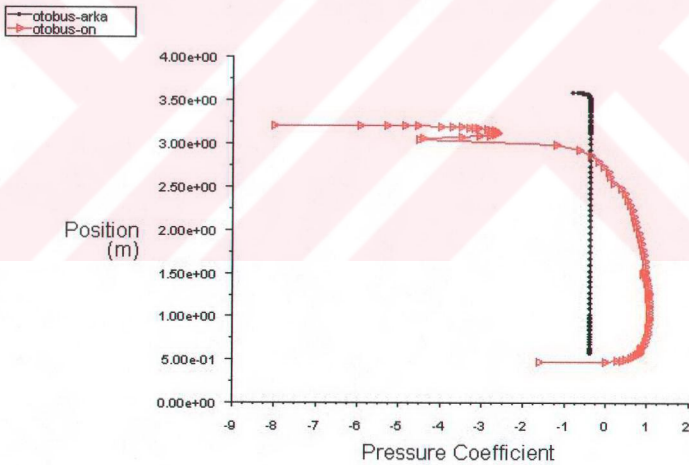
Bu koşuda, koşu 23'de ikinci defa iyileştirmeye tabi tutulmuş ağ sistemi üçüncü bir iyileştirmeye tabi tutulmaktadır. Burada koşu 23'deki ağ sisteminin, otobüs ön yüzeyinden itibaren ilk 6 sıradaki elemanlar, otobüs üst yüzeyinden itibaren ilk 3 sıradaki elemanlar, otobüs arka yüzeyinden itibaren ilk 25 sıradaki elemanlar ve otobüs alt yüzeyindeki ilk 3 sıradaki elemanlar ikiye bölünerek iyileştirmeye tabi tutulmaktadır.

Hesplamalar yapılırken, hata eğrilerinin kararlı bir şekilde yakınsama kriterine ulaşabilmeleri için yakınsama katsayılarının değerleri sırasıyla, basınç için 0.2, momentum, k ve ϵ için 0.35 değerine çekilmiştir.

Şekil 7.30 ve 7.31'de otobüs üst, alt, ön ve arka yüzeylerindeki C_p dağılımları görülmektedir. Önceki çözüm iyileştirmelerinde olduğu gibi burada da otobüs ön üst köşesi civarında oluşan maksimum hızların büyüklüğü artmıştır. Bu nedenle bu bölgedeki statik basınç ve C_p değerleri düşmektedir.



Şekil 7.30: Otobüs üst ve alt yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 24).



Şekil 7.31: Otobüs ön ve arka yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimi (KN 24).

Bu koşu için hesaplanan C_D değeri 0.511 olup, Koşu 23'e göre 0.015 düşmüştür. Her bir ağ sistemi iyileştirmesi sonucunda hesaplanan C_D değerinde bir düşüş gözlemlenmektedir. Ancak C_D değerindeki düşüş oranı her bir iyileştirmeden sonra

azalmaktadır. Bu koşuda C_D değeri koşu 23'üne göre % 2.85 düşmektedir. Tablo 7.1'de koşu 21, 22, 23 ve 24'e ait C_D değerleri özetlenmektedir.

Tablo 7.1: Koşu 21,22,23,24'e ait C_D değerleri

Koşu numarası	C_D değeri	Bir önceki koşuya göre C_D değerindeki düşüş oranı
21	0.657	—
22	0.548	%16.59
23	0.526	%4.01
24	0.511	%2.85

8. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmadaki, kutu ve otobüs modelleri üzerinde yapılan sayısal akış çözümlerine göre, model etrafında oluşturulan hesap alanının akış özellikleri ve hesaplanan aerodinamik direnç katsayısı değeri üzerinde epey etkili olduğu görülmektedir. Hesap alanının genişletilmesi ile blokaj etkisi azalmaktadır. Böylelikle model üzerindeki, kesit daralması nedeniyle oluşan, yüksek hızların üst sınıra varışı önlenmektedir. Buna ilaveten giriş sınırındaki işletme basıncı değerinin model önündeki statik basınç artışından etkilenmesi azalmaktadır. Hesap alanı boyutlarındaki bu artımlar sayesinde hesaplanan C_D değeri doğru sonuca yaklaşmaktadır. Aksi takdirde C_D değeri olması gerekenden daha yüksek çıkmaktadır. Tablo 8.1’de kutu modeline ait koşulların C_D değerleri listelenmiştir.

Sayısal çözümleme esnasında yapılan kabuller sonuçlar üzerinde etkili olmaktadır. Modelin zemin üzerinde oturuyor olması hali ile zemin açıklığının varolması hallerinde hesaplanan C_D değerleri arasında bir fark oluşmaktadır. Model altındaki akış nedeniyle model yüzeylerindeki C_p dağılımının değişmesinden ötürü, C_D katsayısında bir miktar artış olmaktadır. Ancak zemin açıklığının küçük oranlarda değişmesi C_D değeri üzerine pek etkili olmamaktadır. Model altındaki akışı sınırlandıran zeminin kalkması (serbest hava jetine maruz kalma durumu) durumunda ise blokaj etkisinin azalması nedeni ile C_D değeri epey düşmektedir.

Hareketli veya durağan zemin kabulü de hesaplanan C_D değerini etkilemektedir. Hareketli zemin halinde kutu modeli önünde pozitif olan statik basınçlar artmakta, arka kısımda ise negatif olan statik basınçlar düşmektedir. Bu durumda modele etkiyen aerodinamik direnç kuvveti ve katsayısı durağan zemine göre artmaktadır. Gerçek yol koşullarını temsil etmek amacıyla hava için modele göre bağlı hareket verildiği gibi zemine de hareket verilmelidir. Bu şekilde hesaplanan C_D değeri daha gerçekçi olmaktadır.

Tablo 8.1: Kutu modeli etrafındaki akış çözümlmelerine ait C_D değerleri ve hesap alanı boyutları

Koşu numarası	C_{D0n}	C_{Darka}	C_D	Giriş kısmı uzunluğu	Hesap alanı yüksekliği	Çıkış kısmı Uzunluğu	Zemin açıklığı ve durumu	Açıklama
1	1.01	0.71	1.725	4L	6H	10L	0 m , Durağan	
2	1.02	0.75	1.77	4L	6H	10L	0 m , Hareketli	
3	1.048	0.752	1.80	4L	6H	10L	0.2 m, Durağan	
4	1.062	0.776	1.838	4L	6H	10L	0.2 m, Hareketli	
5	1.058	0.741	1.799	4L	6H	10L	0.3 m, Durağan	
6	1.064	0.765	1.83	4L	6H	10L	0.3 m, Hareketli	
7	1.075	0.731	1.806	4L	6H	10L	0.4 m, Durağan	
8	1.068	0.764	1.833	4L	6H	10L	0.4 m, Hareketli	
9	0.930	0.586	1.517	4L	12H	10L	0.3 m, Durağan	
10	0.997	0.557	1.555	4L	12H	10L	0.3 m, Hareketli	
11	0.860	0.549	1.410	8L	12H	10L	0.3 m, Durağan	
12	0.924	0.582	1.506	8L	12H	10L	0.3 m, Hareketli	
13	0.853	0.582	1.436	4L	6H	10L	0.3 m, Durağan	Kısılmış hava jeti
14	0.865	0.603	1.468	4L	6H	10L	0.3 m Hareketli	Kısılmış hava jeti
15	0.876	0.326	1.202	4L	20H	10L	Zemin yok	Kutu orta ekseninde
16	0.820	0.443	1.263	8L	12H	10L	0.3 m, Hareketli	Ağ sistemi iyileştirmesi
17	0.839	0.288	1.127	4L	6H	6H	0.3 m, Durağan	3-boyutlu
18	0.838	0.307	1.146	4L	6H	10L	0.3 m, Hareketli	3-boyutlu

Kutu modeli etrafındaki akış çözümlemesinde yapılan 2 veya 3-boyutlu çözüm kabulü hesaplanan C_D değeri üzerinde epey etkili olmaktadır. Hareketli zemin şartı için 2-boyutlu çözümlemeden 3-boyutluya geçildiğinde hesaplanan C_D değerinde %37.3'lük bir düşüş gerçekleşmiştir. Bu önemli düşüş miktarının nedenleri şöyle sıralanabilir: Akış 3-boyutlu simülasyonda kutunun üstünden olduğu gibi kutunun yan tarafından da akması nedeni ile kutu üst ve arka bölgelerindeki akış ayrılmaları ve türbülans hareketleri azalmaktadır. Bu şekilde kutunun yüzeylerindeki basınç dağılımı etkilenmekte ve bu da aerodinamik direnç katsayısını düşürücü bir etki yapmaktadır. Bu durum özellikle kutu modeli gibi küt ve sivri köşeli şekle sahip modellerde daha etkili olmaktadır. Çünkü kutu modeli bu şeklinden ötürü, daha yuvarlak ve eğimli hatlara sahip modellere göre akışı daha fazla dağıtmakta, önemli derecede akış ayrılmalarına ve türbülans hareketlerine neden olmaktadır. Bu nedenle otobüs modeli için 2-boyutlu çözümlemede daha az hata oluşması beklenebilir. Bu çalışmada 3-boyutlu model ile kıyaslanan 2-boyutlu modelin hesap alanı oldukça dar olduğundan, 3. boyutun olmamasından oluşacak hatalara blokaj etkisinin getirmiş olduğu hatalar da eklenmektedir. Bu sebeple zaten blokaj etkisinden ötürü normalden daha yüksek bir değer olarak hesaplanan C_D değeri, 3-boyutlu çözümlemede bu etkinin azalması ile çok düşmektedir. Hesap alanı çok geniş tutulan 2-boyutlu çözümlemelerde daha az hata oluşması beklenebilir.

Otobüs etrafındaki akışa ait çözümlemelerin C_D değerleri tablo 8.2'de verilmiştir. Otobüse ait C_D değerleri kutuya ait C_D değerlerinden çok daha düşük çıkmaktadır. Bunun nedeni, daha önceden belirtildiği gibi otobüsün daha yuvarlak ve eğimli hatlara sahip olmasından ötürü akışı ön kısımda daha az dağıtarak, daha az akış ayrılmaları ve türbülans hareketleri oluşturmasıdır. Genel olarak otobüs ön yüzeyinde durma noktası civarında pozitif C_p dağılımı, diğer bölgelerde ise negatif C_p dağılımı oluşmaktadır. Bunun sebebi otobüs üzerine gelen akışın ön yüzeydeki durma noktası civarında aniden durmaya zorlanması ile bu bölgede dinamik basınç statik basınca dönüşmekte ve C_p değerleri pozitif olmaktadır. Bu pozitif basınç dağılımı otobüs üzerine bir aerodinamik direnç kuvveti yaratmaktadır. Otobüs ön üst köşesinde oluşan çok yüksek hızlar nedeni ile buradaki C_p değerleri negatif olup, çok düşük çıkmaktadır. Otobüs üst yüzeyi üzerinde gidildikçe C_p değerleri yükselmekte ve negatiflikleri azalmaktadır. Kutu modelinde de ön yüzeyde pozitif C_p dağılımı vardır. Ancak kutu üst yüzeyinde ise, kutunun ön üst köşesinin sivri olmasından

Tablo 8.2: Otobüs etrafındaki akış çözümlmelerine ait C_D değerleri ve hesap alanı boyutları

Koşu numarası	C_D	Giriş kısmı uzunluğu	Hesap alanı yüksekliği	Çıkış kısmı uzunluğu	Zemin açıklığı ve durumu	Açıklama
19	0.636	8L	12H	10L	0.3 m, durağan	
20	0.675	8L	12H	10L	0.3 m, hareketli	
21	0.657	12L	18H	15L	0.3 m, hareketli	
22	0.548	12L	18H	15L	0.3 m, hareketli	Ağ sisteminin 1. defa iyileştirilmesi
23	0.526	12L	18H	15L	0.3 m, hareketli	Ağ sisteminin 2. defa iyileştirilmesi
24	0.511	12L	18H	15L	0.3 m, hareketli	Ağ sisteminin 3. defa iyileştirilmesi

ötürü, akış ayrılmaları ve türbülans hareketleri oluşmaktadır. Bu etki bütün üst yüzey boyunca devam ettiğinden kutu üst yüzeyindeki C_p değerleri otobüsünkinden daha negatif çıkmaktadır. Kutu modelinin 3-boyutlu çözümlemesinde ise bu etki azalmakta, C_p değerlerinin negatifliği üst yüzey boyunca ilerlendikçe azalmaktadır. Otobüs altı dar bir kanal olması sebebi ile venturi gibi çalışıp buradaki hızlar çok yükselmektedir. Böylelikle statik basıncın dinamik basınca dönüşmesi ile buradaki C_p değerleri yüksek derecede negatif çıkmaktadır. Kutu modelinde ise alttaki akış hızları çok yükselmediğinden kutu alt yüzeyindeki C_p değerleri otobüsünkinden daha az negatiftir. Otobüs arka bölgesinde ise otobüs üst ve alt bölgesinden gelen akışlar otobüs yüzeyinden ayrılmakta ve bu bölgede türbülans hareketleri oluşturmaktadır. Ard iz yapısının olduğu bu bölgede basınçlar çok düşmektedir. Otobüs arka yüzeyinde oluşan negatif statik basınç ve C_p değerleri bu yüzeyde vakum etkisi yaratmakta, bu da aerodinamik direnç kuvveti ile aynı yönde olduğundan, aerodinamik direnç kuvvetinin etkisini artırmaktadır. Benzer durum kutu modelinin arka yüzeyi için de geçerlidir.

Akış çözümlemelerinde kaba elemanlı ağ sistemleri iyileştirildiğinde (elemanların boyutları küçültüldüğünde) hesaplanan C_D değerinde bir düşüş gerçekleşmektedir. Özellikle katı yüzeylere (cidarlara) komşu bölgeler ile ard iz yapısının olduğu bölgeler daha küçük elemanlar ile incelenmelidir. Böylelikle sınır tabaka ile türbülanslı bölgelerdeki hız ve basınç değerleri daha hassas olarak çözümlenmekte, bu durum da otobüs yüzeylerindeki C_p değerlerini değiştirmektedir. Sonuçta hesaplanan C_D değeri daha doğru çıkmaktadır. Bu nedenle kaba elemanlı ağ sistemlerinde iyileştirmeye gidilmelidir.

Taşıtların aerodinamik özelliklerinin tesbiti için kullanılan sayısal yöntemlerde,

- Akışın 3-boyutlu olarak çözümlenmesi
- Olabildiğince geniş bir hesap alanı kullanılması
- Taşıt çevresi ve ard iz bölgesinde küçük boyutlu çok sayıda eleman kullanılması
- Hareketli zemin şartının uygulanması
- Tekerleklerin ve tekerlek dönüşünün temsil edilmesi

ile daha hassas sonuçlar elde edilebilir. Ancak 3-boyutlu çözümleme ve hesap alanının geniş tutulması ile çok sayıda eleman kullanılması güçlü bilgisayarlar gerektirmekte olup, hesaplama sürelerini de uzatmaktadır.

Sayısal çözümler deneysel çalışmalar ile beraber yürütülmelidir. Sayısal çözümlemesi yapılan modelin üzerinde yapılacak deneyler ile sayısal sonuçların doğruluk derecesi hakkında sağlıklı bilgilere erişilebilir.

Kutu ve otobüs etrafındaki akışın incelenmesinden, akışın şekli ve model üzerinde yaratacağı aerodinamik direnç etkisinin, modelin geometrik özelliklerinden önemli derecede etkilendiği gözlemlenmektedir. Bu nedenle taşıt tasarımında, taşıt geometrisi akışa uygun bir şekilde tasarlanmalıdır. Taşıt ön şekli akışı daha az dağıtacak, akış ayrılmalarını azaltacak yuvarlak hatlara sahip olmalıdır. Bölüm 2 ve 7’de bahsedildiği gibi taşıt arka kısmında eğimli bir yüzeyin olması akım çizgilerini daha düzgün tutacağından oluşacak aerodinamik direnç kuvveti azalır. Ayrıca taşıt üzerinde gereksiz çıkıntılar bulunmamalıdır. Taşıt tasarımında dikkat edilecek bu hususlar ile, taşıtın sahip olduğu C_D değeri önemli derecede düşürülebilir. Taşıtın güç gereksinimi taşıt hızının 3. kuvveti ile orantılı olduğundan C_D değerinin düşürülmesi yakıt tüketiminde önemli bir düşüş sağlayarak yakıt ekonomisinde bir iyileşme sağlar. Buna ilaveten çevreye zararlı egzoz gazı bileşenlerinin miktarı azaltılarak, çevreye daha az zarar verilebilir.

KAYNAKLAR

- Ahmed, S.R.**, 1984. Influence of base slant on the wake structure and drag of road vehicles, *Jou. Fluids Engineering*, **105**, 429-434.
- Axelsson, N., Ramnefors, M. and Gustafsson, R.**, 1998. Accuracy in computational aerodynamics Part 1: Stagnation pressure, *SAE Technical Paper*, **980037**.
- El-Sayed, A.F., Nassief, M.M.**, 1996. An investigation into the aerodynamics of the external flow around a bus (Daewoo model), *SAE Technical Paper*, **962173**
- Erzi, I.** , 1997. Taşıt Tekniği Lisans Ders Notları, İ.T.Ü Makina Fakültesi , İstanbul.
- Gillespie, T.D.**, 1992. Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE Move, Pennsylvania.
- Gutierrez, W.T., Bassil, H., Croll, R.H., and Rutledge, W.H.** , 1996. Aerodynamics overview of the ground transportation systems project for heavy vehicle reduction, *SAE Technical Paper*, **960906**.
- Gutierrez, W.T., Bassil, H., Croll, R.H., Suazo, J.E. and Riggins, A.** , 1996. Aerodynamics overview of the ground transportation systems project for heavy vehicle reduction, *SAE Technical Paper*, **960907**.
- Güney, A.**, 1989. Taşıtlarda Güç İletimi Yüksek Lisans Ders Notları, İTÜ Makina Fakültesi, İstanbul.
- Hucho, W.H. and Sovran, G.**, 1996 Vehicle aerodynamics: An overview in *Aerodynamics of road vehicles*, Spec. Publ. SAE Move. Pennsylvania, **SP-1145**
- Katz, J.**, 1995. Race Car Aerodynamics, Robert Bentley Inc., Cambridge.
- Lajos, T., Preszler, L. and Finta L.**, 1988. Styling and aerodynamics of buses, *Int. Jou. Vehicle Design*.

- Patankar, S.V.**, 1988. Finite difference method, in *Handbook of Numerical Heat Transfer*, pp. 215-240, Eds. Minkowycz, W.J., Sparrow, E.M., Pletcher, R.H. and Schneider, G.E., John Wiley & Sons Inc.
- Perzon, S., Sjögren, T. and Jönson, A.**, 1998. Accuracy in computational aerodynamics Part 2: Base pressure, *SAE Technical Paper*, **980038**.
- Shaw, C.T.**, 1988. Predicting vehicle aerodynamics using by computational fluid dynamics-a user's perspective, *SAE Technical Paper*, **880454**.
- Vesteeg, H.K. and Malalasekera, W.**, 1995. An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method, Longman Group Ltd., Essex.
- Wong, J.Y.**, 1993. Theory of Ground Vehicles, John Wiley & Sons Inc.



ÖZGEÇMİŞ

Markos ÇAĞAN 1975 yılında Antakya’da doğdu. İlköğrenimini Antakya Cemalattin Tınaztepe İlkokulunda tamamladı (1981-86). Ortaöğrenimini Antakya kurtuluş Lisesinde (1986-1992) tamamladıktan sonra, 1992 yılında İTÜ Makina Fakültesine kaydoldu. Bir senelik İngilizce Hazırlık öğreniminden sonra Makina Fakültesinden 1998 yılında mühendis olarak mezun oldu. Markos ÇAĞAN 1998 yılından beri İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Otomotiv programında yüksek lisans eğrenimi yapmaktadır.

