

**BİNEK ARAÇ MODELİ ÜZERİNDEKİ
AERODİNAMİK ANALİZLERİN DENEYSEL VE
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Armağan ALTINIŞIK



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİNEK ARAÇ MODELİ ÜZERİNDEKİ
AERODİNAMİK ANALİZLERİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

Armağan ALTINIŞIK

Prof. Dr. Habib UMUR
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

BURSA – 2013
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Armağan ALTINIŞIK tarafından hazırlanan “Binek Araç Üzerindeki Aerodinamik Analizlerin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki juri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda ~~YÜKSEK LİSANS TEZİ / DOKTORA TEZİ~~ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Habib UMUR

İkinci Danışman : -----

Başkan : Prof.Dr.Habib UMUR İmza
Uludağ Üniv. Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Anabilim dalı

Üye : Prof.Dr.İrfan KARAGÖZ İmza
Uludağ Üniv.Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Anabilim dalı

Üye : Prof.Dr.Erdoğan DİLAVEROĞLU İmza
Uludağ Üniv.Mühendislik Fakültesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim dalı

Üye : Prof.Dr.İlhami HORUZ İmza
Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Anabilim dalı

Üye : Yard.Doç.Dr.Erhan PULAT İmza
Uludağ Üniv.Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Anabilim dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Ali Osman DEMİR

Enstitü Müdürü

.... / /

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
 - atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
 - kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
 - ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı
- beyan ederim.**

31 / 07 / 2013

İmza

Armağan ALTINIŞIK

ÖZET

Doktora Tezi

BİNEK ARAÇ ÜZERİNDEKİ AERODİNAMİK ANALİZLERİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Armağan ALTINIŞIK

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr. Habib UMUR

Bu çalışmada FIAT Linea aracın 1:5 ve 1:10 ölçekli modelleri üzerindeki aerodinamik analizleri Uludağ Üniversitesi rüzgar tüneline (UURT) ve Ankara Rüzgar Tüneline (ART) gerçekleştirilmiştir. Araç modelinde alt kısmı hareketsiz olup (tekerlekler sbt), hava alıkları da kapalıdır. İki tüneldeki farklı türbülans ve blokaj oranlarının aerodinamik etkisi değerlendirilmiştir. Modeller üzerinde hız profilleri, C_p (basınç katsayısı) dağılımları ve C_d (sürüklenme katsayısı) değerleri farklı yanal rüzgar açılarında değerlendirilmiştir. Statik basınçlar modeller üzerinde $\emptyset : 1$ mm çapında açılan delikler üzerinden simetri eksenini boyunca ve yanal olarak açılan üç adet kesit üzerinden alınmıştır. C_p , C_d değerleri 1:5 ölçekli model için $\beta = 10^\circ$ derece yanal rüzgar açısına kadar ve 1:10 ölçekli model için de $\beta = 40^\circ$ ye kadar ölçülmüştür. Mevcut hava tünellerinde genel olarak araç modelleri türbülans seviyeleri %1 civarında test edilirken gerçek hayatta otoban üzerinde seyahat eden araçların %5-10 türbülans şiddetine maruz kaldıkları bilinmektedir. Bu çalışmada testler türbülans şiddeti seviyesi UURT' de %7 ve ART' de %0.5 seviyelerinde gerçekleştirilerek gerçek duruma çok yakın analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Sayısal CFD analizleri FIAT' ın da standard kodu olan StarCCM+ ile gerçekleştirilmiş ve türbülans modeli olarak Düzeltilmiş(Realizable) K- ϵ two-layer kullanılmıştır. Deneysel UURT ve ART sonuçları, elde edilen CFD sonuçlarıyla da kıyaslanmıştır. 1:10 ölçekli model ile birbirini yakın takip eden iki araç aerodinamik analizleri gerçekleştirilmiş ve ön ve arkadaki aracın $x/L = 0, 0.5, 1.0$ pozisyonlarında C_p ve C_d etkileşimleri analiz edilmiştir.

Keywords: Taşıt aerodinamiği, blokaj oranı, türbölans Şiddeti, sürüklenme katsayısı, basınç katsayısı

2013, xxiii + 185 sayfa

ABSTRACT

PHD Thesis

EXPERIMENTAL and NUMERICAL AERODYNAMIC ANALYSIS OF A

PASSENGER CAR

Armağan ALTINIŞIK

Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Science

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Habib UMUR

In this study, 1:5 and 1:10 scale models of passenger car (FIAT Linea) were tested in two different wind tunnels as Uludag University Wind Tunnel (UURT) and Ankara Wind Tunnel (ART). Velocity profiles at different air freestream velocities were measured. Static pressures (C_p) and the drag coefficients (C_d) were measured at freestream velocities up to 30 m/s. Tunnel blockage effects were analysed with different proposed methods. For 1:5 scale model, C_p and C_d measurements were done at different yaw angles up to $\beta = 10^\circ$. Paralely for 1:10 scale model C_p and C_d measurements were done up to $\beta = 40^\circ$ yaw angle. Experimental and numerical investigation of aerodynamic interactions of two close following vehicles were also evaluated in this study. C_p measurements were done on the holes ($\emptyset : 1mm$) located on the symmetry axis and lateral three sections (x: 232 mm, 405 mm, 635 mm). Normally car models are tested at low turbulence intensities ($\sim 1\%$) at existing wind tunnels but in the real life vehicles are subjected higher turbulence intensities as 5-10% measured at highways. In this study turbulence intensities were 7% at UURT and 0.5% at ART. Obtained C_p and C_d results and flow characteristics were compared with CFD analysis. StarCCM+ with Realizable K- ϵ two-layer turbulence model was used for the numerical analysis.

Keywords: Otomotive Aerodynamics, Turbulence Intensity, Tunnel Blockage Ratio, Drag Coefficient, Pressure Coefficient

2013, xxiii + 185 pages

TEŐEKKÖR

Doktora tez alıŐmamn ortaya çıkmasında emeđini ve vaktini esirgemeyen deđerli hocam Prof.Dr.Habib UMUR'a, tez sűresi boyunca deđerli gűrűŐleri için Dr.Onur YEMENİCİ ve Yrd.Doç.Dr.Erhan PULAT'a, deneysel testlerin gerçekleŐtirilmesinde bűyűk gayret gűsteren Sami ÖZTÖRK'e, sayısal çalıŐmalarda verdiđi destekler için Yűk.Műh. Emre KÖTÖKEKEN'e, anlayıŐ ve sabırlarından dolayı eŐim Özlem ve kızlarım Buse Duru ve Beril Su'ya teŐekkűrlerimi borç bilirim.

Armağan ALTINIŞIK

31/ 07 / 2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Türbülans Şiddeti	7
1.2 Hava Tüneli Blokaj Oranı.....	8
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	13
2.1 Referans Modeller Üzerinde Aerodinamik Çalışmalar.....	13
2.2 Yanal Rüzgar C_d Etkileşimi.....	20
2.3 Birbirini Yakın Takip Eden Araç Etkileşimleri	24
2.4 Sayısal (CFD) Analizleri	27
2.5 C_d Optimizasyon Çalışmaları	33
2.6 Hava Tünelleri Türbülans Şiddeti Çalışmaları	41
2.7 Hava Tüneli Blokaj Etkilerine Yönelik Çalışmalar	42
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	46
3.1 Ölçekli Modellere Ait Detay Bilgiler.....	47
3.1.1 “1:5” Ölçekli Model.....	47
3.1.2 “1:10” Ölçekli Model.....	52
3.2 UURT (Uludağ Üniversitesi Rüzgar Tüneli) Testleri.....	54
3.2.1 Model Etrafındaki Hız Profillerinin Ölçümü.....	56
3.2.2. Model Üzerindeki Basınçların Ölçümü.....	59
3.2.3. Model Üzerindeki Sürüklenme Kuvvetlerinin Ölçümü.....	61
3.2.4. Modeller Üzerindeki Yüzey Akım Görüntülemeleri.....	67
3.2.5. Birbirini Yakın Takip Eden İki Araç Modeli Aerodinamik Analizleri.....	69

3.3 ART (Ankara Rüzgar Tüneli) Testleri	70
3.4 Belirsizlik Analizi	74
3.4.1. Hız Ölçümündeki Belirsizlik.....	75
3.4.2. C_p, C_d Hesaplarındaki Belirsizlikler.....	76
3.5. Sayısal (CFD) Analizleri	77
3.5.1. Türbülans modelleri.....	81
3.5.1.1. $K-\varepsilon$, Realizable $K-\varepsilon$ türbülans modeli.....	82
3.5.1.2 Duvar Yakını Modellemesi.....	85
3.6. Çalışmada Kullanılan Boyutsuz Sayılar	88
4.BULGULAR ve TARTIŞMA	90
4.1 Akım Görüntülemesi ve Simetri Ekseni Üzerindeki Hız Profilleri	90
4.1.1. “1:5” ve “1:10” Ölçekli Modeller Üzerindeki İplikcik Testleri	91
4.1.2. Simetri Ekseni Üzerindeki Hız Profilleri.....	94
4.1.3. StarCCM+ CFD Akım Karakteristiği Analizi	103
4.2 Basınç Dağılımlarının Analizi ($\beta = 0$)	104
4.2.1. Simetri Ekseni Üzerinde ($y:0$) Basınç Dağılımları ($\beta = 0$)	105
4.2.2. Yanal Eksenler Üzerindeki ($x: 232, x: 405, x: 635$) Basınç Dağılımları ($\beta = 0$)	114
4.3 Basınç Dağılımlarının Yanal Rüzgar Açılı Durumunda Analizi ($\beta > 0$) ..	125
4.4 Birbirini Yakın Takip Eden Araç Durumlarında C_p Dağılımları	149
4.5 Sürüklenme Katsayısı (C_d) Analizleri	161
4.5.1. Düz konumda sürüklenme katsayıları (C_d).....	161
4.5.2. Blokaaj Etkilerinin Sürüklenme Katsayısı (C_d) Üzerindeki Etkilerinin Analizleri	165
4.5.3. Değişik Yanal Sapma Açılarında ($\beta > 0$) C_d Değerleri	167
4.5.4. Birbirlerini Takip Eden Araç Durumlarında C_d Değerleri.....	172

5.SONUÇLAR.....	177
6.KAYNAKLAR.....	181
7.ÖZGEÇMİŞ.....	185

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
C_d	Sürükleme Katsayısı
C_l	Hava Taşıma Kuvveti Katsayısı
ρ	Hava Yoğunluğu (kg/m^3)
U_∞	Serbest Akım Hızı (m/s)
A	Rüzgara Dik Model Kesit Alanı (m^2)
I_u	Türbülans Şiddeti (Turbulence Intensity)
B	Tünel Blokaj Oranı
A_v	Araç/model Kesit Alanı (m^2)
A_t	Tünel Deney Odası Kesit Alanı (m^2)
Re	Reynold's Sayısı
ϑ	Kinematic Viskozite (m^2/s)
μ	Dinamik Viskozite ($kg/m.s$)
P_∞	Modelden Uzak Toplam Basınç (Pa)
P	Model Üzerindeki bir noktada Statik Basınç (Pa)
C_p	Statik Basınç Katsayısı
β	Yanal Rüzgar Açısı ($^\circ$)
$C_{m_{y,z}}$	Aerodinamik Moment Katsayıları
$RK - \varepsilon$	Realizable K - Epsilon Turbulence Model
C_{dc}	Blokaj Düzeltilmiş Sürükleme Katsayısı
C_{dm}	Blokaj Düzeltilmemiş Sürükleme Katsayısı
w	Blokaj Düzeltme Faktörü
q	Dinamik Basınç
q_c	Düzeltilmiş Dinamik Basınç

Simgeler	Açıklama
m'	Cowdrey Blokaj Faktörü
θ	Maskell Blokaj Faktörü
GF	Straingauge (Gauge Factor)
Nu	Yerel Nusselt sayısı
y^+	Cidardan boyutsuz uzaklık
u^+	Boyutsuz hız
$\tau_{x,y,z}$	Duvar kayma gerilmeleri
C_μ	Standart k- ϵ Türbülans Modeli Sabiti
$C_{\epsilon 1}$	Standart k- ϵ Türbülans Modeli Sabiti
$C_{\epsilon 2}$	Standart k- ϵ Türbülans Modeli Sabiti
C_k	Standart k- ϵ Türbülans Modeli Sabiti
C_ϵ	Standart k- ϵ Türbülans Modeli Sabiti
$C_{\epsilon 1RNG}$	RNG k- ϵ Türbülans Modeli Sabiti
$C_{\epsilon 2RNG}$	RNG k- ϵ Türbülans Modeli Sabiti
δ	Sınır Tabaka kalınlığı
u	x yönündeki hız bileşeni
v	y yönündeki hız bileşeni
w	z yönündeki hız bileşeni
μ_t	Türbülans Viskozitesi
μ_{eff}	Efektif Viskozite
S_M	Dış Kuvvetler Toplamı
P'	Modifiye Basınç
S_ϵ	Kullanıcı Tarafından Tanımlanan Kaynak Terimi

Kısaltmalar

Açıklama

ART	Ankara Rüzgar Tüneli
CFD	Computational Fluid Dynamics
CTA	Kızgın Tel Anomemetresi
DES	Detached eddy Simulation
LDA	Lazer Doppler Anomemetresi
MIRA	Motor Industry Research Association
NCBS	New Car Buyer Survey
PIV	Particle Image Velocimeters
SUV	Sport Utility Vehicle
RANS	Reynolds Ortalamalı Navier Stokes Denklemleri
SAE	Society of Automotive Engineers
SAD	Sayısal Akışkanlar Dinamiği
TGS	Turbulence Generating System
TOFAŞ	Türk Otomobil Fabrikası A.Ş.
UURT	Uludağ Üniversitesi Rüzgar Tüneli
VG	Vortex Üretici (Vortex Generator)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Sürüklenme katsayısındaki iyileştirmenin yakıt sarfıyatı üzerindeki etkisi.....	1
Şekil 1.2. Sürüklenme katsayısının (C_d) yıllara göre gelişimi	2
Şekil 1.3. Örnek prototip araçlarda C_d değerleri < 0.2 (a: C.N.R. Prototipe, b: Fioravanti Flair Prototipe)	2
Şekil 1.4. Aerodinamik direnç ve tekerlek yuvarlanma direncinin araç hızı ile olan ilişkisi	3
Şekil 1.5. Aerodinamik dirençler.....	4
Şekil 1.6. Örnek Vortex Generator (VG) uygulaması (a) ve C_d iyileştirmesi (b).....	5
Şekil 1.7. Örnek Pininfarina Hava Tüneli.....	6
Şekil 1.8 Türbülans arttırıcı kanatçık sistemi (Pininfarina Tüneli, Torino).....	8
Şekil 1.9. Hava tüneli hızı ve fan gücü ilişkisi.....	9
Şekil 1.10. Hava tüneli blokaj oranı.....	10
Şekil 1.11. Hava tüneli blokaj etkisi.....	11
Şekil 2.1 Standard Ahmed Modeli boyutları (mm).....	13
Şekil 2.2 SAE referans modeli ve boyutları (mm)	14
Şekil 2.3 “1/2.5” ölçekli DrivAer modelinin boyutları (mm)	15
Şekil 2.4 DrivAer referans modeli taban altı modellemesi	15
Şekil 2.5 Düz ve detaylandırılmış taban altı durumunda araç üstü C_p dağılımı	16
Şekil 2.6 Düz ve detaylandırılmış taban altı durumunda araç tabanı C_p dağılımı	17
Şekil 2.7 Ahmed Modeli arka eğim açısının C_p ye etkisi	17
Şekil 2.8. Ahmed Modeli arka eğim açısının C_d ye etkisi	18
Şekil 2.9 Referans MIRA 1:1 ölçekli model boyutları	19
Şekil 2.10 Mira modeli simetri ekseninde C_p dağılımı karşılaştırması	20
Şekil 2.11 Yanal rüzgar açısının C_d ve C_l e etkisi	21
Şekil 2.12 Değişik araçlarda C_d , β yanal açı etkileşimi (BOSCH 2002)	21

Şekil 2.13 Dikdörtgensel aracın değişik blokaj ve β yanal açılarında C_d etkileşimi.....	22
Şekil 2.14 Yanal Rüzgar açısı β , C_d , C_l ilişkisi	22
Şekil 2.15 (a) $\beta:0^\circ$ ve (b) $\beta:30^\circ$ de simetri ekseni basınç dağılımları	23
Şekil 2.16 SUV araç üzerinde yanal rüzgar açısının C_d ye etkisi	23
Şekil 2.17 İki Ahmed Modelin birbirine göre konumları	24
Şekil 2.18 Model pozisyonlarına göre yanal yük ve C_d değişimi	24
Şekil 2.19 Ara mesafesine göre iki minivan araç C_d etkileşimi	25
Şekil 2.20 İki adet Ford Windstar tandem pozisyonda C_d etkileşim testi	25
Şekil 2.21 1:1 ve 1:8 ölçekli tandem iki araç test sonuçlarının (C_d) kıyaslaması	26
Şekil 2.22 Birbirini yakın takip eden iki MIRA modeli	27
Şekil 2.23 Deneysel ve CFD analizi C_p dağılımları kıyaslaması	29
Şekil 2.24 Pikap modeli simetri ekseni boyunca C_p dağılım kıyaslaması	30
Şekil 2.25 MIRA modeli ve çözüm alanı boyutları (mm)	30
Şekil 2.26 1:5 araç modeli ve sayısal analiz grid yüzeyleri	31
Şekil 2.27 1:5 model üzerinde deneysel ve CFD C_p dağılımları.....	32
Şekil 2.28. Volvo S60 Model ve simetri ekseni mesh yoğunluğu	32
Şekil 2.29 Volvo S80 modeli simetri ekseni üzerinde C_p dağılımı	33
Şekil 2.30 Değişik açılarda taban altı arka kısım difüzör açıları	34
Şekil 2.31 Sedan tipi araçta arka difüzör açısının C_d ve C_l e etkisi	35
Şekil 2.32 (a) araç arka kısım sıkıştırılmış, (b) mevcut orijinal aracın arka kısmı (c) arka kısım çekilerek uzatılmış modeller	35
Şekil 2.33 (a) (b) (c) durumlarına göre araç arkasındaki akım karakteristikleri	36
Şekil 2.34 Uzatılmış Ahmed Modeli (mm)	36
Şekil 2.35 Taban altının kapalı, pürüzsüz olmasının C_d ye etkisi	37
Şekil 2.36 Ahmed Modeli arka flap açısının C_d etkileşimi	38
Şekil 2.37 Araç arka stil optimizasyonu C_d etkileşimi	38
Şekil 2.38 Araç yerden yüksekliğinin C_d ye etkisi	39

Şekil 2.39	MITSUBUSHI LANCER araçta VG (Vortex Generator) Uygulaması.....	39
Şekil 2.40	Aktif kontrol metoduyla akışın arka iz bölgesinin kontrolü	40
Şekil 2.41	Ahmet Gövdesi arka bölgesinde mikro-jet akımı uygulayarak ayrılma bölgesinin kontrolü	41
Şekil 2.42	Türbülans arttırıcı tahta kanatçıklar	42
Şekil 2.43	TGS var/yok durumuna göre C_d , C_l / β yanal açısı ilişkisi	42
Şekil 2.44.	Yolcu araç tipinde düzeltme faktörünün β yanal açılarına göre durumu ...	44
Şekil 3.1	“1:5” ve “1:10” FIAT Linea Modellerin boyutları (mm)	46
Şekil 3.2	“1:5” ölçekli model ön kısım geometrik laser taraması	47
Şekil 3.3	“1:5” ölçekli model sağ yan kısım geometrik laser taraması	48
Şekil 3.4	“1:5” ölçekli model üst kısım geometrik laser taraması	48
Şekil 3.5	“1:5” ölçekli model sol yan kısım geometrik laser taraması	49
Şekil 3.6	“1:5” model arka kısım geometrik laser taraması	49
Şekil 3.7	“1:5” model üzerindeki statik basınç delikleri	50
Şekil 3.8	“1:5” model üzerindeki statik basınç delikleri laser taraması (I)	50
Şekil 3.9	“1:5” model üzerindeki statik basınç delikleri laser taraması (II)	51
Şekil 3.10	“1:5” model basınç iğne ve hortumları	51
Şekil 3.11	“1:10” modelin 5 eksenli tezgahta işlenmesi	52
Şekil 3.12	“1:10” model yüzey taraması	52
Şekil 3.13	Akışkanlar mekaniği laboratuvarında bulunan rüzgar tüneli (UURT)	54
Şekil 3.14	Modifiye edilmiş UURT açık devre rüzgar tüneli boyutları ve deney odası.	55
Şekil 3.15	CTA Anemometresi ölçüm zinciri	56
Şekil 3.16	(a) DANTEC 55P0111 probu (b) Travers mekanizması	57
Şekil 3.17	(a) kalibrasyon ünitesi (b) CTA sistemi	58
Şekil 3.18	Model arkasında örnek delik normali (53 nolu delik)	58
Şekil 3.19	Değişik β açılarında konumlandırılmış 1:5 ölçekli model	59
Şekil 3.20	16 kanallı Pressure Systems datalogger	59

Şekil 3.21	Statik basınç ölçüm düzeneği	60
Şekil 3.22	Model ölçekleri bazında C_d ölçümleri için β açıları	61
Şekil 3.23	“1:5” model straingauge balance düzeneği	62
Şekil 3.24	“1:5” model straingauge balance sistem konstrüksiyonu	62
Şekil 3.25	Lehimlenebilir Metalic Straingauge	63
Şekil 3.26	Wheatson köprüsü	63
Şekil 3.27	Straingauge taşıyıcı ayakların ölçekli modellere göre boyutları	64
Şekil 3.28	Straingauge balans kalibrasyon düzeneği (1:5 model)	65
Şekil 3.29	“1:5” ölçekli model geometrik merkezi	65
Şekil 3.30	“1:10” model straingauge balance sistemi	66
Şekil 3.31	“1:5” model balance sistemi kalibrasyon eğrisi	66
Şekil 3.32	“1:10” model straingauge balans sistemi kalibrasyon grafiği	67
Şekil 3.33	(a) Perspektif görünüm (b) arkadan görünüm (c) β yanal açılı görünüm	68
Şekil 3.34	“1:10” ölçekli model iplikcik testleri	68
Şekil 3.35	UURT 1:10 ölçekli iki araç tünel konumları (a): L0 (b): L/2 (c): L	69
Şekil 3.36	Ankara Rüzgar Tüneli (ART) 1.test bölümü 2.ilk difüzör 3. Birinci ve ikinci dönüş kanatçıkları 4.Fan 5. İkinci difüzör 6. Dönüş kanatçıkları 7. Akış düzeltici elekler 8.dinlenme odası ve daralma konisi	70
Şekil 3.37	“1:5” model ART tünel deney odası yerleşimi	71
Şekil 3.38	(a) 64 kanallı elektronik basınç algılayıcı (b) (c) data toplama sistemleri....	72
Şekil 3.39	Çoklu basınç ölçer bileşenleri	73
Şekil 3.40	Çoklu basınç ölçer üstten görünüş	73
Şekil 3.41	Çözüm alanı mesh kaynakları (a) Dış dikiz ayna bölgesi (b) arka bölge (c) yere yakın bölge (d) ard iz bölgesi	78
Şekil 3.42	Sayısal çözüm alanı orta kesit mesh dağılımı ($\beta = 0^\circ$).....	79
Şekil 3.43	Sayısal çözüm alanı orta kesit mesh dağılımı ($\beta = 30^\circ$)	79
Şekil 3.44	Birbirini yakın takip eden iki araç sayısal çözüm alanı ($x/L = 0$)	80
Şekil 3.45	Birbirini yakın takip eden iki araç sayısal çözüm alanı ($x/L = 1$)	80

Şekil 3.46 Tam Gelişmiş Türbülanslı Sınır Tabaka Hız Profili	86
Şekil 3.47 y^+ ile boyutsuz hız, u^+ 'nın değişimi	87
Şekil 4.1 “1:5” ölçekli model UURT iplikcik testi	91
Şekil 4.2 “1:10” ölçekli model UURT iplikcik testi	91
Şekil 4.3 “1:5” ölçekli model UURT iplikcik testi (I)	92
Şekil 4.4 “1:5” ölçekli model iplikcik testi 30 m/s (II)	93
Şekil 4.5 “1:10” ölçekli model iplikcik testi 30 m/s (I)	93
Şekil 4.6 “1:10” ölçekli model iplikcik testi 30 m/s (II)	94
Şekil 4.7 “1:5” ölçekli model simetri ekseni hız profilleri 30 m/s ($Re : 2,73.10^5$)	96
Şekil 4.8 Mitsubishi LANCER EVOLUTION VIII 1:1 ölçekli araç üzeri hız profili ...	96
Şekil 4.9 “1:5” ölçekli model arka iz bölgesinde hız profilleri $U_\infty = 30$ m/s	97
Şekil 4.10 “1:5” ölçekli model simetri ekseni hız profilleri 3 m/s ($Re : 2,73.10^4$)	97
Şekil 4.11 “1:10” ölçekli model üzerinde 3,10, 20, 30 m/s hızlarda hız profilleri	100
Şekil 4.12 “1:10” model 3 m/s ve 30 m/s hızlarda hız profillerinin karşılaştırılması ..	101
Şekil 4.13 “1:5” ve “1:10” ölçekli modeller üzerinde hız profilleri $U_\infty = 30$ m/s	102
Şekil 4.14 “1:10” ölçekli model arka iz bölgesi hız profilleri	102
Şekil 4.15 “1:5” ölçekli model 30 m/s CFD yüzey sürtünme konturları	103
Şekil 4.16 “1:5” ölçekli model 30 m/s CFD yüzey sürtünme konturları (üst bakış)...	104
Şekil 4.17 1:5 model üstü CFD akım görüntüleme 30 m/s	104
Şekil 4.18 “1:5” ölçekli model UURT testi simetri ekseni C_p dağılımı (30 m/s)	106
Şekil 4.19 “1:5” model simetri ekseni C_p dağılımları 10, 20, 30 m/s	106
Şekil 4.20 “1:5” model ART ve UURT C_p karşılaştırması (30 m/s)	107
Şekil 4.21 “1:5” model ART C_p dağılımları kıyaslaması (10, 20, 30 m/s)	107
Şekil 4.22 “1:5” ve “1:10” model C_p dağılım karşılaştırması (UURT- 30 m/s)	108
Şekil 4.23 “1:5” model ART ve “1:10” model UURT C_p dağılımı kıyaslaması (30 m/s)	109
Şekil 4.24 “1:10” model C_p dağılımı kıyaslaması (UURT – 10, 20, 30 m/s)	109

Şekil 4.25 StarCCM+ 1:5 ölçekli model üzeri basınç dağılımı (30 m/s)	110
Şekil 4.26 StarCCM+ CFD değişik blokaj oranlarında basınç dağılımları – Üst Görünüş	111
Şekil 4.27 StarCCM+ CFD değişik blokaj oranlarında basınç dağılımları – Yan Görünüş	111
Şekil 4.28 CFD 1:5 ölçekli model 0 ve 20% blokaj durumunda simetri eksenine C_p dağılımları kıyaslaması (30 m/s)	112
Şekil 4.29 Sayısal model simetri eksenine keskin geçişler	112
Şekil 4.30 “1:5” model simetri eksenine CFD ve ART C_p kıyaslaması (30 m/s)	113
Şekil 4.31 “1:10” model simetri eksenine C_p dağılımının “1:5” model CFD C_p dağılımıyla kıyaslaması (30 m/s)	113
Şekil 4.32 “1:5” model simetri eksenine 20 % blokaj durumunda CFD ve UURT C_p kıyaslaması (30 m/s)	114
Şekil 4.33 “1:5” model yan eksenlerdeki basınç delik pozisyonları	115
Şekil 4.34 “1:5” model Y1 kesiti basınç dağılımı ($U_\infty = 30$ m/s, $\beta = 0^\circ$)	115
Şekil 4.35 “1:5” model Y2 kesiti basınç dağılımı ($U_\infty = 30$ m/s, $\beta = 0^\circ$)	116
Şekil 4.36 “1:5” model Y3 kesiti basınç dağılımı ($U_\infty = 30$ m/s, $\beta = 0^\circ$)	117
Şekil 4.37 “1:5” model Y1 kesiti basınç dağılımı kıyaslaması (UURT ve ART, $U_\infty = 30$ m/s, $\beta = 0^\circ$)	118
Şekil 4.38 “1:5” model Y2 kesiti basınç dağılımı kıyaslaması (UURT ve ART, $U_\infty = 30$ m/s, $\beta = 0^\circ$)	119
Şekil 4.39 “1:5” model Y3 kesiti basınç dağılımı kıyaslaması (UURT ve ART, $U_\infty = 30$ m/s, $\beta = 0^\circ$)	119
Şekil 4.40 “1:5” ve “1:10” modeller Y3 kesiti UURT basınç dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s, $\beta = 0^\circ$)	120
Şekil 4.41 “1:5” ve “1:10” modeller Y2 kesiti UURT basınç dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s, $\beta = 0^\circ$)	120
Şekil 4.42 “1:5” ve “1:10” modeller Y3 kesiti UURT basınç dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s, $\beta = 0^\circ$)	121
Şekil 4.43 “1:5” model Y1 kesiti ART basınç dağılımı CFD kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s, $\beta = 0^\circ$)	122

Şekil 4.44 “1:5” model Y2 kesiti ART basınç dağılımı CFD kıyaslaması ($U_{\infty} = 30$ m/s, $\beta = 0^{\circ}$)	122
Şekil 4.45 Yan kesitlerde modeldeki keskin geçişler	123
Şekil 4.46 “1:5” model Y3 kesiti ART basınç dağılımı CFD kıyaslaması ($U_{\infty} = 30$ m/s, $\beta = 0^{\circ}$)	123
Şekil 4.47 “1:5” model Y1 kesiti CFD 20 % blokaj C_p dağılımının UURT kıyaslaması ($U_{\infty} = 30$ m/s, $\beta = 0^{\circ}$)	124
Şekil 4.48 “1:5” model Y2 kesiti CFD 20 % blokaj C_p dağılımının UURT kıyaslaması ($U_{\infty} = 30$ m/s, $\beta = 0^{\circ}$)	124
Şekil 4.49 “1:5” model Y3 kesiti CFD 20 % blokaj C_p dağılımının UURT kıyaslaması ($U_{\infty} = 30$ m/s, $\beta = 0^{\circ}$)	125
Şekil 4.50 “1:5” model simetri ekseninde $\beta = 0^{\circ}$ ve 5° de C_p dağılımı UURT kıyaslaması ($U_{\infty} = 30$ m/s)	126
Şekil 4.51 “1:5” model simetri ekseninde $\beta = 0^{\circ}$ ve 10° de C_p dağılımı UURT kıyaslaması ($U_{\infty} = 30$ m/s)	126
Şekil 4.52 “1:5” model simetri ekseninde $\beta = 0^{\circ}$ ve 5° de C_p dağılımı ART kıyaslaması ($U_{\infty} = 30$ m/s)	127
Şekil 4.53 “1:5” model simetri ekseninde $\beta = 0^{\circ}$ ve 10° de C_p dağılımı ART kıyaslaması ($U_{\infty} = 30$ m/s)	127
Şekil 4.54 “1:5” model simetri ekseninde $\beta = 0^{\circ}$ ve 5° de CFD C_p dağılımı kıyaslaması ($U_{\infty} = 30$ m/s)	128
Şekil 4.55 “1:5” model simetri ekseninde $\beta = 0^{\circ}$ ve 10° de CFD C_p dağılımı kıyaslaması ($U_{\infty} = 30$ m/s)	128
Şekil 4.56 “1:10” model UURT değişik yanal açılarında konumu	129
Şekil 4.57 “1:10” model simetri ekseninde $\beta = 0^{\circ}$ ve 5° de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_{\infty} = 30$ m/s)	130
Şekil 4.58 “1:10” model simetri ekseninde $\beta = 0^{\circ}$ ve 10° de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_{\infty} = 30$ m/s)	130
Şekil 4.59 “1:10” model simetri ekseninde $\beta = 0^{\circ}$ ve 20° de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_{\infty} = 30$ m/s)	131
Şekil 4.60 “1:10” model simetri ekseninde $\beta = 0^{\circ}$ ve 30° de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_{\infty} = 30$ m/s)	131

Şekil 4.61 CFD simetri ekseninde $\beta = 0^\circ$ ve 20° de C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	132
Şekil 4.62 CFD simetri ekseninde $\beta = 0^\circ$ ve 30° de C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	132
Şekil 4.63 CFD simetri ekseninde $\beta = 0^\circ \div 40^\circ$ de C_p dağılımları ($U_\infty = 30$ m/s)	133
Şekil 4.64 CFD simetri ekseninde $\beta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ ve 30° de C_p dağılımlarının 1:10 model UURT deneysel sonuçlarıyla kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	133
Şekil 4.65 CFD basınç konturları – üstten görünüş ($\beta = 0^\circ \div 40^\circ$ yanal açılarda) ($U_\infty = 30$ m/s)	134
Şekil 4.66 CFD basınç konturları – yan görünüş ($\beta = 0^\circ \div 40^\circ$ yanal açılarda) ($U_\infty = 30$ m/s)	134
Şekil 4.67 “1:10” model $\beta = 10^\circ$ de UURT iplikcik testi ($U_\infty = 30$ m/s)	135
Şekil 4.68 “1:10” model $\beta = 20^\circ$ de UURT iplikcik testi ($U_\infty = 30$ m/s)	136
Şekil 4.69 “1:10” model $\beta = 30^\circ$ de UURT iplikcik testi ($U_\infty = 30$ m/s)	136
Şekil 4.70 “1:5” model Y1 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ$ ve 5° de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	137
Şekil 4.71 “1:5” model Y2 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ$ ve 5° de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	137
Şekil 4.72 “1:5” model Y3 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ$ ve 5° de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	138
Şekil 4.73 “1:5” model Y1 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	139
Şekil 4.74 “1:5” model Y2 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	139
Şekil 4.75 “1:5” model Y3 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	140
Şekil 4.76 “1:5” model Y1 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ de ART C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	140
Şekil 4.77 “1:5” model Y2 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ de ART C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	141

Şekil 4.78 “1:5” model Y3 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ de ART C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	141
Şekil 4.79 “1:5” model Y1 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 5^\circ$ de CFD C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	142
Şekil 4.80 “1:5” model Y2 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 5^\circ$ de CFD C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	142
Şekil 4.81 “1:5” model Y3 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 5^\circ$ de CFD C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	143
Şekil 4.82 “1:5” model Y1 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ de CFD C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	144
Şekil 4.83 “1:5” model Y2 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ de CFD C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	144
Şekil 4.84 “1:5” model Y3 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ de CFD C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	145
Şekil 4.85 “1:10” model Y1 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	146
Şekil 4.86 “1:10” model Y2 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	146
Şekil 4.87 “1:10” model Y3 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	147
Şekil 4.88 Y1 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ de CFD C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	147
Şekil 4.89 Y2 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ de CFD C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	148
Şekil 4.90 Y3 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ de CFD C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	148
Şekil 4.91 Y1, Y2, Y3 kesitlerinde 1:10 model deneysel UURT ve CFD C_p dağılımları kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	149
Şekil 4.92 “1:10” model tandem araç pozisyonları (UURT)	150
Şekil 4.93 “1:10” model (L0) simetri eksenine C_p dağılımı tek araç durumu ile kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	151

Şekil 4.94 “1:10” model (T0) simetri eksenini C_p dağılımını tek araç durumu ile kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	151
Şekil 4.95 1:10 model (L0.5) simetri eksenini C_p dağılımını tek araç durumu ile kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	152
Şekil 4.96 “1:10” model (T0.5) simetri eksenini C_p dağılımını tek araç durumu ile kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	152
Şekil 4.97 “1:10” model (L1) simetri eksenini C_p dağılımını tek araç durumu ile kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	153
Şekil 4.98 “1:10” model (T1) simetri eksenini C_p dağılımını tek araç durumu ile kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	153
Şekil 4.99 “1:10” model değişik tandem pozisyonlarında simetri eksenini C_p dağılımlarının tek araç durumu ile kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)	154
Şekil 4.100 CFD simetri eksenleri C_p dağılımları ($x/L = 0$) ($U_\infty = 30$ m/s)	155
Şekil 4.101 CFD simetri eksenleri C_p dağılımları ($x/L = 0.5$) ($U_\infty = 30$ m/s)	155
Şekil 4.102 CFD simetri eksenleri C_p dağılımları ($x/L = 1$) ($U_\infty = 30$ m/s)	155
Şekil 4.103 1:10 model CFD ve UURT deneysel C_p dağılımları karşılaştırması ($x/L = 0$) ($U_\infty = 30$ m/s)	156
Şekil 4.104 1:10 model CFD ve UURT deneysel C_p dağılımları karşılaştırması ($x/L = 0.5$) ($U_\infty = 30$ m/s)	156
Şekil 4.105 1:10 model CFD ve UURT deneysel C_p dağılımları karşılaştırması ($x/L = 1$) ($U_\infty = 30$ m/s)	156
Şekil 4.106 CFD tandem araç pozisyonlarına göre basınç konturları üstten görünüşleri ($U_\infty = 30$ m/s)	157
Şekil 4.107 CFD tandem araç pozisyonlarına göre basınç konturları yan görünüşleri ($U_\infty = 30$ m/s)	158
Şekil 4.108 CFD tandem araç pozisyonlarına göre hız konturları ($U_\infty = 30$ m/s).....	158
Şekil 4.109 “1:10” model ‘L0 -T0’ konumu iplikcik testi ($U_\infty = 30$ m/s)	159
Şekil 4.110 1:10 model ‘L0.5 - T0.5’ konumunda arkadaki araç iplikcik testi ($U_\infty = 30$ m/s)	160
Şekil 4.111 1:10 model ‘L1 -T1’ konumunda arkadaki araç iplikcik testi ($U_\infty = 30$ m/s)	160

Şekil 4.112 1:5 ve 1:10 ölçekli model düz konumda maksimum kesit alanları (m^2)....	161
Şekil 4.113 1:5 ölçekli model UURT C_d grafiği (30 m/s, $\beta = 0$)	162
Şekil 4.114 1:5 ölçekli model ART C_d grafiği (30 m/s, $\beta = 0$)	163
Şekil 4.115 1:10 ölçekli model UURT C_d grafiği (30 m/s, $\beta = 0$)	163
Şekil 4.116 1:5 ölçekli model 20 % blokajlı ve blokajsız CFD C_d grafiği (30 m/s, $\beta = 0$)	164
Şekil 4.117 Değişik β yanal açılarında 1:10 modelin UURT deney odası pozisyonları ve kesit alanları	168
Şekil 4.118 C_d hesabında kullanılan araç eksenî sürüklenme kuvveti	169
Şekil 4.119 $A_\beta \cos\beta$ ile yanal rüzgar açısı ilişkisi	169
Şekil 4.120 CFD β yanal açılarında C_d değişimleri	170
Şekil 4.121 β yanal açılarında 1:5 ve 1:10 model C_d değişimleri ($U_\infty = 30$ m/s)	171
Şekil 4.122 Bir birini takip eden araç pozisyonları (L: Öndeki araç, T: Arkadaki araç)	173
Şekil 4.123 Araç konumlarına göre C_d değişimleri (CFD ve UURT karşılaştırması) ..	174
Şekil 4.124 Ardışık pozisyonda Ahmed Modelleri (Watkins ve Vino, 2008)	174
Şekil 4.125 Ardışık Ahmed modelleri C_d oranları(Watkins ve Vino, 2008)	175
Şekil 4.126 Birbirini yakın takip eden iki adet minivan C_d oranları (Zabat ve ark, 1995)	175
Şekil 4.127 İki adet yakın takip eden Mira modeli (Örselli, 2006).....	176
Şekil 4.128 İki adet yakın takip eden Mira modeli C_d oranları (Örselli, 2006).....	176

ÇİZELGELER DİZİNİ

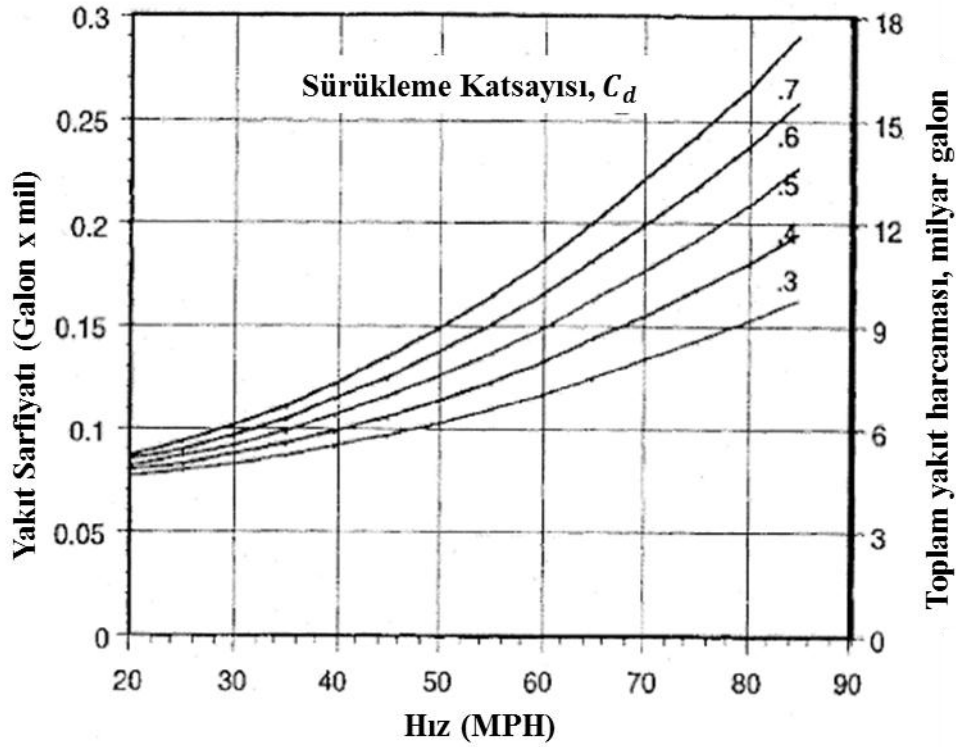
	Sayfa
Çizelge 1.1 Aerodinamik dirençlerin örnek dağılımı	4
Çizelge 1.2 Örnek Avrupa Hava Tünelleri Teknik Özellikleri (Atlı 1985)	6
Çizelge 2.1 DrivAer referans modeli C_d değerleri ($Re= 4.87E+6$)	16
Çizelge 2.2 Mira modeli aerodinamik katsayıları	19
Çizelge 2.3 İki adet yakın takip eden MIRA modeli C_d oranları	27
Çizelge 2.4 CFD analizi ve deneysel aerodinamik katsayıların kıyaslaması	29
Çizelge 2.5 MIRA modeli deneysel ve CFD sonuçları kıyaslaması	31
Çizelge 2.6 Araç pozisyonlarının toplam C_d üzerindeki payları	34
Çizelge 2.7 Uzatılmış Ahmed modeli optimum parametreler ve C_d değerleri	37
Çizelge 3.1 Modeller üzerindeki eksenlere göre statik basınç delik sayıları	53
Çizelge 3.2 Ölçeklere göre simetri ve yan eksenlerdeki basınç delikleri seçimleri	53
Çizelge 3.3 UURT (Uludağ Üniversitesi Rüzgar Tüneli) özellikleri	55
Çizelge 3.4 Netscanner 9116 Teknik Özellikleri	61
Çizelge 3.5 Modellere göre taşıyıcı ayaklara gelecek yük aralığı	64
Çizelge 3.6 ART Teknik özellikleri	70
Çizelge 3.7 64 kanallı basınç algılayıcı teknik özellikleri	74
Çizelge 3.8 Hız profillerinin ölçümündeki belirsizlikler	76
Çizelge 3.9 C_p hesabındaki belirsizlik	76
Çizelge 3.10 C_d hesabındaki belirsizlik	76
Çizelge 3.11 Sayısal çözümlerde kullanılan mesh sayıları	81
Çizelge 3.12 Standard K- ϵ sabitleri (Launder ve Spalding 1974)	84
Çizelge 4.1 $\beta = 0^\circ$ düz konumda C_d değerleri (30 m/s)	164
Çizelge 4.2 C_d blokaj düzeltme faktörleri ve oranları (30 m/s)	167
Çizelge 4.3 Yanal açılara göre kesit alanı x Cosinüs (β) değerleri	169

Sayfa

Çizelge 4.4 1:5 ve 1:10 ölçekli modellerin değişik β yanal açılarındaki C_d değerleri	170
Çizelge 4.5 Araç konumlarına göre C_d oranları (UURT, CFD kıyaslamalı)	173
Çizelge 4.6 Tandem araç konumlarına göre C_d değerleri (UURT, CFD kıyaslamalı)	173

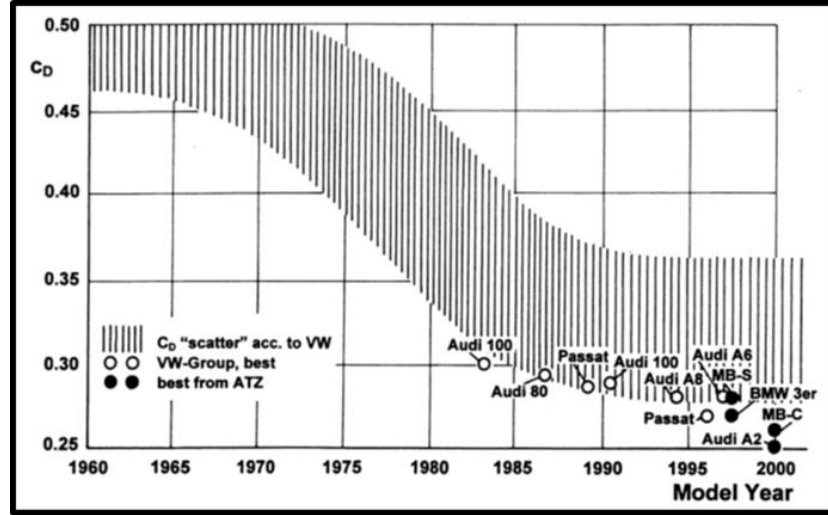
1. GİRİŞ

Otomobil üzerindeki aerodinamik yapının yakıt sarfiyatı, araç dinamiği ve gürültü seviyesi üzerindeki etkileri bilinmektedir. Son zamanlarda otomobil dünyasındaki rekabetin artması özellikle satınalma eğilimlerinde önemli parametrelerden olan yakıt sarfiyatı konusunda çalışmaları öne çıkarmıştır. NCBS (New Car Buyers Survey) anketleri sonuçlarına göre yeni araç satınalma sebepleri arasında yakıt sarfiyatı ilk 5 neden arasında yer almaktadır. Araç C_d (sürüklenme katsayısı) değerinin artışı yakıt sarfiyatında da artışa neden olmaktadır. **Şekil 1.1** de bu ilişki görülmektedir.

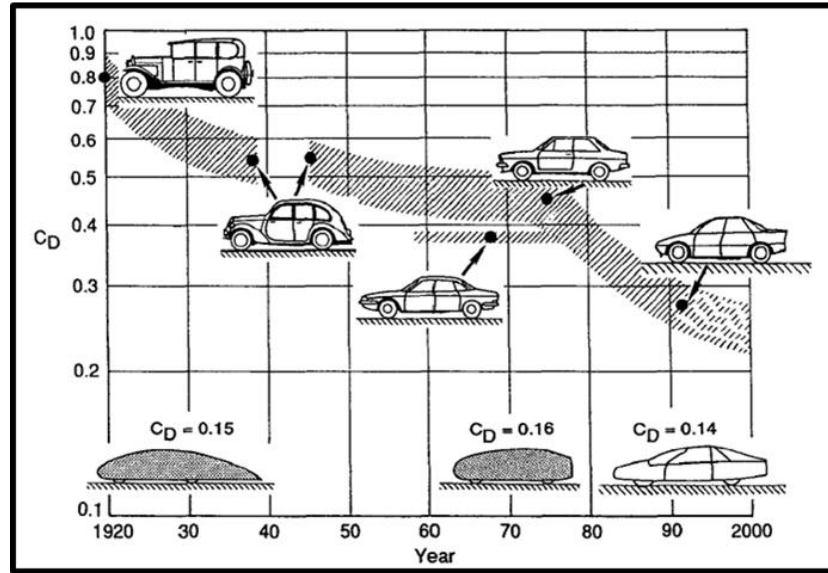


Şekil 1.1. Sürüklenme katsayısındaki iyileştirmenin yakıt sarfiyatı üzerindeki etkisi (Stapleford, 1981)

C_d değerlerinin yıllara göre durumu **Şekil 1.2** (a) ve (b) de görülmektedir. 1920 li yıllarda 0.8 seviyelerinde olan C_d değerleri 1960 lı yıllarda 0.45 değerlerine ve günümüzde 0.25 değerlerine kadar indirilebilmiştir. Prototip araçlarda bu değerler 0.2 değerlerin altına kadar da indirilebilmektedir (**Şekil 1.3**).



(a)



(b)

Şekil 1.2. Sürüklenme katsayısının yıllara göre gelişimi (Hugho, 1998)



(a)



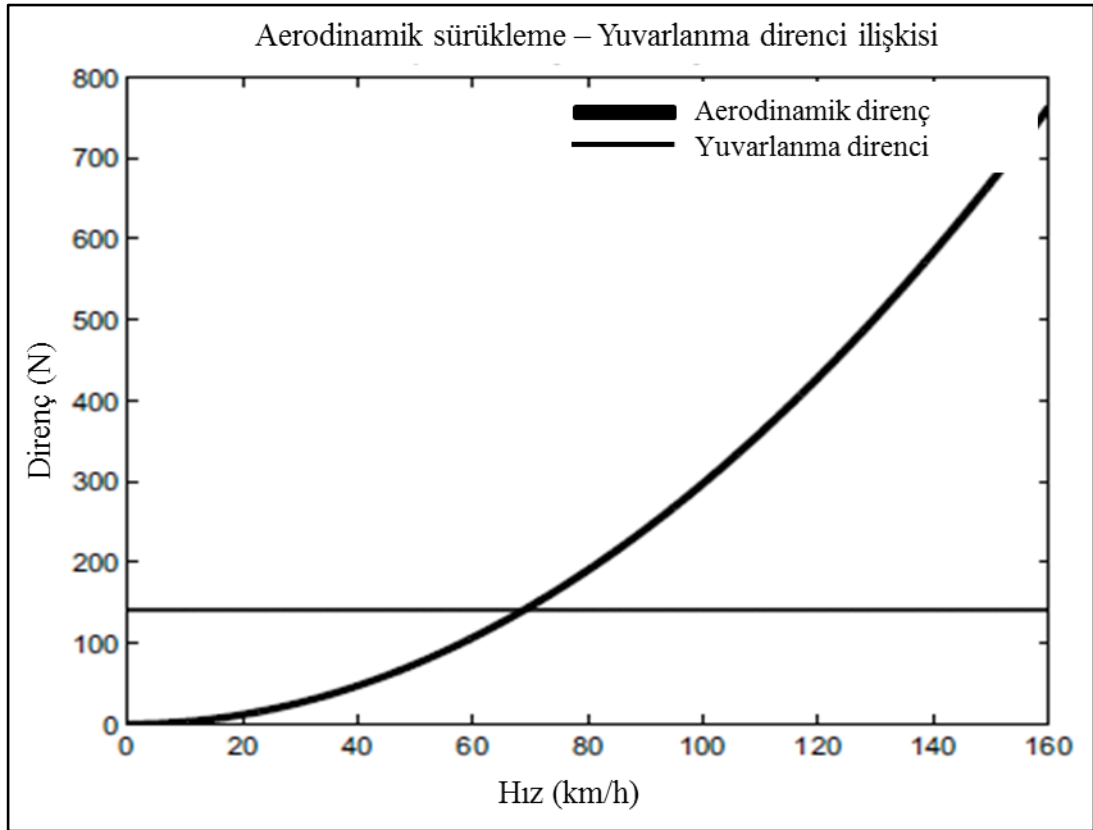
(b)

Şekil 1.3. Örnek prototip araçlarda C_d değerleri < 0.2 (a: C.N.R. Prototype, b: Fioravanti Flair Prototype, (Buresti, 2004))

Sürüklenme katsayısı boyutsuz bir parametre olup aşağıdaki formülasyonla belirtilir (Hugho, 1998) :

$$C_d = \frac{F_d}{0.5\rho U_\infty^2 A} \quad (1.1)$$

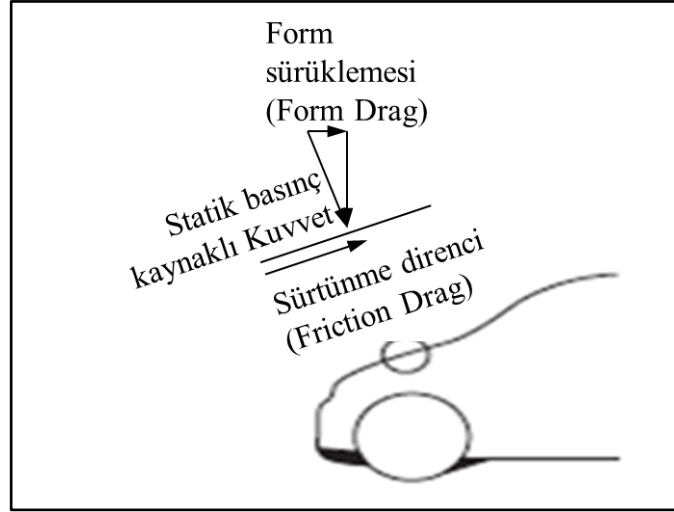
F_d araç üzerindeki aerodinamik direnç kuvvetini (N), ρ hava yoğunluğunu (kg/m^3), U_∞ serbest akım hızını (m/s) ve A aracın hava akış alanına normal olarak yansıtılmış maksimum kesit alanını (m^2) ifade etmektedir. Formülasyondan da görüleceği üzere C_d değerinin iyileştirilebilmesi F_d aerodinamik direncin düşürülmesiyle mümkün olabilmektedir.



Şekil 1.4. Aerodinamik direnç ve tekerlek yuvarlanma direncinin araç hızı ile olan ilişkisi (Levin ve Rigdal, 2011)

Aerodinamik direnç araç hızı ile belirgin artış gösterirken yuvarlanma direnci $V < 100$ km/s için sabit değerlendirilebilir (Levin ve Rigdal, 2011). Aerodinamik direncin iki

bileşeni bulunmaktadır. Form (basınç) direnci ve yüzey sürtünme direnci. Basınç direnci yüzey normaline göre (yüzeye dik) etki oluşturur iken sürtünme direnci yüzeye paralel etmektedir.



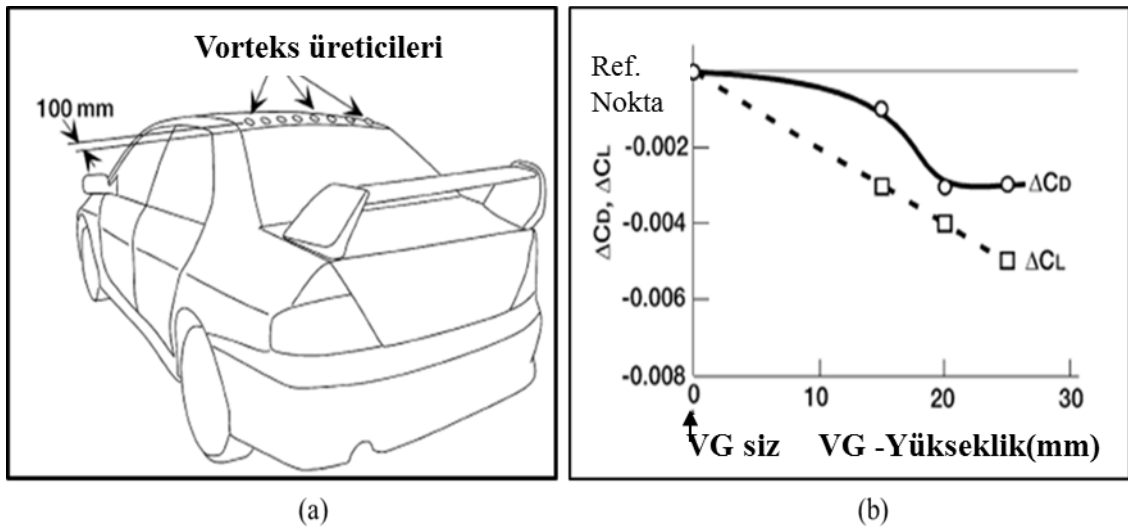
Şekil 1.5. Aerodinamik dirençler

Sürüklenme direncinin %65 i aracın şekli ile ilgilidir (ön, arka, tavan, yüzey), %20 yuvarlanma direnci olarak belirtilirken %15 lik kısım ise araç içi aerodinamiği ve diğer dirençler olarak belirlenmektedir. **Çizelge 1.1** de aerodinamik dirençlerin örnek dağılımı verilmiştir.

Çizelge 1.1 Aerodinamik dirençlerin örnek dağılımı (Gillespie, 1992)

DİRENÇ KATSAYISI BİLEŞENİ	TİPİK DEĞER
Taşıt öntü	0.055
Taşıt arkası	0.14
Taşıt altı	0.06
Yüzey Sürtünmesi	0.025
Toplam Gövde Direnci	0.28
Tekerlekler ve tekerlek boşlukları	0.09
Su olukları	0.01
Cam çerçeveleri	0.01
Dış ayna (bir adet)	0.01
Toplam Çıkıntı Direnci	0.12
Soğutma sistemi	0.035
Toplam İç Direnç	0.035
Genel Toplam Direnç	0.435
	(1970'ler ve 1980'lerinbaşı)

Dirence en büyük katkıyı yapan bölüm, arka taraftaki ayrışma bölgesinden kaynaklanan direnç nedeniyle, taşıt arkasıdır. Direnç azaltma potansiyeli en çok bu bölgededir. Araç arka kısmındaki optimizasyonlar genel olarak dizayn optimizasyonları şeklinde olabildiği gibi son yıllarda vortex üreticileri (VG) çalışmaları da yapılmaktadır. Bu çalışmalarla C_d değerlerinde %10 seviyelerine varan iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir (Koike ve ark., 2004). **Şekil 1.6** da örnek Mitsubishi aracı üzerinde uygulanan VG örneği ve C_d iyileştirmesi görülmektedir.



Şekil 1.6. Örnek Vortex Generator (VG) uygulaması (a) ve C_d iyileştirmesi (b) (Koike ve ark., 2004)

Aerodinamik analizler hem sayısal CFD analizleriyle hem de deneysel olarak hava tünellerinde gerçekleştirilmektedir. Özellikle deneysel çalışmaların maliyetli oluşu nedeniyle son yıllarda CFD analizlerinin öne çıktığı görülse de mevcut türbülans modellerinin otomobil üzerindeki kompleks akışları analiz etmede yeterince etkin olamaması nedeniyle deneysel çalışmalar her zaman önemini korumuştur. **Şekil 1.7** de örnek Pininfarina 1:1 ölçek hava tüneli örneği görülmektedir. **Çizelge 1.2.** de örnek Avrupa hava tünelleri ve teknik özellikleri görülmektedir (Atlı, 1985).



Şekil 1.7. Örnek Pininfarina Hava Tüneli (Torino, İtalya)

Çizelge 1.2 Örnek Avrupa Hava Tünelleri Teknik Özellikleri (Atlı, 1985)

Kolektör

	VW	MIRA	DB	FIAT	St.Cyr	PININF ARINA	FORD EWT
Dik kesit alanı m ²	37,5	35	32,6	30	15	11,75	11
Daralma oranı	4	1,45	3,53	4	5	6,2	6
Genişlik m.	7,5	7,9	7,4	7	5	5	3,6
Yükseklik m.	5,0	4,4	4,9	4,6	3	2,9	3,1
Uzunluk s.	8,0		8,6	8	6,8	10	10

Deney Odası

TİP	Açık	Kapalı	Açık	Açık	Yarıklı Duv.	Açık	Açık
Uzunluk m.	10,0	15,2	10,0	10,5	10,0	9,5	9,0

Giriş Ağızı

Dik kesit alanı m ²	50		60	55	16,6	16	16,8
Genişlik m.	8,2		8,2	8,5	5,2	4,3	4,5
Yükseklik m.	6,5		8,0	6,5	3,2	2,6	3,8
A _g / A _N	1,34		1,85	1,83	1,1	1,36	1,53

Fan

Çap m.	9	4 fans	8,5	9	2*4,6	4,6	4,5
Max RPM min ⁻¹	175		250	150	550		
Max güç kW	2600	970	4000	1865	2*258	625	1120
V _{max} m/s	75	37	75	56	40	70	70

1.1 Türbülans Şiddeti

Hava tünellerinde hava kalitesi türbülans şiddeti ile ifade edilmektedir. Türbülans şiddeti hız dalgalanmalarının ortalama kare kökünün ortalama hıza oranı olarak tanımlanmaktadır. Genellikle yüzde olarak verilir. Bir başka deyişle türbülans şiddeti, akım boyunca meydana gelen rastgele dalgalanmaların yoğunluğunun ifadesidir. Şu şekilde formülize edilir.

$$I_u = \frac{u'}{U} \times 100\% \quad (1.2)$$

Burada u' ortalama hızdan sapmaları ve U ortalama hız olarak tanımlanmıştır. Hava tünelleri tasarlanırken düşük türbülans şiddeti elde edilecek şekilde tasarlanmaktadır. Genel olarak türbülans şiddetleri (I_u) %1 seviyesi ve altındadır. Fakat gerçek hayatta trafik esnasında çoğu zaman araçlar hareket halindeyken yüksek türbülans şiddetlerine maruz kalırlar. Trafığın şartlarına bağlı olarak birbirini takip eden araçların varlığı, yolda ve yol kenarlarındaki engeller (binalar, ağaçlar vs..) türbülans şiddetlerini arttırmaktadır. Araç kullanımları çoğunlukla hafif rüzgarlı ortamda gerçekleşmektedir. Atmosferik rüzgarların %95 i 2 m yüksekliğinde ve 10 m/s hız seviyesinin altında gerçekleşmektedir (Watkins, 1990). Hafif rüzgar olarak adlandırdığımız 3 - 5 m/s hızlarda rüzgarların varlığı da türbülans şiddetlerini $I_u = \% 10-35$ seviyelerine çıkarmaktadır (Cogotti, 2008). Gerçek durumun deneylere yansıtılabilmesi amacıyla son zamanlarda hava tünellerinde türbülans arttırıcı sistemler kullanılmaktadır. Türbülans şiddetini arttırmak için tel ızgara (grid), delikli plakalar yada hareketli kanatçıklar kullanılmaktadır. **Şekil 1.8** de örnek Pininfarina rüzgar tüneline kullanılmış türbülans arttırıcı sistem görülmektedir. Bu çalışmada Fiat Linea 1:5, 1:10 modelleri UURT tüneline %7 türbülans şiddetinde ve ART tüneline 1:5 ölçekli model %0.5 türbülans şiddetinde test edilmiştir.



Şekil 1.8 Türbülans arttırıcı kanatçık sistemi (Pininfarina Tüneli, Torino)

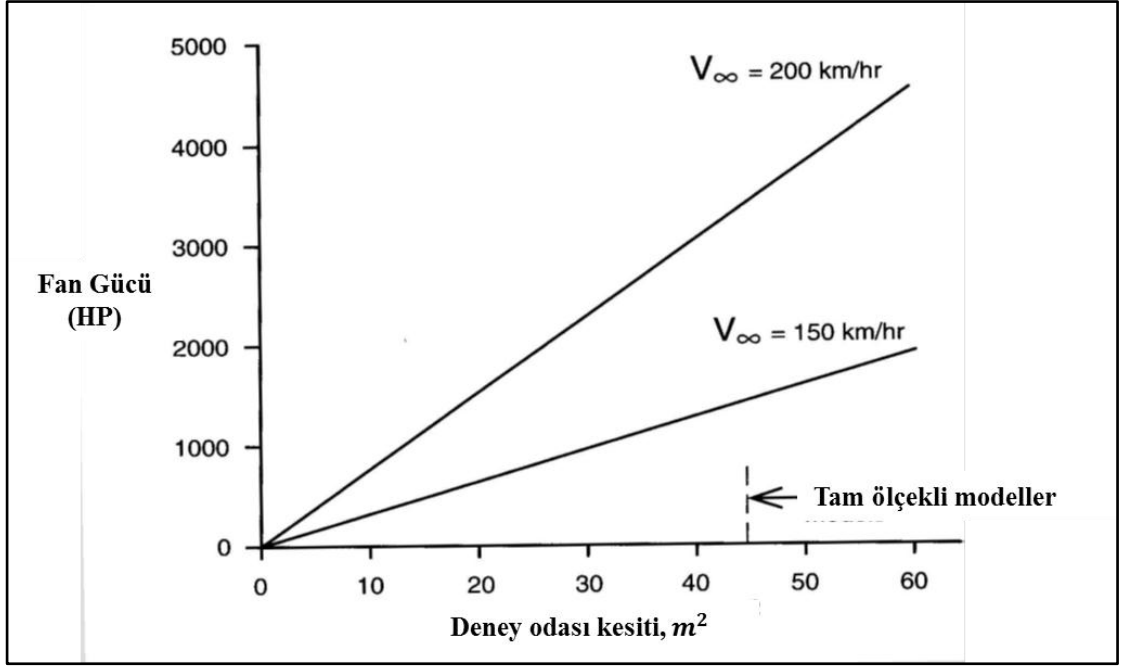
1.2 Hava Tüneli Blokaj Oranı

Hava tünel testlerinde diğer önemli parametrelerden biri de model kesiti ve deney odası arasındaki ilişkiyi tanımlayan blokaj oranıdır ve aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$B = A_v/A_t \quad (1.3)$$

Burada B blokaj oranını, A_v test edilen modelin hava eksenine dik maksimum kesit alanını ve A_t de hava tüneli deney odası kesit alanını ifade etmektedir (**Şekil 1.10**).

Deney odası blokaj oranını düşürebilmek için deney odası kesitlerinin olabildiğince büyük olması tercih edilir, bu sayede günlük yaşamdaki aerodinamik şartlar daha iyi simüle edilebilir fakat **Şekil 1.9** da da görüleceği gibi deney odası kesiti büyüdükçe gerekli olan fan gücü ihtiyaçları çok artmakta bu da testlerin aşırı maliyetli olmasına sebebiyet vermektedir. Dünyada 1:1 scale hava tünelleri sayıları sınırlıdır. Genel olarak testlerde tercih edilen model ölçekleri 1:2 – 1:5 boyutlarındadır. Daha küçük ölçekli modellerin de kullanıldığı görülmekle birlikte model küçüldükçe gerçek araçla model arasındaki sapmalar da artmaktadır. Bunun iki nedeni bulunmaktadır :



Şekil 1.9. Hava tüneli hızı ve fan gücü ilişkisi (Laight, 2012)

a) Reynold sayısı benzerliği:

$$Re = \frac{c_1 U_1}{\vartheta} = \frac{c_2 U_2}{\vartheta} \quad (1.4)$$

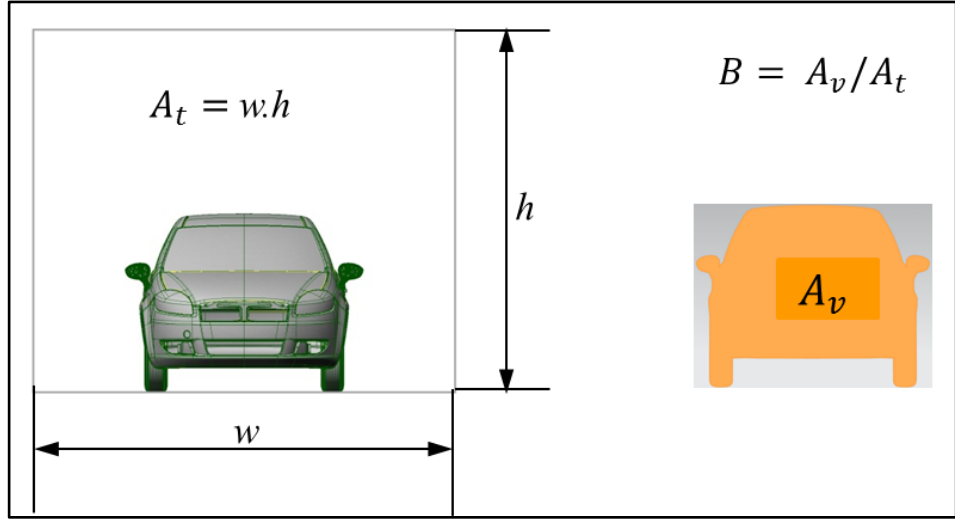
$$\vartheta = \mu / \rho$$

Burada c_1 , c_2 modellerin karakteristik uzunluklarını, U_1 , U_2 deney odası girişindeki serbest akım hızlarını, ϑ kinematik viskoziteyi, μ dinamik viskoziteyi ve ρ da hava yoğunluğunu ifade etmektedir.

Üstteki eşitlikte model 1:5 ölçekli alındığında hava hızının 5 kat artması anlamına gelmektedir. 40 m/s hızda giden bir aracın aerodinamik analizlerinin 1:5 ölçekli tünelde $40 \times 5 = 200$ m/s hava hızında yapılması anlamına gelmektedir. Bu da 0.6 Mach civarında hava hızı anlamına gelir ki, bu durumda hem havanın sıkıştırılabilirlik etkisi gözönünde bulundurulmalı hem de çok yüksek güçlü fan kullanımlarını gerektirmektedir. Bu da mevcut tünellerde mümkün olmamaktadır.

- b) Geometrik benzerlik : model küçüldükçe işleme esnasında gerçek modelden sapmalar artmakta çok küçük ölçüsel hatalarda bile 5 -10 kat büyük modelle kıyaslandığında önemli sapmalar ortaya çıkarabilmektedir.

Model boyutları üstte bahsettiğimiz kısıtlardan dolayı gerçek durumu simüle edebilmesi için mümkün olduğunca büyük tutulmalıdır. Bu durumda da deney odası blokaj oranları kaçınılmaz olmaktadır. Otomobil testlerinde genel olarak %5 blokajın üstündeki blokaj oranları tercih edilmemektedir. Yüksek blokaj oranlarında elde edilen sonuçlar blokaj düzeltme faktörüyle düzeltilmelidir. Blokaj oranının aerodinamik açıdan etkilerini aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz :



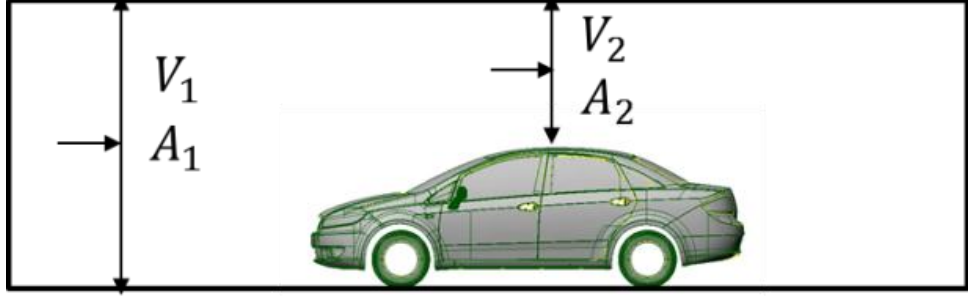
Şekil 1.10 Hava tüneli blokaj oranı

Blokaj oranı arttıkça model üzerinde aerodinamik hız, basınç ve sürüklenme katsayılarında belirgin değişimler gözlenmektedir. Bunun sebebi Bernoulli ve süreklilik denklemleriyle ifade edebilir :

$$P_1 + \rho \frac{U_1^2}{2} = P_2 + \rho \frac{U_2^2}{2} \quad (1.5)$$

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (1.6)$$

Burada P_1 araçtan oldukça önde hava akımının statik basıncını, U_1 serbest akım hızını, P_2 tavan üst bölgesinde havanın statik basıncını, U_2 tavan üst bölgesinde blokaj etkisiyle değişen akım hızını göstermektedir.



Şekil 1.11. Hava tüneli blokaj etkisi

Şekil 1.11 de görüldüğü gibi blokaj oranı arttıkça $V_2 > V_1$ olacağından, $P_2 < P_1$ olacaktır. Sonuç olarak araç üzerindeki basınç dağılımı ve C_d değerleri etkilenecektir. Gerçek hayatta blokaj oranları sıfır olarak alınabilir zira tünel geçişleri dışında atmosferde blokaj etkisi yaratacak bir durum oluşmamaktadır. CFD sayısal analizlerde de blokaj oranları %1 seviyesinde alınmakta olup etkileri ihmal edilebilir. Bu çalışmada araç üzerindeki aerodinamik analizlerin daha sağlıklı analiz edilebilmesi için 1:5 ölçekli model araç mevcut Uludağ Üniversitesi açık hava tüneline (UURT) (60 cm x 70 cm) deney odası kesitinde %20 blokaj oranında test edilmiştir. Testler sonucunda bulunan C_p ve C_d değerlerinin analizi için 1:10 ölçekli FIAT Linea modeli üretilmiş ve UURT'de aynı şartlarda test edilmiştir. İlave olarak 1:5 ölçekli model Ankara Rüzgar Tüneline (ART) %1 blokaj oranında test edilmiştir ve sonuçlar kıyaslanarak blokaj değerlendirmesi yapılmıştır.

Tez çalışmasında modeller üzerinde aşağıdaki formülasyonda belirtilen boyutsuz basınç katsayıları da araç simetri eksenini boyunca ve yanal eksenler boyunca (x:232, 405, 635) ölçülmüş ve CFD sonuçlarıyla kıyaslanmıştır.

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{0.5 \rho U_\infty^2 A} \quad (1.7)$$

Burada P_∞ toplam referans basıncı, P model üzerindeki herhangi bir noktada ölçülen statik basıncı, ρ test esnasında ölçülen hava yoğunluğu, U_∞ tünel deney odası girişindeki serbest hava hızını, A hava eksenine dik maksimum model kesit alanını ifade etmektedir.

Çalışmada 1:5 ve 1:10 ölçekli modeller üzerinde 3, 10, 20, 30 m/s akım hızlarında simetri eksenini üzerinde hız profilleri ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. C_p dağılımları üstte belirtilen simetri ve yanal eksenlerde 1:5 model için UURT ve ART tünellerinde, 1:10 ölçekli model için ise UURT tüneline ölçülmüş ve birbirleriyle ve CFD analizleriyle karşılaştırılmıştır. C_d değerleri özel tasarlanmış ve kalibre edilmiş strain gauge balans sistemi vasıtasıyla hem 1:5 hem de 1:10 ölçekli modeller için ölçülmüş ve CFD sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Çalışma kapsamında β yanal rüzgar açısı durumunda C_p dağılımları ve C_d değerleri analiz edilmiştir. Birbirini yakın takip eden iki araç durumunda C_p dağılımları ve C_d değerlerindeki değişimler UURT tüneline 1:10 ölçekli model için gerçekleştirilmiş ve CFD sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

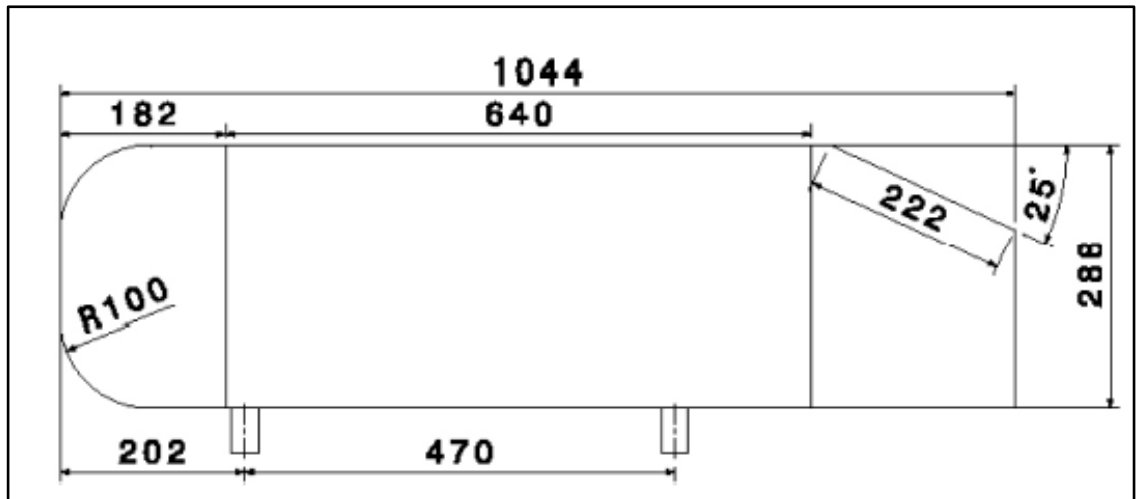
2. KAYNAK ÖZETLERİ

Kara taşıtları üzerinde yapılan deneysel aerodinamik çalışmalar 1960 lı yıllara dayanmaktadır. Aerodinamik çalışmalar daha çok C_d değerlerini iyileştirerek yakıt sarfiyatının iyileştirmesine, araç dinamiği, stabilitesi ve aerodinamik ses, gürültü seviyesini iyileştirmesine yönelik yapılmaktadır.

Sürükleme kuvvetleri daha çok araç üzerinde oluşan basınç kuvvetleriyle domine edildiğinden araç, model üzerindeki basınç katsayılarının (C_p) ölçümü ve tahmin edilmesi önem kazanmaktadır.

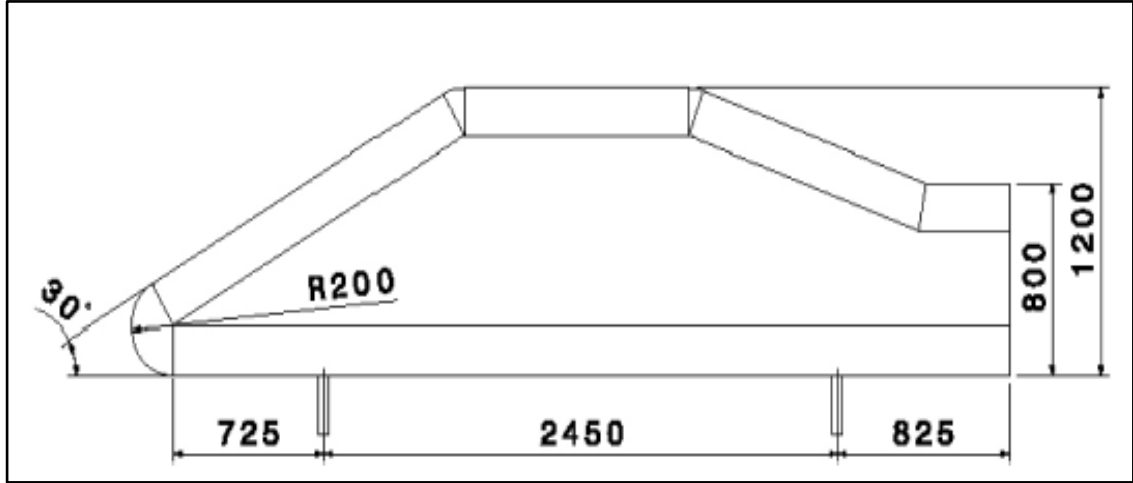
2.1 Referans Modeller Üzerinde Aerodinamik Çalışmalar

Literatürde aerodinamik çalışmalarda farklı referans modellerin kullanıldığı görülmektedir (Good ve Garry, 2004). Standart modellerden literatürde en fazla rastladığımız model Ahmed modelidir (Ahmed ve Ramm, 1984). **Şekil 2.1** de Ahmed modeli boyutları görülmektedir. Ahmed modeli üzerinde bir çok deneysel ve sayısal CFD analizleri gerçekleştirilmiştir (Gillieron ve ark., 2010, Aider ve ark., 2010, Fourriè ve ark., 2010, Strachan ve ark., 2007, Gillieron ve Kourta, 2010, Fares, 2006, Kapadia ve Roy, 2003, Frolich ve Terzi, 2008, Rodi, 2006).



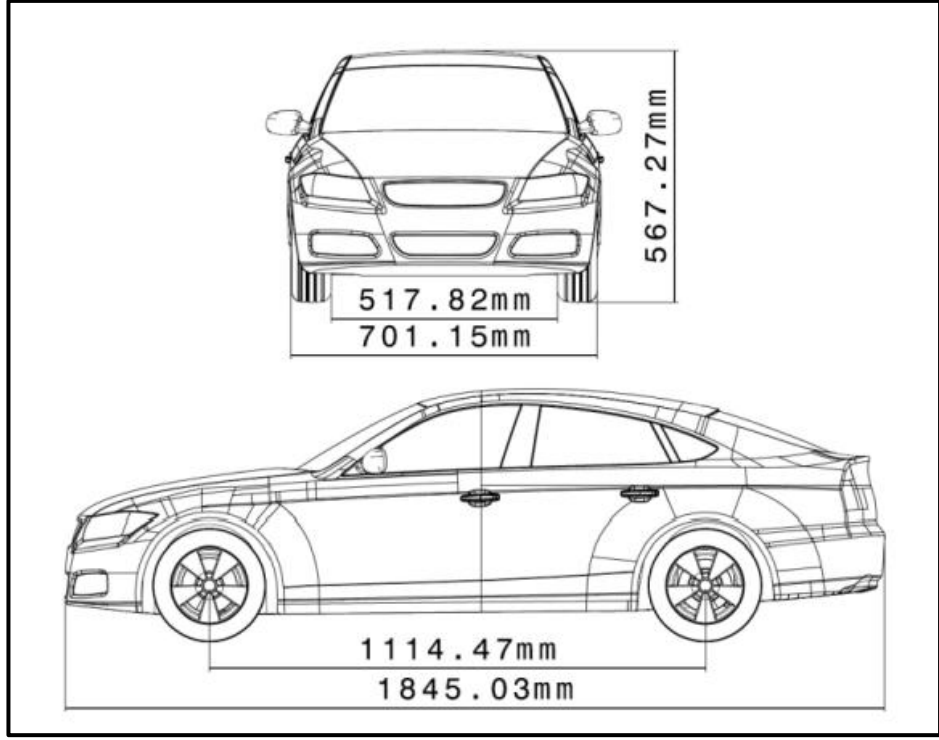
Şekil 2.1 Standard Ahmed Modeli boyutları (mm) (Ahmed ve Ramm, 1984)

Ahmed modelinin yanı sıra sedan tipi yolcu araçlarının aerodinamik analizlerinde kullanılan diğer bir standard model ise SAE tarafından geliştirilen modeldir (Good ve Garry, 2004). **Şekil 2.2** de SAE referans modeli ve boyutları görülmektedir.

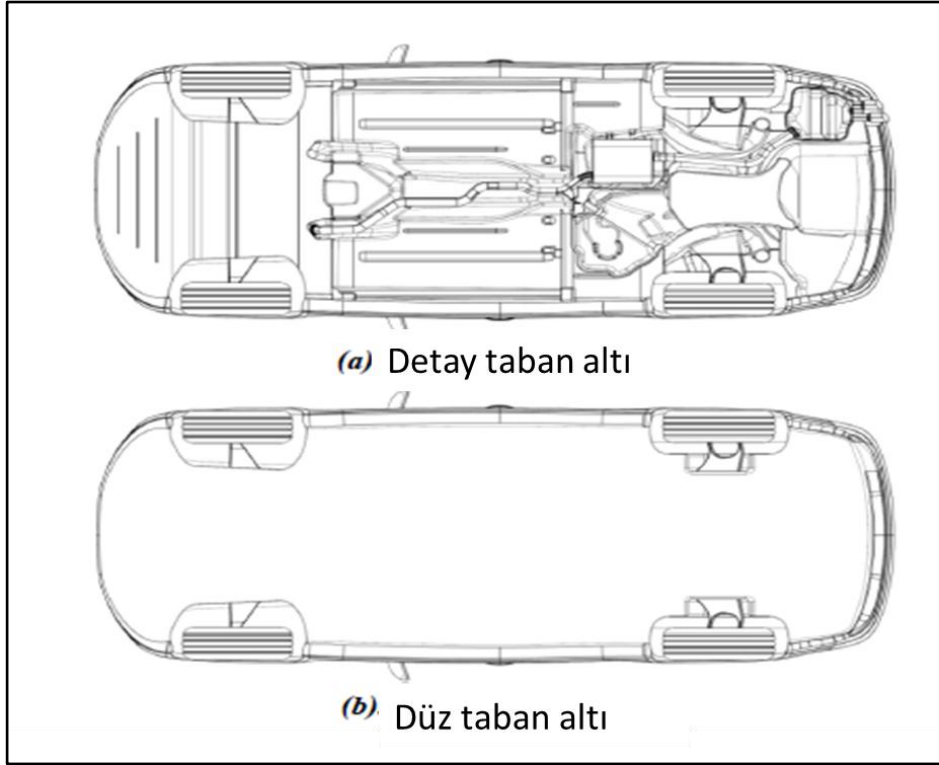


Şekil 2.2 SAE referans modeli ve boyutları (mm) (Good ve Garry, 2004)

Basit araç modelleri (Ahmed, SAE modelleri), spesifik bölgelerde basit akış yapılarını anlamada faydalı olurken, özellikle taban altı, tekerlek bölgesi gibi alanlardaki kompleks akışların analizlerinde zayıf kalmaktadır. Gerçek araçlara ait modellere endüstriyel açıdan ulaşmak çok kısıtlı olduğundan bu alanlarda az sayıda çalışma ve bilgi bulunmaktadır. Bu alandaki eksikliği gidermek üzere the Institute of Aerodynamics and Fluid Mechanics of the Technische Universität München (TUM) tarafından Audi AG ve BMW grup ile birlikte çalışarak yeni bir referans model geliştirilmiştir (Heft, Indinger, Adams, 2012). Modelin gövdesi tipik iki orta-klas aracı, üstü değişebilir uç ve tabanı iki farklı geometri olmak üzere oluşturulmuştur. DrivAer adı verilen 1: 2.5 ölçekli bu referans modelin kullanımını teşvik etmek amacıyla modele ait tüm geometrik boyutlar enstitünün websitesinde sunulmuştur (<http://www.aer.mw.tum.de/en/research-groups/automotive/drivaer>, 2012). **Şekil 2.3** te DrivAer referans modeli ve boyutları ve **Şekil 2.4** de ise taban altı modellemesi görülmektedir.



Şekil 2.3 “1/2.5” ölçekli DrivAer modelinin boyutları (mm)(Heft ve ark., 2012)



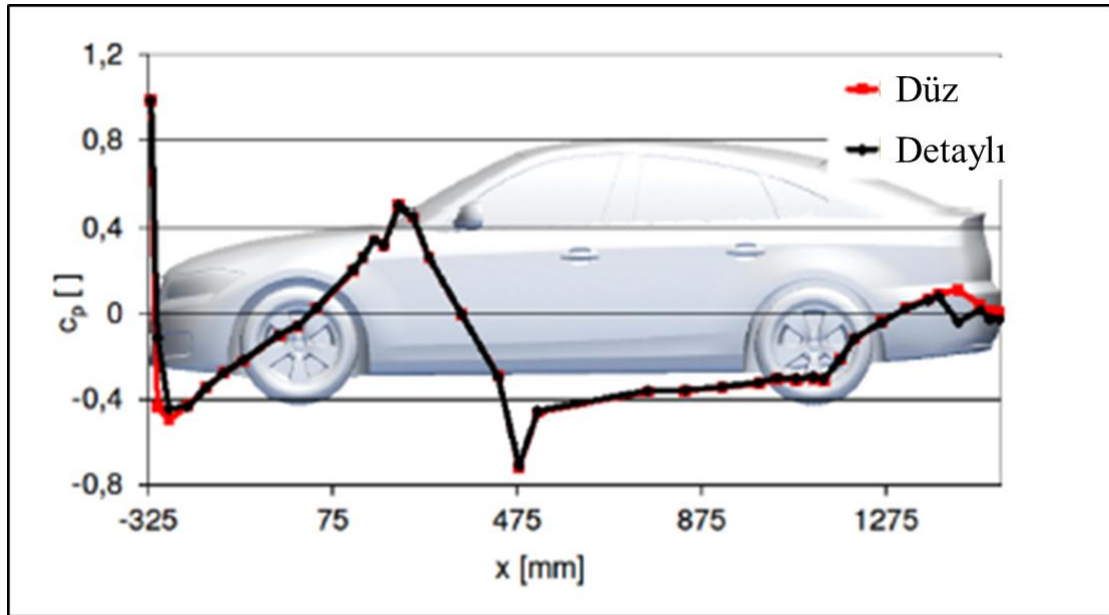
Şekil 2.4 DrivAer referans modeli taban altı modellemesi(Heft ve ark.,2012)

Yapılan deneysel çalışmalarda (Heft ve ark, 2012), DirvAer, Audi ve BMW mockup modelleri %8 blokajla yer simülasyonlu ve simülasyonsuz test edilerek C_p ve C_d değerleri ölçülmüş ve özellikle Audi Notchback ve Fastback modellerine paralel değerler bulunmuştur (Çizelge 2.1).

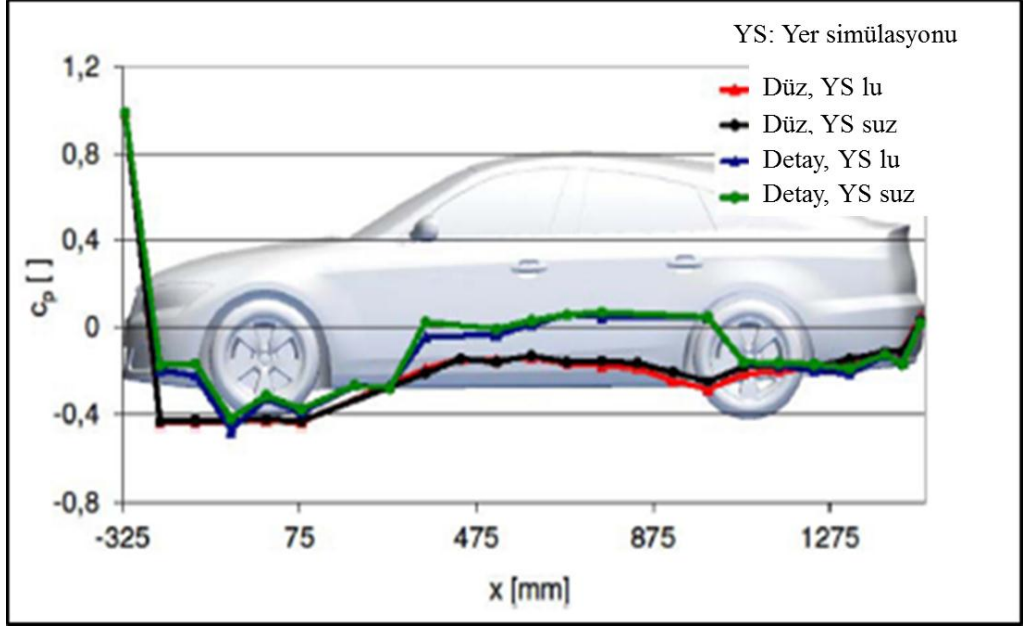
Çizelge 2.1. DirvAer referans modeli C_d değerleri ($Re= 4.87E+6$) (Heft ve ark.,2012)

	Estate Back	Notchback	Fastback
Audi	0.288	0.260	0.259^2
BMW	0.257	0.248	$-^3$
DirvAer	0.319	0.277	0.275

Model tabanının düz olması durumuna göre Şekil 2.6 da C_p dağılımlarının özellikle taban altında etkilendiği görülürken Şekil 2.5 te aracın üst simetri ekseninde ölçülen C_p değerlerinin etkilenmediği görülmektedir.

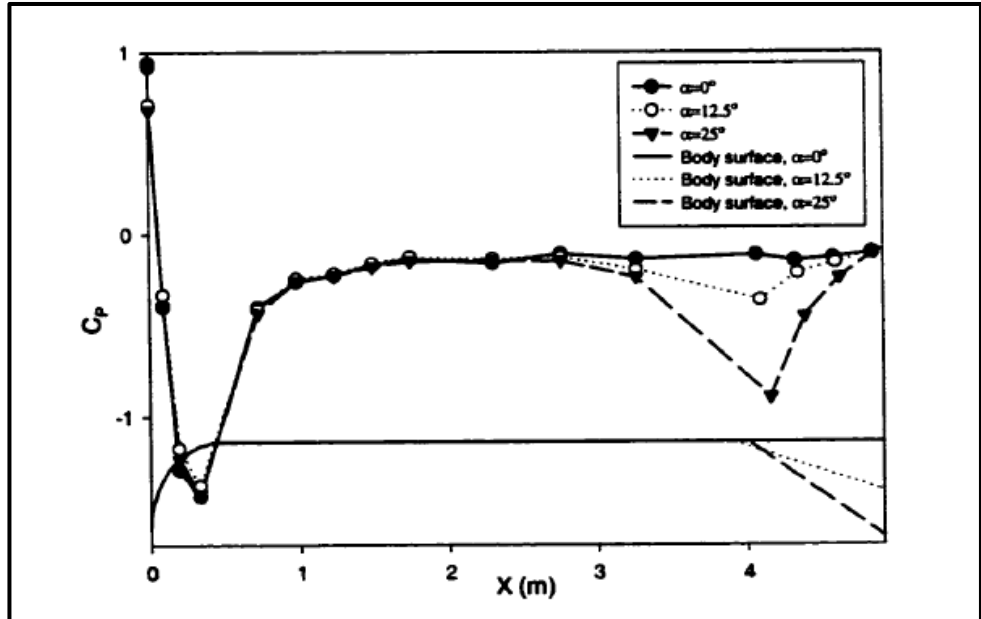


Şekil 2.5 Düz ve detaylandırılmış taban altı durumunda araç üstü C_p dağılımı (Heft ve ark,2012)

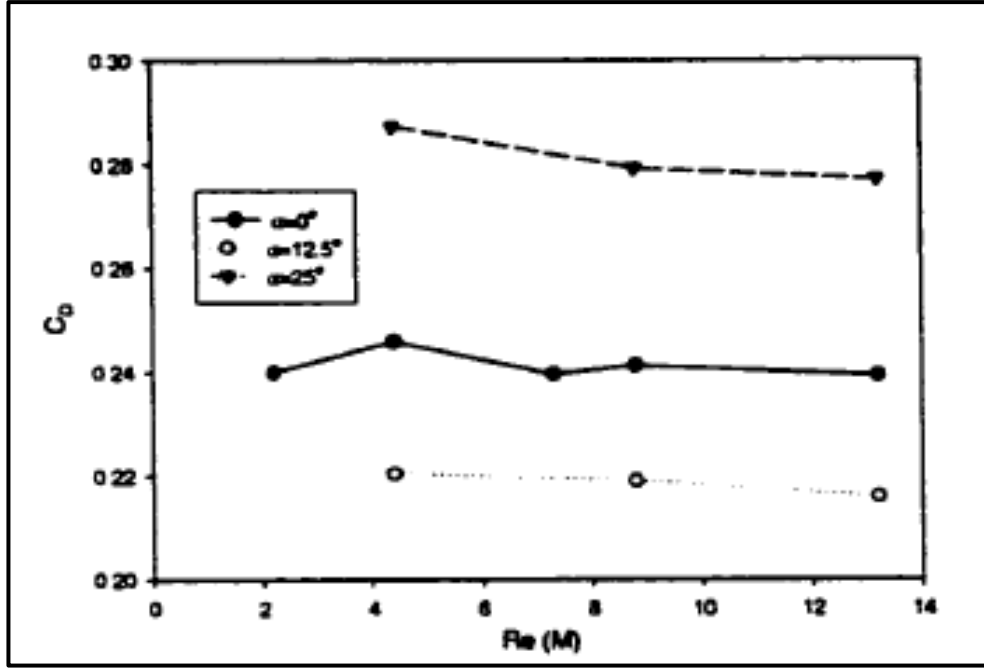


Şekil 2.6 Düz ve detaylandırılmış taban altı durumunda araç tabanı C_p dağılımı (Heft ve ark.,2012)

(Bayraktar, 2002) tarafından Ahmed modeli üzerinde yapılan deneysel ve nümerik çalışmada model arkasındaki değişik α eğim açıları durumundaki C_p dağılımı değerlendirilmiştir (Şekil 2.7). Şekil 2.8 de de arka eğim açısının C_d ye olan etkisi değerlendirilmiştir. $\alpha : 12.5^\circ$ de optimum C_d değerleri elde edilmiştir.

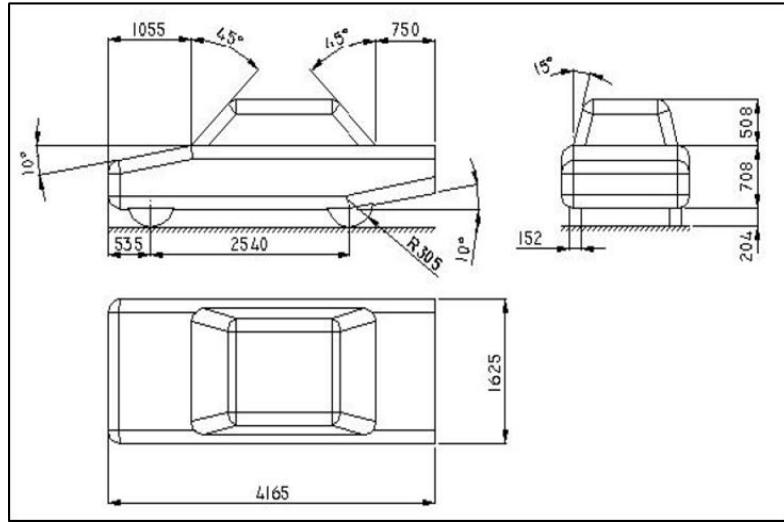


Şekil 2.7 Ahmed Modeli arka eğim açısının C_p ye etkisi (Bayraktar, 2002)



Şekil 2.8. Ahmed Modeli arka eğim açısının C_d ye etkisi (Bayraktar, 2002)

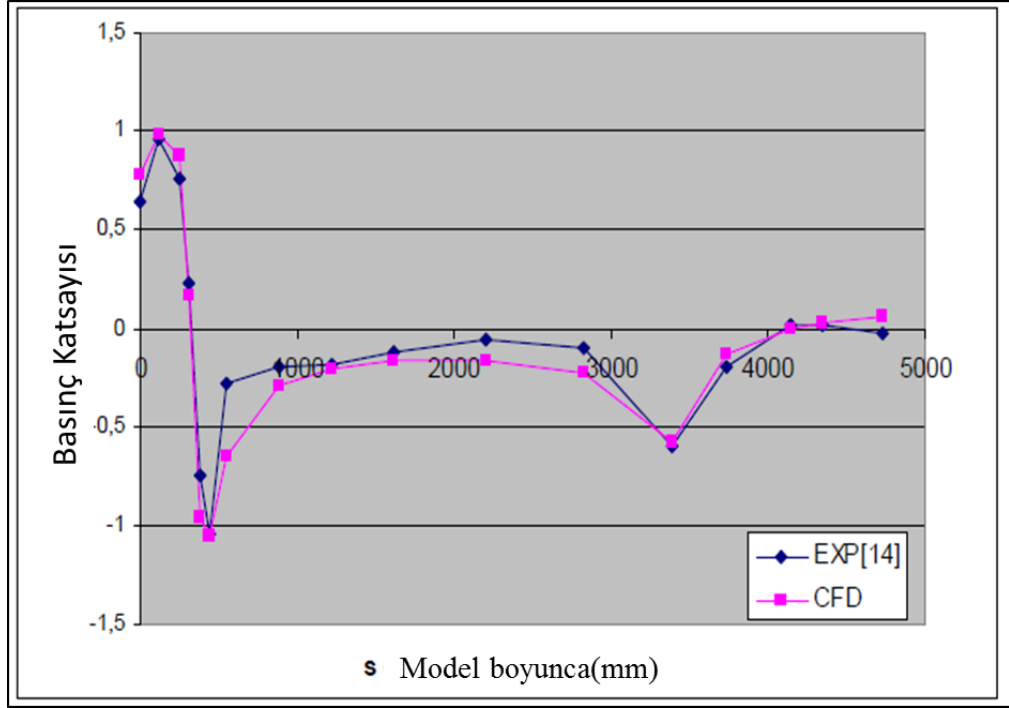
Aerodinamik testlerde kullanılan diğer bir standart model de 1999 senesi MIRA (Motor Industry Reserach Association-UK) tarafından geliştirilen modeldir. Şekil 2.9 da MIRA referans modeli ve boyutları verilmiştir. Model %5.3 blokaj oranı ile 27.7 m/s hızda hava tüneline $\beta: 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ yanıl açılarda test edilmiş ve Çizelge 2.2 de görülen sonuçlar bulunmuştur (Templin ve Raimondo, 1986). Şekil 2.10 da Mira modeli simetri eksenini üzerindeki C_p dağılımını CFD sonuçlarıyla kıyaslamalı olarak görülmektedir.



Şekil 2.9 Referans MIRA 1:1 ölçekli model boyutları (Good ve Garry, 2004)

Çizelge 2.2 Mira modeli aerodinamik katsayıları (Templin ve Raimondo, 1986)

Yanal açı	C_D	C_L	C_Y	C_{MY}	C_{MZ}
0°	0,295	0,014	0,001	-0,019	0,001
5°	0,325	0,034	0,265	0,017	0,051
10°	0,380	0,093	0,534	0,080	0,097



Şekil 2.10 Mira modeli simetri eksenini üzerinde C_p dağılımını karşılaştırması (Templin ve Raimondo, 1986)

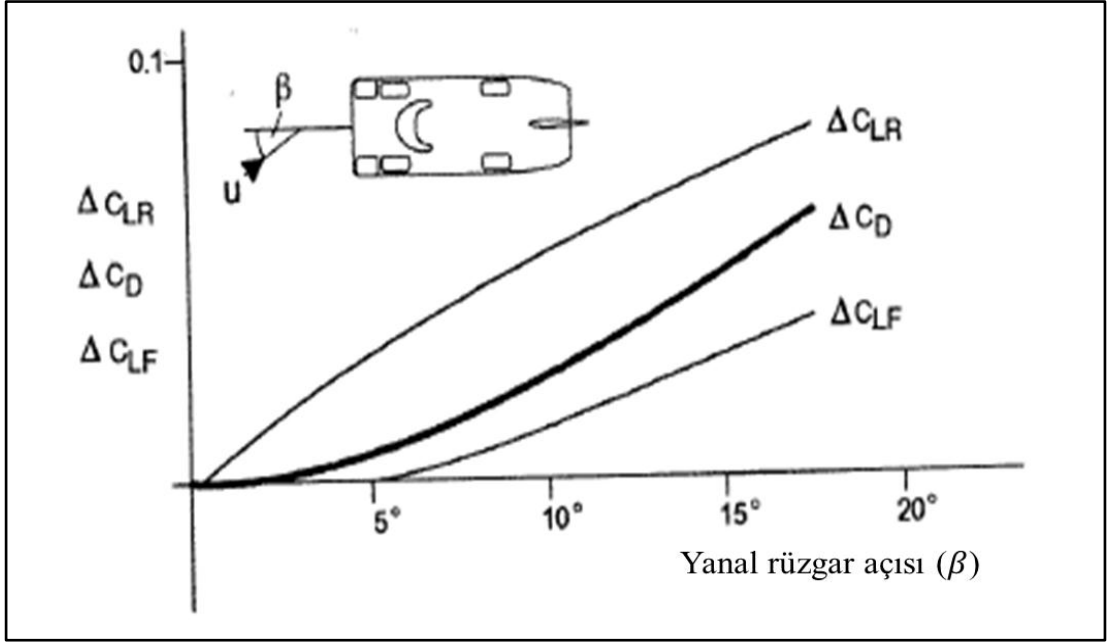
β : 5° yanal rüzgar açısında C_d değeri %10.1 artış gösterirken $\beta = 10^\circ$ yanal açıda %28.8 artış göstermiştir.

2.2. Yanal Rüzgar C_d Etkileşimi

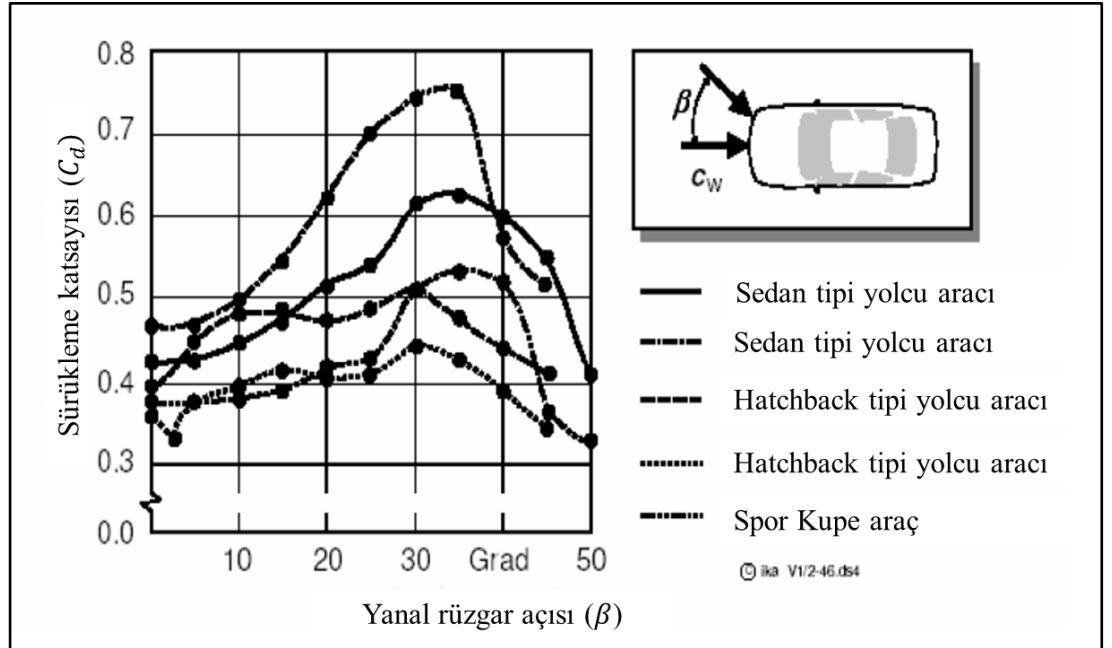
Yanal rüzgar açısı (β) durumunda araç, model C_d ve C_l değerleri etkilenmektedir. C_d değerleri artış gösterirken negatif C_l değerleri azalmaktadır (Şekil 2.11) (Hugho, 1998).

Şekil 2.12 de değişik araç modellerinin değişik β yanal rüzgar açılarındaki C_d değişimleri gösterilmiştir. Genel olarak binek tipi araçlarda $\beta = 30^\circ - 35^\circ$ yanal açı değerine kadar C_d değerleri artmakta ve bu açıdan sonra düşüşe geçtiği görülmektedir (BOSCH, 2002) (Mezarcıöz, 2006).

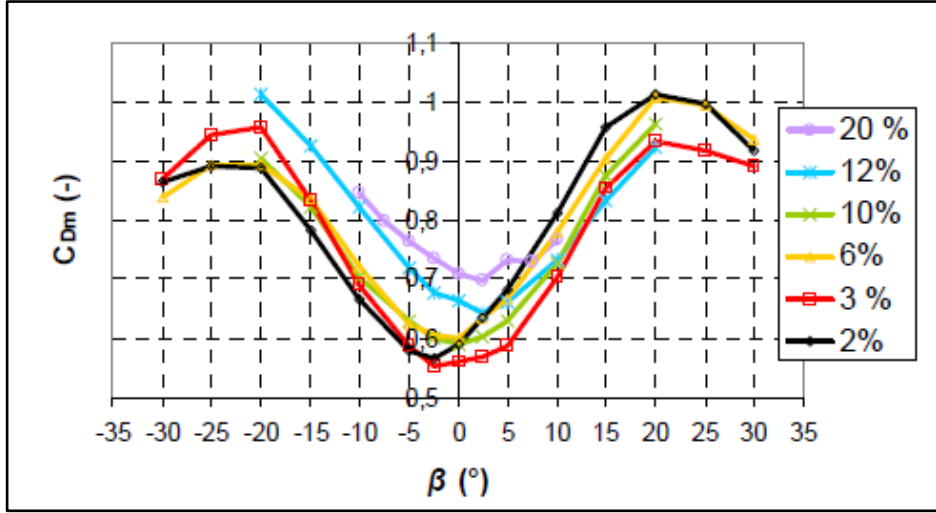
Kohut, Sulitka, Randa (2005), çalışmalarında dikdörtgenel araç modeli üzerinde değişik blokaj oranlarında ve β yanal rüzgar açılarındaki C_d değerlerine etkilerini incelemişler (Şekil 2.13) ve $\beta:20^\circ$ ye kadar C_d değerleri artarken $\beta: 25^\circ$ ve sonrası C_d değerinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 2.11 Yanal rüzgar açısının C_d ve C_l e etkisi (Hugho, 1998)

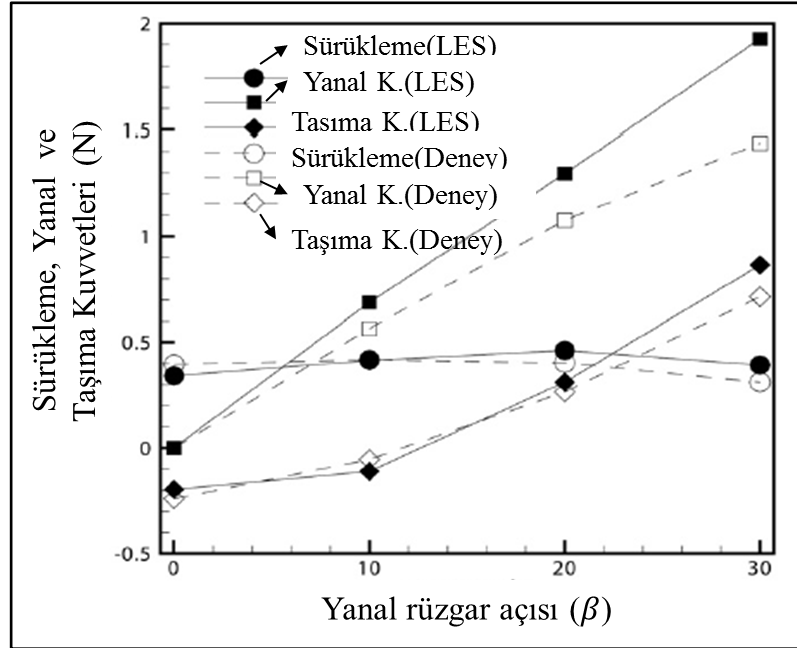


Şekil 2.12 Değişik araçlarda C_d , β yanarüzgar açısı etkileşimi (BOSCH 2002)

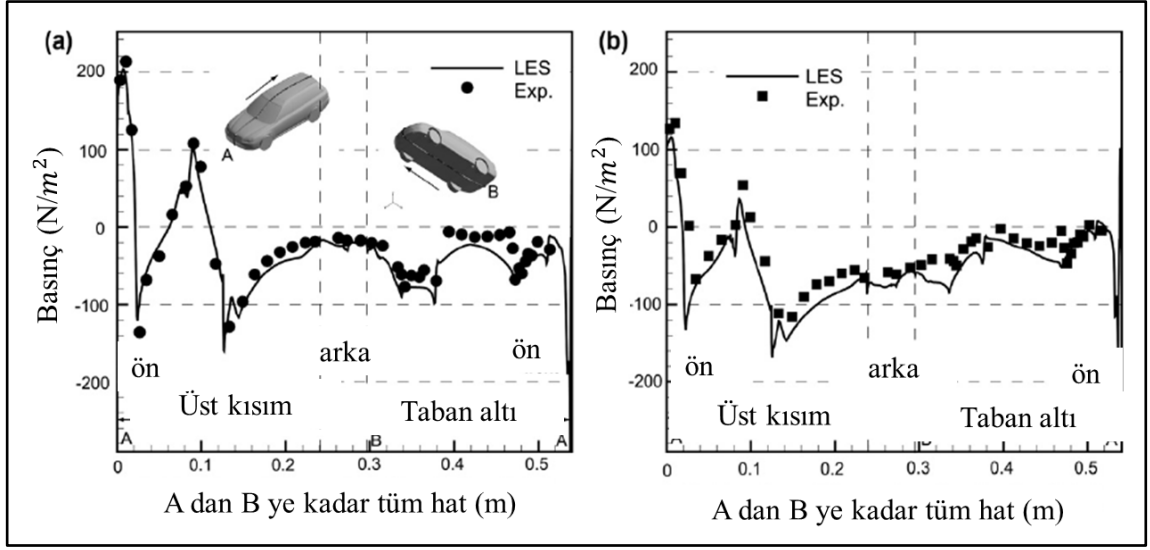


Şekil 2.13 Dikdörtgenel aracın değişik blokaj ve β yanal açılarında C_d etkileşimi (Kohut ve ark., 2005)

Tsubokura ve ark., (2010), 1:20 ölçekli araç modeli üzerinde yanal rüzgar etkilerini hem sayısal hem de deneysel olarak incelemiştir. Şekil 2.14 de C_d , β yanal sapma açısı ilişkisi görülmektedir. Maksimum C_d değeri $\beta = 20^\circ$ de elde edilmiştir. Bu değerden sonra C_d değerinin düştüğü görülmektedir. Şekil 2.15 de ise $\beta = 0^\circ$ ve $\beta = 30^\circ$ yanal açılarda araç üzerindeki basınç dağılımları görülmektedir.

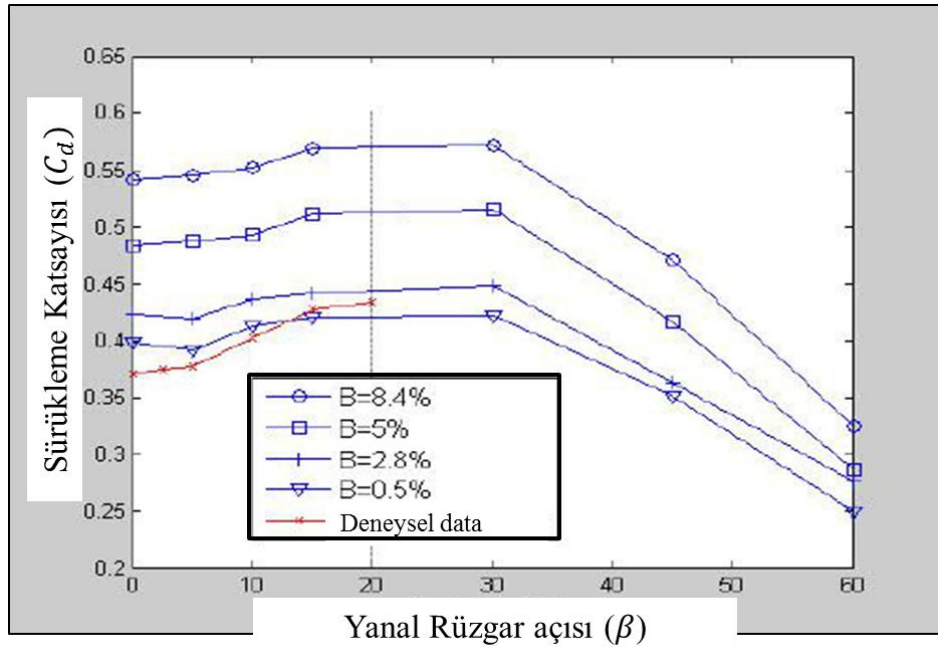


Şekil 2.14 Yanal Rüzgar açısı β , C_d , C_l ilişkisi (Tsubokura ve ark., 2010)



Şekil 2.15 (a) $\beta:0^\circ$ ve (b) $\beta:30^\circ$ de simetri eksenini basınç dağılımları (Tsubokura ve ark., 2010)

Tan ve ark., (2010), CFD analizi ile SUV araç üzerinde yanal rüzgar durumundaki aerodinamik analizleri incelemişlerdir. Analizler %0.5 - %8.4 tünel blokaj oranları arasında gerçekleştirilmiştir. C_d değerleri $\beta = 30^\circ$ dereceye kadar artış gösterirken $\beta = 30^\circ$ dereceden sonra da azalmaya başlamıştır (Şekil 2.16).

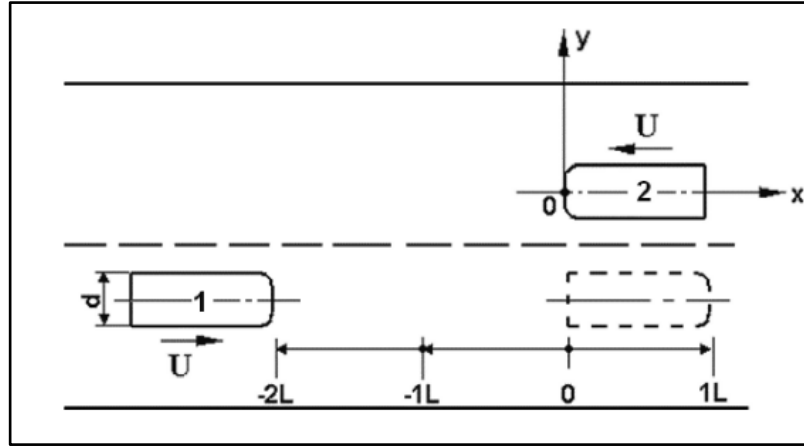


Şekil 2.16 SUV araç üzerinde yanal rüzgar açısının C_d ye etkisi (Tan ve ark., 2010)

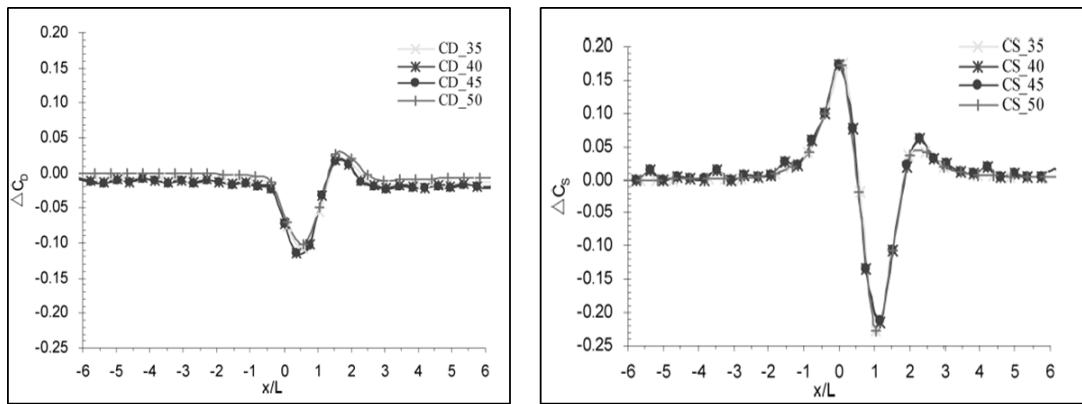
Bu sonuçlardan da görüleceği üzere model tipine bağlı olarak maksimum C_d değerinin elde edildiği β açısı değişkenlik göstermekle birlikte 20° ile 35° değerleri arasında görülmektedir.

2.3 Birbirini Yakın Takip Eden Araç Etkileşimleri

Hu ve ark., (2007) birbirini karşılıklı olarak geçmeye çalışan iki Ahmed modelini sayısal CFD Star-CD yazılımıyla hareketli ağ(mesh) kullanarak incelemiştir. Akış alanının kompleks türbülanslı akım olması nedeniyle Standard $K-\varepsilon$ metodunu kullanmışlardır. Modellerin konumları Şekil 2.17 de verilmiştir. Modellerin konumlarına göre C_d ve yanal yük değişimi Şekil 2.18 de verilmiştir.



Şekil 2.17 İki Ahmed Modelin birbirine göre konumları (Hu ve ark., 2007)

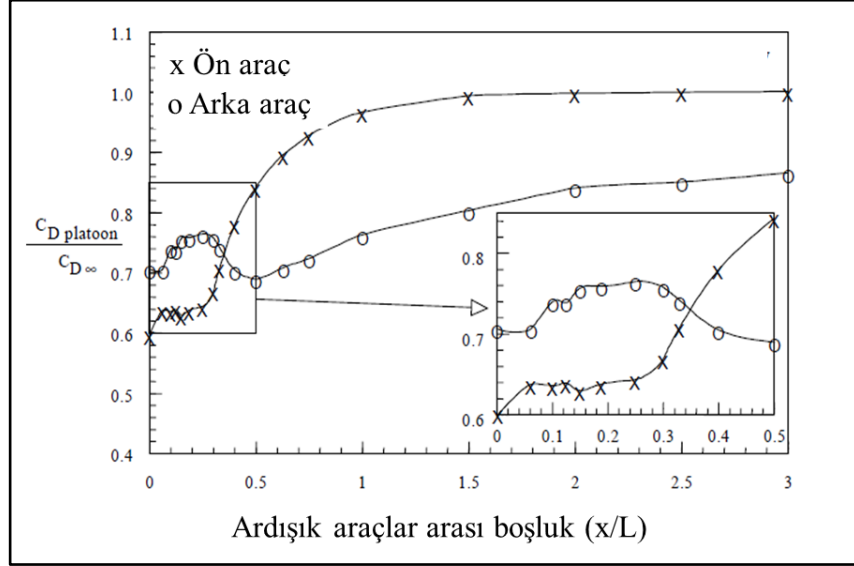


a) C_d değişimi

b) Yanal yük değişimi

Şekil 2.18 Model pozisyonlarına göre yanal yük ve C_d değişimi (Hu ve ark., 2007)

Zabat ve ark., (1995), 1/8 ölçekli birbirini ardışık takip eden iki adet minivan modeli yaklaşık $Re = 10^6$ deneysel olarak test etmişler ve araçların konumuna göre C_d ilişkisini Şekil 2.19 daki gibi bulmuşlardır. Şekilden de görüleceği üzere özellikle $x/L = 0 - 1$ değerleri arasında C_d değerlerinde düşüş görülmektedir.

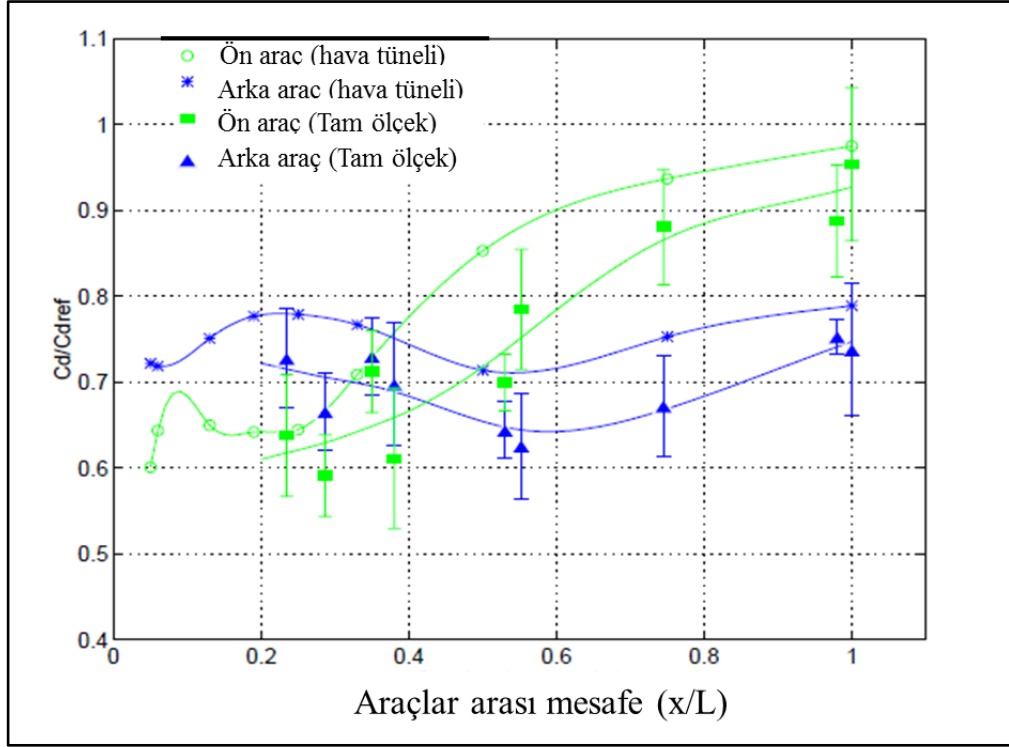


Şekil 2.19 Ara mesafesine göre iki minivan araç C_d etkileşimi (Zabat ve ark., 1985)

Hong ve ark., (1998) ise üstteki benzer çalışmayı birbirini yakın takip eden iki tam ölçekli Ford Windstar van modeli ile çölde tekrarlamışlardır. İki model birbirine bar ile bağlanmış ve modeller arası mesafe $0.2 L - L$ olacak şekilde testler gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.20). Ölçülen C_d değerleri Zabat ve ark., (1995) tarafından gerçekleştirilen 1:8 ölçekli model tünel testleriyle kıyaslanmış ve paralel sonuçlar bulunmuştur (Şekil 2.21)

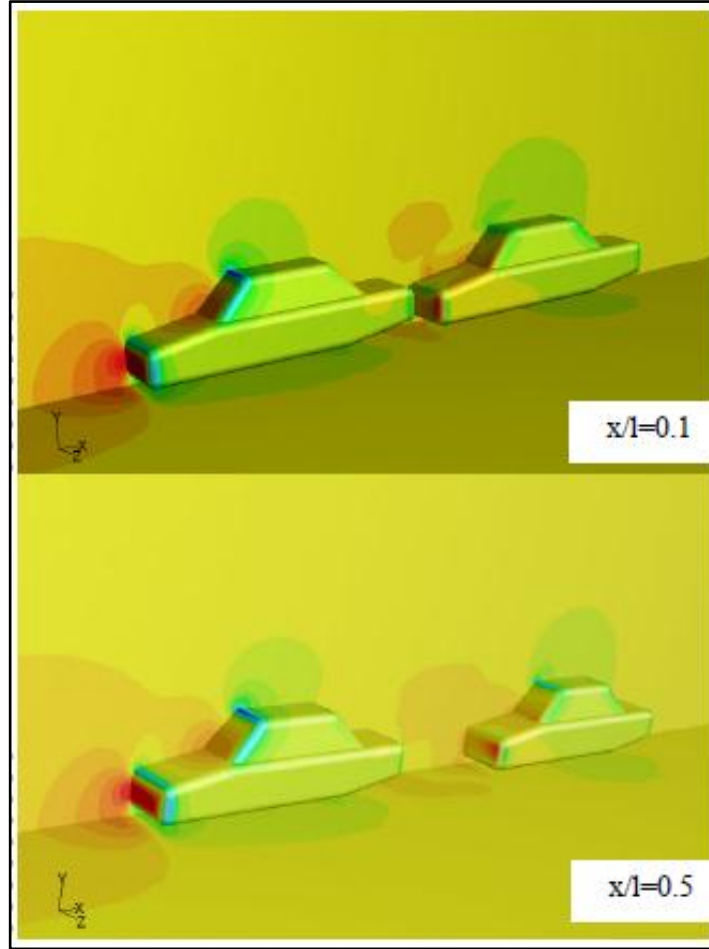


Şekil 2.20 İki ardışık Ford Windstar C_d etkileşim testi (Hong ve ark., 1998)



Şekil 2.21 1:1 ve 1:8 ölçekli ardışık iki araç (C_d) kıyaslaması (Hong ve ark., 1998)

Şekil 2.22 de birbirini yakın takip eden iki adet MIRA standard modeli görülmektedir (Örselli 2006). Çalışmada $x/L = 0$ ve 0.5 pozisyonları deneysel ve sayısal olarak analiz edilmiş ve Çizelge 2.3 te görülen C_d değerleri elde edilmiştir. Deneysel ve CFD sonuçları arkadaki araç için bir miktar farklılaşmıştır. CFD sonuçlarında öndeki aracın C_d değerleri belirgin bir şekilde düşerken, arkadaki araçta özellikle $x/L = 0.5$ pozisyonunda C_d artışı oluşmuştur. Bu durum deneysel sonuçlarda böyle değildir. Deneysel sonuçlarda hem öndeki araçta hem de arkadaki araçta %20 civarında C_d düşüşü görülmüştür.



Şekil 2.22 Birbirini yakın takip eden iki MIRA modeli (Örselli, 2006)

Çizelge 2.3 İki adet yakın takip eden MIRA modeli C_d oranları (Örselli, 2006)

x/l	C_{Dref1}		C_{Dref2}		$C_{Dref1} / C_{D\infty}$		$C_{Dref2} / C_{D\infty}$	
	EXP	CFD	EXP	CFD	EXP	CFD	EXP	CFD
0.1	0.250	0.212	0.236	0.246	0.76	0.82	0.71	0.95
0.5	0.290	0.214	0.269	0.289	0.88	0.83	0.81	1.12
$C_{D\infty}=0.259$								

2.4 Sayısal (CFD) Analizleri

Son yıllarda sayısal analizler, deneysel sonuçlarla çok yakın sonuçlar vermesi, deneysel çalışmaların uzun ve maliyetli olması nedenleriyle özellikle deneysel çalışmalarını da yönlendirmesi açısından tercih edilmektedir. Sayısal çalışmalar C_d optimizasyon

çalışmalarında da hızlı sonuç vermesi açısından yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu durum bir sonraki bölümde anlatılacaktır (bkz. 2.5 C_d iyileştirme çalışmaları).

Han (1989), zemine yakın küt gövdeli taşıtların SAD (Sayısal Akışkanlar Dinamiği) esaslı aerodinamik direncini belirleyen ilk araştırmacılardan birisidir. Han, sıkıştırılmaz Reynolds ortalama Navier – Stokes metodunu K-ε türbülans modeli ile birlikte Ahmed tipi taşıt gövdeleri etrafındaki akışı simule etmek için kullanmıştır.

Han ve ark. (1996), üç farklı konfigürasyondaki (kare arka yüzeyli, uzun eğimli arka yüzeyli ve kısa eğimli arka yüzeyli) otomobil için iki denklemlilik türbülans modellerinden Standart K-ε ve RNG K-ε kullanarak C_d direnç katsayılarını belirlemiş ve RNG modeli ile deneysel çözümlerin daha uyumlu olduğunu göstermiştir.

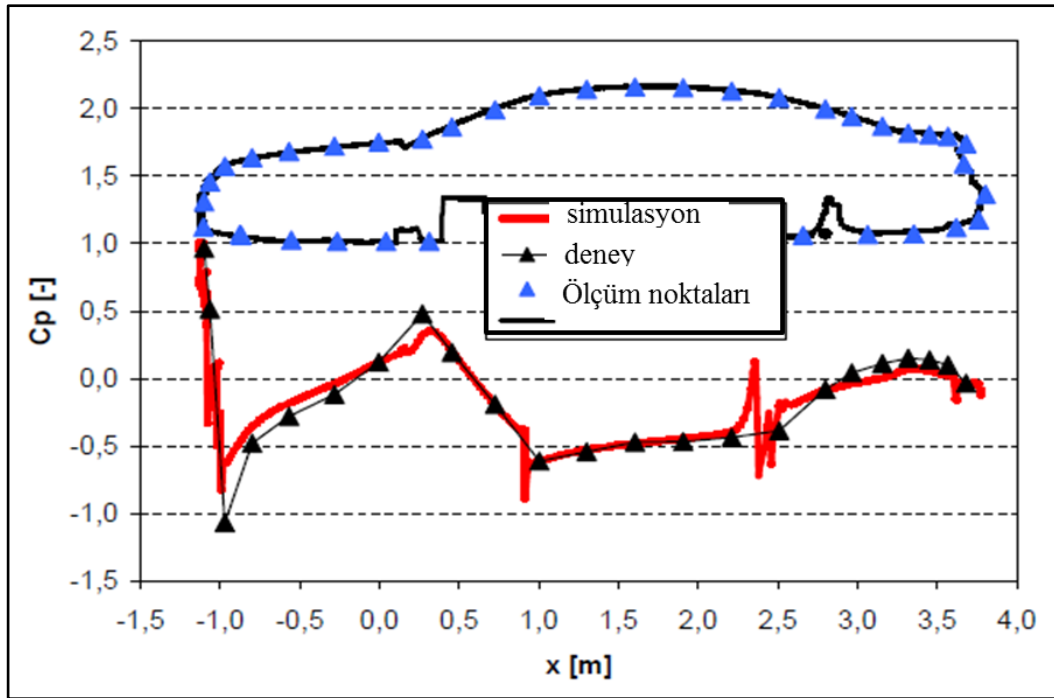
Sayısal analizlerde çözüm alanındaki mesh yoğunluğunu çok önem kazanmaktadır. Ramnefors ve ark. (1996), Volvo ECC model taşıtta Standart K-ε ve RSM türbülans modelleri kullanarak basınç ve direnç belirleme çalışması yapmışlardır. Köşelerde, spoiler ucunda, motor kaput önünde ve tavanın önü ile arkasında yüksek hatalar tespit etmişlerdir. Çözüm ağının yoğunluğunun direnç ile ilgili hata miktarını etkilediğini ifade etmişlerdir. Kalıntıların 10^{-4} - 10^{-5} aralığında olmasının çözümün yakınsaması için yeterli olabileceğini belirtmişlerdir.

Borg ve ark.(2003), karayolu taşıtlarının aerodinamik katsayılarını belirlemek için türbülans modellerin duvar yakın (near wall) formülasyonlarının etkilerini belirlemişlerdir. Zaman ortalama kararlı RANS metodlarının en az hesaplama zamanı alan metodlar olduğunu LES metodunun hesaplama zamanının çok daha fazla olduğunu ifade etmişlerdir. Otomotiv endüstrisinde dış akış hesaplamaları için SAD’nde günümüzün en yaygın yaklaşımının yüksek Reynolds sayısı türbülans modelleri kullanmak olduğunu belirtmişlerdir. Diskretizasyon şekilleri olarak hem birinci derece hem ikinci derece kullanılarak etkileri kaba ve yoğun çözüm ağlarında incelenmiştir.

Islam ve ark. (2009), Volkswagen Grup Audi, Volkswagen ve SEAT tarafından yaygın olarak kullanılan open-FOAM® CFD yazılımıyla DES (Detached Eddy Simulation) metoduyla deneysel C_d ve C_p değerlerine paralel çok yakın değerler elde etmişlerdir (Çizelge 2.4), (Şekil 2.23).

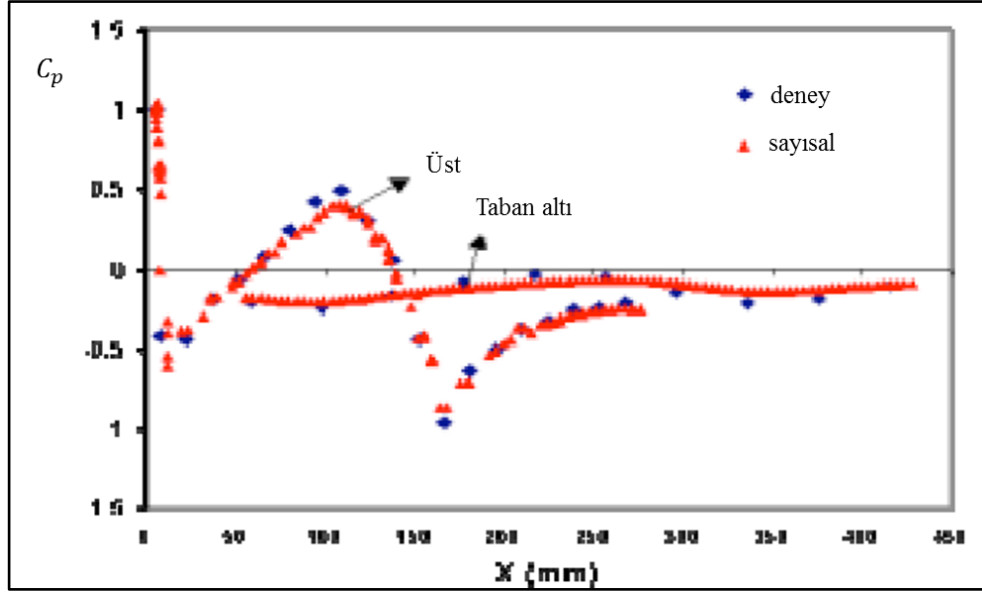
Çizelge 2.4 CFD ve deneysel aerodinamik katsayıların kıyaslaması (İslam ve ark., 2009)

	Δc_D [-]	Δc_{L_f} [-]	Δc_{L_r} [-]
SEAT Ibiza	0.018	-0.017	0.045
SEAT Leon	0.021	-0.005	0.030
VW Golf	0.003	0.034	0.024
VW Passat	0.011	-0.033	0.035
VW New Beetle	0.016	0.001	0.030
Audi A3	0.007	-0.018	0.034
Audi A5	0.011	-0.036	0.031
Audi A6	-0.004	0.002	0.026
Audi Q5	-0.001	-0.006	0.047
Audi TT	-0.001	-0.006	0.051
Audi R8	0.022	0.021	-0.012



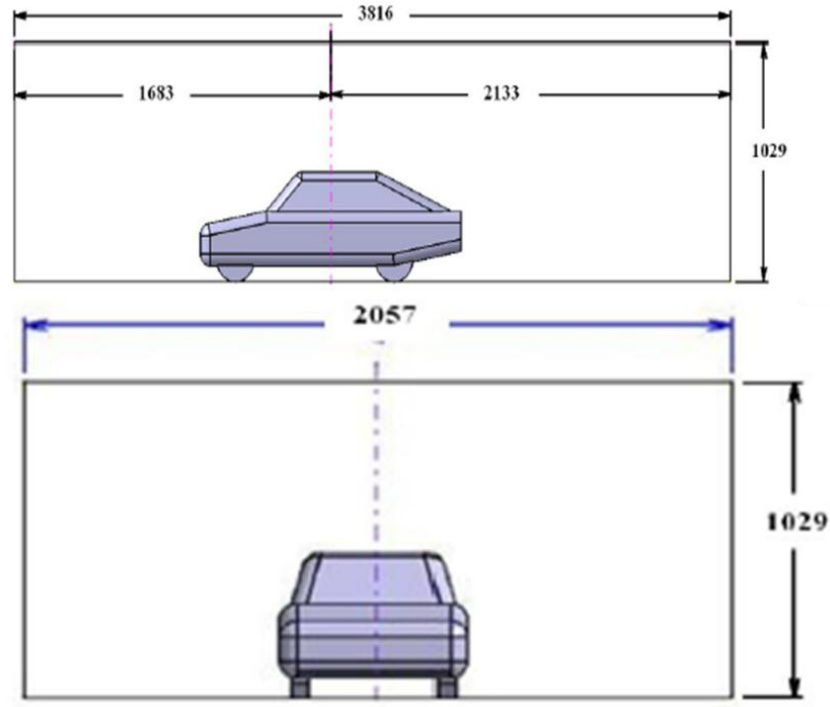
Şekil 2.23 Deneysel ve CFD analizi Cp dağılımları kıyaslaması (İslam ve ark., 2009)

Jindal ve ark.(2005), IB-RANS CFD metodunu kullanarak SUV ve Pikap modelleri üzerinde aerodinamik analizleri gerçekleştirmişler ve C_d değerlerini %6 seviyesinde hatayla belirleyebilmişlerdir. C_p değerleri sayısal ve deneysel kıyaslaması Şekil 2.24 te verilmiştir.



Şekil 2.24 Pikap modeli simetri eksenini boyunca C_p kıyaslaması (Jindal ve ark., 2005)

Ahmad ve ark. (2010), Star-CCM+ yazılımıyla, ağ(mesh) optimizasyonu kullanarak standart MIRA modeli (Şekil 2.25) üzerinde C_d analizleri gerçekleştirmişler ve hava tüneli testlerinde bulunan C_d değerlerini maksimum %4 hata oranıyla tahmin edebilmişlerdir (Çizelge 2.5).

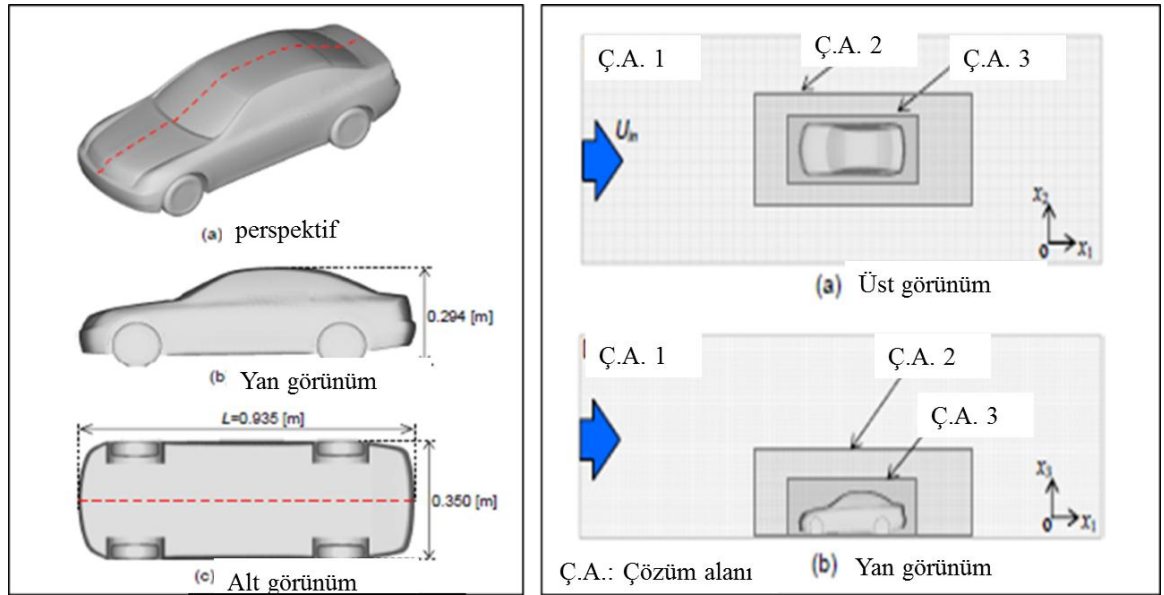


Şekil 2.25. MIRA modeli ve çözüm alanı boyutları (mm) (Ahmad ve ark., 2010)

Çizelge 2.5 MIRA modeli deneysel ve CFD kıyaslaması (Ahmad ve ark., 2010)

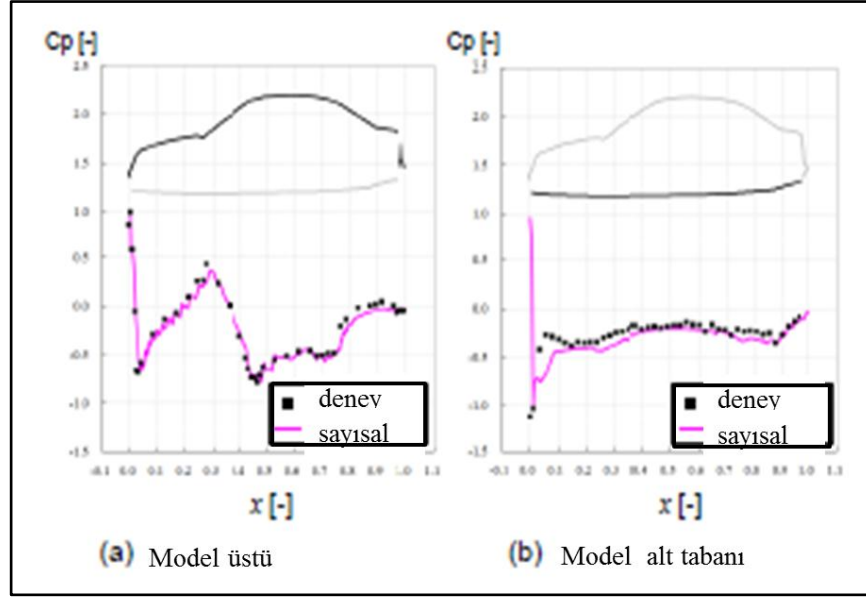
Ölçek	Araç Boyu (mm)	Ağ(mesh) Boyutu = %3.6 x araç Boyu (mm)	Araç yüzeyi ağ boyutu(% araç boyu)	MIRA C_d data	CFD C_d data	% FARK
1:3	1388	50	0.36%	0.3208	0.3215	0.23%
1:4	1041	37.5	0.21%	0.2706	0.2812	3.91%
1:5	833	30	0.18%	0.2653	0.2675	0.83%

Akasaka ve Ono (2010), 1:5 model üzerinde LES (Large Eddy Simulation) ile CFD analizlerini gerçekleştirmişler (Şekil 2.26).



Şekil 2.26. 1:5 araç modeli ve sayısal analiz grid yüzeyleri (Akasaka ve Ono, 2010)

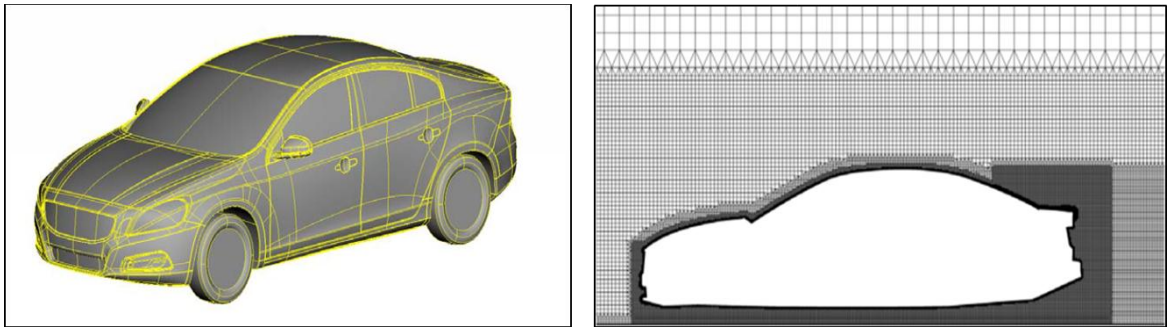
CFD ve deneysel C_p dağılımları birbirleriyle uyumlu olup aralarında paralellik görülmüştür (Şekil 2.27).



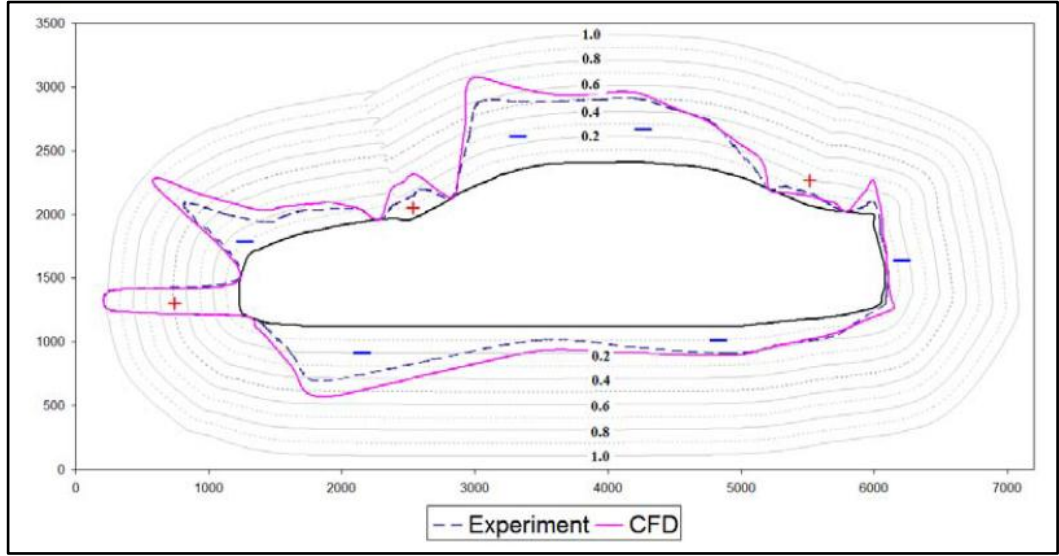
Şekil 2.27 1:5 model deneysel ve CFD C_p dağılımları (Akasaka ve Ono, 2010)

Youngling ve ark., (2000), MSC.Patran SW ile 1:4 araç modeli aerodinamik analizinde tetrahedron hücreler kullanılarak MSC CFD duvar fonksiyonları kullanılmış ve $U_\infty = 30$ m/s hızda I_u : %1 (türbülans şiddeti) değerinde %4.7 hata oranıyla $C_d = 0.347$ bulunmuştur (hava tüneli sonucu $C_d = 0.364$).

Olander, (2012), Volvo marka araçlar (S60, S80) (Şekil 2.28) üzerinde yaptığı CFD analizinde, düzeltilmiş(Realizable) K- ϵ türbülans modeli kullanılmış bulunan C_d ve C_p değerlerini gerçek tünel test sonuçlarıyla kıyaslamıştır. S60 modelinde $C_{d_cfd} : 0.266$, $C_{d_tünel} : 0.241$, S80 modelinde ise $C_{d_cfd} : 0.279$, $C_{d_deneysel} : 0.308$ bulunmuştur. Hata oranları %10 seviyesindedir. S80 modeli üzerinde simetri eksenini boyunca C_p dağılımı Şekil 2.29 de deneysel sonuçlarla kıyaslamalı olarak verilmiştir.



Şekil 2.28. Volvo S60 Model ve simetri eksenini ağ(mesh) yoğunluğu (Olander, 2012)



Şekil 2.29 Volvo S80 modeli simetri ekseninde C_p dağılımı (Olander, 2012)

2.5 C_d Optimizasyon Çalışmaları

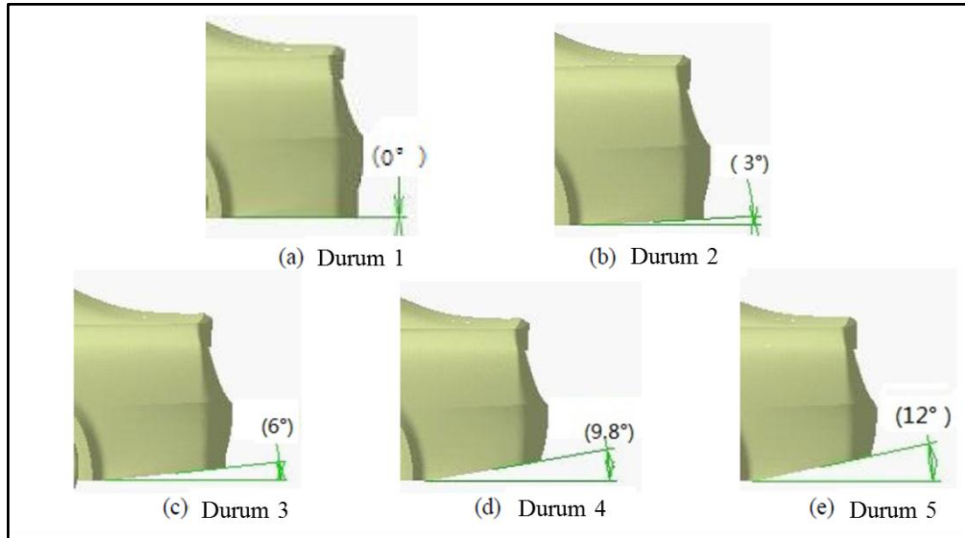
Geçmişte yolcu araçlarının dış şekilleri genel olarak emniyet, konfor, estetik sebeplerle değişikliklere uğramaktaydı. 70 li yıllardaki petrol krizi nedeniyle yakıt sarfiyatıyla olan direk ilişkisi nedeniyle sürüklenme katsayısı (C_d) iyileştirme çalışmaları otomotiv tasarımcılarının ilgi odağı olmaya başlamıştır. Son yıllara kadar çözümün kompleksliği ve maliyetli olması nedeniyle sayısal analizler yeterince tercih edilmemekte ve kullanılmamaktaydı.

Gerçek araç üzerindeki C_d dağılımına araç bölgelerinin etkisi Çizelge 2.6 da örnek olarak görülmektedir.

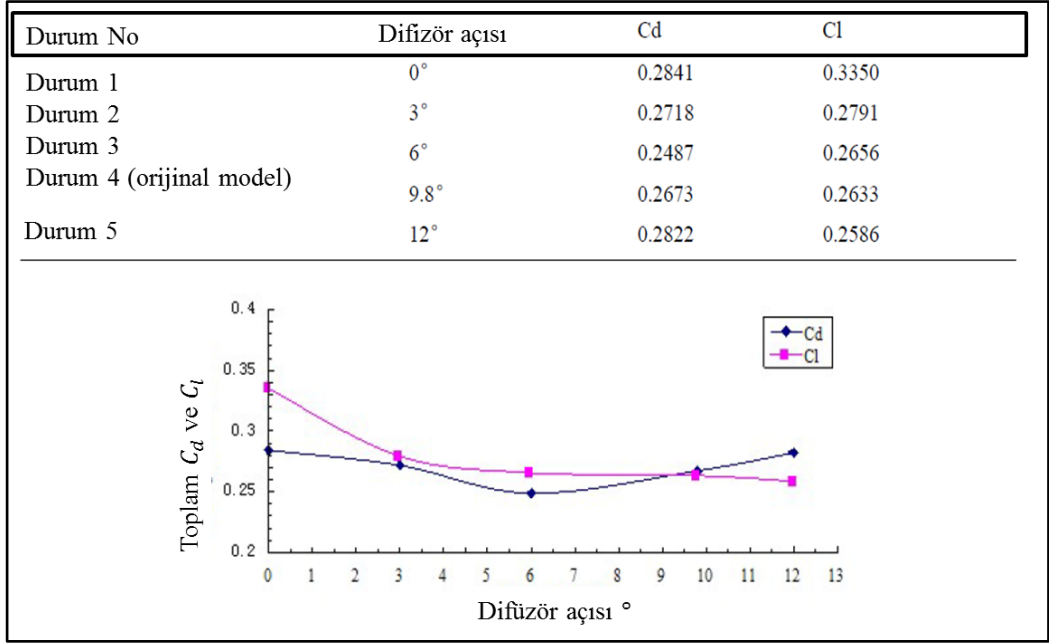
Çizelge 2.6 Araç pozisyonlarının toplam C_d üzerindeki payları

Pozisyon	%Cd
Üst Yüzey	40
Alt Kısım	30
Tekerlekler	15
Soğutma Sistemi	10
Diğer	5

Hu ve ark., (2011), sedan tipi bir araç üzerinde taban alt arka kısımda uygulanabilecek ilave difüzör açısının C_d ye olan etkisini incelemişlerdir. Difüzör açıları α : $0^\circ, 3^\circ, 6^\circ, 9.8^\circ, 12^\circ$ çalışılmıştır (Şekil 2.30). Gerçek araçta α : 9.8° seviyesindedir. Sonuç olarak difüzör açısı arttıkça taban altında aerodinamik yapı, basınçlar belirgin bir şekilde değişmektedir. α artarken C_d düşmekte fakat 6° den sonra tekrar yükselişe geçtiği görülmektedir (Şekil 2.31).

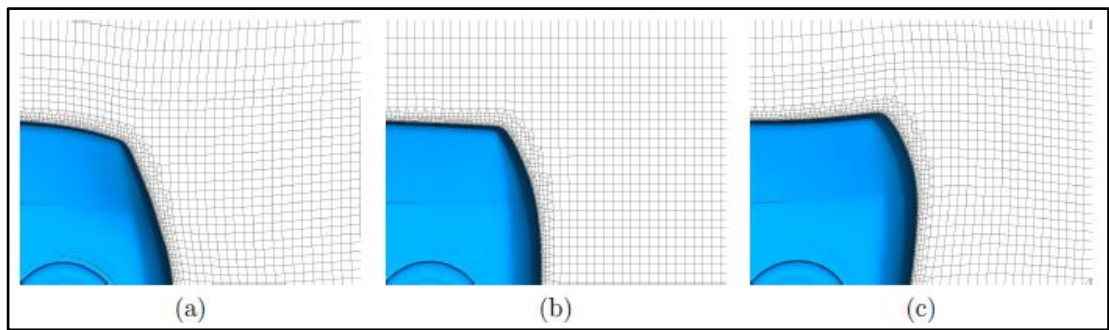


Şekil 2.30 Değişik açılarda taban altı arka kısım difüzör açıları (Hu ve ark., 2011)

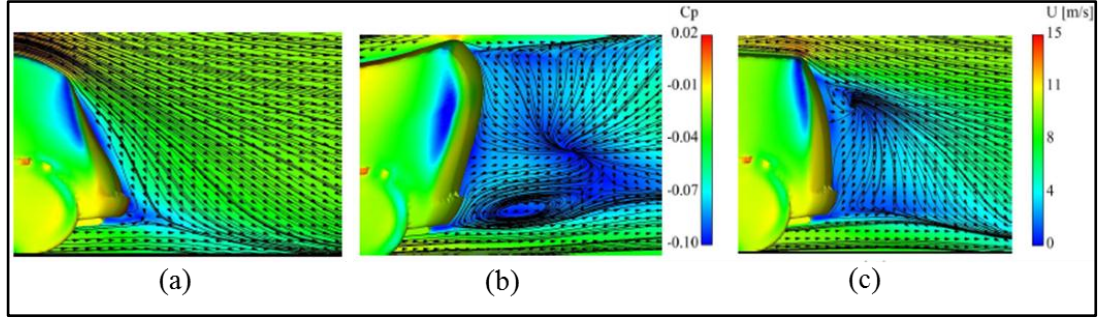


Şekil 2.31 Sedan tipi araçta arka difüzör açısının C_d ve C_l e etkisi (Hu ve ark., 2011)

Helgason ve Hafsteinsson, (2009), otomatik araç şekil optimizasyonunun aerodinamik katsayılar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. 1:1 model Volvo aracı CFD olarak modellemiş (Şekil 2.32), optimum C_d değerini orijinal araçta da olduğu gibi (Şekil 2.33) te elde edebilmiştir. Bulunan C_d değeri deneysel sonuçlarla da %5 hata ile uyumlu bulunmuştur (C_d :0.353 - CFD, 0.335 deneysel).

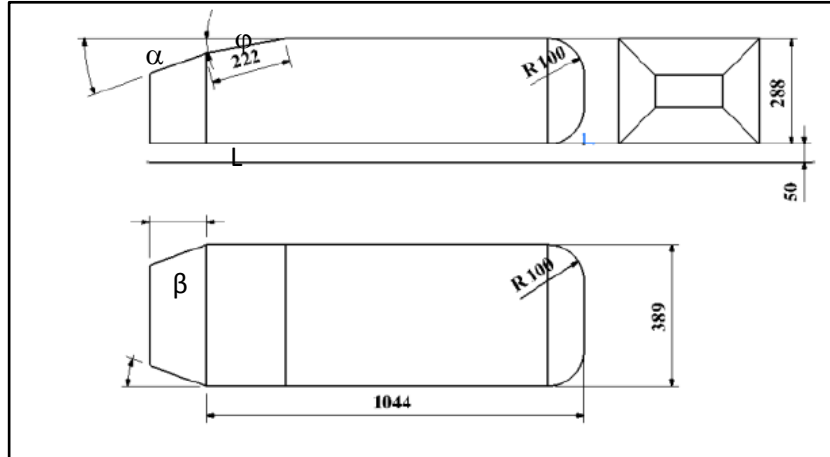


Şekil 2.32 (a) araç arka kısım sıkıştırılmış, (b) mevcut orijinal aracın arka kısmı (c) arka kısım çekilerek uzatılmış modeller (Helgason ve Hafsteinsson, 2009)



Şekil 2.33 (a) (b) (c) durumlarına göre araç arkasındaki akım karakteristikleri (Helgason ve Hafsteinsson, 2009)

Beigmoradi, Ramezani (2012), Ahmed modeli üzerinde geliştirme yapıp arka kısmına kuyruk ilave etmişler ve Taguchi metodu kullanarak $\varphi : 5^\circ-25^\circ$, $\alpha : 0^\circ-20^\circ$, $\beta : 0^\circ - 20^\circ$ açıları arasında ve L: 80 mm – 400 mm arasında testler gerçekleştirmişlerdir (**Şekil 2.34**).



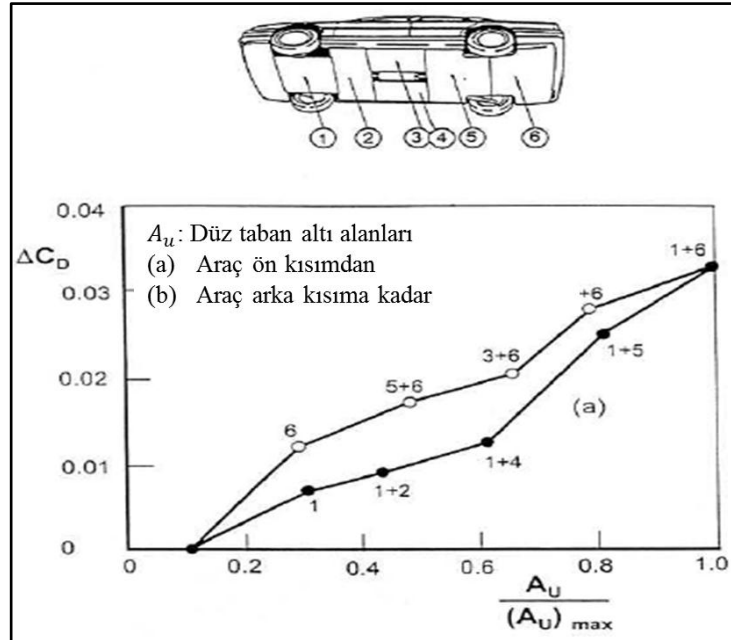
Şekil 2.34 Uzatılmış Ahmed Modeli (mm) (Beigmoradi, ve Ramezani, 2012)

Optimum parametre değerleri ve C_d **Çizelge 2.7** de gösterildiği gibi bulunmuştur.

Çizelge 2.7 Uzatılmış Ahmed modeli optimum parametreler ve C_d değerleri
(Beigmoradi, ve Ramezani, 2012)

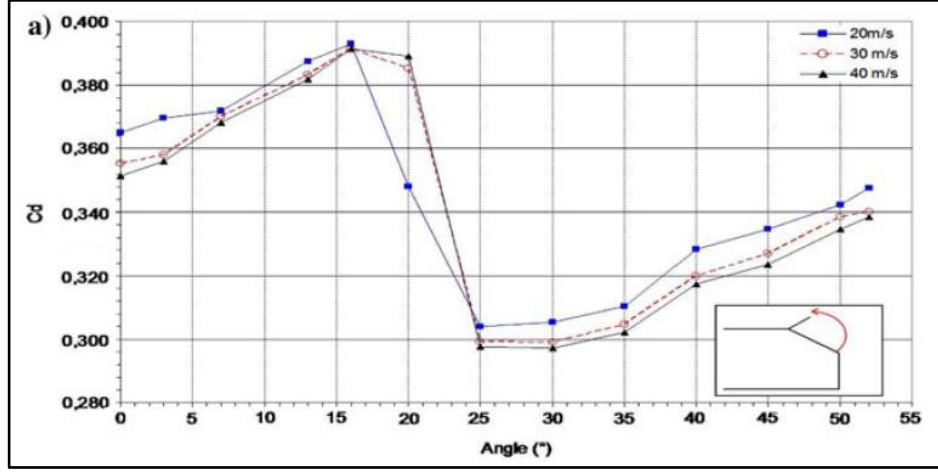
Parametre	Optimum değer
arka açısı (derece)	5
Arka kutu boyu (mm)	400
Arka kutu açısı (derece)	15
Arka kuyruk açısı (derece)	20
Taguchi metodu ile C_d	0.124
Simulasyon metodu ile C_d	0.132
Taguchi ve Simulasyon metodu ile C_d farkı	6%

Ahmed (1999), araç taban altının pürüzsüz, düzgün olması durumunun C_d ye olan etkisini incelemiş ve taban altının tamamıyla düzgün bir şekilde kapalı olması durumunun yaklaşık $\Delta C_d : 0.033$ puan iyileştirme sağladığını tespit etmiştir (Şekil 2.35).



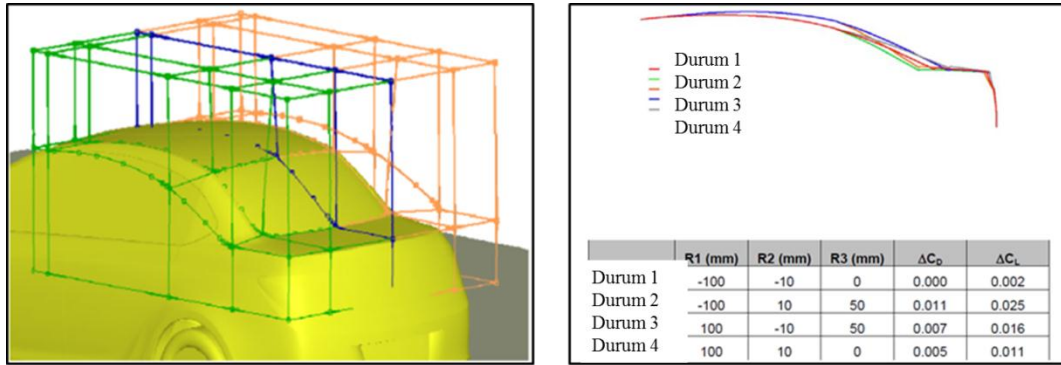
Şekil 2.35 Taban altının kapalı, pürüzsüz olmasının C_d ye etkisi (Ahmed, 1999)

Beaudoin ve Aider (2008), üç boyutlu Ahmed modeli üzerinde flap açısının C_d ye olan etkisini incelemişler ve $\alpha : 25^\circ$ de optimum C_d değerini elde etmişlerdir (Şekil 2.36).



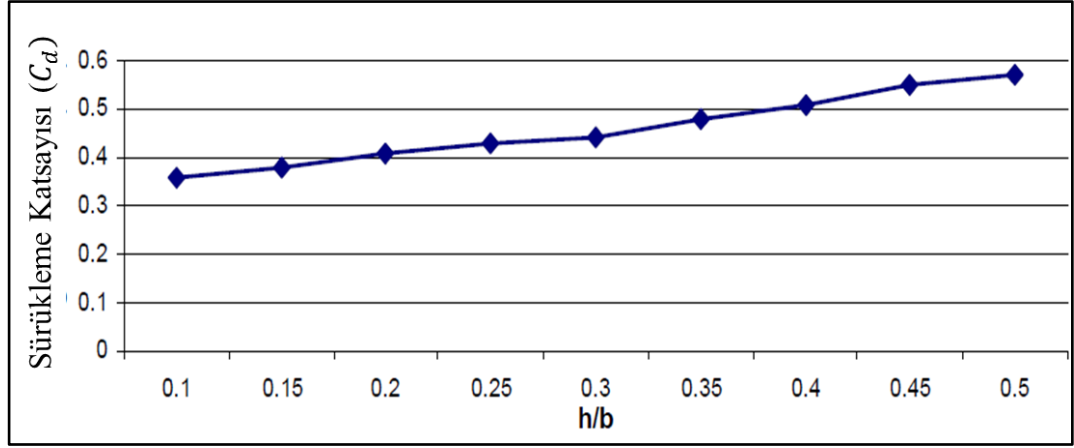
Şekil 2.36 Ahmed Modeli arka flap açısının C_d etkileşimi (Beaudoin ve Aider, 2008)

Peddiraju ve ark., (2009), CAE SW ve ANSA kullanarak araç arka bölgesindeki yüzeyler üzerinde oynayarak (Şekil 2.37) C_d ye olan etkiyi analiz etmişlerdir.



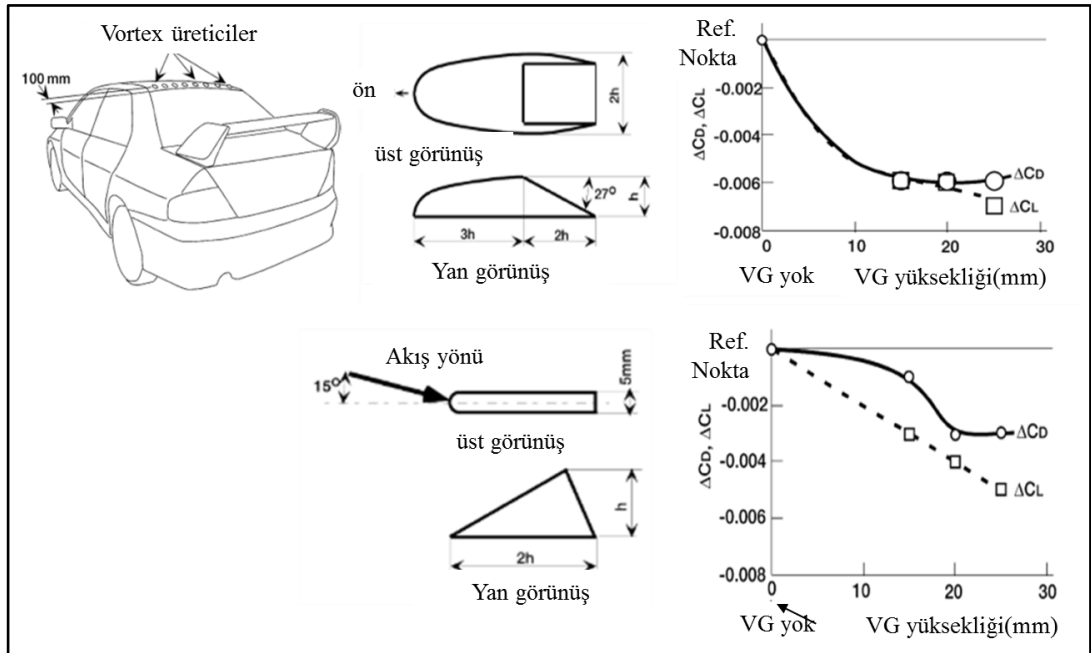
Şekil 2.37 Araç arka stil optimizasyonu C_d etkileşimi (Peddiraju ve ark., 2009)

Mitra (2010), araç tabanının yerden yüksekliğinin (h) aks aralığı (b) mesafesine oranının (h/b) C_d ye olan etkisini incelemiştir. Şekil 2.38 de görüldüğü gibi h/b oranı arttıkça C_d değeri de artmaktadır. Özellikle yarış araçlarında araç tabanının yere olabildiğince yakın yapılmasının en önemli sebebi budur.



Şekil 2.38 Araç yerden yüksekliğinin C_d ye etkisi (Mitra, 2010)

C_d iyileştirme metodlarından birisi de araç arka kısmında VG (Vortex Üretici) kullanımıdır. Koike ve ark. (2004), tavan arka kısmına yakın bölgede değişik atak açılarında VG kullanarak C_d ye olan etkiyi incelemişlerdir (Şekil 2.39). Sonuçlar CFD (Star-CD Rk- ϵ) analiz sonuçlarıyla kıyaslanmış ve paralel sonuçlar bulunmuştur.

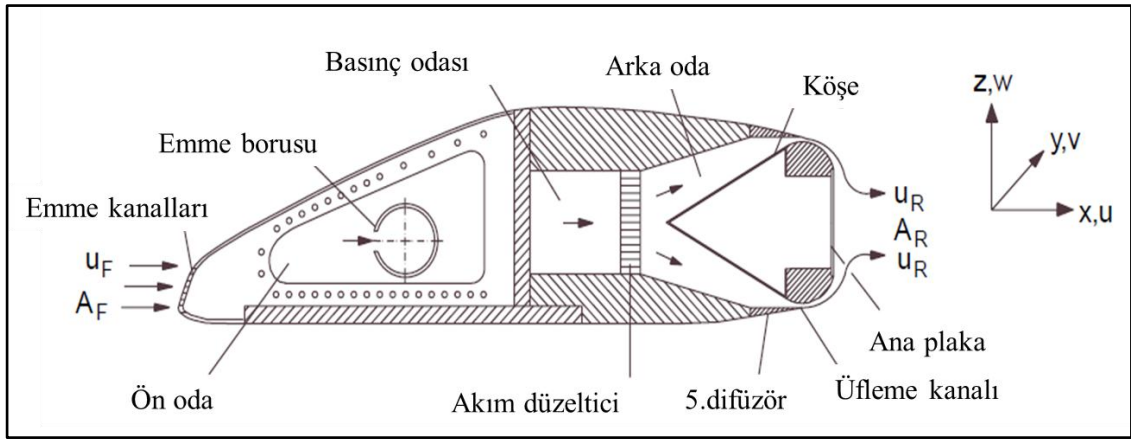


Şekil 2.39 MITSUBUSHI LANCER araçta VG (Vortex Üreticiler) Uygulaması (Koike ve ark., 2004)

Feng, (2007), Hafif araç tipi üzerinde (LMV : Low Mass Vehicle) CFD analizi ile Spoiler ve VG (Vortex Üretici) C_d etkileşimini incelemiş, tavan arka kısmında

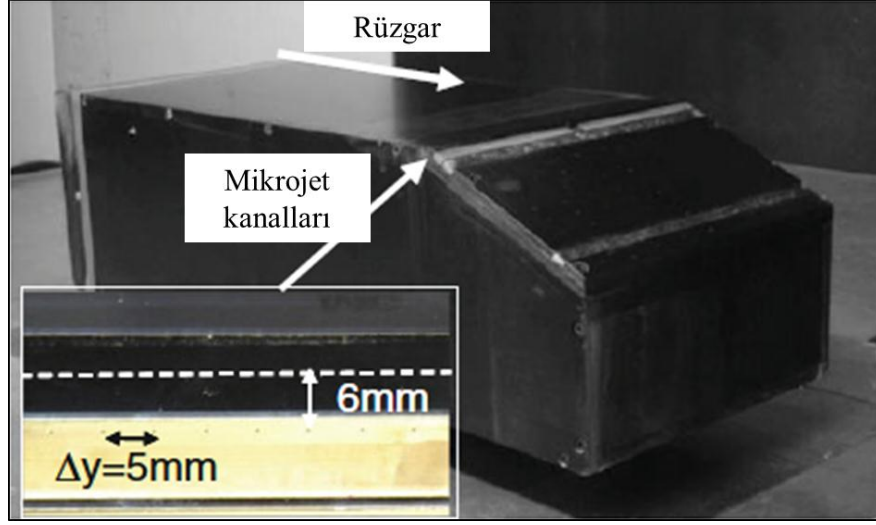
uygulanan spoylerin C_d de %10 seviyesinde iyileştirme sağlarken VG uygulaması bu tip araçta C_d de iyileştirme sağlamamıştır.

C_d iyileştirme çalışmalarında biri de model arka kısmındaki iz bölgesini daraltabilmek amacıyla uygulanan aktif kontrol yöntemleridir. Geropp ve Odenthal (2000), Coanda etkisi diye tanımladıkları model etrafındaki akışın model içerisinden geçirilerek arka iz bölgesine verilmesi sayesinde iz bölgesini tamamıyla elimine ederek C_d değerini %10 oranında iyileştirebilmişlerdir (**Şekil 2.40**).



Şekil 2.40 Aktif kontrol metoduyla akışın arka iz bölgesinin kontrolü (Geropp ve Odenthal, 2000)

Aubrun ve ark. (2011), Ahmet modeli üzerinde tavan ve arka cam bölgesi arasında ayrılma bölgesinin 6 mm önünden 150 m/s hızda mikro jet hava akımı vererek ayrılma bölgesini kontrol etmiş ve C_d değerini %9-14 iyileştirebilmiştir (**Şekil 2.41**).



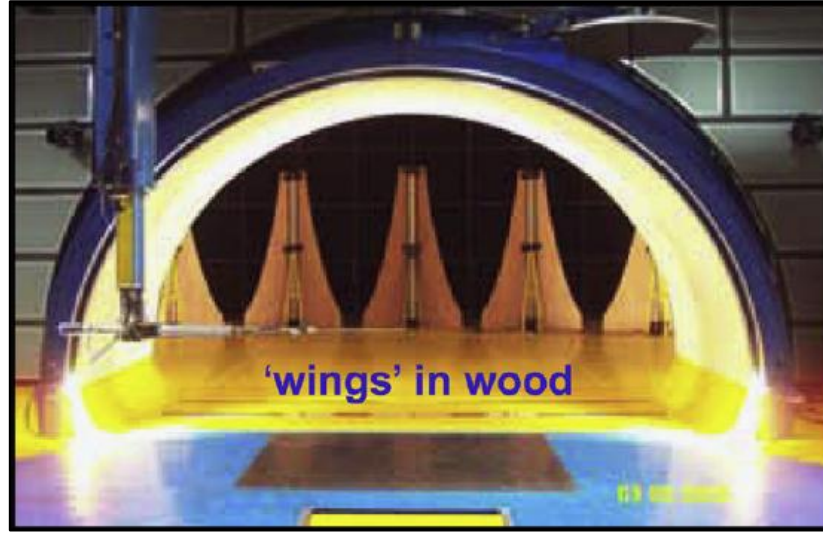
Şekil 2.41 Ahmet Gövdesi arka bölgesinde mikro-jet akımı uygulayarak ayrılma bölgesinin kontrolü (Aubrun ve ark., 2011)

2.6 Hava Tünelleri Türbülans Şiddeti Çalışmaları

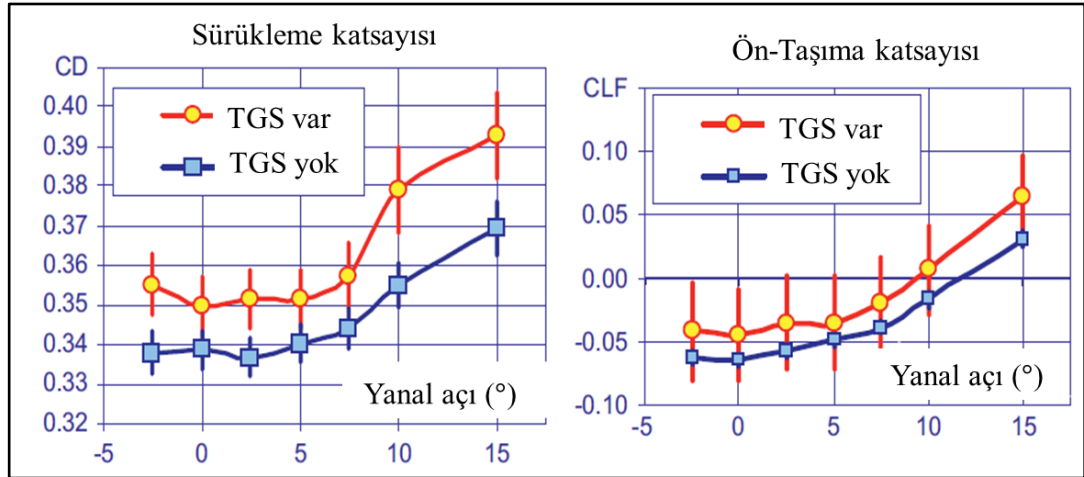
Mevcut hava tünellerinin çoğunda akış kalitesi çok iyi durumda olup türbülans şiddeti seviyeleri $< \%1$ dir. Fakat normal atmosfer şartlarında türbülans şiddetleri hava tünellerinin tersine yüksek değerlerde olabilmektedir. Peric ve ark. (1997), Atmosferik rüzgarların $\%30$ seviyelerine kadar türbülans şiddeti oluşturabileceğini ve hareket halindeki araçlarda $\%10$ seviyelerinde türbülans şiddetlerinin oluşabileceği belirtmişlerdir.

Normal yol şartlarında türbülans şiddeti trafiğin olmadığı, rüzgarın olmadığı durumlarda teorik sıfır değeriyle trafik ve rüzgarın durumuna göre yüksek değerde olabilmektedir. Atmosferde oluşan rüzgarların çoğu 1 m/s ile 10 m/s hızları arasında değişebilmekte bunun neticesinde de türbülans şiddetleri $\%0 < I_u < \%11$ seviyelerine çıkabilmektedir (Flay, 1978).

Cogotti, (2008), Pininfarina hava tüneline tahta kanatçıklar kullanarak (Şekil 2.42) türbülans şiddetini $\%10$ seviyelerine kadar çıkarmış ve türbülans şiddetinin değişik β yanal sapma açlarına göre C_d ve C_l ye olan etkisini belirlemiştir. Şekil 2.43 de görüleceği üzere $\beta = 0$ değerinde TGS (Turbulence Generating System) mevcut ve yok durumlarında wagon tip bir araçta C_d değerleri arasındaki fark $\%3.2$ seviyesinde bulunmuştur. Türbülans şiddeti arttıkça özellikle β açısına bağlı olarak C_d ve C_l değerleri artmaktadır.



Şekil 2.42 Türbülans arttırıcı tahta kanatçıklar (Pininfarina, İtalya)



Şekil 2.43 TGS var/yok durumuna göre C_d , C_l / β yanal açısı ilişkisi (Cogotti, 2008)

2.7 Hava Tüneli Blokaj Etkilerine Yönelik Çalışmalar

Gerçeğe yakın aerodinamik analizler için hava tünelinde test edilen modellerin 1:1 ölçeğe yakın olmaları gerekir. Bölüm (1.2) de bahsedildiği gibi Reynolds benzerliğinin küçük modellerde sağlanamaması ve tüneldeki hava akım hızlarının da sınırlı olması sebebiyle yapılan analizler gerçek modellerden sapmalar oluşturmaktadır. Literatür çalışmalarında %25 blokaj seviyelerine kadar çalışmaların yapıldığı ve düzeltme faktörlerinin belirlendiği görülmektedir. Fakat belirlenen düzeltme faktörleri maalesef evrensel olarak kabul edilmiş ve standart tüm modellere uygulanabilir değildir. Modelin

şekli ve mevcut sürüklenme katsayısının değeri blokaj düzeltmesinde etkili olduğu görülmektedir. Blokaj düzeltme formülleri genel olarak aşağıdaki şekilde verilir:

$$C_{dc} = w \cdot C_{dm} \quad (2.1)$$

$$w = (1 - B)^2$$

Burada C_{dc} düzeltilmiş sürüklenme katsayısını, C_{dm} blokaj düzeltmesi yapılmamış ölçüm sonucu bulunan sürüklenme katsayısını göstermektedir. w ise blokaj düzeltme faktörü olup blokaj oranının (B) karesiyle ilişkilidir (Carr 1971) .

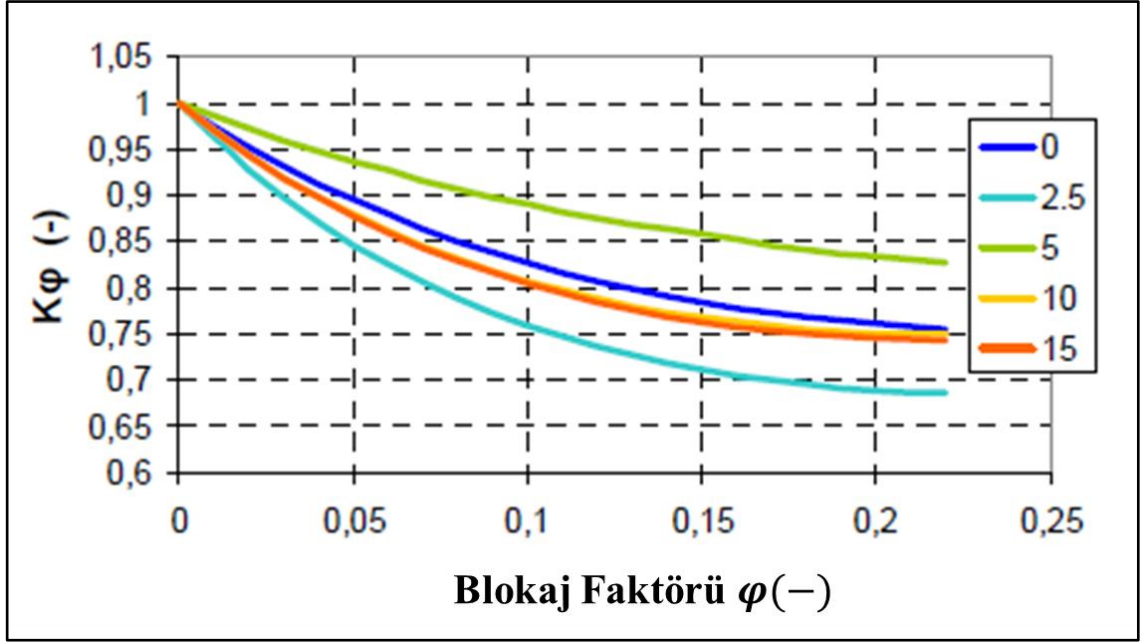
Sykes, (1973), ise w blokaj faktörünü aşağıda verildiği şekilde tanımlamış ve optimum m değerini 1.9 olarak önermiştir.

$$w = 1 - mB$$

Stafford, (1981), ise optimum m değerini 1.22 olarak belirlemiştir. Maciejewski ve Osmólski, (2002), otomobil modeli üzerindeki blokaj etkisinin C_d ye olan etkisini sayısal analizle belirlemişler ve optimum düzeltme faktörünü (Carr 1971) de belirtilen formülle kullanmışlardır. Kohut ve ark., (2005), açık deney odalı (open jet) hava tüneli için sürüklenme katsayısı düzeltme faktörünü aşağıdaki gibi belirlemişlerdir:

$$K_\varphi(\varphi) = \frac{C_{do}}{C_{dapp}(\varphi)} \quad (2.2)$$

$K_\varphi(\varphi)$ blokaj düzeltme katsayısı , C_{dapp} ise düzeltilmiş sürüklenme katsayısıdır. Blokaj oranı ile K_φ değerinin ilişkisi aşağıdaki gibi belirlenmiştir.



Şekil 2.44. Yolcu araç tipinde düzeltme faktörünün β yanal açılarına göre durumu (Kohut ve ark., 2005)

Sahini, (2004), dikdörtgenel kesit üzerinde iki boyutlu ve üç boyutlu akışlarda blokaj etkisini incelemiş ve yüksek blokaj oranlarında C_d ve C_p değerlerinin belirgin bir şekilde etkilendiğini ortaya koymuştur ve her bir farklı durum için düzeltme faktörü belirlemiştir. Maskell, (1965), kapalı devre hava tünellerinde kaba ve basit üç boyutlu modeller üzerindeki blokaj düzeltme faktörünü modelin şekli ve sürüklenme katsayısına bağlı olarak aşağıdaki şekilde tanımlamıştır:

$$\frac{q_c}{q} = \frac{C_d}{C_{dc}} = 1 + \theta \cdot C_d \cdot B \quad (2.3)$$

$$\theta = 0.96 + 1.94e^{\left(-\frac{0.05h}{l}\right)}$$

θ katsayısı iki ve üç boyutlu levhalar için üstteki gibi belirlenmiş olup modele bağlı olarak yüksekliğin uzunluğa oranı olarak belirtilmiştir. Cowdrey, (1968), Maskell metodunu geliştirerek üç boyutlu modellerde düzeltme katsayısını model sürüklenme katsayısından bağımsız olarak belirlemiştir. Fakat yeni belirlenen katsayı gene model şekline bağlı olarak ifade edilmiştir:

$$\frac{q_c}{q} = \frac{C_d}{C_{dc}} = 1 + m' \cdot B \quad (2.4)$$

$$m' = 1.85 + 1.35e^{(-0.05^h/l)}$$

Yang ve Schenkel, (2004), aşağıdaki formülasyonda belirtilen CFD blokaj düzeltme faktörünü önermişlerdir:

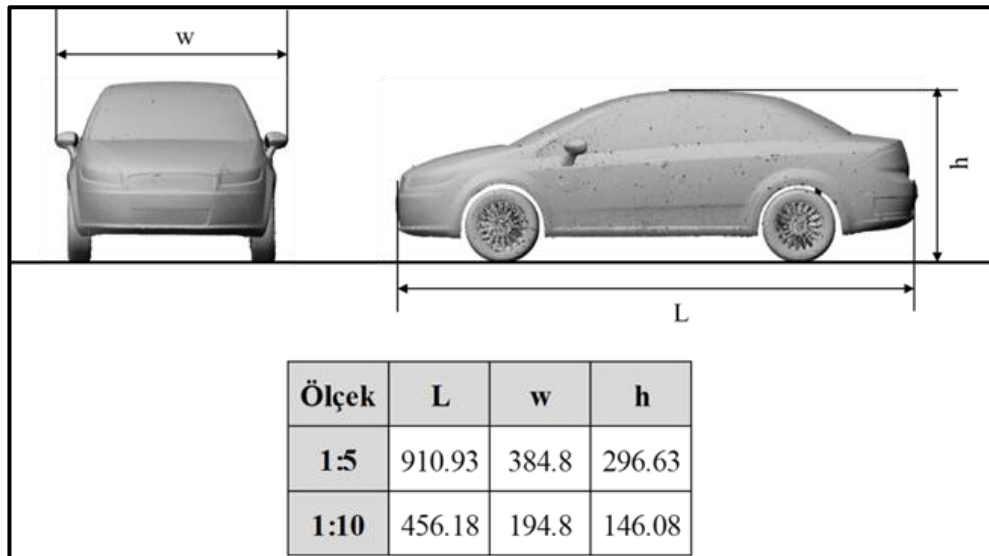
$$C_d(0, \text{exp}) = C_d(\text{exp}) - \Delta C_d(\text{CFD}) \quad (2.5)$$

Burada $C_d(0, \text{exp})$ düzeltilmiş sürüklenme katsayısını, $C_d(\text{exp})$ blokaj düzeltmesi yapılmamış deneysel sürüklenme katsayısını, $\Delta C_d(\text{CFD})$ ise CFD analizleriyle belirlenmiş düzeltme farkıdır. Bu fark sayısal çözüm alanının aynı deneysel ortamda olduğu gibi blokajlı simüle edilip analiz edilmesiyle bulunmaktadır. Yapılan analizlerde CFD düzeltme faktörünün Carr, (1971) alan metoduna paralel uyumlu sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Yapılan tüm bu çalışmalar gösteriyor ki, evrensel olarak kabul edilmiş ve tüm cisimlere uygulanabilecek bir blokaj düzeltme metodu henüz mevcut değildir. Bu çalışmada mevcut model için üstte önerilen tüm blokaj faktörleri incelenerek karşılaştırılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışması kapsamında 1:5 ve 1:10 ölçekli iki adet FIAT Linea araç modeli kullanılmıştır. Modellerin ebatları **Şekil 3.1** de verilmiştir. Deneysel testler iki farklı hava tüneline gerçekleştirilmiştir. UURT (Uludağ Üniversitesi Rüzgar Tüneli) de 1:5, 1:10 ölçekli modeller 10, 20, 30 m/s hızlarda test edilirken, ART (Ankara Rüzgar Tüneli) de 1:5 ölçekli model 10, 20, 30 m/s serbest akım hızlarında teste tabii tutulmuştur. Deneylein iki farklı tünelde gerçekleştirilmesinin nedeni farklı türbülans şiddetlerinin ve blokaj etkilerinin değerlendirilebilmesidir. Çalışmalarda modellerin simetri eksenleri üzerinde hız, simetri ve yanal eksenler üzerinde statik basınçlar ve sürüklenme kuvvetleri ölçümlenmiş ve sürüklenme katsayısı (C_d) belirlenmiştir. Deneysel testler ART’de $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ yanal rüzgar açılarında gerçekleştirilirken UURT’de 1:5 modelde $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ ve 1:10 modelde ise $\beta = 40^\circ$ yanal rüzgar açlarına kadar gerçekleştirilmiştir. Akış görüntülemeleri 1:5 ve 1:10 modeller için hem tek araç halinde hem de birbirini yakın takip eden araç halinde iplikçik metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. UURT testlerinde 1:10 model için birbirlerini yakın takip eden iki araç modelinin etkileşimleri değişik ara mesafelerinde değerlendirilmiş ve C_p, C_d ye olan etkileri belirlenmiştir. Deneysel sonuçlarla elde edilen C_p dağılımları ve C_d sürüklenme katsayısı sayısal CFD sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Çalışmada aynı zamanda blokaj etkileri de değerlendirilmiştir.

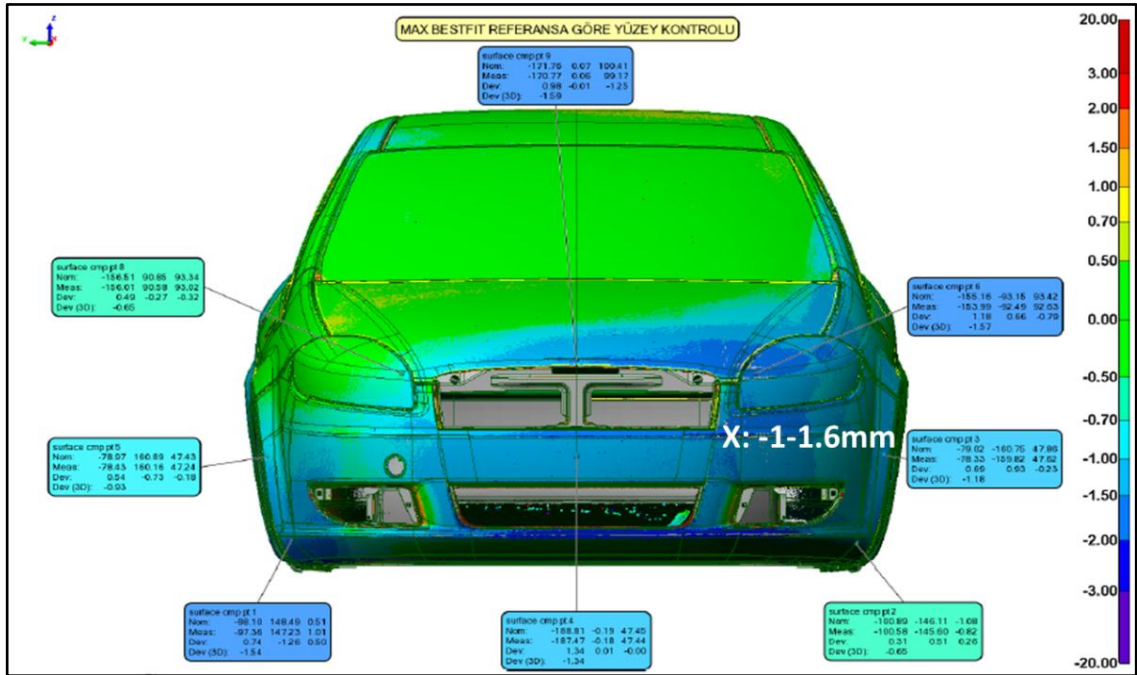


Şekil 3.1 “1:5” ve “1:10” FIAT Linea Modellerin boyutları (mm)

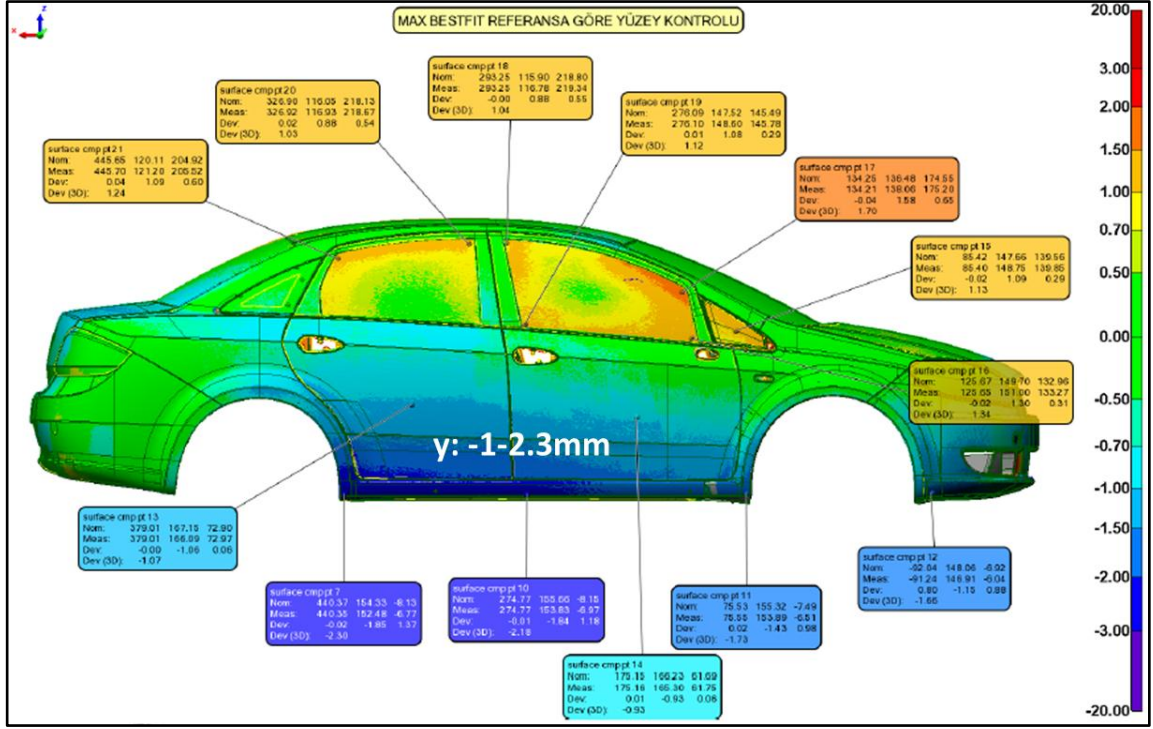
3.1 Ölçekli Modellere Ait Detay Bilgiler

3.1.1 "1:5" Ölçekli Model

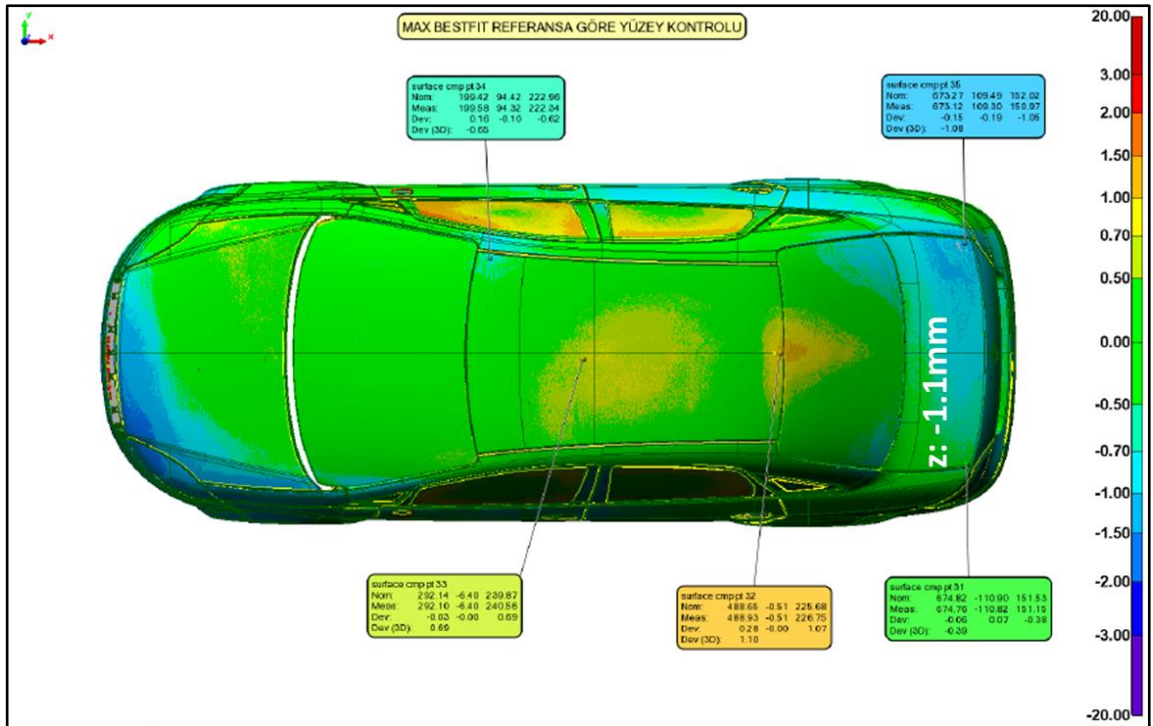
1:5 ölçekli model aslına sadık kalınarak ABS malzemeden yaptırılmıştır. Modelin laser maksimum bestfit metodu ile referanslanarak geometrik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. **Şekil 3.2** de modelin ön kısmı görülmekte olup sağ ön çamurluk bölgesinde max. 1.6 mm ye kadar varan hatalar görülmektedir. **Şekil 3.3** de modelin yandan görünüşü verilmiştir. Sağ ön/arka kapıların alt bölgelerinde 2.3 mm ye varan hatalar görülmektedir. **Şekil 3.4** de modelin üstten görünüşü verilmekte olup, bagaj kapağı sağ tarafında z : -1.1 mm ye varan hatalar görülmektedir. **Şekil 3.5** de sol yan görünüş verilmiştir, bu bölgede de y : -1 mm ye varan hatalar görülmektedir. **Şekil 3.6** da modelin arkadan görünüşü verilmiş olup x: -0.6 / -1.3 mm ye varan hatalar görülmektedir. Modelin 1:5 olduğu düşünülürken 1:1 model için bu geometrik hataların 8-9 mm seviyesinde olacağı görülmektedir. Bu sapmalar deneysel ve nümerik analiz farklılıklarında gözönüne alınmalıdır.



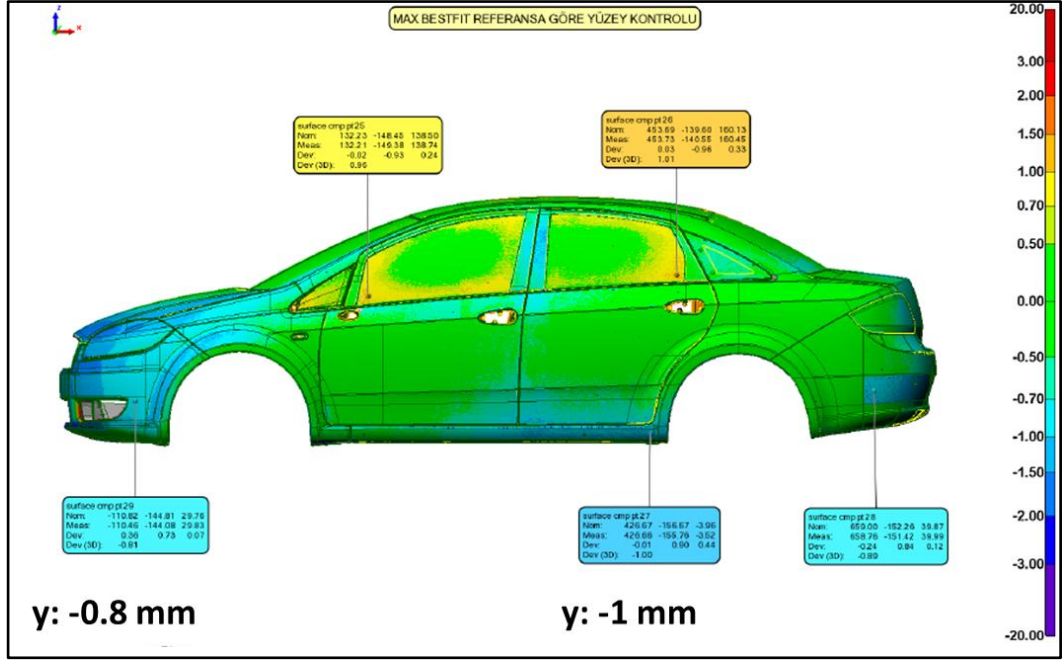
Şekil 3.2 1:5 ölçekli model ön kısım geometrik laser taraması



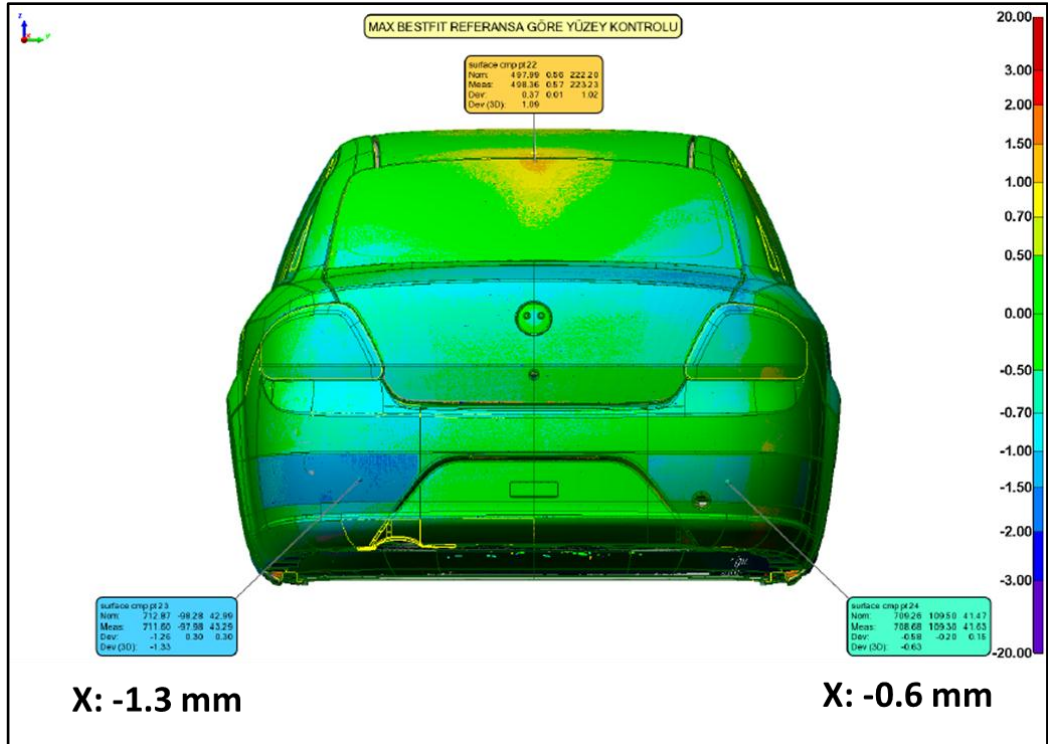
Şekil 3.3 “1:5” ölçekli model sağ yan kısım geometrik laser taraması



Şekil 3.4 “1:5” ölçekli model üst kısım geometrik laser taraması



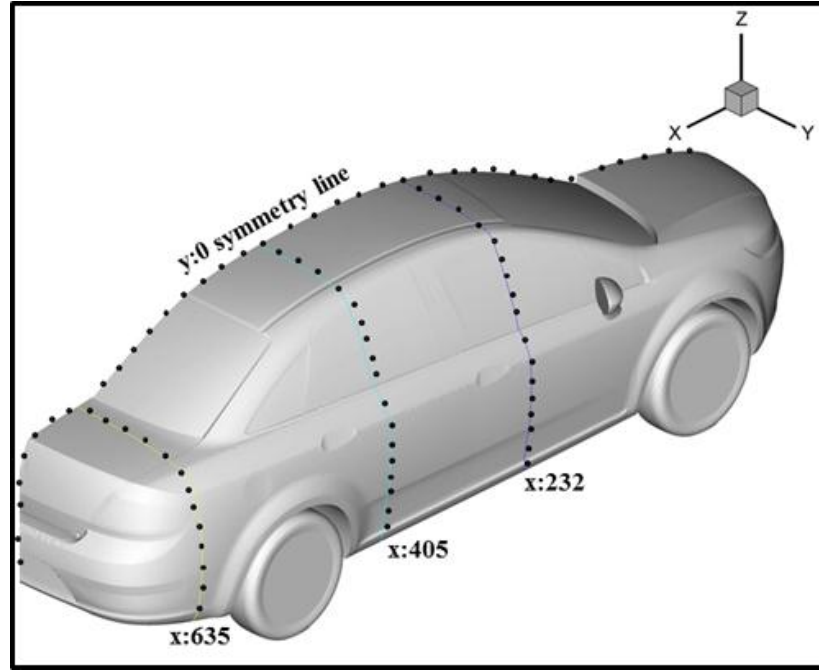
Şekil 3.5 “1:5” ölçekli model sol yan kısım geometrik laser taraması



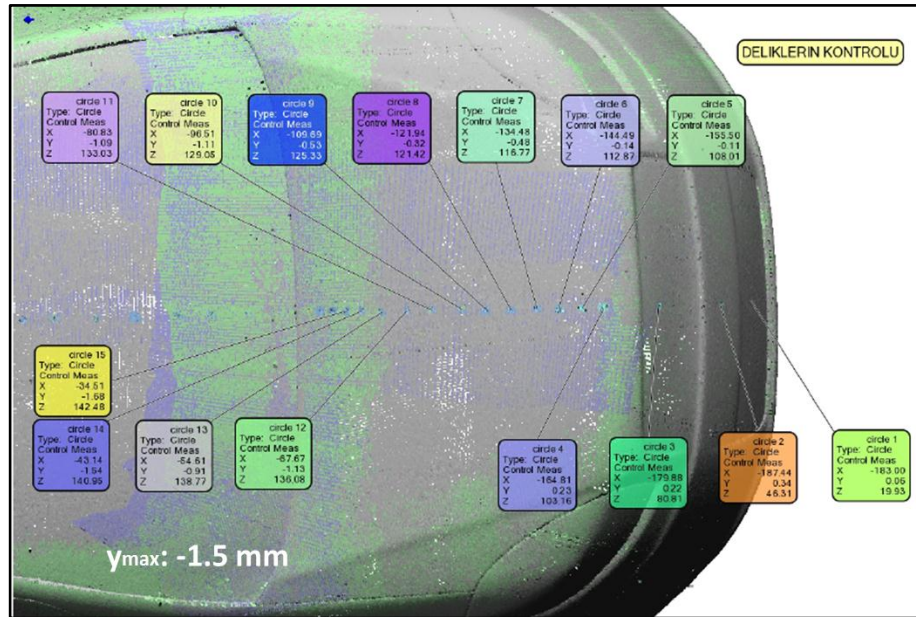
Şekil 3.6 “1:5” model arka kısım geometrik laser taraması

1:5 model üzerinde statik basınçların okunabilmesi amacıyla simetri ekseninde ($y=0$) 84 adet ve yan yüzeylerde de 3 adet kesitte ($x:232$, $x:405$, $x:635$) toplam 70 adet olmak

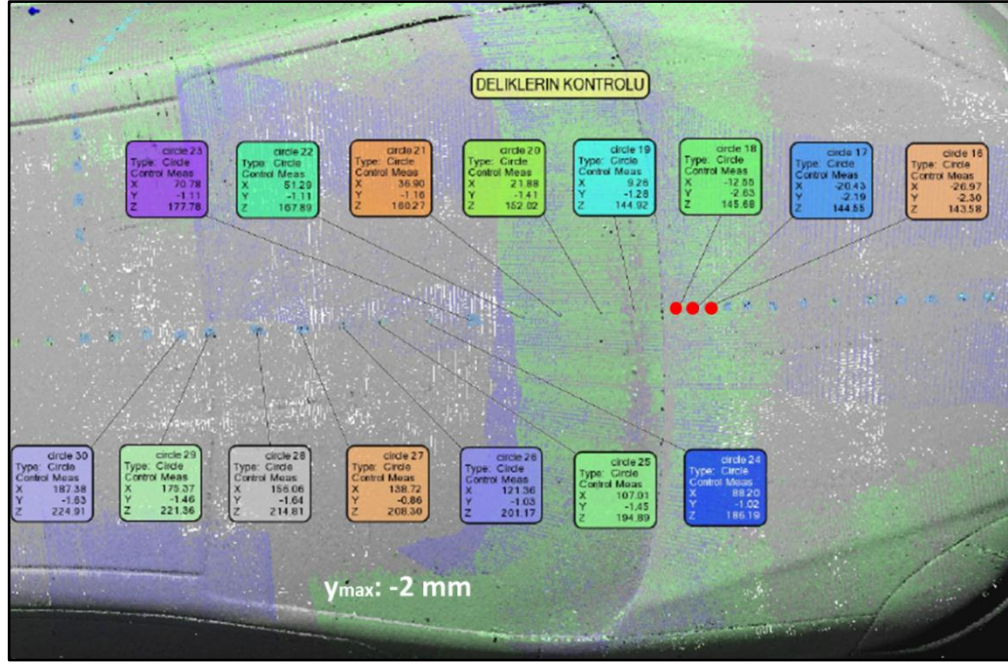
üzere toplamda 154 adet $\varnothing:1\text{mm}$ çapında statik basınç delikleri açılmıştır. Basınç deliklerinin şematik görünüşü Şekil 3.7 de verilmiştir. Şekil 3.8 de deliklerin laser tarama sonuçları görülmekte olup simetri ekseninde görülen max. kaçıklık genel olarak -1 mm civarında olup motor kaputu arka bölgesindeki üç delikte “y= -2” mm seviyesindedir (Şekil 3.9).



Şekil 3.7 “1:5” model üzerindeki statik basınç delikleri

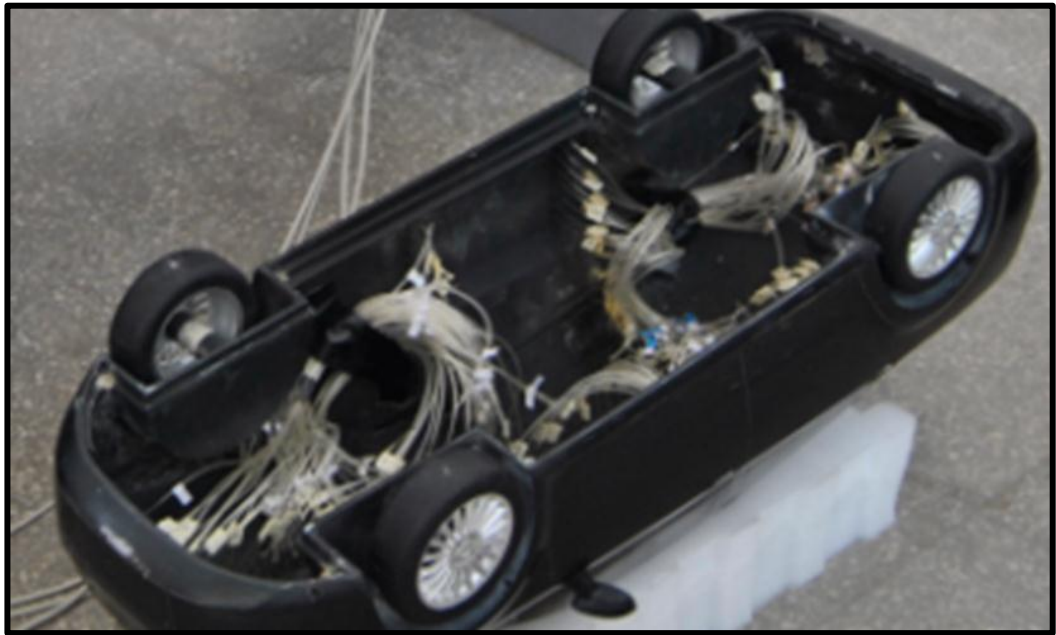


Şekil 3.8 “1:5” model üzerindeki statik basınç delikleri laser taraması (I)



Şekil 3.9 “1:5” model üzerindeki statik basınç delikleri laser taraması (II)

Model üzerindeki basınç deliklerine dış çapı $\varnothing: 1.2 \text{ mm}$ olan veteriner iğneleri Loctite ile yapıştırılmış ve bu iğnelere iç çapı $\varnothing: 1.2 \text{ mm}$ olan küçük esnek hortumlar geçirilerek data toplamaya hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.10).



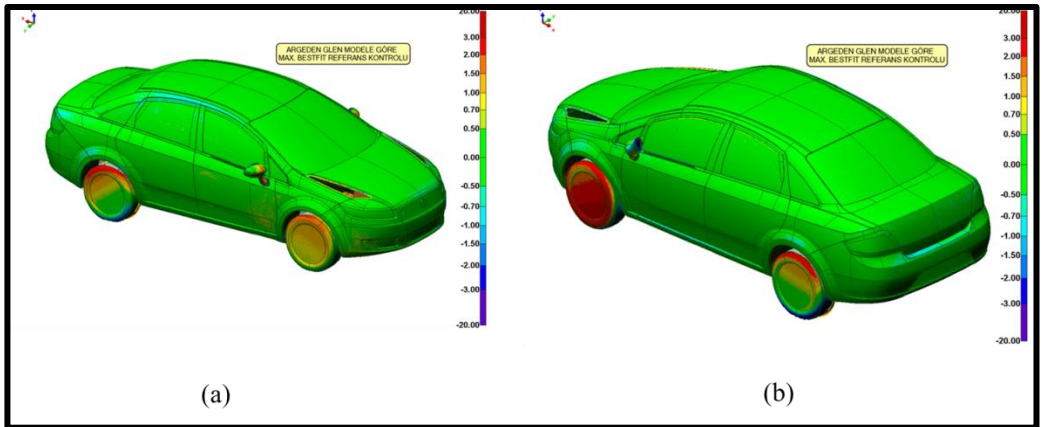
Şekil 3.10 “1:5” model basınç iğne ve hortumları

3.1.2 “1:10” Ölçekli Model

Kütük malzemesi olarak Corepox WB-1222 kullanılmış ve model TOFAŞ pres kalıp atelyesinde beş eksenli tezgah üzerinde hassas işlenerek master modeli oluşturulmuştur (Şekil 3.11 (a) ve (b)). Daha sonra master modelden dişi kalıp yapılmış ve ABS malzemeden model üretilmiştir. Model üretildikten sonra geometrik açıdan laser taraması gerçekleştirilmiş ve max. yüzey hatalarının $\pm 0.5 \text{ mm}$ değerinin altında kaldığı görülmüştür. Yalnızca tekerlek bölgesinde 1-2 mm civarı sapma görülmüştür. Şekil 3.12 (a) ve (b) de görüldüğü gibi tekerlekler dışında tüm gövde yeşil bölgededir. Üzerindeki basınç delikleri gene 1:5 modele sadık kalınarak simetri ekseninde (y:0) 44 adet ve yan eksenlerde de 35 adet olmak üzere toplam 79 adet açılmıştır.



Şekil 3.11 “1:10” modelin 5 eksenli tezgahta işlenmesi



Şekil 3.12 “1:10” model yüzey taraması

Modeller üzerindeki delik sayıları ve seçimlerinin ölçeklere göre dağılımı **Çizelge 3.1** ve **Çizelge 3.2** de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Modeller üzerindeki eksnelere göre statik basınç delik sayıları

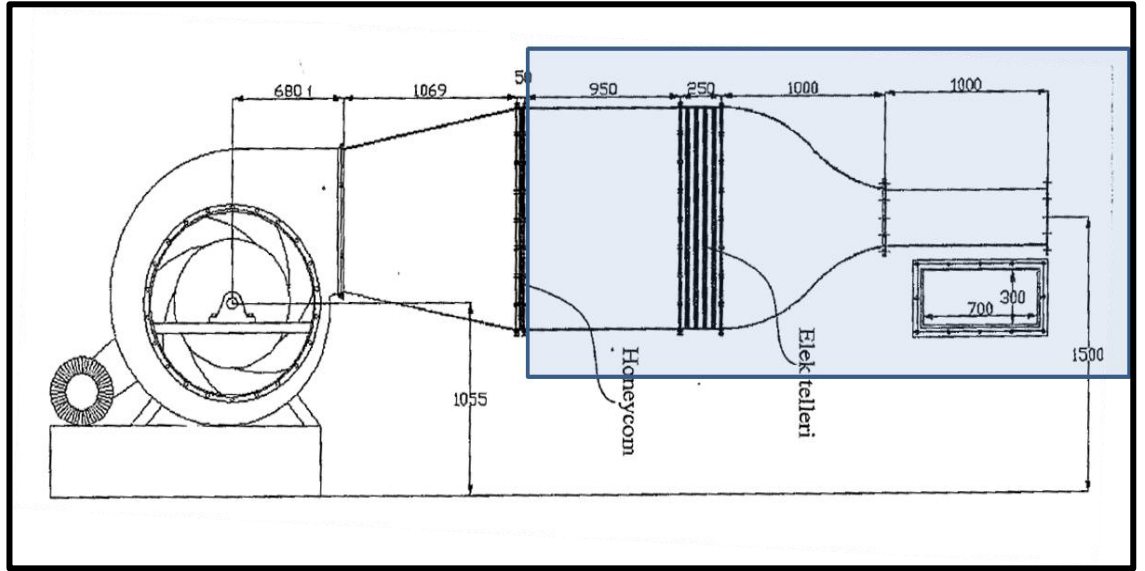
Ölçek	y=0	x=232	x=405	x=635	Toplam
1:5	84	26	26	18	154
1:10	44	13	13	9	79

Çizelge 3.2 Ölçeklere göre simetri ve yan eksenlerdeki basınç delikleri seçimleri

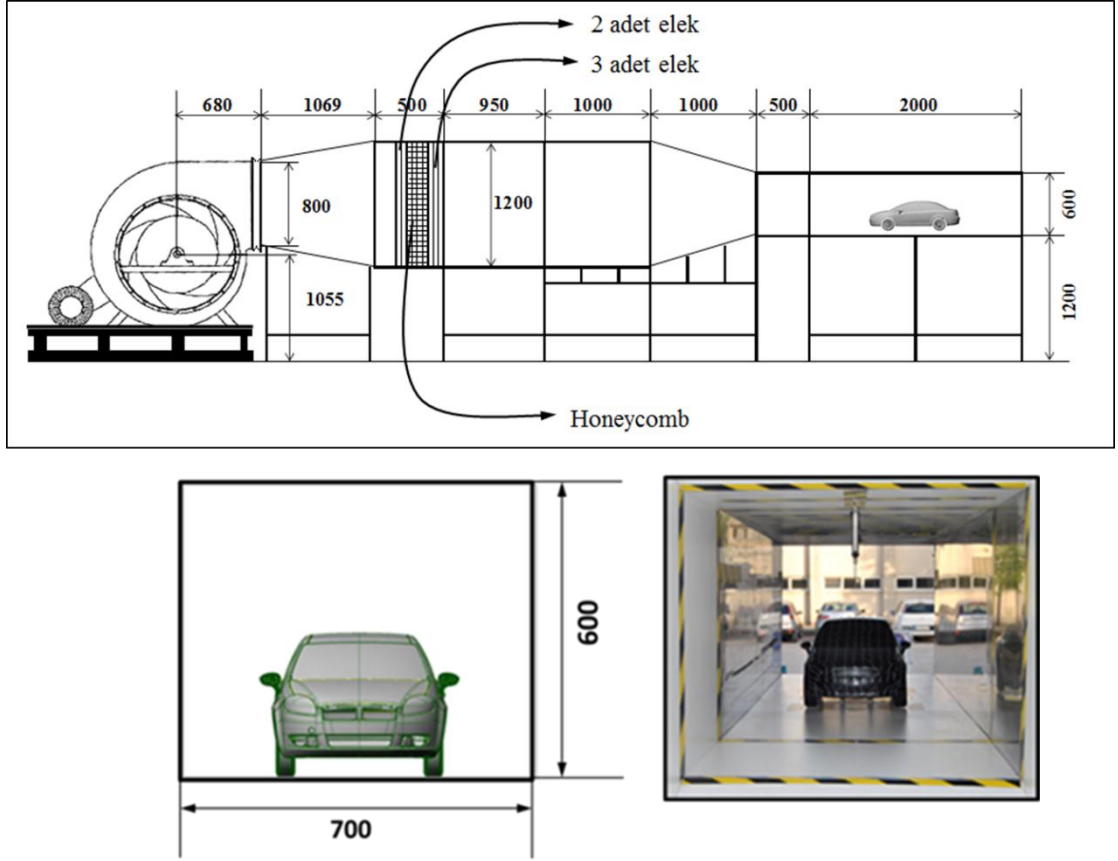
Simetri Ekseni (y:0)									Y1 (x:232)			Y2 (x:405)			Y3 (x:635)		
#	1:5	1:10	#	1:5	1:10	#	1:5	1:10	#	1:5	1:10	#	1:5	1:10	#	1:5	1:10
1			31			61			1			1			1		
2			32			62			2			2			2		
3			33			63			3			3			3		
4			34			64			4			4			4		
5			35			65			5			5			5		
6			36			66			6			6			6		
7			37			67			7			7			7		
8			38			68			8			8			8		
9			39			69			9			9			9		
10			40			70			10			10			10		
11			41			71			11			11			11		
12			42			72			12			12			12		
13			43			73			13			13			13		
14			44			74			14			14			14		
15			45			75			15			15			15		
16			46			76			16			16			16		
17			47			77			17			17			17		
18			48			78			18			18			18		
19			49			79			19			19					
20			50			80			20			20					
21			51			81			21			21					
22			52			82			22			22					
23			53			83			23			23					
24			54			84			24			24					
25			55						25			25					
26			56						26			26					
27			57														
28			58														
29			59														
30			60														

3.2 UURT (Uludağ Üniversitesi Rüzgar Tüneli) Testleri

Uludağ Üniversitesi akışkanlar mekaniği laboratuvarında bulunan açık devre rüzgar tüneli (UURT) deney odası kesiti $700 \times 300 \text{ mm}^2$ olup 1:5 ölçekli FIAT Linea modeli test etmeye elverişli boyutlarda değildir (**Şekil 3.13**). Bu sebepten dolayı testlere başlamadan önce hava tüneli honeycomb dan itibaren tekrar tasarlanarak modifiye edilmiştir. Yeni durumda deney odası kesiti $700 \times 600 \text{ mm}^2$ ye genişletilmiştir (**Şekil 3.14**). Modifiye edilen deney odasında blokaj oranları 1:5 model için %20 ve 1:10 model için ise %5 seviyelerindedir. UURT yeni tünelin teknik spesifikasyonları **Çizelge 3.3** de verilmiştir.



Şekil 3.13 Akışkanlar mekaniği laboratuvarında bulunan rüzgar tüneli (UURT)



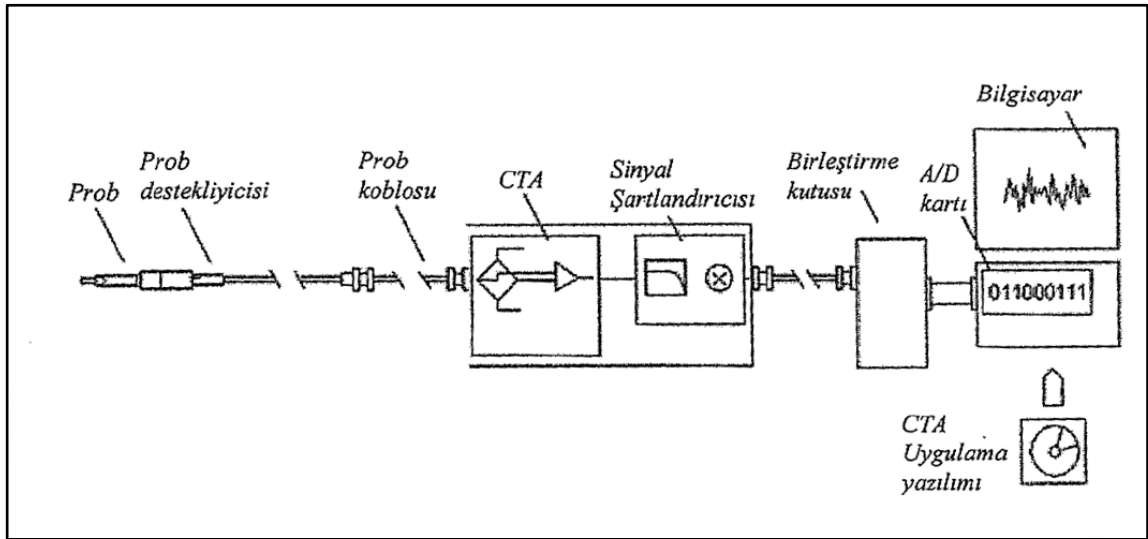
Şekil 3.14 Modifiye edilmiş UURT açık devre rüzgar tüneli boyutları ve deney odası

Çizelge 3.3 UURT (Uludağ Üniversitesi Rüzgar Tüneli) özellikleri

UURT Teknik Spesifikasyonları	
Tip	yatay açık devre
Deney odası kesitleri	uzunluk: 2 m, genişlik: 0.7 m, yükseklik : 0.6 m
Max Test Hızı	32 m/s
Fan Tipi	Radyal
Fan Gücü (HP,Max. RPM)	22kW (1540)
Türbülans şiddeti (%)	7%
Daralma oranı	2
Blokaj oranı	20% (1:5 ölçek model için)

3.2.1 Model Etrafındaki Hız Profillerinin Ölçümü

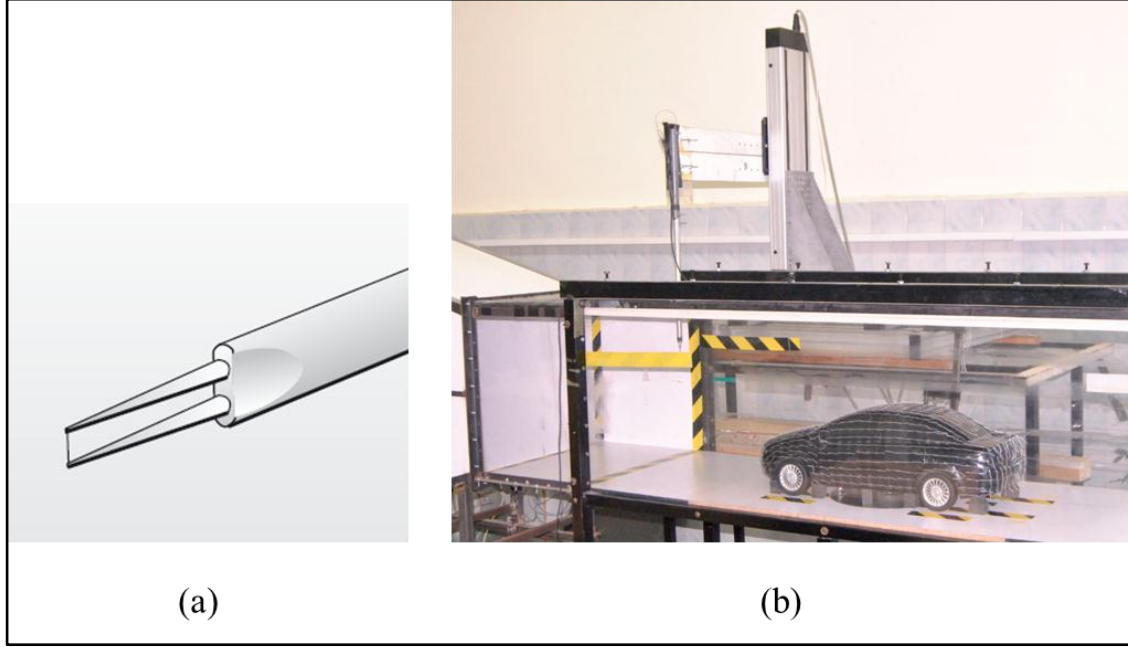
Model etrafındaki hız profilleri 1:5 ölçekli modelde 3, 10, 20, 30 m/s hızlarda, 1:10 ölçekli modelde 3, 10, 20, 30 m/s hızlarda DANTEC Dynamic CTA anemometresi kullanılarak ölçülmüştür. Probu akış alanındaki hareketi üç boyutlu bir travers mekanizması vasıtasıyla sağlanmıştır. Ölçümlerde 55P0111 kodlu düz hotwire probu kullanılmıştır. Literatürde hız ve türbülans yoğunluklarının ölçümü, kızgın tel anemometresi (CTA olarak da bilinir), Lazer Doppler anemometresi (LDA) veya Particle-Imaging hızölçeri (PIV) ile yapılmaktadır. Bu çalışmada CTA anemometresi kullanılmıştır. Sistem ısıtılmış bir sensörden çevredeki akışkana ısı transferini esas alarak çalışır. Isı transferi öncelikle akışkanın hızına bağlıdır. Servo-loop teknikli elektronik elemanlar ve akışkan içine yerleştirilmiş hassas tel sensörleri kullanılarak, hız dalgalanmaları hassas ölçeklerde ve yüksek frekanslarda ölçülebilir. CTA diğer ölçüm cihazlarına göre kolay kullanımlıdır. Çıktısı bir analog voltajdır ve bilgi kaybı yoktur, çözünürlüğü yüksektir. Sonuç olarak PIV ve LDA sistemlerine göre daha hassas ve ayrıntılı ölçümler yapar. **Şekil 3.15** de CTA ölçüm ekipmanları görülmektedir.



Şekil 3.15 CTA Anemometresi ölçüm zinciri

Hız profillerinin ölçümünde **Şekil 3.16 (a)** da görülen düz hotwire probu kullanılmıştır. Probe akış alanında **Şekil 3.16 (b)** de görülen üç boyutlu travers mekanizmasıyla programlanarak otomatik olarak hareket ettirilmiştir. Kullanılan travers sistemi her üç

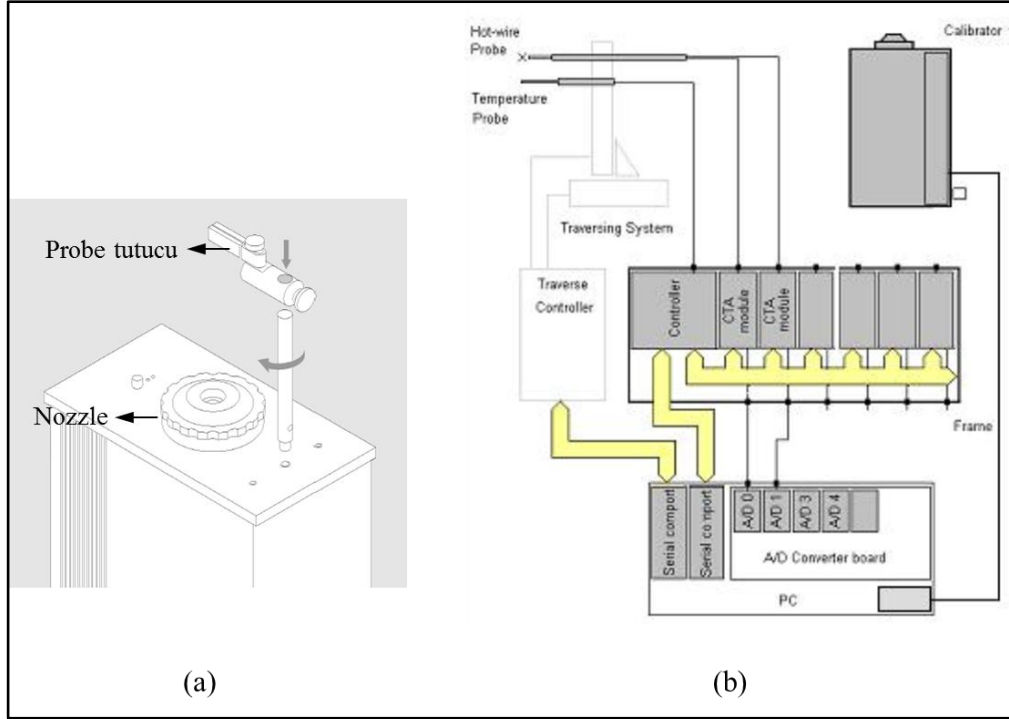
eksende de 0.1 mm den daha hassas bir çözünürlüğe sahiptir ve ± 0.1 mm hataya sahiptirler.



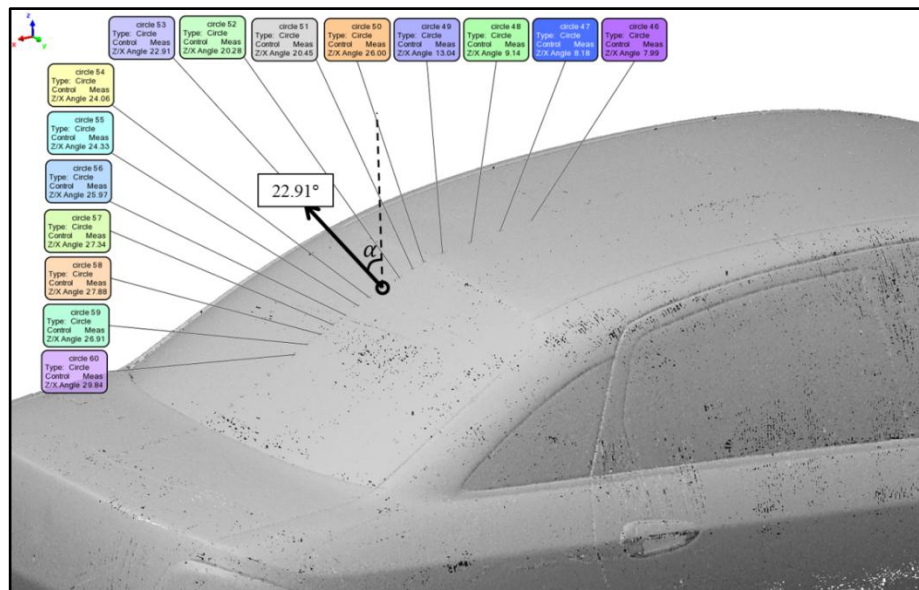
Şekil 3.16 (a) DANTEC 55P0111 probu (b) Travers mekanizması

Hotwire sisteminin kalibrasyonu gene DANTEC den temin edilmiş ve akışkanlar mekaniği laboratuvarında bulunan kalibrasyon cihazı vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon işleminde harici bir kompresör ile temin edilen basınçlı hava kalibrasyon ünitesi üzerine akıma dik olacak şekilde sabitlenmiş probe üzerine gönderilir. Kalibrasyon ünitesi ethernet bağlantısı ile bir PC ye bağlıdır. Kalibrasyon ünitesi otomatik olarak PC tarafından kontrol edilmektedir. Kompresörden basınçlı gelen hava kalibratör içerisinde yağ ve partiküllerinden arındırılmak üzere filtre edilir. Kalibratör içerisinde bulunan hassas basınç ayarlayıcı ile sabit basınç ile probe üzerine gönderilir. Kalibratör çıkışındaki hava jeti düz, üniform ve düşük türbülans seviyesindedir. Kalibrasyon cihazında dört farklı tip nozzle kullanılabilmektedir (20, 60, 120 and 1400 mm^2) bu sayede hız kalibrasyon aralığı 0.02 m/s den 1 Mach (ses hızı) seviyesine kadar çıkabilmektedir. Kalibrasyon hassasiyeti 5 m/s hız değerlerinin üzerinde $\pm\%5$ seviyesindedir. **Şekil 3.17 (a)** da kalibrasyon ünitesi ve **(b)** de CTA sistemi görülmektedir. Hız ölçümleri sadece model üzerinde simetri eksenini (y:0) da basınç deliklerinin olduğu noktalarda yapılmıştır. Ölçümler her noktada her 1 mm mesafe için

gerçekleştirilmiştir. Bunun için her noktanın normal vektörleri bulunmuş ve bu noktaya dik olacak şekilde travers programlanmıştır. **Şekil 3.18** de model üzerindeki bir noktada normal vektörü görülmektedir. Travers bu normal doğruyu takip edecek şekilde programlanmış ($\Delta x:0.5 \text{ mm}$, $\Delta z: 1.18 \text{ mm}$) ve hız profili bu normale göre çıkarılmıştır.



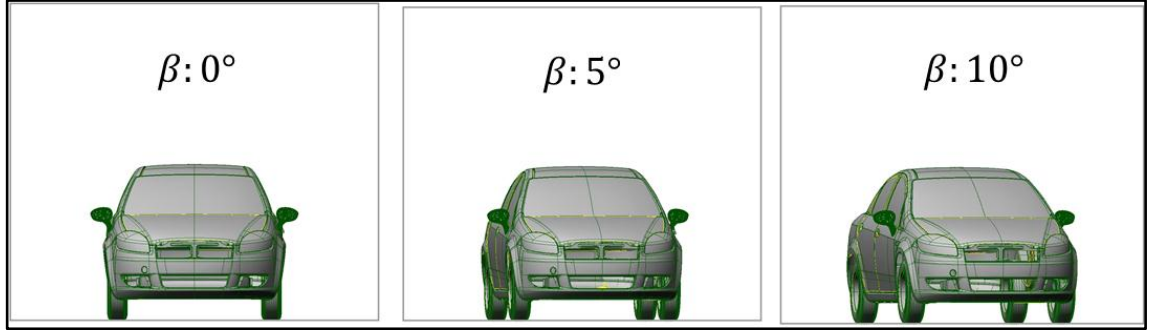
Şekil 3.17 (a) kalibrasyon ünitesi (b) CTA sistemi



Şekil 3.18 Model arkasında örnek delik normali (53 nolu delik)

3.2.2. Model Üzerindeki Basınçların Ölçümü

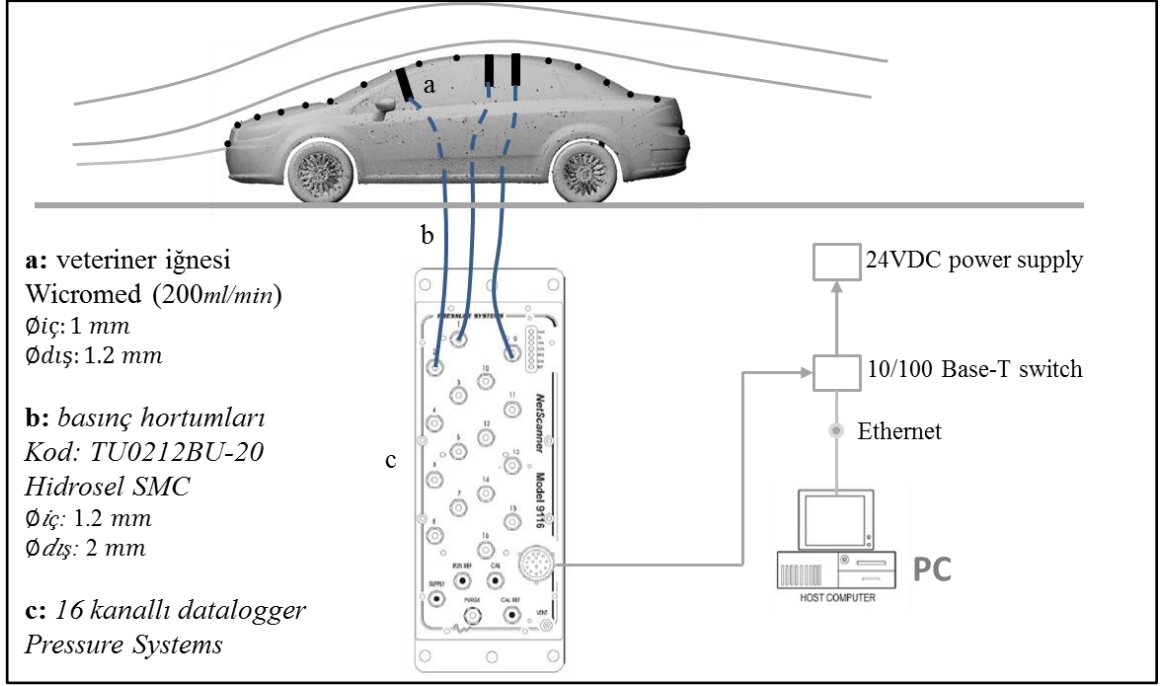
Modeller üzerinde daha önce açılmış olan deliklerden 10, 20, 30 m/s hızlarda statik basınç değerleri ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler daha sonra statik basınç katsayısına dönüştürülmüştür (C_p). Basınç ölçümlerinde modellere $\beta : 0^\circ, +5^\circ, +10^\circ$ yanal rüzgar açıları da verilmiştir (Şekil 3.19). UURT tüneline 16 kanallı Pressure Systems datalogger kullanılmıştır (Şekil 3.20). Datalogger üzerindeki kanallara Şekil 3.21 de görülen hortumlar takılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.22 de statik basınç ölçüm düzeneği görülmektedir.



Şekil 3.19 Değişik β açılarında konumlandırılmış 1:5 ölçekli model



Şekil 3.20 16 kanallı Pressure Systems datalogger



Şekil 3.21 Statik basınç ölçüm düzeneği

Netscanner 9116 basınç tarayıcısı %0.05 seviyesinde çok yüksek hassasiyete sahiptir. Cihaza ait teknik spesifikasyonlar **Çizelge 3.4** de verilmiştir. Basınç dataları tünel hızı istenen hıza getirildikten sonra 1' süreyle saniyede 5 ölçüm datası olmak üzere 500 ölçüm değerinin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Ölçümlerde aynı anda en fazla 16 basınç deliğinden ölçüm yapılmış, ölçüm akabinde ikinci lotta 16 lık basınç deliklerindeki basınçlar ölçülmüştür.

Çizelge 3.4 Netscanner 9116 Teknik Özellikleri

After 1 hour warmup @ 25°C with atmospheric reference pressure unless otherwise stated / FS = Full Scale

Parameter	9116	Units	Comments
PNEUMATICS			
Pressure Range ¹	10 (2.5)		
	1 (7)	45 (310)	psi (kPa) ranges ≥ 100 psi (689 kPa) are unidirectional only
	2.5 (17)	100 (689)	
	5 (34)	250 (1724)	
	10 (69)	500 (3447)	
	15 (103)	750 (5171)	
30 (207)	850 (5860)		
Number of Pressure Inputs	16		available in any combination of ranges
Pneumatic Fittings	1/16", 1/8", 1/4" 5/16" -24 SAE .063", .040" bulge tube		compression fittings o-ring boss QDC tubing plate
Media	Dry, non-corrosive gas		
Proof Pressure ²	3.0X		FS min range <15 psi (103 kPa) range 15-100 psi (103-689 kPa) range >100 psi (689 kPa)
	2.0X		
	1.5X		
Burst Pressure	5.0X		FS min range <15 psi (103 kPa) range 15-100 psi (103-689 kPa) range >100 psi (689 kPa)
	3.0X		
	2.0X		
Max Line Pressure ³	100 (689)		psi (kPa) psi (kPa) range ≤ 5 psi (34 kPa) range >5 psi (34 kPa)
	600 (4137)		
Manifold Control Pressure	80 (552)		psi (kPa) psi (kPa) min max
	125 (862)		
Purge Pressure ⁴	> max input pressure		psi (kPa) psi (kPa) min max
	850 (5860)		
STATIC PERFORMANCE			
Measurement Resolution	±0.003		% FS
Static Accuracy ⁵ After Rezero	±0.05		% FS
	±0.15		% FS range > 2.5 psi (17 kPa) range ≤ 2.5 psi (17 kPa)
Total Thermal Error ⁶	±0.001		% FS/°C
	±0.0015		% FS/°C range > 2.5 psi (17 kPa) range ≤ 2.5 psi (17 kPa)
Line Pressure Effect	±0.0003		% FS/psi range ≥ 100 psi (689 kPa)
	±0.0008		% FS/psi range >5 psi (34 kPa) to <100 psi (689 kPa)
	±0.001		% FS/psi range ≤ 5 psi (34 kPa)
Measurement Rate	500		meas/ch/ sec engineering units

3.2.3. Model Üzerindeki Sürüklenme Kuvvetlerinin Ölçümü

Aerodinamik sürüklenme kuvvetleri 20, 30 m/s rüzgar hızlarında ve modellere göre değişik β yanal açıları belirlenmiştir. Model ölçeklerine göre β açıları durumu **Şekil 3.22** de verilmiştir. 1:5 ölçekli model için deney odası kısıtlarından dolayı $\beta = 10^\circ$ ye kadar ve 1:10 ölçekli modelde ise $\beta = 40^\circ$ ye kadar aerodinamik testler gerçekleştirilmiştir.

β yanal sapma açısı

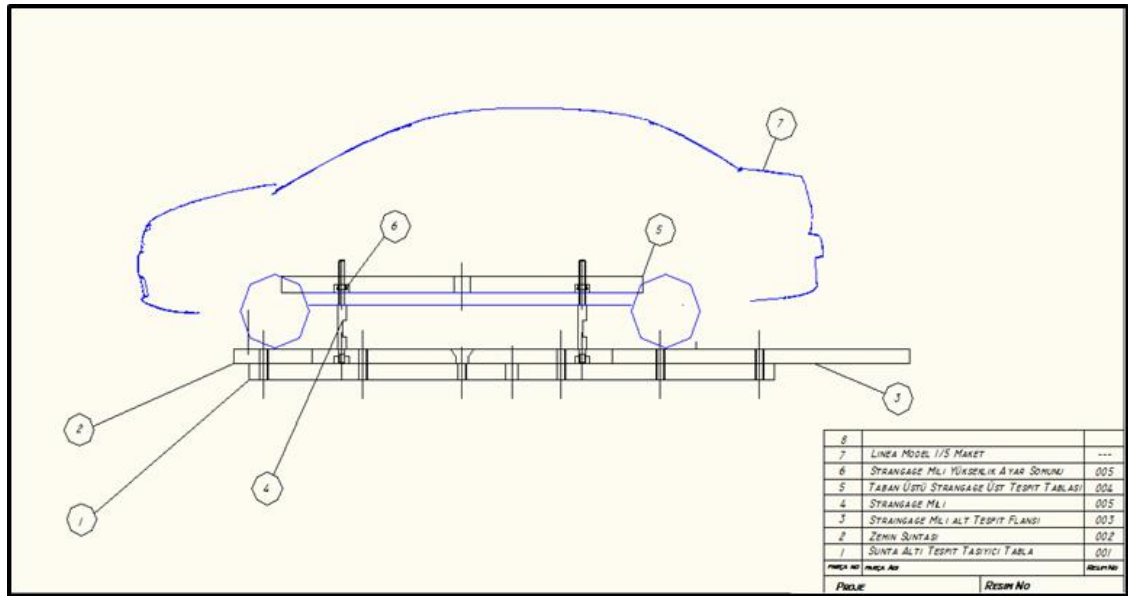
Ölçek	0	5	10	15	20	25	30	35	40
1:5	x	x	x						
1:10	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Şekil 3.22 Model ölçekleri bazında C_d ölçümleri için β açıları

Sürüklenme kuvvetlerini ölçmek üzere 1:5 ölçekli model ve 1:10 ölçekli model için özel straingaugedance sistemi tasarlanmıştır. Şekil 3.23 de görüldüğü gibi model 4 adet silindirik çubuk vasıtasıyla ana tablaya, tekerlekler yerden yaklaşık 1 mm yukarıda olacak şekilde tespit edilerek tünele pozisyonlanmıştır. Straingaugedance sisteminin şematik resmi Şekil 3.24 de görülmektedir.

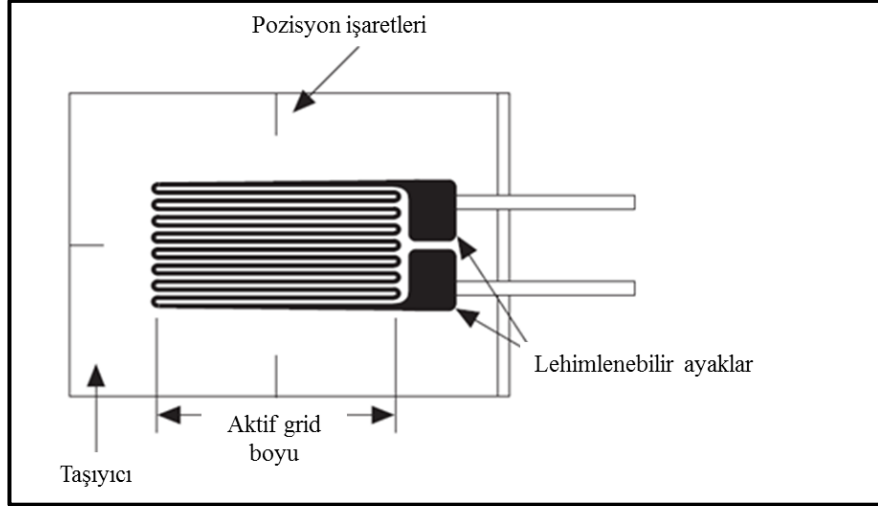


Şekil 3.23 “1:5” model straingaugedance balans düzeni



Şekil 3.24 “1:5” model straingaugedance sistem konstrüksiyonu

Strain, kuvvete bağlı olarak cisim gövdesinde meydana gelen deformasyonun miktarıdır ve çok küçük bir değerdir. Bu sebepten $\mu\epsilon$ olarak ifade edilir ($\epsilon \cdot 10^{-6}$). Strain değeri ölçümünde en yaygın kullanılan metodlardan biri straingaugedance kullanımınıdır. Straingaugedance sisteminde elektriksel direnç strain değerine bağlı olarak orantılı bir şekilde değişir. En yaygın kullanılan straingaugedance tipi metal yüzeylere uygulanan lehimlenebilir straingaugedance tipidir (Şekil 3.25).

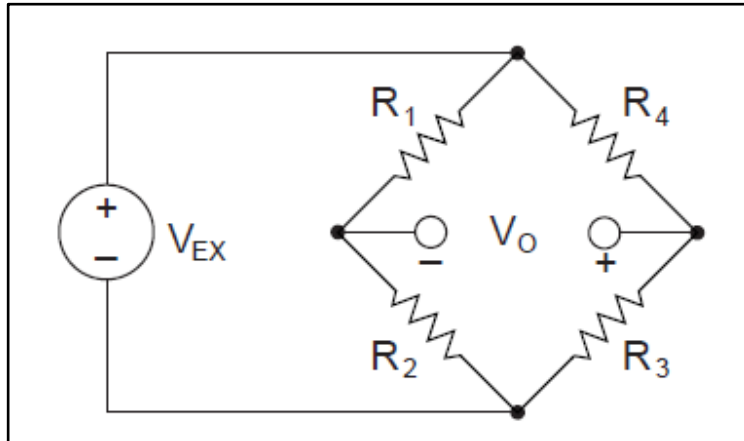


Şekil 3.25. Lehimlenebilir Metalic Strain gauge

Strain miktarına olan hassasiyet strain gauge sistemi için önemli bir parametredir ve GF (Gauge Factor) olarak ifade edilir :

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (3.1)$$

Basit anlamda GF cihazdaki elektriksel direnç değişiminin strain değerine oranıdır. Metalic strain gauge lerde GF değeri 2 civarındadır. Çok küçük strain değerleri ölçümlendiğinden direnç değerlerinin ortamın sıcaklık değişiminden etkilenmemesi gerekmektedir. Sıcaklık kompensasyonu için wheatson köprüsü kullanılmaktadır (Şekil 3.26).

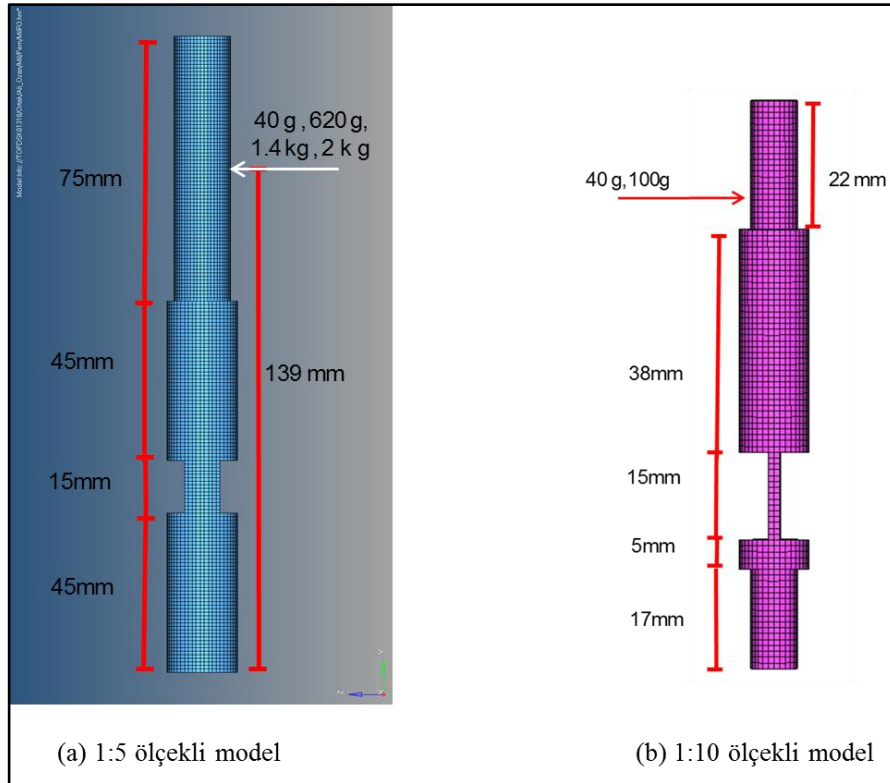


Şekil 3.26 Wheatson köprüsü

Diğer önemli nokta da straingauge taşıyıcılarında ölçüm aralığındaki deformasyonun (strain) istenen değerde sağlanabilmesidir. Bu amaçla straingauge taşıyıcı milleri özel hesaplanarak dizayn edilmelidir. Örnek modellerimizde her bir straingauge taşıyıcı ayaklara **Çizelge 3.5** de belirtilen küçük yüklerin geleceği düşünüldüğünde model boyutlarına göre taşıyıcı ayaklar **Şekil 3.27** de belirtildiği gibi dizayn edilmiş ve sayısal olarak strain değerleri hesaplanarak doğrulanmıştır. Küçük yükleri dahi algılayabilmek için straingauge yapıştırılacak yüzeyler yapılabildiği kadar inceltirilmiştir.

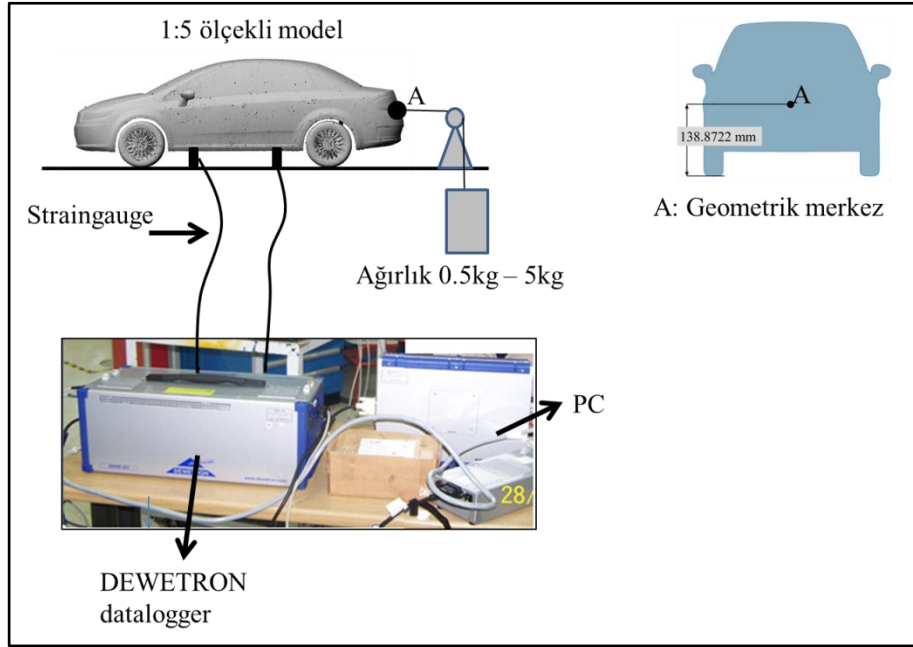
Çizelge 3.5 Modellere göre taşıyıcı ayaklara gelecek yük aralığı

	Toplam 4 taşıyıcı	Tek Taşıyıcı
1:5	0.9 kg - 2 kg	0.225 kg - 0.5 kg
1:10	0.185 kg - 0.4 kg	0.046 kg- 0.1 kg

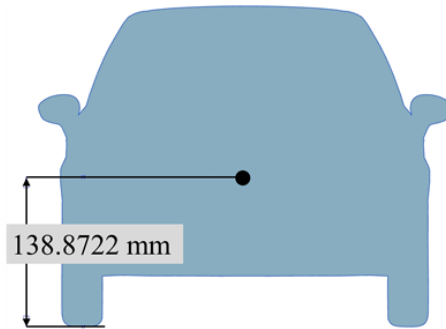


Şekil 3.27 Straingauge taşıyıcı ayakların ölçekli modellere göre boyutları

Balans sistemi kurulduktan sonra straingauge yük kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir. **Şekil 3.28** de kalibrasyon düzeneği şematik olarak görülmektedir. Modellerin geometrik merkezleri **Şekil 3.29** de 1:5 model örneğinde görüldüğü gibi modelin laser taraması metoduyla bulunmuş ve o noktadan kalibrasyonlu ağırlıklar asılarak datalogger vasıtasıyla yükler ölçülmüştür. 1:10 ölçekli modele ait straingauge balance sistemi **Şekil 3.30** da görülmektedir. **Şekil 3.31** ve **Şekil 3.32** de 1:5 ve 1:10 modellerin kalibrasyon grafikleri görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere balance sistemi hassas şekilde %0.5 hassasiyette kalibre edilebilmiştir.



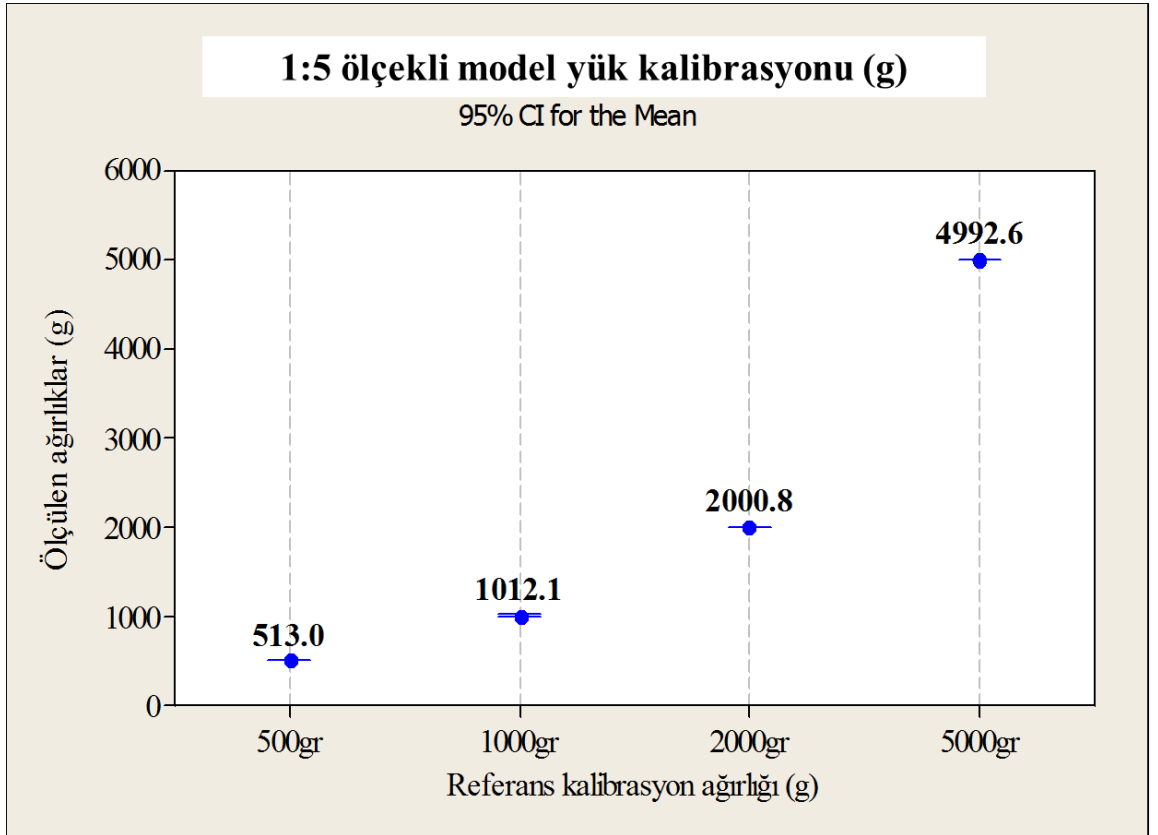
Şekil 3.28 Straingauge balans kalibrasyon düzeneği (1:5 model)



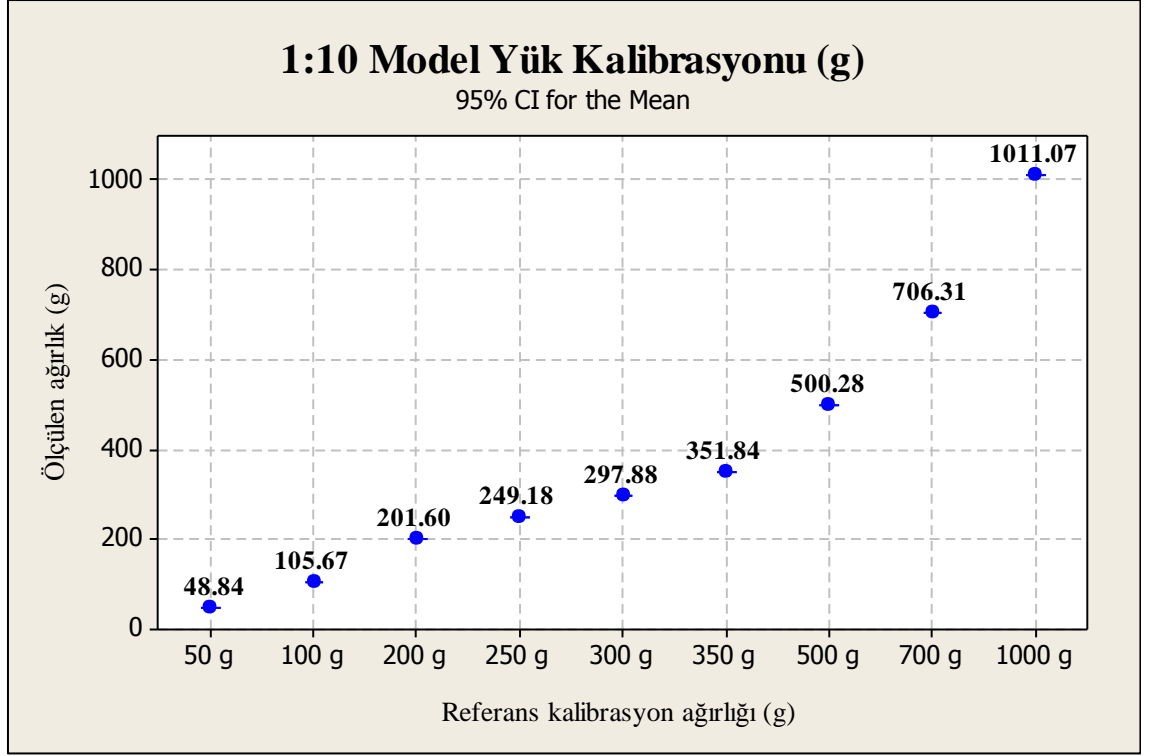
Şekil 3.29 “1:5” ölçekli model geometrik merkezi



Şekil 3.30 “1:10” model strain gauge balans sistemi



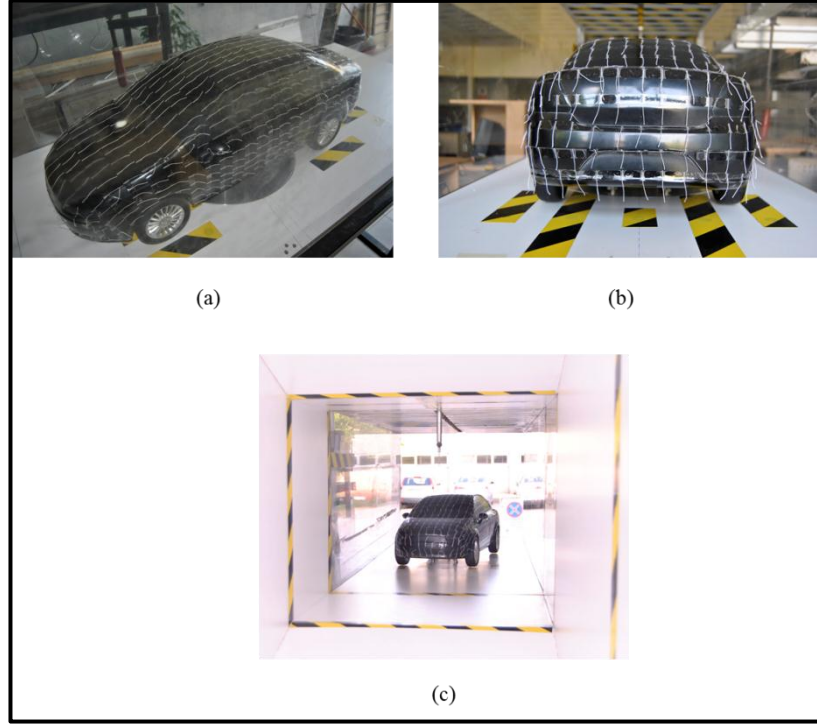
Şekil 3.31 “1:5” model balance sistemi kalibrasyon eğrisi



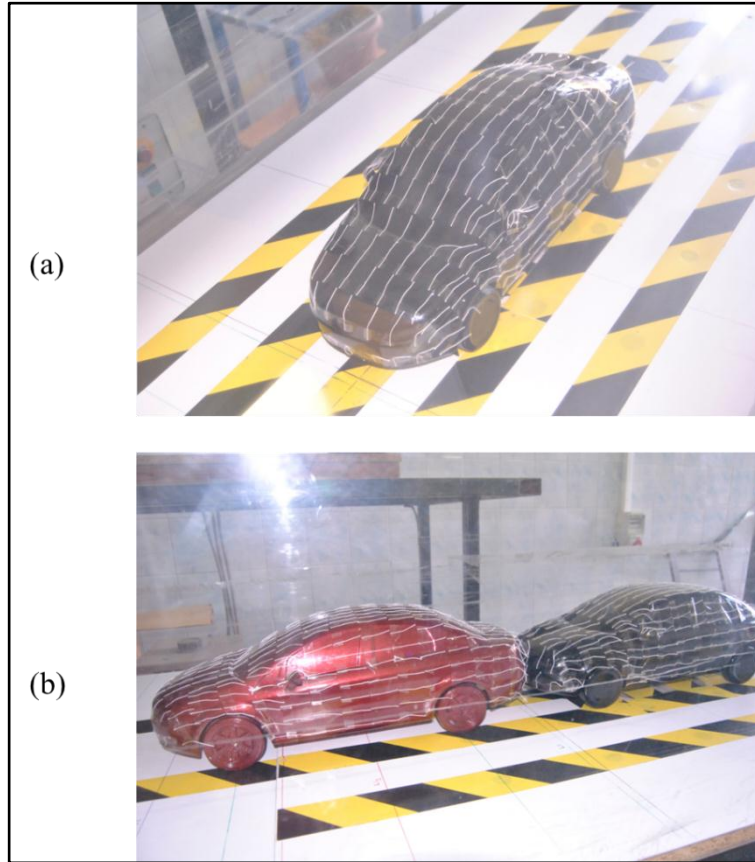
Şekil 3.32 “1:10” model strain gauge balans sistemi kalibrasyon grafiği

3.2.4. Modeller Üzerindeki Yüzey Akım Görüntülemeleri

Modeller üzerindeki akım görüntüleme işlemi iplikcik metoduyla gerçekleştirilmiştir (SAE J2084, 1993.). **Şekil 3.33** de 1:5 model üzerindeki iplikciklerin yerleşimi görülmektedir. Görüntülemeler $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ yanal rüzgar açılarında 30 m/s tünel hava hızında gerçekleştirilmiştir (**Şekil 3.33 (c)**). 1:10 ölçekli modelde ise $\beta = 40^\circ$ yanal açığa kadar iplikcik testleri gerçekleştirilmiştir. Tandem pozisyonda birbirlerini yakın takip eden iki adet 1:10 ölçekli model üzerindeki akım karakteristikleri de iplikcik metoduyla görüntülenmiştir. **Şekil 3.34 (a)** da $\beta = 0^\circ$ yanal açısında **(b)** de ise $x/L = 0$ pozisyonu için model üzerindeki iplikcikler görülmektedir.



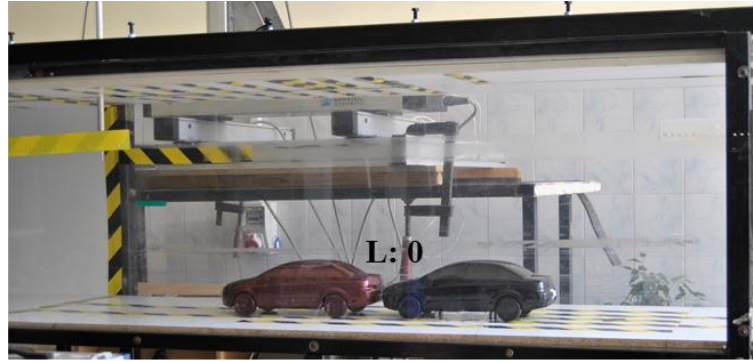
Şekil 3.33 (a) Perspektif görünüm (b) arkadan görünüm (c) β yanal açılı görünüm



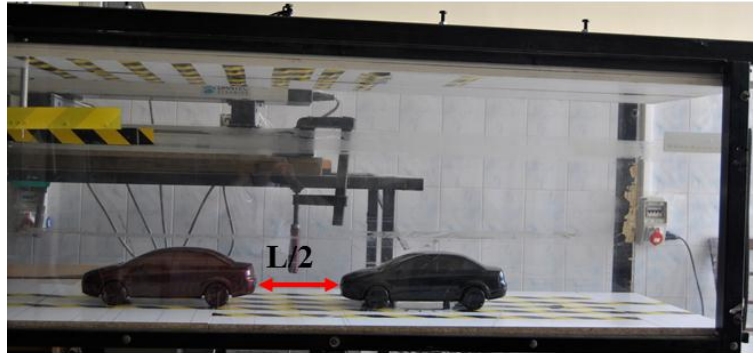
Şekil 3.34 “1:10” ölçekli model iplikcik testleri

3.2.5. Birbirini Yakın Takip Eden İki Araç Modeli Aerodinamik Analizleri

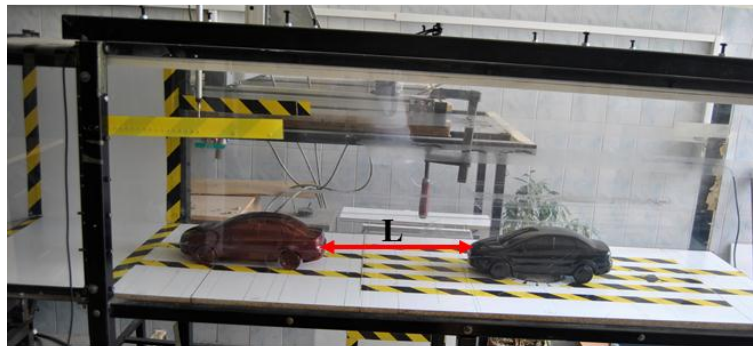
UURT hava tüneli boyut kısıtından dolayı deneysel testler iki adet aynı 1:10 ölçekli model aracın $x/L = 0, 1/2, 1$ ara mesafelerinde 30 m/s serbest hava akımında gerçekleştirilmiştir. C_d değerleri $\beta = 0^\circ$ yanal açı konumunda alınırken C_p değerleri yalnızca simetri eksenini boyunca ölçümlenmiştir. Şekil 3.35 (a),(b),(c) de UURT tüneli içerisinde 1:10 model iki aracın pozisyonları görülmektedir.



(a)



(b)



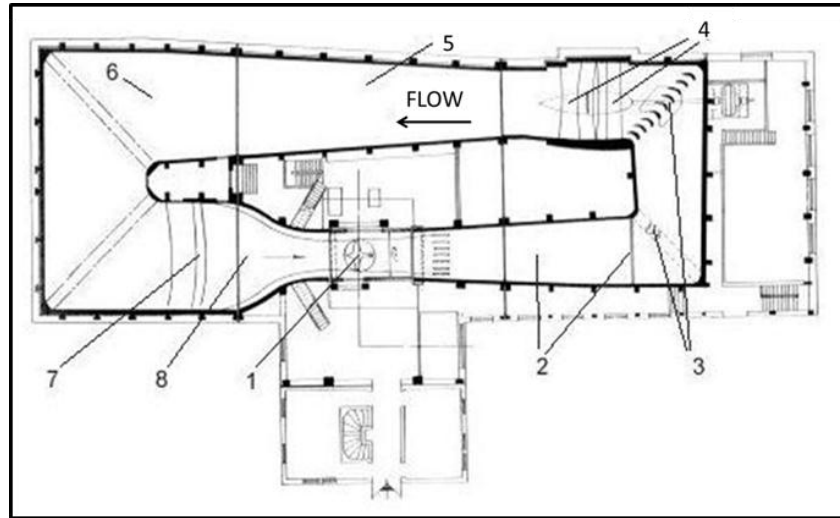
(c)

Şekil 3.35 UURT 1:10 ölçekli iki araç tünel konumları (a): L0 (b): L/2 (c): L

Statik basınç ölçümleri 16 kanallı Pressure Systems datalogger ile gerçekleştirilirken sürükleme kuvveti ölçümleri 1:10 ölçekli model için tasarlanan strain gauge balans sistemi vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.

3.3 ART (Ankara Rüzgar Tüneli) Testleri

Ankara Rüzgar Tüneli Tubitak-SAGE tarafından yönetilmekte olup kapalı devre bir rüzgar tüneldir. Kapalı devre rüzgar tünelleri akım kalitesinin yüksek olması ve gürültü, enerji sarfiyatı konularındaki avantajlarından dolayı tercih edilmektedir. Şekil 3.36 de ART tünelinin şematik görünüşü verilmiştir. Tünelin teknik spesifikasyonları da Çizelge 3.6 da görülmektedir.



Şekil 3.36 Ankara Rüzgar Tüneli (ART) 1. test bölümü 2. ilk difüzör 3. Birinci ve ikinci dönüş kanatçıkları 4. Fan 5. İkinci difüzör 6. Dönüş kanatçıkları 7. Akış düzeltici elemler 8. dinlenme odası ve daralma konisi

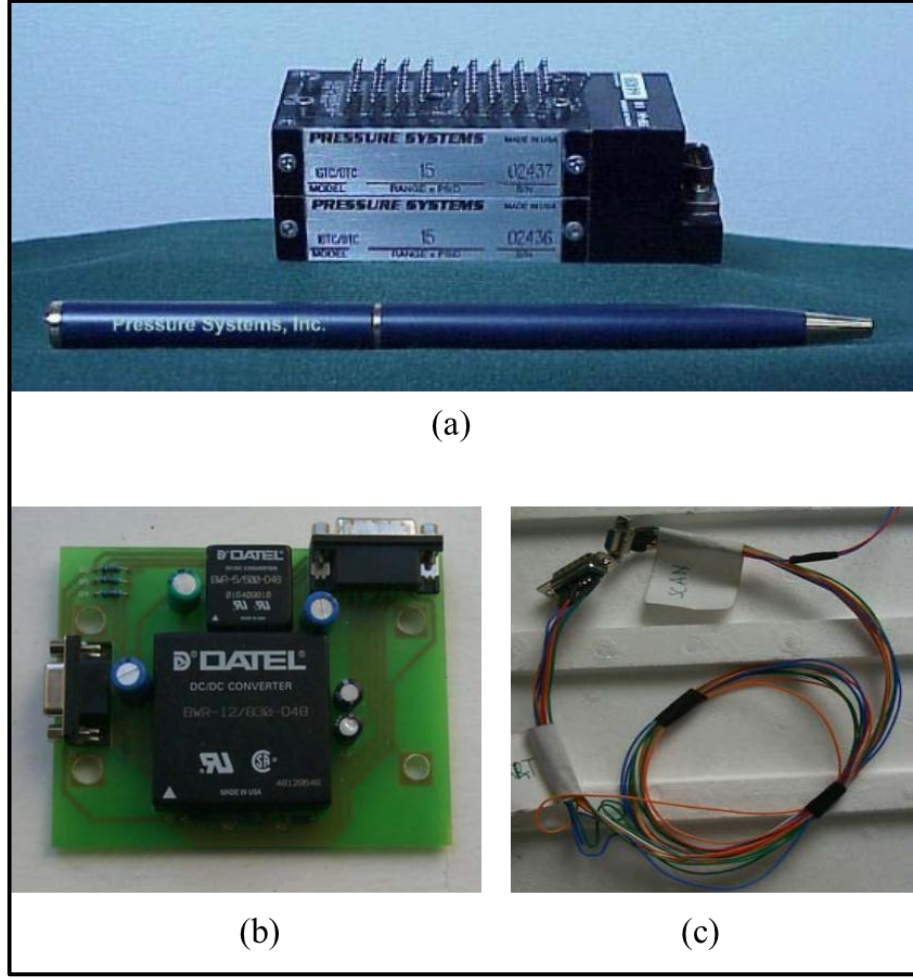
Çizelge 3.6 ART Teknik özellikleri

Tip	yatay kapalı devre
Test bölümü	uzunluk: 6.1 m, genişlik: 3.05 m, yükseklik : 2.44 m
Max Test Hızı	90 m/s
Fan Tipi	Axial
Fan Gücü "kW(HP)"	750kW (1000HP)
Türbülans şiddeti	0.5%
Daralma oranı	7.5
Blokaj oranı	1% (1:5 ölçekli Fiat Linea modeli için)

ART testleri UURT testleriyle karşılaştırma yapılabilmesi için 10, 20, 30 m/s rüzgar hızlarında gerçekleştirilmiştir. $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ yanal açılarda model üzerindeki statik basınçlar ve sürükleme kuvvetleri ölçülmüştür. Modelin tünel deney odasının içerisindeki görünümü **Şekil 3.37** de verilmiştir. Deney esnasında model aracın yüzeyi üzerindeki basınç ölçümlerinde Pressure Systems firmasına ait 64 kanallı basınç ölçer (**Şekil 3.38 (a)**) kullanılmıştır. 64 kanallı basınç ölçer, üzerinde DC/DC dönüştürücü olan elektronik kart ve veri toplama ara kablosu (**Şekil 3.38 (b)** ve **(c)**) ile birlikte kullanılmıştır.



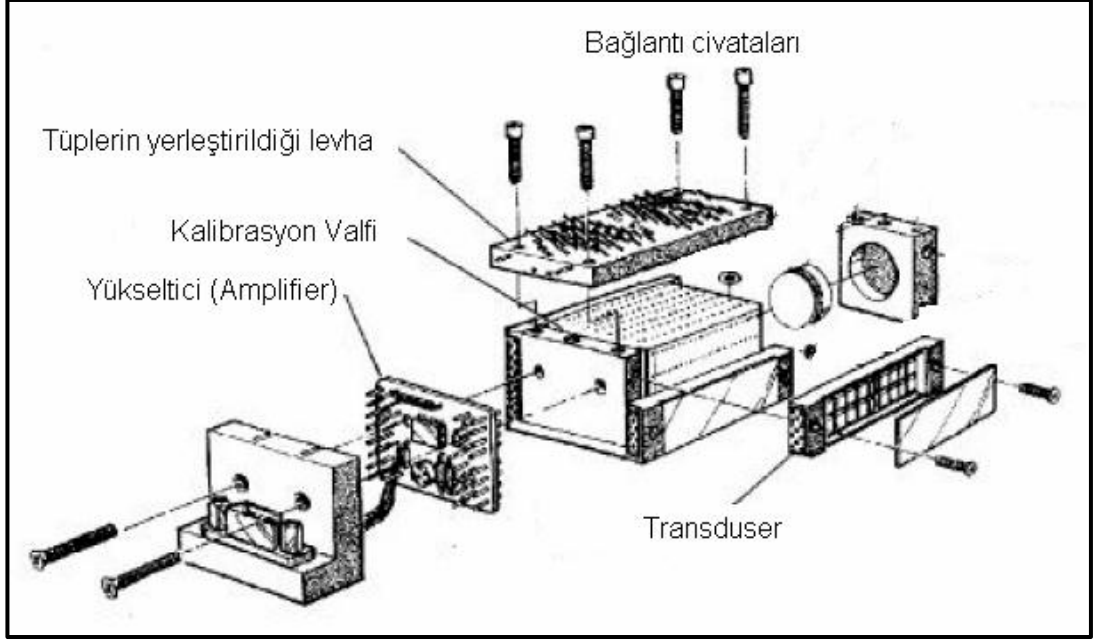
Şekil 3.37 “1:5” model ART tünel deney odası yerleşimi



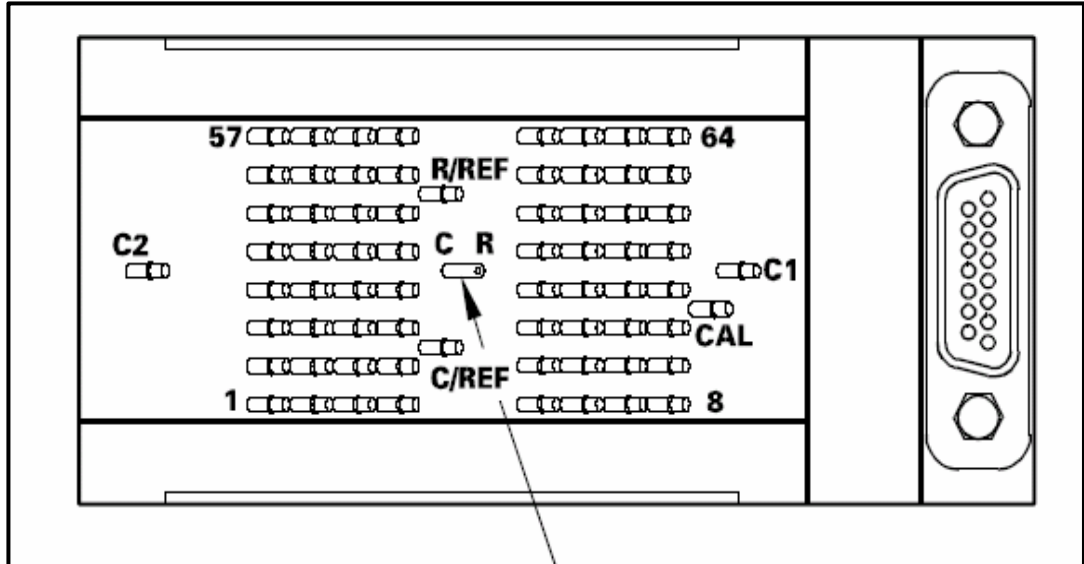
Şekil 3.38 (a) 64 kanallı elektronik basınç algılayıcı (b) (c) data toplama sistemleri (İnce, 2007)

Küçük tip çoklu basınç ölçer, çoklu basınç ölçüm işlemleri için tasarlanmış on-line kalibrasyon yeteneğine sahip her kanalı duyarlı olan bir basınç ölçerdir. Yüksek transduser yoğunluk kriterine göre tasarlanmış olan cihaz, kısıtlı hacimlerde de basınç ölçerlerin kolaylıkla kullanılmasına izin verir. Yüksek yoğunluklu transduserler 16, 32 veya 64 silikon basınç ölçücüden meydana gelir. Basınç ölçücü, saniyede 20000 okuma hızına kadar bir ikili adres kodu ile adreslenebilir. İlave olarak analog çıktılar ± 4 VDC nominal tam skala çıktı sağlamak için cihazın içinde bulunan yükseltici ile güçlendirilmelidir. Bu basınç ölçerler, on-line olarak kendiliğinden kalibre edilmesine izin veren bir kalibrasyon valfına sahiptir. Bu valf pünomatik olarak çalıştırma ve kalibrasyon konumları arasında kullanılır. Kalibrasyon konumunda iken bütün basınç ölçücüler kalibrasyon basıncının hepsine uygulanabilmesi için genel bir kalibrasyon

hattına yönlendirilir. On-line kalibrasyonda statik hatalar \pm % 0,05'den azdır. Şekil 3.39' da bileşenleri ve Şekil 3.40'da port görevleri verilen standart 64 kanallı basınç ölçer sıcaklık kompanzasyonlu olup teknik ve geometrik özellikleri Çizelge 3.7'de verilmiştir (İnce 2007).



Şekil 3.39 Çoklu basınç ölçer bileşenleri (İnce, 2007)



Şekil 3.40 Çoklu basınç ölçer üstten görünüş (İnce, 2007)

Çizelge 3.7 64 kanallı basınç algılayıcı teknik özellikleri

No	Tanımı	Teknik ve Geometrik Özellik	
1	Üretici firma	Pressure System	
2	Seri numarası	64933A	
3	Basınç ölçer kanal sayısı	64	
4	Çalışma sıcaklığı	(-25°C)-(+80°C)	
5	Basınç ölçer toplam ağırlığı	140 gr	
6	Ölçüm biçimi	Fark	
7	Basınç ölçüm aralığı	±1 psi	
8	Uygulanabilir azami basınç	%400	
9	Basınç ölçer boyutları	3.3 cm x 3.94 cm x 8.0 cm (genişlik x yükseklik x uzunluk)	
10	Okuma hızı (Scan Rate)	Dakikada 20.000 veri	
11	Dinamik frekans cevabı	50 Hz	
12	Kullanılabilir ortam	Gaz	
13	Her bir kanal çapı	1.016 mm (0.04 inch)	
14	Pnömatik bağlantı	1.016 mm	
15	Statik ölçüm doğruluk (static accuracy) (non-linearity, hysteresis, and non-repeatability)	Tipik	Kötü durum
		± 0.06 %	± 0.1 %
16	Isıl sıfır hatası	Tipik	Kötü durum
		± 0.07%	± 0.2 %

1:5 modelin sürükleme kuvveti ölçümleri UURT tünelde kullanılan strain gauge balans sistemi ile gerçekleştirilmiştir.

3.4 Belirsizlik Analizi

Doğası gereği her ölçüm aynı zamanda hata içerir. Bu hatalar minimize edilirken tamamıyla giderilmesi mümkün değildir. Hatalar iki şekilde sınıflandırılabilir; (i) ölçüm araçlarındaki elektronik gürültü ve salınımlardan kaynaklanan random hatalar, (ii) aynı büyüklüklerin tekrar ölçümleri sırasında ortaya çıkan ve nedeni bilinmeyen sistematik hatalar (Holman 1971). Bu hatalar dışında ölçüm alanlardan kaynaklanan hatalar da olabilir. Bu çalışmada ölçümlerin belirsizlik analizinde random ve sistematik hatalar dikkate alınmıştır.

Ölçümlerdeki belirsizlikleri tanımlayan bir çok metot vardır. Bu metodlar (Holman 1971, Moffat 1988) de belirtildiği gibi B şeklindeki herhangi bir ölçüm ve bu ölçüme etki eden n değişik parametre için bağımsız değişkenlerin B ölçümü üzerindeki belirsizliği (3.2) deki gibi belirtilebilir;

$$B = B(x_1, x_2 \dots \dots \dots x_n) \quad (3.2)$$

$$w_B = \left[\left(\frac{\partial B}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial x_2} \right)^2 \dots \dots \dots \left(\frac{\partial B}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.3)$$

$w_1, w_2, \dots \dots \dots w_n$ her bir değişkene ait hata miktarlarını, B ise ölçümdeki toplam belirsizliği göstermektedir.

3.4.1. Hız Ölçümündeki Belirsizlik

Kızgın tel (Hot-wire) ile hız ölçümü akış alanında çok ince dairesel bir telden taşınım ile olan ısı transferi bilgisine dayanmaktadır. Telden olan ısı transferi ile akış hızı arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Holman 1971) :

$$Nu \left(\frac{T_{\text{çevre}}}{T_{\text{akış}}} \right)^m = A + Re^n \quad (3.4)$$

Kızgın tel ile hız ölçümünde hem çevresel hem de ölçüm metodunun kendisinden kaynaklanan bir çok belirsizlik kaynağı vardır. **Çizelge 3.8** de hız ölçümünde karşılaşılabilecek belirsizlikler görülmektedir (Jorgensen). Tablodan da görüleceği üzere hız profillerinin ölçümündeki toplam belirsizlik değeri %2.07 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.8 Hız profillerinin ölçümündeki belirsizlikler

Elektronik gürültü ve frekans algılamasından kaynaklanan belirsizlik (%)	0.5
Kalibrasyon ve kalibrasyon işlemi esnasında meydana gelen belirsizlikler (%)	1
Lineerleştirme esnasında oluşan belirsizlik (%)	0.4
A/D dönüştürücü kartın 10V aralığında 12bit çözünürlüğünden oluşan belirsizlik	0.3
Probe pozisyonundan kaynaklanan belirsizlik (%)	0.016
Ortam basıncı kaynaklı değişim(10kPa) (%)	0.6
1 °C sıcaklık farkından dolayı hava yoğunluğundan kaynaklanan belirsizlik (%)	0.4
1 °C çalışma sıcaklığı nedeniyle probe dan kaynaklanan belirsizlik (%)	1.5
TOPLAM BELİRSİZLİK (%)	2.07

3.4.2. C_p, C_d Hesaplarındaki Belirsizlikler

C_p, C_d boyutsuz katsayıların hesabındaki belirsizlikler **Çizelge 3.9** ve **Çizelge 3.10** da verilmiş olup %1.13 ve %1.23 seviyelerindedir.

Çizelge 3.9 C_p hesabındaki belirsizlik

Statik basınç ölçümü belirsizlikleri (%)	0.15
Anlık hız ölçümündeki belirsizlik (%)	0.5
Ortam yoğunluğu ölçümündeki belirsizlik (%) ($\rho = P/(RT)$)	1.0012
<i>Ortam basıncı ölçümündeki belirsizlik (%)</i>	<i>0.05</i>
<i>Ortam sıcaklığı ölçümündeki belirsizlik (%)</i>	<i>1</i>
TOPLAM C_p ÖLÇÜMÜNDE BELİRSİZLİK (%)	1.13

Çizelge 3.10 C_d hesabındaki belirsizlik

Straingauge balance sistemi belirsizliği (%)	0.5
Anlık hız ölçümündeki belirsizlik (%)	0.5
Ortam yoğunluğu ölçümündeki belirsizlik (%) ($\rho = P/(RT)$)	1.0012
<i>Ortam basıncı ölçümündeki belirsizlik (%)</i>	<i>0.05</i>
<i>Ortam sıcaklığı ölçümündeki belirsizlik (%)</i>	<i>1</i>
TOPLAM C_d ÖLÇÜMÜNDE BELİRSİZLİK (%)	1.23

ART tüneli için benzer çalışma yapıldığında belirsizlikler C_p için %1.12 ve C_d içinse %1.37 olarak bulunmuştur.

3.5. Sayısal (CFD) Analizleri

Momentum ve kütle transferi işlemlerini tanımlamak için kullanılan denklemler Navier-Stokes denklemleri olarak bilinir. Bu kısmi diferansiyel denklemler 19.yy başlarında türetilmiş ve analitik olarak çözülememiştir. Fakat sayısal olarak çözülebilirler. Günümüzde ise bu denklemlerin çözümü geliştirilen yazılımlarla hem de paket programlar yardımıyla yapılmaktadır. Bu çalışmada nümerik analizlerde FIAT' ın da standart kodu olarak kullandığı Star-CCM+ yazılımı kullanılmıştır. Star-CCM+ yazılımı aşağıda verilen süreklilik ve momentum denklemlerini sonlu elemanlar yöntemiyle çözmektedir. Bu yöntemde çözüm alanı kontrol hacmi olarak adlandırılan küçük bölümlere ayrılır. Denklemler her bir kontrol hacmi için ayrıklaştırılarak iteratif olarak çözülür. Sonuç olarak her kontrol hacmindeki değişkenler tüm akış alanı (domain) içinde baştan sona tespit edilir. Böylece akışın davranışı tespit edilmiş olur.

Nümerik CFD analizlerinde kullanılan kütle ve momentum korunum denklemleri en genel haliyle aşağıdaki gibidir.

Süreklilik denlemi :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.5)$$

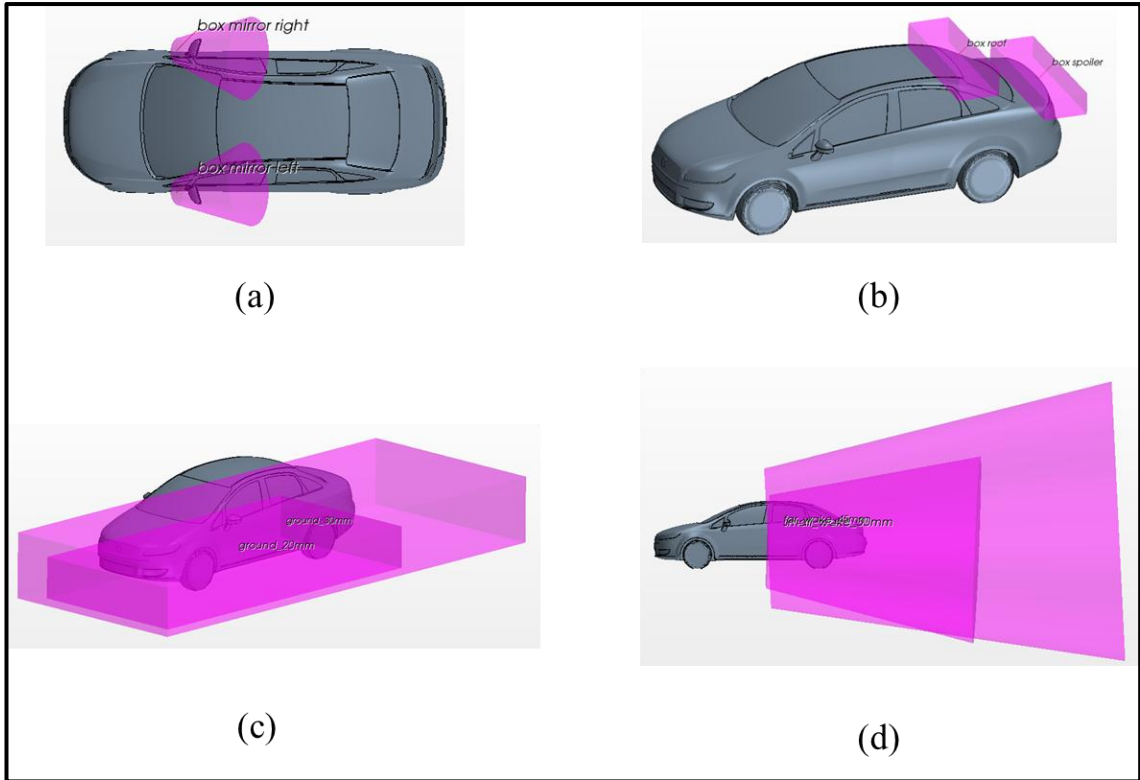
Momentum denklemleri x, y ve z yönlerinde sırasıyla ;

$$\rho \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} - \rho \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \quad (3.6)$$

$$\rho \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} - \rho \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) \quad (3.7)$$

$$\rho \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} - \rho \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \quad (3.8)$$

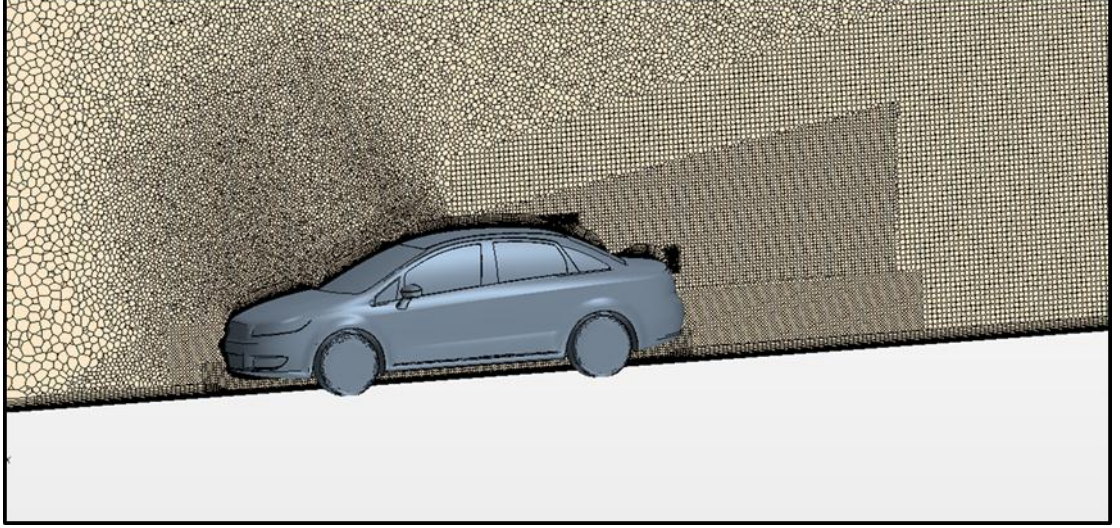
Su geçirmez model ANSA kullanılarak oluşturulmuştur. StarCCM+ yazılımında bulunan otomatik ağ(mesh) sistemiyle çözüm alanı polyhedral veya daha yaygın olarak hexahedral kontrol hacimlerine bölünür. Ağ(mesh) oluşturulurken dikkat edilmesi gereken önemli durumlardan biri de model duvar yakın bölgelerinin doğru olarak modellenebilmesidir. Mevcut kod çözüm alanında model duvarı üzerini otomatik olarak yüksek-kalite ekstrüzyon-tabaka ağ ile modeller. Çözüm alanında ağ(mesh) oluştururken 8 adet hacim kaynağı kullanılmıştır. 2 adet kaynak yan dikiz aynaları için, 2 adet yere yakın alan için ve 4 adet kaynak da arka ve iz bölgelerinin modellenmesi için kullanılmıştır (Şekil 3.41).



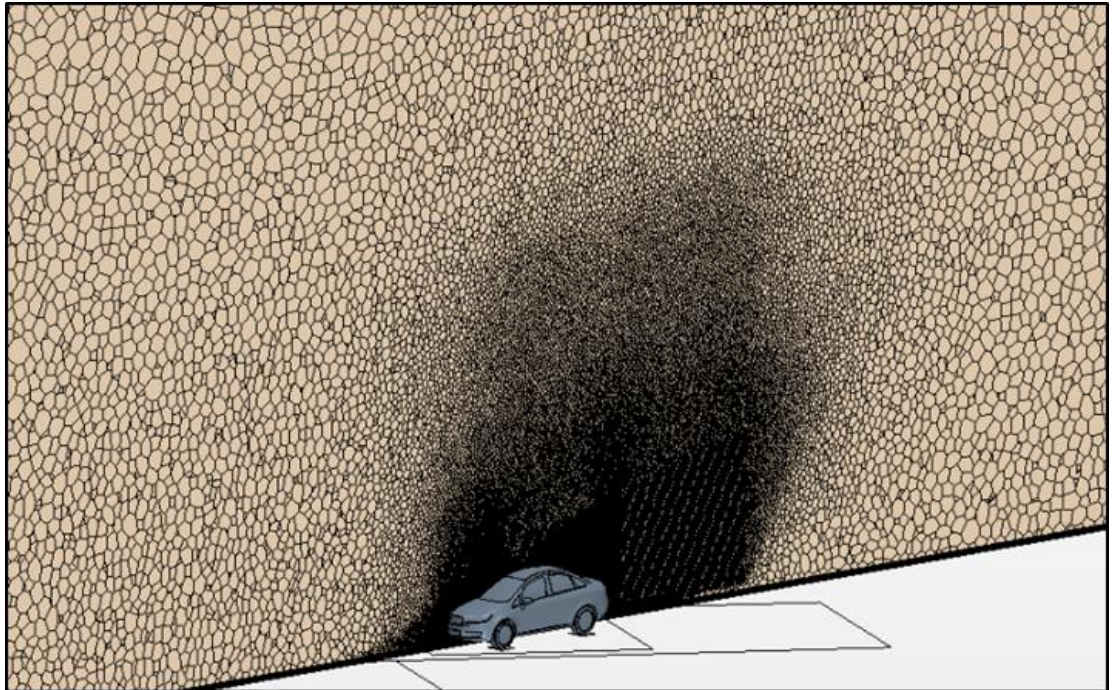
Şekil 3.41 Çözüm alanı mesh kaynakları (a) Dış dikiz ayna bölgesi (b) arka bölge (c) yere yakın bölge (d) ard iz bölgesi

Çözüm alanı mesh dağılımları örnek olarak $\beta = 0^\circ$, 30° de Şekil 3.42 ve Şekil 3.43 de birbirini yakın takip eden iki araç simülasyonunda $x/L = 0$ ve 1 konumundaki çözüm alanları da sırasıyla Şekil 3.44 ve Şekil 3.45 de verilmiştir. Bu çalışmada 10, 20, 30 m/s serbest akım hızlarında 1:5, 1:10 model Fiat Linea aracı değişik β yanal açılarında sayısal olarak çözülmüş ve C_p dağılımları ve C_d değerleri hesaplanmıştır. Deneysel

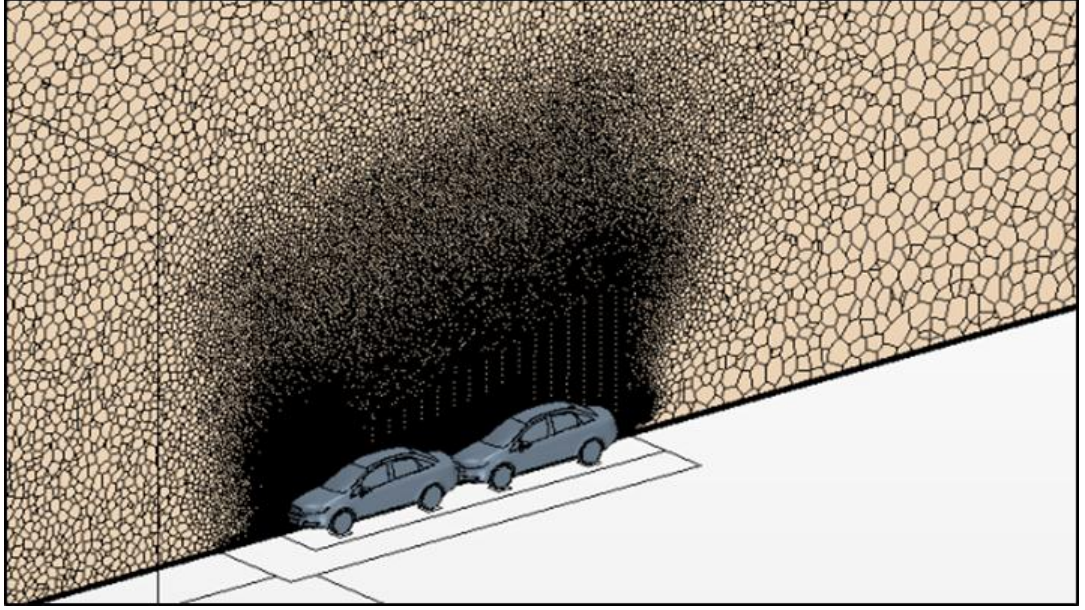
çalışmalarla kıyaslanabilmesi açısından değişik blokaj oranlarında da analizler gerçekleştirilmiştir. Birbirini yakın takip eden araç simülasyonu da 1:5 ölçekli model için çalışılmış ve deneysel UURT testleriyle karşılaştırılmıştır. Tüm bu simülasyonlarda kullanılan ağ eleman sayıları **Çizelge 3.11** de özetlenmiştir.



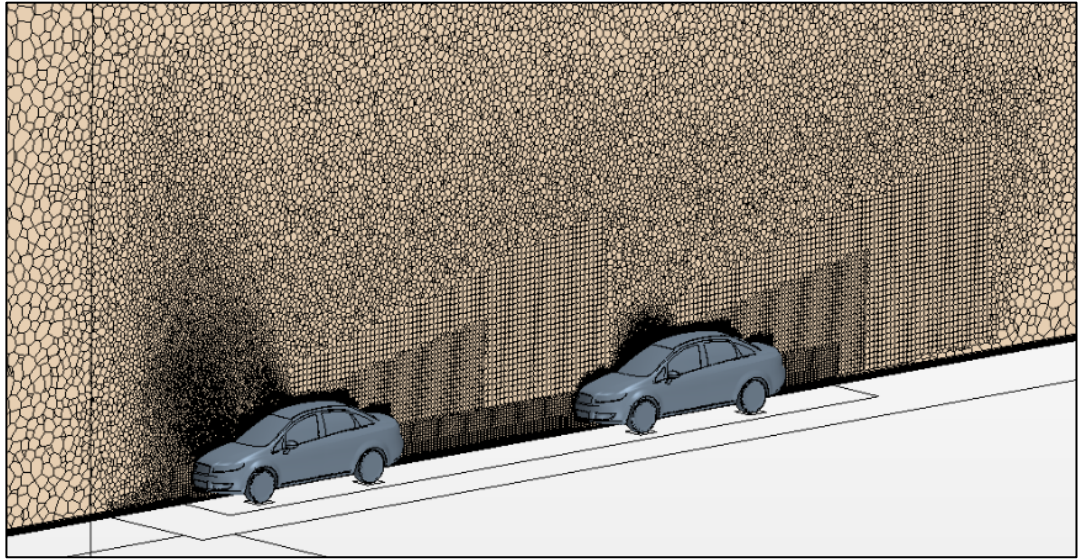
Şekil 3.42 Sayısal çözüm alanı orta kesit ağ(mesh) dağılımı ($\beta = 0^\circ$)



Şekil 3.43 Sayısal çözüm alanı orta kesit ağ(mesh) dağılımı ($\beta = 30^\circ$)



Şekil 3.44 Birbirini yakın takip eden iki araç sayısal çözüm alanı ($x/L = 0$)



Şekil 3.45 Birbirini yakın takip eden iki araç sayısal çözüm alanı ($x/L = 1$)

Çizelge 3.11 Sayısal çözümlerde kullanılan eleman sayıları

Analizler	Milyon ağ eleman
1:5 model $\beta: 0$	13.0
1:5 model $\beta: 5$	12.6
1:5 model $\beta: 10$	11.1
1:5 model $\beta: 20$	12.2
1:5 model $\beta: 30$	12.4
1:5 model $\beta: 40$	13.4
1:5 20% blokaj	16.0
1:10 5% blokaj	12.7
1:5 Ardışık L0	14.7
1:5 Ardışık L1/2	11.0
1:5 Ardışık L1	12.5

3.5.1. Türbülans modelleri

Laminer akışlarda kullanılan süreklilik ve Navier-Stokes denklemleri dört bilinmeyenli (u, v, w, p) dört denklem setini oluşturmaktadır. Matematiksel olarak bu denklem seti kapalıdır, yani çözülebilmesi için gerekli şartı sağlamıştır. Ancak türbülanslı akışlara ait Reynolds denklemlerinin oluşturulması için yapılan ortalama işlemi neticesinde altı ekstra bilinmeyen (Reynolds gerilmeleri) ortaya çıkmaktadır. Bunun yanında zaman ortalamalı skalar taşınım denklemlerinde de üç ekstra terim oluşmaktadır. Türbülans modellerinin temel amacı ortaya çıkan bu ekstra terimleri çözmek üzere hesaplama yöntemleri geliştirmektir. Mühendislik uygulamalarında en çok kullanılan ve zaman-ortalama akış denklemlerini temel alan klasik türbülans modelleri aşağıdaki gibidir ;

- Karışma uzunluğu modeli (Mixing length model)
- Spalart – Allmaras modeli (One equation model)
- K- ε modeli (two-equation model)

Standart

RNG

Düzeltilmiş(Realizable)

- K- ω modeli (two-equation model)

Standart

SST (Shear stress transport)

- Reynold gerilim denklemi modeli (Reynold stress equation model)
- Cebirsel gerilim modeli (Algebraic stress model)

Bu modellerin hepsi kullanılmakla beraber K- ε modeli pratikte en çok kullanılan ve deneysel verilerle karşılaştırılarak güvenilir sonuçlar verdiği belirlenen modeldir. Türbülanslı akışlarda, türbülans seviyesi ve türbülans gerilimleri akış içerisindeki her noktada değişim göstermektedir. Karışma uzunluğu modeli, bu gerilimleri tanımlamak üzere türbülans viskozitesini pozisyonun fonksiyonu olarak veren basit bir cebirsel denklemle ifade etmektedir. Buna karşın K- ε modelinde, türbülans viskozitesi, türbülansın üretimi ve yutulumu etkilerini de içermektedir. Bu amaçla biri türbülans kinetik enerjisi, k diğeri ise türbülans kinetik enerji yutulma miktarı (dissipation), ε için iki taşınım denklemi çözülmektedir

İki denklemlili türbülans modelleri zaman – hassasiyet arasında optimum sonucu sunduğundan endüstride ve araştırmalarda sıklıkla kullanılmaktadır. İki denklemlili modeller sıfır ve bir denklemlili türbülans modellerine göre daha karmaşıktır. Hız ve uzunluk ölçeği iki ayrı transport denklemi ile çözülmektedir.

Std. K- ε ve Std. K- ω tabanlı iki denklemlili türbülans modelleri Reynolds gerilmeleri ile ortalama hız gradyeni ve türbülans viskozitesini gradyen difüzyon hipotezi ile ilişkilendirmektedir. Türbülans viskozitesi, türbülans hızı ve türbülans uzunluk ölçeğinin ürünü olarak modellenir. İki denklemlili modellerde türbülans hız ölçeği türbülans kinetik enerjisinden, türbülans kinetik enerjisi de türbülans kinetik enerjisi transport denkleminde hesap edilir. Türbülans uzunluk ölçeği ise genellikle türbülans kinetik enerji ve yayılım hızından (dissipation rate) hesaplanır. Türbülans yayılım hızı için yine ayrı bir transport denklemi çözülmektedir.

3.5.1.1. K- ε , Realizable K- ε türbülans modeli

Standard K- ε modeli;

Hızdaki dalgalanmaların varyansına türbülans kinetik enerjisi denir ve “ k ” ile gösterilir.

$$k = \sqrt{u'^2 + v'^2 + w'^2} \quad (3.9)$$

Birimi uzunluğun karesinin zamanın karesine oranıdır (Örneğin, m^2/s^2). “ ϵ ” ise türbülans eddy yayılımıdır (hız dalgalanmalarının yayılım hızı) ve birimi birim zamandaki türbülans kinetik enerjisidir (Örneğin, m^2/s^3).

Std. K- ϵ modeli denklem sistemine iki yeni denklem ve iki yeni bilinmeyen ekler. Yeni durumda süreklilik denklemi şöyle yazılır (Launder ve Spalding 1974).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (3.10)$$

Momentum denklemi de şu şekilde belirtilir :

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)] + S_M \quad (3.11)$$

Burada S_M dış kuvvetlerin toplamı, μ_{eff} türbülans viskozitesini de içeren efektif viskozite, p' ise modifiye basınçtır.

Std. K- ϵ modeli eddy viskozite yaklaşımına dayanmaktadır.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.12)$$

Burada μ_t türbülans viskozitesidir. Std. K- ϵ modeli türbülans viskozitesini türbülans kinetik enerjisi ve türbülans yayılım oranı ile ilişkilendirir.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.13)$$

Burada C_μ sabittir (bkz. **Çizelge 3.12**).

Çizelge 3.12 Standard K-ε sabitleri (Launder ve Spalding 1974)

Std. k-ε Sabitleri	Değeri
C_μ	0.09
$C_{\varepsilon 1}$	1.44
$C_{\varepsilon 2}$	1.92
C_k	-
C_s	-

Türbülans kinetik enerjisi ve türbülans kinetik enerjisi yayılım hızı ayrı ayrı çözülen iki transport denkleminde hesaplanmaktadır.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb} \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon b}) \quad (3.15)$$

Burada $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, C_k , C_ε model sabitleridir (**Çizelge 3.12**).

Düzeltilmiş(Realizable) K-ε modeli;

- Standart K-ε modeli ile aynı türbülans kinetik enerji denklemi kullanılır.
- ε için denklem geliştirilmiştir.
- sabit yerine değişken C_μ kullanılır.
- Düzeyssel ve yuvarlatılmış akıslarda (yuvarlatılmış akısların yayılmasını oldukça doğru ifade eder.), güçlü ters basınç gradyanları veya ayrılmaların olduğu sınır tabakalarda, döngülü ve sirkülasyonlu akımlarda ve güçlü akım çizgili eğrisel akımlarda oldukça iyi performans sergiler.

Standart K-ε modelinden farklılıklar:

- Türbülans viskozite için alternatif formülasyondur.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{U^* k}{\varepsilon}} \quad (3.16)$$

A_0, A_s ve U^* hız gradyanlarının fonksiyonudur.

Türbülans kinetik enerjisinin yayılımı, ε için yeni transport denklemi aşağıda

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\partial \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (3.17)$$

$C_1, C_2, C_{1\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, \sigma_\varepsilon$ model sabitleridir, S_ε kullanıcı tarafından tanımlanan kaynak terimidir, G_b ise buoyancy kaynaklı türbülans üretimidir.

Bu çalışmada Realizable K- ε two layer türbülans modeli kullanılmıştır. Two layer yaklaşımı ilk defa Rodi, (1991) tarafından gündeme getirilmiştir. Modelde kullanılan katsayılar aynı olmakla birlikte y^+ duvar fonksiyonu adaptasyonunda ilave bir esneklik kazanmaktadır.

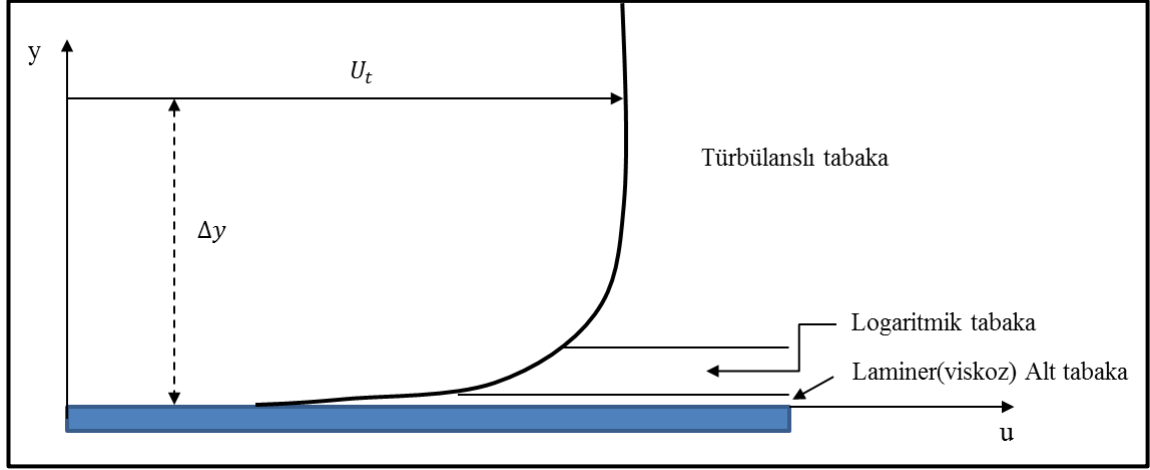
Düzeltilmiş (Realizable) K- ε modeli Standard K- ε modelinden bir çok uygulamada daha iyi sonuçlar vermektedir. Çalışmalar göstermektedir ki, özellikle kompleks, ayrılmış akışlarda Realizable K- ε türbülans modeli tüm K- ε modellerinden daha iyi, gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir (Shabbir ve ark., 1995).

3.5.1.2 Duvar Yakını Modellemesi

Kaymaz duvar yakınında yüksek gradyenler oluşur. Ayrıca viskoz etkilerde çok yüksektir. Bu bölgeler sayısal çözümde aşağıda belirtilen sorunları ortaya çıkarır.

- Duvardaki viskoz etkilerin nasıl hesaplanacağı
- Sınır tabaka bölgesinde akış değişkenlerindeki ani değişimin nasıl hesaplanacağı

Deneyle ve matematiksel analizler göstermiştir ki duvar yakını iki ayrı bölge olarak incelenebilir. Akışın neredeyse laminer olduğu ve momentum ve ısı transferinde viskozitenin dominant olduğu viskoz alt tabakadır. Diğer ise duvardan biraz daha uzak olan logaritmik bölge (**Şekil 3.46**).



Şekil 3.46 Tam Gelişmiş Türbülanslı Sınır Tabaka Hız Profili

Logaritmik bölgede, hız dağılımı logaritmik fonksiyonla kabul edilebilir doğrulukta temsil edilebilmektedir ve bu sayede akışkan içerisindeki kayma gerilmeleri hızın fonksiyonuyla sayısal olarak temsil edilebilmektedir. Bu yaklaşıma duvar fonksiyonu (wall function) yaklaşımı denir.

Duvar yakınına hesaplamada iki temel yaklaşım vardır.

- Duvar fonksiyonu yaklaşımı
- Düşük Reynolds Sayılı Türbülans Modelleri

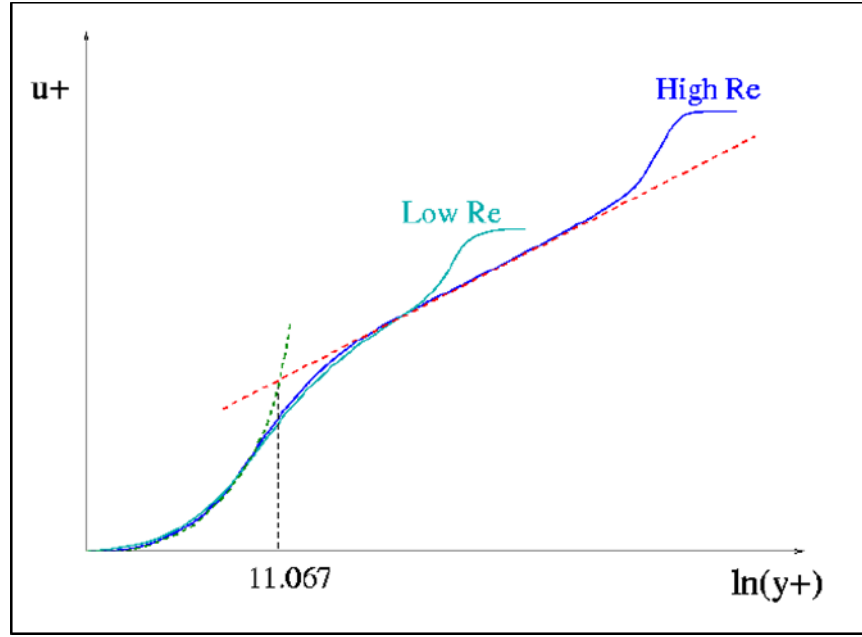
Duvar fonksiyonu yaklaşımında duvara yakın bölgeler sayısal içerisine alınıp çözülmeyen, logaritmik duvar kanunu ile hıza bağlı bir fonksiyon ile temsil edilirler. Bu sayede bilgisayar hafızası ve çözüm zamanından tasarruf edilir. Bununla beraber özellikle ayrılmış akış ve yüksek eğimli duvarlarda gerçek sonuçtan sapmalar meydana geldiği bilinmektedir.

Düşük Reynolds sayılı türbülans modeli kullanma yaklaşımı ise, duvar yakınında özellikle hız gradyanını yakalayacak yoğunlukta sayısal ağ kullanarak sayısal olarak çözüm elde etmektir. Bu yaklaşım bilgisayar hafızası ve çözüm süresi bakımından devavantaj getirirse de akış ayrılmasında daha hassas sonuçlar vermektedir.

Duvar yakınında yoğun sayısal ağ gereksinimi şöyle açıklanabilir. y^+ cidardan dik boyutsuz uzaklık olarak tanımlanır ve şu şekilde ifade edilir:

$$y^+ \equiv \frac{u_* y}{\nu} \quad (3.18)$$

Burada, u_* , boyutsuz sürtünme hızı, y duvardan dik uzaklık, ν , kinematik viskozitedir. $y^+ < 11.06$ bölgesi viskoz laminar alt tabaka olarak ifade edilir. Düşük Reynolds sayılı türbülans modelleri ile hassas sonuçlar olmak için bu bölgede en az 10 adet ağ noktası (node) olmalıdır. y^+ ile boyutsuz hız, u^+ nın değişimi Şekil 3.47 de görülmektedir.



Şekil 3.47 y^+ ile boyutsuz hız, u^+ nın değişimi

Bu çalışmada Düzeltilmiş(Realizable) K- ϵ , iki-tabaka türbülans yaklaşımı (two-layer approach) kullanılmıştır. İki-tabaka (two-layer) yaklaşımı, düşük Reynolds sayısı yaklaşımına alternatif olup K- ϵ modelinin viskoz alt tabakada da kullanımına imkan sağlamaktadır. Bu yaklaşımda çözüm alanı iki tabakaya ayrılmaktadır. Duvara yakın olan bölgede türbülans yutulmuş oranı (ϵ) ve türbülans viskozitesi (μ_t) duvardan olan mesafenin fonksiyonu olarak tanımlanır. Tanımlanmış olan yakın duvar değerleri duvardan uzak bölgede çözülen transport denkleminin sonuçlarından tahmin edilebilmektedir. Türbülans kinetik enerji denklemi tüm çözüm alanı için çözülmektedir. Böylece gerçeğe çok yakın çözümler elde edilebilmektedir. StarCCM+ yazılımında iki tabaka (two-layer) formülasyonu, hem küçük Reynolds sayısı tipi mesh ($y^+ \sim 1$) ile hem de duvar-fonksiyonu tipi mesh ($y^+ > 30$) le de çalışmaktadır.

3.6. Çalışmada Kullanılan Boyutsuz Sayılar

Reynold's Sayısı :

Reynolds sayısı, akışkan içerisindeki atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranını gösteren boyutsuz bir büyüklüktür.

$$Re = \frac{U.L}{\nu} \quad (3.19)$$

Burada;

U : Hava hızı

ν : Havanın kinematik viskozitesi

L : Karakteristik uzunluk

Statik basınç katsayısı (C_p):

Model üzerinde herhangi bir noktadaki statik basınç farkının dinamik basınca oranıdır.

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \quad (3.20)$$

Burada;

P_∞ : Referans basınç

P : Herhangi bir noktadaki statik basınç

ρ : Akışkan yoğunluğu

U_∞ : Serbest akım hızı

Sürüklenme katsayısı (C_d):

Model üzerinde, model eksenine boyunca hesaplanan, bulunan sürüklenme kuvvetinin dinamik basınç ile model eksenine dik kesit ile çarpımından bulunan kuvvete oranıdır.

$$C_d = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A} \quad (3.21)$$

Burada;

F_x : x yönünde (model eksen) sürüklenme kuvveti

ρ : Hava yoğunluğu

U_∞ : Serbest akım hızı

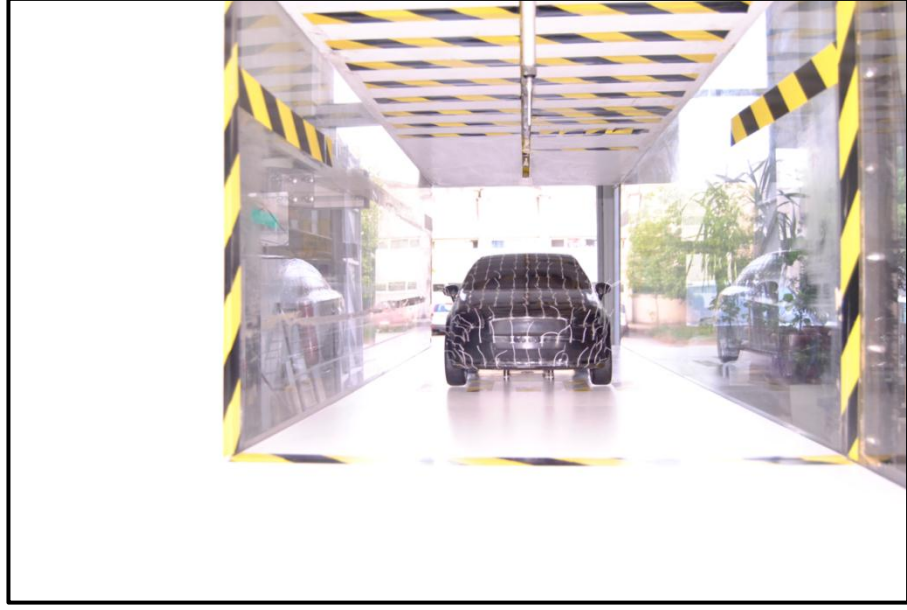
A : Model kesit alanı

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında 1:5 ve 1:10 ölçekli Fiat Linea modeli deneysel olarak UURT (Uludağ Üniversitesi Rüzgar Tüneli) ve ART (Ankara Rüzgar Tüneli) tünellerinde 10 m/s, 20m/s, 30 m/s hızlarında test edilmiştir. Simetri ve yanal eksenlerde C_p dağılımları ölçümlenmiş ve C_d değerleri hesaplanmıştır. Model simetri eksenleri boyunca değişik hızlarda hız profilleri çizdirilmiştir. Elde edilen sonuçlar StarCCM+ sayısal koduyla da çözülerek kıyaslanmıştır. Akış karakterlerinin anlaşılabilmesi için iplikcik metodu uygulanmış ve hem 1:5 ölçekli hem de 1:10 ölçekli modellerde akım görüntülemeleri gerçekleştirilmiştir. UURT testleri yüksek blokaj oranlarında gerçekleştirilmiştir. 1:5 ölçekli model %20 blokaj oranına sahip iken 1:10 model ise %5 blokaj oranına sahiptir. Sonuçların kıyaslanabilmesi açısından CFD çalışmaları deneysel oranlara eşit blokaj oranlarında da test edilmiş ve deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Doktora çalışması kapsamında yanal açı durumlarında aerodinamik analizler gerçekleştirilmiştir. 1:5 model de $\beta: 10^\circ$ ye kadar 1:10 modelde ise $\beta: 40^\circ$ ye kadar testler gerçekleştirilmiş ve CFD analizleriyle kıyaslanmıştır. 1:5 model boyutları nedeniyle UURT testlerinde β max. 10° alınabilmiştir. 1:10 ölçekli iki adet modelle arka arkaya birbirini yakın takip eden iki araç simülasyonları $x/L : 0, 0.5, 1$ pozisyonlarında 30 m/s rüzgar hızında test edilerek modeller üzerindeki C_p ve C_d dağılımları ölçülmüş ve sayısal çözümlerle kıyaslanmıştır. Bu bölümde üstte bahsedilen test ve çalışmalar ayrı ayrı başlıklar altında sunulmuştur.

4.1. Akım Görüntülemesi ve Simetri Ekseni Üzerindeki Hız Profilleri

Akım görüntüleme metodlarından hava tüneli testlerinde yaygın olarak kullanılan iplikcik testi 1:5 ve 1:10 ölçekli modeller üzerinde UURT tüneline gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1, Şekil 4.2).



Şekil 4.1 “1:5” ölçekli model UURT iplikcik testi

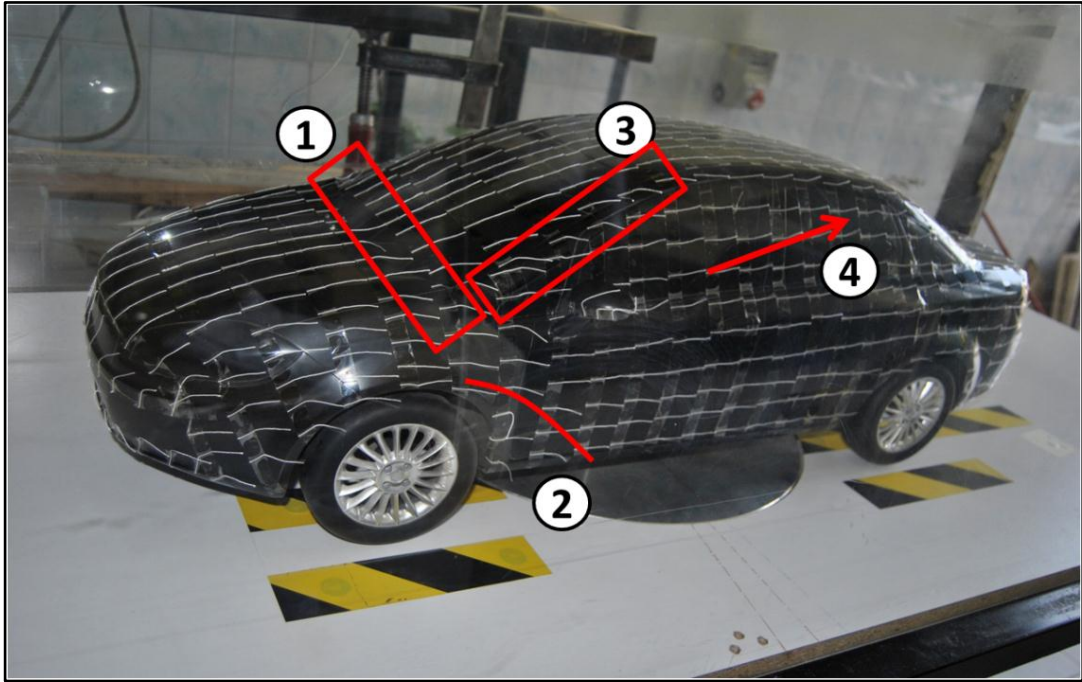


Şekil 4.2 “1:10” ölçekli model UURT iplikcik testi

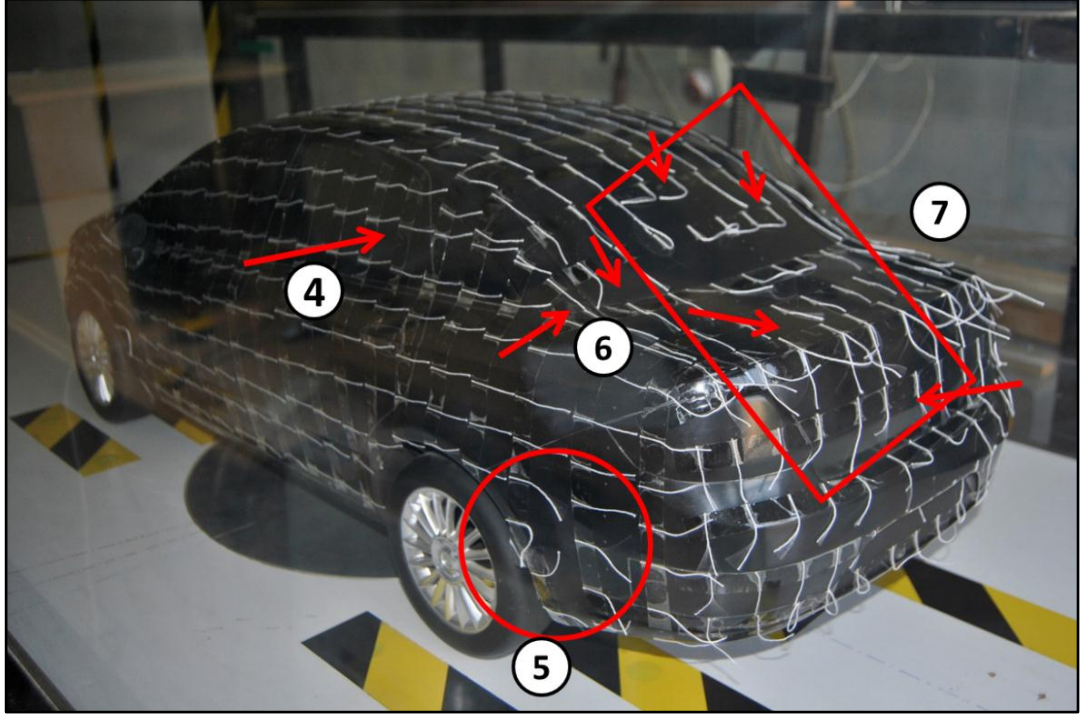
Testler 30 m/s de değişik β yanal açılarında gerçekleştirilmiş olup yanal açılardaki değerlendirmeler ilerleyen bölümlerde verilecektir.

4.1.1. “1:5” ve “1:10” Ölçekli Modeller Üzerindeki İplikcik Testleri

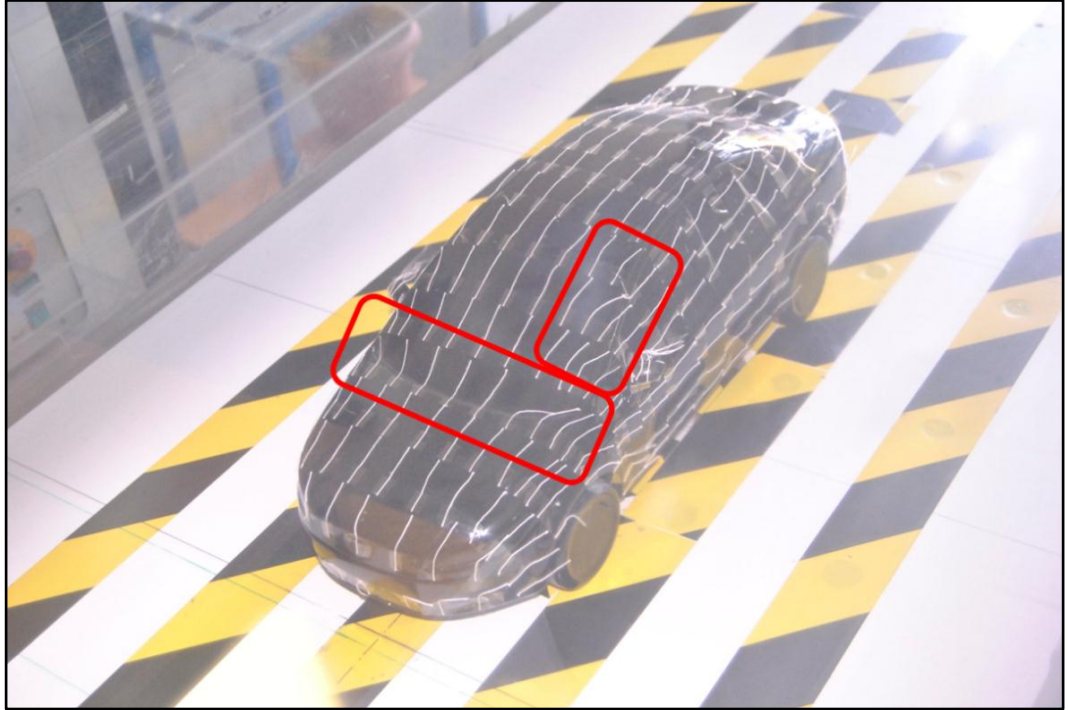
Şekil 4.3 ve **Şekil 4.4** de görüldüğü gibi 30 m/s serbest hava akım hızında motor kaputu, ön bombeli cam ve tavan bölgelerinde akım kararlı olup yüzeye yapışık durumdadır. (1) nolu ön silecek bölgesinde vortex oluşumu gözlenmiştir. Bu bölgede akım kararsızdır ve iplikler model yüzeyini takip etmemektedir. (2) ve (5) nolu ön ve arka çamurluk tekerlek bölgelerinde de kararsızlık görülmektedir. Bu bölgede çamurluk yüzeylerindeki dışarıya doğru çıkıntı bu akım bozulmasına sebebiyet vermektedir. (3) nolu A-Pillar ön kapı direk bölgesindeki hava hızlanma ve akabinde oluşan statik basınç düşümü nedeniyle sola doğru kanalize olmaktadır. Yan dış dikiz ayna etkisi özellikle B-Pillar orta direk üst bölgesinde (4) ve arka bombeli cam yan kısımlarında etkili olmaktadır. Bu bölgede aynadan sapan hava akımı arka kapı üst bölgesinden arka bombeli cam yan kısmına dönmektedir. (6) ve (7) nolu bölgeler arasında hava akımının farklılık göstermesinin nedeni budur. (7) nolu bölgede akım tamamıyla yüzeyden kopmuş olup kararsız durumdadır. Tavan üzerinden gelen hava akımı arka cam yan kısmında yan dış dikiz aynalarından dönen akımla kesişmektedir. Bu bölgede iplikçiklerin araç dışına doğru döndüğü görülmektedir. Bagaj kapağı ve arka tampon bölgesi tamamıyla kararsız bölgedir. **Şekil 4.5** ve **Şekil 4.6** da 1:10 ölçekli modelde 30 m/s hızda aynı 1:5 modeldeki karakteristikler belirlenmiştir.



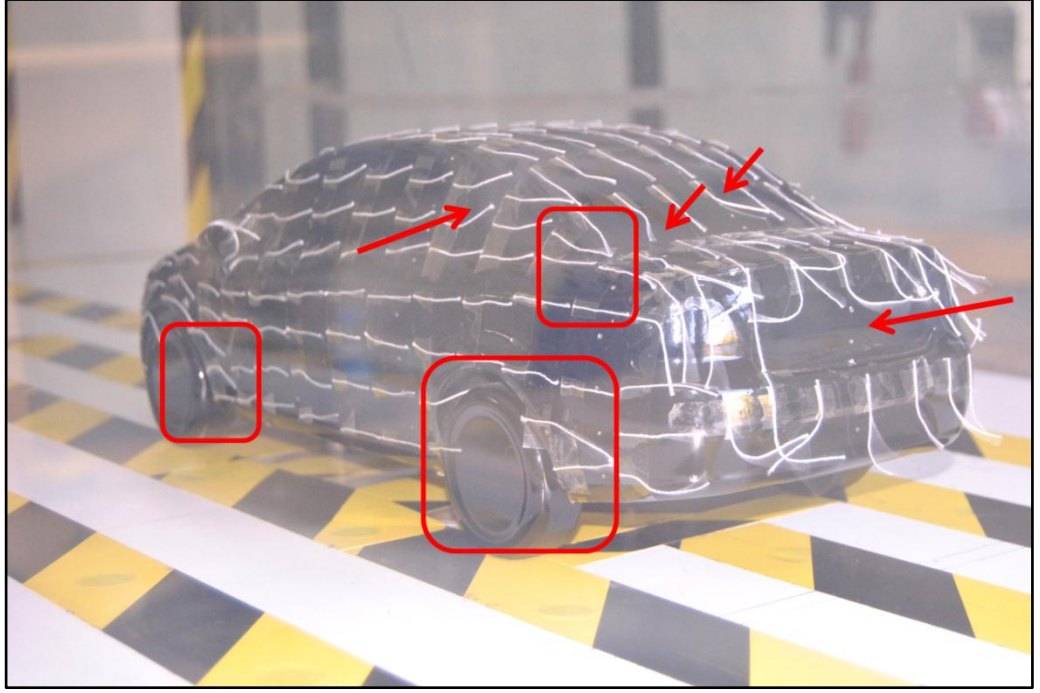
Şekil 4.3 “1:5” ölçekli model UURT iplikcik testi (I)



Şekil 4.4 “1:5” ölçekli model iplikcik testi 30 m/s (II)



Şekil 4.5 “1:10” ölçekli model iplikcik testi 30 m/s (I)



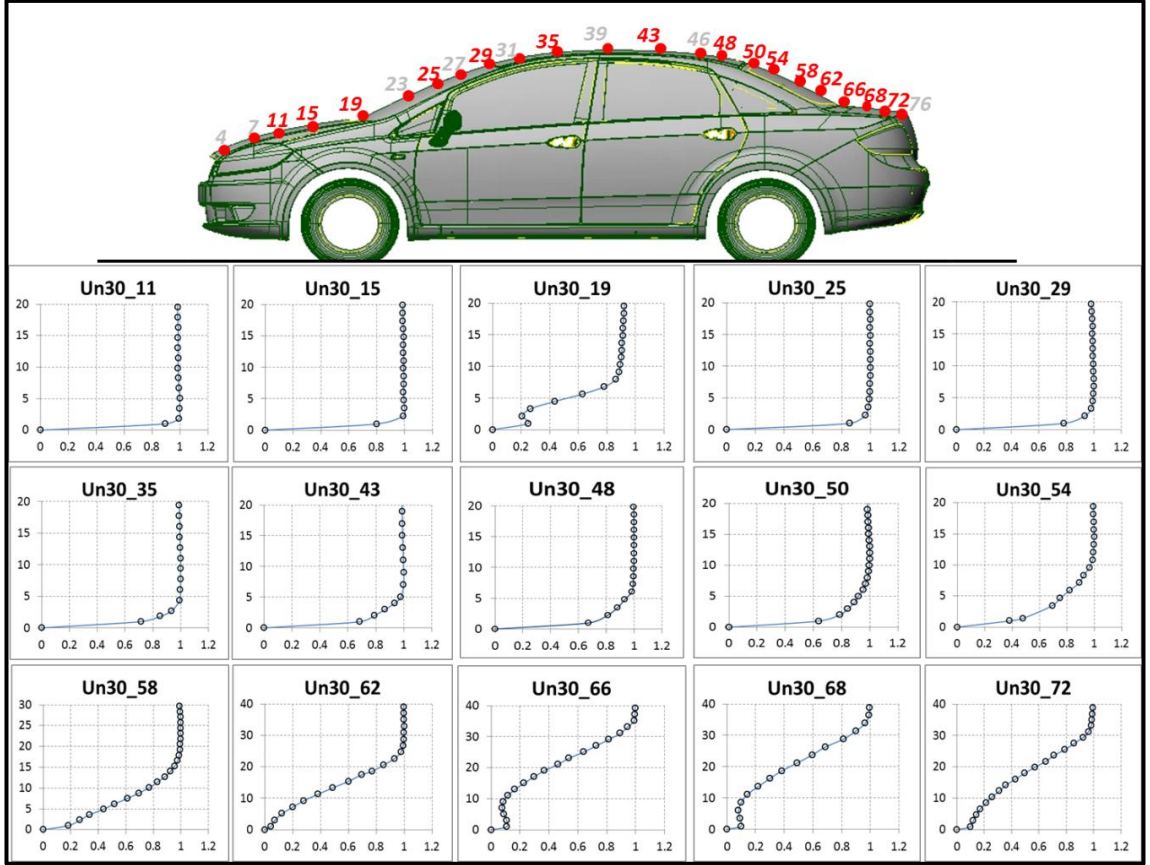
Şekil 4.6 “1:10” ölçekli model iplikkik testi 30 m/s (II)

4.1.2. Simetri Ekseni Üzerindeki Hız Profilleri

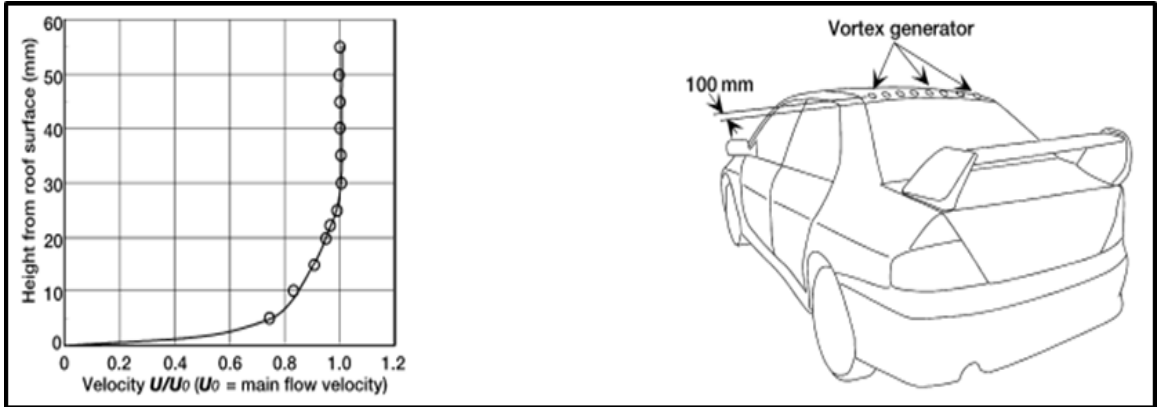
1:5 ve 1:10 ölçekli modeller üzerinde sırasıyla 3 m/s, 10 m/s, 20 m/s, 30 m/s serbest hava akım hızlarında Dantec 55P0111 düz kıvgın tel (hot-wire) probu kullanılarak simetri ekseni üzerinde hız profilleri ölçülmüştür. Hız profil dataları x, y, z eksenleri boyunca programlanabilir travers vasıtasıyla otomatik olarak model yüzeyine dik her 1 mm mesafe aralıkta toplanmıştır. Şekil 4.7 de $U_{\infty} = 30 \text{ m/s}$ ($Re = 2,73 \cdot 10^5$) hız profilleri görülmektedir. Kırmızı renkle numaralandırılan noktalarda hız profilleri altta görülmektedir. Motor kaputu üzerinde (11,15) noktalarında hız profilleri düzgün ve kararlı görülmektedir. (15) noktasında sınır tabaka yüksekliği $\delta = 2 \text{ mm}$ civarındadır. (19) nolu ön silecek grubu bölgesinde vortex oluşumu gözlenmiştir. Bu bölgede motor kaputu ile ön cam alt kısmı arasında mevcut olan set bu bölgedeki akışı etkilemektedir. Bu noktada sınır tabaka yüksekliği $\delta = 8 \text{ mm}$ civarındadır. Ön cam ve tavan arka kısımlarına kadar hız profillerinin kararlı olduğu görülmektedir. Tavan arka noktalarına doğru sınır tabaka yüksekliği artmaktadır. (48) noktasında $\delta = 6 \text{ mm}$ seviyesine ulaşmıştır. (48) noktası tavan ile arka cam birleşim noktasından yaklaşık 20 mm önde olup (1:5 ölçekli model için) bu bölge C_d optimizasyon çalışmalarında vortex üretici

(VG) uygulamaları için optimum nokta olarak belirlenmiştir (Koike ve ark, 2004). Mitsubishi LANCER EVOLUTION VIII 1:1 gerçek araçta yapılan çalışmada arka cam başlangıcından 100 mm önde hız profili **Şekil 4.8** de verildiği gibi bulunmuş olup sınır tabaka yüksekliği ve hız profili 1:5 ölçekli Fiat Linea modeli üzerinde (48) noktasında verilen hız profiliyle uyumlu bulunmuştur. (54) noktasından itibaren hız profili sınır tabaka içerisinde geriye doğru dönmeye başlamıştır. Bu bölgede akım tamamıyla kararsız durumdadır, sınır tabaka kalınlığı $\delta = 10$ mm boyutlarına ulaşmıştır. Bu noktadan itibaren sınır tabak kalınlığı artarak bagaj kapağı üzerinde $\delta = 30$ mm civarlarına ulaşmıştır. **Şekil 4.9** de 30 m/s serbest akım hızında araç arka iz bölgesinde ölçülen hız profilleri gösterilmiştir. İz bölgesinin etkisi mesafe ile azalmakla birlikte $0.5 x/L$ mesafesinde hala etkili görülmektedir.

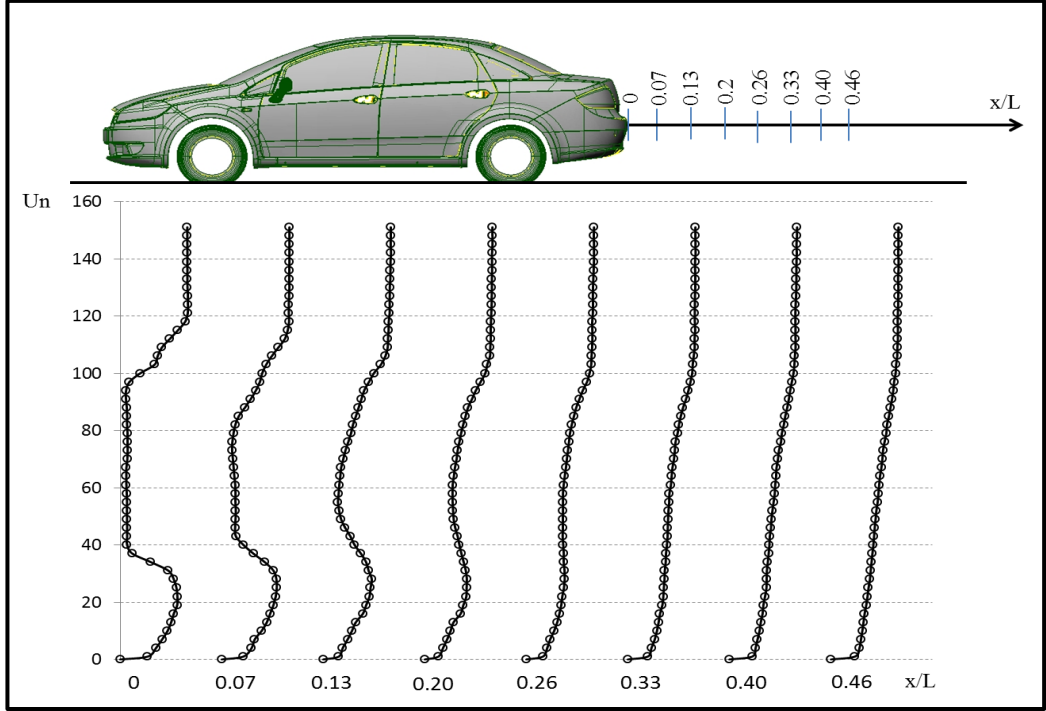
1:5 model üzerinde 3 m/s, 10 m/s, 20 m/s hızlarda da hız profilleri çizdirilmiştir. Sınır tabaka kalınlıklarının hız arttıkça azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni ise artan hıza bağlı olarak akışkan partiküllerinin momentumundaki artışın model arkasına doğru artan ters basınç gradyanını yenebilmesi olarak ifade edilebilir. 10, 20, 30 m/s hızlarda hız profilleri çok yakınlık arzederken 3 m/s ($Re = 2,73 \cdot 10^4$) de hız profilleri büyük ölçüde farklıdır, bunun sebebi akışın laminar akış olması olarak ifade edilebilir. **Şekil 4.10** da $U_\infty = 3$ m/s serbest akım hızında çizdirilen hız profilleri görülmektedir.



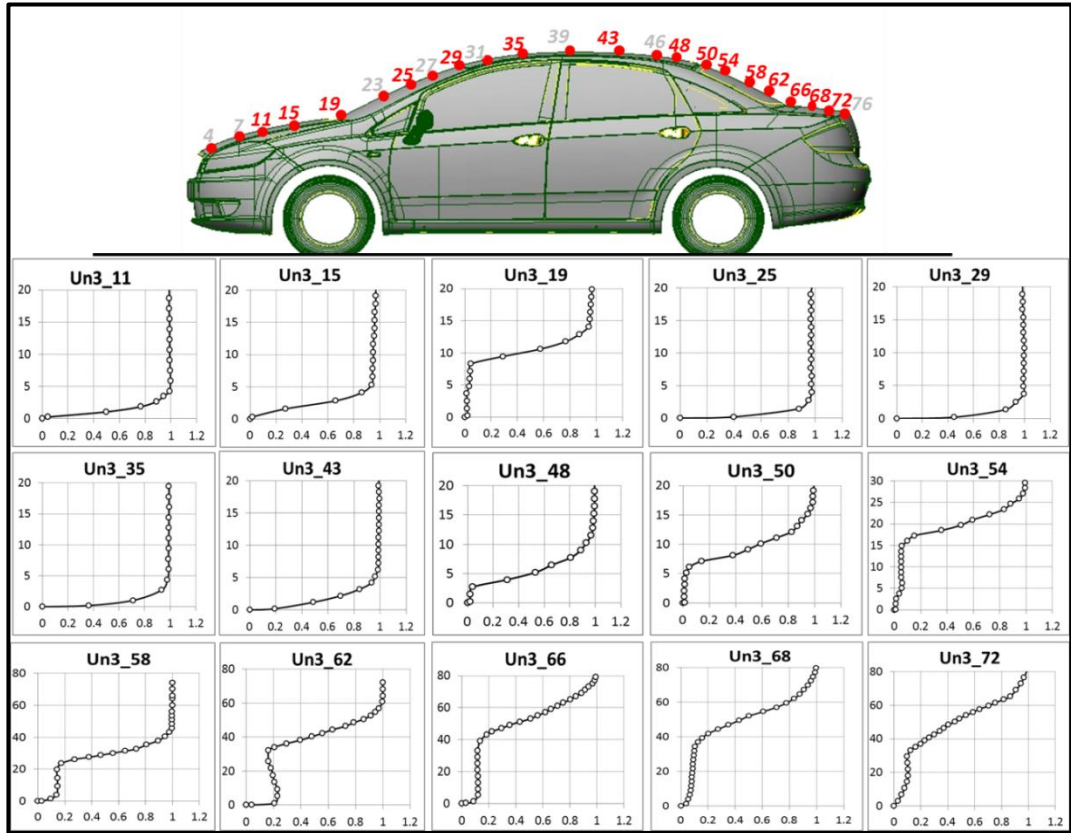
Şekil 4.7 “1:5” ölçekli model simetri eksenli hız profilleri 30 m/s ($Re : 2,73 \cdot 10^5$)



Şekil 4.8 Mitsubishi LANCER EVOLUTION VIII 1:1 ölçekli araç üzerinde hız profili

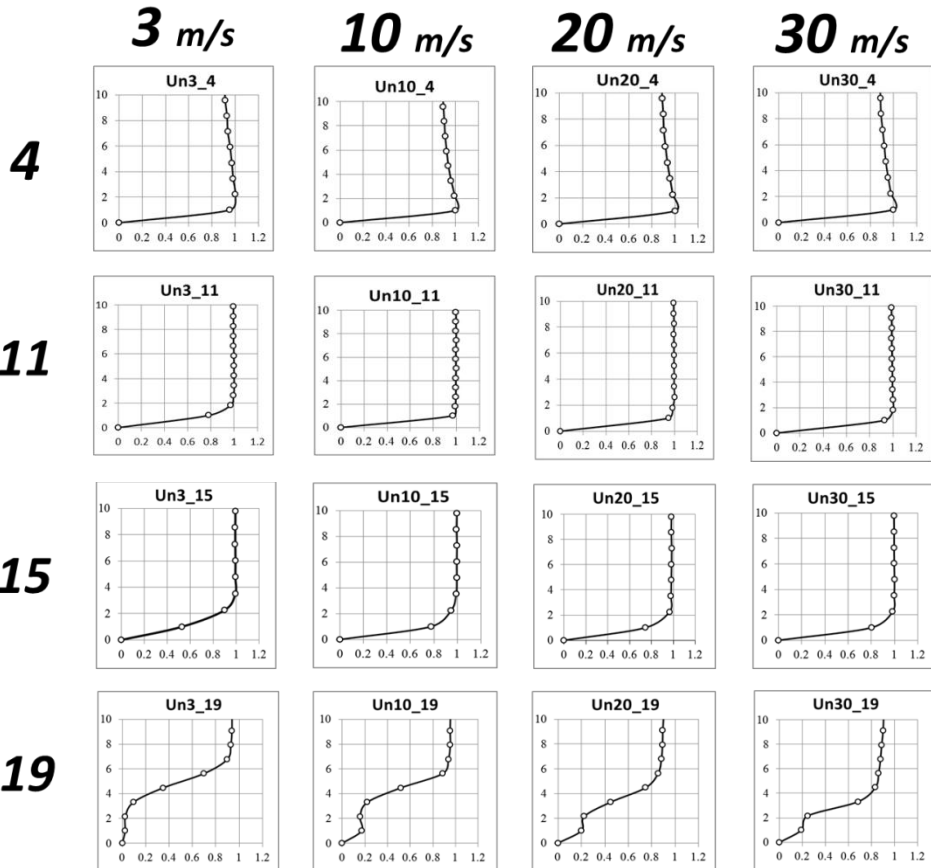
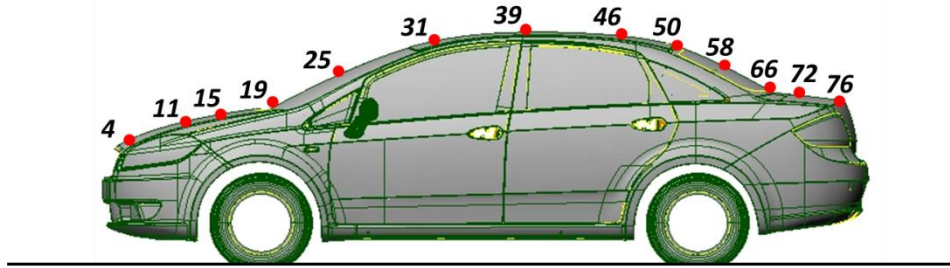


Şekil 4.9 “1:5” ölçekli model arka iz bölgesinde hız profilleri $U_{\infty} = 30$ m/s

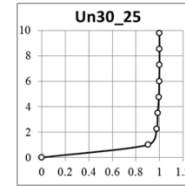
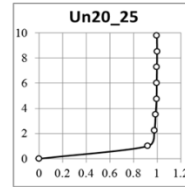
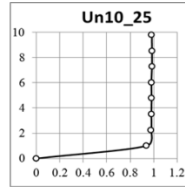
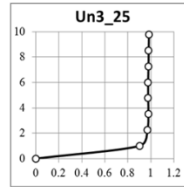


Şekil 4.10 “1:5” ölçekli model simetri eksenli hız profilleri 3 m/s ($Re : 2,73 \cdot 10^4$)

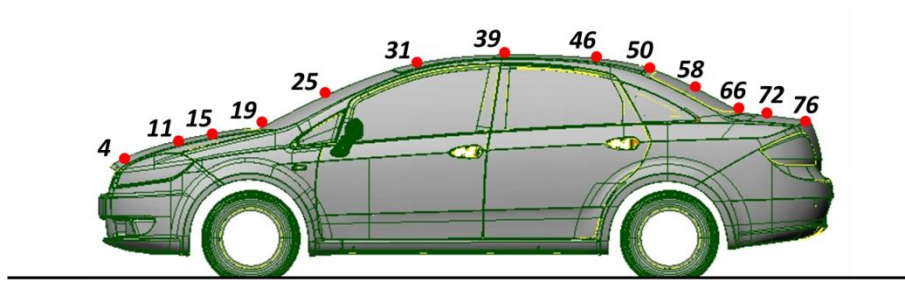
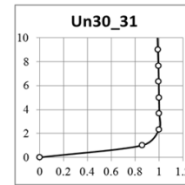
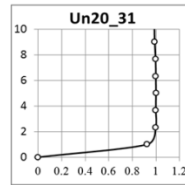
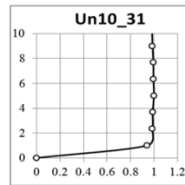
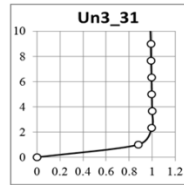
1:10 ölçekli model üzerinde de aynı hızlarda (3, 10, 20, 30 m/s) hız profilleri çizdirilmiştir. 1:10 ölçekli model için de benzer sonuçlar gözlemlenmiştir. 3 m/s hızda akım laminar ve hız profilleri diğer hızlara göre büyük ölçüde farklı ve sınır tabaka kalınlıkları daha yüksektir. Şekil 4.11 de hızlara göre kıyaslamalı olarak hız profilleri görülmektedir. Şekil 4.12 de ise 1:10 ölçekli model üzerinde 3 m/s de ve 30 m/s serbest akım hızlarında model üzerindeki aynı noktalarda hız profillerinin kıyaslaması verilmiştir. Tünel blokaj etkisinin hız profilleri üzerindeki etkisi ise Şekil 4.13 de görülmektedir. Daha önceki bölümlerde belirtildiği üzere 1:5 ölçekli model %20 blokaja sahip iken 1:10 ölçekli model %5 blokaj değerine sahiptir. Özellikle tavan ve araç arka kısmında hız profilleri arasındaki fark dikkat çekmektedir.



25



31



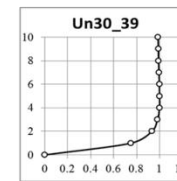
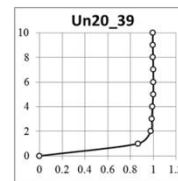
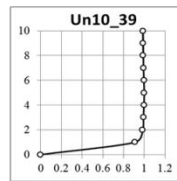
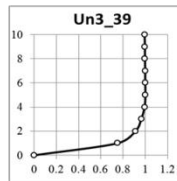
3 m/s

10 m/s

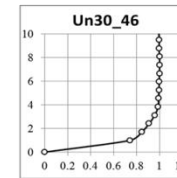
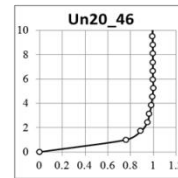
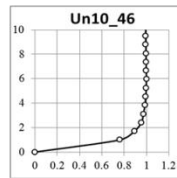
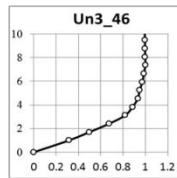
20 m/s

30 m/s

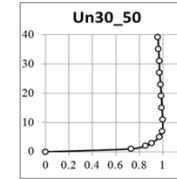
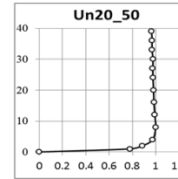
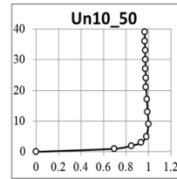
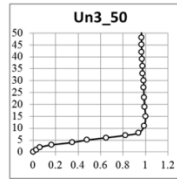
39



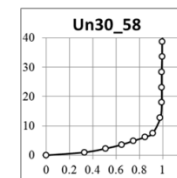
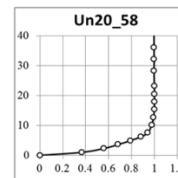
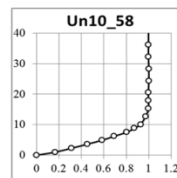
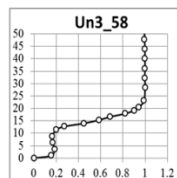
46

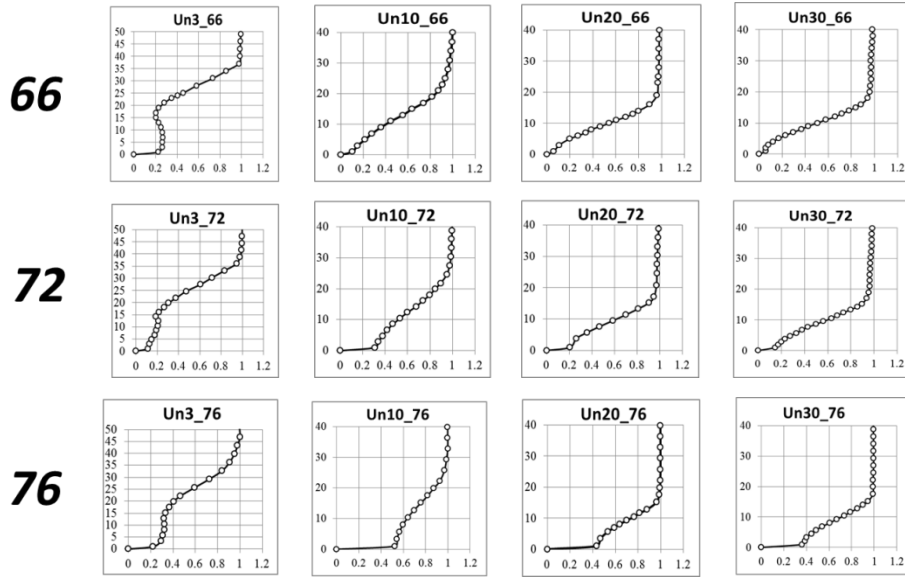


50

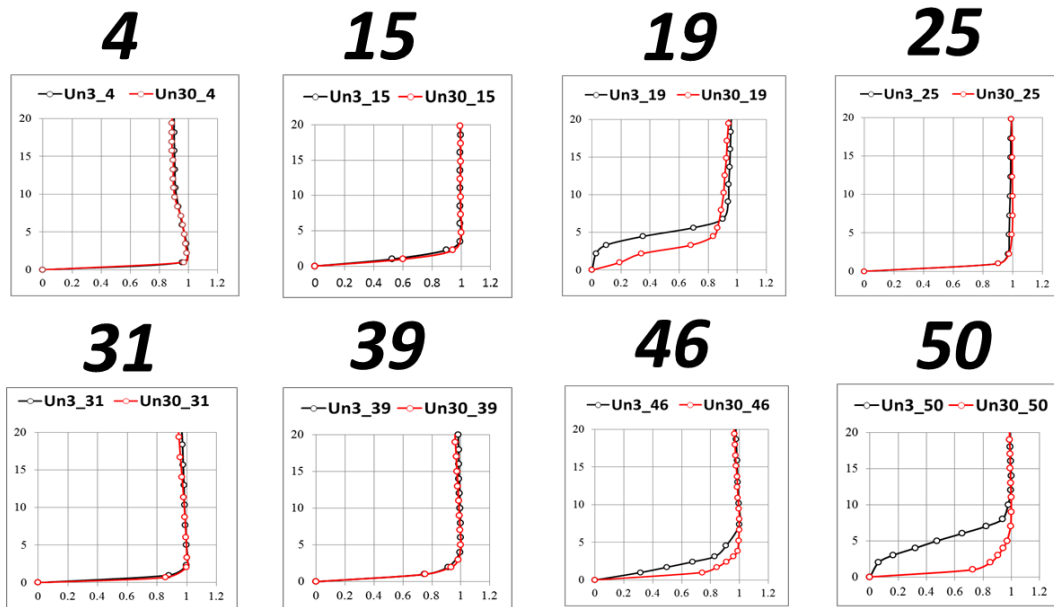
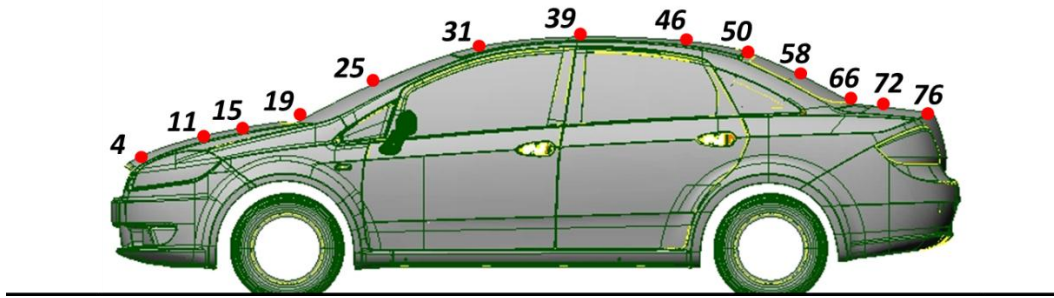


58





Şekil 4.11 “1:10” ölçekli model üzerinde 3,10, 20, 30 m/s hızlarda hız profilleri

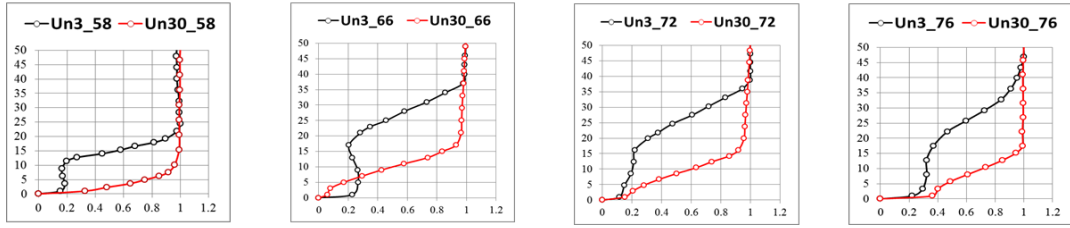


58

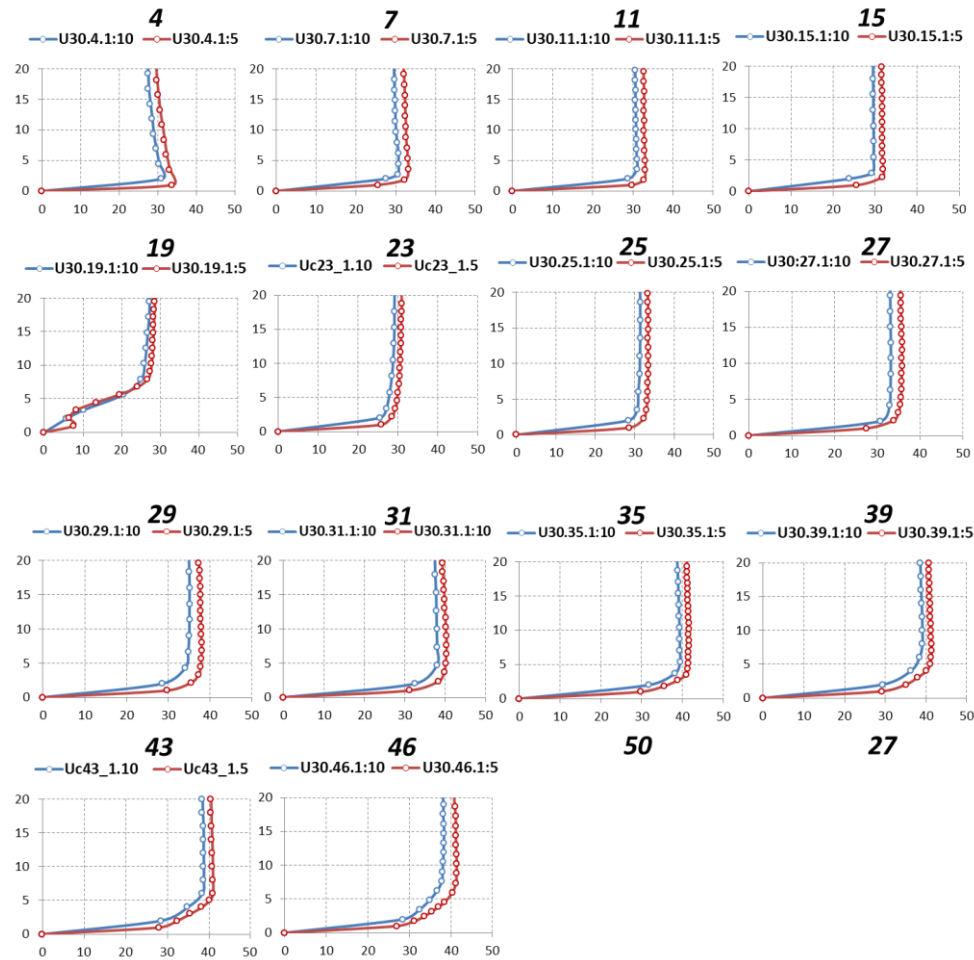
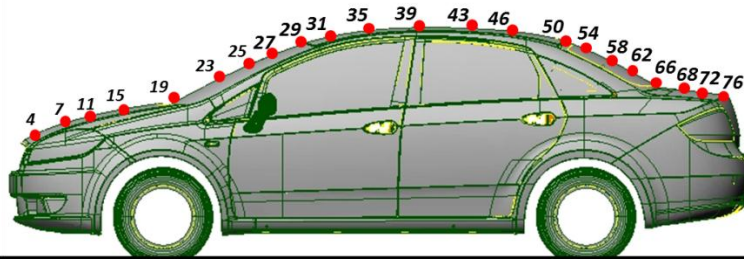
66

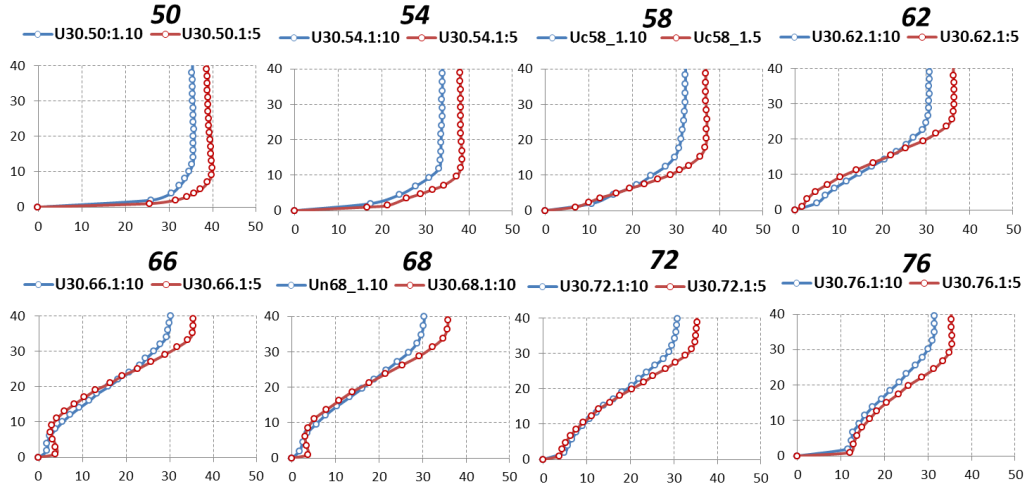
72

76



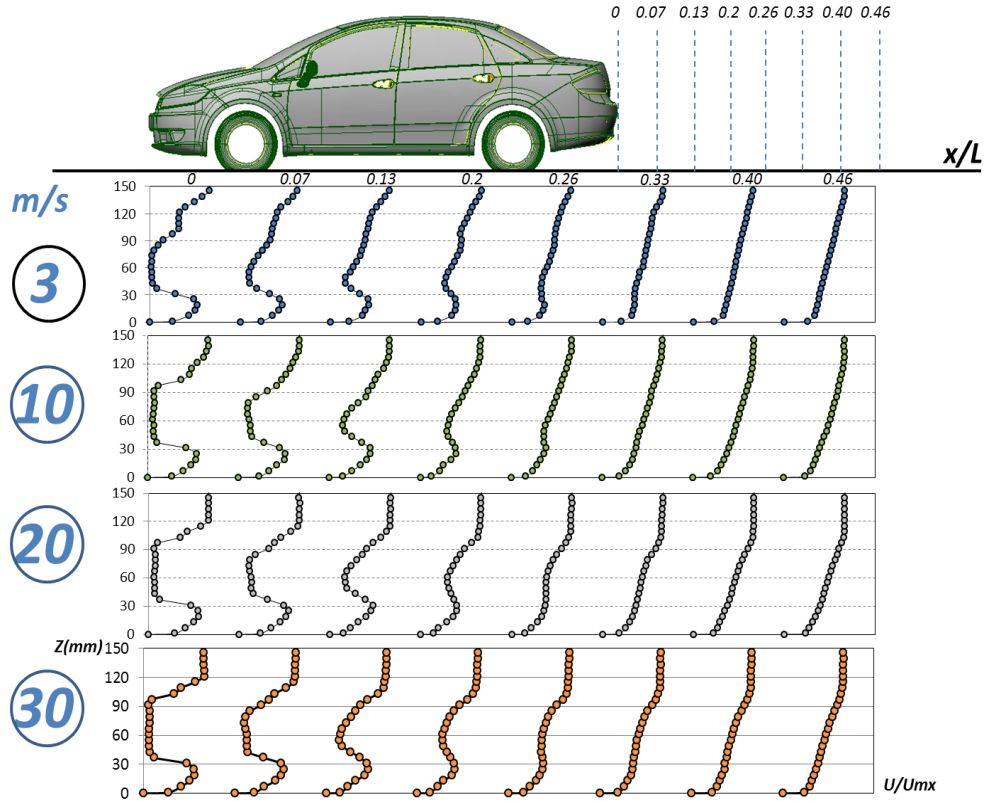
Şekil 4.12 “1:10” model 3 m/s ve 30 m/s hızlarda hız profillerinin karşılaştırılması





Şekil 4.13 “1:5” ve “1:10” ölçekli modeller üzerinde hız profilleri $U_{\infty} = 30$ m/s

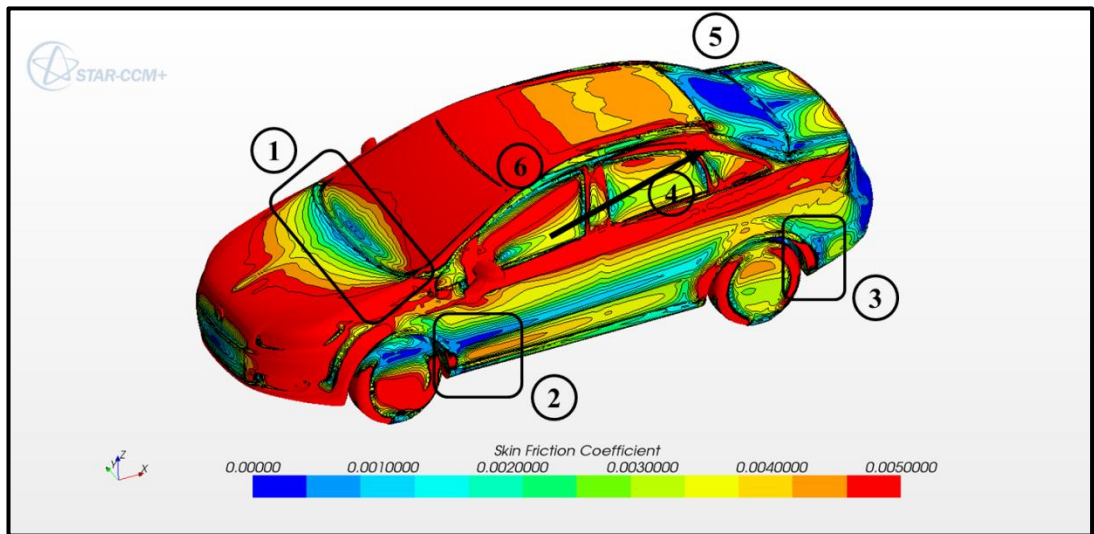
1:10 ölçekli model arka iz bölgesi hız profilleri Şekil 4.14 de 3,10, 20, 30 m/s serbest akım hızlarına göre model boyuna bağlı belirtilen “x” mesafelerinde çizdirilmiştir. Buradan da görüleceği üzere 3 m/s hız dışında profiller birbirine çok yakın olarak görülmüş olup 1:5 modelde belirtildiği gibidir.



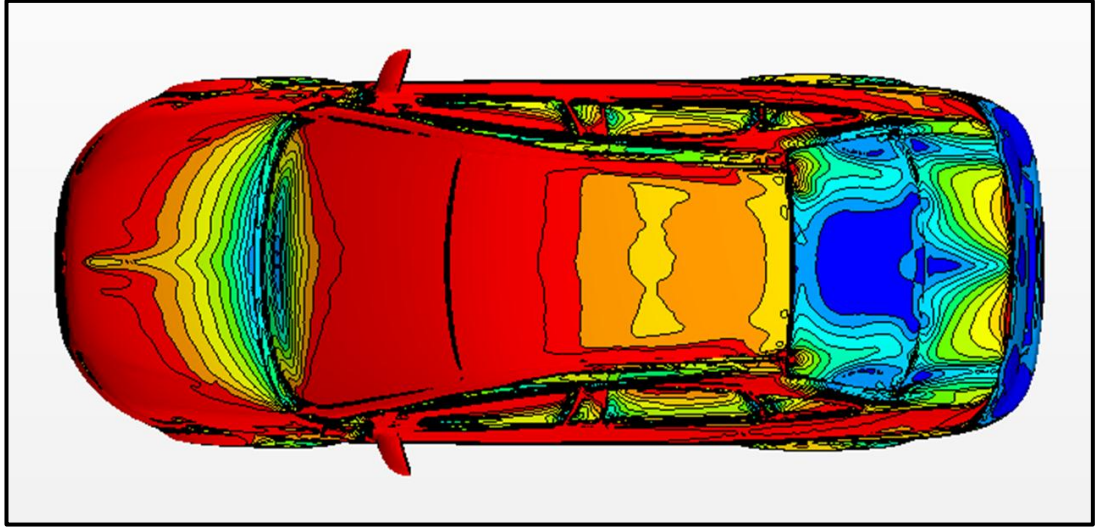
Şekil 4.14 “1:10” ölçekli model arka iz bölgesi hız profilleri

4.1.3. StarCCM+ CFD Akım Karakteristiği Analizi

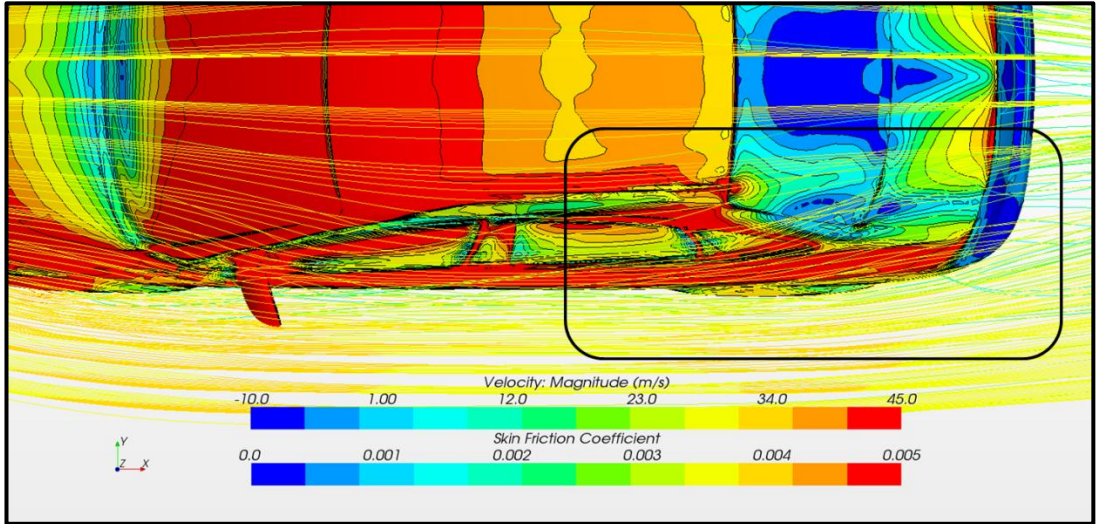
30 m/s serbest akım hızında sayısal analiz sonucu **Şekil 4.15** te görüldüğü gibi yüzey sürtünmesi (skin friction) konturlarını incelediğimizde üstte bahsettiğimiz iplikcik testleri ve hız profil ölçümlerinde yaptığımız yorumları doğrulanmaktadır. Şekilde kırmızı renk akımın yüzeye yapıştığını koyu mavi, lacivert renkler ise yüzeyden koptuğunu ifade etmektedir. (1) nolu ön silecek bölgesinde vortex oluşmaktadır, (2) ve (3) nolu bölgeler iplikcik testinde de ifade edildiği gibi çamurluk tekerlek bölgelerinde dışa set olan bölgeler olup bu bölgelerde akım kopmaları görülmektedir. (4) nolu bölgede kırmızı hat takip edilirse ön kapı camı üzerinden B-Pillar bölgesinden arka kapı üstü ve arka bonbeli cam yan kısımlarına kadar dış dikiz ayna bölgesinden dönen akımın etkisi görülmektedir. Tavan dan gelen hava akımıyla birlikte arka cam yan köşelerde akım tamamıyla karışmaktadır. Bu durum **Şekil 4.17** de dikdörtgen içerisine alınan bölgede daha belirgin bir şekilde görülmektedir. (5) nolu arka bobeli cam bölgesinde koyu mavi görülen bölge (**Şekil 4.15**) aynı şekilde iplikcik testi ile daha önce gösterilmişti. Hemen bu bölgeden yanlara doğru rengin açıldığını görüyoruz. Bunun sebebi üstte bahsettiğimiz dış dikiz ayna etkisi olarak belirtilebilir. (6) nolu A-Pillar, ön direk bölgesinde akımın yüzeyden ayrılmakta ve akım araç dışına doğru dönmektedir. Bu durumu **Şekil 4.17** de net bir şekilde görülmektedir. **Şekil 4.16** de görülen üstten görünüşte de benzer yorumlar yapılabilir.



Şekil 4.15 “1:5” ölçekli model 30 m/s CFD yüzey sürtünme konturları



Şekil 4.16 “1:5” ölçekli model 30 m/s CFD yüzey sürtünme konturları (üst bakış)



Şekil 4.17 1:5 model üstü CFD akım görüntüleme 30 m/s

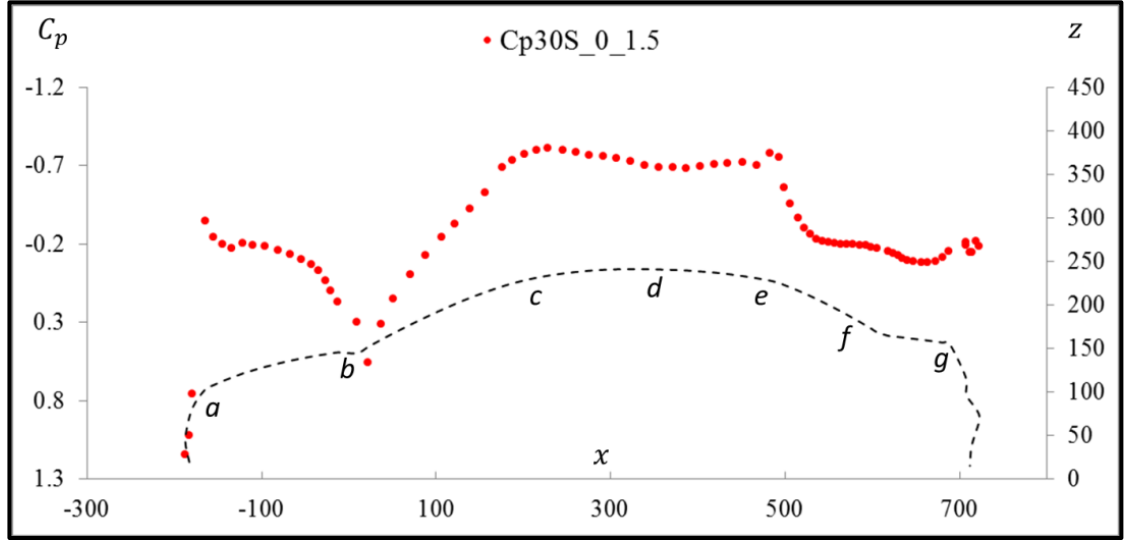
4.2 Basınç Dağılımlarının Analizi ($\beta = 0$)

Bu bölümde model düz konumda ($\beta: 0$) gerçekleştirilen test sonuçları paylaşılıp sayısal çözümlere kıyaslaması sunulacaktır. Testler 10, 20, 30 m/s hızlarda 1:5 ölçekli model için hem UURT (Uludağ Üniversitesi Rüzgar Tüneli) hem de ART (Ankara Rüzgar Tüneli) de gerçekleştirilmiştir. 1:10 ölçekli model aerodinamik testi ise sadece UURT de yapılmıştır. Sayısal çözümlerde de 1:5 model boyutları çalışılmıştır.

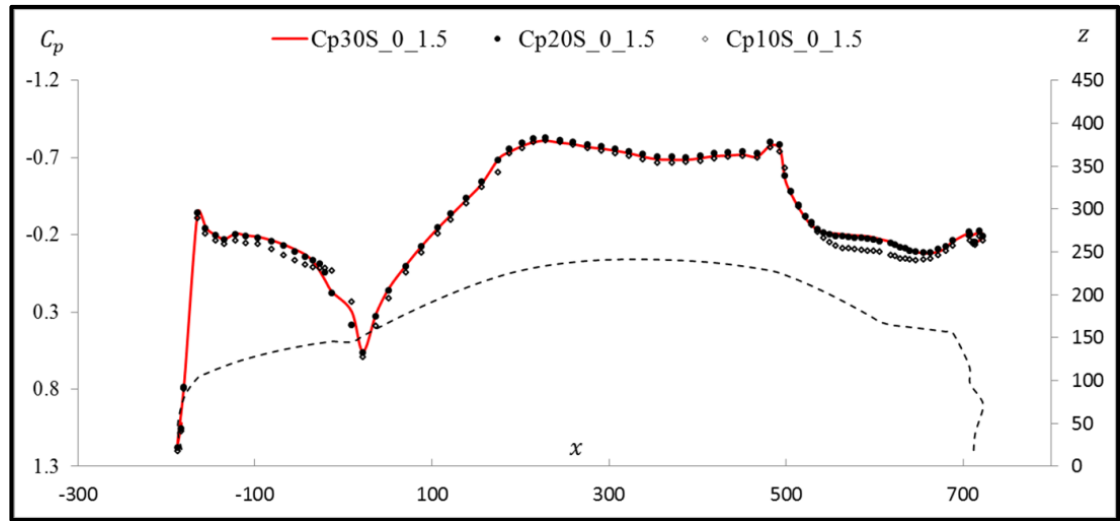
4.2.1. Simetri Ekseni Üzerinde ($y:0$) Basınç Dağılımları ($\beta = 0$)

Şekil 4.18 de 1:5 ölçekli modelin 30 m/s hızda UURT tüneli (%20 blokaj) testi neticesinde elde edilen statik basınç (C_p) dağılımı görülmektedir. Cp30S_0_1.5 ifadesinde S: simetri eksenini, 0 yanal ($\beta:0$) açısını, 1.5 ise 1:5 ölçekli modeli simgelemektedir. Maximum pozitif basınç (durma noktası – *stagnation point*) ön tampon üzerinde gerçekleşmektedir. Motor kaputunun başlangıç noktasında (a) lokal negatif basınç pik değere ulaşmaktadır. Bu noktadan ön silecek bölgesine kadar (b) basınç artışa geçmektedir. (b) noktasından itibaren akım hızlanmakta ve buna bağlı olarak C_p değerleri tekrar negatif değerde artarak tavan ön kısmında max. negatif pik değerine ulaşmaktadır. Tavan ortası (d) noktasına doğru basınç artışa geçip (e) noktasına kadar yaklaşık sabit kalmakta ve (e) noktasında kısa mesafeli negatif pik yaparak arka bombeli cam ortalarına kadar artışa geçmektedir. (f) bölgesinde basıncın sabit kaldığı gözlemlenmektedir bunun nedeni bu bölgenin tamamıyla yüzeyden ayrılmış ve kararsız olmasıdır. (g) noktasında basıncın gene lokal bölgede negatif değerde arttığı gözlemlenmiştir. **Şekil 4.19** da simetri eksenindeki C_p dağılımlarının hızlara göre kıyaslaması görülmektedir. 20 m/s ve 30 m/s serbest akım hızlarında C_p dağılımları çakışırken 10 m/s hızda motor kaputu ve model arka bölgesinde basınçlar farklılaşmaktadır. Bu bölgelerde 10 m/s akım hızında akım momentumunun basınç gradyanından etkilendiği ve basınçların bir miktar daha arttığı ve akımın yavaşladığı anlaşılmaktadır. **Şekil 4.20** de 1:5 modelin ART (Ankara Rüzgar Tüneli) de çok düşük blokaj etkisi durumunda (%1 blokaj) ve çok düşük türbülans şiddeti seviyesinde (%0.5) 30 m/s hızda simetri eksenini boyunca ölçülen C_p dağılımı 1:5 model için %20 blokaj oranına sahip UURT hava tüneli sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Dağılım trendlerinin aynı olduğu görülmektedir. Fakat UURT dağılımında tünel blokaj etkisi çok belirgin bir şekilde görülmektedir. Özellikle tavan ve aracın arka bölgesinde basınçlarda belirgin değişimler gözlemlenmektedir. İleriki bölümlerde bahsedileceği gibi oluşan bu C_p dağılımındaki belirgin fark sürüklenme katsayısında da belirgin farklılık ortaya çıkarmaktadır. ART testleri sonucunda 1:5 ölçekli modelin simetri ekseninde 10 m/s, 20 m/s, 30 m/s serbest akım hızlarındaki C_p dağılımlarının karşılaştırılması **Şekil 4.21** de verilmiştir. **Şekil 4.19** da belirtilen farklılık ART testlerinde de 10 m/s hızda görülmektedir. Motor kaputu ve aracın arka bölgesinde

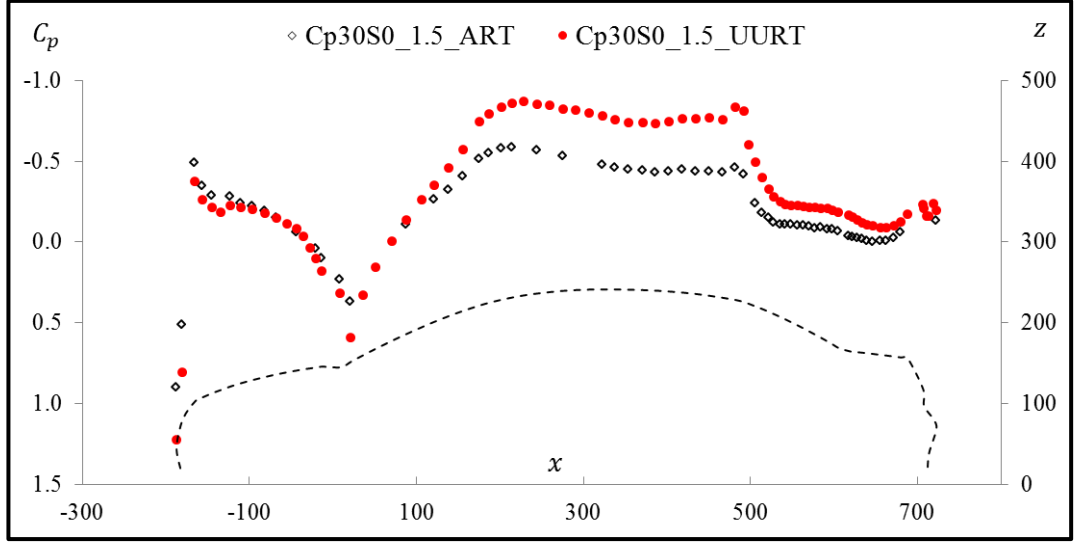
dağılım 20 m/s ve 30 m/s hızlardakine göre bir miktar daha farklıdır. 20 m/s ve 30 m/s hızlarda simetri eksenindeki C_p dağılımları aynı seviyededir.



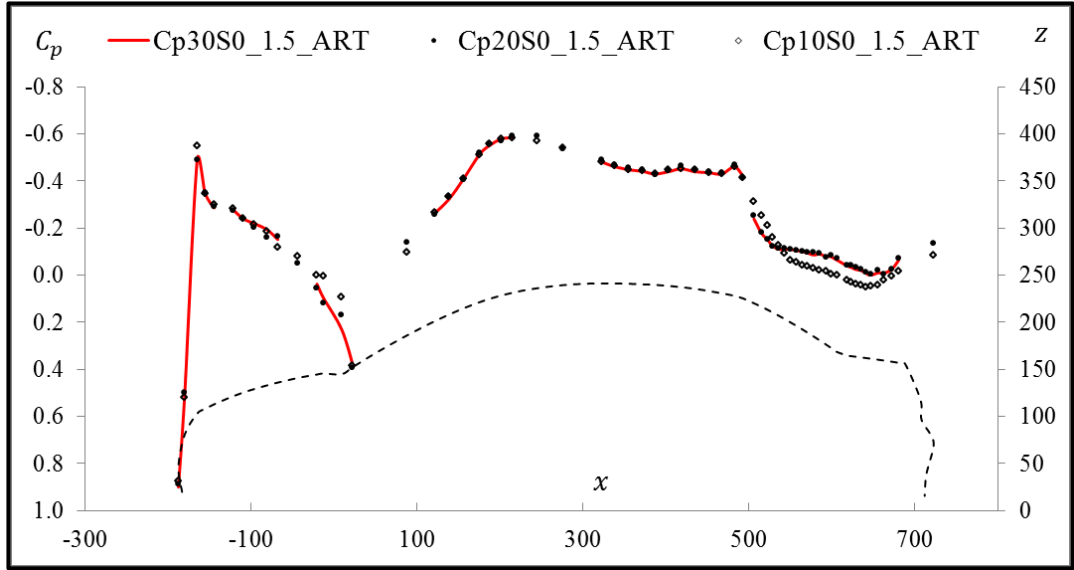
Şekil 4.18 “1:5” ölçekli model UURT testi simetri eksenini C_p dağılımı (30 m/s)



Şekil 4.19 “1:5” model simetri eksenini C_p dağılımları 10, 20, 30 m/s



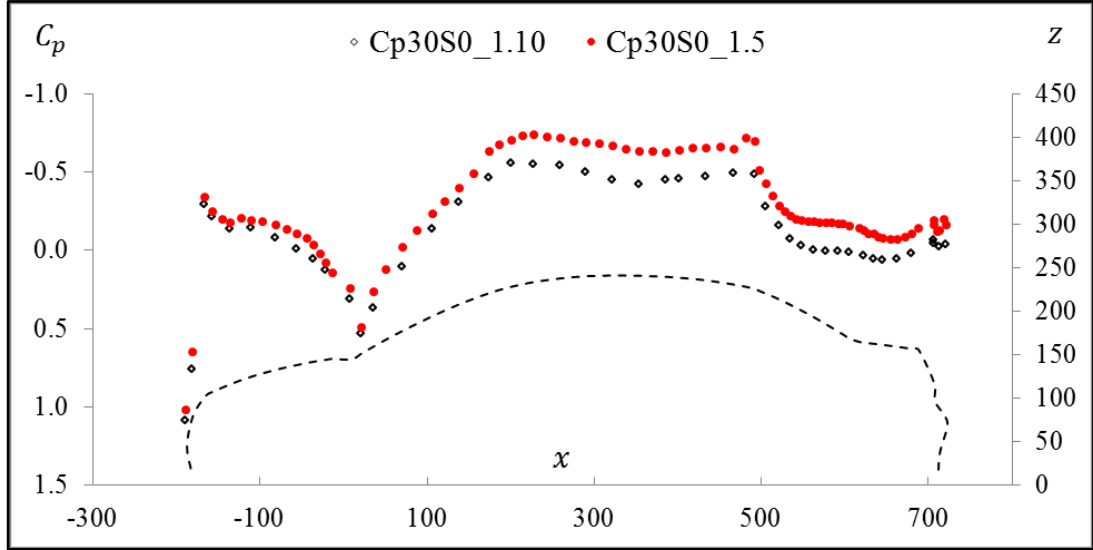
Şekil 4.20 “1:5” model ART ve UURT C_p karşılaştırması (30 m/s)



Şekil 4.21 “1:5” model ART C_p dağılımları kıyaslaması (10, 20, 30 m/s)

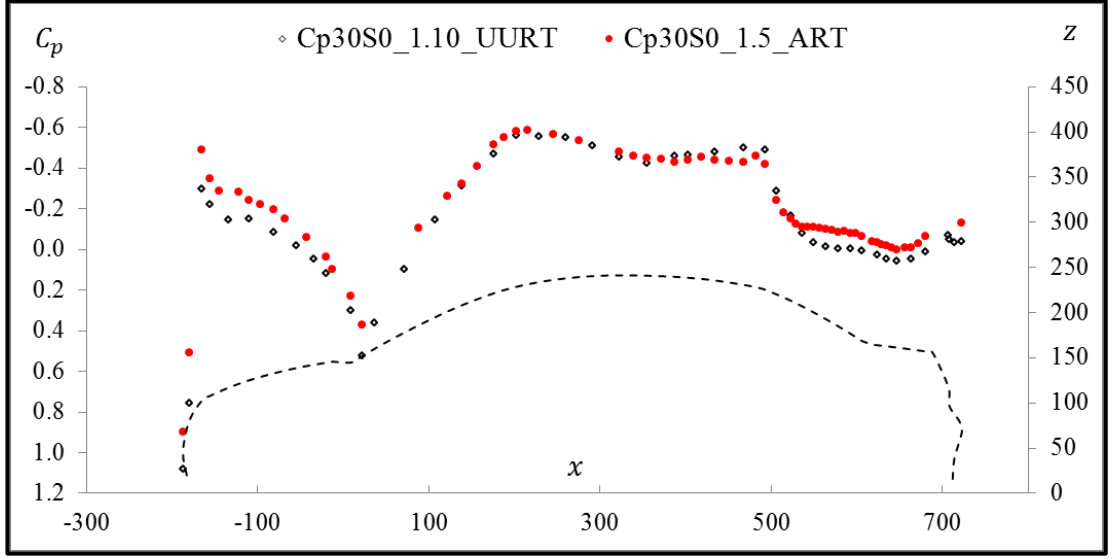
Blokaj etkisini daha net değerlendirebilmek amacıyla 1:10 ölçekli FIAT Linea modeli UURT testlerinde 1:5 modelde olduğu gibi aynı hızlarda (10, 20, 30 m/s) test edilerek basınç dağılımları ölçülmüştür. İfadelerde Cp30S0_1.5 terimi 30 m/s hızda simetri ekseninde ve 1:5 modeldeki C_p değerlerini simgelemektedir. Cp30S0_1.10 ise 1:10 modeli ifade etmektedir. 1:10 model UURT test odası boyutlarına göre %5 blokaj oluşturmaktadır. Şekil 4.22 den de görüleceği üzere ön bombeli cam orta noktalarından

İtibaren tavan ve araç arka bölgesinde basınçlar belirgin bir şekilde değişmiştir. Bu değişimin ana nedeni blokajın azalmasına bağlı olarak tavan ve arka bölgede akım hızlarının düşmesidir.

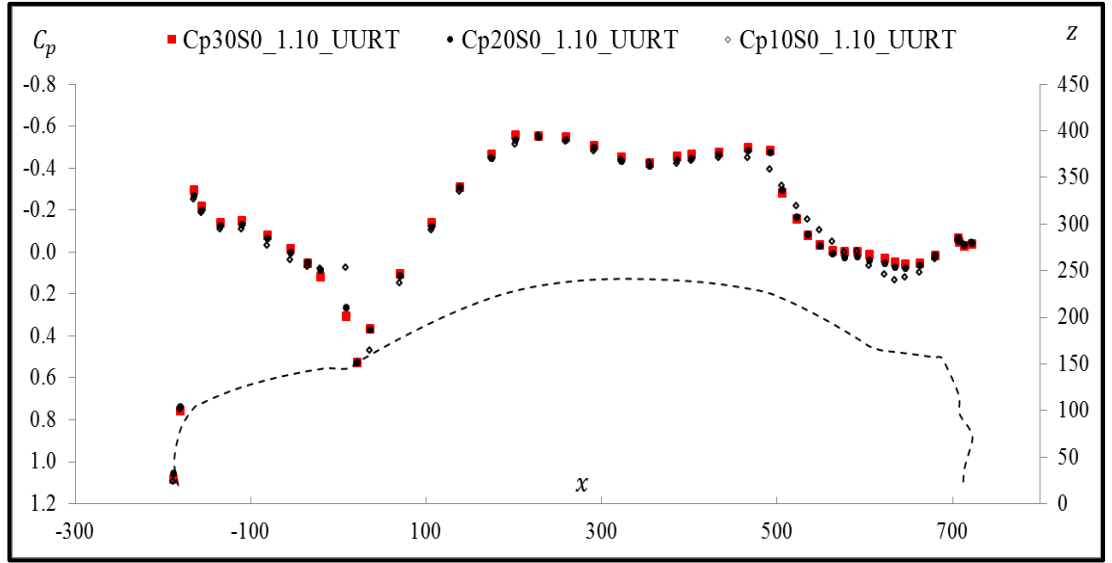


Şekil 4.22 “1:5” ve “1:10” model C_p dağılım karşılaştırması (UURT- 30 m/s)

UURT de gerçekleştirilen 1:10 ölçekli model üzerindeki C_p dağılımının ART de gerçekleştirilen 1:5 ölçekli model üzerindeki C_p dağılımlarına çok yakın bir dağılım oluşturması beklenmektedir. Blokaj değerlerinin bir birine yakın olması bunun ana nedenidir. Şekil 4.23 de motor kaputu ve araç arka bölgesinde bir miktar dağılım farklılığı gözlemlenmiştir. Bunun ana nedeni model boyutlarındaki farka bağlı olarak Reynolds sayısı benzerliğinin aynı olmaması olarak açıklanabilir. Model boyutları yarı yarıya azalmasına rağmen aynı hız değerinde testler gerçekleştirilmiştir. Fakat özellikle tavan bölgesindeki maksimum negatif basınçların aynı seviyelerde olmasının ana nedeni UURT testinde 1:10 model kullanılarak blokaj oranının %5 seviyesine düşürülmesi olarak ifade edilebilir. Şekil 4.24 de 1:10 modelin 10, 20, 30 m/s hızlardaki simetri eksenini üzerindeki C_p dağılımları kıyaslanmıştır. Burada da 10 m/s dağılımı 20 m/s ve 30 m/s dekine göre hem motor kaputu arka kısmında hem de arka bombeli cam ve arka kaput bölgelerinde farklılaşmaktadır.



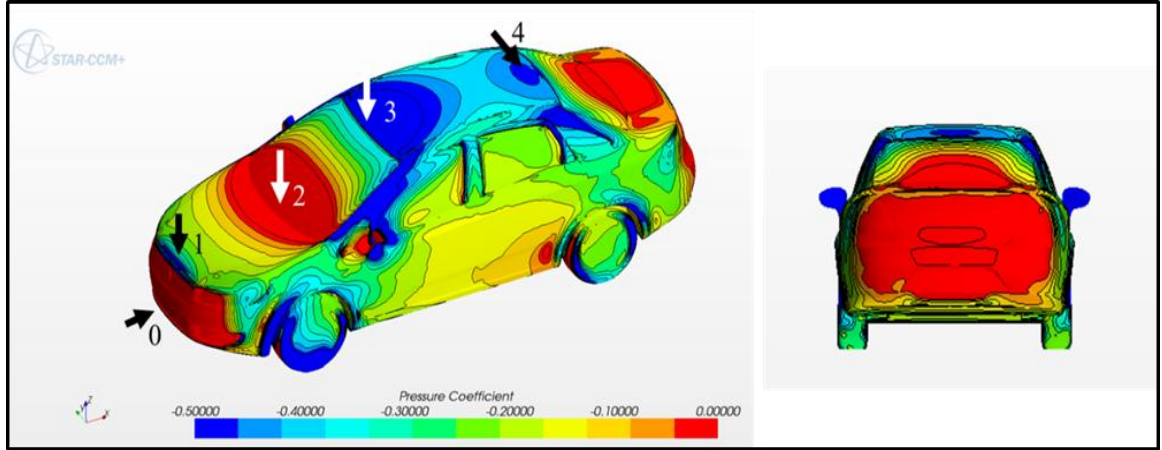
Şekil 4.23 “1:5” model ART ve “1:10” model UURT C_p dağılımı kıyaslaması (30 m/s)



Şekil 4.24 “1:10” model C_p dağılımı kıyaslaması (UURT – 10, 20, 30 m/s)

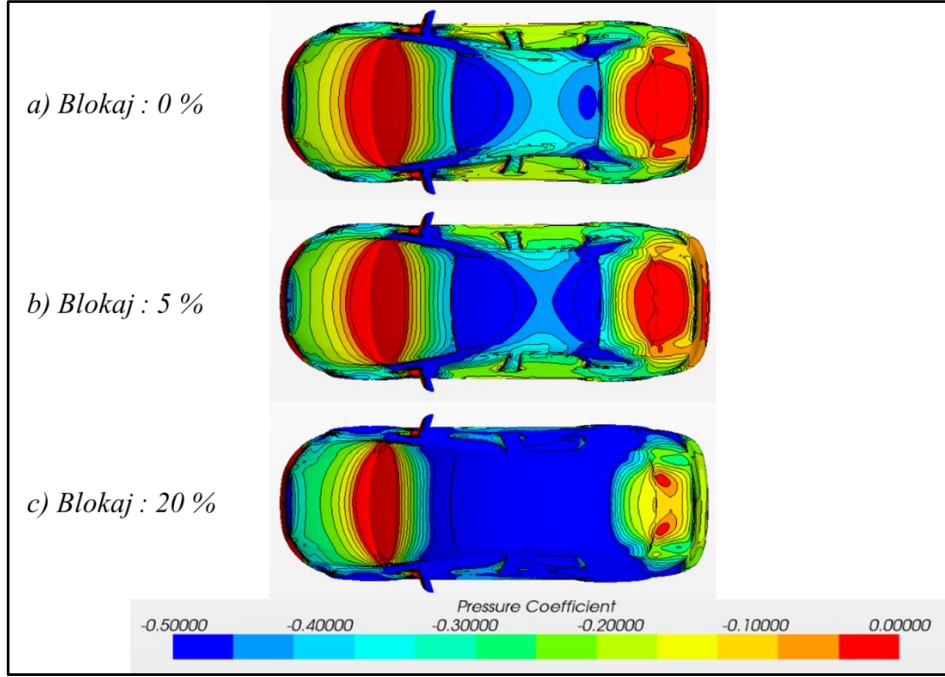
Şekil 4.25 de 1:5 model üzerinde CFD basınç konturları görülmektedir. (0) noktası durma noktası (stagnation point) olup maksimum pozitif basınç kırmızı renkle bu bölgededir. Mavi renkler ise negatif basınçları göstermektedir. (1) nolu nokta da lokal mavi renkli bölge motor kaputunun önü olup bu noktada lokal bir negatif basınç piki oluşmaktadır. (1) noktasından (2) nolu ön silecek bölgesine doğru basınç artmaktadır, bu bölge kırmızı renkle görülebilir. (3) nolu tavan ön bölgesinde basınç gene negatif pik

değere ulaşmaktadır. Tavan orta bölgesine doğru tekrar basınç artışa geçmektedir. (4) nolu tavan arka bölgesinde UURT test sonuçlarında da belirtildiği gibi lokal negatif pik görülmektedir. Aracın arka kısmına doğru basınç artışı kontur dağılımından görülmektedir.

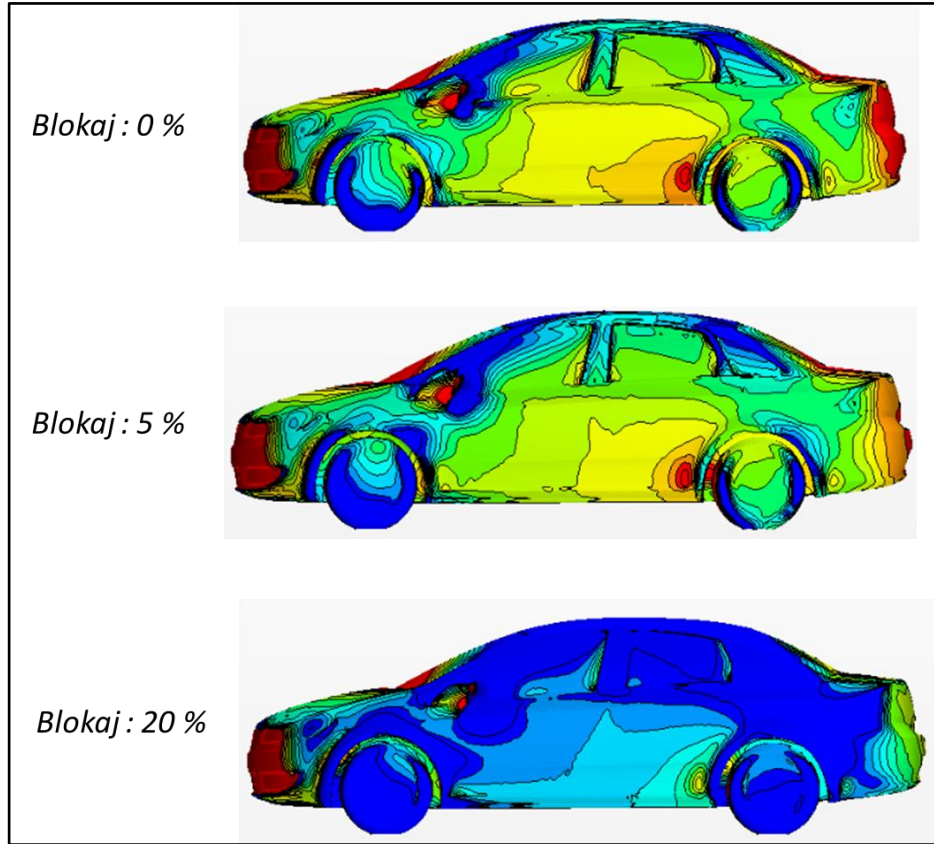


Şekil 4.25 StarCCM+ 1:5 ölçekli model üzeri basınç dağılımı (30 m/s)

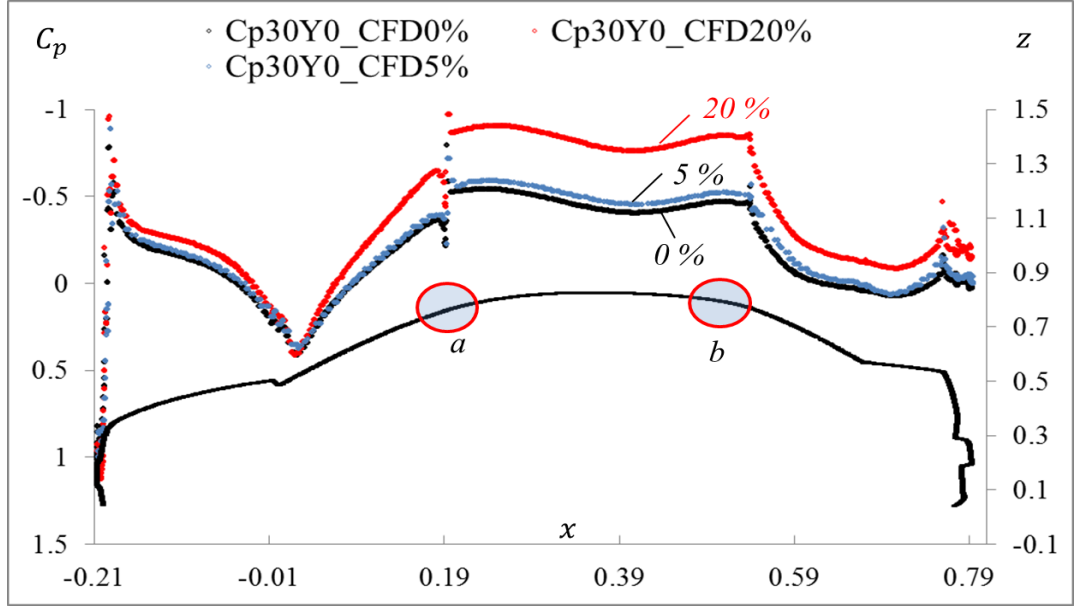
Şekil 4.26 ve **Şekil 4.27** de ise sayısal olarak tünel blokaj etkisinin değerlendirilmesi görülmektedir. UURT deney odası boyutlarında 1:5 ve 1:10 ölçekli modeller %20 ve %5 blokaj oranları oluşturularak CFD çözümleri gerçekleştirilmiştir. Kontur dağılımlarından da görüleceği üzere blokaj oranı artışına bağlı olarak tavan üstünde negatif basınç belirgin bir şekilde artmaktadır. Model arka kısmındaki kırmızı renkli basınç konturlarının da negatif basınç bölgesine geçtiği görülmektedir. Özellikle %20 blokaj seviyesinde tavan üstünde, araç arka kısmında ve yan yüzeylerde ciddi basınç değişimleri oluşmuştur. **Şekil 4.28** de 1:5 ölçekli model simetri eksenindeki C_p dağılımlarının blokajsız, %5 ve %20 blokajlı durumlarda CFD kıyaslamaları görülmektedir. %5 blokaj durumunda belirgin basınç değişimi gözlemlenmez iken özellikle %20 blokaj durumunda basınçlar belirgin bir şekilde değişmiştir. Deneysel testlere paralel olarak aynı şekilde ön bombeli cam ortalarından başlayarak araç arka bölgesine kadar blokaj etkisi belirgindir. Akım hızlarındaki artışa paralel negatif basınçlar bu bölgelerde yüksektir. (a) ve (b) bölgesinde dağılımda görülen kesiklikler model üzerinde **Şekil 4.29** da görülen sayısal model keskin geçişlerinden kaynaklanmaktadır.



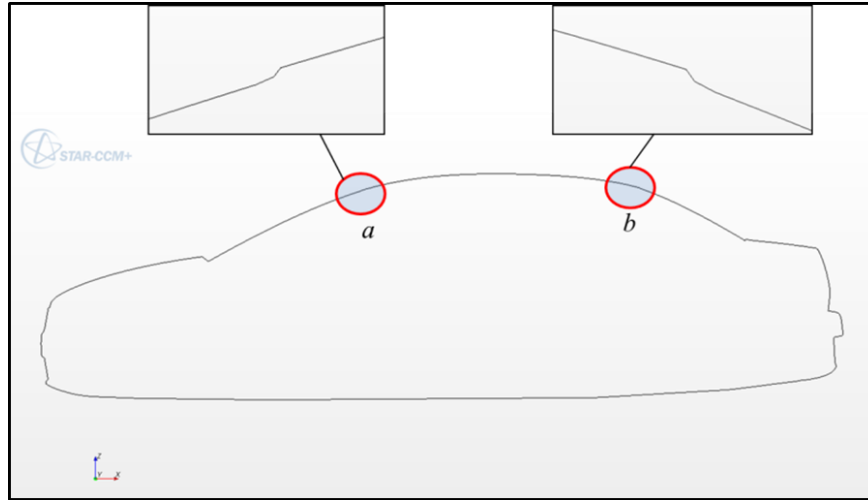
Şekil 4.26 StarCCM+ CFD değişik blokaj oranlarında basınç dağılımları – Üst Görünüş



Şekil 4.27 StarCCM+ CFD değişik blokaj oranlarında basınç dağılımları – Yan Görünüş



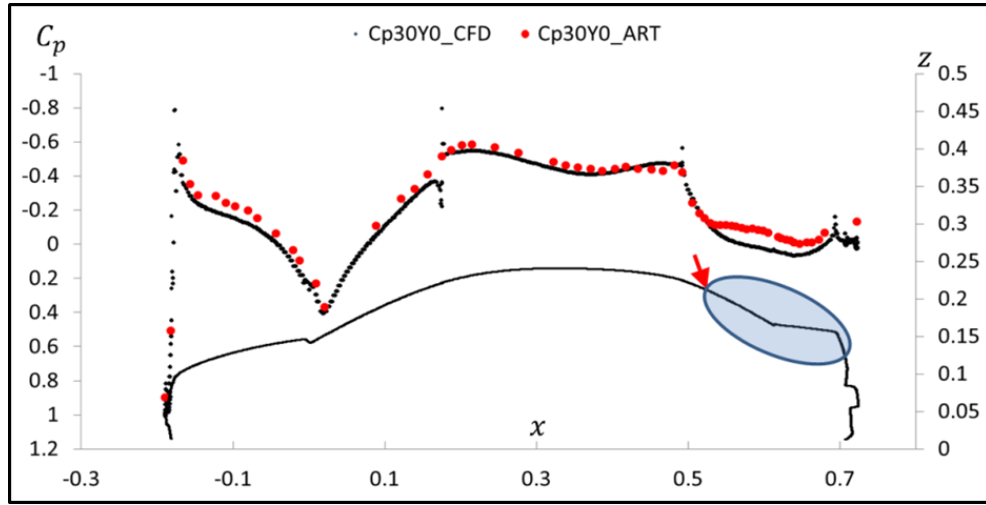
Şekil 4.28 CFD 1:5 ölçekli model 0, 5, 20% blokaj durumunda simetri eksen C_p dağılımları kıyaslaması (30 m/s)



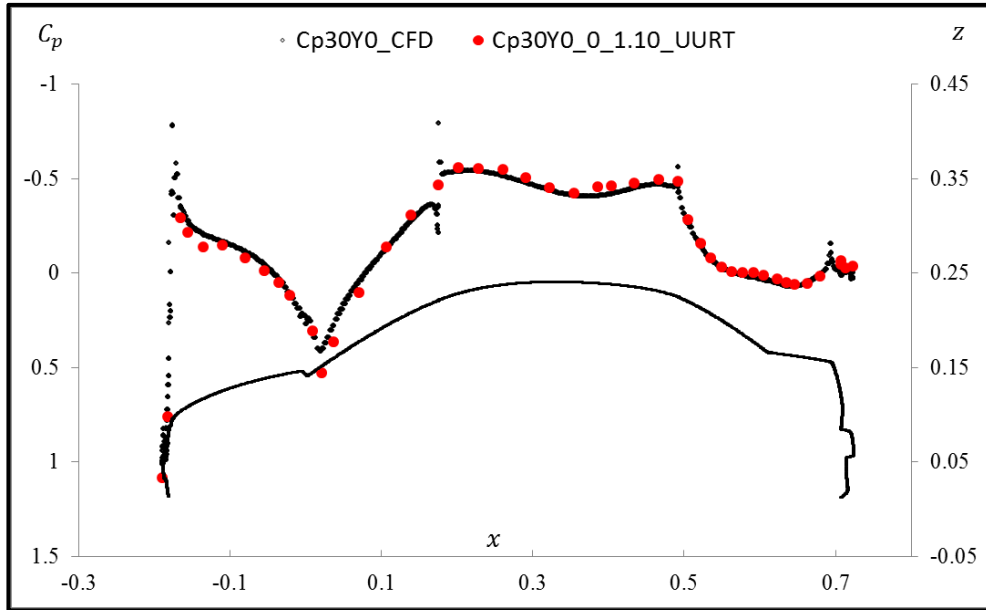
Şekil 4.29 Sayısal model simetri eksen keskin geçişler

Şekil 4.30 da CFD blokajsız çözümünün 1:5 model ART testi ile kıyaslama sonucu görülmektedir. C_p trendi paralel görülmekle birlikte model arka bölgesinde bir miktar fark gözlemlenmiştir. Bu bölgedeki fark türbülans modellerinin mevcut mesh sayılarıyla bu bölgedeki ayrılmayı deneysel çalışmada olduğu şekliyle modelleyememesidir. Bu bölgede mesh sayısında yapılacak artışın modellemeyi daha sağlıklı hale getirmesi beklenir. Bu çalışmada HW limitleri nedeniyle ağ(mesh) sayısı limitli tutulmuştur. **Şekil**

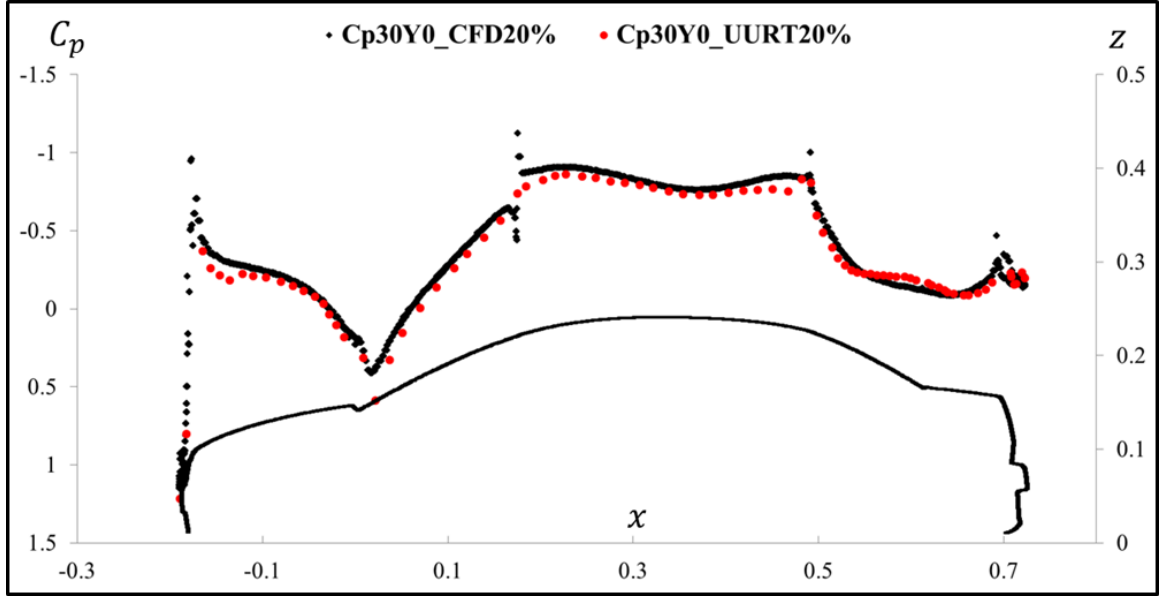
4.31 da 1:10 ölçekli Fiat Linea model ile 1:5 ölçekli model CFD simülasyonu kıyaslanmıştır ve C_p dağılımlarının bire bir çakıştığı görülmektedir. Burada 1:10 modelde modelin küçülmesiyle birlikte akım ayrılma karakteristiğinin 1:5 modelde olduğu gibi tam yakalanamaması düşünülmektedir. Fakat Şekil 4.32 de blokaj modellemesinde çözüm alanı domaini küçüldüğünde mesh yoğunluğu artmış ve 16M ağ seviyesine ulaşmıştır. Bu durumda CFD sonuçlarının model arka bölgesinde daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.



Şekil 4.30 “1:5” model simetri ekseninde CFD ve ART C_p kıyaslaması (30 m/s)



Şekil 4.31 “1:10” model simetri ekseninde C_p dağılımının “1:5” model CFD C_p dağılımıyla kıyaslaması (30 m/s)

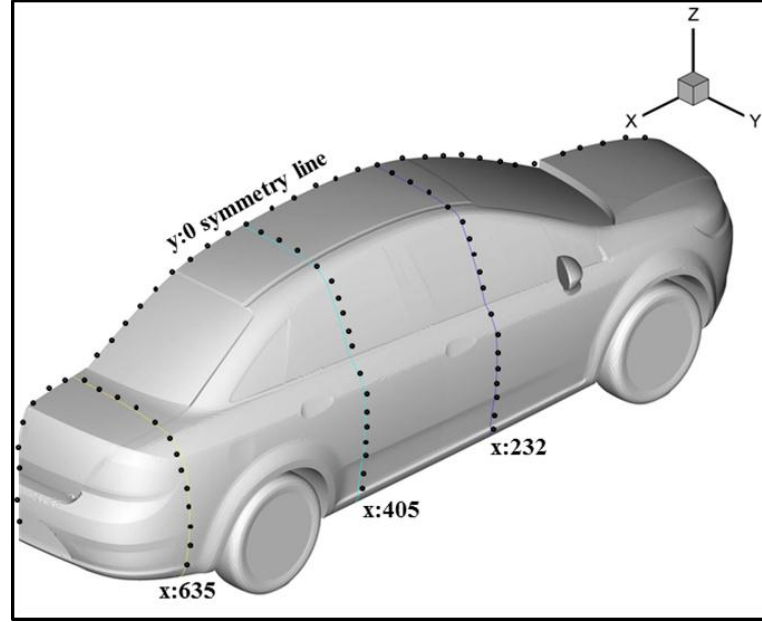


Şekil 4.32 “1:5” model simetri eksenini 20 % blokaj durumunda CFD ve UURT C_p kıyaslaması (30 m/s)

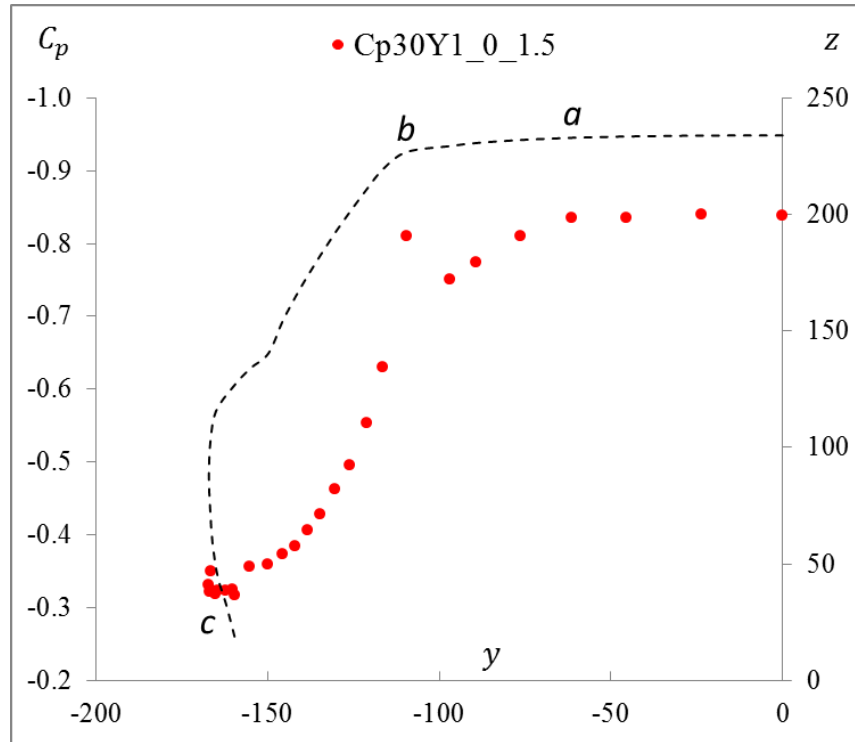
4.2.2. Yanal Eksenler Üzerindeki ($x:232$, $x:405$, $x:635$) Basınç Dağılımları ($\beta = 0$)

Yan ekseninde basınç ölçümleri üç kesitte gerçekleştirilmiştir. **Şekil 4.33** de 1:5 model için bu kesitler görülmektedir. $x:232$ kesitinde 26 adet, $x:405$ kesitinde 26 adet ve $x:635$ kesitinde de 18 adet olmak üzere 1:5 modelde yan kesitlerde toplam 70 adet $\emptyset = 1$ mm çapında statik basınç delikleri bulunmaktadır. 1:10 ölçekli modelde ise nokta sayıları seyreltilerek $x:232$ kesitinde 13, $x:405$ kesitinde 13, ve $x:635$ kesitinde 9 adet olmak üzere 35 adet statik basınç deliği oluşturulmuştur. **Şekil 4.34** da $x:232$ kesitinde 30 m/s serbest akım hızında 1:5 model üzerindeki statik basınç dağılımı görülmektedir. Grafikte $Cp30Y1_0_1.5$ ifadesi 30 m/s hızda Y1 ($x:232$) kesitinde, $\beta = 0^\circ$ yanal açısında, 1:5 ölçekli modelin basınç dağılımını ifade etmektedir. Y1 kesitinde tavan üzerinde (a) noktasına kadar basınç sabit iken (b) noktasında ön kapı üst çerçeve kısmında 1:5 modelin 20 % blokaj oluşturmasına bağlı olarak C_p değerinde lokal negatif pik değeri oluşmaktadır. Bu noktadan sonra kesit alt etek noktalarına doğru (c) basınç artarak -0.3 seviyelerine ulaşmaktadır. **Şekil 4.35** de $x:405$ kesiti üzerindeki basınç dağılımı görülmektedir. Bu kesit de Y2 kesiti olarak adlandırılmıştır. Bu kesitte de Y1 kesitinde olduğu gibi (a) noktasına kadar basınç sabit görülmektedir, (b) noktasına doğru bir miktar artış gözlenirken tekrar (c) noktasında arka kapı üst çerçeve

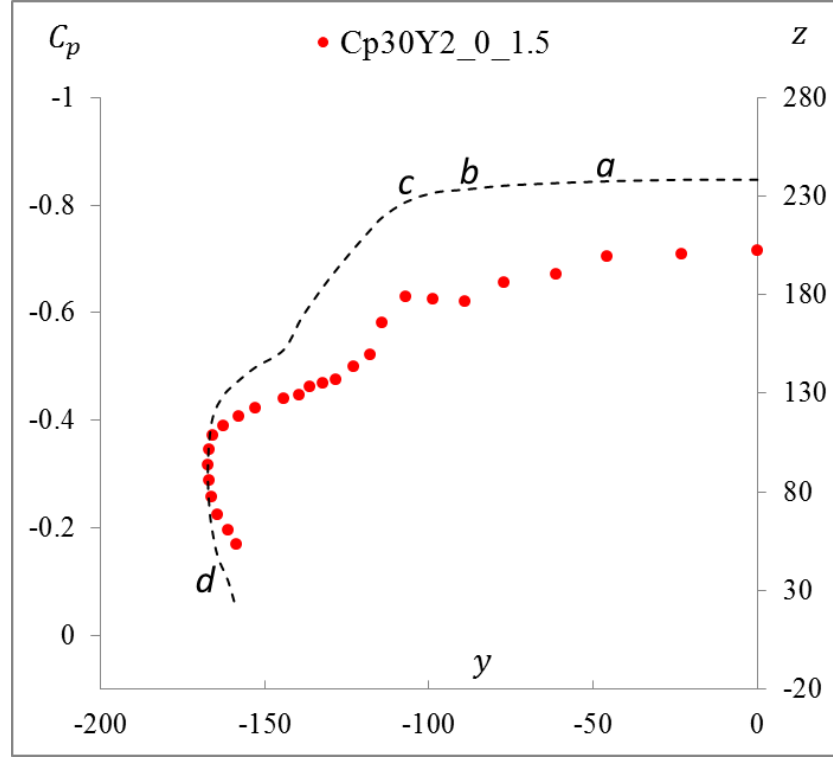
bölgesinde negatif pik yakalanmıştır. Bu bölgede dış dikiz aynanın etkisi görülmektedir. (d) noktasına, kesit alt etek bölgesine doğru basınç tekrar artmaktadır.



Şekil 4.33 “1:5” model yan eksenlerdeki basınç delik pozisyonları

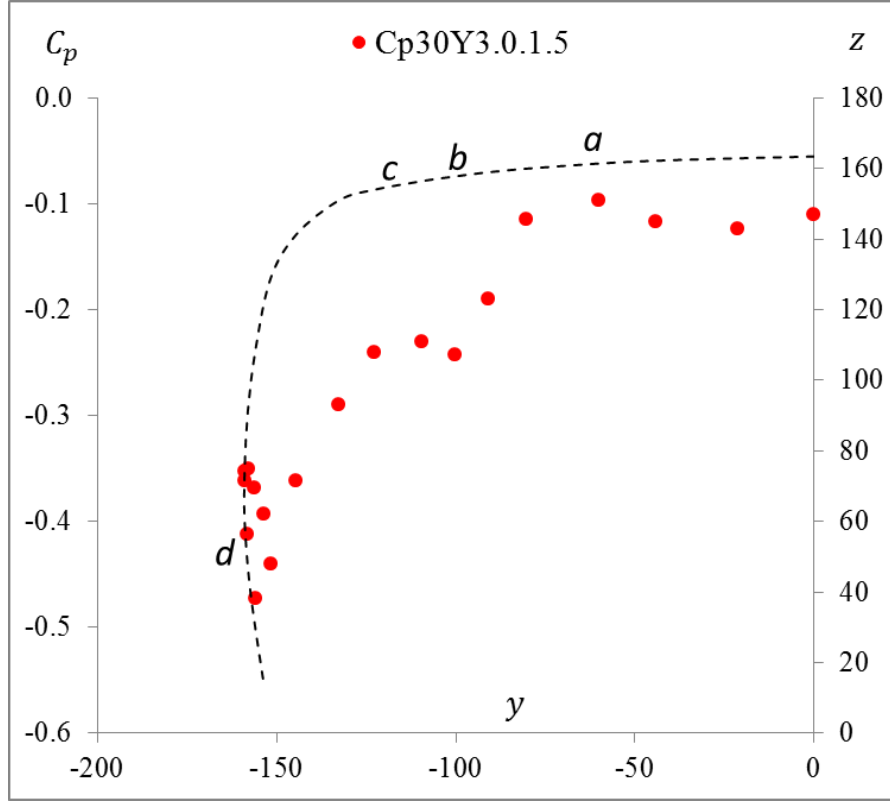


Şekil 4.34 “1:5” model Y1 kesiti basınç dağılımı ($U_{\infty} = 30$ m/s, $\beta = 0^{\circ}$)



Şekil 4.35 "1:5" model Y2 kesiti basınç dağılımı ($U_{\infty} = 30$ m/s, $\beta = 0^{\circ}$)

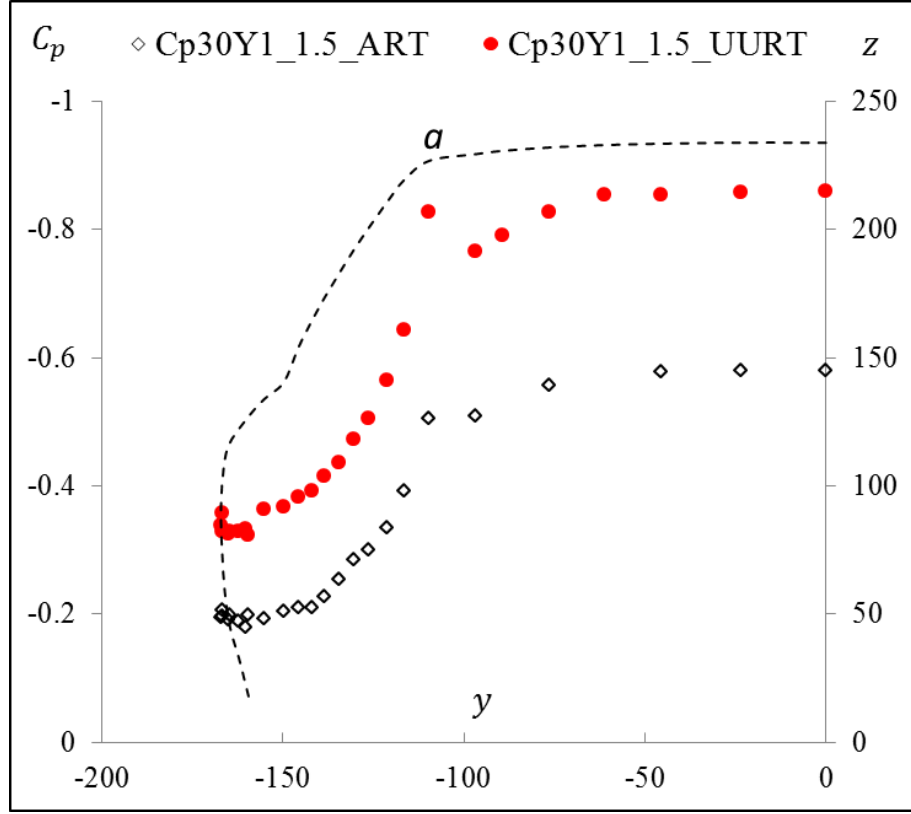
Şekil 4.36 da ise x: 635 kesiti üzerindeki basınç dağılımı görülmektedir. Bu kesit de Y3 kesiti olarak adlandırılacaktır. Bu kesitte de (a) noktasına kadar basınç sabit değerlendirilebilir (b) noktasında ani lokal basınç düşüşü gözlenmektedir. (c) noktasında ise basınç tekrar lokal olarak artmaktadır. Daha sonra (d) noktasına kadar basınç tekrar düşüşe geçmektedir. (d) noktasında ise akımın çok kararsız olduğu görülmektedir. Bu bölgede basınçlar -0.3 ile -0.5 değeri arasında salınım göstermektedir. Y3 kesitinin bu kadar kararsız olmasının nedenlerinden biri tavan bölgesinden gelen akım ile yan dikiz aynalarından gelen akımın özellikle bagaj kaputunun yan kısımlarında akımı etkilemesi olarak değerlendirilebilir. Özellikle bagaj kaputunun arka yan çamurluklara yakın bölgesinde (c) noktasında kopan akımın tekrar model yüzeyine yapıştığı görülmektedir.



Şekil 4.36 “1:5” model Y3 kesiti basınç dağılımı ($U_{\infty} = 30$ m/s, $\beta = 0^{\circ}$)

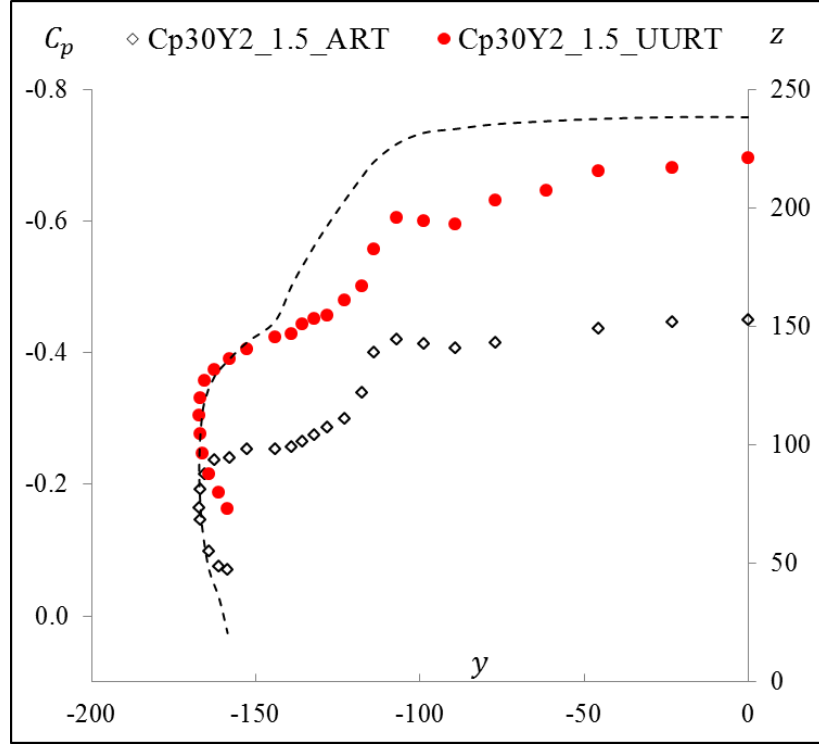
Bu noktadan itibaren sırasıyla yan kesitler üzerindeki basınç dağılımlarının 1:5 modeli ART test sonuçlarıyla, 1:10 modelin UURT sonuçlarıyla ve CFD StarCCM+ sonuçlarıyla hem blokajsız hem de blokaj simülasyonu sonuçlarıyla kıyaslamaları verilecektir. Basınç ölçümleri 10, 20, 30 m/s hızlarda alınmasına rağmen profillerin hızlara göre belirgin fark oluşturmadığı gözlemlendiğinden kıyaslamalarda 30 m/s hız değeri baz alınmıştır.

Şekil 4.37 de Y1 kesiti üzerindeki basınç dağılımları UURT ve ART testleriyle kıyaslanmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi UURT de 1:5 ölçekli model %20 blokaj oluşturur iken aynı model ART de %1 blokaj oluşturmaktadır. Blokajın basınçlar üzerindeki etkisi grafikte net olarak görülmektedir. Basınç trendleri çok benzer iken özellikle tavan üzerinde blokaja bağlı akım hızı değişiminin oluşturduğu basınç farkları çok belirginleşmiştir. (a) noktasında UURT testinde görülen pik tamamıyla blokaja bağlı değerlendirilebilir zira ART testlerinde testlerinde bu bölgede pik oluşmamış basınç sabit kalmıştır.

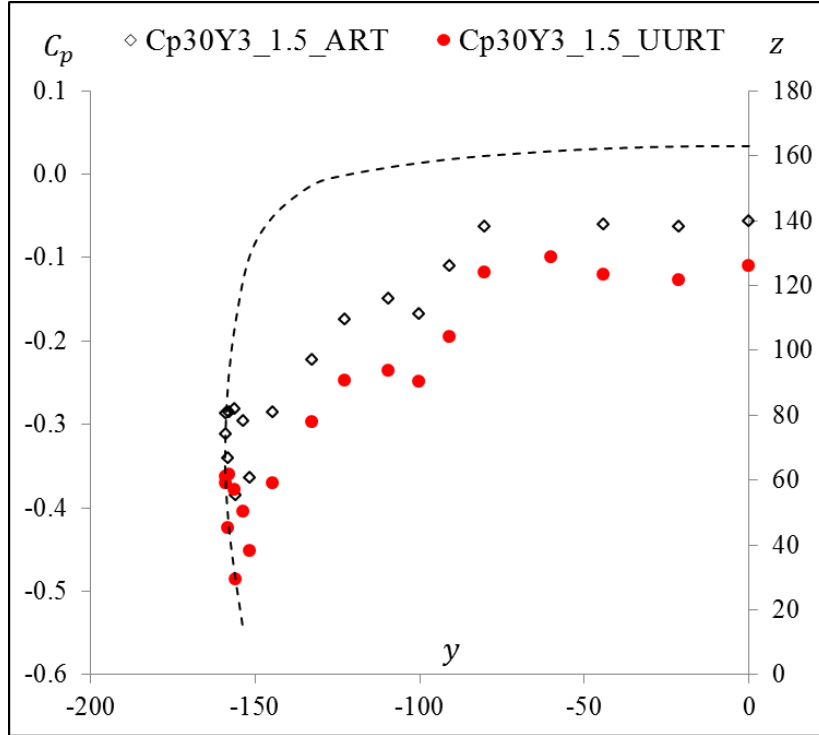


Şekil 4.37 "1:5" model Y1 kesiti basınç dağılımı kıyaslaması (UURT ve ART, $U_{\infty} = 30$ m/s, $\beta = 0^{\circ}$)

Şekil 4.38 de 1:5 model Y2 kesitinde UURT ve ART testleri 30 m/s akım hızlarında karşılaştırılmıştır. Bu kesitte de C_p trendleri birbiriyle uyumludur, blokaj etkisine bağlı olarak ART de negatif basınç değerleri daha düşük gözlemlenmektedir. Arka kapı çerçevesi üzerinde yakalanan negatif pik ART testlerinde de gözlemlenmiştir. Şekil 4.39 da Y3 kesitinde 30 m/s hızda UURT ve ART test sonuçları kıyaslanmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi basınç trendleri tamamıyla paraleldir. Arka yan çamurluğa yakın bölgelerde ART testlerinde de yüzeyden kopan akımın tekrar yüzeye yapıştığını gözlemlenmektedir. Gene kesit yan etek bölgelerinde basınç dalgalanmaları görülmektedir.

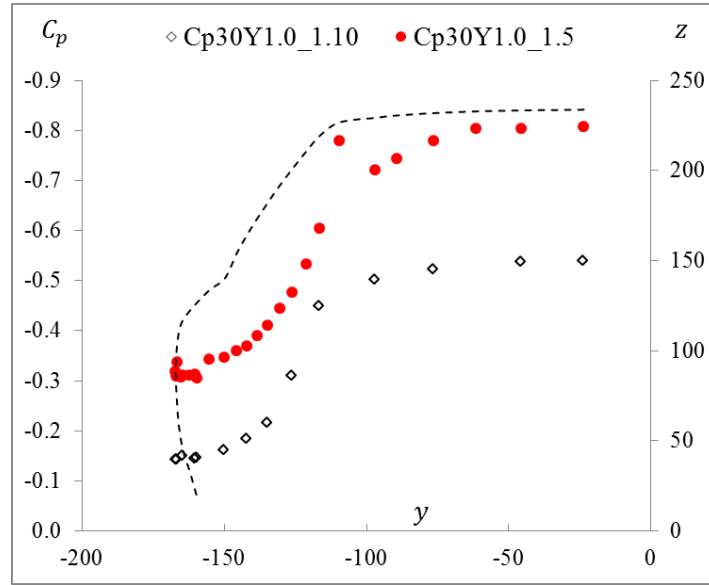


Şekil 4.38 "1:5" model Y2 kesiti basınç dağılımı kıyaslaması (UURT ve ART, $U_\infty = 30$ m/s, $\beta = 0^\circ$)

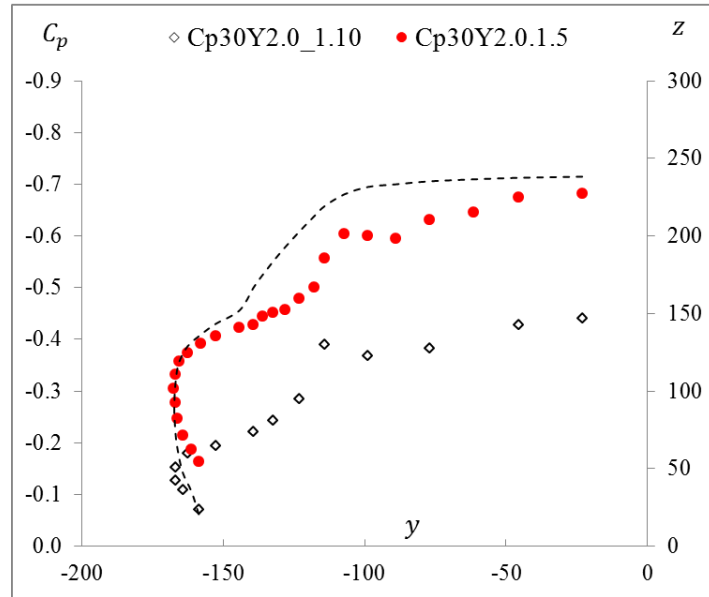


Şekil 4.39 "1:5" model Y3 kesiti basınç dağılımı kıyaslaması (UURT ve ART, $U_\infty = 30$ m/s, $\beta = 0^\circ$)

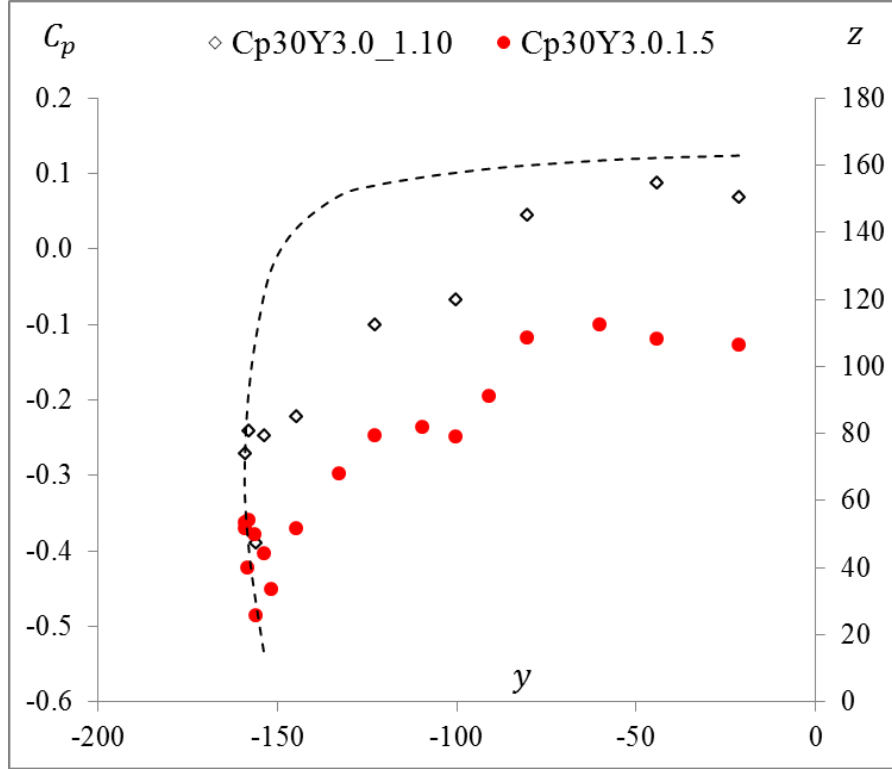
Şekil 4.40, Şekil 4.41 ve Şekil 4.42 de 1:5 model UURT testleri 1:10 model UURT testleriyle karşılaştırılmıştır. Aynı tünel şartlarında %20 blokaj ve %5 blokaj durumları test edilmiştir. Y1 ve Y2 kesitlerinde trendler ART kıyaslamalarıyla uyumlu iken Y3 kesitinde 1:5 ve 1:10 modeller arasındaki fark belirginleşmiştir. Bunun nedeni modelin 1:5 ten 1:10 a küçülmesiyle birlikte Reynolds benzerliğinin bozulması sebebiyle 1:10 modelde model arkasının 1:5 detayında yakalanamaması olarak belirtilebilir.



Şekil 4.40 “1:5” ve “1:10” modeller Y3 kesiti UURT basınç dağılımı karşılaştırması ($U_{\infty} = 30 \text{ m/s}$, $\beta = 0^{\circ}$)

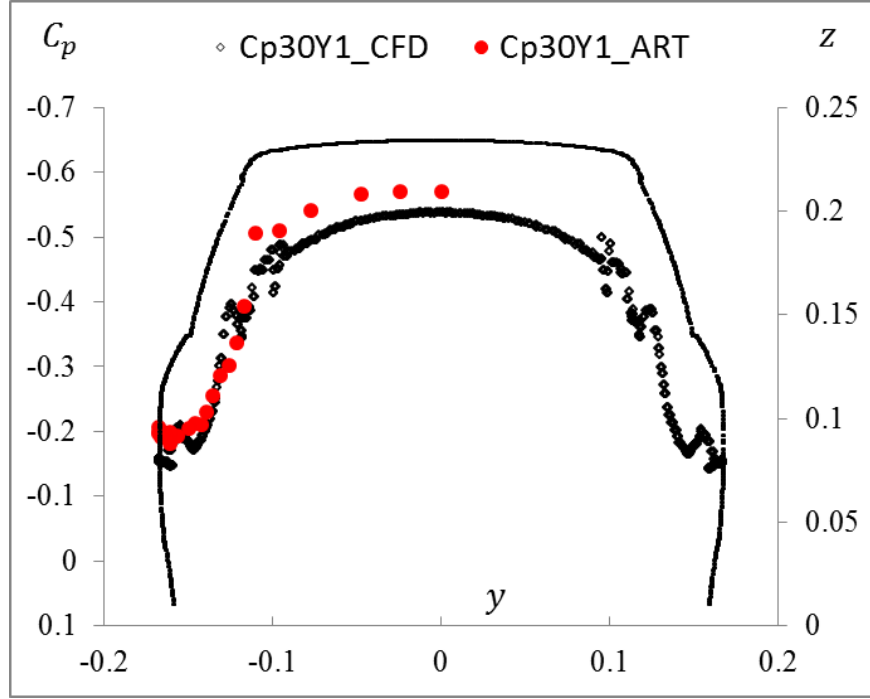


Şekil 4.41 “1:5” ve “1:10” modeller Y2 kesiti UURT basınç dağılımı karşılaştırması ($U_{\infty} = 30 \text{ m/s}$, $\beta = 0^{\circ}$)

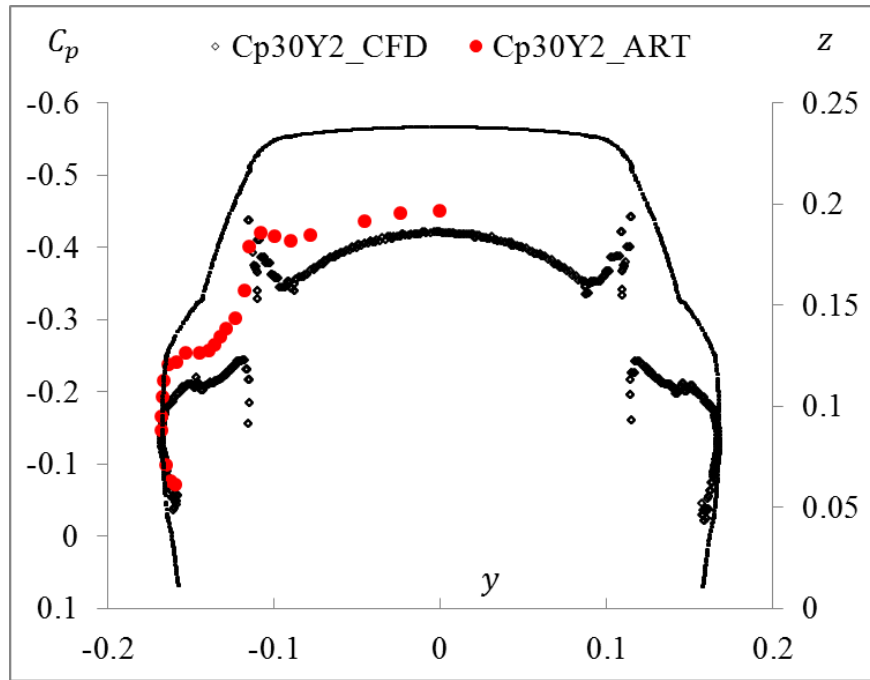


Şekil 4.42 “1:5” ve “1:10” modeller Y3 kesiti UURT basınç dağılımı kıyaslaması ($U_{\infty} = 30$ m/s, $\beta = 0^{\circ}$)

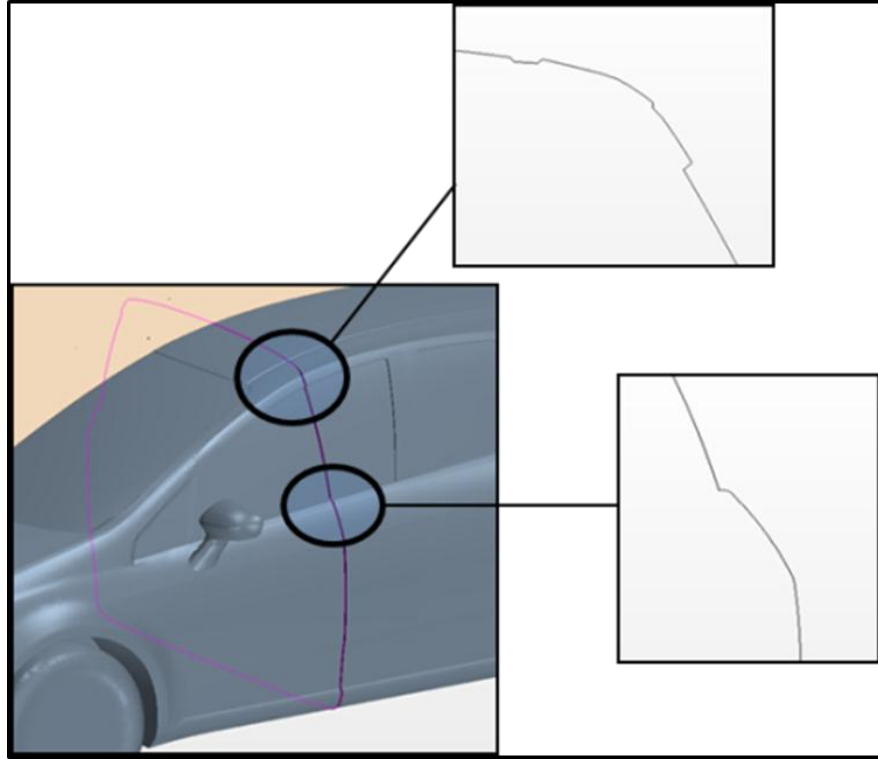
1:5 model yan kesitlerdeki C_p dağılımlarının CFD çözümleriyle kıyaslaması aşağıda verilmiştir. **Şekil 4.43** de Y1 kesitinde 1:5 model 30 m/s serbest akım hızında ART test sonucunun CFD ile uyumlu olduğu ve basınç trendinin aynı olduğu görülmektedir. Tavan üzerinde küçük sapma olmasına rağmen dağılım uyumludur. Y2 kesiti üzerindeki 30 m/s hızda C_p dağılımı ART testi ve CFD kıyaslaması **Şekil 4.44** de verilmiştir. Sayısal analizde yan yüzeyde görülen kopma model çizgisindeki keskin geçişin yarattığı bir durumdur (**Şekil 4.45**). Y2 kesitinde lokal anlamda küçük sapmalar görülmekle birlikte trend çok uyumludur. Sayısal çözümde de kapı üst çerçeve bölgesinde basınç negatif piki yakalanmaktadır. **Şekil 4.46** de Y3 kesidi üzerindeki C_p dağılımı görülmektedir. CFD dağılımı ART testlerine göre bagaj kapağı üstünde bir miktar sapmıştır. Bu sapmanın gerekçesi önceki bölümlerde anlatılmıştır. Fakat basınç trendleri aynıdır.



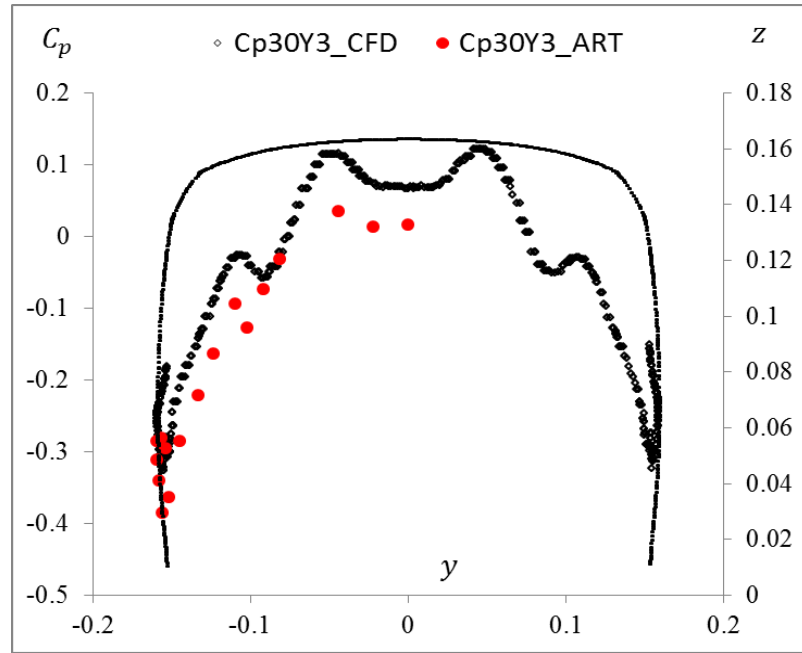
Şekil 4.43 “1:5” model Y1 kesiti ART basınç dağılımı CFD kıyaslaması ($U_{\infty} = 30$ m/s, $\beta = 0^{\circ}$)



Şekil 4.44 “1:5” model Y2 kesiti ART basınç dağılımı CFD kıyaslaması ($U_{\infty} = 30$ m/s, $\beta = 0^{\circ}$)

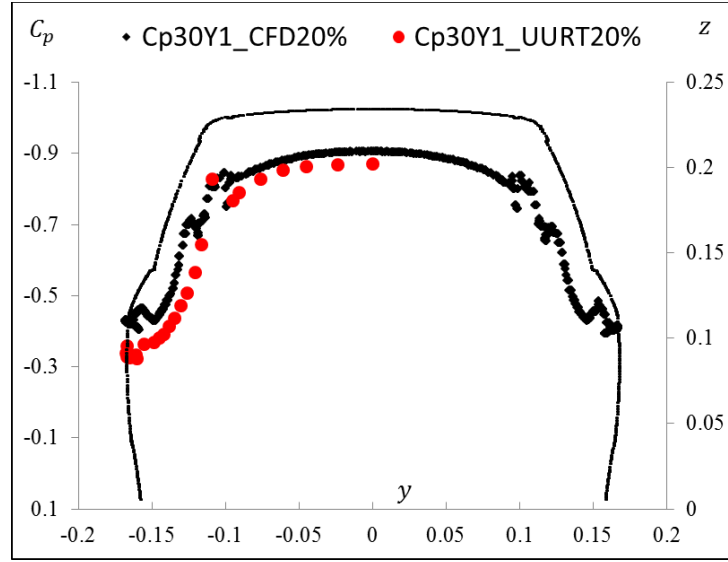


Şekil 4.45 Yan kesitlerde modeldeki keskin geçişler

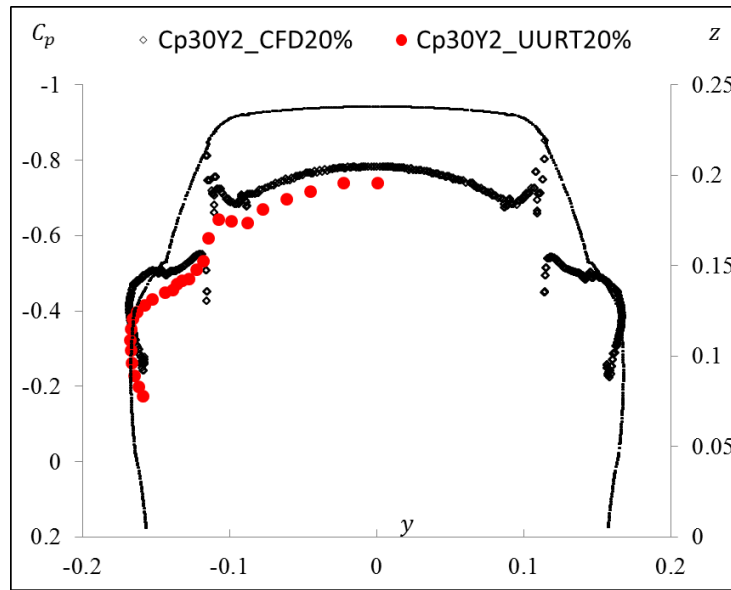


Şekil 4.46 "1:5" model Y3 kesiti ART basınç dağılımı CFD kıyaslaması ($U_{\infty} = 30$ m/s, $\beta = 0^{\circ}$)

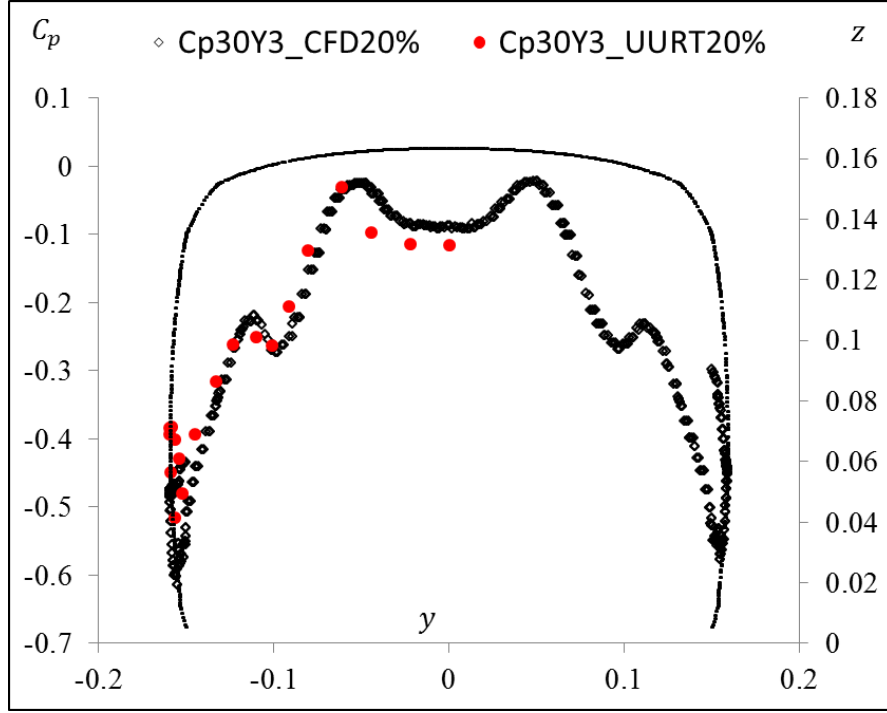
Şekil 4.47 , Şekil 4.48 ve Şekil 4.49 de CFD 1:5 model blokaj modellemesi sonucunda elde edilen Y1, Y2, Y3 kesitlerindeki C_p dağılımları UURT sonuçlarıyla kıyaslanmış olup sonuçlar tamamıyla uyumludur. Blokaj simülasyonu için sayısal çözüm alanı UURT tüneli deney odası boyutlarında alınmıştır. 30 m/s akım hızında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.47 "1:5" model Y1 kesiti CFD 20 % blokaj C_p dağılımının UURT kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s, $\beta = 0^\circ$)



Şekil 4.48 "1:5" model Y2 kesiti CFD 20 % blokaj C_p dağılımının UURT kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s, $\beta = 0^\circ$)

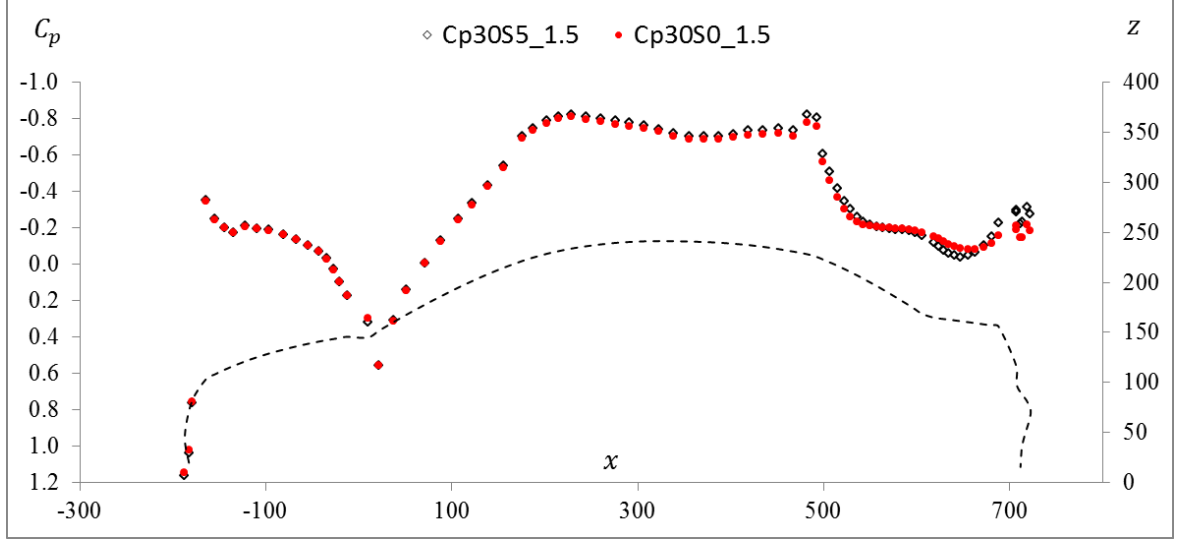


Şekil 4.49 "1:5" model Y3 kesiti CFD 20 % blokaj C_p dağılımının UURT kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s, $\beta = 0^\circ$)

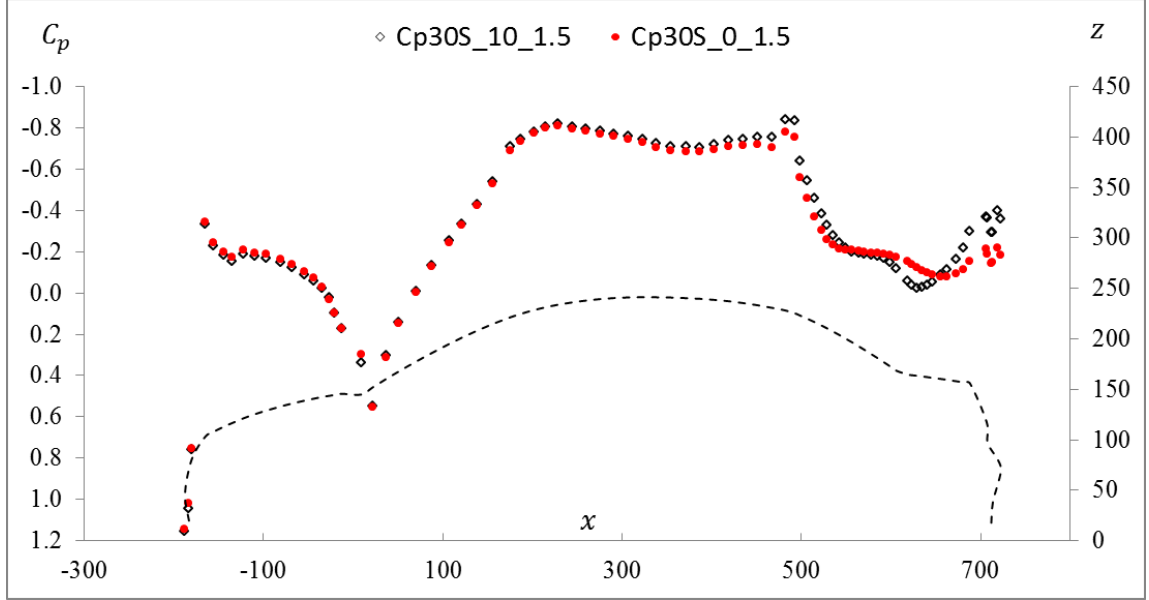
4.3 Basınç Dağılımlarının Yanal Rüzgar Açılı Durumunda Analizi ($\beta > 0$)

Yanal açılarda gerçekleştirilen testler model ve modele bağlı olarak deney odası ebatlarıyla sınırlandırılmıştır. 1:5 model UURT tüneline $\beta = 10^\circ$ yanal açıya kadar denenebilmiştir. ART testleri de UURT ile karşılaştırılabilirliği açısından 10° ye kadar gerçekleştirilmiştir. $\beta = 10^\circ$ yanal açıya kadar CFD analizleri de gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Daha yüksek yanal açılardaki aerodinamik analizler 1:10 ölçekli model için $\beta = 40^\circ$ yanal açıya kadar gerçekleştirilmiştir. Açılar saat yönüne model sağa doğru döndürülerek verilmiştir. Şekil 4.50 de 30 m/s akım hızında 1:5 modelin %20 blokaj durumunda $\beta = 5^\circ$ yanal açıda simetri eksenindeki basınç dağılımının $\beta = 0^\circ$ konumuyla kıyaslaması görülmektedir. Şekilde belirtilen Cp30S5_1.5 ifadesi 30 m/s hızda simetri ekseninde 5° lik yanal açı durumunda 1:5 ölçekli modelin basınç dağılımını belirtmektedir. Şekilden de görüleceği üzere 5° yanal açıda tavan arka kısımdan itibaren çok minimal değişimler gözlenmiştir. Şekil 4.51 de ise $\beta = 10^\circ$ yanal açı durumundaki C_p dağılımı karşılaştırması

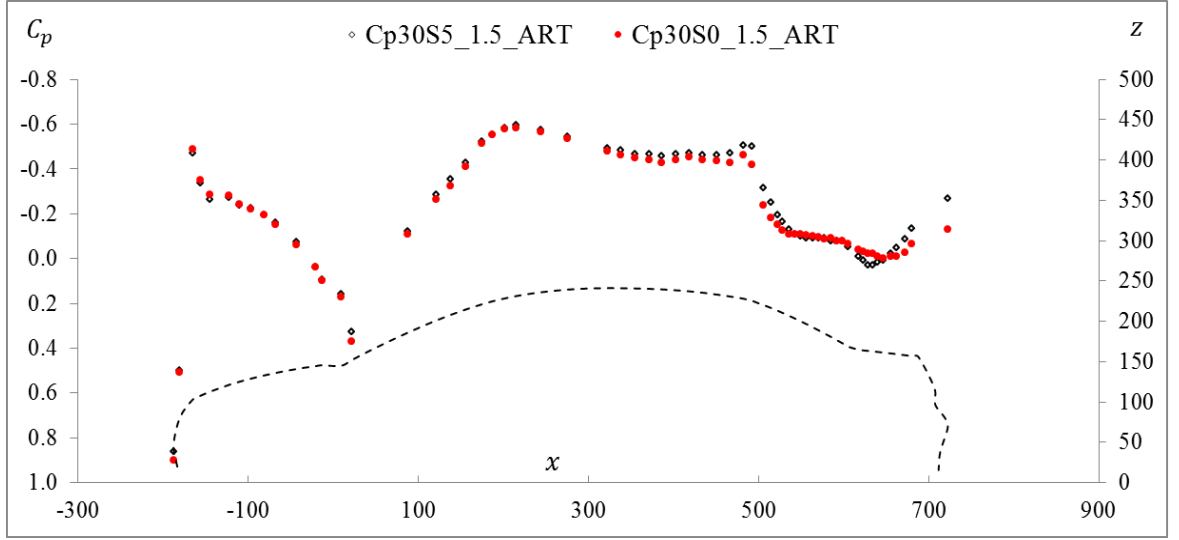
görülmektedir. Tavan arka bölgesinden model arka bölgesine doğru basınç değişimi 5° ye nazaran biraz daha belirginleşmektedir.



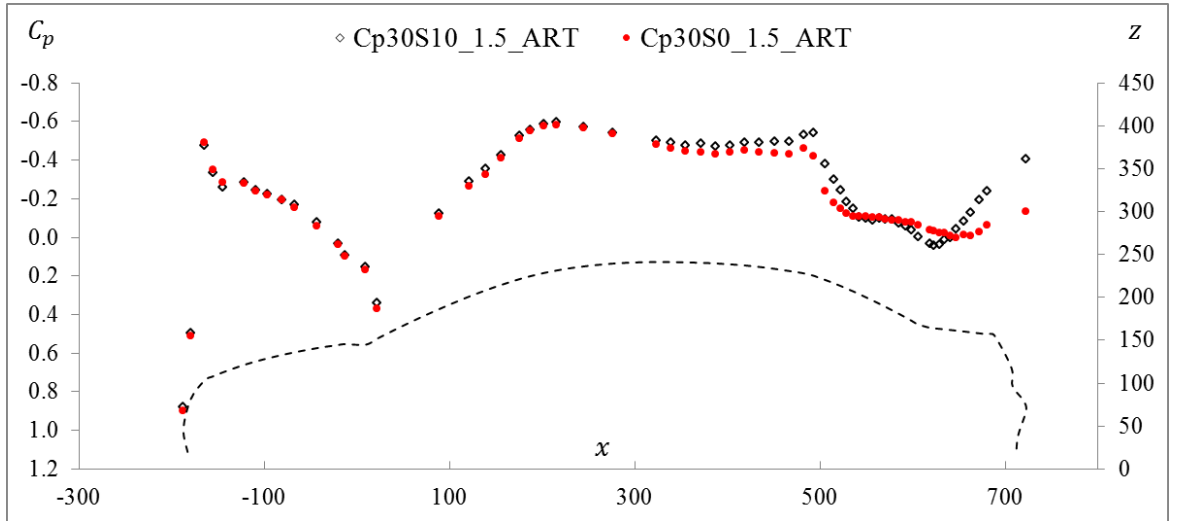
Şekil 4.50 "1:5" model simetri ekseninde $\beta = 0^\circ$ ve 5° de C_p dağılımı UURT kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)



Şekil 4.51 "1:5" model simetri ekseninde $\beta = 0^\circ$ ve 10° de C_p dağılımı UURT kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)



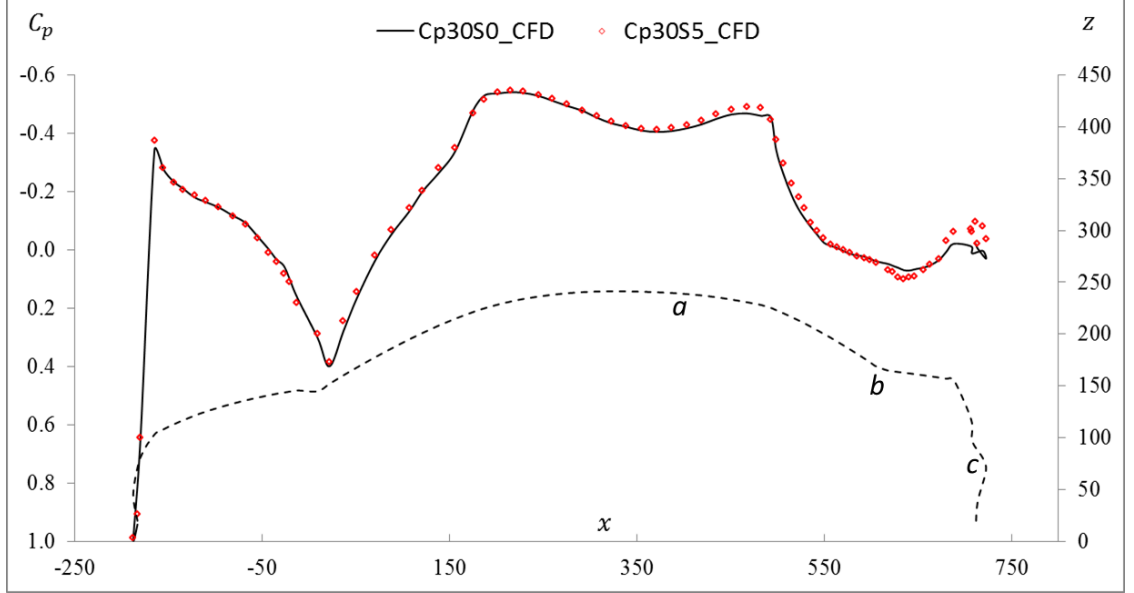
Şekil 4.52 “1:5” model simetri ekseninde $\beta = 0^\circ$ ve 5° de C_p dağılımı ART kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)



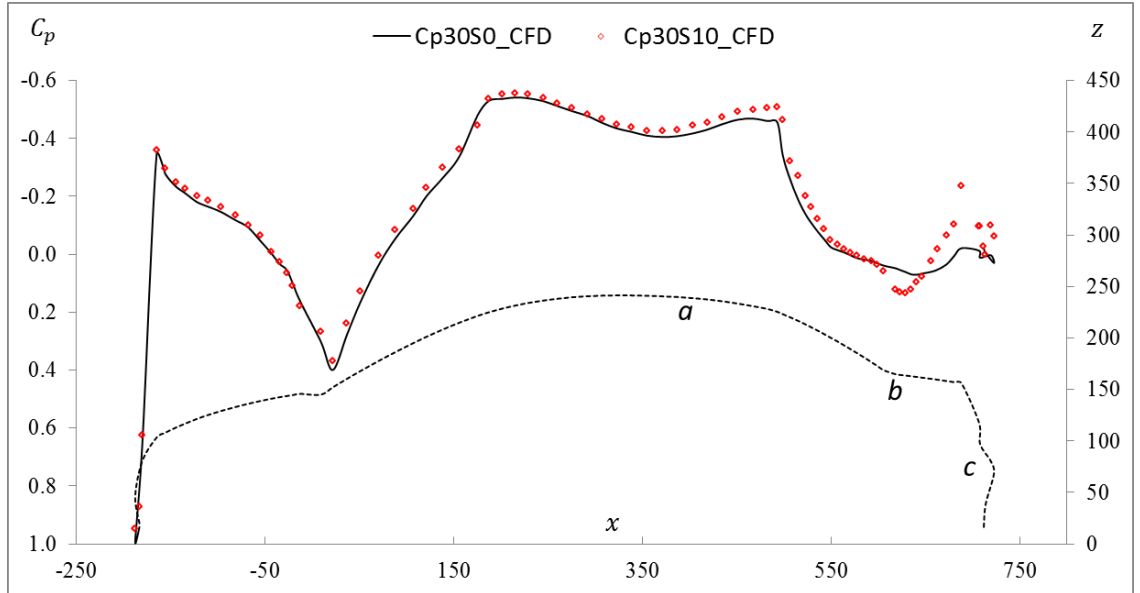
Şekil 4.53 “1:5” model simetri ekseninde $\beta = 0^\circ$ ve 10° de C_p dağılımı ART kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)

Şekil 4.52 ve **Şekil 4.53** de 1:5 ölçekli model ART testlerinde 30 m/s serbest akım hızlarında $\beta = 5^\circ$ ve $\beta = 10^\circ$ yanal açılarında simetri eksenindeki C_p dağılımları kıyaslanmış olup UURT testleriyle paralel trendler gözlemlenmiştir. Genel olarak tavan arka kısmından itibaren basınç değişimleri gözlemlenmiştir. **Şekil 4.54** ve **Şekil 4.55** de $\beta = 5^\circ, 10^\circ$ yanal açıları CFD kıyaslamaları görülmektedir. CFD analizleri de deneysel

sonuçlara paralel sonuçlar göstermiştir. (a) bölgesinden itibaren dağılım farklılaşmaya başlamış ve bagaj kapağı üstünde belirginleşmiştir.

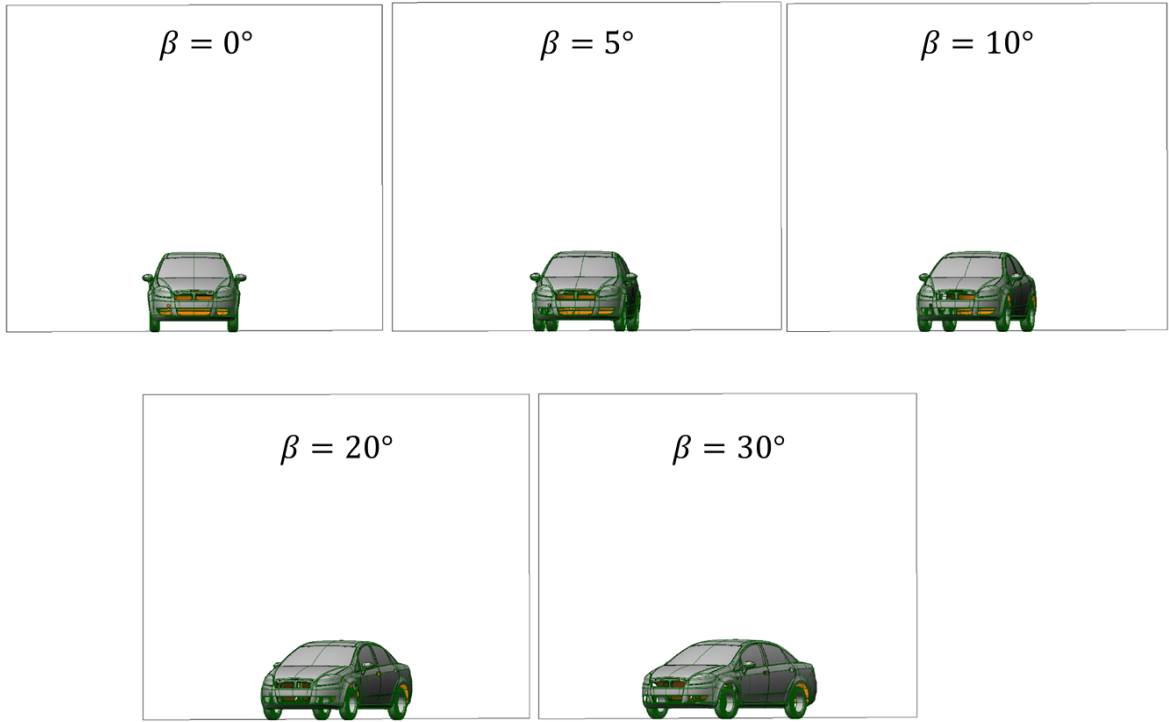


Şekil 4.54 "1:5" model simetri ekseninde $\beta = 0^\circ$ ve 5° de CFD C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)



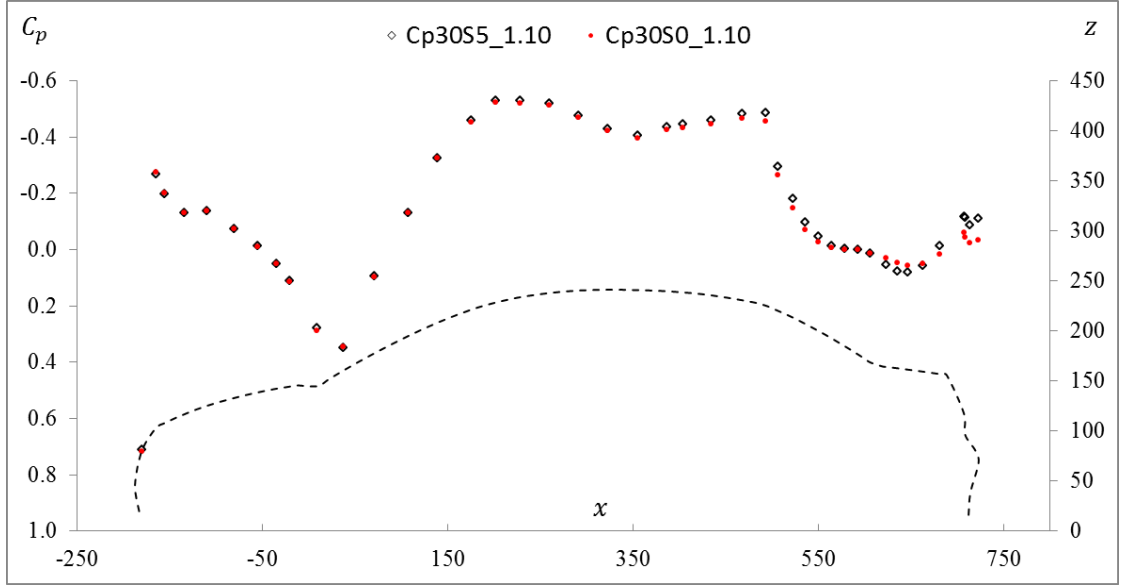
Şekil 4.55 "1:5" model simetri ekseninde $\beta = 0^\circ$ ve 10° de CFD C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)

Yüksek β yanal açıların etkilerini değerlendirebilmek amacıyla UURT tüneline 1:10 ölçekli Fiat Linea modeli teste tabii tutulmuştur. $\beta = 30^\circ$ ye kadar statik basınç değerleri ölçülmüş, simetri ve yanal eksenlerde C_p dağılımları çıkarılmış ve CFD analizleriyle de yüksek β açılarında kıyaslanmıştır. 1:10 ölçekli modelin β açılarındaki deney odası konumları **Şekil 4.56** ölçekli olarak verilmiştir. Özellikle $\beta = 20^\circ, 30^\circ$ yanal açılarındaki tüneldeki blokaj etkisi ve yanal kuvvetler etkisi belirginleşmektedir.

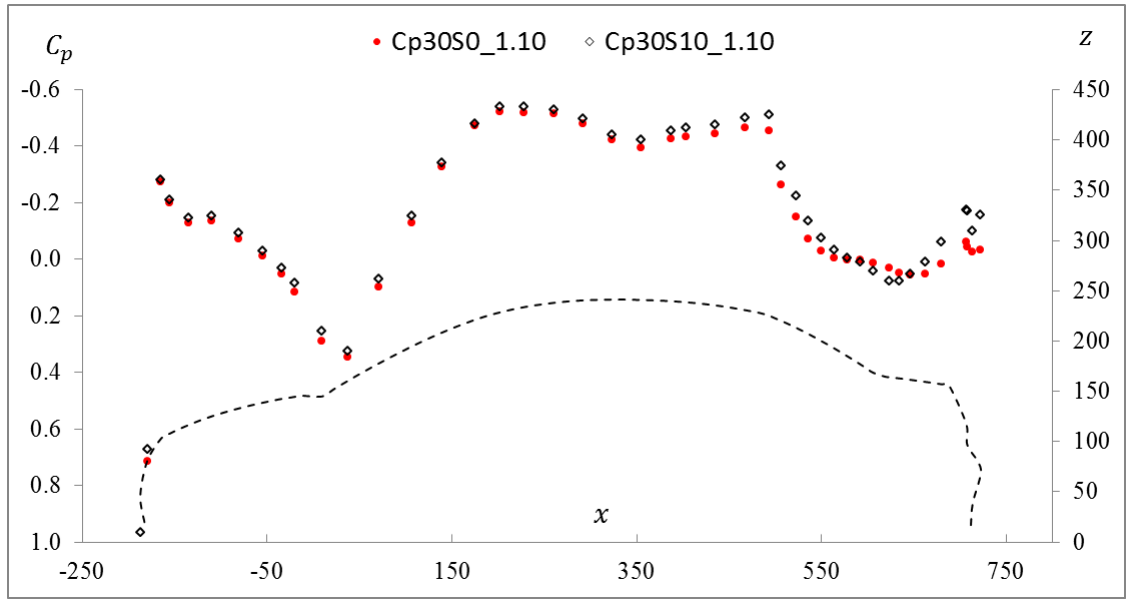


Şekil 4.56 “1:10” model UURT değişik yanal açılarındaki konumu

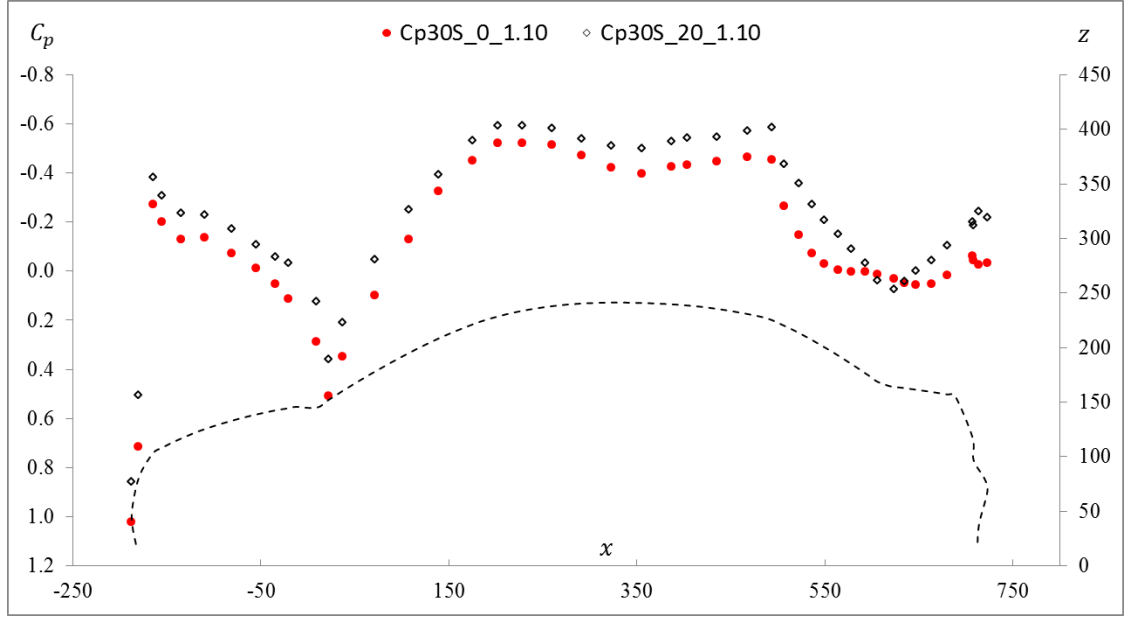
Şekil 4.57 de 1:10 model $\beta = 5^\circ$ yanal açıda simetri eksenindeki C_p dağılımı düz konumla karşılaştırılmıştır. C_p dağılımının düz konuma göre neredeyse aynı kaldığı gözlenmiş, çok küçük minör sapmalar tavan arkasından itibaren gözlenmiştir. **Şekil 4.58** de ise $\beta = 10^\circ$ yanal açıda C_p dağılımı görülmektedir. Yanal açı arttıkça basınç dağılımındaki değişimin belirginleştiği görülmektedir. **Şekil 4.59** ve **Şekil 4.60** da $\beta = 20^\circ, 30^\circ$ lerdeki C_p dağılımları görülmektedir. 20° ve 30° yanal açılarda basınç değişimi çok belirgin olarak görülmektedir. İlerleyen bölümlerde C_d değerlerinin yanal açıyla olan etkileşimi değerlendirilirken bu açılarda C_d değerlerinde de belirgin artışa değinilecektir.



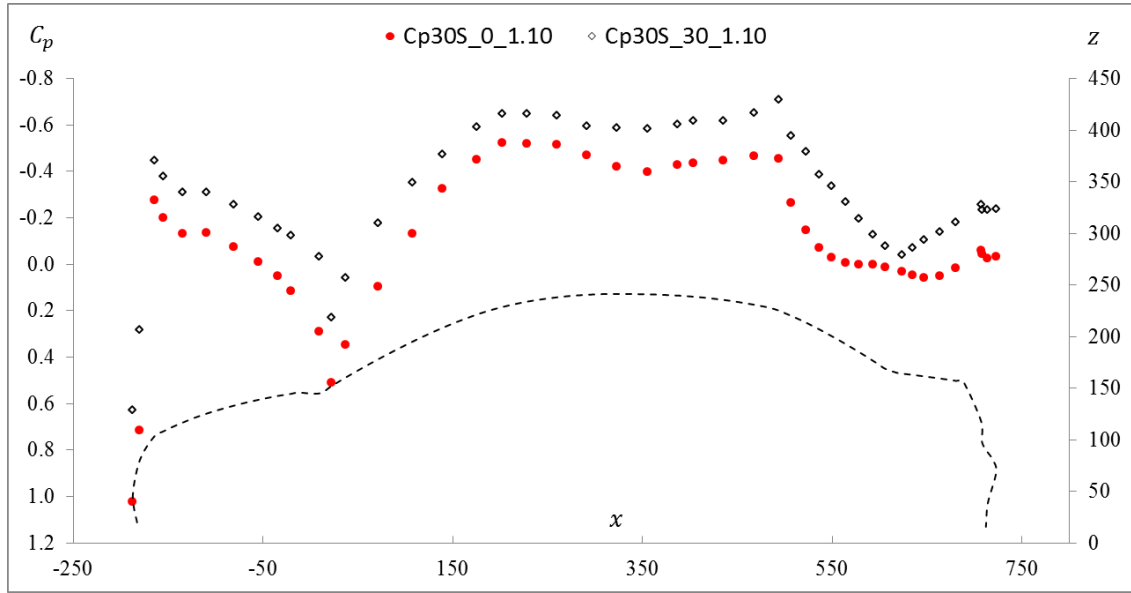
Şekil 4.57 “1:10” model simetri ekseninde $\beta = 0^\circ$ ve 5° de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)



Şekil 4.58 “1:10” model simetri ekseninde $\beta = 0^\circ$ ve 10° de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)



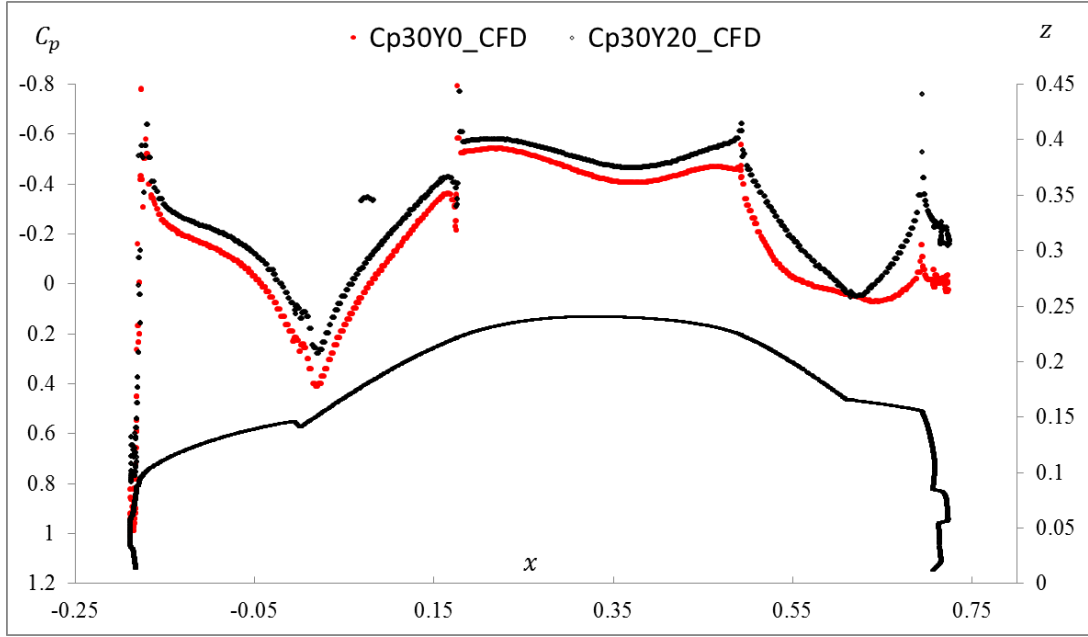
Şekil 4.59 “1:10” model simetri ekseninde $\beta = 0^\circ$ ve 20° de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)



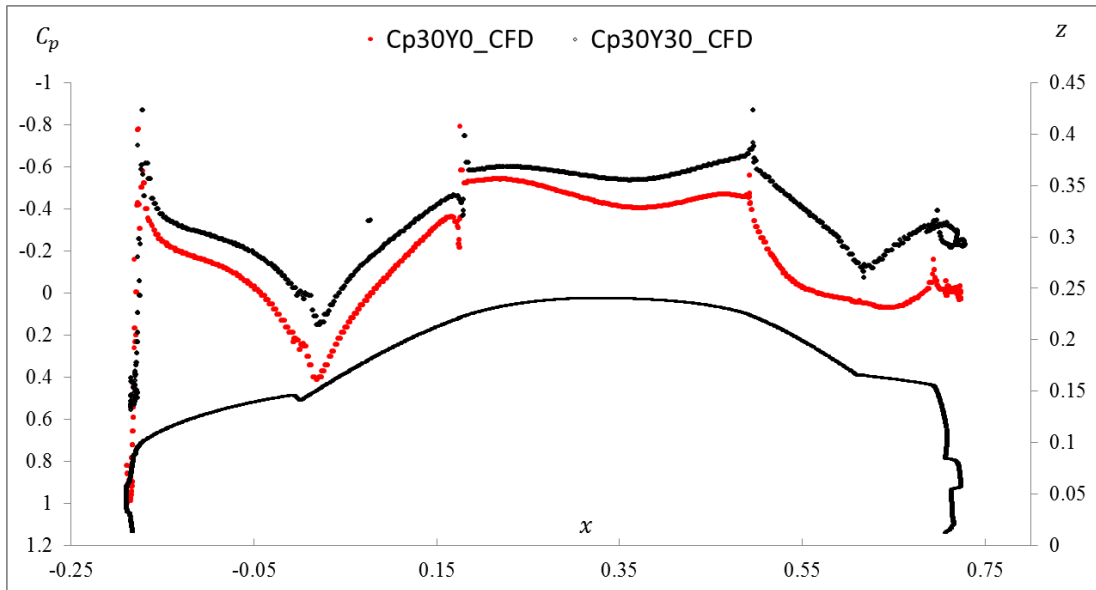
Şekil 4.60 “1:10” model simetri ekseninde $\beta = 0^\circ$ ve 30° de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)

$\beta = 20^\circ$ ve $\beta = 30^\circ$ yanal açılarında simetri eksenindeki CFD C_p dağılımları Şekil 4.61 ve Şekil 4.62 de verilmiş olup deneysel sonuçlarla uyumlu bulunmuştur. Sayısal analizler de $\beta = 20^\circ$ ve 30° yanal açılarında C_p dağılımları $\beta = 5^\circ$ ve 10° ye

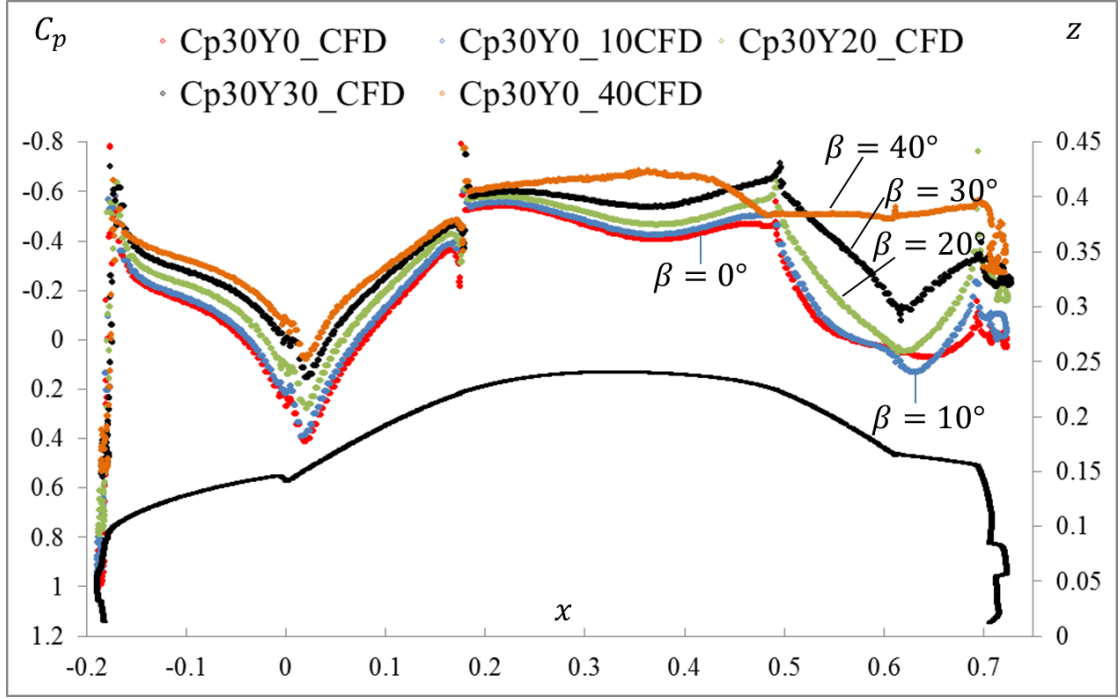
nazaran belirgin bir şekilde değişmiştir. Şekil 4.63 te CFD tüm β yanal açılarında C_p dağılımları görülürken Şekil 4.64 de CFD basınç dağılımları değişik β yanal açılarında UURT deneysel 1:10 model sonuçlarıyla karşılaştırmaları görülmektedir. CFD ve deneysel dağılımlar birbiriyle tamamiyle uyumlu bulunmuştur.



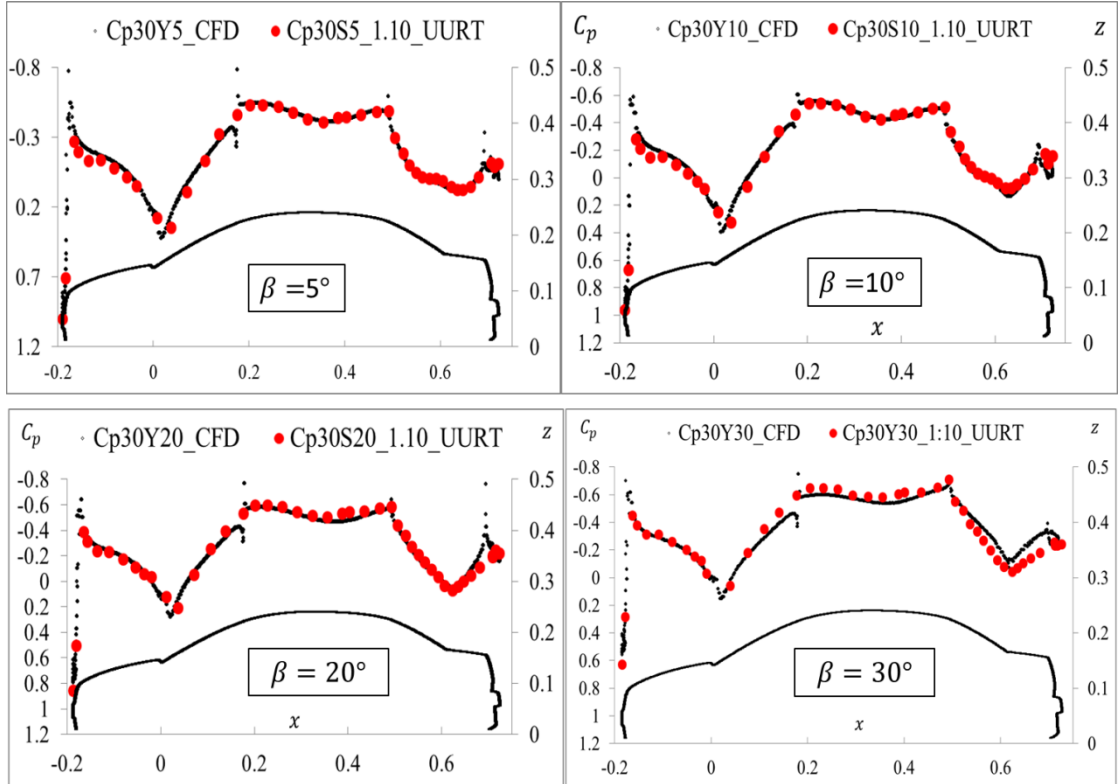
Şekil 4.61 CFD simetri ekseninde $\beta = 0^\circ$ ve 20° de C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)



Şekil 4.62 CFD simetri ekseninde $\beta = 0^\circ$ ve 30° de C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)

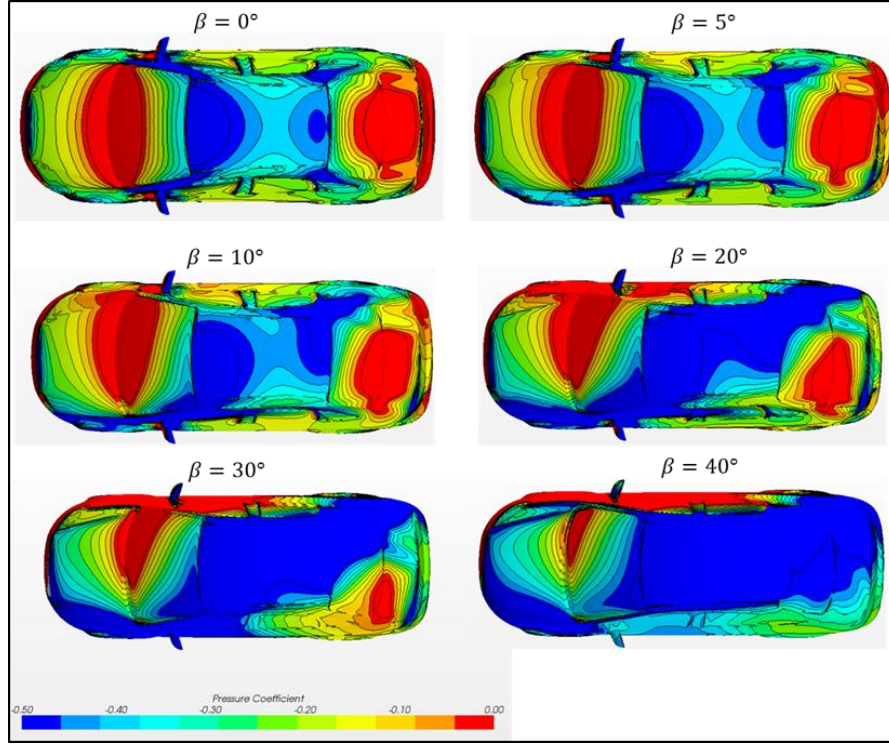


Şekil 4.63 CFD simetri ekseninde $\beta = 0^\circ \div 40^\circ$ de C_p dağılımları ($U_\infty = 30$ m/s)

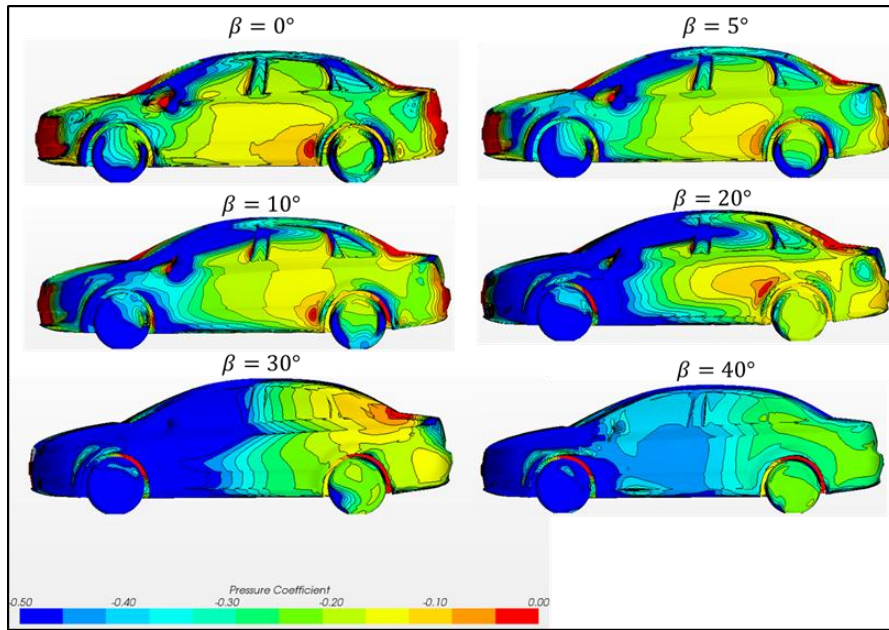


Şekil 4.64 CFD simetri ekseninde $\beta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ ve 30° de C_p dağılımlarının 1:10 model UURT deneysel sonuçlarıyla kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)

Şekil 4.65 ve Şekil 4.66 da ise tüm β yanal açılarındaki CFD basınç konturları görülmektedir.

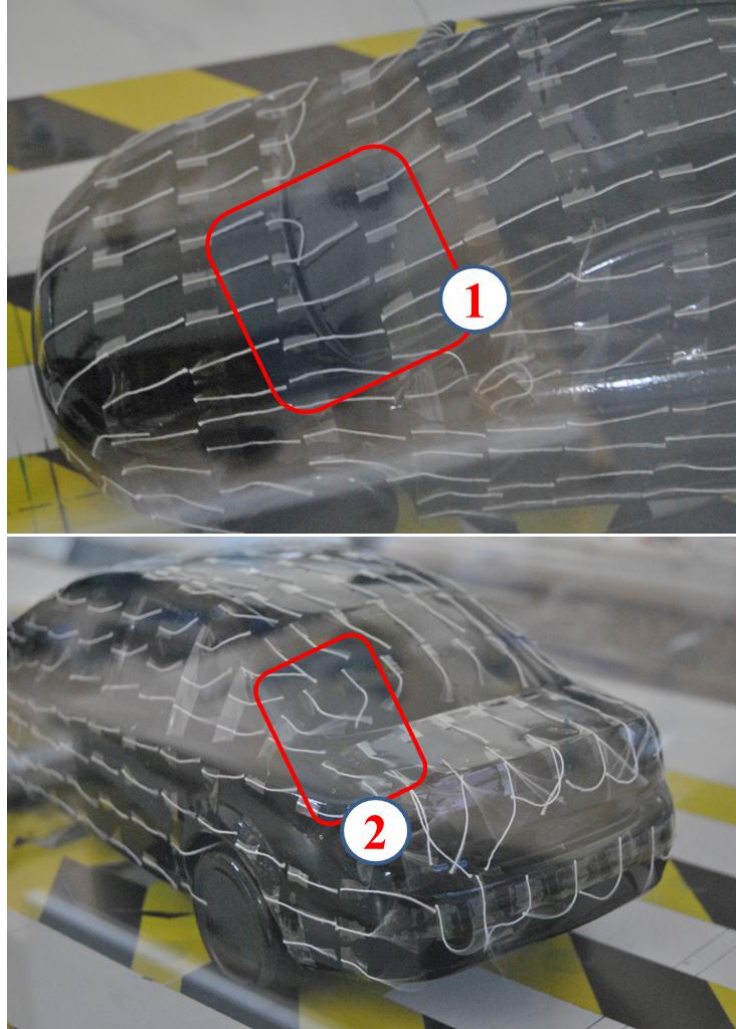


Şekil 4.65 CFD basınç konturları – üstten görünüş ($\beta = 0^\circ \div 40^\circ$ yanal açılarda) ($U_\infty = 30$ m/s)

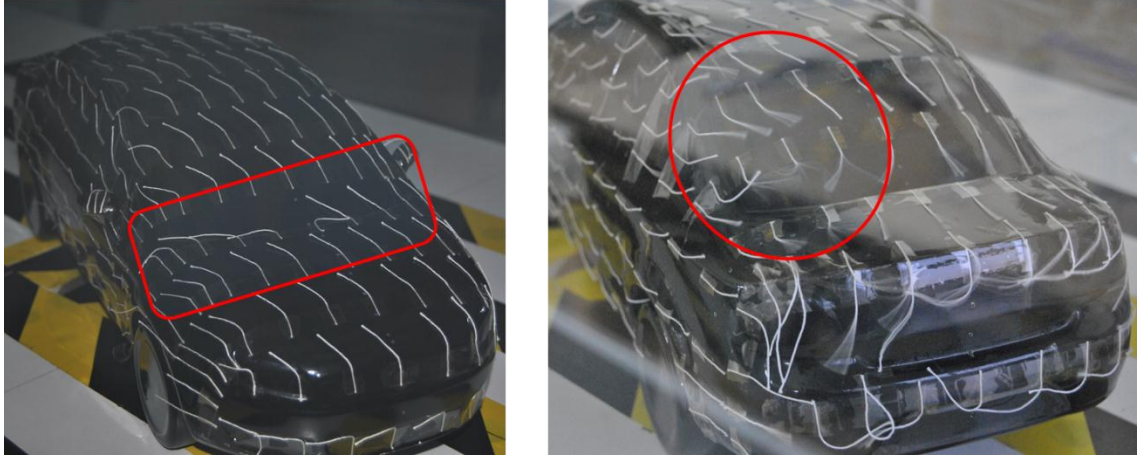


Şekil 4.66 CFD basınç konturları – yan görünüş ($\beta = 0^\circ \div 40^\circ$ yanal açılarda) ($U_\infty = 30$ m/s)

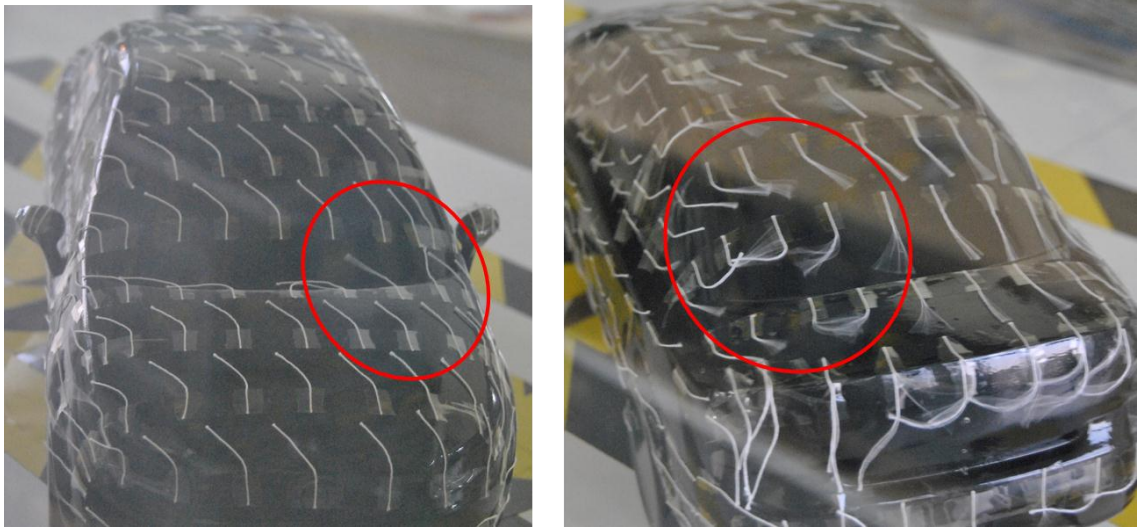
Şekil 4.67 de $\beta = 10^\circ$ yanal açıda 30 m/s serbest akım hızında iplikcik testi sonucu görülmektedir. motor kaputu ve tavan üzerinde akımda belirgin bir bozulma görülmemekle birlikte yan yüzeyde kapı cam bölgelerinde akımın yukarıya doğru yöneldiği görülmektedir. Silecek grubu bölgesinde akımın sağa doğru yöneldiği ve sol ön kısımda akımın kararlılık kazanarak yüzeyi takip ettiği görülmektedir (1 nolu bölge). 2 nolu bölgede de tavandan gelen akım sol yandan gelen akımla birleşmekte ve bu bölgede kararsız bir akım oluşturmaktadır. Şekil 4.68 de $\beta = 20^\circ$ de iplikcik testi görülmektedir. Şekil 4.69 da ise $\beta = 30^\circ$ yanal açıda iplikcik testi görülmektedir. 20° ve 30° yanal açılarında yanal kuvvetlerin etkisi iplikcik hareketlerinden net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.67 “1:10” model $\beta = 10^\circ$ de UURT iplikcik testi ($U_\infty = 30$ m/s)

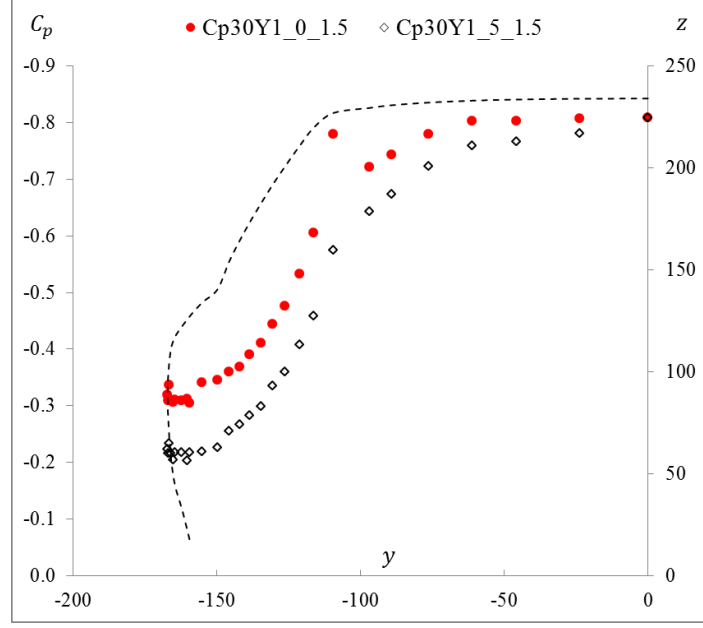


Şekil 4.68 “1:10” model $\beta = 20^\circ$ de UURT iplikcik testi ($U_\infty = 30$ m/s)

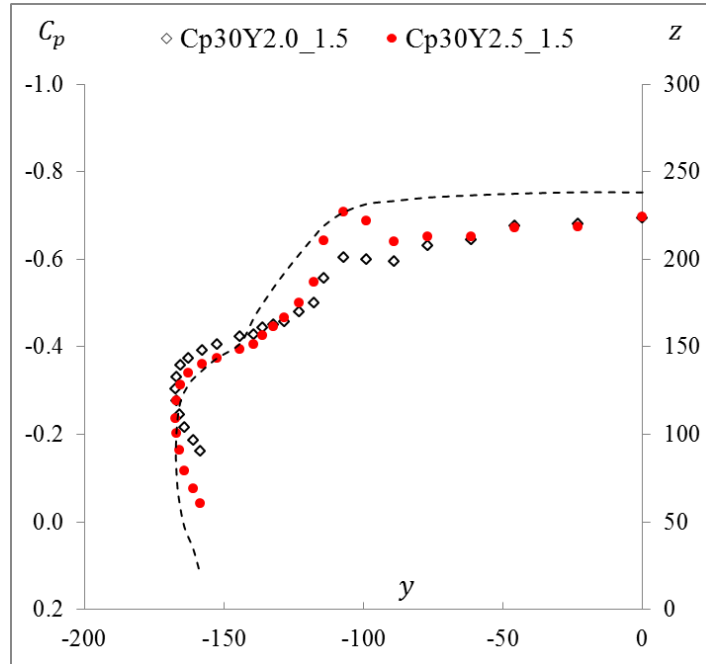


Şekil 4.69 “1:10” model $\beta = 30^\circ$ de UURT iplikcik testi ($U_\infty = 30$ m/s)

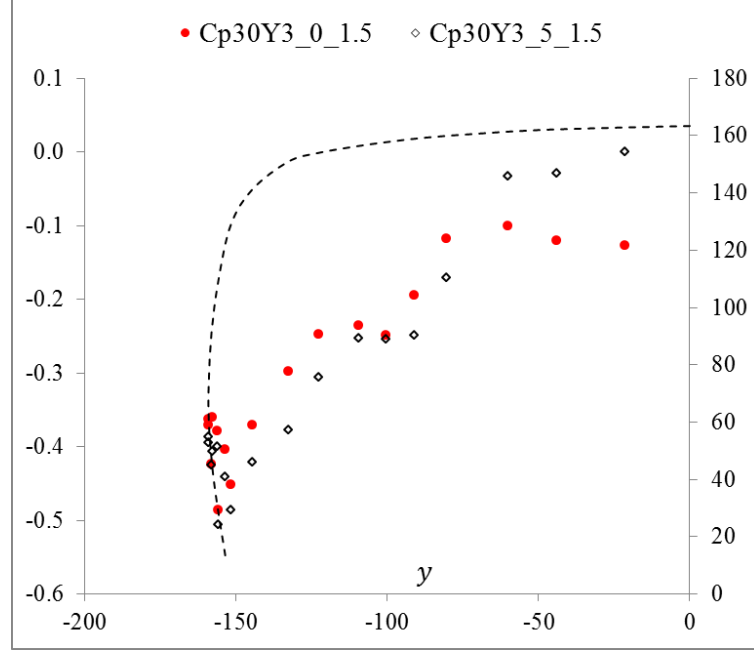
Yanal kesitlerde de değişik β yanal açılarındaki C_p dağılımları incelenmiştir. **Şekil 4.70** de 1:5 modelin %20 blokajlı haliyle 30 m/s hızda Y1 (x:232) kesiti üzerinde C_p dağılımı görülmektedir. Model saat yönünde, sağa döndürüldüğü için Y1 kesitinde genişleme olmuş ve ön kapı üst çerçevesindeki lokal pikin kaybolduğu görülmüştür. Bu kesitte akım hızındaki azalmanın C_p değerlerinde pozitif yönde artışa sebep olduğu görülmüştür. Y2 kesitinde ise arka kapı üst çerçeve bölgesinde lokal negatif basıncın arttığı görülmektedir (**Şekil 4.71**). Y3 kesitinde ise bagaj kaputu orta bölgesi üzerinde basınçta artış görülürken kesit alt bölgelerine doğru akım hızındaki artışa bağlı olarak negatif basınç değerleri artmıştır (**Şekil 4.72**).



Şekil 4.70 "1:5" model Y1 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ$ ve 5° de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)

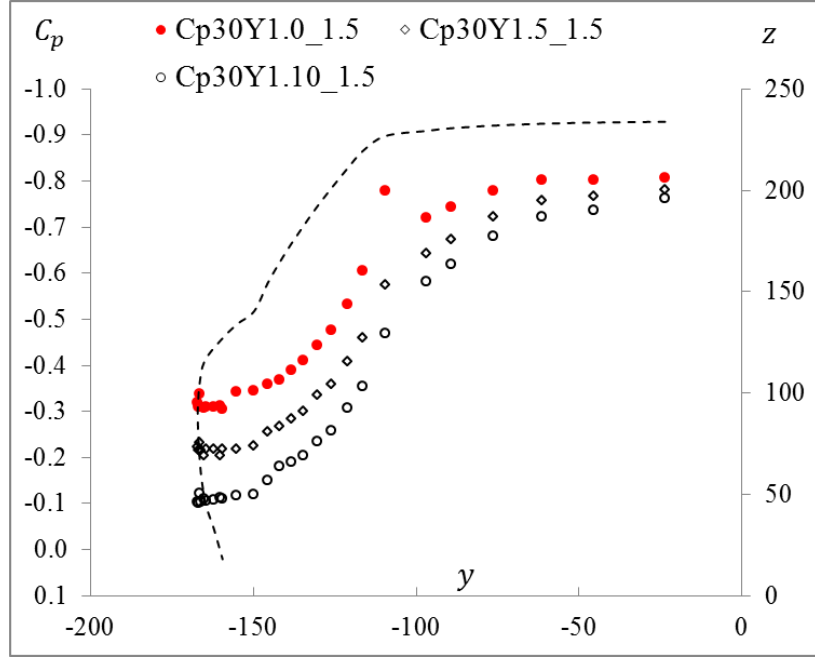


Şekil 4.71 "1:5" model Y2 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ$ ve 5° de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)

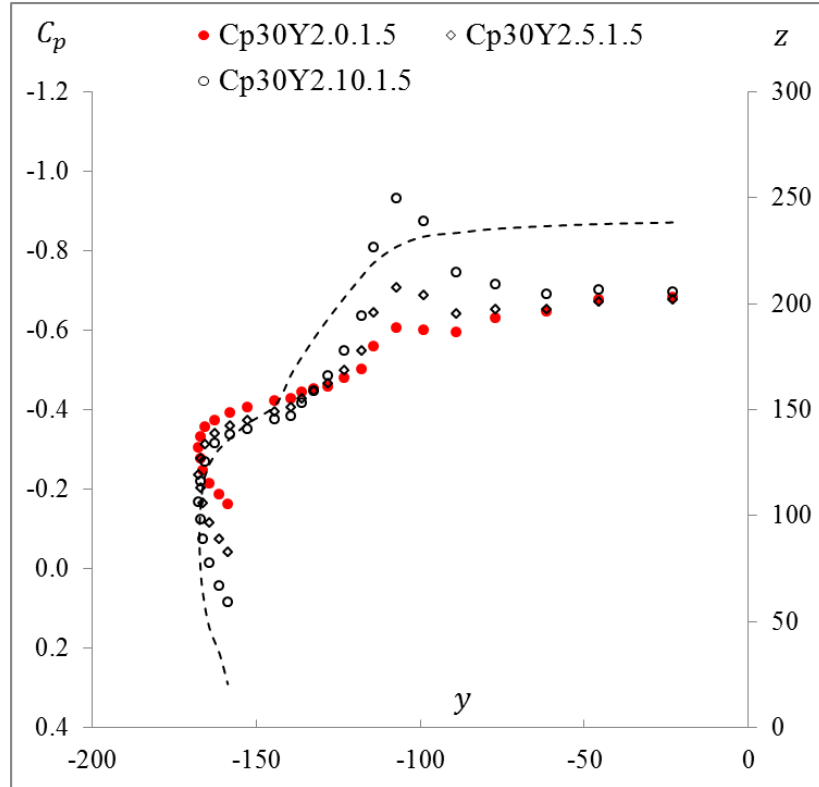


Şekil 4.72 “1:5” model Y3 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ$ ve 5° de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)

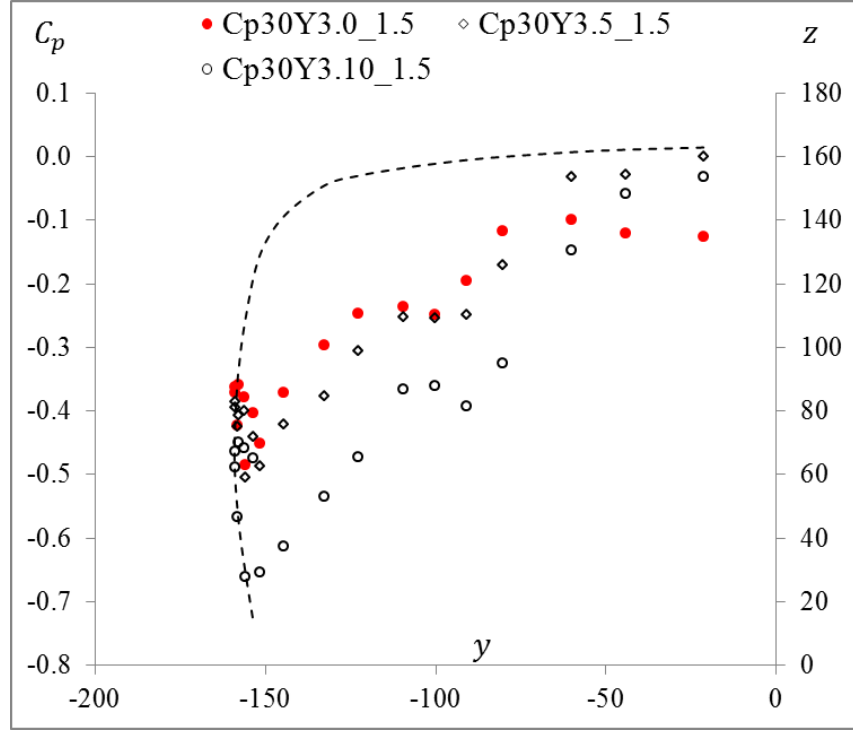
$\beta = 10^\circ$ yanal açıda 30 m/s hızda C_p dağılımlarının düz konumdaki C_p dağılımlarıyla karşılaştırılması aşağıda verilmiştir. Y1 kesitinde akım hızında düşmeye bağlı olarak C_p değerlerinde pozitive doğru artış görülmüştür (Şekil 4.73). Y2 kesitinde ise kapı çerçeve üst bölgesinde lokal pik daha belirgin hala gelmiştir. Alt etek bölgesine doğru basınçlarda artış görülmüştür (Şekil 4.74). Y3 kesiti üzerindeki dağılımların karşılaştırılması Şekil 4.75 de görülmektedir. Y3 kesitinde 10° de basınç dağılımı 5° ye göre belirgin bir şekilde değişmiş ve bu kesitteki hava akımındaki hızlanma C_p değerlerinde belirgin düşüşe neden olmuştur. Kesit alt kısımlarında akım tamamıyla kararsız olup C_p değerlerinde pozitif yönde artış gözlemlenmiştir. ART’de 1:5 model için 30 m/s serbest akım hızlarında $\beta = 5^\circ, 10^\circ$ yanal açılarında Y1, Y2, Y3 kesitlerindeki C_p dağılımları UURT testleriyle benzer trend göstermektedir. Şekil 4.76, Şekil 4.77 ve Şekil 4.78 de dağılımlar karşılaştırmalı olarak görülmektedir.



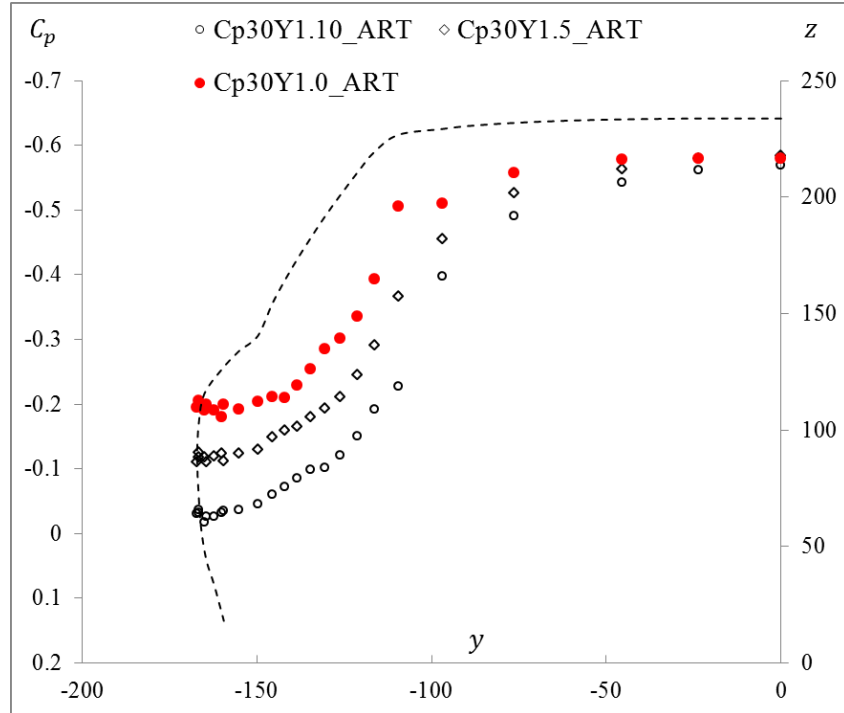
Şekil 4.73 “1:5” model Y1 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)



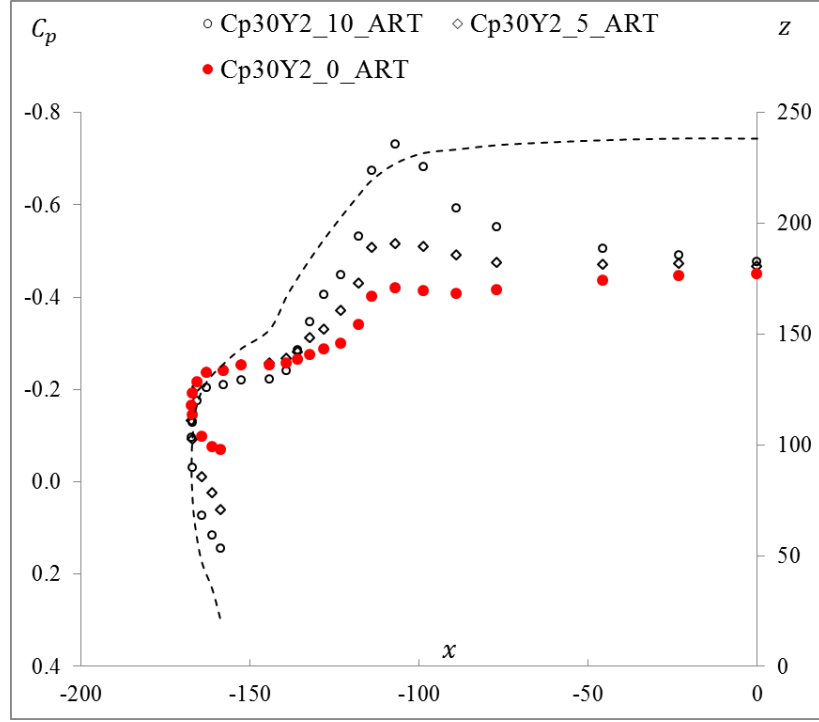
Şekil 4.74 “1:5” model Y2 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)



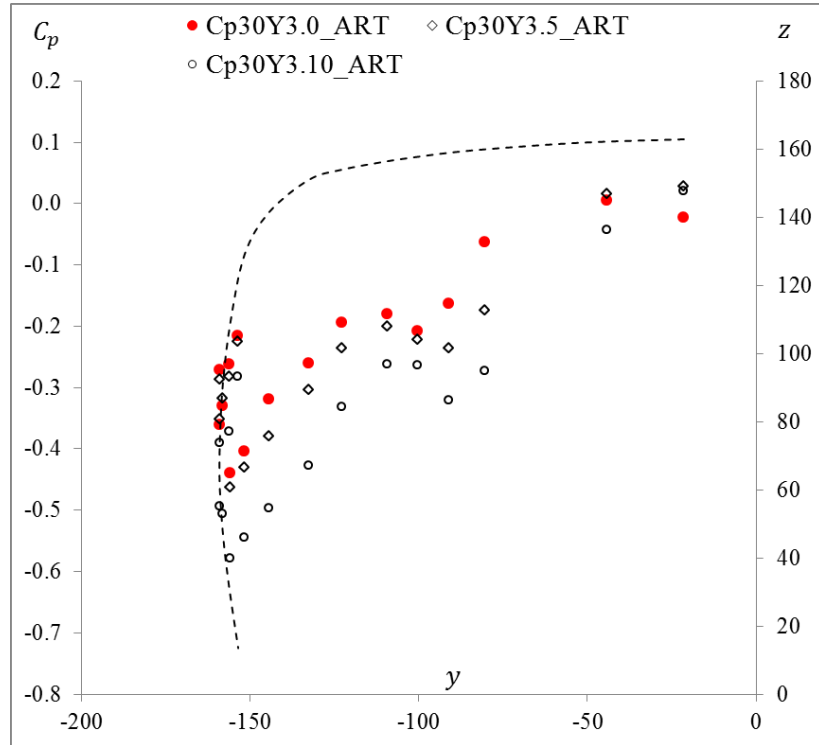
Şekil 4.75 "1:5" model Y3 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)



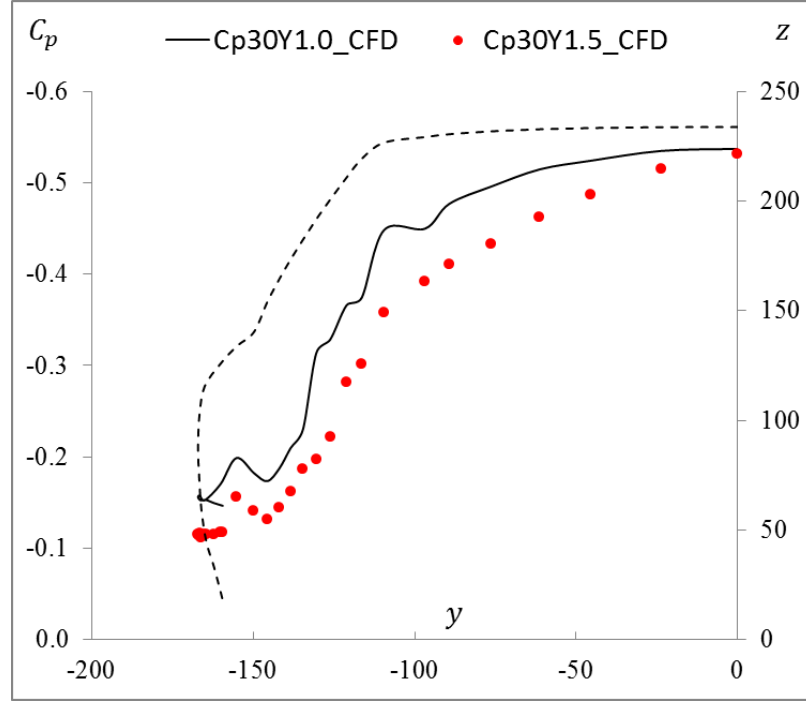
Şekil 4.76 "1:5" model Y1 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ de ART C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)



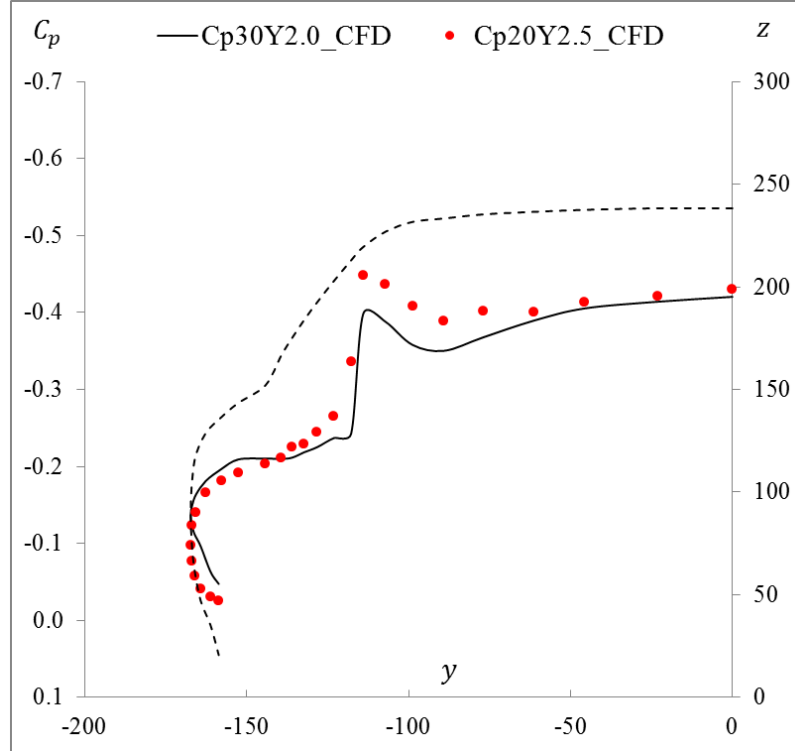
Şekil 4.77 “1:5” model Y2 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ de ART C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)



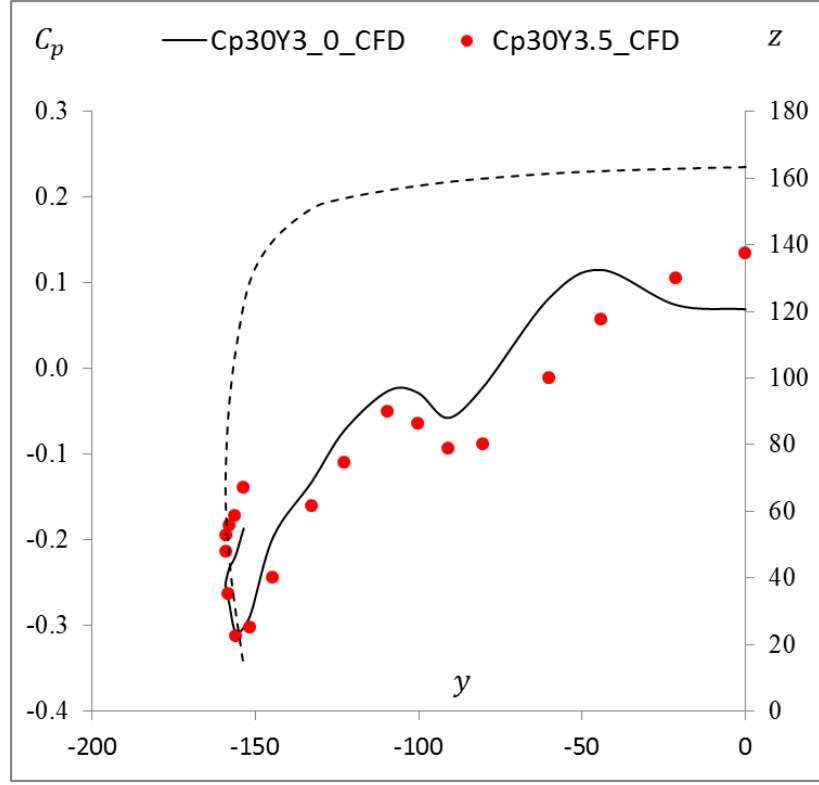
Şekil 4.78 “1:5” model Y3 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ de ART C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)



Şekil 4.79 “1:5” model Y1 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ$, 5° de CFD C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)

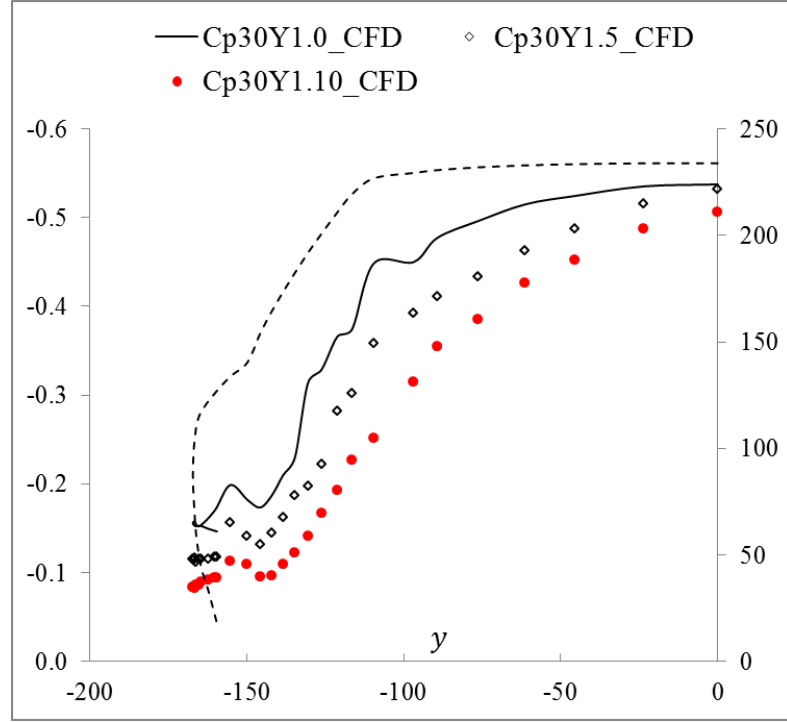


Şekil 4.80 “1:5” model Y2 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ$, 5° de CFD C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)

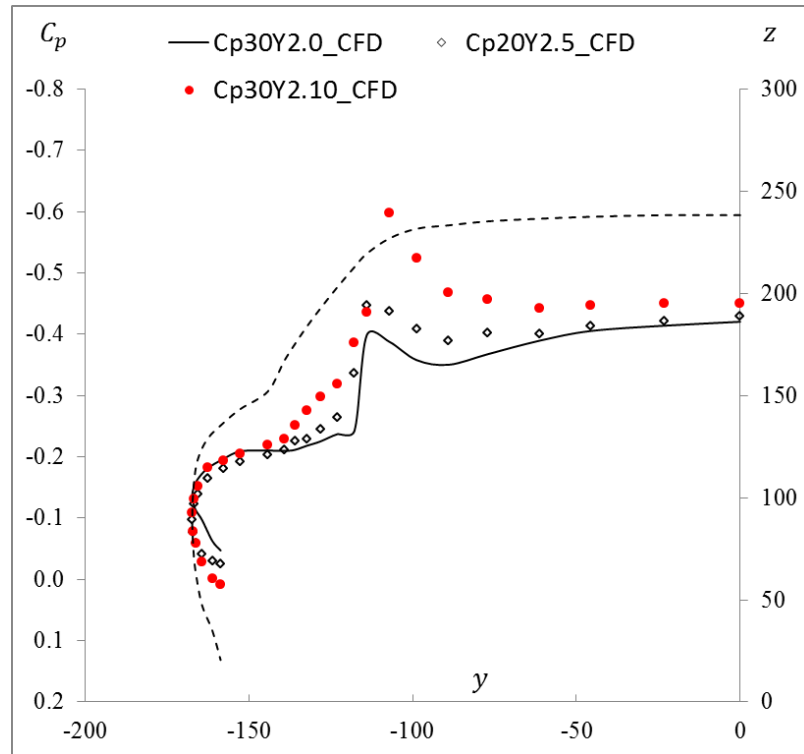


Şekil 4.81 “1:5” model Y3 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 5^\circ$ de CFD C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)

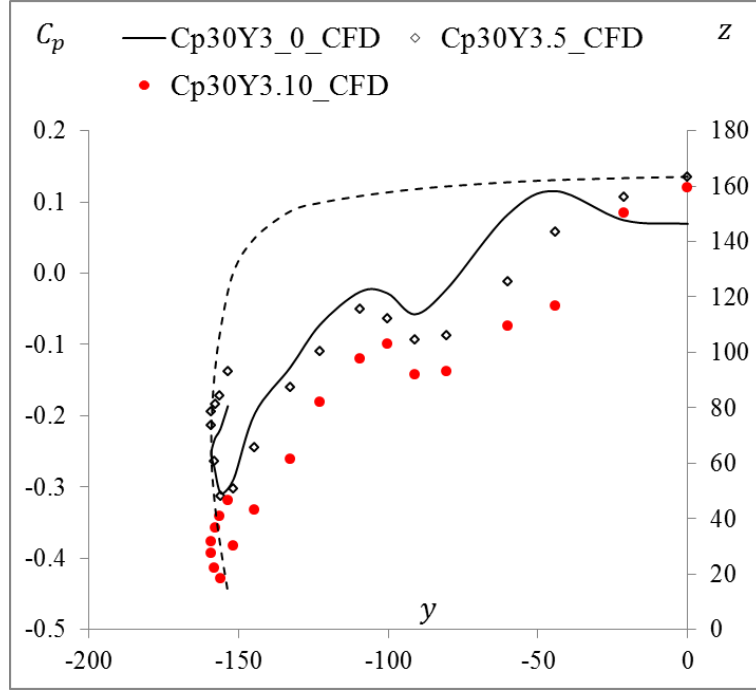
$\beta = 5^\circ$ yanal açıda 30 m/s hızda C_p dağılımlarının düz konumdaki C_p dağılımlarıyla CFD analiz karşılaştırılması üstte **Şekil 4.79**, **Şekil 4.80**, **Şekil 4.81** de verilmiş olup dağılım trendleri deneysel sonuçlarla uyumludur. **Şekil 4.82**, **Şekil 4.83** ve **Şekil 4.84** de β yanal açısı 10° verilerek ölçümlenen Y1, Y2, Y3 yanal kesitlerdeki C_p dağılımları düz konum ve 5° yanal açı durumuyla karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlardan da görüleceği üzere Y1 kesitinde akım hızı düştüğünden buna bağlı statik basınçlarda pozitif yönde artış görülmektedir. Y2 ve Y3 kesitlerinde tam tersine akım hızları daralmaya bağlı artmakta ve negatif basınç değerleri yükselmektedir. Y3 kesiti alt etek bölgesi deneysel sonuçlarda olduğu gibi kararsız ve dalgalanmaktadır.



Şekil 4.82 “1:5” model Y1 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ de CFD C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)



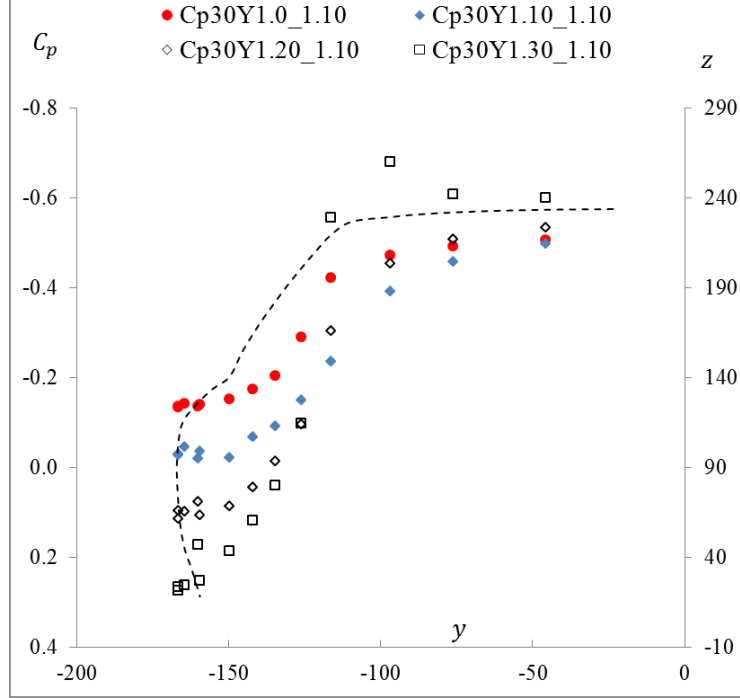
Şekil 4.83 “1:5” model Y2 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ de CFD C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)



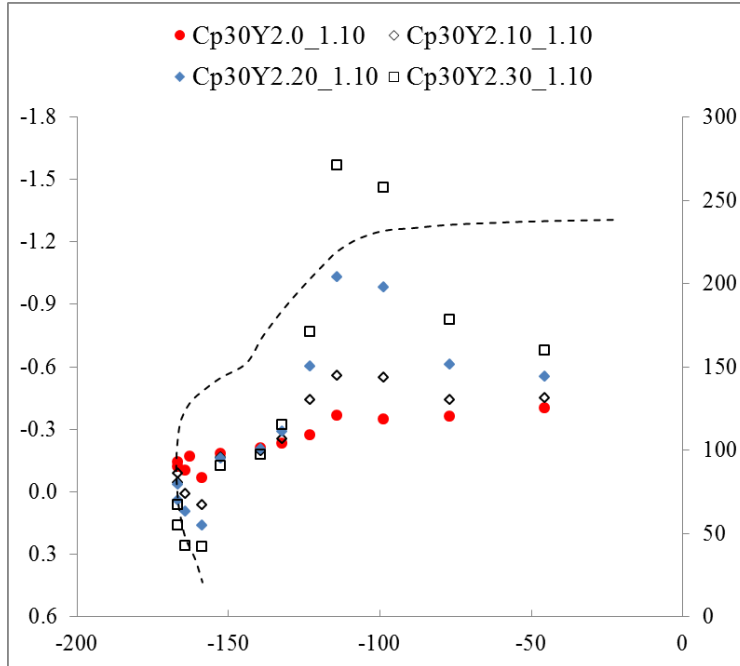
Şekil 4.84 “1:5” model Y3 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ de CFD C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)

UURT deney odası boyutları gözönünde tutularak 1:10 ölçekli model $\beta = 30^\circ$ açığa kadar yanal eksenlerde ölçülen C_p değerleri Şekil 4.85, Şekil 4.86 ve Şekil 4.87 de verilmiş olup burada da aynı şekilde simetri ekseninde görülen durum gözlemlenmiştir. 20° ve 30° yanal açılarda basınçlar 10° ve 5° yanal açılara göre çok daha belirgin sapma göstermiştir. Bu açılarda blokaj oranlarında ciddi artış görülmektedir. Şekil 4.88, Şekil 4.89 ve Şekil 4.90 da yüksek yanal sapma açılarında ($\beta : 30^\circ$ ye kadar) CFD analizi sonucunda bulunan C_p dağılımları yanal kesitler Y1, Y2, Y3 üzerinde çizdirilmiştir. Y1 kesiti üzerindeki yanal açılara bağlı dağılımlar Şekil 4.85 de verilen 1:10 model üzerindeki Y1 kesitindeki dağılımla uyumlu görülmüştür. $\beta = 30^\circ$ yanal açıda Y1 kesiti tavan ve kapı üst çerçeve kısmında lokal negatif pik basınç oluşmuştur. Kapı eteklerine doğru ise basınç artışa geçmiştir. Şekil 4.89 da Y2 kesidi üzerindeki CFD C_p dağılımları görülmektedir. Dağılımlar Şekil 4.86 da verilen deneysel dağılımları doğrulamaktadır. Tavan ile yan kapı orta noktalarına kadar basınçlar β yanal açısından belirgin etkilenirken bu noktadan sonra C_p dağılımları neredeyse aynı trendleri göstermektedir. Şekil 4.90 da Y3 kesitinde ki CFD C_p dağılımları görülmekte olup β değeri arttıkça negatif basınç değerinin büyüdüğü görülmektedir. Arka çamurluk etek bölgesinde

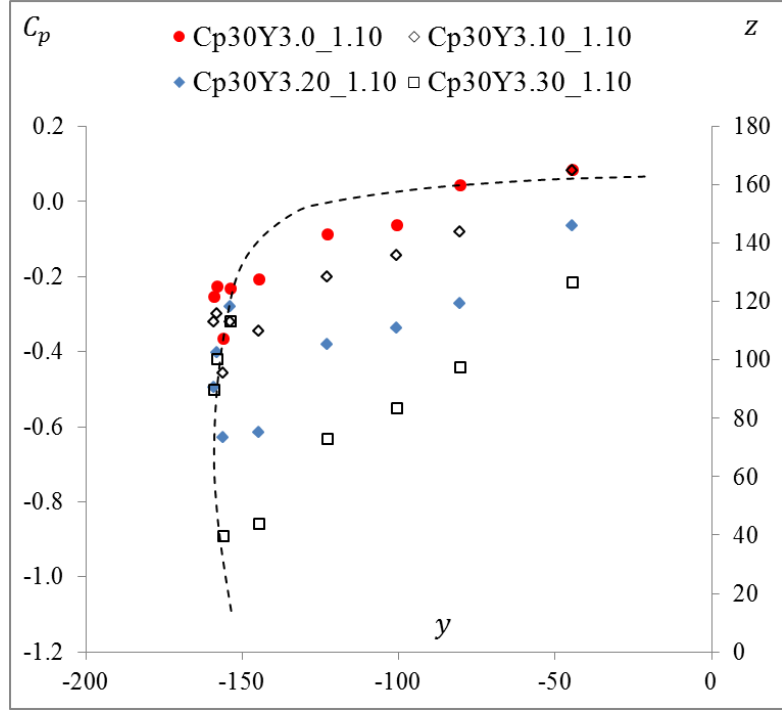
önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi ani basınç yükselmesi görülmekte olup bu bölgenin çok kararsız olduğunu göstermektedir.



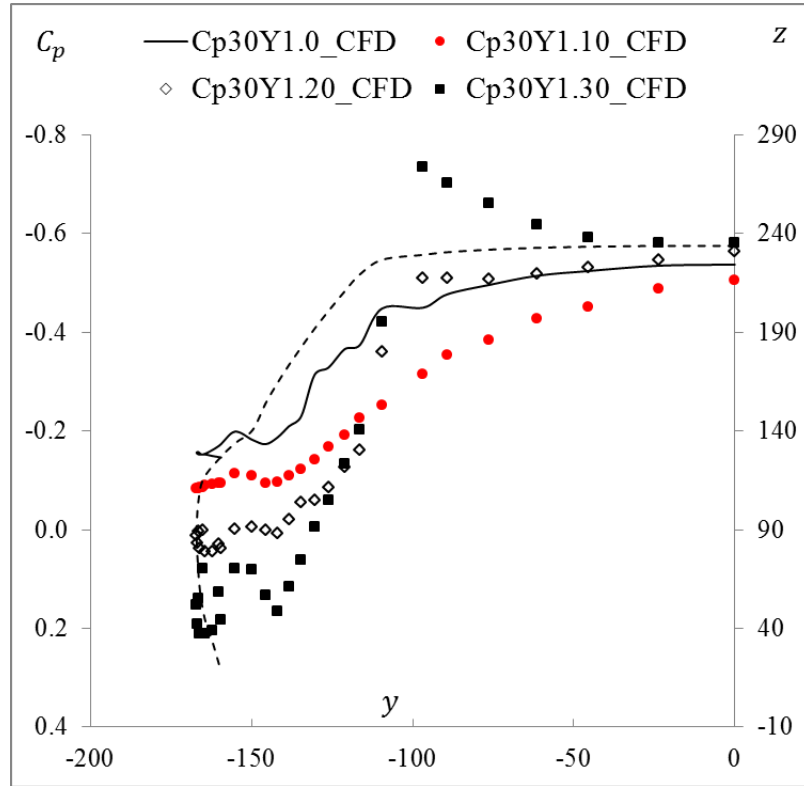
Şekil 4.85 "1:10" model Y1 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)



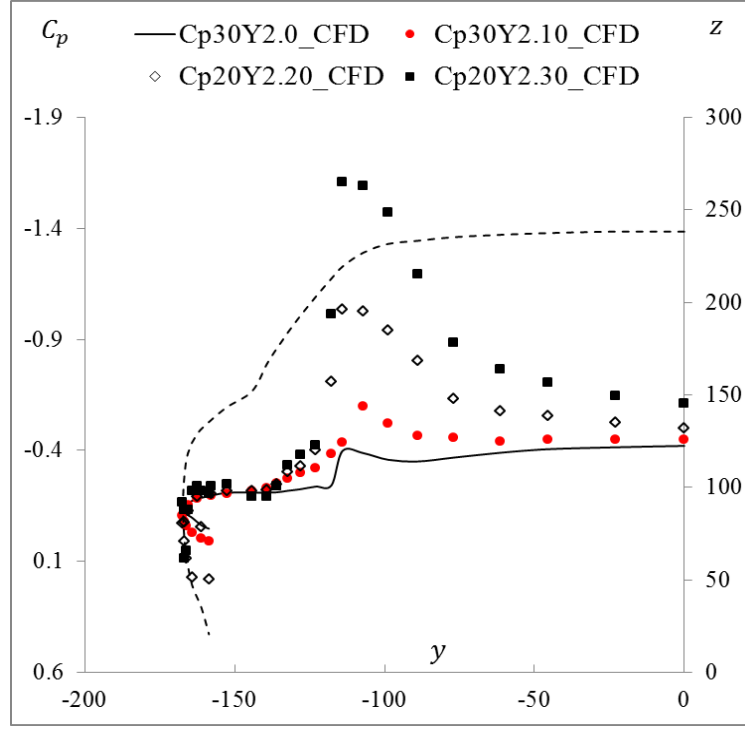
Şekil 4.86 "1:10" model Y2 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)



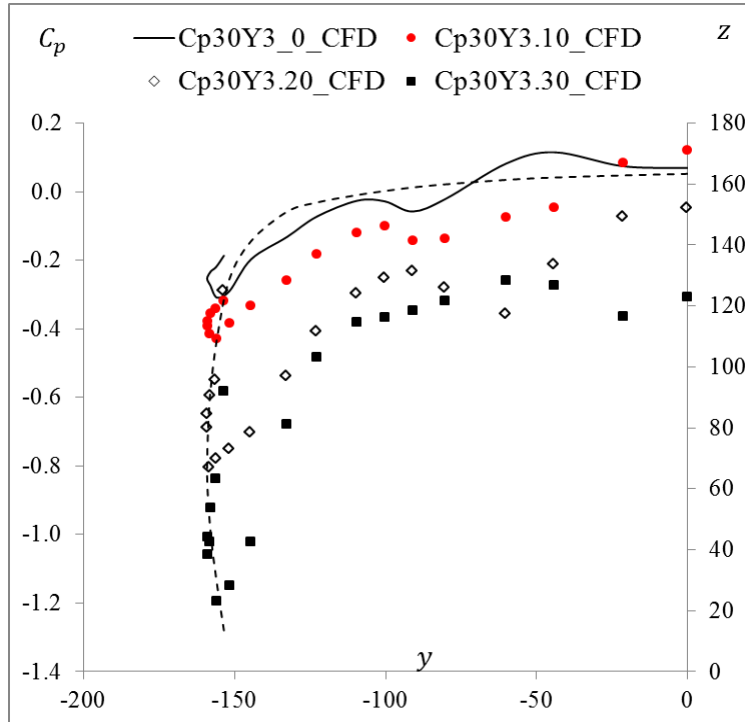
Şekil 4.87 “1:10” model Y3 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ de UURT C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)



Şekil 4.88 Y1 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ de CFD C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)

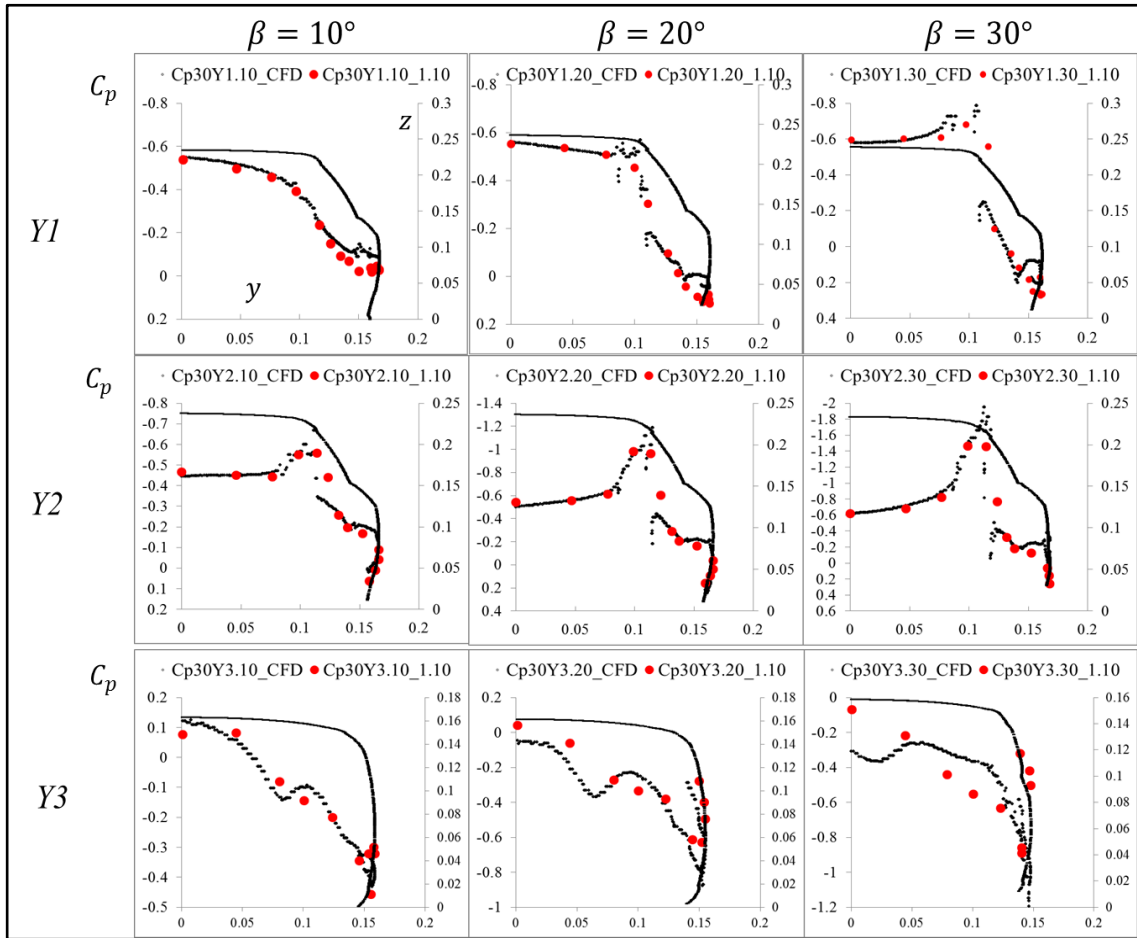


Şekil 4.89 Y2 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ de CFD C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)



Şekil 4.90 Y3 kesiti üzerinde $\beta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ de CFD C_p dağılımı kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)

Yanal Y1, Y2, Y3 kesitlerinde $U_\infty = 30$ m/s hızda $\beta = 10^\circ$, 20° ve 30° yanal açılarında CFD C_p dağılımlarının 1:10 ölçekli model UURT testlerinde bulunan C_p dağılımlarıyla karşılaştırması Şekil 4.91 de verilmiştir. Y1 ve Y2 dağılımlarında trendler tamamıyla uyumlu iken Y3 kesitinde $\beta = 30^\circ$ yanal açısında bagaj kaputu bölgesinde bir miktar sapma gözlemlenmiştir. CFD dağılımlarında görülen kopmalar lokal bölgelerde (kapı çerçeve üstleri) keskin model hatlarından kaynaklanmaktadır. Bu bölgelerde sayısal çözümlerde kavitasyonlar oluşmakta ve akım kopmaları görülmektedir.



Şekil 4.91 Y1, Y2, Y3 kesitlerinde 1:10 model deneysel UURT ve CFD C_p dağılımları kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)

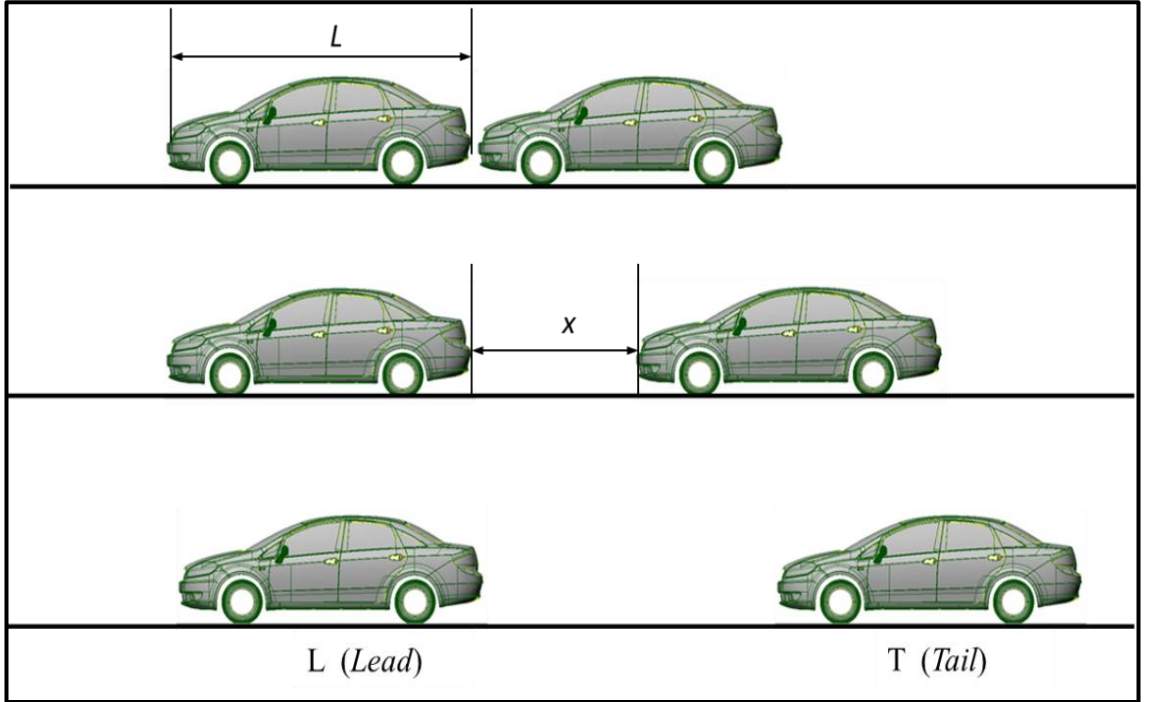
4.4 Birbirini Yakın Takip Eden Araç Durumlarında C_p Dağılımları

Deneysel testler UURT' de $U_\infty = 30$ m/s serbest akım hızlarında UURT deney odası sınırları da baz alınarak $x/L = 0, 0.5, 1$ oranlarında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.92).

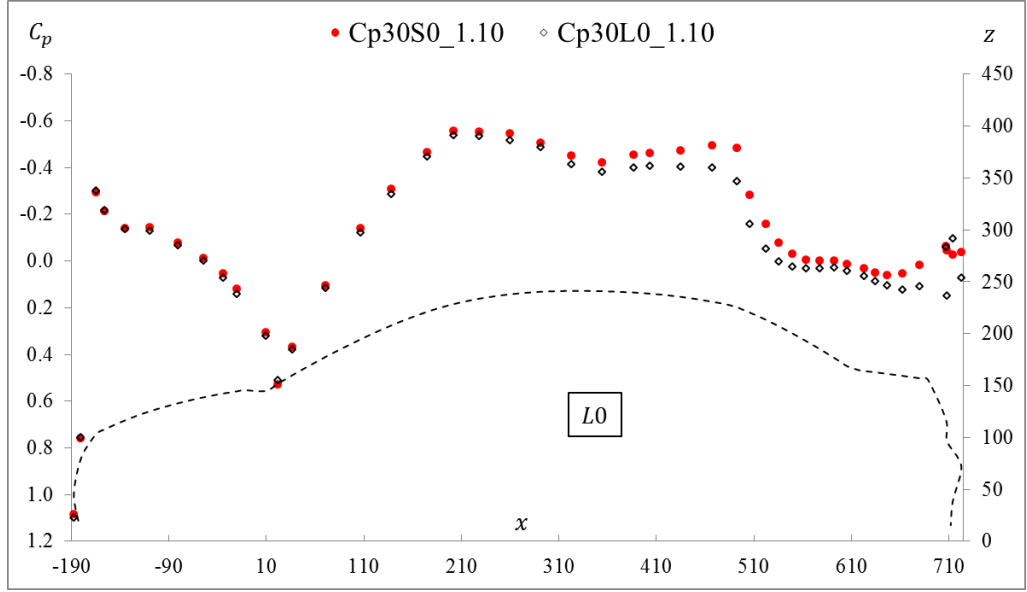
Öndeki araç L harfi ile arkadaki araç ise T harfleriyle gösterilecektir. Testlerde 1:10 ölçekli model kullanılmıştır.

Şekil 4.93 de $x/L = 0$ konumunda öndeki araç (L0) simetri eksenleri üzerinde ölçülen C_p dağılımları görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere araç tavan orta kısımdan geriye doğru basınçlar tek araçta ölçülen basınçlara göre pozitif yönde artış göstermiştir.

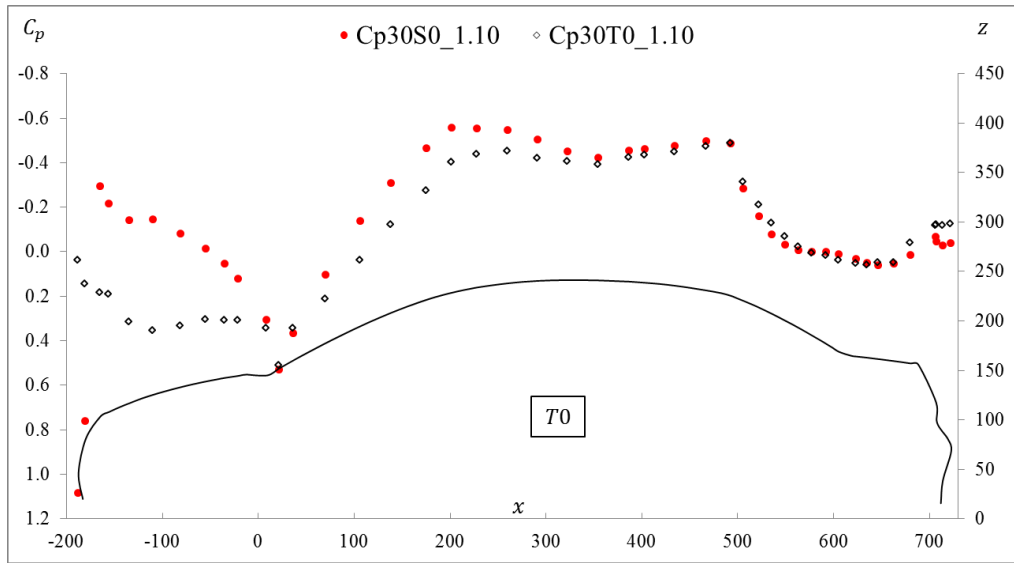
Şekil 4.94 de arkadaki araç (T0) simetri eksenleri üzerinde ölçülen basınçların gene tek araç olması durumunda ölçülen basınçlarla kıyaslaması görülmektedir. Arkadaki aracın tampon bölgesindeki yüksek basınç noktasının kaybolduğu ve akımın tavan orta bölgelerine kadar bozulduğu, etkilendiği görülmektedir.



Şekil 4.92 “1:10” model tandem araç pozisyonları (UURT)

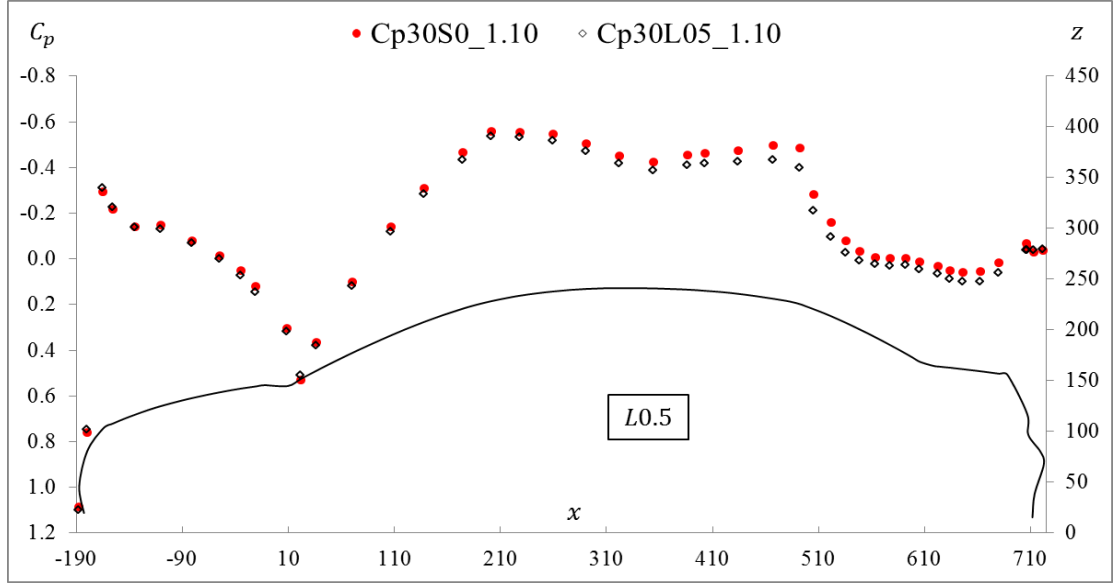


Şekil 4.93 "1:10" model (L0) simetri ekseninde C_p dağılımı tek araç durumu ile kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)

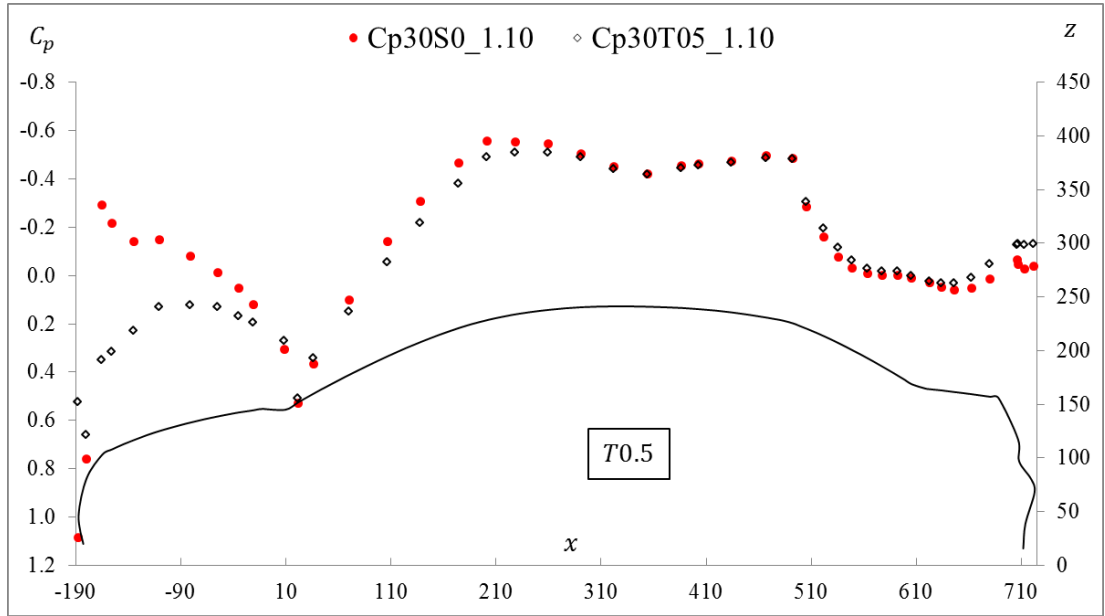


Şekil 4.94 "1:10" model (T0) simetri ekseninde C_p dağılımı tek araç durumu ile kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)

Şekil 4.95 ve Şekil 4.96 da $x/L = 0.5$ konumunda C_p dağılımları düz konumla kıyaslamalı olarak verilmiştir. Tavan orta bölgesinden itibaren C_p değişimi bu testte de gözlemlenmiştir. Arkadaki araçta da gene tavan orta bölgesine kadar akım etkilenmektedir. Tampon bölgesine doğru basınçta yükselme gözlemlenmektedir.



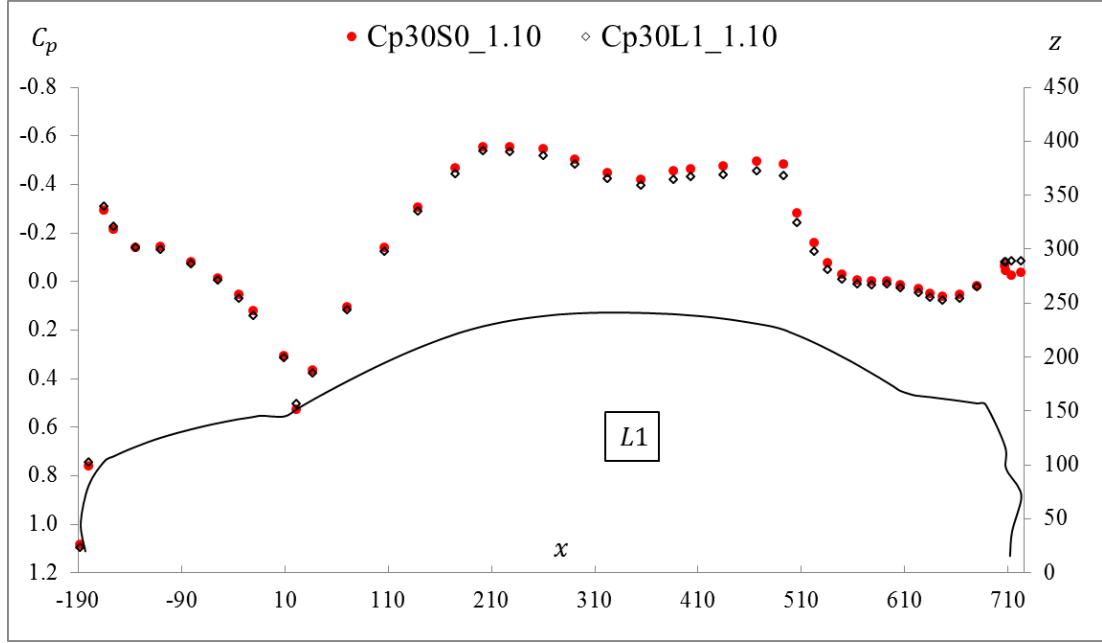
Şekil 4.95 1:10 model (L0.5) simetri ekseninde C_p dağılımı tek araç durumu ile kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)



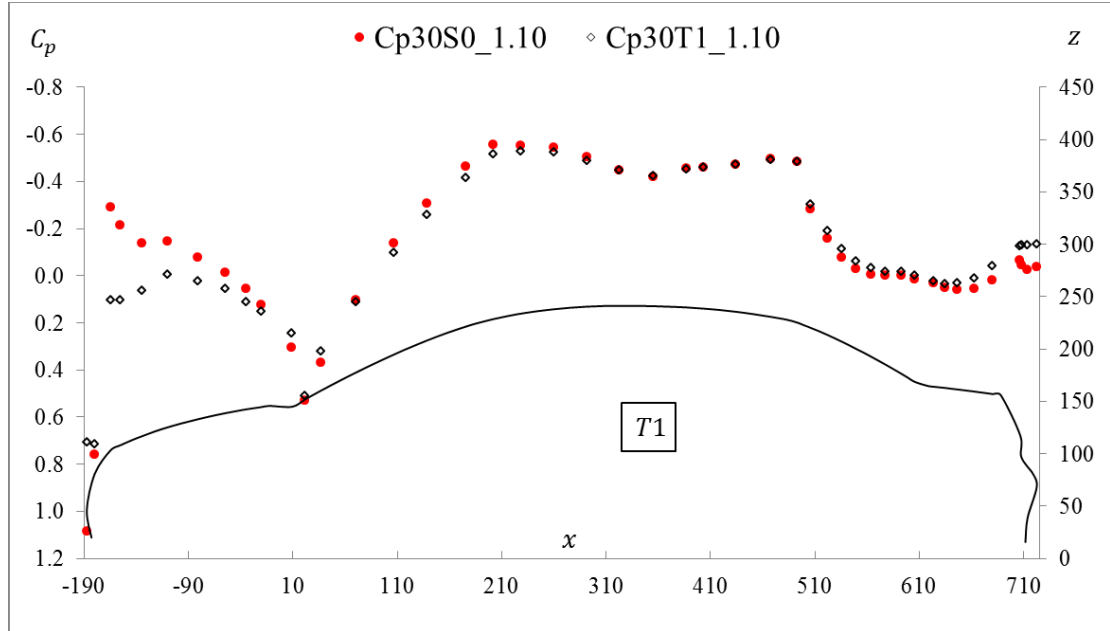
Şekil 4.96 "1:10" model (T0.5) simetri ekseninde C_p dağılımı tek araç durumu ile kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)

Şekil 4.97 ve Şekil 4.98 de $x/L = 1$ konumunda C_p dağılımları düz konumla kıyaslamalı olarak verilmiştir. Öndeki araçta C_p dağılımı neredeyse tek araç dağılımına yaklaşmıştır. Arkada bulunan araçta öndeki aracın etkileri hala motor kaputu arkalarına

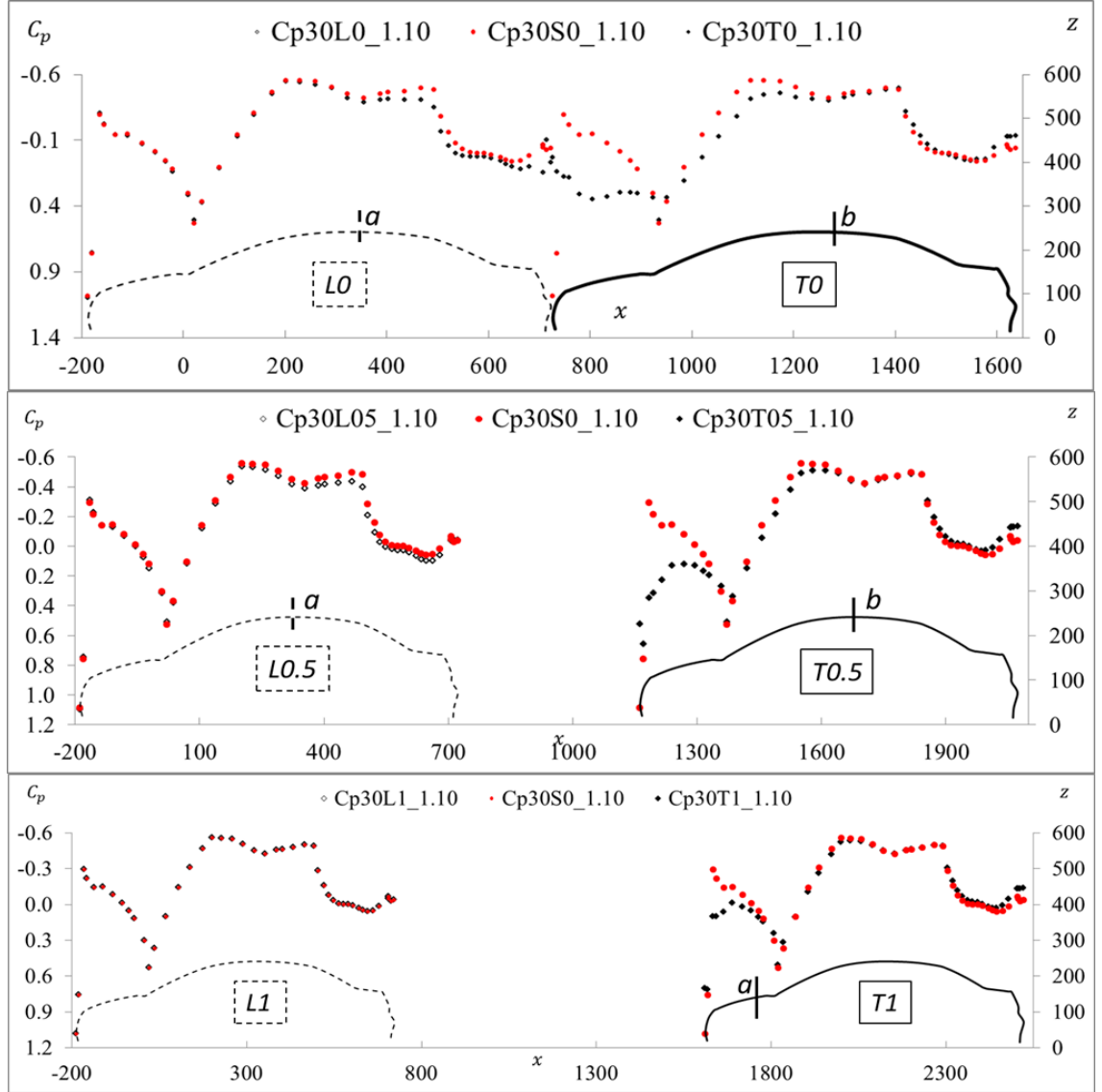
kadar hissedilmektedir. Şekil 4.99 da toplu olarak x/L pozisyonlarına göre C_p dağılımları görülmektedir. “a” ve “b” bölgeleri arasında akım alanları etkilenmiştir.



Şekil 4.97 “1:10” model (L1) simetri eksenini C_p dağılımı tek araç durumu ile kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)

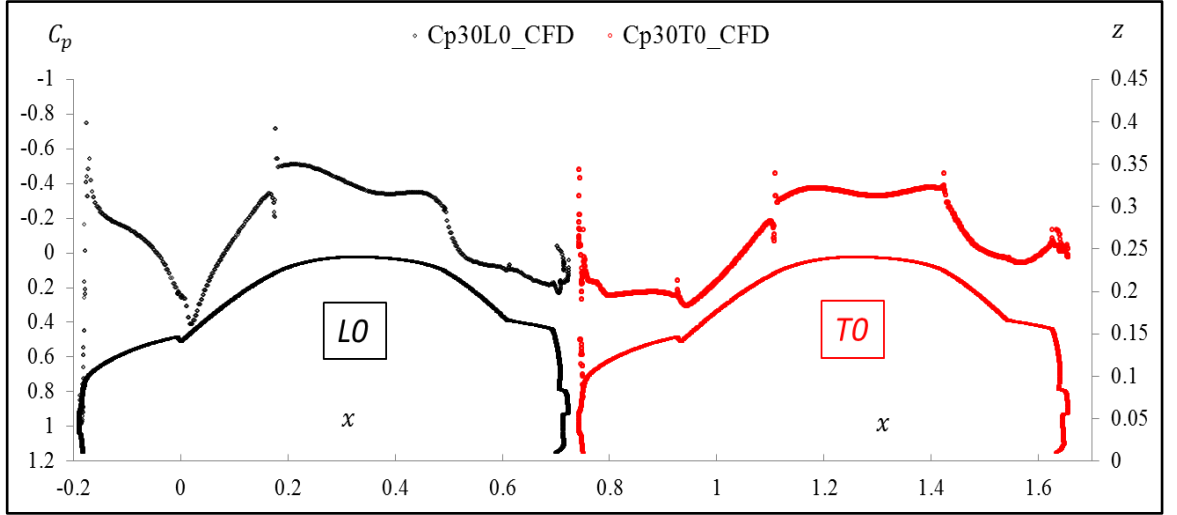


Şekil 4.98 “1:10” model (T1) simetri eksenini C_p dağılımı tek araç durumu ile kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)

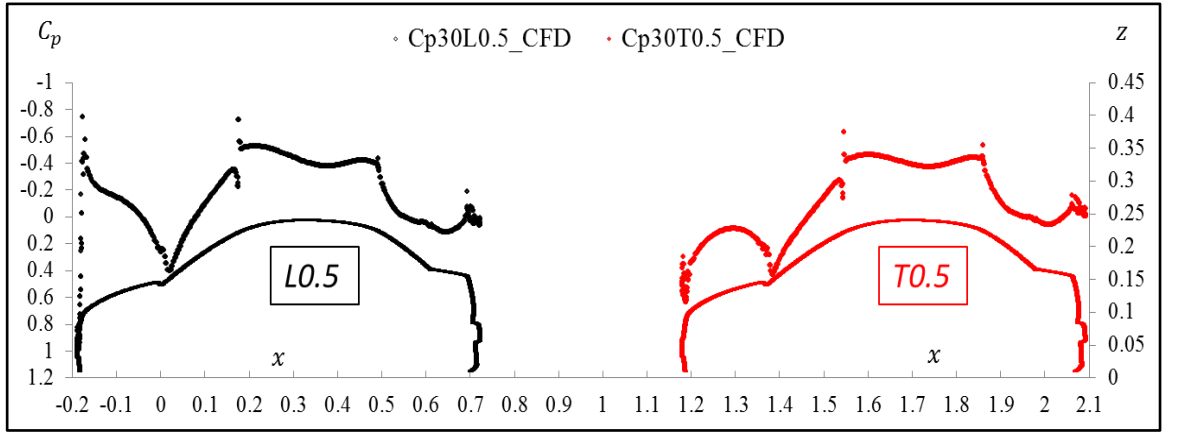


Şekil 4.99 “1:10” model değişik ardışık pozisyonlarında simetri eksenine C_p dağılımlarının tek araç durumu ile kıyaslaması ($U_\infty = 30$ m/s)

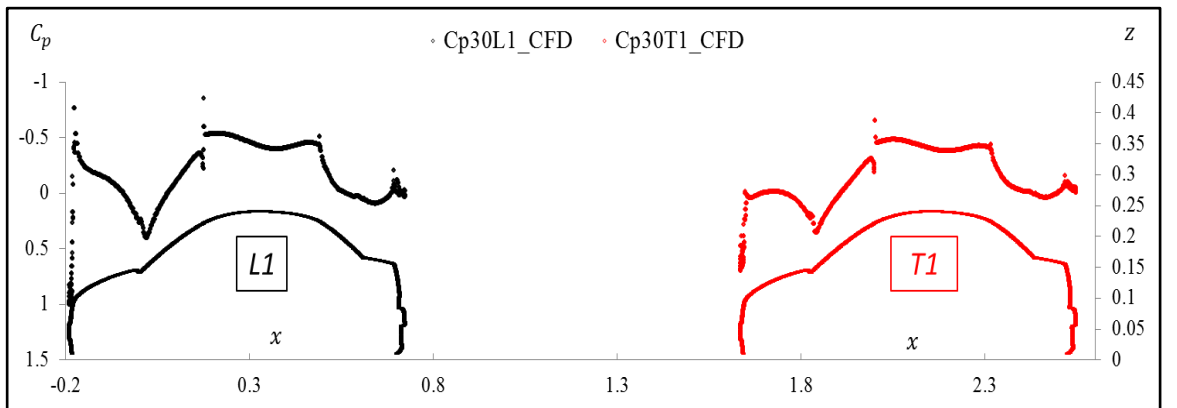
Birbirini yakın takip eden araç CFD analizleri 1:5 modeller için $U_\infty = 30$ m/s serbest akım hızlarında gerçekleştirilmiş olup, C_p dağılımları simetri ekselleri üzerinde x/L pozisyonlarına bağlı olarak **Şekil 4.100**, **Şekil 4.101** ve **Şekil 4.102** de verilmiştir. Deneysel UURT sonuçlarıyla kıyaslanmış halde **Şekil 4.103**, **Şekil 4.104** ve **Şekil 4.105** de C_p dağılımları görülmekte olup sonuçlar tamamıyla uyumludur.



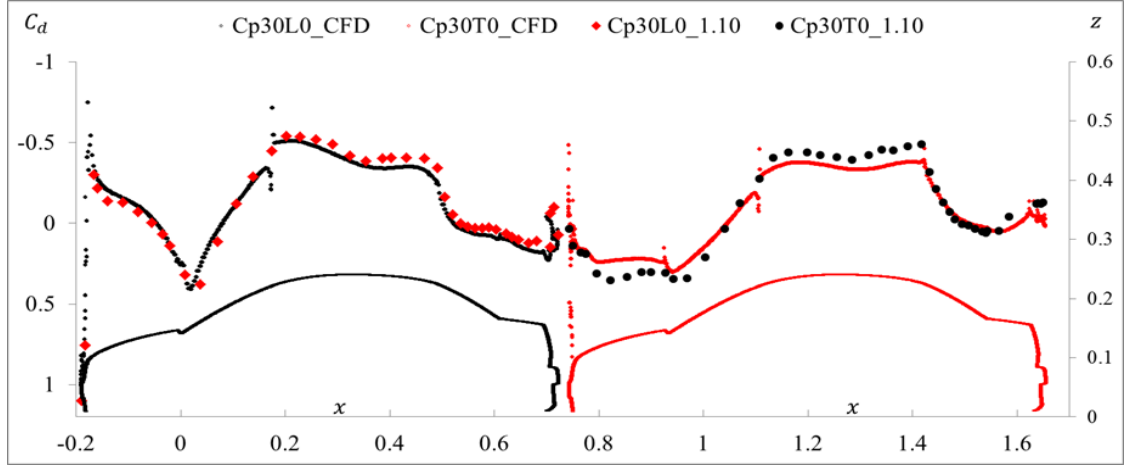
Şekil 4.100 CFD simetri eksenleri üzerinde C_p dağılımları ($x/L = 0$) ($U_\infty = 30$ m/s)



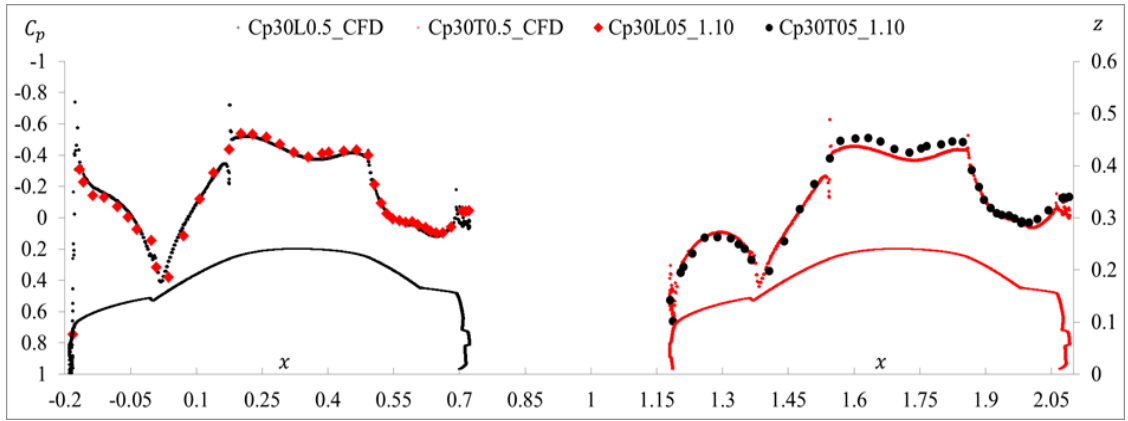
Şekil 4.101 CFD simetri eksenleri üzerinde C_p dağılımları ($x/L = 0.5$) ($U_\infty = 30$ m/s)



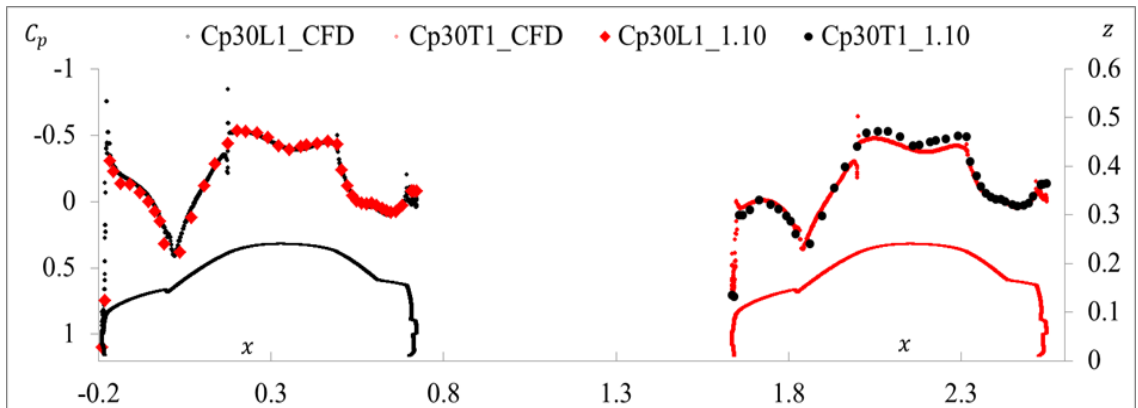
Şekil 4.102 CFD simetri eksenleri üzerinde C_p dağılımları ($x/L = 1$) ($U_\infty = 30$ m/s)



Şekil 4.103 1:10 model CFD ve UURT deneysel C_p dağılımları karşılaştırması ($x/L = 0$) ($U_\infty = 30$ m/s)

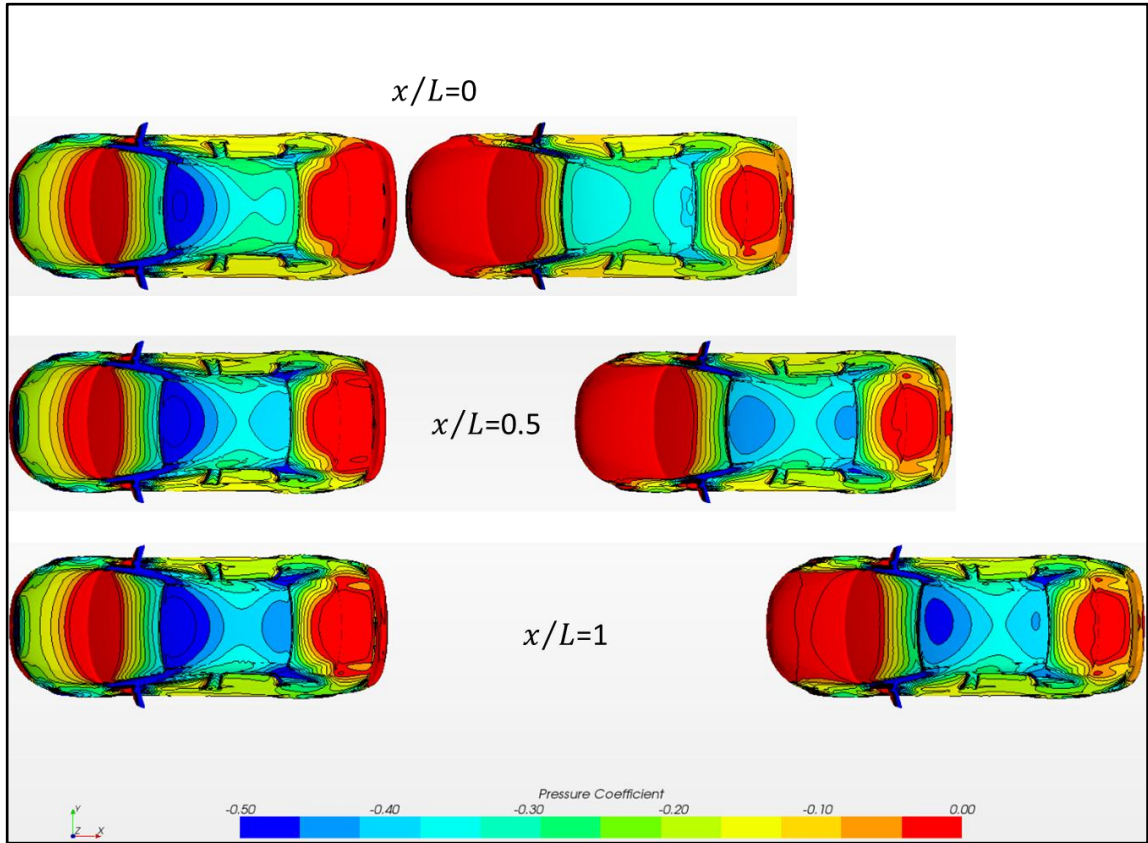


Şekil 4.104 1:10 model CFD ve UURT deneysel C_p dağılımları karşılaştırması ($x/L = 0.5$) ($U_\infty = 30$ m/s)

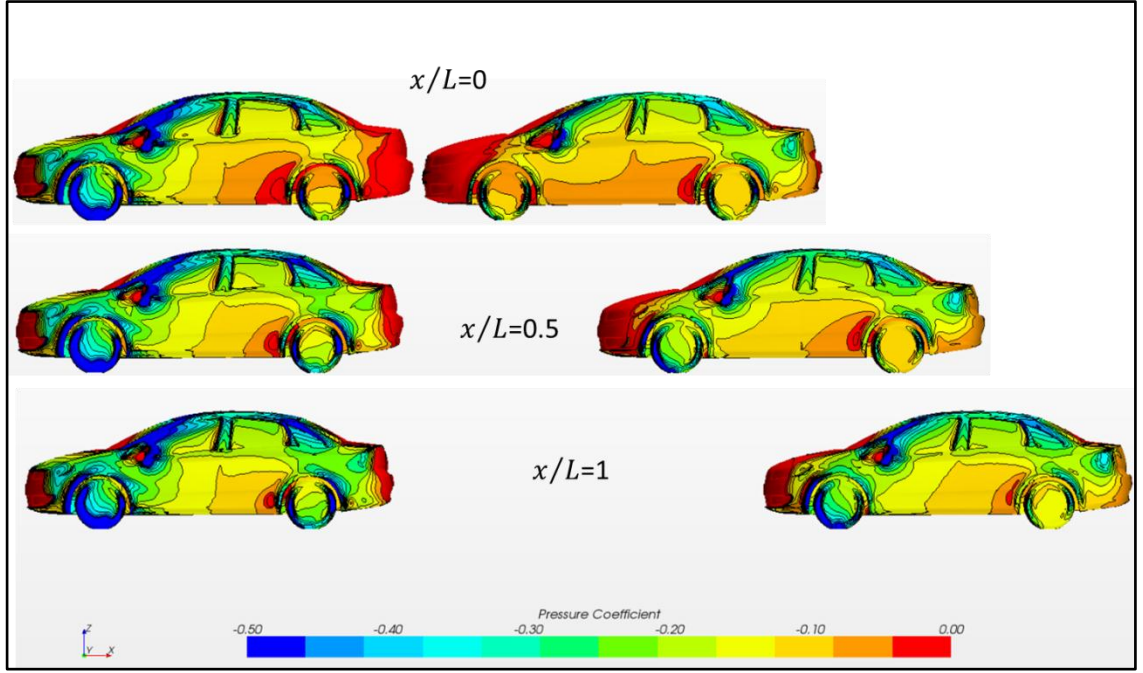


Şekil 4.105 1:10 model CFD ve UURT deneysel C_p dağılımları karşılaştırması ($x/L = 1$) ($U_\infty = 30$ m/s)

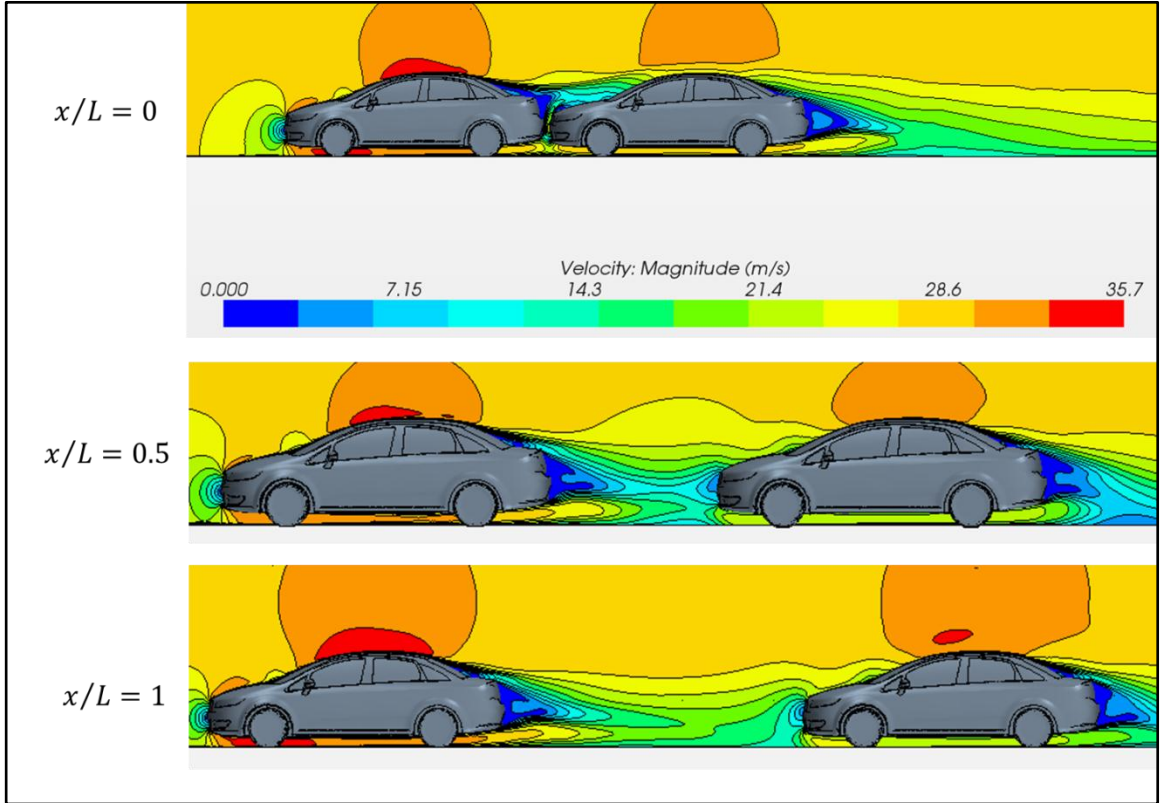
Ardışık araç pozisyonlarına göre öndeki ve arkadaki araçlar üzerindeki basınç konturları **Şekil 4.106** ve **Şekil 4.107** de görülmektedir. Basınç konturlarından da anlaşılacağı üzere öndeki aracın tavan orta noktalarından arkadaki aracın tavan orta bölgesine kadar akım karakteristiği etkilenmektedir. **Şekil 4.108** de ise ardışık araç pozisyonlarına bağlı olarak araç modelleri etrafındaki hız konturları görülmektedir. $x/L = 1$ pozisyonunda dahi arkadaki aracın ön kısmında hava akımı ön araçtan etkilendiği görülmektedir. Araç pozisyonlarına göre hem öndeki hem de arkadaki araçta ölçümlenen C_d değerleri birsonraki bölümde değerlendirilecektir. **Şekil 4.109** dan itibaren araç tandem pozisyonlarında gerçekleştirilen iplikcik testleri paylaşılmaktadır.



Şekil 4.106 CFD ardışık araç pozisyonlarına göre basınç konturları üstten görünüşleri ($U_\infty = 30$ m/s)

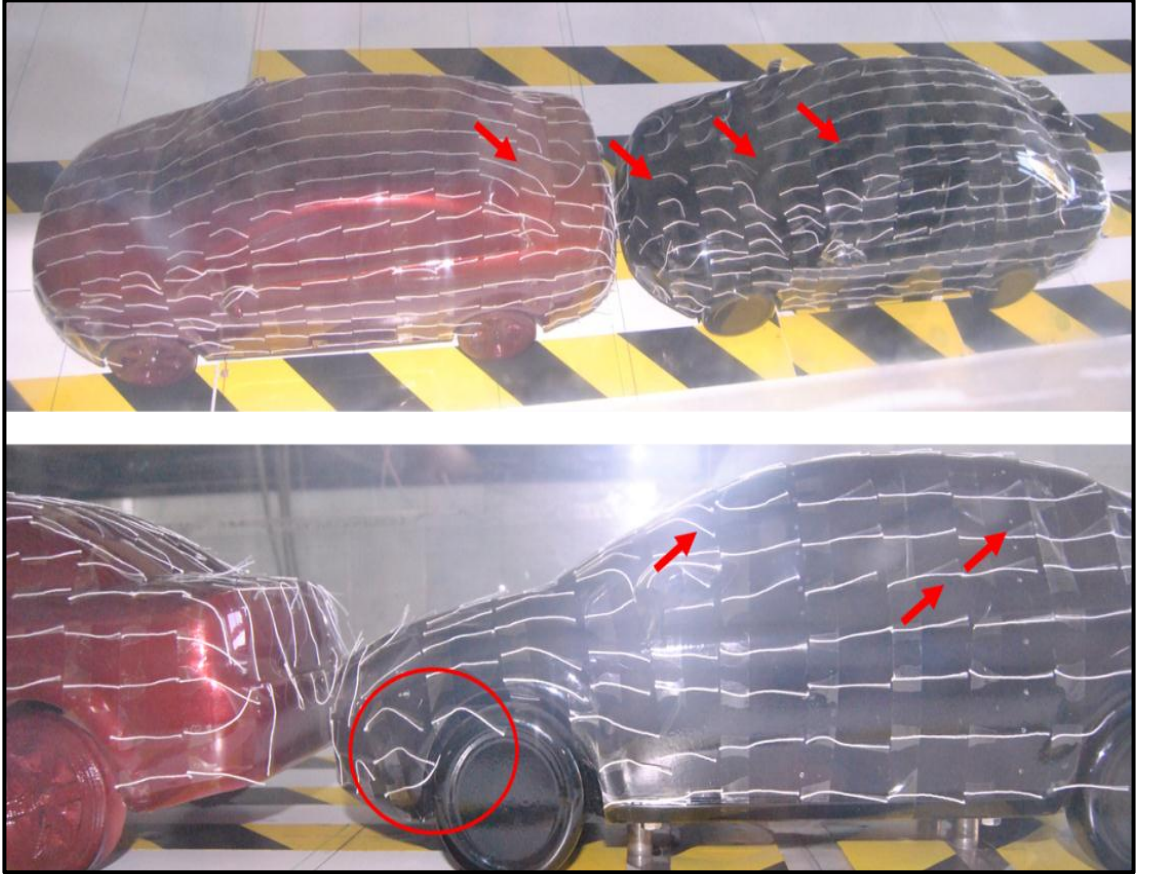


Şekil 4.107 CFD ardışık araç pozisyonlarına göre basınç konturları yan görünüşleri ($U_{\infty} = 30$ m/s)

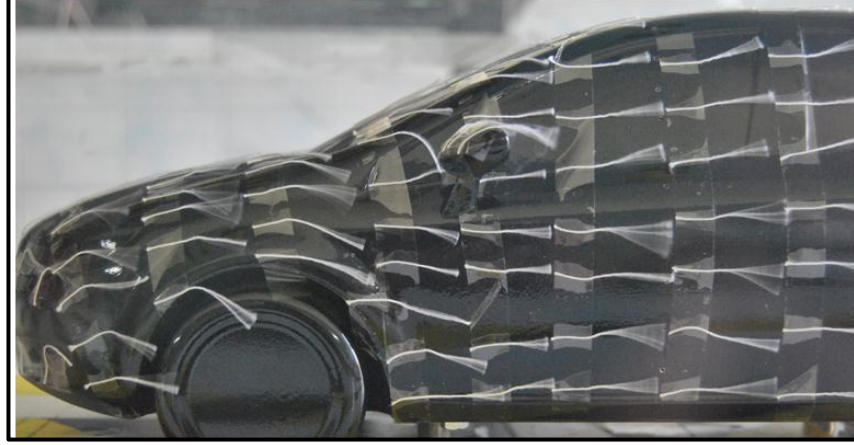


Şekil 4.108 CFD ardışık araç pozisyonlarına göre hız konturları ($U_{\infty} = 30$ m/s)

Şekil 4.109 da görüldüğü gibi arkadaki aracın (T0) motor kaputu, tavan ve yan kapılar üzerinde akım kalitesi tamamiyle bozulmuştur. **Şekil 4.110** da $x/L = 0.5$ konumunda iplikcik testi sonuçları görülmektedir. **Şekil 4.111** de ise $x/L = 1$ konumu iplikcik testi görülmektedir. Arkadaki araç üzerinde öndeki araç ile olan mesafe 1 araç boyu olmasına rağmen akımın özellikle motor kaputu üzerinde bozulduğu görülmektedir.



Şekil 4.109 “1:10” model ‘L0 -T0’ konumu iplikcik testi ($U_{\infty} = 30$ m/s)



Şekil 4.110 1:10 model 'L0.5 - T0.5' konumunda arkadaki araç iplikcik testi ($U_{\infty} = 30$ m/s)



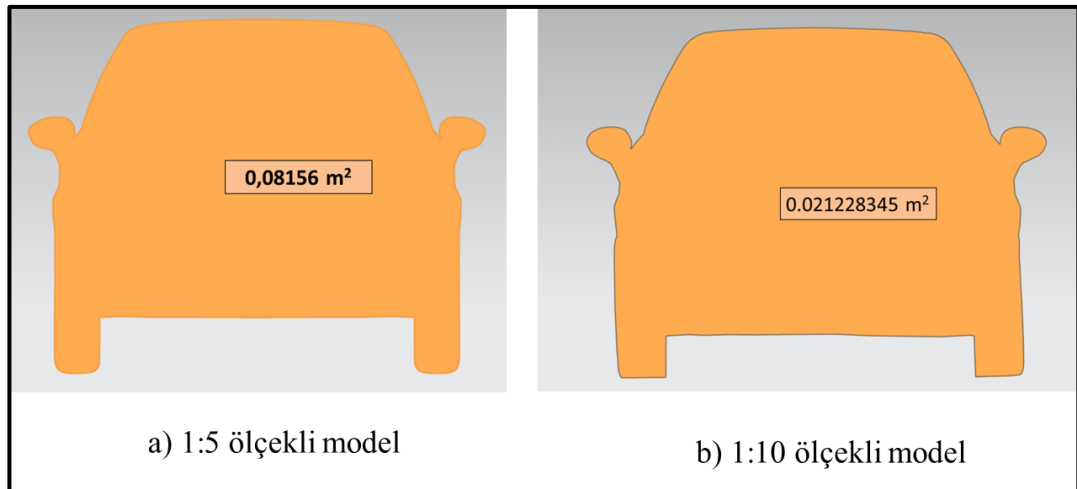
Şekil 4.111 1:10 model 'L1 -T1' konumunda arkadaki araç iplikcik testi ($U_{\infty} = 30$ m/s)

4.5 Sürüklenme Katsayısı (C_d) Analizleri

Bu bölümde değişik konumlarda olmak üzere 1:5 ve 1:10 modelin değişik blokaj oranlarında sürüklenme katsayıları tartışılacaktır. 1:5 modelin düz ve yanal açılarda sürüklenme katsayıları hem UURT hem de ART testlerinde ölçülmüştür. 1:5 model ART deney odasında 1 % blokaj oluştururken UURT deney odasında %20 blokaj oranı oluşturmuştur. 1:10 ölçekli model de UURT deney odasında %5 blokaj oranı oluşturmaktadır. 1:10 model sadece UURT de test edilmiştir. Deneysel sonuçlar CFD analizleriyle karşılaştırılmış ve blokaj etkileri değerlendirilmiştir. Yanal açılarda C_d ölçümleri 1:5 model için $\beta = 10^\circ$ ye kadar 1:10 model için ise $\beta = 40^\circ$ ye kadar gerçekleştirilmiştir. C_d ölçümleri birbirlerini yakın takip eden ardışık araç pozisyonlarına göre ($x/L = 0, 0.5, 1$) 1:10 model için UURT de gerçekleştirilmiş ve CFD sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Araç eksenini boyunca oluşan sürüklenme kuvveti F_x (N) kalibre edilmiş strain gauge balance sistemi yardımıyla ölçülmüş ve C_d değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda, sayısal çözümlerde de olduğu gibi hava yoğunluğu ($\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$) değeri olarak sabit alınmıştır.

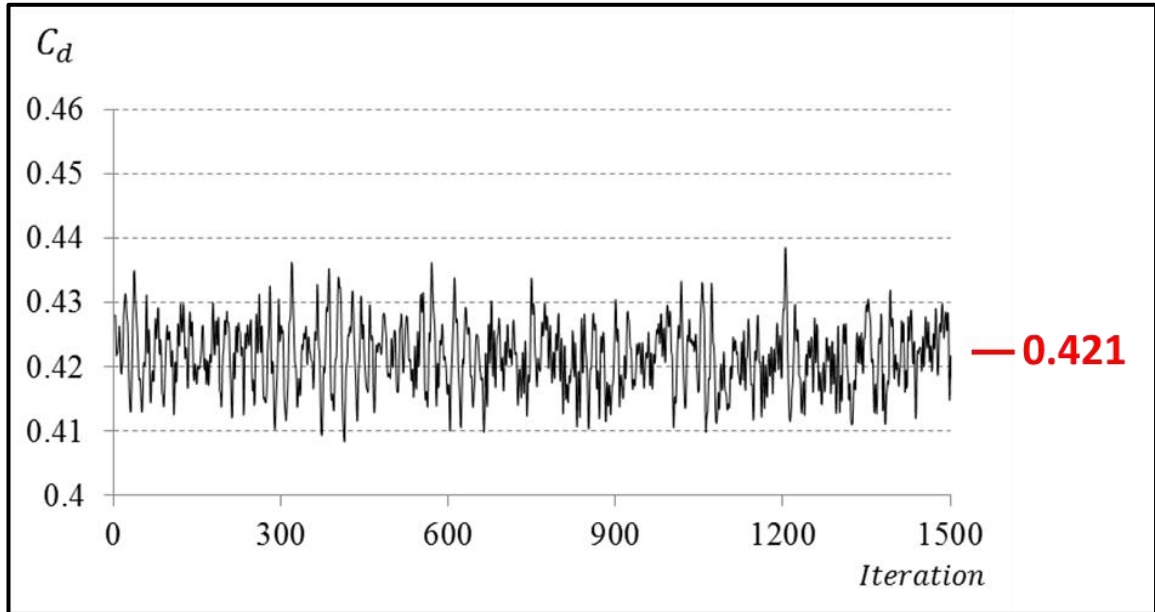
4.5.1. Düz Konumda Sürüklenme Katsayıları (C_d)

1:5 ve 1:10 modellerin düz konumda hava akımına dik max. kesit alanı Şekil 4.112 de verilmiş olup C_d hesaplamalarında baz alınmıştır.

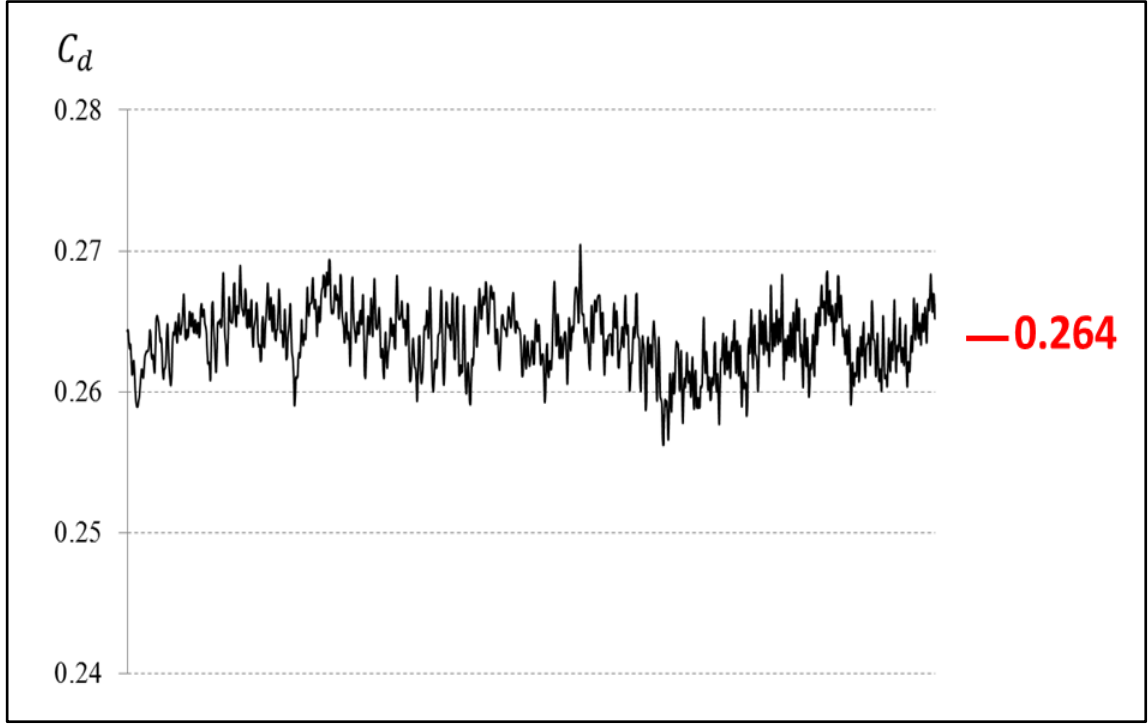


Şekil 4.112 1:5 ve 1:10 ölçekli model düz konumda maksimum kesit alanları (m²)

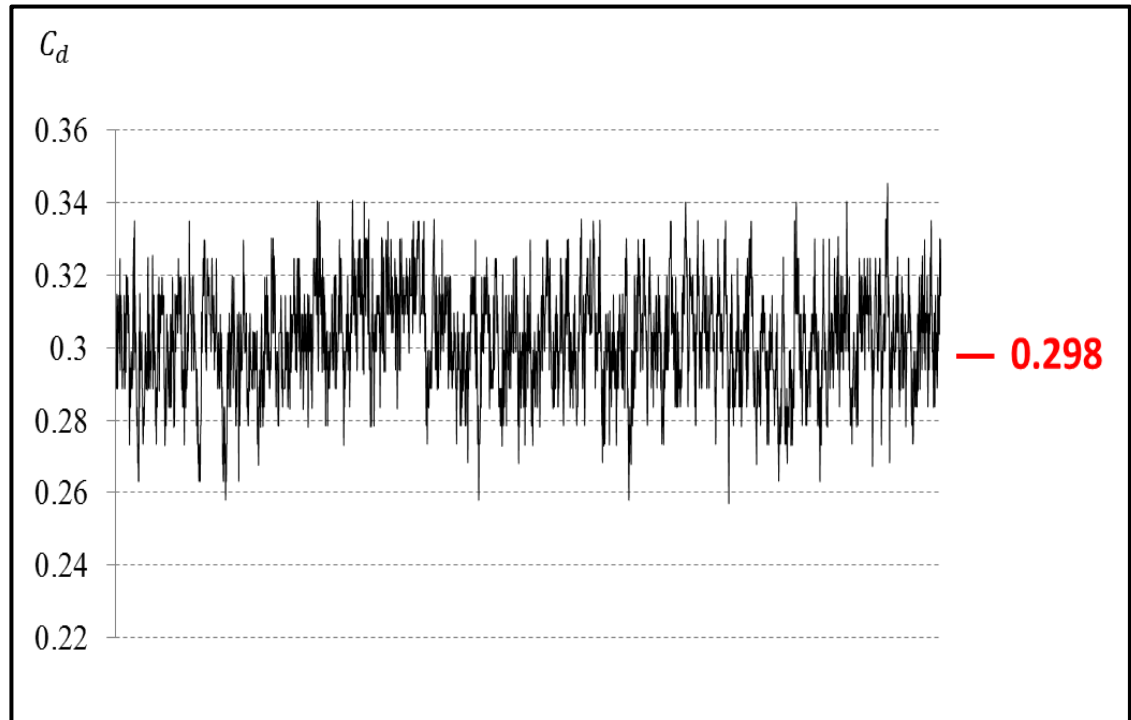
Şekil 4.113 de 1:5 modelin UURT’de $\beta = 0^\circ$ yanal açıda 30 m/s serbest akım hızındaki C_d grafiği görülmektedir. Blokaj oranı 1:5 ölçekli model için %20 seviyesindedir. Şekil 4.114 de ise aynı 1:5 modelin ART’de mevcut straingauge balance sistemiyle ölçülmüş C_d grafiği görülmektedir. ART de 1:5 model %1 blokaj seviyesinde test edilmiştir. C_d değerleri arasında belirgin fark görülmüştür. Blokaj etkilerinin değerlendirilebilmesi için 1:10 ölçekli model önceki bölümlerde bahsedildiği gibi 1:5 modele benzer straingauge balance sistemiyle UURT’de 30 m/s hızda test edilmiş ve Şekil 4.115 de görülen C_d grafiği oluşturulmuştur. Şekil 4.116 da 1:5 ve 1:10 ölçekli model CFD analizi C_d grafikleri görülmektedir. %20 blokaj oranı 1:5 modelin UURT tünel deney odası kesiti kullanılarak modellenmiştir. Aynı grafik üzerinde görülen %5 blokaj oranı da 1:10 ölçekli model boyutlarının UURT tünel boyutlarıyla CFD analizinden bulunmuştur. Bulunan 1:5 model CFD sonuçları deneysel UURT sonuçlarına %3 sapmayla yakındır 1:10 model CFD analizinde bulunan $C_d = 0.303$ değeri ise UURT test sonucu bulunan $C_d = 0.298$ değerine yaklaşık %1.7 seviyesinde yakın bulunmuştur.



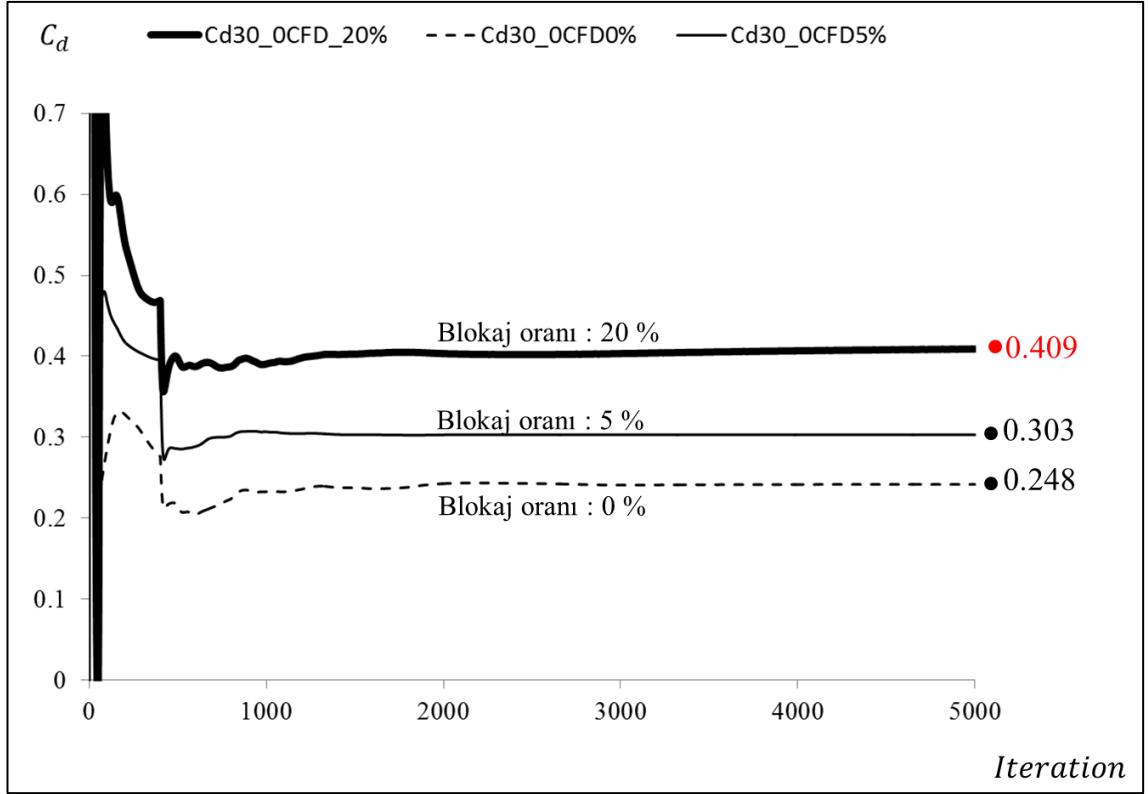
Şekil 4.113 1:5 ölçekli model UURT C_d grafiği (30 m/s, $\beta = 0$)



Şekil 4.114 1:5 ölçekli model ART C_d grafiği (30 m/s, $\beta = 0$)



Şekil 4.115 1:10 ölçekli model UURT C_d grafiği (30 m/s, $\beta = 0$)



Şekil 4.116 1:5 ve 1:10 ölçekli modeller %20 ve %5 blokajlı CFD C_d değerlerinin blokajsız CFD C_d ile kıyaslaması (30 m/s, $\beta = 0$)

Çizelge 4.1 de $\beta = 0^\circ$ düz konumda 1:5 ve 1:10 ölçekli modeller için UURT, ART testleri ve CDF analizleri C_d sonuçları tablo halinde verilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar birbirlerine çok yakın düzeyde bulunmuştur. Genel olarak sayısal ve deneysel çalışmalarda %10 a kadar farklar literatürde görülmektedir.

Çizelge 4.1 $\beta = 0^\circ$ düz konumda C_d değerleri (30 m/s)

	0 Blokaj 1:5 ölçekli model	5% Blokaj 1:10 ölçekli model	20% Blokaj 1:5 ölçekli model
UURT	-	0.298	0.421
ΔCFD %		-1.7%	2.9%
ART	0.264	-	-
ΔCFD %	6.1%		
CFD	0.248	0.303	0.409

4.5.2. Blokaj Etkilerinin Sürüklenme Katsayısı (C_d) Üzerindeki Etkilerinin Analizleri

Hava tüneli testlerinden elde edilen C_d değerleri için blokaj oranlarına bağlı olarak düzeltme faktörü uygulanması gerekir. Genel olarak universal kabul edilmiş tüm modeller için geçerli olabilecek bir düzeltme faktörü olmamakla birlikte blokaj faktörü aşağıdaki formülle de belirtilen basit formülasyonla gösterilebilir.

$$C_{dc} = w \cdot C_{dm} \quad (4.1)$$

Burada C_{dm} blokaj düzeltmesi yapılmamış, ölçülen sürüklenme katsayısıdır, C_{dc} düzeltilmiş sürüklenme katsayısıdır, w ise düzeltme katsayısıdır ve değişik formlarda belirtilmiştir. Maciejewski ve Osmólski, (2002) tarafından aşağıda belirtilen şekilde tanımlanmıştır:

$$w = 1 - k_l \cdot (A_v/A_w) + k_n \cdot (A_v/A_w)^2$$

A_v model kesit alanı, A_w deney odası kesit alanı, k_l, k_n ise düzeltme katsayılarıdır. Maciejewski and Osmólski, (2002) $k_l = 2$ ve $k_n = 1$ değerlerini blokaj düzeltmesi için optimum değerler olarak belirlemişlerdir.

Carr, (1971/4) aynı katsayıyı benzer şekilde aşağıda belirtildiği gibi blokaj oranıyla ilişkilendirmiştir :

$$w = (1 - B)^2$$

B tünel deney odası blokaj oranıdır. Sykes, (1973) ise katsayıyı aşağıdaki gibi tanımlamıştır :

$$w = 1 - m \cdot B$$

Burada m ampirik katsayıdır. Optimum değer $m: 1.9$ olarak önerilmiştir. Stafford, (1981) ise $m: 1.22$ değerini bir seri test sonrası önermiştir. Sykes' hipotezinin de belirttiği üzere m aynı zamanda modele ait sürüklenme katsayısına da bağlıdır.

Cowdrey, (1968), dikdörtgensel kesitli modeller için, Maskell, (1965) tarafından tanımlanmış olan model en-boy oranı ve model sürüklenme katsayısının fonksiyonu olan blokaj düzeltme faktörünü (4.5) geliştirerek sadece model en-boy oranının fonksiyonu olarak ifade etmiştir (4.6) .

$$\frac{C_d}{C_{dc}} = 1 + \theta \cdot C_d \cdot B \quad (4.5)$$

$$\theta = 0.96 + 1.94e^{(-0.05h/l)}$$

$$\frac{C_d}{C_{dc}} = 1 + m' \cdot B \quad (4.6)$$

$$m' = 1.85 + 1.35e^{(-0.05h/l)}$$

Yang and Schenkel, (2004) ise CFD blokaj düzeltme faktörünü aşağıdaki formülasyonla ifade etmişlerdir :

$$C_d(0, \text{exp}) = C_d(\text{exp}) - \Delta C_d(\text{CFD}) \quad (4.7)$$

Burada $C_d(0, \text{exp})$, düzeltilmiş deneysel sürüklenme katsayısını, $C_d(\text{exp})$ ise düzeltilmemiş deneysel sürüklenme katsayısını ifade etmektedir. $\Delta C_d(\text{CFD})$ ise CFD analizlerinden elde edilen blokaj düzeltme miktarıdır.

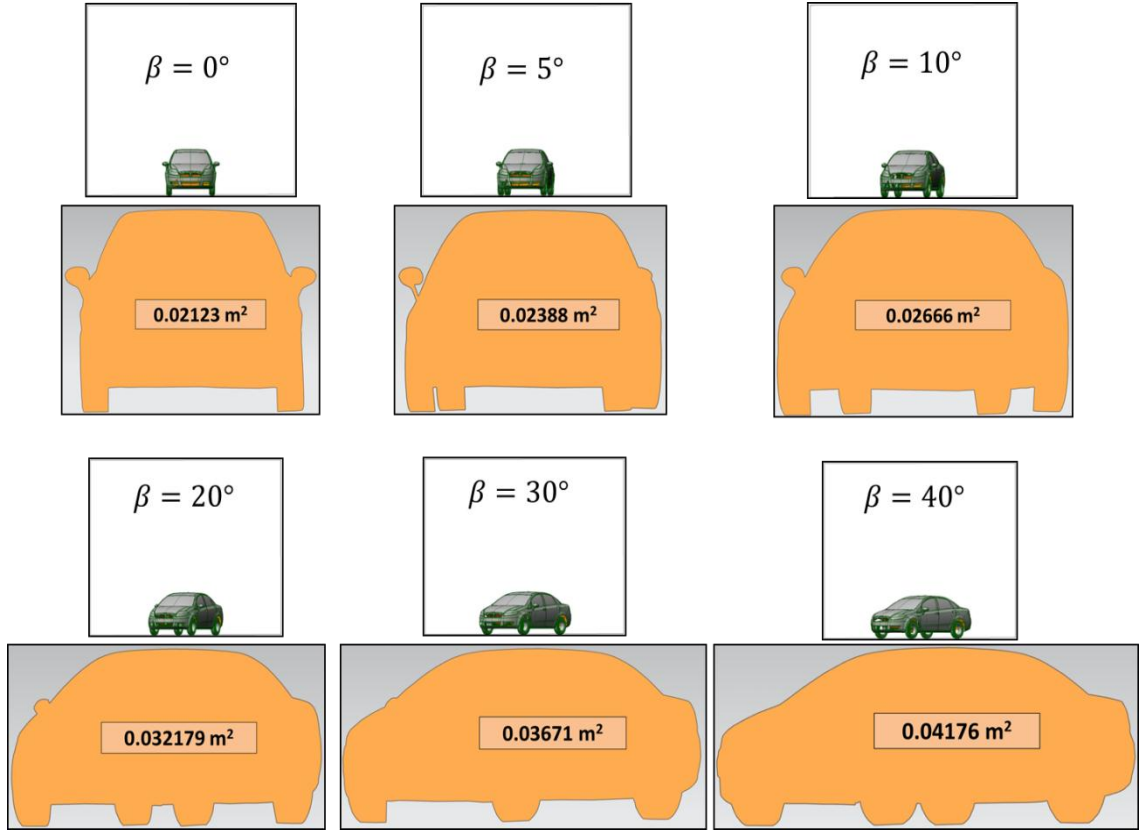
Çizelge 4.2 de üstte bahsedilen blokaj düzeltme faktörlerinin özeti görülmektedir. Düzeltme faktörleri blokaj oranları %5 ve %20 olan UURT deneysel sonuçlarına uygulanarak ART testlerinde elde edilen %1 blokaj oranlı sürüklenme katsayısı sonucuyla kıyaslanmıştır. Maskell ve Stafford yaklaşımlarında sapmalar yüksek iken diğer düzeltme faktörlerinin C_d değerini %1 – %8 aralığında sapma ile kabul edilebilir boyutlarda tahmin edilebildiği görülmektedir.

Çizelge 4.2 C_d blokaj düzeltme faktörleri ve oranları (30 m/s)

	UURT		ART	
	C_{d5}	C_{d20}	C_{d0}	
	0.298	0.421	0.264	
Blokaj Düzeltme Metodları	C_{dc5}	C_{dc20}	ΔC_{dc5}	ΔC_{dc20}
Sykes	0.270	0.261	0.028	0.160
Err%	2.2%	-1.1%		
Carr	0.269	0.269	0.029	0.152
Err%	1.9%	2.1%		
Maciejewski, Osmólski	0.269	0.269	0.029	0.152
Err%	1.9%	2.1%		
Stafford	0.280	0.318	0.018	0.103
Err%	6.0%	20.6%		
Maskell	0.286	0.339	0.012	0.082
Err%	8.3%	28.4%		
Cowdrey	0.257	0.257	0.041	0.164
Err%	-2.6%	-2.5%		
CFD blokaj düzeltmesi	0.243	0.260	0.055	0.161
Err%	-8.0%	-1.5%		

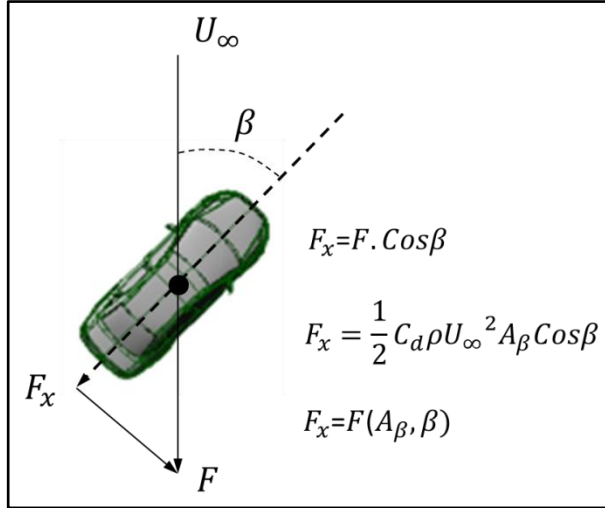
4.5.3. Değişik Yanal Sapma Açılarında ($\beta > 0$) C_d Değerleri

1:5 ölçekli model için β açısı UURT deney odası kısıtlarından dolayı maksimum 10° alınırken, 1:10 ölçekli modelde 40° yanal açısına kadar testler gerçekleştirilmiştir. CFD C_d analizleri $\beta = 40^\circ$ yanal açya kadar gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Yanal açı durumuna göre 1:10 ölçekli modelin UURT deney odası konumları ve rüzgara dik kesitleri ve alanları Şekil 4.117 de verilmiştir. Görüldüğü gibi özellikle 20° ve üstü yanal açı durumlarında kesit alanı belirgin bir şekilde büyümektedir. Bu durumda da blokaj etkileri belirgin şekilde artmaktadır.



Şekil 4.117 Değişik β yanal açılarında 1:10 modelin UURT deney odası pozisyonları ve kesit alanları

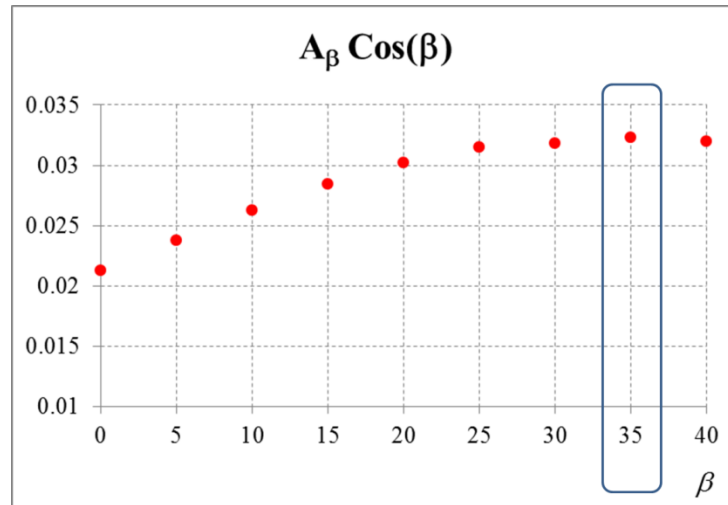
Yanal açı artışı ile birlikte rüzgara dik kesit ve buna bağlı olarak rüzgar yönündeki direnç kuvveti artış göstermektedir. Fakat C_d hesabında araç simetri eksenini "x" yönünde oluşan sürükleme kuvveti ve $\beta = 0^\circ$ de verilen kesit alanı kullanıldığından (Şekil 4.118), β açısının belirli bir değerine kadar C_d değeri artmakta ve daha sonra tekrar düşüşe geçmektedir. Çizelge 4.3 te yanal açılara göre A_β kesit alanı ve yanal açı β nin cosinüs değeriyle çarpımları verilmiştir. Şekil 4.119 da ise grafik halinde görülmektedir. $\beta = 35^\circ$ yanal açısından itibaren C_d değerinde düşüş beklenmektedir. Bu açıdan itibaren alan artışı etkisi ile β yanal açısının cosinüs değerleri birbirlerini dengelemektedir.



Şekil 4.118 C_d hesabında kullanılan araç eksenli sürüklenme kuvveti

Çizelge 4.3 Yanal açılara göre kesit alanı x Cosinüs (β) değerleri

Yanal Açı	A_β (m ²)	$A_\beta \cdot \text{Cos}(\beta)$
0	0.021230	0.021230
5	0.023880	0.023789
10	0.026660	0.026255
15	0.029444	0.028441
20	0.032179	0.030238
25	0.034716	0.031463
30	0.036710	0.031792
35	0.039445	0.032311
40	0.041760	0.031990

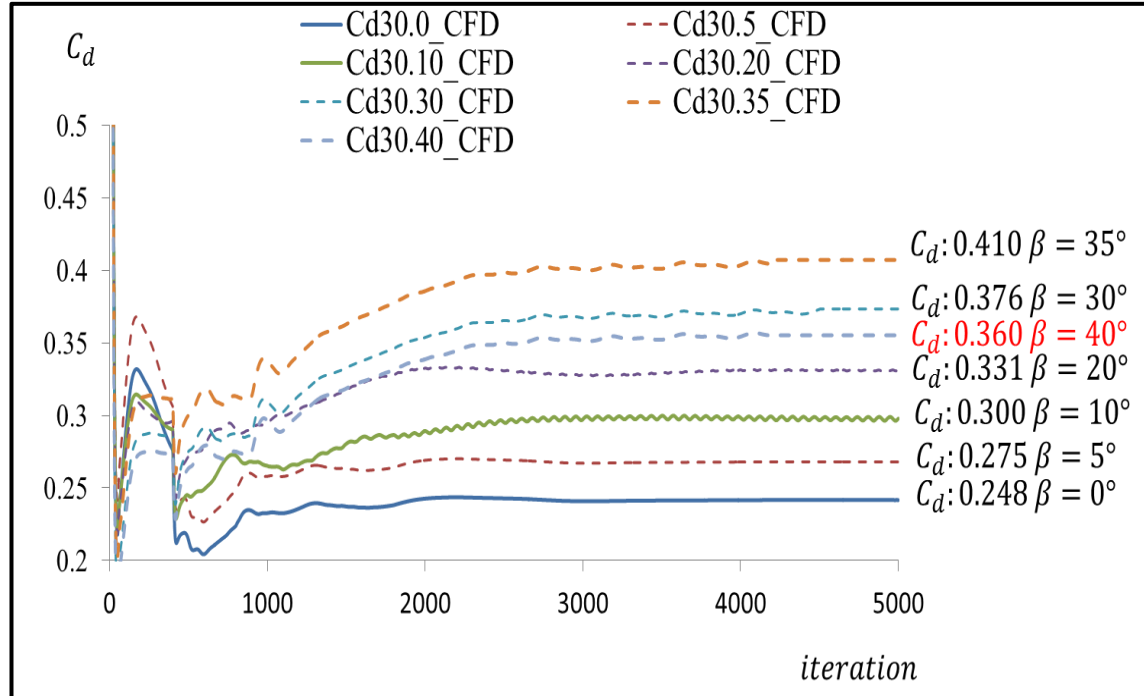


Şekil 4.119 $A_\beta \text{Cos}\beta$ ile yanal rüzgar açısı ilişkisi

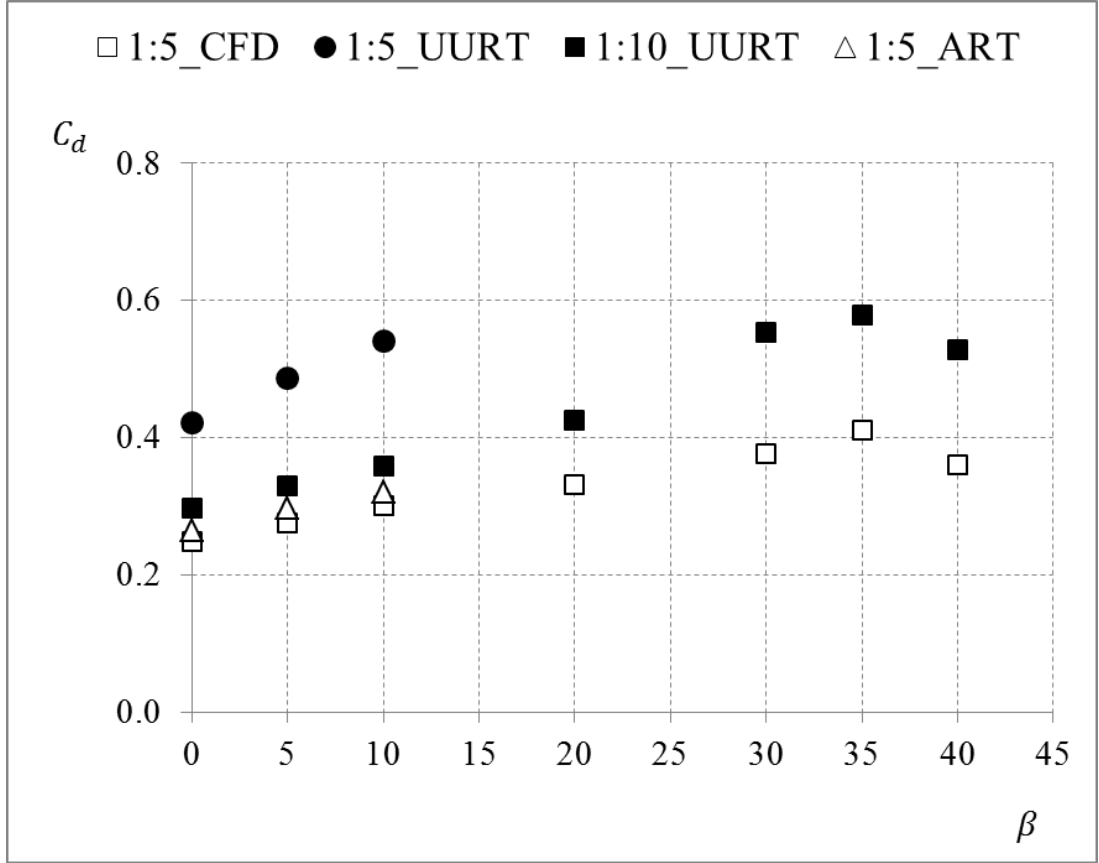
Çizelge 4.4 de 1:5 ve 1:10 ölçekli modellerin değişik β yanal açılarında ART, UURT testlerinde ve 1:5 modele ait CFD sonuçları görülmektedir. **Şekil 4.120** de $\beta = 40^\circ$ yanal açığa kadar CFD C_d sonuçları grafik halinde verilmiştir. **Şekil 4.121** de ise modellere göre ART, UURT ve CFD testlerinde C_d ile yanal rüzgar açısı β ilişkisi görülmektedir..

Çizelge 4.4 1:5 ve 1:10 ölçekli modellerin değişik β yanal açılarındaki C_d değerleri

		β						
		0	5	10	20	30	35	40
UURT	1:5	0.421	0.486	0.541				
	1:10	0.298	0.330	0.359	0.425	0.553	0.578	0.528
ART	1:5	0.264	0.297	0.32				
CFD	1:5	0.248	0.275	0.300	0.331	0.376	0.410	0.360



Şekil 4.120 CFD β yanal açılarında C_d değişimleri



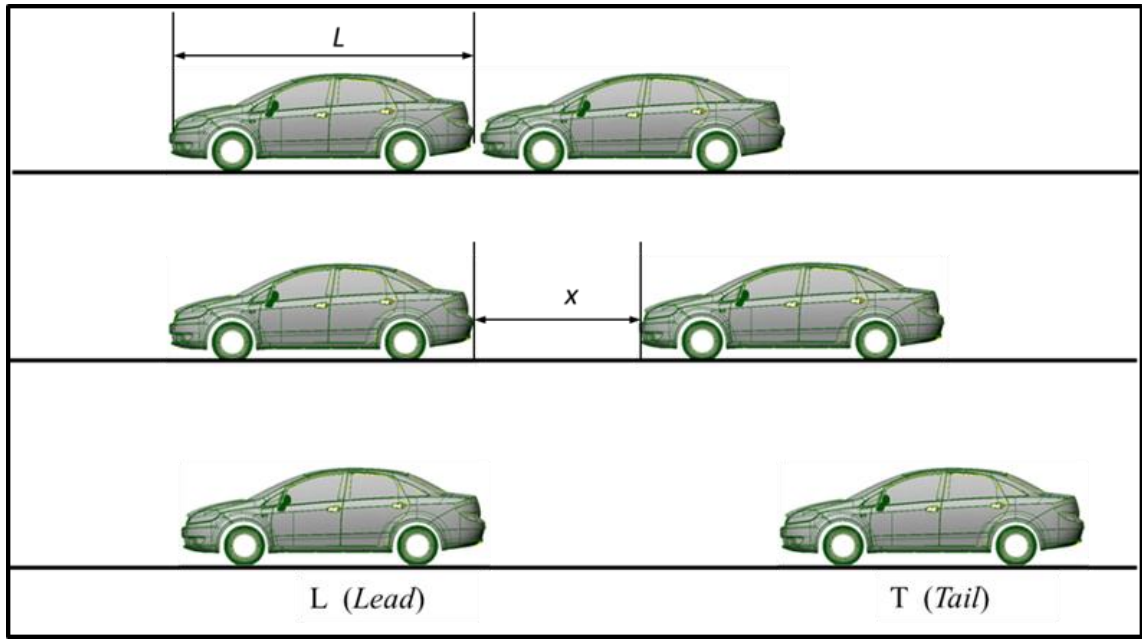
Şekil 4.121 β yanal açılarında 1:5 ve 1:10 model C_d değişimleri ($U_\infty = 30$ m/s)

1:5 model UURT testlerinde deney odası boyut kısıtları nedeniyle $\beta = 10^\circ$ ile sınırlandırılırken ART testleri de 1:5 model için $\beta = 10^\circ$ ye kadar gerçekleştirilmiştir. 1:10 ölçekli modelde ise UURT testleri $\beta = 40^\circ$ ye kadar gerçekleştirilmiştir. CFD analizleri ise 1:5 ölçekli model boyutlarında StarCCM+ Realizable K- ϵ two layer türbülans modeli ile $\beta = 40^\circ$ yanal açığa kadar gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.121 den de görüleceği üzere β açısına bağlı olarak C_d değişim trendleri paralellik gösterirken, 1:5 model UURT testleri diğer sonuçlardan blokaj tesiri nedeniyle farklılaşmıştır. ART test sonuçlarıyla CFD sonuçları birbiriyle tamamiyle uyumlu görülmektedir. 1:10 ölçekli modele gelindiğinde $\beta = 10^\circ$ ye kadar trendler tamamiyle paralel iken $\beta = 20^\circ$ den itibaren UURT testlerinde blokaj tesirine bağlı olarak C_d değerleri belirgin artış göstermiş fakat $\beta = 35^\circ$ den itibaren yanal açının cosinüs değeri C_d artışını dengelemiştir. $\beta = 35^\circ$ değeri CFD çözümüyle de doğrulanmıştır.

4.5.4. Birbirlerini Takip Eden Araç Durumlarında C_d Değerleri

Şekil 4.122 de görülen araç pozisyonlarında $x/L = 0, 0.5, 1.0$ değerlerinde $U_\infty = 30$ m/s hız değerinde C_d değerleri ölçülmüştür. Önde bulunan araç modeli L harfi (Lead) ile gösterilmiş, arkada bulunan araç ise T harfi (Tail) ile gösterilmiştir. Bölüm 4.4 de basınç dağılımları gösterilmiş ve öndeki aracın tavan orta kısmından arkadaki aracın tavan orta bölgesine kadar akımın etkilendiği belirtilmiştir. UURT testlerinde $x/L = 0$ pozisyonunda arkadaki aracın C_d değeri pek değişmez iken öndeki aracın C_d değeri arka bölgedeki iz (wake) bölgesinin yok olmasıyla birlikte önemli bir şekilde düşüş göstermiştir. $Cd_{l0}/Cd_0 = 0.54$ değeri bulunmuştur. Burada $l0$ indexi öndeki aracın $x/l = 0$ pozisyonunu göstermektedir. Cd_0 ise tek araç halindeki sürüklenme katsayısıdır. Arkada bulunan araçta ise $Cd_{T0}/Cd_0 = 1.01$ değeri bulunmuştur. $x/L = 0.5$ değerinde öndeki aracın sürüklenme katsayısı 0 pozisyonuna göre birmiktar artış göstermiştir fakat hala tek araç durumuna göre düşüktür, $Cd_{l0.5}/Cd_0 = 0.75$. Arkada bulunan aracın sürüklenme katsayısı çok az bir artış göstererek $Cd_{T0.5}/Cd_0 = 1.04$ değeri olarak ölçülmüştür. $x/L = 1.0$ pozisyonunda öndeki araçta sürüklenme katsayısı artar iken arkadaki araçta bir miktar düşüş görülmüştür. $Cd_{l1}/Cd_0 = 0.88$ seviyesinde iken $Cd_{T1}/Cd_0 = 0.88$ olarak ölçülmüştür. CFD analizlerinde de pozisyonlara bağlı olarak bulunan sürüklenme katsayıları deneysel sonuçlarla uyumludur. Sadece $x/L = 1.0$ konumunda deneysel çözümlerde sürüklenme katsayıları daha düşük bulunmuştur. **Çizelge 4.5** de deneysel UURT test sonuçları CFD analizleriyle kıyaslanmış ve **Şekil 4.123** de ise grafik halinde karşılaştırma gösterilmiştir. Ön ve arkadaki araçların ortalama C_d oranlarında pozisyonlara göre UURT deneysel sonuçlarında sırasıyla $x/L = 0$ da %23 iyileşme görülürken $x/L = 0.5$ te iyileşme oranı %11 mertebesindedir. $x/L = 1$ pozisyonunda ise ortalama C_d değeri %12 mertebesinde tek araç durumuna göre iyileşmiştir. Bu değerler CFD analizlerinde ise $x/L = 0$ da %21 iken $x/L = 0.5$ te ortalama C_d %5 seviyesinde iyileşmiştir. $x/L = 1$ de ise iyileşme oranı %4 seviyesinde kalmıştır. Bu sonuçlardan da görüleceği gibi arka arkaya pozisyonlanmış FIAT Linea model araçlarda arkadaki araca nazaran önde pozisyonlanmış aracın C_d değeri daha belirgin bir iyileşme göstermektedir. Arkadaki araçta ise özellikle $x/L = 0.5$ mesafesinde C_d değeri artışa geçmektedir. Tandem pozisyonlarda UURT testlerinde ve CFD analizlerinde bulunan C_d değerleri **Çizelge 4.6** da listelenmiştir. Benzer sonuçlar

Watkins ve Vino, (2008) Ahmed modelleri üzerinde tandem pozisyonda yapılan çalışmada da görülmektedir. **Şekil 4.124** de Ahmed modellerinin pozisyonları ve **Şekil 4.125** de de bulunan C_d oranları görülmektedir. $x/L= 0.5$ pozisyonunda arkadaki modelde C_d değeri 30 % seviyesinde artış göstermiştir. Öndeki modelde ise çalışmamızda Fiat Linea model de gördüğümüz belirgin C_d düşüşü Ahmed modeli çalışmasında da görülmektedir.



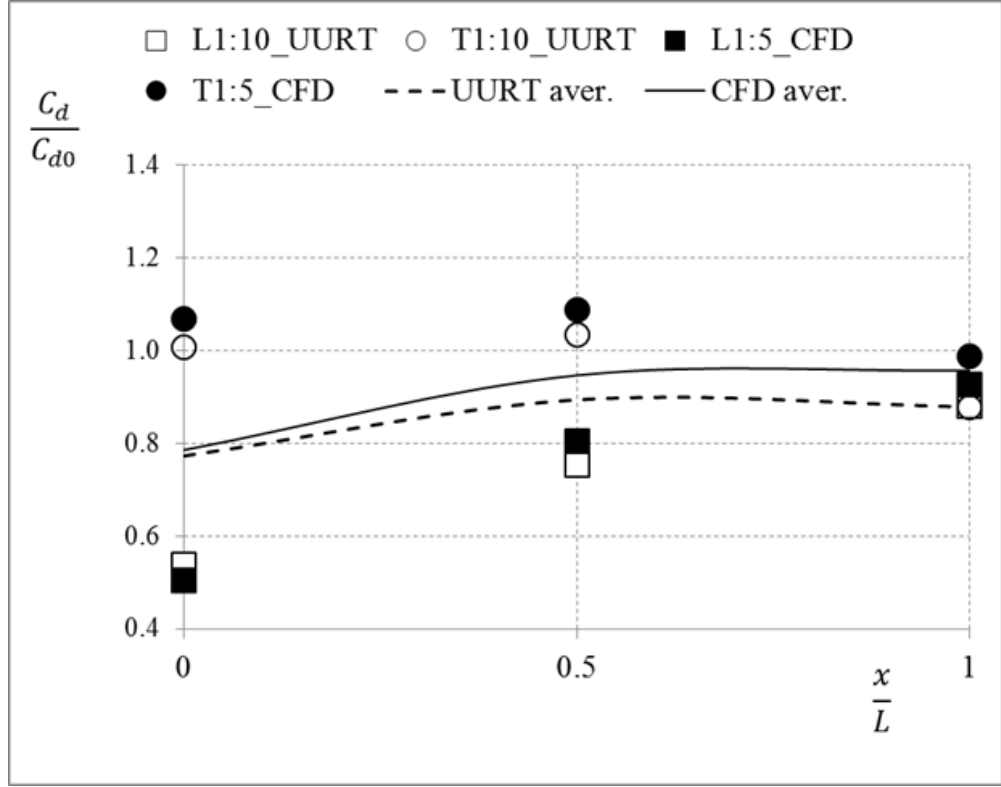
Şekil 4.122 Bir birini takip eden araç pozisyonları (L: Öndeki araç, T: Arkadaki araç)

Çizelge 4.5 Araç konumlarına göre C_d oranları (UURT, CFD kıyaslamalı)

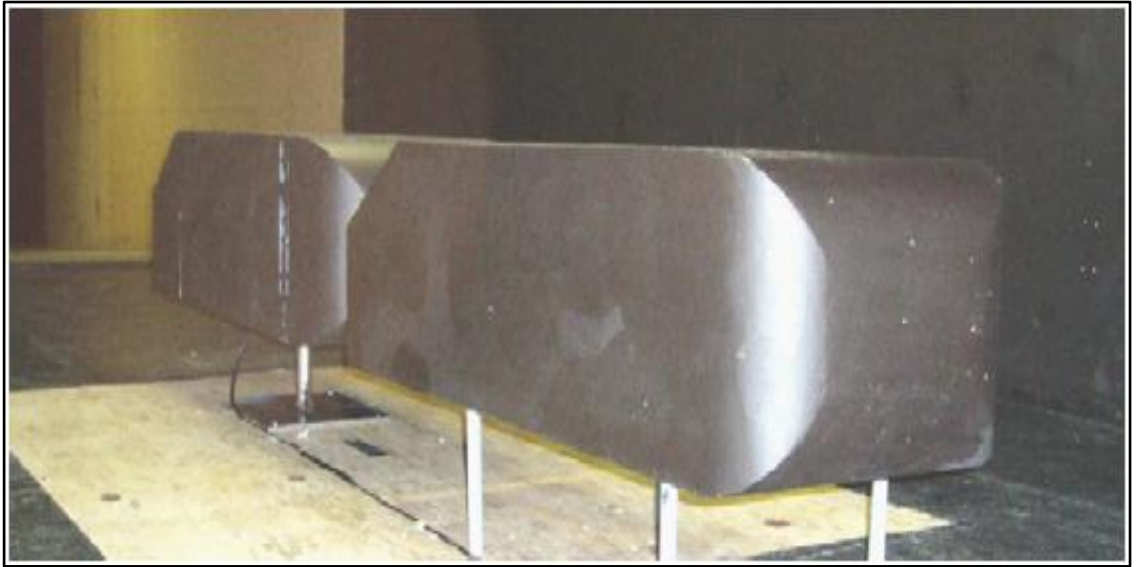
	Model	Cd_{l0} / Cd_0	Cd_{t0} / Cd_0	$Cd_{l0.5} / Cd_0$	$Cd_{t0.5} / Cd_0$	Cd_{l1} / Cd_0	Cd_{t1} / Cd_0
UURT	1:10	0.54	1.01	0.75	1.04	0.88	0.88
CFD	1:5	0.50	1.07	0.81	1.09	0.93	0.99

Çizelge 4.6 Tandem araç konumlarına göre C_d değerleri (UURT, CFD kıyaslamalı)

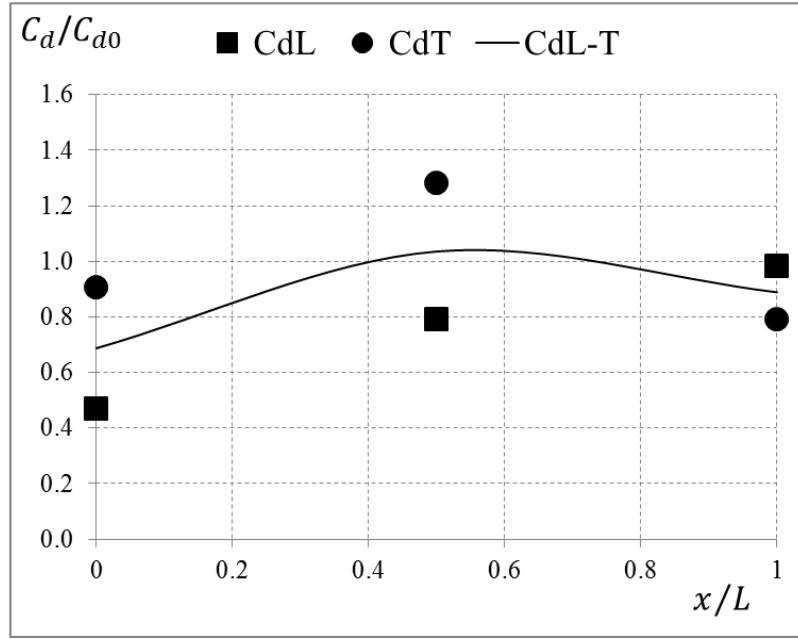
	Model	Cd_{l0}	Cd_{t0}	$Cd_{l0.5}$	$Cd_{t0.5}$	Cd_{l1}	Cd_{t1}
UURT	1:10	0.161	0.301	0.223	0.310	0.262	0.262
CFD	1:5	0.125	0.265	0.200	0.271	0.231	0.246



Şekil 4.123 Araç konumlarına göre C_d değişimleri (CFD ve UURT karşılaştırması)

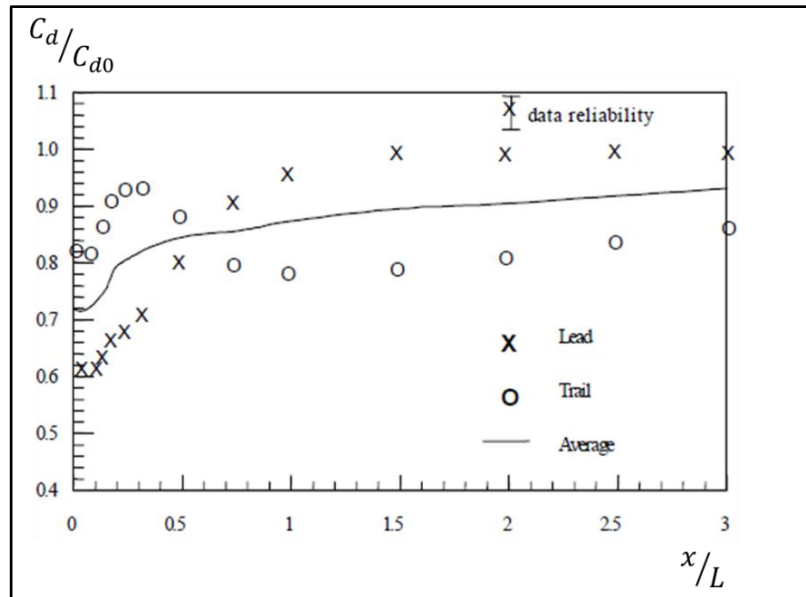


Şekil 4.124 Ardışık pozisyonda Ahmed Modelleri (Watkins ve Vino, 2008)



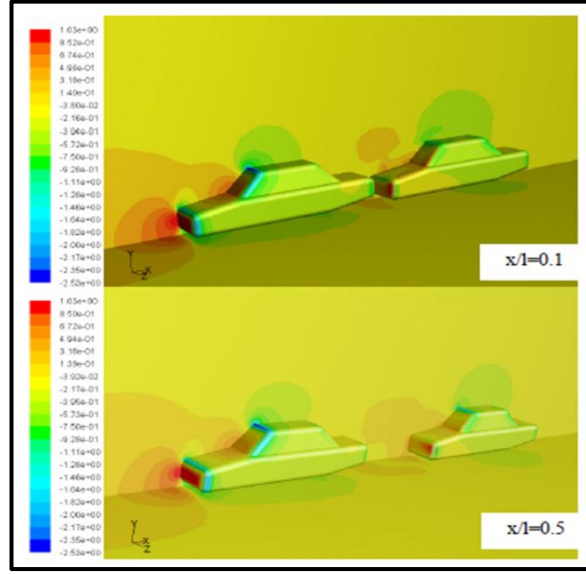
Şekil 4.125 Ardışık Ahmed modelleri C_d oranları (Watkins ve Vino, 2008)

Zabat ve ark, (1995) tarafından ardışık pozisyonda birbirini yakın takip eden iki adet minivan araçta yapılan C_d ölçümlerinde ise Şekil 4.126 da görülen sonuçlar elde edilmiştir. Burada da öndeki araçta C_d düşüşü $x/L = 0 - 0.5$ pozisyonları arası belirgin iken arkadaki araçta $x/L = 0 - 0.5$ arası C_d değerleri öndeki araca göre daha yüksek görülmektedir.

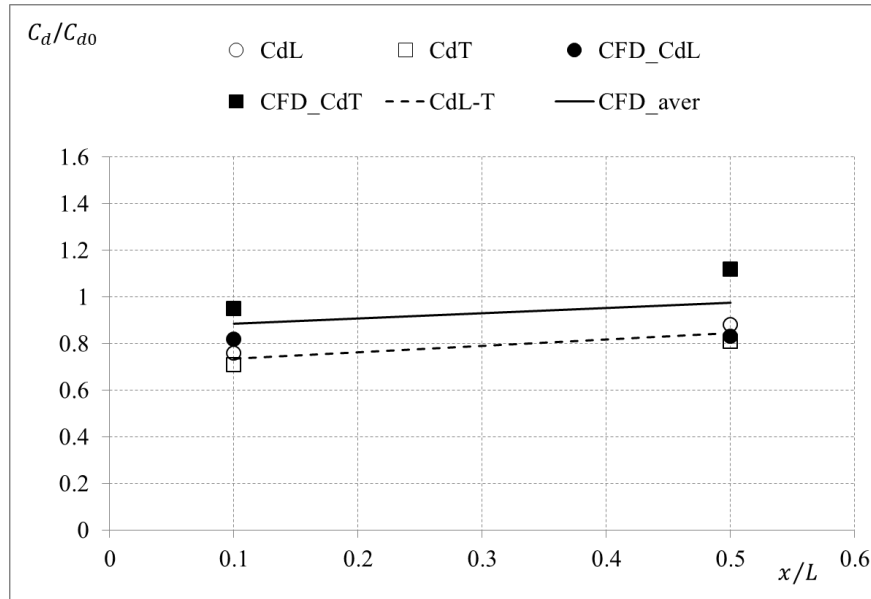


Şekil 4.126 Birbirini yakın takip eden iki adet minivan C_d oranları (Zabat ve ark, 1995)

Örselli, (2006) iki adet birbirini yakın takip eden Mira modeli (Şekil 4.127) üzerinde yaptığı deneysel ve CFD analizlerinde Şekil 4.128 de görülen C_d oranları elde edilmiştir. CFD analizleri deneysel sonuçlardan bir miktar sapma göstermiştir, özellikle $x/L = 0.5$ değerinde arkadaki araçtaki C_d artışı CFD analizinde de doğrulanmıştır. Deneysel sonuçlarda ise $x/L = 0.1$ ve 0.5 değerlerinde yaklaşık %20 ortalama C_d düşüşü elde edilmiştir.



Şekil 4.127 İki adet yakın takip eden Mira modeli (Örselli, 2006)



Şekil 4.128 İki adet yakın takip eden Mira modeli C_d oranları (Örselli, 2006)

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada 1:5 ve 1:10 ölçekli gerçek araç modelleri (Fiat Linea) blokaj tesirlerinin değerlendirilebilmesi amacıyla hem UURT hem de ART tünellerinde test edilmiştir. C_d değerleri kalibre edilmiş straingauge balans sistemi vasıtasıyla Datalogger yardımıyla toplanan verilerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. 1:5 ölçekli model UURT deney odasında %20 blokaj oluşturmaktadır. Aynı model ART tüneline %1 blokaj düzeyine sahip olup blokaj etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Ölçülen C_d değerleri arasında belirgin fark görülmüştür. $U_\infty = 30$ m/s serbest akım hızında UURT C_d değeri 0.421 iken ART de aynı model sürüklenme katsayısı 0.264 olarak bulunmuştur. UURT tüneline 1:10 ölçekli Fiat Linea modeli %5 blokaj oluşturmakta olup $U_\infty = 30$ m/s hızında C_d değeri 0.298 bulunmuştur. Sayısal analizlerde FIAT'ın da standard CFD kodu olan StarCCM+ kullanılmış ve türbülans modeli olarak Düzeltilmiş (Realizable) K- ϵ two-layer kullanılmıştır. Modellemelerde 1:5 ölçekli model kullanılmıştır. Bulunan C_d değerleri deneysel sonuçlarla oldukça uyumludur. 1:5 ölçekli model normal CFD analizinde $C_d = 0.248$ bulunurken %20 blokaj modellemesi 1:5 ölçekli modelin UURT tünel deney odası boyutlarıyla gerçekleştirilen simülasyonunda $C_d = 0.409$ bulunmuştur. Bu değer deneysel sonuçlara %2.9 seviyesinde yakındır. %5 blokaj modellemesinde de 1:10 ölçekli model gene UURT deney odası boyutlarıyla modellenerek analiz yapılmış ve $C_d = 0.303$ bulunmuştur. Bu değer deneysel sonuçlara %1.7 seviyesinde yakındır. Blokajsız durumda bulunan 0.248 C_d değeri ise deneysel sonuçlara ($C_d = 0.264$) %6 seviyesinde yakındır. Bu sonuçlara göre CFD analizlerinin gerçek araç modellerini deneysel sonuçlara çok yakın seviyede analiz edebildiğini göstermektedir. Düzeltilmiş (Realizable) K- ϵ two-layer türbülans modelinin otomobil aerodinamik analizlerinde güvenilir sonuçlar verdiğini de göstermiştir.

Blokaj etkilerinin C_d değerleri üzerinde önemli sapmalar oluşturduğu görülmüş ve blokajlı C_d değerlerinin blokaj düzeltme faktörü kullanılarak düzeltilmesi gerekliliği belirlenmiştir. Blokaj düzeltme faktörleri olarak universal kabul edilmiş bir metod bulunmamakla birlikte literatürde farklı tanımlamalar bulunmaktadır. Carr, (1971/4) tarafından tanımlanmış alan metodu (area method) blokajlı C_d değerini doğru değere çok yakın düzeyde tahmin edebilmektedir. Blokajlı 0.421 değerini 0.269 değerine düzeltmektedir. Bu değer ART $C_d = 0.264$ değerinden sapması %1.9 seviyesindedir.

Blokaj düzeltmesi için CFD analizlerinden bulunan blokaj düzeltme faktörü de kullanılabilir fakat değişik blokaj oranları için her seferinde sayısal çözüm ihtiyacı oluşmaktadır. Sayısal çözümler 13 M – 16 M ağ(mesh) sayısı aralığında 4-5 günlük analizle elde edilebilmiştir. Dolayısıyla çok zaman almakta ve bu noktada kısıt oluşturmaktadır.

Deneysel testlerde 10, 20, 30 m/s akım hızlarında 1:5 ve 1:10 modellerin simetri eksenleri ($y=0$) üzerinde belirlenmiş olan noktalarda hız profilleri sıcak tel anomemetresi (Hotwire anomemeter) ile laboratuarda mevcut olan travers vasıtasıyla otomatik data toplama metoduyla çizdirilmiştir. Hız profilleri ile belirlenen akım ayrılma noktaları hem iplikcik metodu akım görüntülemesiyle hem de sayısal CFD skin friction kontur dağılımıyla doğrulanmıştır. Akım genel olarak motor kaputu, ön cam ve tavan arka kısmına kadar kararlı ve yüzeyi takip etmektedir, fakat ön silecek bölgesi, ön ve arka tekerlek arka bölgeleri, A-direk bölgesi ve arka bombeli cam üst kısmıyla arka kaput bölgesinde akım kararlı yapı izlememekte ve vortex oluşumları gözlenmektedir. Dış dikiz aynasından sapan hava akımı B-direk bölgesinden saparak arka bombeli cam ve bagaj kaputu yan birleşiminde hava akımını belirgin bir şekilde etkilemektedir. Hız profillerinden simetri eksenini üzerinde sınır tabaka kalınlıkları çizdirilmiş ve özellikle arka bombeli cam ve tavan birleşiminden yaklaşık 20 mm önde hız profili çizdirilmiştir. Bu bölge literatür çalışmalarında bir çok araç modelinde VG(Vortex Üretici) uygulama noktası olarak önerildiğinden, bu noktadaki sınır tabaka kalınlığı 1:5 model için 6 mm bulunmuş olup 1:1 scale için 30 mm anlamına gelmektedir. Bu noktada Koike ve ark, (2004) tarafından Mitsubishi LANCER EVALUTION VIII de yapılan çalışmada aynı noktada 1:1 ölçekli modelde 30 mm sınır tabaka yüksekliği bulunmuş ve VG uygulaması olarak önerilmiştir. Gelecek çalışmalarda FIAT Linea model için de aynı nokta değişik VG alternatif uygulaması için kullanılabilir.

10, 20, 30 m/s hızlarında ve simetri eksenini ve yanal eksenler üzerinde ($x=232$, $x=405$, $x=635$ kesitleri) statik basınç değerleri ölçülerek C_p dağılımları çıkarılmıştır. 1:5 modelde toplam 154 noktada ve 1:10 ölçekli modelde de 79 noktada statik basınç ölçülmüştür. Bu ölçümlerde özellikle %20 blokaja sahip 1:5 modelin UURT testlerinde simetri eksenini üzerinde tavan ve araç arka bölgesinde basınç dağılımı belirgin bir şekilde sapma göstermiştir. Yanal eksenlerde de hem CFD hem de ART testlerine göre

sapmalar görülmüştür. %5 blokaja sahip 1:10 ölçekli model UURT basınç dağılımları ise CFD ve ART sonuçlarıyla çok uyumlu bulunmuştur. Sayısal CFD basınç konturları da incelendiğinde blokaj etkisinin özellikle ön bombeli cam üst kısmından itibaren araç arka bölgesine doğru etkisini gösterdiği görülmektedir.

Bu çalışmada 1:5 ve 1:10 ölçekli modellerin β yanal açı durumlarında C_d değerleri ve simetri ve yanal eksenler üzerindeki C_p dağılımları belirlenmiştir. 1:5 model UURT tüneline boyutsal kısıtlar nedeniyle $\beta = 10^\circ$ ye kadar test edilirken 1:10 modelde bu açı $\beta = 40^\circ$ ye kadar çıkarılmıştır. 1:5 ölçekli model ART testlerinde de 10° ye kadar test edilirken, CFD analizleri 1:10 model gibi 40° yanal açıya kadar gerçekleştirilmiştir. $\beta = 5, 10$ derecelerde akım karakteristikleri az etkilenirken özellikle 20° den itibaren blokaj etkisine bağlı olarak 1:10 ölçekli modelde C_d artışı belirgin hale gelmiştir. $\beta = 35^\circ$ C_d değerinin maksimum olduğu pik noktası olarak bulunmuş olup bu noktadan itibaren C_d değeri düşüşe geçmektedir. Aynı durum CFD analizlerinde de doğrulanmıştır. C_p dağılımları da aynı durumu doğrulamaktadır. Literatür çalışmalarında ise sürüklenme katsayısının maksimum olduğu yanal açıların $25 - 40$ dereceleri arasında değiştiği gözlemlenmiştir. $\beta = 5, 10$ derecelerde simetri ekseninde basınç dağılımı genel olarak çok az miktarda tavan arka kısmından geriye doğru değişim gösterirken $\beta = 20$ ve 30 derecelerde sapma çok belirgin hal almıştır. Bunun nedeni %5 blokaja sahip 1:10 ölçekli modelin deney odası içerisinde bu yanal açılarda rüzgara dik kesit alanının ve sonuç olarak da blokaj etkisinin belirgin artması şeklinde açıklanabilir.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen diğer bir çalışma ise birbirini yakın takip eden iki aracın değişik pozisyonlarda C_d ve simetri ekseninde üzerindeki C_p etkileşimlerinin çıkarılmasıdır. Bu çalışma 30 m/s hızda 1:10 ölçekli model üzerinde UURT tüneline gerçekleştirilmiştir. $x/L = 0, 0.5, 1.0$ pozisyonları test edilmiştir. Önde bulunan araçta C_d değeri özellikle $x/L = 0$ pozisyonunda %50 oranında düşerken arkada bulunan araçta C_d değerinin aynı seviyelerde kaldığı gözlemlenmiştir. $x/L = 1.0$ pozisyonunda ise hem öndeki hem de arkadaki aracın C_d değerleri birbirine çok yaklaşmıştır. Sayısal analizler 1:5 ölçek üzerinde gerçekleştirilmiş olup pozisyonlara göre C_d trendleri deneysel sonuçlarla uyumlu görülmektedir. $x/L = 0.5$ pozisyonunda arkadaki araçta C_d değeri bir miktar artış göstermiştir. Benzer durum literatürde yapılan çalışmalarla da karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Ön ve arkadaki aracın ortalama C_d

değerleri göz önüne alındığında pozisyonlara bağlı olarak %23 ile %12 arasında C_d değerleri düşüş göstermektedir. Özellikle $x/L = 0$ pozisyonunda öndeki araçta arka ardız(wake) bölgesinin kaybolmasıyla birlikte sürüklenme katsayısı yarı yarıya iyileşmiştir. Bu pozisyonlarda simetri eksenleri üzerinde basınç dağılımları incelendiğinde öndeki aracın tavan orta bölgesinden arkada pozisyonlanan aracın tavan orta bölgesine kadar dağılımın etkilendiği görülmektedir.

İleriye dönük çalışmalar için, bu çalışmada elde edilen analizler gelecekte yeni model ve FL(facelift) çalışmalarına girdi oluşturabilir. Ardışık araç testleri daha büyük deney odasına sahip tünellerde daha büyük x/L mesafeleri için tekrarlanabilir. Değişik türbülans şiddetlerinin aerodinamik katsayılar(C_d, C_p) etkileri değerlendirilebilir. Olası stil optimizasyonları ve ardız(wake) bölgesini aktif,pasif metodlarla kontrol ederek C_d iyileştirmeleri çalışabilir. Çalışmalarda kullandığımız modellerin hava alıkları kapalı ve taban altları düz modellenmiş idi, özellikle taban altı ve tekerlek bölgeleri detay modellenerek gerçek araçtaki aerodinamik simüle edilebilir. 1:1 gerçek araçtaki C_d değerleri coast-down testleriyle karşılaştırılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Ahmad, N.E., Abo-Serie, E., Gaylard, A., 2010**, Mesh Optimization for Ground Vehicle Aerodynamics, *ISSR Journals*, Vol. 2(1).
- Ahmed, S.R., Ramm, G., 1984**, Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake, *SAE-Paper* 840300
- Aider, J., Franc, J., Beaudoin, O., Wesfreid, J.E., 2010**, Drag and lift reduction of a 3D bluff-body using active vortex generators, *Exp Fluids* (2010) 48:771–789
- Akasaka, K., Ono, K., 2010**, Development of rapid simulation method for automotive aerodynamics, *Proceedings of the ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting and 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels FEDSM-ICNMM2010*, Engineering Summer Meeting and 8th
- Ath, V., 1985**, Kara vasıtalari aerodinamigi incelemelerinde kullanılan hava tünelleri, *I. Otomotiv ve Yan Sanayii Sempozyumu*, Bursa, 17-33.
- Aubrun, S., McNally, J., Alvi, F., Kourta, A., 2011**, Separation flow control on a generic ground vehicle using steady microjet arrays, *Exp Fluids* 51:1177–1187
- Bayraktar, İ., 2002**, External Aerodynamics of Heavy Ground Vehicles, *Computations and Wind Tunnel Testing, Ph.D Thesis*.
- Beaudoin, J-F., Aider, J-L., 2008**, Drag and lift reduction of a 3D bluff body using flaps, *Exp Fluids* 44:491–501
- Beigmoradi, S., Ramezani, A., 2012**, Drag Optimization on Rear Box of a Simplified Car Model by Robust Parameter Design, *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, Vol.2, Issue.3, May-June 2012 pp-1253-1259, ISSN: 2249-6645
- Borg, A., Perzon, S., Roditcheva, O., 2003**, On the influence of the near wall formulation of turbulence models for prediction of aerodynamic coefficients for ground vehicles, *SAE Technical Paper Series*, 2003-01-1317, 1-7.
- Buresti, G., 2004**, The influence of aerodynamics on the design of high-performance road vehicles, KTH Stockholm.
- Carr., G.W., 1971/4**, Wind tunnel blockage corrections for road vehicles, *Mot. Ind. Res. Assoc.*, Rep. MIRA.
- Cogotti, A., 2008**, Evolution of performance of an automotive wind tunnel, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 667–700
- Cowdrey, F., 1968**, Two Topics of Interest in Experimental Industrial Aerodynamics - Part 1: Application of Maskell's Theory of Wind-Tunnel Blockage to Some Large Models, Part 2: Design of Velocity Profile Grids. NPL Aero Report 1268, April 1968. *Presented at the Symposium on Wind Effects on Buildings and Structures*, Loughborough University of Technology, Loughborough, UK, April 1988
- Fares, E., 2006**, Unsteady flow simulation of the Ahmed reference body using a lattice Boltzmann approach, *Computers & Fluids* 35 (2006) 940–950.
- Feng, H., 2007**, Low mass vehicle and its aerodynamic study, *Master's Thesis*, California State University, Sacramento
- Flay, R.G.J., 1978**, Structure of a rural atmospheric boundary layer near the ground, *Ph.D. Thesis*, Department of Mechanical Engineering, University of Canterbury, New Zealand.
- Fourrie, G., Keirsbulck, L., Labraga, L., Gillie, P., 2010**, Bluff-body drag reduction using a deflector, *Exp Fluids* (2010), DOI 10.1007/s00348-010-0937-6.

- Frohlich, J., Terzi, D., 2008**, Hybrid LES/RANS methods for the simulation of turbulent flows, *Progress in Aerospace Sciences* 44 (2008) ,349– 377
- Geropp, D., Odenthal, H-J., 2000**, Drag reduction of motor vehicles by active control using the Coanda effect, *Experiments in Fluids*, 28, 74-85
- Gillespie, T., 1992**, Fundamentals of vehicle Dynamics, *SAE*.
- Gilliéron, P., Leroy, A., Aubrun, S., Audier, P., 2010**, Influence of the Slant Angle of 3D Bluff Bodies on Longitudinal Vortex Formation, *Journal of Fluids Engineering* , Vol. 132 / 051104-1.
- Gilliéron, P., Kourta, A., 2010**, Aerodynamic drag reduction by vertical splitter plates, *Exp Fluids* 48:1–16
- Good, G.M., Garry, K.P., 2004**, On the use of Reference Models in Automotive Aerodynamics, *SAE Technical Paper Series*.
- Han, T., 1989**, Computational analysis of three-dimensional turbulent flow around a bluff body in ground proximity, *AIAA J.*, 27 (9): 1213-1219.
- Heft, I.A., Indinger, T., Adams, A.N., 2012**, Introduction of a New Realistic Generic Car Model for Aerodynamic Investigations, *SAE International*, doi:10.4271/2012-01-0168.
- Helgason, E., Hafsteinsson, H.E., 2009**, Automatic Shape Optimization of Aerodynamic Properties of Cars, *Master's Thesis in Solid and Fluid Mechanics*, Chalmers University of Technology, Department of Applied Mechanics.
- Holman, 1971**, experimental methods for engineers, *McGraw-Hill Book company*, 37-52.
- Hu, X., Fu, L., He, B., Li, S., Zhang, Y., Wu, Y., 2007**, Numerical Simulation of Three Dimensional Transient Aerodynamic Characteristics of Two Crossing Vehicles, *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 8:223–231.
- Hu, X. Zhang, R., Ye, J., Yan, X., Zhao, Z., 2011**, Influence of Different Diffuser Angle on Sedan's Aerodynamic Characteristics, 2011 International Conference on Physics Science and Technology (ICPST 2011), *Physics Procedia* 22 (2011) 239–245.
- Hugho, W-H., 1998**, Aerodynamics of Road Vehicles, Society of Automotive Engineers Inc; 4 edition, ISBN-10: 0768000297.
- <http://www.opencfd.co.uk>.
- İnce, İ.T, 2007**, Gtd Model İdari Hizmet Pikap Aracının Aerodinamik Analizi, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi.
- İslam, M., Decker, F., Villiers, E., Jackson, A., Gines, J., Grahs, T., Gitt–Gehrke, A., Font, J.C., 2009**, Application of Detached–Eddy Simulation for Automotive Aerodynamics Development, *SAE* 2009-01-0333.
- Jorgensen ,F.E.**, How to measure turbulence with hot-wire anemometers, A practical guide dantec dynamic, *Technical note*.
- Jindal, S., Khalighi, B., Iaccarino, G., 2005**, Numerical Investigation of Road Vehicle Aerodynamics Using Immersed Boundary RANS Approach, *SAE International*, 05B-419
- Kapadia, S., Roy, S., Wurtzler, K., 2003**, Detached Eddy Simulation Over a Reference Ahmed Car Model, *AIAA*-2003-0857.
- Koike, M., Nagayoshi, T., Hamamoto, N., 2004**, Research on Aerodynamic Drag Reduction by Vortex Generators, *Mitsubishi Motors Technical Review* No. 16

- Kohut, P., Sulitka, M., Randa, Z., 2005**, Determination of blockage correction in open-jet wind tunnel, *16th International Symposium on Transport Phenomena*, ISTP-16, 2005, PRAGUE.
- Laight, M., 2012**, Race car aerodynamics, Part 1, Renault F1 Team.
- Lauder, B.E., Spalding, D.B., 1974**, The numerical computation of turbulent flows, *Comp Meth Appl Mech Eng*, 3:269-289.
- Levin, J., Rigdal, R., 2011**, Aerodynamic analysis of drag reduction devices on the underbody for SAAB 9-3 by using CFD, *Master's Thesis*, ISSN: 1652-8557
- Maciejewski, M., Osmólski, W., 2002**, Numerical simulation of the blockage effect in wind-tunnels, *Proceedings 14th European Simulation Symposium*.
- Maskell, E.C., 1965**, A Theory of the Blockage Effects on Bluff Bodies and Stalled Wings in a Closed Wind Tunnel, ARC R&M No. 3400, HMSO, London.
- Mezarcioz, S., 2006**, Aerodynamics of a Model Bus, *M.Sc. Thesis*, Cukurova University.
- Mitra, D., 2010**, Design Optimization of Ground Clearance of Domestic Cars, *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2 (7), 2678-2680.
- Moffat, R.J., 1988**, Describing the uncertainty in experimental results, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 1, pp. 3-17.
- Olander, M., 2011**, CFD Simulation of the Volvo Cars Slotted Walls Wind Tunnel, *Master's Thesis in Solid and Fluid Mechanics*, Chalmers University of Technology, Department of Applied Mechanics, 2011:33
- Örselli, E., 2006**, Computation of Drag Force on Single and Close-Following Vehicles, *Master's Thesis*, Middle East Technical University, Mechanical Engineering Dpt., September 2006
- Peddiraju, P. Papadopoulous, A., Singh, R., 2009**, Cae frame work for aerodynamic design developement of automotive vehicles, *3rd ANSA & μ ETA International Conference*, September 9-11.
- Peric, C., Watkins, S., Lindqvist, E., 1997**, Wind turbulence effects on aerodynamic noise with relevance to road vehicle interior noise, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 69-71 , 423-435.
- Ramnefors, M., Bensiyd, R., Holmberg, E., Perzan, S., 1996**, Accuracy of drag prediction on cars using CFD-effect of grid refinement and turbulence models, *SAE Technical Paper Series* 960681, 865-879.
- Rodi, W., 2006**, DNS and LES of some engineering flows, *Fluid Dynamics Research* 38, 145-173
- Rodi, W. 1991**. Experience with Two-Layer Models Combining the k- ϵ Model with a One-Equation Model , Near the Wall, *29th Aerospace Sciences Meeting*, January 7-10, Reno, NV, AIAA 91-0216.
- SAE J2084, 1993**, Aerodynamic Testing of Road Vehicles – Testing Methods and Procedures, *Surface Vehicle Information Report*, SAE International.
- Sahini, D., 2004**, Wind tunnel blockage corrections : a computational study, *Master's Thesis in Mechanical Engineering*, Texas Tech University.
- Shabbir, A., Shih, T.H., Liou, W.W., Zhu, J., 1995**, A new k- ϵ eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows, *Computers Fluids*, 24(3):227-238.
- Stafford, L.G., Kramer, C., Gerhardt, H.J., 1974**, *Proc. Colloquium on Industrial Aerodynamics*, Fachhochschule Aachen, pp. 109-118.
- Stapleford, W.R., 1981**, Aerodynamic improvements to the body and cooling system of a typical small saloon car, *J of Wind Eng. and Ind. Aerodyn.* 9, 63-75.

STAR-CCM+ Manual, Version 6.06.011.

Strachan, R.K., Knowles, K., Lawson, N.J., 2007, The vortex structure behind an Ahmed reference model in the presence of a moving ground plane, *Exp Fluids* 42:659–669.

Sykes, D.M., in H.S. Stephens (Ed.), 1973, Advances in Road Vehicle Aerodynamics, Br. Hydrodyn. Res. Assoc., *Fluid Eng.*, pp. 311-321.

Tan, J., Chen, Z., Hu, Y., Parameswaran, S., Rahman, S., Gleason, M., Sun, R., 2010, Effects of cross wind on sport utility vehicles (SUV): A computational study, *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)* Chapel Hill, North Carolina, USA May 23-27.

Templin J.T., Raimondo S., 1986, Experimental Evaluation of Test Section Boundary Interference Effects in Road Vehicle Tests in Wind Tunnels, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 22, 129-148.

Tsubokura, M., Nakashima, T., Kitayama, M., Ikawa, Y., Doh, D.H., Kobayashi, T., 2010, Large eddy simulation on the unsteady aerodynamic response of a road vehicle in transient crosswinds, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 31, 1075–1086.

Watkins, S., 1990, Wind-tunnel modelling of vehicle aerodynamics: with emphasis on turbulent wind effects on commercial vehicle drag, *Ph.D. Thesis*, Mechanical Engineering, Royal Melbourne Institute of Technology, Victoria.

Watkins, S., Vino, G., 2008, The effect of vehicle spacing on the aerodynamics of a representative car shape, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96 1232–1239.

Youngling, S., Guangqiang, W., Xieshuo, 2000, Numerical Simulation of the External Flow Field Around a Bluff Car, Shanghai Tongji University Automotive Engineering Department.

Zabat, M., Stabile, N., Frascaroli, S., Browand, F., 1995, Drag Forces Experienced by 2, 3 & 4-Vehicle Platoons at Close Spacings, *SAE Paper* No. 940421.

7. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Armağan ALTINIŞIK

Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa 1967

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Bursa Süleyman Çelebi Lisesi

Lisans : İTÜ Uçak Mühendisliği

Y.Lisans : ODTÜ Makine Mühendisliği

Çalıştığı Kurum ve Yıl : TOFAS A.Ş. 01.12.1992 - Devam Ediyor

İletişim : armağan.altinisik@tofas.com.tr