

TEK VE ARDIŞIK KONUMLANMIŞ MODEL  
KARA TAŞITI ETRAFINDAKİ AKIŞ YAPISININ  
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK  
İNCELENMESİ

ATA AĞIR

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
2011

CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEK VE ARDIŞIK KONUMLANMIŞ MODEL KARA TAŞITI  
ETRAFINDAKİ AKIŞ YAPISININ DENEYSEL VE  
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

ATA AĞIR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI  
Prof. Dr. ALİ PINARBAŞI

SİVAS  
2011

Bu çalışma Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanmış ve jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan Prof. Dr. Emine ÖZTÜRK

Üye Prof. Dr. Ertan BUYRUK

Üye (Danışman) Prof. Dr. Ali PINARBAŞI

ONAY

Bu tez çalışması, 14 / 04 / 2011 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulu tarafından belirlenen ve yukarıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mustafa DEĞİRMENCI  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 24.09.2008 tarihli ve 009 sayılı toplantısında kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu adlı yönergeye göre hazırlanmıştır.

Çalışma sırasında bana destek olan aileme ve arkadaşlarıma ...

## ÖZET

### TEK VE ARDIŞIK KONUMLANMIŞ MODEL KARA TAŞITI ETRAFINDAKİ AKIŞ YAPISININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Ata AĞIR

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali PINARBAŞI

2011, 111 sayfa

Bu çalışmada artan araç nüfusunda araçlar ardışık olarak uzun mesafeler kat etmektedirler. Bu nedenle etrafındaki akış yapısı gerçek araçlara benzeyen model kara taşıtları etrafındaki akış yapısı iki bölümde incelenmektedir.

Birinci bölümde bir model kara taşıtı (Ahmed cismi) etrafındaki akış yapısı tek ve ardışık olarak beş farklı pozisyonda ( $x/L=2, 1.5, 1, 0.5, 0.3$ ) Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme Yöntemi (PIV) kullanarak deneysel olarak incelenmiştir. Bütün deneyler serbest yüzeyli, kapalı çevrim bir su kanalında, model yüksekliğine ve serbest akım hızına ( $u_0=218$  mm/s) bağlı olarak hesaplanan  $Re_H=1.5 \times 10^4$  Reynolds sayısında gerçekleştirilmiştir. PIV yöntemiyle model boyunca iki farklı ekseninde, çeşitli düzlemlerde zaman-ortalama ve anlık hız vektörleri, akım çizgileri, girdap dağılımları ve çalkantı hızları ile Reynolds gerilmelerinin değişimi elde edilmiştir.

İkinci bölümde ise tek ve ardışık olarak konumlanmış  $Re_H=1.5 \times 10^4$  koşulları için Ahmed cismi etrafındaki akımın hız alanı, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) paket programı olan FLUENT ile sayısal olarak hesaplanmış ve deneysel bulgular ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada; tek model için farklı türbülans modelleri, ardışık olarak konumlanmış modeller için ise, sadece bir türbülans modeli ile elde edilen sayısal hız gradyanları ve sürüklenme katsayısı ( $C_D$ ) değişimi verilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Kara Taşıtı Aerodinamiği, Ahmed Cismi, Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme Yöntemi (PIV), Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), Sürüklenme Katsayısı

## ABSTRACT

### LOCATED IN THE PATTERN OF SINGLE AND SEQUENTIAL STRUCTURE OF THE EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF FLOW AROUND VEHICLES

Ata AĞIR

Master's thesis, Department of Mechanical Engineering

Consultant: Prof. Dr. Ali PINARBAŞI

2011, 111 page

In this study, means increasing vehicle population has been consecutively long distances. Therefore, the structure of flow around a model of motor vehicles around the flow structure similar to the real tools is examined in two parts.

The first section, a model vehicles (Ahmed body) around the flow structure as a single and consecutive five different positions ( $x/L= 2, 1.5, 1, 0.5, 0.3$ ) Particle Image Velocimetry (PIV) were investigated experimentally using. All experiments of free surface, a closed-loop water channel the height of the model and the free flow velocity ( $u_0= 218$  mm/s) depending on the  $Re_H=1.5 \times 10^4$  Reynolds number was calculated. PIV method, the model in two different axes along the various planes, the time-average and instantaneous velocity vectors, streamlines, vortex breakdown and turbulence exchange rates and Reynolds stresses were obtained.

In the second part  $Re_H= 1.5 \times 10^4$  positioned as a single and consecutive to the conditions around the Ahmed body flow velocity field of Computational Fluid Dynamics (CFD) software package FLUENT with the numerically calculated and compared with experimental findings. This comparison, different for single model, located in consecutive numerical models of the velocity gradients obtained with a turbulence model and drag coefficient ( $C_D$ ) variation is given.

**Keywords:** Vehicles Aerodynamics, Ahmed body, Particle Image Velocimetry (PIV), Computational Fluid Dynamics (CFD), Drag coefficient

## TEŞEKKÜR

Danışmanım Prof. Dr. Ali PINARBAŞI'na tez boyunca yaptığı katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren Arş. Gör. Dr. Cahit GÜRLEK ve Arş. Gör. Dr. K. Melih GÜLEREN'e, tezin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Ümit N. TEMEL'e ve sayısal çalışmaları aşamasında yardımcı olan Arş. Gör. Ferhat KILINÇ'a katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca deneysel çalışmalarımız sırasında bize PIV laboratuvarını kullanmamız konusunda her türlü desteklerini esirgemeyen Çukurova Üniversitesi, Makine Mühendisliği bölümü öğretim elemanlarına teşekkürü bir borç biliyorum.

Her konuda sabırla yardımcı olan aileme desteklerinden dolayı teşekkür ederim.



Bu Çalışma Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.

Proje No: **M 397**

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	v
ABSTRACT .....	vi
TEŞEKKÜR .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvi
SİMGELER DİZİNİ .....	xvii
KISALTMALAR DİZİNİ .....	xviii
1 GİRİŞ .....	1
1.1 Önceki Çalışmalar .....	3
1.1.1 Deneysel Çalışmalar .....	3
1.1.2 Sayısal Çalışmalar .....	7
1.1.3 Deneysel ve Sayısal Çalışmalar .....	11
1.2 Çalışma ve Çalışmanın Amacı .....	12
2 TAŞITLARDA AERODİNAMİK .....	14
2.1 Taşıt Aerodinamiğinin Tarihçesi .....	14
2.1.1 Temel Şekiller .....	15
2.1.2 Aerodinamik Şekil Devri .....	16
2.2 Otomobillerdeki Kayıplar .....	23
2.3 Aerodinamik Kuvvetler .....	24
2.3.1 Sürüklenme Kuvveti (drag force)( $F_D$ ) .....	26
2.3.2 Kaldırma Kuvveti (lift force)( $F_L$ ) .....	27
2.3.3 Yanal Kuvvet ( $F_Y$ ) .....	29
2.4 Aerodinamik Momentler .....	29
2.4.1 Yunuslama Momenti (pitching)( $M_P$ ) .....	29
2.4.2 Yuvarlanma Momenti (rolling)( $M_R$ ) .....	30
2.4.3 Yana Kayış Momenti (yaw)( $M_Y$ ) .....	30
2.5 Aerodinamik Dirence Etki Eden Faktörler .....	30
2.5.1 Sürüklenme Katsayısını Azaltmak için Yapılan Çalışmalar .....	31
2.5.2 Taşıtın Tasarımında İdeal Aerodinamik Şekil .....	33

3	METERYAL VE METOD .....	37
3.1	Deney Düzenegi ve Yöntem .....	37
3.2	Model Etrafindaki Akimin CFD Modellenmesi .....	47
3.2.1	Temel Denklemler .....	48
3.2.2	Türbülans Modelleri .....	48
3.2.3	Çözüm Bölgesi ve Sınır Şartları .....	49
3.2.4	Sonlu Elemanlar Hesap Ağı .....	50
4	TEK AHMED MODELİ İÇİN BULGULAR VE TARTIŞMA .....	53
4.1	DeneySEL Bulgular .....	53
4.2	Sayısal Bulgular ve DeneySEL Sonuçlarla Karşılaştırılması .....	68
5	ARDIŞIK KONUMLANMIŞ AHMED MODELİ İÇİN BULGULAR VE TARTIŞMA .....	74
5.1	DeneySEL Bulgular .....	74
5.2	Sayısal Bulgular ve DeneySEL Sonuçlarla Karşılaştırılması .....	94
5.3	Sürüklenme Katsayısının ( $C_D$ ) Tek ve Ardışık Konumlara Göre Değişimi .....	103
6	SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....	105
	KAYNAKLAR .....	109
	ÖZGEÇMİŞ .....	111

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Ahmed Cismi.....	2
Şekil 2.1 Otomobil aerodinamiğinin tarihsel gelişimi.....	15
Şekil 2.2 Camille Jenatzy, tarafından 1899 yılında yapılan rekor kıran araba, maksimum hız: 105,9 km/h .....	15
Şekil 2.3 Count Ricotti'nin damla modelinde Alfa – Romeo'su (1914).....	16
Şekil 2.4 Boat – Tailed “Audi Alpensieger” (1913).....	16
Şekil 2.5 Hareket halindeki arabanın arkasındaki toz akımının Rumpler arabasıyla karşılaştırılması .....	17
Şekil 2.6 Rüzgar tüneline Rumplerin “teardrop” arabası (1922).....	17
Şekil 2.7 Grand Prix yarış arabası E. Bugatti, (1923) .....	18
Şekil 2.8 “Half Body” modeline göre aerodinamik direnç katsayısının değişimi .....	19
Şekil 2.9 Jaray ve Kamm kombinasyonları modelleri ve hava direnç katsayıları .....	19
Şekil 2.10 Jaray arabasında aerodinamik direnç katsayısının taşıt izdüşümü alanı ile incelediği modeller .....	20
Şekil 2.11 Otomobilin ön ve arka formlarının direnç kuvveti katsayısına etkisi .....	20
Şekil 2.12 1930'lu yıllarda Amerika Birleşik Devletlerinde otomobil aerodinamiğinin durumu .....	21
Şekil 2.13 1950'den 1977 yılına Porsche otomobilleri.....	21
Şekil 2.14 1955'ten 1982'ye Citroen otomobilleri .....	22
Şekil 2.15 Avrupa'da seri üretilen Ford otomobillerinin direnç kuvveti katsayıları .....	22
Şekil 2.16 Otomobil üzerinde oluşan aerodinamik kuvvet, momentler ile basınç, ağırlık merkezlerinin şematik gösterimi .....	25
Şekil 2.17 Taşıtın kesit referans alanı .....	27
Şekil 2.18 (a) Ferrari F1 prototoip, (b) Ferrari F1 1/14 model araç .....	31
Şekil 2.19 1936 yapımı Mercedes W125 .....	32
Şekil 2.20 (a)Fast – Back otomobil (b) Normal binek otomobil .....	34
Şekil 2.21 Taşıtın lastik boşluklarında meydana gelen hava akımı ayrılmasının şekli .....	35
Şekil 3.1 Deney kanalının görünümü .....	37
Şekil 3.2 Deney kanalının şematik gösterimi .....	38
Şekil 3.3 Tek Ahmed modeli için deney düzeneğinin şematik görünümü .....	39
Şekil 3.4 Ardışık Ahmed modeli için deney düzeneğinin şematik görünümü .....	40

Şekil 3.5 Ahmed modeli için deney düzeneğinin görünümü .....	40
Şekil 3.6 Orijinal Ahmed modelinin teknik resmi .....	41
Şekil 3.7 Test alanının şematik görünümü .....	42
Şekil 3.8 Test alanının görünümü .....	44
Şekil 3.9 PIV deney düzeneğinin şematik görünümü .....	44
Şekil 3.10 Lazer kaynağı.....	45
Şekil 3.11 Ahmed Modelinin anlık akım alanı .....	46
Şekil 3.12 Ahmed Modelinin anlık kamera ve kros – kolerasyon işleminden sonraki ham vektör alanı ve işlenmiş vektör alanı .....	46
Şekil 3.13 Sayısal hesaplama bölgesi ve sınır şartları .....	50
Şekil 3.14 Tek Ahmed modeli etrafındaki sonlu elemanlar ağı .....	51
Şekil 3.15 Ardışık olarak hareket eden 2 farklı Ahmed modeli etrafındaki sonlu elemanlar hesap ağı .....	52
Şekil 4.1 Ahmed modelinin olduğu noktada, Ahmed modeli olmadan elde edilen hız dağılımı .....	54
Şekil 4.2 Ahmed modelinin düşey eksenindeki lazer düzlemleri .....	55
Şekil 4.3 $z/H=0$ kesitinde Ahmed modeli etrafındaki deneysel hız profilleri .....	56
Şekil 4.4 $z/H=0$ düzleminde Ahmed modeli etrafındaki akış yapısının iki boyutlu; zaman ortalamalı hız vektörleri $\langle v \rangle$ , akım çizgileri $\langle \psi \rangle$ ve eş girdap eğrileri $\langle \omega \rangle$ , dağılımı .....	57
Şekil 4.5 $z/H=0.34$ düzleminde Ahmed modeli etrafındaki akış yapısının iki boyutlu; zaman ortalamalı hız vektörleri $\langle v \rangle$ , akım çizgileri $\langle \psi \rangle$ ve eş girdap eğrileri $\langle \omega \rangle$ , dağılımı .....	58
Şekil 4.6 Ahmed modelinin arka yüzeyine paralel eksenindeki lazer düzlemleri .....	59
Şekil 4.7 Model arka yüzeyine paralel düzlemlerde Ahmed modeli etrafındaki akış yapısının iki boyutlu; zaman ortalamalı hız vektörleri $\langle v \rangle$ , akım çizgileri $\langle \psi \rangle$ ve eş girdap eğrileri $\langle \omega \rangle$ , dağılımı .....	60
Şekil 4.8 Model arka yüzeyine paralel düzlemlerde Ahmed modeli etrafındaki akış yapısının iki boyutlu; zaman ortalamalı hız vektörleri $\langle v \rangle$ ve eş girdap eğrileri $\langle \omega \rangle$ dağılımı .....	61
Şekil 4.9 Model arka yüzeyine paralel düzlemlerde Ahmed modeli etrafındaki akış yapısının iki boyutlu; zaman ortalamalı hız vektörleri $\langle v \rangle$ , akım çizgileri $\langle \psi \rangle$ ve eş girdap eğrileri $\langle \omega \rangle$ , dağılımı .....	62

Şekil 4.10 Ahmed modeli düşey simetri eksenindeki akış yapısının iki boyutlu; anlık hız vektörleri $v$ , anlık akım çizgileri $\psi$ ve anlık girdap $\omega$ eş düzey eğrileri dağılımı .....	65
Şekil 4.11 Ahmed modeli arka yüzeyine paralel eksenindeki akış yapısının iki boyutlu; anlık hız vektörleri $v$ , anlık akım çizgileri $\psi$ ve anlık girdap $\omega$ eş düzey eğrileri dağılımı .....	65
Şekil 4.12 Düşey simetri eksenini $z/H=0$ 'da akış yönündeki hız çalkantıları $\langle u_{rms} \rangle / U$ , akışa dik yöndeki hız çalkantıları $\langle v_{rms} \rangle / U$ ve Reynolds gerilmesi $\langle u'v' \rangle / U^2$ dağılımı .....	67
Şekil 4.13 $z/H=0$ düzleminde Ahmed modeli etrafındaki akış yapısının $k-\epsilon$ ve $k-\omega$ türbülans modellerine göre iki boyutlu; zaman ortalamalı akım çizgileri $\langle \psi \rangle$ dağılımı .....	69
Şekil 4.14 $z/H=0.34$ düzleminde Ahmed modeli etrafındaki akış yapısının $k-\epsilon$ ve $k-\omega$ türbülans modellerine göre iki boyutlu; zaman ortalamalı akım çizgileri $\langle \psi \rangle$ dağılımı .....	70
Şekil 4.15 Farklı türbülans modelleri ve PIV yöntemi ile elde edilen model etrafındaki akış yapısının hız dağılımlarının değişimi .....	73
Şekil 5.1 Ardışık Ahmed modellerinin deney konumları .....	74
Şekil 5.2 Düşey simetri eksenini $z/H=0$ 'da modeller arasındaki zaman ortalama hız vektörleri $\langle v \rangle$ , akım çizgileri $\langle \psi \rangle$ ve eş girdap eğrileri $\langle \omega \rangle$ dağılımı .....	77
Şekil 5.3 Düşey simetri eksenini $z/H=0.34$ düzleminde modeller arasındaki zaman ortalama hız vektörleri $\langle v \rangle$ , akım çizgileri $\langle \psi \rangle$ ve eş girdap eğrileri $\langle \omega \rangle$ dağılımı .....	80
Şekil 5.4 Modeller arasındaki mesafenin $x=2 L$ olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki Model 1'in etrafındaki akış yapısının iki boyutlu; anlık hız vektörleri $v$ , akım çizgileri $\psi$ ve eş girdap eğrileri $\omega$ dağılımı .....	84
Şekil 5.5 Modeller arasındaki mesafenin $x=1.5 L$ olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki Model 1'in etrafındaki akış yapısının iki boyutlu; anlık hız vektörleri $v$ , akım çizgileri $\psi$ ve eş girdap eğrileri $\omega$ dağılımı .....	85
Şekil 5.6 Modeller arasındaki mesafenin $x=L$ olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki Model 1'in etrafındaki akış yapısının iki boyutlu; anlık hız vektörleri $v$ , akım çizgileri $\psi$ ve eş girdap eğrileri $\omega$ dağılımı .....	86

Şekil 5.7 Modeller arasındaki mesafenin $x=0.5 L$ olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki Model 1'in etrafındaki akış yapısının iki boyutlu; anlık hız vektörleri $v$ , akım çizgileri $\psi$ ve eş girdap eğrileri $\omega$ dağılımı .....	87
Şekil 5.8 Modeller arasındaki mesafenin $x=0.3 L$ olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki Model 1'in etrafındaki akış yapısının iki boyutlu; anlık hız vektörleri $v$ , akım çizgileri $\psi$ ve eş girdap eğrileri $\omega$ dağılımı .....	88
Şekil 5.9 Farklı mesafelerdeki ardışık Ahmed modelleri için düşey simetri eksen $z/H=0$ 'da akış yönündeki hız çalkantı şiddetleri $\langle u_{rms} \rangle/U$ , dağılımı .....	91
Şekil 5.10 Farklı mesafelerdeki ardışık Ahmed modelleri için düşey simetri eksen $z/H=0$ 'da akışa dik yöndeki hız çalkantı şiddetleri $\langle v_{rms} \rangle/U$ dağılımı .....	92
Şekil 5.11 Farklı mesafelerdeki ardışık Ahmed modelleri için düşey simetri eksen $z/H=0$ 'da Reynolds gerilmesi $\langle u'v' \rangle/U_{\infty}^2$ , dağılımı .....	93
Şekil 5.12 Düşey eksen $z/H=0$ düzleminde modeller arasındaki mesafenin değişme durumunda $k-\omega$ türbülans modeline göre iki boyutlu; zaman ortalamalı akım çizgileri $\langle \Psi \rangle$ dağılımı .....	95
Şekil 5.13 Düşey eksen $z/H=0.34$ düzleminde modeller arasındaki mesafenin değişme durumunda $k-\omega$ türbülans modeline göre iki boyutlu; zaman ortalamalı akım çizgileri $\langle \Psi \rangle$ dağılımı .....	96
Şekil 5.14 Modeller arasındaki mesafenin $x=2L$ olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki Model 1'in etrafındaki deneysel ve sayısal olarak elde edilen model etrafındaki akış yapısının hız dağılımlarının değişimi .....	100
Şekil 5.15 Modeller arasındaki mesafenin $x=1.5L$ olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki Model 1'in etrafındaki deneysel ve sayısal olarak elde edilen model etrafındaki akış yapısının hız dağılımlarının değişimi .....	101
Şekil 5.16 Modeller arasındaki mesafenin $x=L$ olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki Model 1'in etrafındaki deneysel ve sayısal olarak elde edilen model etrafındaki akış yapısının hız dağılımlarının değişimi .....	101

Şekil 5.17 Modeller arasındaki mesafenin $x=0.5L$ olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki Model 1'in etrafındaki deneysel ve sayısal olarak elde edilen model etrafındaki akış yapısının hız dağılımlarının değişimi .....	102
Şekil 5.18 Modeller arasındaki mesafenin $x=0.3L$ olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki Model 1'in etrafındaki deneysel ve sayısal olarak elde edilen model etrafındaki akış yapısının hız dağılımlarının değişimi .....	102
Şekil 5.19 Tek ve ardışık konumlanmış araçların $C_D$ sürüklenme katsayısı .....	104



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Benzin motorlu 1200 kg'lık bir otomobilde 90 km/h hızda yakıt enerjisinin % (yüzde) olarak kullanımı .....	24
Çizelge 4.1 Deneysel ve teorik bulgular tablosu .....	71
Çizelge 5.1 Düşey eksendeki $z/H=0$ düzlemi için teorik ve deneysel bulgular tablosu .....	97
Çizelge 5.2 Düşey eksendeki $z/H=0$ düzlemi için teorik ve deneysel bulgular tablosu .....	98

## SİMGELER DİZİNİ

A	İzdüşüm alanı, m <sup>2</sup>
C <sub>D</sub>	Sürüklenme katsayısı
C <sub>L</sub>	Lift katsayısı
C <sub>Mp</sub>	Yunuslama momenti katsayısı
C <sub>M<sub>R</sub></sub>	Yuvarlanma momenti katsayısı
C <sub>M<sub>Y</sub></sub>	Yana kayış momenti katsayısı
C <sub>Y</sub>	Yanal kuvvet katsayısı
C <sub>η</sub>	Türbülans sabiti
dA <sub>y</sub>	Akışa dik doğrultudaki alan, m <sup>2</sup>
F	Bileşke (yayıllı) kuvvet, N
F <sub>D</sub>	Sürüklenme kuvvet, N
F <sub>L</sub>	Lift kuvveti, N
F <sub>Y</sub>	Yanal kuvvet, N
g	Yer çekim ivmesi, m/s <sup>2</sup>
H	Ahmed cismi yüksekliği, mm
L	Ahmed cismi uzunluğu, mm
M <sub>p</sub>	Yunuslama momenti, N.m
M <sub>R</sub>	Yuvarlanma momenti, N.m
M <sub>Y</sub>	Yana kayış momenti, N.m
P	Atmosferik basınç, Pa
p	Ortam basıncı, Pa
p <sub>∞</sub>	İşletme (atmosfer) basıncı, Pa
q	Dinamik basınç, Pa
Re <sub>H</sub>	Yükseklik ve serbest akım hızına bağlı Reynolds sayısı
u <sub>0</sub>	Serbest akım hızı, mm/s
<u <sub>rms</sub> >/U	Akış yönündeki hız çalkantıları
<u' v' >/U <sup>2</sup>	Reynolds gerilmesi dağılımı
V	Hız, m/s
<v>	Zaman ortalamalı hız vektörleri, mm/s
v	Anlık hız vektörleri, mm/s
<v <sub>rms</sub> >/U	Akış yönüne dik yöndeki hız çalkantıları
x	x eksenindeki uzaklık birimi, mm
y	y eksenindeki uzaklık birimi, mm
z	z eksenindeki uzaklık birimi, mm
W	Ahmed cismi genişliği, mm
ρ	Yoğunluk, kg/m <sup>3</sup>
τ	Kayma momenti, kg.m
η	Türbülans viskozitesi, kg/m.s
δ	Sınır tabak kalınlığı, mm
<ψ>	Zaman ortalamalı akım çizgileri
<ω>	Zaman ortalamalı eş girdap eğrileri, s <sup>-1</sup>
ψ	Anlık akım çizgileri
ω	Anlık eş girdap eğrileri, s <sup>-1</sup>

## KISALTMALAR DİZİNİ

CFD	Computational Fluid Dynamics
CÜ	Cumhuriyet Üniversitesi
ÇÜ	Çukurova Üniversitesi
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
PIV	Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm Yöntemi
SVV	Spectral Vanishing Viscosity

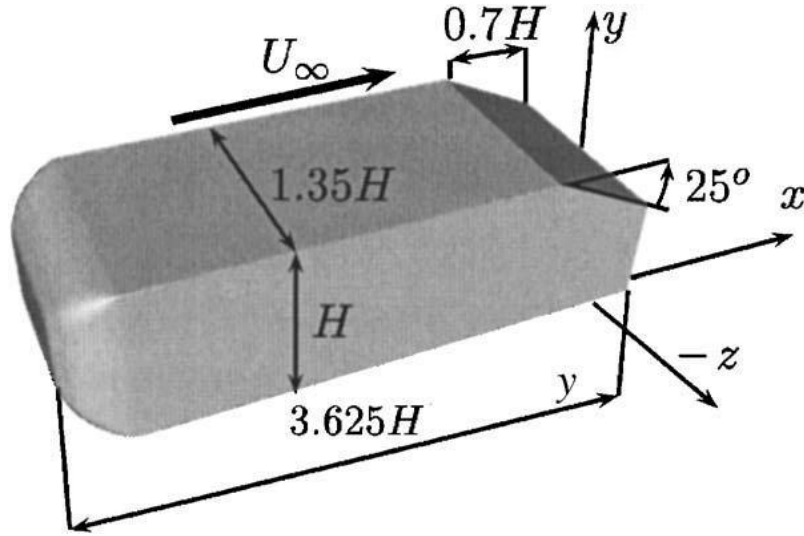
## 1. GİRİŞ

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

Türkiye petrol sarfiyatının büyük bir kısmını karasal taşıtlarla (otomobil, kamyon, otobüs vb.) harcamaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre 29.11.2010 tarihi itibari ile trafikteki motorlu araç sayısı 15.023.323'e ulaşmıştır. 2011 yılının Ocak ayında trafiğe kaydı yapılan toplam 80.561 araç içinde otomobil %43.4'lük pay ile ilk sırada yer almaktadır. Otomobili %28.7 ile kamyonet, %13.1 ile motosiklet, %6.1 ile kamyon izlemektedir. Geriye kalan %8.7'sini ise minibüs, otobüs, traktör ve özel amaçlı taşıtlar oluşturmaktadır. Doğal olarak araç sayısının artması ile orantılı ülkede yakıt sarfiyatı artmaktadır. Bu sarfiyatı azaltmak için üretici firmalar, araçlarının insan ayağını yerden kesmek yanında yüksek sürat, yüksek taşıma kapasitesi ve yakıttan tasarruf gibi üstün performans özelliklerine sahip olması gerektiğini fark ettiklerinden bu yana, bir yandan motor tarafından sağlanan gücü artırma, diğer yandan da hava direncinden kaynaklanan kayıpları azaltma yolları araştırmışlardır. Çünkü Saatteki hızı 100 km olan bir otomobil gücünün %60'ını hava ile sürtünmeden kaynaklanan sürüklenme direnci kuvvetini ( aerodinamik etki ) yenmek için harcar (Çakmak,2000). İlk binek otoların telefon kulübesinden farkı yokken günümüzdeki otomobil üreticileri araçların daha iyi aerodinamik özelliklere sahip olması amacıyla AR-GE çalışmalarına büyük önem vermektedirler.

Ülkedeki araç sayısının artmasıyla birlikte araçlar özellikle büyük şehirlerde konvoylar halinde uzun mesafeler kat etmekte ve bu konvoylar gün geçtikçe daha da artmaktadır. Bunun sonucunda da konvoyların sarf ettikleri yakıt miktarı merak konusu olmaktadır. Bu çalışmanın bir kısmında araçların ardışık hareketinin yakıt sarfiyatı üzerine etkisi incelenmiştir.

Kara taşıtlarının aerodinamiği ile ilgili yapılan deneysel ve sayısal çalışmaların çoğunluğunda, gerçek araçların etrafındaki akış yapısına benzer özellikler oluşturabilecek şekilde basitleştirilmiş model araçlar kullanılmıştır [2 – 6]. Çalışmalarda en çok kullanılan basitleştirilmiş araç modeli, Ahmed Cismi olarak adlandırılan modeldir (Şekil 1.1).



**Şekil 1.1** Ahmed cismi

## 1.1 Önceki Çalışmalar

### 1.1.1 Deneysel Çalışmalar

Lienhart H. ve arkadaşları son yıllarda kullanılan türbülans modellerinin taşıt aerodinamiği konusunda doğruluğunun araştırılmasına temel olacak deneyler yapmışlardır[7]. Kritik arka yüzey eğim açısı olan  $30^0$  içine alması nedeniyle iki farklı eğim açısı  $25^0$  ve  $35^0$  için Ahmed modeli üzerinde kapsamlı deneyler yapmışlardır. Ortalama ve salınım hız ölçümlerini, iki bileşenli Laser Doppler Anemometre kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışma iki eğim açısı için akış yapısındaki farklılıkları ortaya koymuştur.

Okada M. ve arkadaşları parçacık izlemeli hız ölçüm yöntemi kullanarak  $25^0$  arka eğim açılı Ahmed modelinin arkasındaki zaman ortalamalı wake yapısına, modelin genişlik – yükseklik oranının değişiminin etkilerini incelemişlerdir [8]. Orijinal Ahmed modelinin genişliği ” W “ olmak üzere genişlikleri sırasıyla  $0.75W$ ,  $W$ ,  $1.25W$  olan üç farklı model için model uzunluğuna ve serbest akım hızına göre hesaplanan Re sayısının  $7.42 \times 10^4$  durumunda ölçümler gerçekleştirilmiştir. Taşıt arkasındaki enlemesine kesitlerdeki çift vortekslerin dar ve orijinal genişlik için belirgin olmasına karşılık en geniş durumda vorteks kesitinin belirgin bir şekilde azaldığını görmüşlerdir. Ayrıca dar olma durumu için vortekslerin orijinal genişliğe göre aşağı kaydığını söylemişlerdir. Simetri ekseninde eğimli yüzey üzerindeki akışın dar ve orijinal genişlik durumunda yüzeye çoğunlukla bağlı kaldığını buna karşılık geniş olma durumunda tamamen ayrıldığını gözlemlenmişlerdir. Kritik bir genişlik – yükseklik oranının üzerinde akış yapısının tamamen değiştiği sonucuna varmışlardır. Taşıt tasarımları açısından arka eğim açısı ile birlikte genişlik – yükseklik oranının önemli bir geometrik parametre olduğunu bildirmişlerdir.

Watkins, F.,Düşük hızlı su kanalında  $25^0$  arka eğim açılı Ahmed modeli üzerindeki ön ve arka bölgelerdeki akış ayrılmalarını ve model arkasındaki yakın wake bölgesini görselleştirmişlerdir. Ölçümler Ahmed modelinin boyuna göre hesaplanan Re sayısının  $3 \times 10^9$  ve  $9 \times 10^9$  (  $0.1$  m/s ve  $0.3$  m/s ) olması durumları için gerçekleştirilmiştir[9]. Görselleştirmeler wake bölgesindeki vorteks yapılarının akış

ayrılmaları sonucu nasıl oluştuğunu ortaya koymuşlardır. Ön bölgelerdeki ayrılmalar periyodik vorteks dökülmeleri şeklinde olduğunu, Re sayısının artmasıyla boyutlarında azalmalar olduğunu ancak buna rağmen arka bölgedeki vortekslerle etkileşimlere girerek önemli etkiler gösterebildiğini söylemişlerdir. Model arkasındaki ayrılma bölgesinin daha önce Ahmed ve arkadaşları tarafından ortaya konulan yapıdan daha karmaşık olduğunu bildirmişlerdir. Bazı sayısal çalışmalarda bildirilen, ilave tekrar birleşme bölgelerinin var olduğunu doğrulamışlardır.

Watkins F. ve arkadaşları, aracın ön cam ve yan kenarları yakınlarında oluşan akış ayrılmalarının yan cam üzerinde meydana getirdiği basınç dalgalanmalarının ve ortalama basınç değerlerini incelemiştir [10]. Bu basınç dalgalanmalarının hız, aracın ön cam geometrisi ve yanal rüzgar (yaw açısı) ile değişimini araştırmak üzere beş farklı model için kapalı devre rüzgar tüneline hızın 60 km/h – 120 km/h aralığında ölçümler gerçekleştirmişlerdir. Yüzey basınç katsayılarının (ortalama ve dalgalanan) pozitif yaw açısı için  $6.4 \times 10^5 - 1.5 \times 10^6$  aralığında Re sayısından bağımsız olduğunu buna karşılık yaw açısının negatif ve sıfır olması durumunda Re sayısına hafif bağımlı olduğunu göstermişlerdir. Maksimum hidrodinamik basınç dalgalanmasının ayrılma ve yeniden birleşme bölgeleri arasında gerçekleştiğini söylemişlerdir. Pozitif yaw açısının akış ayrılmasının alan ve büyüklüğünü azalttığını buna karşılık negatif yaw açısının bunları arttırdığını bildirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri frekans esaslı spektrum analiz sonucunda basınç dalgalanmalarında en fazla enerjinin 100 – 400 Hz arasında uzandığını belirtmişlerdir.

Noger C. ve arkadaşları, arka eğim açısı  $0^0$  olan iki Ahmed modelinden birisi hareketli yatak üzerine, diğeri ise aerodinamik kuvvet dengeleme birimine sabitlenerek rüzgar tüneline geçiş durumları için dinamik deneyler gerçekleştirmişlerdir [11]. Geçen ve geçilen taşıtlar üzerine etkiyen aerodinamik kuvvetler ve momentlerin boylamasına mesafe, taşıtlar arası aralık, taşıtlar arası bağıl hız ve yanal rüzgar gibi parametrelerle değişimi Re sayısının  $2 \times 10^6$  olması durumu için belirlenmiştir. Geçilen taşıt açısından çok yüksek bağıl hız değerlerinde küçük farklılıklar olmasına rağmen, aerodinamik kuvvetlerin hızından bağımsız olduğunu söylemişlerdir. Geçen taşıt açısından yüksek bağıl hız değerlerinde kararsız aerodinamik etkilerin oluştuğunu ve sanki – statik testlere göre aerodinamik katsayıların daha düşük olduğunu göstermişlerdir. Taşıtlar

aralığının azaltılması durumunda taşıtların karşılıklı etkileşimlerinin aerodinamik kuvvetler üzerinde belirgin bir artışa neden olduğunu bildirmişleridir. Bütün aerodinamik kuvvetler için taşıt aralığının logaritması ile değişiminin neredeyse doğrusal olduğunu göstermişleridir. Yan rüzgârın geçen ve geçilen taşıt üzerinde herhangi bir yeni kararsız etkide bulunmadığını bildirmişleridir.

Brunn A. ve Nitsche W., Ahmed modeli arkasındaki akış için aktif ayrılma kontrol metodu kullanarak akış ayrılmasını azaltmayı ve dolayısıyla toplam sürüklenme katsayısını azaltmayı amaçlamışlardır [12].  $35^0$  arka eğim açılı Ahmed modeli için Re sayısının  $1.1 \times 10^5$  olması durumundaki akış yapısını Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm Yöntemi (PIV) ile belirlemişlerdir. Pompa ile oluşturulan periyodik basınç düzensizliği bir yarık boyunca geçirilerek salınımlı bir jet olarak eğimli yüzeye uygulanmıştır. Salınımlı jetin boyutsuz frekansı (Strouhal sayısı St) 0.1 – 0.7 aralığında değiştirilerek sonuçlar elde edilmiştir. Wake bölgesi ayrılma uzunluğunda önemli ölçüde bir azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. St sayısının 0.2 olması durumunda wake bölgesinin büyük ölçüde azaldığını buna karşılık St sayısının artmasıyla wake bölgesinin büyüdüğünü söylemişlerdir. St sayısının 0.2-0.4 aralığında olması durumunda sürüklenme katsayısında %20'ye varan azalma olduğunu ve sürüklenme katsayısındaki en büyük azalmanın St=0.2 durumunda gerçekleştiğini belirlemişlerdir.

Brunn A. ve arkadaşları, deneysel ve sayısal olarak araştırmalarını, aktif kontrol ayrılma yöntemi kullanarak, Ahmed modelinin toplam aerodinamik sürüklenmesini azaltmak amacıyla iki farklı Ahmed modeli için gerçekleştirmişlerdir [13]. İki farklı arka eğim açılı ( $25^0$  ve  $35^0$ ) wake bölgelerinin farklılığını göz önüne alarak farklı kontrol teknikleri uygulamışlardır.  $35^0$  arka eğim açılı model için eğimli yüzey üzerindeki ayrılan akış, periyodik üfleme / emme ile uyarılmıştır.  $25^0$  eğim açılı durumda kararlı yan kenar vortekslerini etkilemek için eğimli yüzey köşelerinden sabit üfleme tekniği uygulamışlardır. Deneyler serbest akım hızı ve model uzunluğuna göre belirlenen Re sayısının  $5 \times 10^5$  olması durumunda gerçekleştirilmiştir.  $35^0$  eğimli yüzey için salınımlı jetin frekansının  $0.1 < St < 0.9$  aralığında uygulanan kontrol tekniği ters akış bölgesinin küçülmesine dolayısıyla sürüklenme katsayısının azalmasına neden olmuştur.  $25^0$  Ahmed modeli durumunda köşelerden oluşan boylamasına vorteksler uygulanan sabit üfleme kontrol tekniği ile zayıflatılmasına rağmen toplam sürüklenme



katsayısındaki azalma fazla olmamıştır. Bunun nedeninin boylamasına vortekslerin zayıflatılmasıyla oluşan pozitif etkinin eğimli yüzey üzerindeki ayrılmaların artmasıyla dengelenmesi olduğunu bildirmişlerdir. Bu nedenle hem kenarlardaki boylamasına vorteksler hemde ayrılma bölgesi için birleşik bir akış kontrolünün gerekliliği sonucuna varmışlardır.

Watkins S. ve Vino G., ard arda hareket eden taşıtlar için, taşıt aralığının sürüklenme ve kaldırma katsayılarına olan etkilerini belirlemeyi amaçlamışlardır [14]. 30° arka eğim açılı iki Ahmed modeli değişik aralıklarla Rüzgar tüneline yerleştirilerek altı bileşenli kuvvet dengeleme sistemi ile ölçümler Reynolds sayısının  $2.3 \times 10^6$  olması durumu için gerçekleştirilmiştir. Farklı aralıklar için akış görselleştirmesi duman yöntemiyle yapılmış, aralık arttıkça akış yapısında belirgin bir fark olduğu gözlemlenmiştir. Model uzunluğuna göre normalize edilen modeller arası farklı aralık mesafelerinin 0 – 4 aralığı için zaman ortalamalı kuvvet katsayıları öndeki taşıt, arkadaki taşıt ve sadece tek taşıt için ölçülmüştür. Aralık mesafesinin 0 ile 1 arasında olması durumunda arkadaki model için sürüklenme katsayısının belirgin bir artış gösterdiğini, buna karşılık artan aralık mesafesiyle sürüklenme katsayısının azaldığını ve tek model için elde edilen değerlerin altında kaldığı gözlemlenmiştir. Öndeki taşıt için sürüklenme katsayısının 0 ile 1 aralığında azaldığını, mesafenin daha da artması durumunda tek model için elde edilen değere yaklaştığı görülmüştür. Kaldırma katsayısı için elde edilen değerlerin gerek öndeki gerekse de arkadaki taşıt için aralık mesafesinin 0 ile 1 aralığında olması durumunda büyük değişim gösterdiğini bildirmişlerdir.

Huang J.F. ard arda sıra halindeki model taşıtların (tekli, ikili, üçlü) üç boyutlu akış yapısını, kapalı devre rüzgar tüneli kullanılarak Parçacık İzlemeli Hız Ölçüm Yöntemi ile 10, 30 ve 50km/h taşıt hızları için ayrıntılı olarak incelemişlerdir [15]. Zıt yönlü dönen boylamasına vortekslerin serbest akım hızına göre daha yavaş bir biçimde aşağı doğru hareket ettiklerini belirlemişlerdir. Ard arda hareket sırasında, taşıt arkası wake bölgesinin önden giden taşıtların neden olduğu akış değişiminden ziyade hemen önündeki taşıttan etkilendiğini söylemişlerdir. Arkadaki taşıttın öndeki taşıttın wake bölgesine önemli etkilerinin bulunduğunu, bununla birlikte önden giden taşıtların wake yapısı üzerindeki ve akış özellikleri (ortalama ve türbülans hızları, vorticity, kayma gerilmesi vb.) üzerindeki etkilerinin ise %10-%20 mertebelerinde olduğunu

bildirmişlerdir. Kesitsel türbülans dağılımının uzak wake bölgesinde bile üniform olmadığını wake bölgesinin merkezinde düşük türbülans iki yanında ise yüksek türbülans oluştuğunu bildirmişlerdir.

### 1.1.2 Sayısal Çalışmalar

Hinterberger C. ve arkadaşları, arka eğimli yüzey açısı  $25^0$  olan Ahmed modeli için iki farklı ağ yapısı (seyrek ağ ve sık ağ) için sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir [16]. Ahmed modeli etrafındaki akışın simülasyonu, LES türbülans modelini kullanılarak elde edilmiştir. Zaman ortalamalı hız profilleri, ortalama karekök salınım hız profilleri, hız vektörleri ve türbülans kinetik enerjileri farklı yüzeyler için ölçmüşlerdir. Ahmed modeli arkasındaki wake bölgesi için akış yapısını görselleştirmişlerdir. Sayısal analizler sonucu elde edilen veriler deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Genel olarak sık ağ yapısı için elde edilen sonuçların, seyrek ağ durumuna göre deneysel verilere daha uyumlu olduğunu, sadece eğimli yüzeyin alt bölümünde deneysel verilerden sapmaların olduğunu belirlemişlerdir.

Kapadia S. ve Roy S.,  $25^0$  ve  $35^0$  arka eğim açılı referans Ahmed taşıt modeli için yapısal olmayan ağ yapısı ve çözücüsü kullanarak Spalart – Allmaras temelli DES analizi gerçekleştirmişlerdir [17]. Sonuçlar, Lienhart ve arkadaşlarının [5] yaptıkları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Toplam sürüklenme katsayısı ile birlikte ön, arka ve eğimli yüzeylerdeki integre edilmiş basınç sürüklenme katsayıları Ahmed ve arkadaşlarının deneysel verileri ile karşılaştırılmıştır.  $25^0$  arka eğimli modeldeki ayrılma ve tekrar birleşmedeki küçük bir farklılığın wake bölgesi için azımsanmayacak bir farka neden olduğunu ortaya koymuşlardır.  $35^0$  arka eğimli yüzey modeli için DES verilerinin deneysel sürüklenme katsayıları ve wake bölgesi tahmininin iyi bir uyum gösterdiğini vurgulamışlardır.

Guilmineau E.,  $25^0$  ve  $35^0$  arka eğim açılı Ahmed modeli etrafındaki akışı birkaç farklı türbülans modeli ile sayısal olarak incelemiştir [18]. Wake bölgesindeki akış yapısının  $30^0$  eğimli arka yüzey durumunda üç boyutlu, bunun altındaki ve üstündeki eğim açılarında iki boyutlu olduğunu bildirmiştir. Elde edilen sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Arka eğim açısının  $35^0$  olması durumundaki iki boyutlu

wake akış yapısı iyi bir uyum sağlamasına karşılık, iki boyuttan üç boyuta geçişi temsil eden  $25^0$  eğim açılı model için bu uyum sağlanamamıştır. Bu model için deneysel veriler eğimli yüzeyin üzerinde ayrılma ve tekrar birleşme olduğunu gösterirken, kullanılan türbülans modellerinde tekrar birleşme görülmediğini bildirmiştir. Sayısal analizler modelin ayaklı ve ayaksız olması durumları için tekrarlanmış ve ayakların göz önüne alınması durumunda sürüklenme katsayısının arttığı bildirilmiştir.

Minguez M. ve arkadaşları,  $25^0$  eğim açısı için LES hesaplamalarını yüksek dereceden spektral metot kullanılarak elde etmişlerdir [19]. LES kabiliyeti SVV (Spectral Vanishing Viscosity) metodu yardımıyla uygulanmıştır. Sıkıştırılmaz Navier Stokes denklemleri SVV terimi ile stabilize edilmiştir. Chebyshev – Fourier metodunu esas alan sayısal çözücü ile hesaplamaları, Reynolds sayısının 768.000 ve 8.322 olması durumu için Gillieron ve Chometon (1999)'un deneysel verilerini göz önüne alarak, akışın bu kontrol parametrelerine olan hassasiyetini kontrol etmek amacıyla yapmışlardır. Genel olarak akış yapısının her iki durum için de birbirine oldukça yakın olduğunu ve Reynolds sayısından bağımsız olduğunu belirlemişlerdir. Bununla birlikte düşük Reynolds sayılı durum için ters akış bölgelerinin daha büyük olduğunu ve taşıt arkasında izleyen ilave vorteksler olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek Reynolds sayılı durum için sayısal sonuçların deneysel sonuçlarla oldukça iyi bir uyum sağladığını, eğimli yüzey üzerinde bazı sapmaların olduğunu söylemişlerdir.

Minguez M. ve arkadaşları,  $25^0$  derece eğim açılı Ahmed modelinin türbülanslı wake bölgesini LES ile hesaplamışlardır. LES kabiliyeti SVV (Spectral Vanishing Viscosity) metodu yardımıyla ve katı cidar düzeltmesi yapılarak uygulanmıştır [20]. Chebyshev – Fourier metodunu esas alan sayısal çözücü ile hesaplamaları, Reynolds sayısının 768.000 olması durumu için hesaplanarak, deneysel verilerle ve sonlu hacimler LES verileriyle karşılaştırılmıştır. Genel olarak hesaplanan akış alanının deneysel ölçümlerle uyum gösterdiğini belirlemişlerdir. Özellikle eğimli yüzey üzerinde tekrar birleşme (reattachment) ve eğimli yüzeyden kopan vortekslerin benzerliğine dikkat çekmişlerdir. Ahmed modeli eğimli yüzey ve arka bölgesindeki değişik konumlardaki ortalama hız profillerini ve türbülans kinetik enerji profillerinin deneysel verilere genel eğilim olarak uyduğunu ancak sapmalar olduğunu bildirmişlerdir. Diğer sayısal yöntemle yapılan karşılaştırma sonucunda eğimli yüzeyin yukarı yarısında SVV

LES verilerinin saptığını buna karşın sonlu hacimler LES metodunun daha iyi sonuç verdiğini söylemişlerdir. Bunun tersi olarak eğimli yüzeyin alt yarısında ise SVV metoduyla, sonlu hacimler LES metoduna göre daha iyi sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir.

Krajnovic S. ve Davidson L., çalışmalarında, akış alanındaki çevrim bölgelerinin pozisyonlarının viskozite ve yukarı akım özellikleri(girişteki türbülans ve sınır tabaka kalınlıkları gibi) tarafından değil, geometri tarafından belirlendiği kabulünü yapmışlardır [21]. Bu kabul Re sayısının ve grid yoğunluğunun azalmasına imkan tanımıştır. Bu yaklaşımı daha önce üzerinde doğru sonuçların alınmadığı  $25^0$  arka eğim açılı Ahmed modeli için kullanmışlardır. Re sayısı karşılaştırma yapılan deneysel çalışmaya göre 4 kat küçültülmüştür. ( $Re=2 \times 10^5$  yüksekliğe göre). Deneysel verilerle kapsamlı bir karşılaştırma yapılarak yöntemin doğruluğu test edilmiştir. Kullanılan LES yöntemi ile deneysel yöntem arasında bazı yerlerde küçük sapmalar görülmüş buradaki sapmaların da deneysel hatalardan kaynaklanabileceği düşünülmüştür. Bu çalışma ile Ahmed modeli etrafındaki yüksek Re sayılı akışın, daha düşük Re sayılı LES simülasyonu ile elde edilebileceğini göstermişlerdir.

Corin R.J. ve arkadaşları, iki boyutlu basitleştirilmiş taşıt modellerinin birbirini geçmesi durumunda oluşan geçici aerodinamik kuvvetlerin değişimini bağıl hız ve yanal rüzgar etkisi için sayısal olarak incelemişlerdir. Öncelikle, Re sayısının  $8 \times 10^5$  olması durumu için tek model yüzeyindeki basınç katsayısı değişimini elde ederek, deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlar ve kullandıkları sayısal yöntemin doğruluğunu göstermişlerdir [22]. Statik geçiş durumunda, aerodinamik katsayılardaki sanki periyodik değişim elde edilebilmesine karşın yollarda görülen tipik bağıl hızlar için bu katsayıların büyüklüklerinin doğru tahmin edilemediği görülmüştür. Özellikle dinamik katsayılarının tepe değerlerinin statik duruma göre, geçilen araç için %150 daha büyük olduğu, geçen aracın katsayılarının ise statik katsayıların %60 civarında olduğu belirlenmiştir.  $V_{bağıl}/V$  oranının 0.2'den daha büyük olması durumunda dinamik etkilerin önemli olduğu sonucuna varmışlardır. Yanal rüzgar durumunda geçilen taşıtta beklenen sınır tabaka ayrılmasının dinamik etkiler nedeniyle gecikmesi sonucu taşıtlar etrafında oluşan daha büyük düşük basınç bölgesi katsayılardaki değişimin statik duruma göre %400 daha büyümesine neden olmaktadır. Yanal rüzgar durumunda

dinamik etkilerin ortaya çıkan önemi nedeniyle, statik geçiş yaklaşımlarının uygun olmadığı sonucuna varmışlardır.

Clarke J. ve Filippone A., bir taşıtın diğerini geçmesi durumu karayolları koşullarındaki 30 m/s hız için iki boyutlu modeller kullanılarak dinamik ağ metoduyla sayısal olarak incelemişlerdir [23]. Öncelikle sayısal metodun doğruluğu açısından ortalama  $C_D$ , Strouhal sayısı gibi parametreler, statik durum için elde edilerek deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Geçiş manevrası detaylı olarak tanımlanmış ve fiziksel olayları irdelenmiştir. Özellikle, geçen taşıtın önünün, geçilen taşıtın arkası ile hizalandığı pozisyonda, hızlı akışkan sıkışması ve ivmelenmesinden dolayı geçilen taşıtın sürüklenme katsayısında ani bir artış meydana gelmektedir. Aynı pozisyonda yan kuvvet ve moment katsayılarında negatif bir artış görülmektedir. Bağlı hızdaki artışın katsayıların değerlerinde artışa neden olduğunu bildirmişlerdir. Taşıt aralığının artması sürüklenme katsayıları için hafif bir değişime neden olmakta ve daha büyük taşıt aralığında daha düşük katsayı değerleri elde edilmektedir. Yan kuvvet katsayıları büyük taşıt aralıklarında birbirine yakınken belirli bir değer altına inildiğinde keskin değişimlerin oluştuğunu bildirmişlerdir. Moment katsayısının aralık azaldıkça en büyük negatif tepe değerlere ulaştığını belirlemişlerdir. Taşıtların paralel konfigürasyonunda yanal kuvvetin ters işaretli olması haricinde gene olarak üç boyutlu deneysel verilerle uyumlu değişimlerin elde edildiğini söylemişlerdir.

Makato T. ve arkadaşları, kullanılan sayısal yöntemin (LES), RANS metoduna göre daha iyi bir model olduğunu göstermek amacıyla 1/5 ASMO modelinin tavan ve tabanındaki basınç dağılımlarını iki farklı ağ yapısı için (5.5 milyon ve 24.3 milyon) gerek LES gerekse de RANS modeli kullanarak elde etmişler ve rüzgar tüneline elde edilen deneysel verilerle karşılaştırmışlardır [24]. Serbest hızın 50m/s olması durumunda her iki yöntemle elde edilen ortalama yüzey basınç katsayılarının modelinin tavanı için deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu, taban için ise biraz sapmaların olduğunu gözlemlemişlerdir. Buna karşın RANS metodunda görülen sapmaların LES ile biraz iyileştirilmiş olduğunu görmüşlerdir. Modelin arka yüzeyindeki ortalama basınç dağılımları incelendiğinde ise LES metodunun iyi sonuçlar vermesine karşın RANS metodunun oldukça farklı değerler verdiğini görmüşlerdir. Kullanılan LES modelinin uygunluğunun gösterilmesinden sonra 1/1 sedan model otomobil etrafındaki

akış yapısı incelenmiş ve taşıt etrafındaki girdapların görselleştirilmiştir. Genel olarak taşıtın ön yan kenarlarından, ön tekerlek boşluklarından, yan camlardan ve taşıtın altından kaynaklı girdapların taşıt arkasında birleşerek arkada oluşan girdaplar üzerinde katkıda bulduklarını söylemişlerdir. 1/1 sedan modeli için zaman ortalamalı toplam basınç dağılımlarını LES ile elde etmişler ve rüzgar tüneline elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Benzerlik ve farklılıklara dikkat çekerek sayısal modelin geçerliliğini göstermişlerdir. Son olarak yaw açısının dinamik olarak değişmesi durumunda akış yapısı incelenmiş, yaw açısının sabit olmasına göre değişim durumunda simetrik olmayan basınç dağılımları dolayısıyla dönme momentin oluştuğunu bildirmişlerdir.

### **1.1.3 Deneysel ve Sayısal Çalışmalar**

Guilmineau E. ve Chometon F., yan rüzgar etkilerini incelemek için tasarlanan Willy kare kesitli model kullanarak deneysel ve sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir [25]. Akışın sıkıştırılmaz, kararlı ve  $Re$  sayısının  $0.9 \times 10^6$  olması durumu için sonlu hacimler esasına dayalı elde edilen çözümleri, rüzgâr tüneline elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Yaw açısı  $0^0-30^0$  aralığında değiştirilerek aerodinamik kuvvetler, duvar basınçları ve toplam basınç haritaları çıkarılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre genel olarak kullanılan sayısal yöntemin üç boyutlu olarak akış yapısını yansıtmaya kabiliyetine sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Bununla birlikte yüksek yaw açısı değerlerinde rüzgarın geldiği yöne göre kuytu tarafta vorticity yapısından sapma olduğunu bunun doğrudan sonucu olarak da taşıta etkiyen yan kuvvet değerlerinin doğru tahmin edilemediğini söylemişlerdir. Ayrıca yüksek yaw açısı değerlerinde modelin ayaklarının akış yapısı üzerinde önemli değişikliklere neden olduğu ve sayısal analiz hesaplamalarında göz önüne alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

Gohlke M. ve arkadaşları, üç boyutlu Willy kare kesitli model üzerinde yan rüzgar etkilerini sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır[26]. Aerodinamik kuvvetlerin dinamiği ve bu kuvvetlerin akış yapısıyla olan ilişkileri hakkında bilgi sahibi olabilmeyi amaçlamışlardır. Akış hızının 40 m/s olması durumu için sayısal analizler Lattice Boltzmann metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel analizleri rüzgar tüneli içerisinde gerçekleştirmişler ve model üzerinde 249 basınç deliği açılarak

lokal basınç dalgalanmaları mikrofonlar aracılığıyla analiz etmişlerdir. Deneysel ve sayısal veriler kullanılarak aerodinamik kuvvet spektrumlarını elde etmişler ve model dinamik kuvvetleriyle bağlantılı bir frekans değeri belirlemişlerdir. Bu frekansın silindirik ayaklardan yayılan vortekslerle özellikle de kuytu ön taraftaki silindirin wake yapısı ile ilgili olduğunu bildirmişlerdir. Bununla birlikte vorteks yayılımının frekans ve genlik değerinin yaw açısına bağlı olduğunu söylemişlerdir. Yaw açısının artmasıyla frekans değerinin arttığını,  $20^0$  ve sonrasında frekans değerinin 295Hz civarında sabit kaldığını buna karşılık genlik değerinin azalmaya devam ettiğini belirlemişlerdir. Bunun nedenini ise kuytu tarafta alt taraftaki vorteks etkisinden dolayı kaynaklandığını söylemişlerdir.

## 1.2 Çalışma ve Çalışmanın Amacı

Bu çalışma aşamasında, deneysel ve sayısal olmak üzere iki kademedен oluşmaktadır. Çalışmada ilk ardışık olarak konumlanmış iki Ahmed modeli ile karşılaştırmak üzere tek Ahmed Modeli etrafındaki ve ardışık halde  $x/L= 2, 1.5, 1, 0.5$  ve  $0.3$  olmak üzere beş farklı pozisyonda iki farklı Ahmed modeli arasındaki üç boyutlu akış yapısı parçacık görüntülemeli hız ölçme yöntemi (PIV) kullanarak deneysel bulgular elde edilmiştir. Bu bulgularda zamana göre ortalama ve anlık hız vektörleri, akım çizgileri ve girdap dağılımları, U ve V hız bileşenlerinin karesinin karekök ortalaması ile Reynolds gerilmeleri dağılımları yardımıyla modele ait akış yapısı detaylı olarak sunulmuştur. Çalışmanın ikinci aşamasında ise deney şartları ile aynı geometri ve özelliklere sahip sayısal hesaplama bölgesi ve ağı kararlı akım koşullarına göre tek Ahmed modeli için iki farklı türbülans modeli ile, ardışık olarak konumlanmış Ahmed modeli için ise tek bir türbülans modeli için HAD programı olan Fluent ile çözümlenmiştir.

Elde edilen deneysel ve sayısal bulgular ile tek Ahmed modeli etrafındaki akış analizinin deneysel bulgular ve sayısal bulgular karşılaştırılmıştır. Ardışık Ahmed modeli için elde edilen deneysel bulguların, tek Ahmed modeline göre farklılıkları tespit edilmiş ve sayısal bulgular ile her pozisyon için  $C_D$  drag katsayısı tespit edilmiştir. Böylece arkadan yaklaşan Ahmed Modelinin öndeki Ahmed modeline etkileri

incelenerek yakıt sarfiyatı hakkında yorumlarda bulunulmuştur. Ayrıca model etrafındaki hız dağılımları tek ve Ardışık Ahmed modeli için verilmiştir.



## 2. TAŞITLARDA AERODİNAMİK

### 2.1. Taşıt Aerodinamiğinin Tarihçesi

Aerodinamik ve taşıt teknolojisi, tarih sürecinde birkaç başarılı denemeden sonra bir araya gelmiştir. Bu durum, gerçek anlamda bir sürprizdi. Çünkü, akışkanlar mekaniği, bu bilim dalını verimli bir şekilde kullanan gemi ve uçak tasarımcılarının alanı olarak bilinirdi. Aerodinamik, doğrudan bu alanlarla ilgili olduğu için, uçak ve gemi tasarımcıları bu konuda çok daha iyi durumdaydılar ve kendileri için en iyi model olabilecek kuş ve balık şekillerini tasarımlarında rahatça kullanabiliyorlardı. Doğada elde ettikleri bu şekillerden, kendileri için gerekli birçok özellik çıkarabiliyorlardı. Fakat kara taşıtları için benzer bir doğal model yoktu. Bu yüzden otomobil tasarımcıları tasarımlarında gemi ve uçak şekillerini kullanmaya çalıştılar. Fakat kısa bir süre sonra yaklaşımlarının yanlış olduğunun farkına vardılar. Bu uygunsuz yaklaşımlardan uzaklaşmalarıyla otomobil aerodinamiği ileri doğru bir ivme kazandı (Hucho [27]).

İlk zamanlarda otomobiller çok yavaşlardı. Kötü yollarda aerodinamik şekilli otomobiller oldukça komik görünmekteydi. Geleneksel atlı arabalar şoför ve yolcuları, rüzgar, çamur ve yağmurdan korunmayı çok güzel bir şekilde başarıyorlardı (Hucho [27]).

Taşıt aerodinamiğinin tarihsel gelişimi, Şekil 2.1 üzerinde özetlenebilir. Burada, dört periyoda ayrılmış otomobil modelleri görülmektedir. Bu dört periyotta, akışkanlar mekaniğinin etkilerinin zaman içerisinde anlaşılacak taşıt aerodinamiğinde kullanılmaya başlandığı görülebilir (Hucho [27]).

Şekil 2.1'deki ilk iki periyot, kişisel uygulamalar olup, otomotiv endüstrisinden gelmemektedir. Buradaki uygulamalarda, temel havacılık aerodinamik prensiplerinin otomobillere uygulandığı görülür. Son iki periyotta ise, taşıt aerodinamiği prensiplerini disiplinli bir şekilde uygulayan otomotiv endüstrisindeki firmalar ön plana çıkmaktadır (Hucho [27]).

### 2.1.1. Temel Şekiller

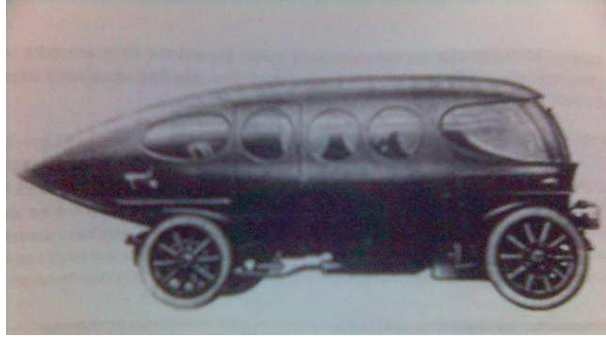
Bu kısımdaki modeller ilk otomobil dizaynları olup, deniz ve hava taşıtlarına benzetilerek hava direncinin önüne geçileceği düşünülmüştür. Şekil 2.2, 2.3 ve 2.4, bu uygulamalara örnektir.

TEMEL ŞEKLİ	1900 - 1925	Torpeda	Boattail	Airship
AKIS ŞEKLİ OTOMOBİLLER	1921 to 1923	Rumoler	Buqatti	
	1922 to 1939	Jaray		
	1934 to 1939	Kamm	Schlör	
	Since 1955	Cartoen	INSLI-Rio 80	
ETKİ OPTİMİZASYON	Since 1973	Golf I		
ŞEKLİ OPTİMİZASYON	Since 1984	Audi 100 III	Ford Siema	

Şekil 2.1 Otomobil aerodinamiğinin tarihsel gelişimi (Hucho [27])



Şekil 2.2 Camille Jenatzy, tarafından 1899 yılında yapılan rekor kıran araba, maksimum hız: 105,9 km/h (Hucho [27])



**Şekil 2.3** Count Ricotti'nin damla modelinde Alfa – Romeo'su (1914) (Hucho [27])



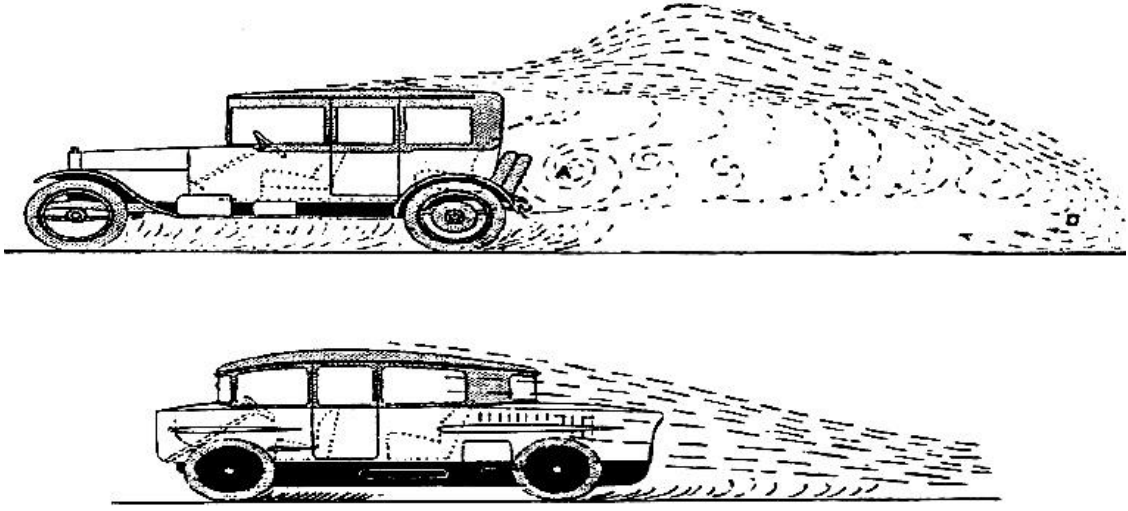
**Şekil 2.4** Boat – Tailed “Audi Alpensieger” (1913) (Hucho [27])

### 2.1.2. Aerodinamik Şekil Devri

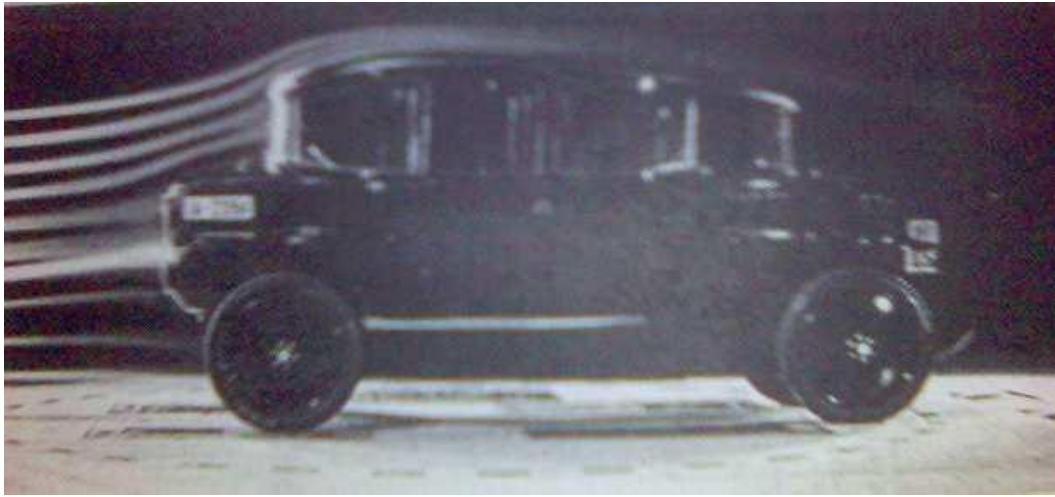
Sezgisel yaklaşımla özellikle 1. Dünya savaşından sonra geliştirilen aerodinamik taşıtların başlangıç dönemini oluşturur. Bu dönemde taşıtlara etkiyen dirençlerden aerodinamik direncin önemi anlaşılmış ve tanımlanmıştır. Elde edilen veriler ışığında aerodinamik direnci yenebilecek tasarımlar yapılmıştır. Bunlardan bir tanesi RUMPLER'ın “Teardrop” arabasıdır. Şekil 2.5 ve 2.6'da görüldüğü üzere otomobil kanat formundadır. Böylece aerodinamik direnci azaltmaya çalışmıştır. 1979 yılında

Volswagen'ın büyük rüzgar tüneline yapılan çalışmada Rumpler arabasından elde edilen sonuçlar;

Direnç katsayısı  $C_D=0.28$ , İzdüşüm Alanı  $A=2.57 \text{ m}^2$  olarak bulunmuştur (Hucho [27]).

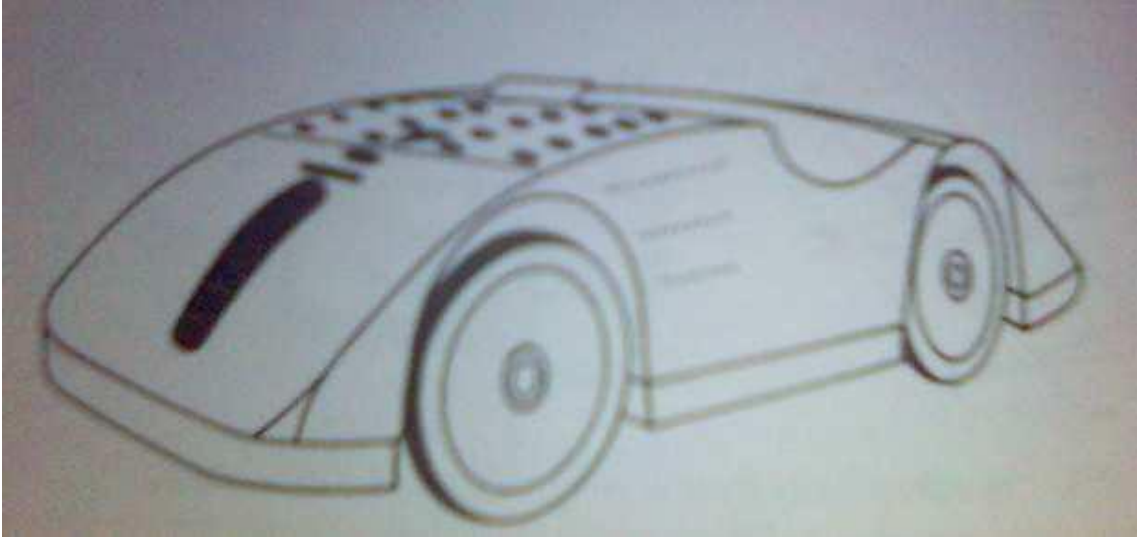


**Şekil 2.5** Hareket halindeki arabanın arkasındaki toz akımının Rumpler arabasıyla karşılaştırılması



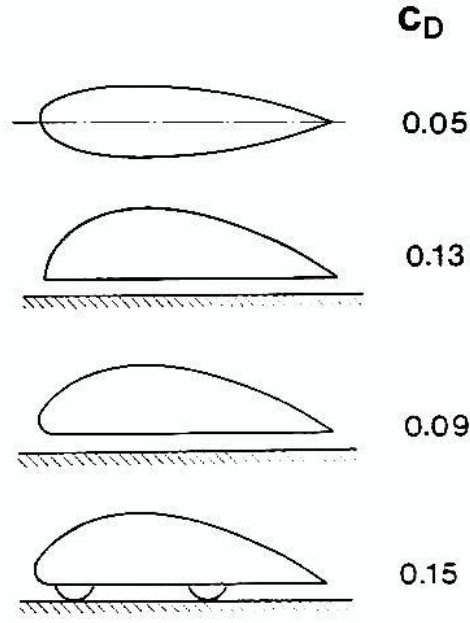
**Şekil 2.6** Rüzgar tüneline Rumplerin “teardrop” arabası (1922) (Hucho [27])

1923 yılında iki boyutlu dizayn şartlarına göre tasarlanan Bugatti otomobili Şekil 2.7. Strasburg Grand Prix'ine katıldı. Otomobil yandan görünüşe göre uçağı andırırsa da, dikkate değer bir şekilde düşük hava direncine maruz kalıyordu. Bu otomobil günümüz yarış arabalarına görünüm ve model itibariyle öncülük etmiştir (Hucho [27]).



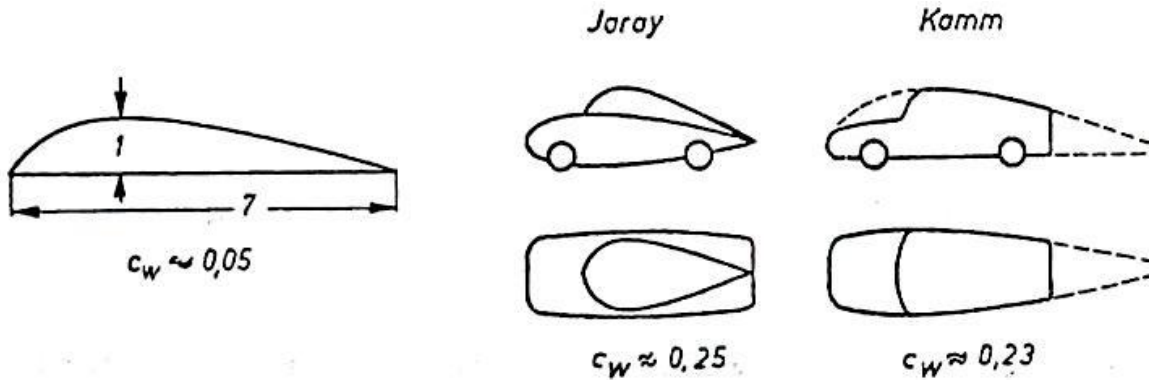
**Şekil 2.7** Grand Prix yarış arabası E. Bugatti, (1923) (Hucho [27])

Bugattinin bu arabası “Streamline” otomobiller olarak adlandırılan arabalar üzerinde çalışmaları hızlandırmış yeni yaklaşımlara yol açmıştır. Bu konuyla ilgili W.KELEMPERER yaptığı çalışmalarda kanat formunu baz alarak aerodinamik direnci hesaplayabileceği modeller oluşturmuştur. Buna göre Şekil 2.8’de  $C_D$  azalışı görülmektedir (Hucho [27]).

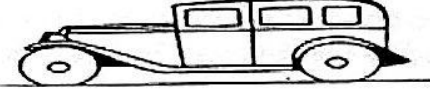
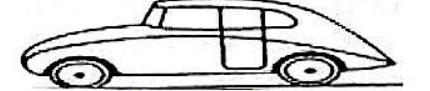
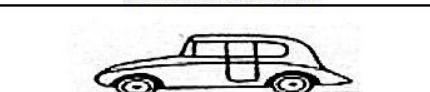


**Şekil 2.8** “Half Body” modeline göre aerodinamik direnç katsayısının değişimi (Hucho [27])

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

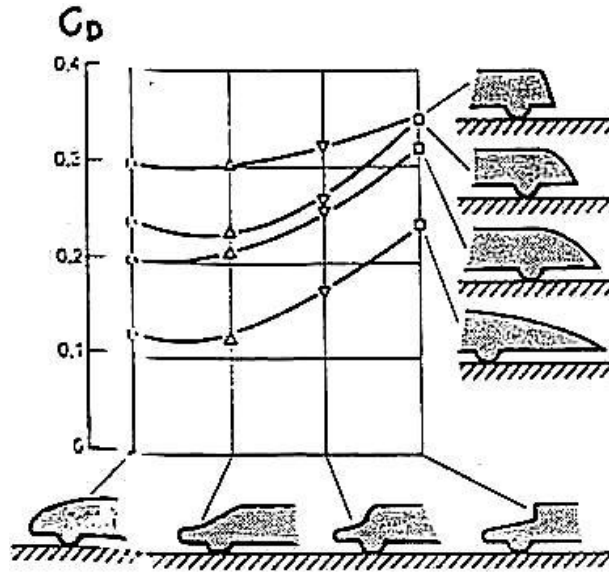


**Şekil 2.9** Jaray ve Kamm kombinasyonları modelleri ve hava direnç katsayıları (Hucho [27])


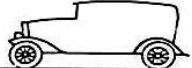
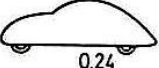
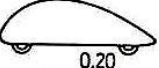
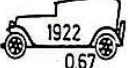
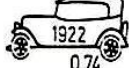

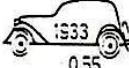


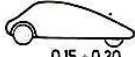
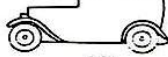
	$A_{1:l} [m^2]$	$C_D$
	2,99	0,64
 BÜYÜK JARAY OTOMOBİLİ	2,86	0,30
 KÜÇÜK JARAY OTOMOBİLİ	1,87	0,29

**Şekil 2.10** Jaray arabasında aerodinamik direnç katsayısının taşıt izdüşümü alanı ile incelediği modeller (1:10) (Hucho [27])





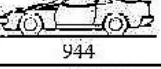
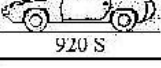

Bu yıllarda araç ön ve arka formları ile oynayarak direncin nasıl değiştiği gözleniyordu. Şekil 2.11’de ön ve arka formlar incelenmiştir. Şekil 2.12’de optimize edilmiş otomobillerin  $C_D$  değerleriyle verilmektedir. Şekil 2.13, 2.14 ve 2.15’de çeşitli otomobil markalarının tarihsel gelişimi verilmektedir.



**Şekil 2.11** Otomobilin ön ve arka formlarının direnç kuvveti katsayısına etkisi (Hucho [27]).



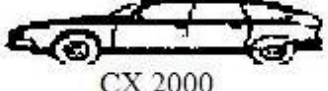
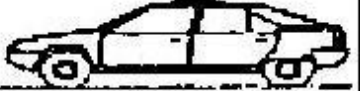
YAZAR YIL ÖLÇEK	Optimize Edilmiş Form	Kıyas Otomobili
W.T. Fishleigh 1931 M 1:4		 Direnç Oranı : 1,26
R.H. Heald 1933 M 1:15	 0,24  0,20	 1922 0,67  1922 0,74  1928 0,71  1933 0,55
W.E. Lay 1933 M 1:8	 0,30 0,24 0,20 0,13	 0,51
E.G. Raid 1935 M 1:1	 0,15 + 0,20	 0,51

Şekil 2.12 1930'lu yıllarda Amerika Birleşik Devletlerinde otomobil aerodinamiğinin durumu (Hucho [27]).

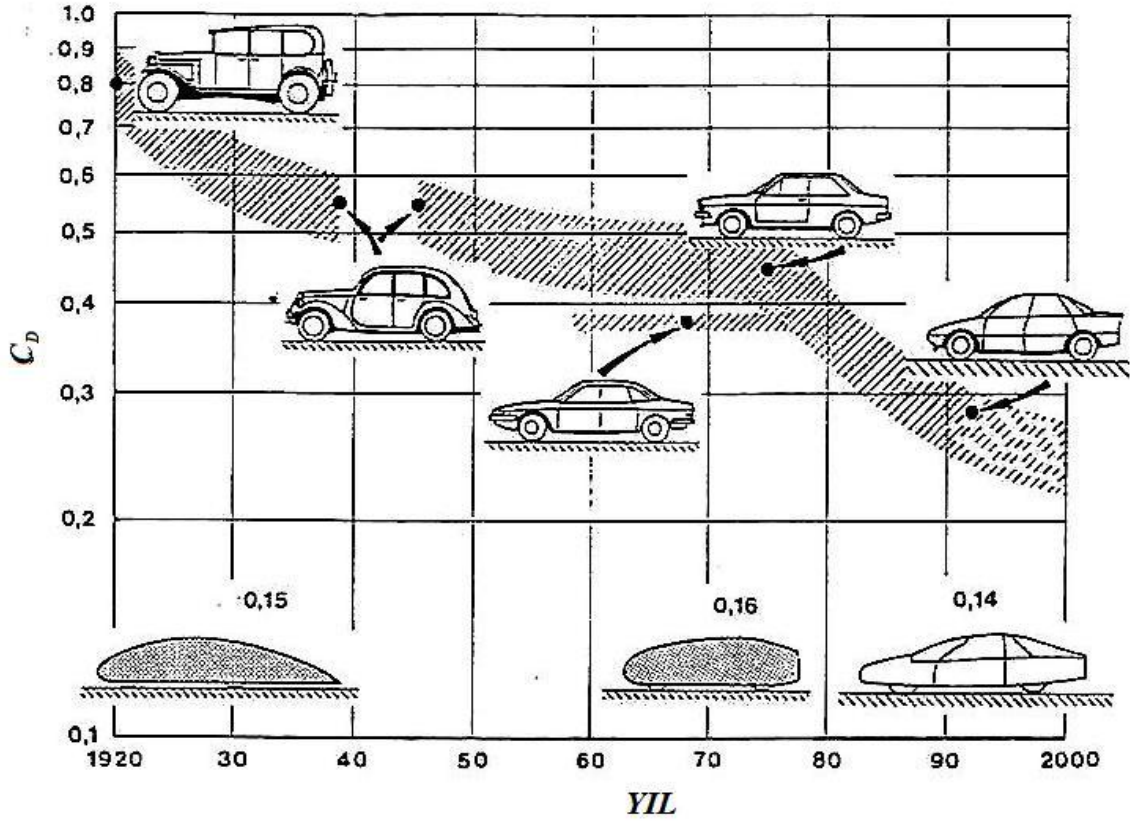
	Model (Yıl)	A [m <sup>2</sup> ]	C <sub>D</sub>
 356 A	1950	1,61	0,31
 356 B	1957	1,69	0,31
 911 S	1978	1,74	0,4
 924	1975	1,79	0,33
 944	1981	1,82	0,35
 920 S	1977	1,96	0,39

Şekil 2.13 1950'den 1977 yılına Porsche otomobilleri (Hucho [27])



	MODEL (YIL)	A [m <sup>2</sup> ]	C <sub>D</sub>
DS 19	1955	2,14	0,38
	1970	1,77	0,37
	1974	1,96	0,4
	1982	1,89	0,33 - 0,34

Şekil 2.14 1955'ten 1982'ye Citroen otomobilleri (Hucho [27])



Şekil 2.15 Avrupa'da seri üretilen Ford otomobillerinin direnç kuvveti katsayıları (Hucho [27])

## 2.2. Otomobillerdeki Kayıplar

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

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

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

Taşıtlarda motorca üretilen güç, hava direnci ve sistem içindeki kayıpları dengeler. Düşük hızlarda hava direnci diğer kayıplar yanında oldukça düşük mertebelindedir. Ancak hız 30-40 km/h değerine ulaşınca hava direnci önem kazanır (Tablo 2.1). Bunun sebebi hava direncinin hızın karesiyle doğru orantılı olarak artmasıdır.

**Çizelge 2.1.** Benzin motorlu 1200 kg'lık bir otomobilde 90 km/h hızda yakıt enerjisinin % (yüzde) olarak kullanımı [28]

Kayıplar	Kısmi yük (Sabit hız)	Tam yük(İvme veya yokuş)
Termodinamik kayıplar	% 78	% 72
Yardımcı sistemler	% 5	% 5
Tekerlek yuvarlanma kaybı	% 4.6	% 2
İvme veya yokuş kaybı	% 0	% 14.3
<b>Aerodinamik kayıplar</b>	<b>% 10.6</b>	<b>% 5.9</b>
Transmisyon kaybı	% 1.8	% 0.8
Taşıta verilen toplam enerji	% 100	% 100

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

### 2.3. Aerodinamik Kuvvetler

Bernoulli Teoremi (enerjinin korunumu) aynı akış yolunun her noktasındaki atmosferik ve dinamik basınçların toplamının sabit olacağını gösterir. Aerodinamiğin temel yasası (2.1.) bağıntısı ile aşağıdaki gibi gösterilir;

$$P + \frac{\rho V^2}{2} = H \quad [2.1]$$

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

Buradaki toplam basınç henüz taşıtın hareket alanına girmemiş yani deforme olmamış hava ortamından hesaplanabilir havanın hızının değiştiği yerlerde dinamik

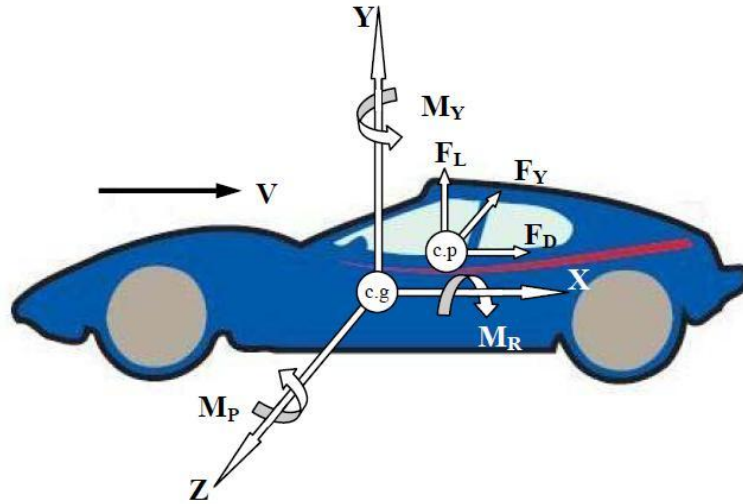
basınç da değişir. Taşıt etrafındaki dış akış nedeniyle oluşan taşıt yzeyindeki normal basınç dağılımı **şekil direnci**, kayma gerilmeleri de **yzey srtünmesini** oluşturmaktadır.

Denklem (2.2)'den gürleceği gibi araç üzerindeki basınç dağılımının tüm taşıt yzey alanına göre integre edilmesiyle, taşıt üzerinde rölatif hızdan dolayı oluşan F aerodinamik bileşke kuvveti bulunur.

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

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

Basınç kuvvetlerinin taşıt üzerindeki belirli bir noktadan etkilediği şeklinde bir idealleştirme yapılabilir. şekil 2.16'da görüldüğü gibi bu noktaya **basınç merkezi**, denir. Bu nokta **ağırlık merkezi**, ile aynı nokta değildir. Bu iki noktanın çakıştırılması aerodinamik aıdan oldukça büyük faydalar sağlar.



**şekil 2.16** Otomobil üzerinde oluşan aerodinamik kuvvet, momentler ile basınç, ağırlık merkezlerinin şematik gösterimi

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

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

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

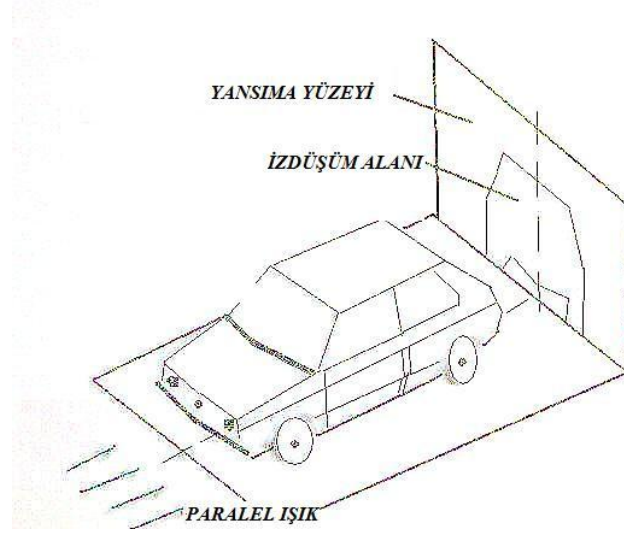
Aerodinamik sürüklenme kuvveti motorun sağladığı çeki kuvveti ile karşılanmaktadır. Onun için sürüklenme kuvveti, gerekli motor gücünde ve dolayısıyla da yakıt tüketiminde etkilidir. Herhangi bir hızdaki yakıt tüketimi direkt olarak gerekli olan güç ile orantılıdır. Aerodinamik direnci yenmek için gerekli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

Aerodinamik sürüklenme kuvveti (2.3) bağıntısı ile hesaplanır;

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

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

Maksimum kesit, taşıtın projeksiyon alanı ile aynıdır ve genellikle referans alanı veya karakteristik alan olarak adlandırılır. Bu alan lastiklerin hava akımına karşı olan alanlarını da kapsar. Yaklaşık olarak göz ile görülebilir veya küresel açı etkilerini ihmal edebilecek kadar uzak bir mesafeden fotoğraf makinesi ile Şekil 2.17'deki gibi görüntülenen alandır[29].



Şekil 2.17 Taşıtın kesit referans alanı [29]

Geometrik boyutları araç dış formuna bağlı sürüklenme katsayısı belli olan bir araca herhangi bir hızda etkiyen sürüklenme kuvveti hesaplanabilir. Örneğin; hızı 30m/s (108km/h) olan bir aracın projeksiyon alanı 3m<sup>2</sup> ve sürüklenme katsayısı C<sub>D</sub>=0.45 ise bu araca etkiyen sürüklenme kuvveti denklem 2.3'ten;

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

### 2.3.2 Kaldırma Kuvveti (lift force) (F<sub>L</sub>)

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

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

Tayfun ve hortum gibi şiddetli rüzgârların tehlikeli olmalarının bir nedeni çok alçaktan eserek yukarıya doğru basınç oluşturup herhangi bir kütleyi havaya savurmasıdır. Benzer bir etki de hızlı kullanılan otomobillerde oluşmaktadır. Bu etki aracın üstünde oluşan emme, altında oluşan kaldırma kuvvetiyle daha çok artmaktadır.

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

Kaldırma kuvveti denklem (2.4)'ten hesaplanır:

$$F_L = q \cdot A \cdot C_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot C_L \quad [2.4]$$

$C_L$  kaldırma katsayısını ifade eder.

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

Öndeki otomobile fazla yanaşan bir yarış arabasının üzerindeki rüzgâr baskısı azalır, çünkü rüzgarın esas baskısını öndeki otomobil karşılar, arkadaki otomobilin sürati artar ancak ön tekerin piste olan teması zayıflar. Bu durumda saatte 300 km hızla giden bir araç birden bire açıkta kalıp esen rüzgarla karşı karşıya geldiğinde arabanın altından giren hava tekerlerin yerle olan temasını keser ve aracı havalandırır [28].

Normal binek araçlarda tehlike bu boyutlarda olmamaktadır fakat savrulma riski vardır. Porsche 1966'dan 1969'a kadar ürettiği 911 marka araçlarda ağırlık artırımını yaparak soruna pratik bir çözüm bulmuştur. Saatte 225 km hızla giden araçların ön tarafına döküm demir, sağ ile sol tarafa birer akü koyarak aracın yere yapılımasını sağlamıştır.

### 2.3.3 Yanal Kuvvet ( $F_Y$ )

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

Yanal kuvvet denklem (2.5)'ten hesaplanır.

$$F_Y = q \cdot A \cdot C_Y = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot C_Y \quad [2.5]$$

## 2.4 Aerodinamik Momentler

Aerodinamik kuvvetlerin taşıt dinamiğine etkisi hesaplanmak istendiğinde bu kuvvetlerin de ağırlık merkezine taşınması gereklidir. Bu durumda dinamik analiz için **aerodinamik momentler** girmektedir. Bu momentler aerodinamik kuvvetler ile bunların ağırlık merkezine olan uzaklıklarının çarpımı ile bulunabilir.

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

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

Aerodinamik sürüklenme ve aerodinamik kaldırma kuvvetlerinden kaynaklanan aracın ön ve arkasından etki eden kaldırma kuvvetleri birbirine eşit olmadığından oluşan **yunuslama momenti  $M_P$  dir**. Basınç merkezinin, ağırlık merkezine göre rölatif pozisyonu  $x_C$  ve  $y_C$  uzaklığı olarak tanımlanırsa;

$$M_P = F_L \cdot x_C + F_D \cdot y_C = q \cdot A \cdot (C_L \cdot x_C + C_D \cdot y_C) = q \cdot A \cdot L \cdot C_{MP} \quad [2.6]$$



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

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

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

$$M_R = F_Y \cdot y_C = q \cdot A \cdot L \cdot C_{MR} \quad [2.7]$$

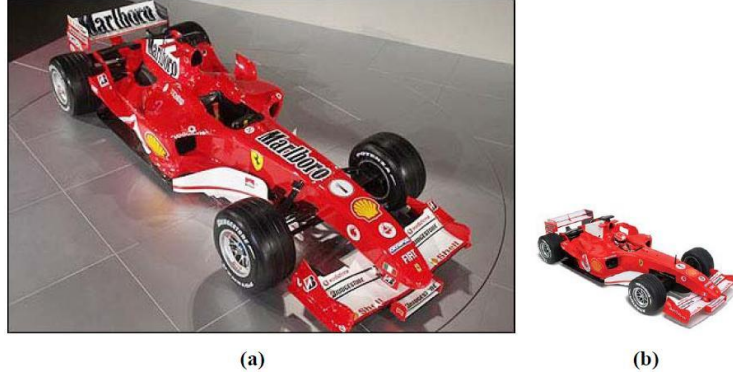
#### 2.4.3 Yana Kayış Momenti (yaw) ( $M_Y$ )

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

$$M_Y = F_Y \cdot x_C = q \cdot A \cdot L \cdot C_{MY} \quad [2.8]$$

### 2.5 Aerodinamik Dirence Etki Eden Faktörler

Aerodinamik tasarım taşıtın performansı ile direkt alakalıdır. Taşıtın aerodinamik yapısının değiştirilmesi tasarımcı, aerodinamik uzmanları, mühendisler ve üreticilerin birlikte çalışmalarıyla gerçekleştirilir. Taşıtın dış yüzeyi, yol tutuş kabiliyeti, güvenilirliği ve hepsinden önemlisi kolay üretilebilirliği gibi birçok konu göz önünde tutulmalıdır. Taşıtın dış yüzeyi ile ilgili aerodinamik araştırmalar oldukça uzun ve yorucu çalışmalardır. Bu yüzden gerekli teknik şartları sağlamakla birlikte piyasada müşterinin hoşuna gidecek nitelikleri de içermelidir. Taşıtın son şekil verilmeden önce yapılan bir tasarım hatası sadece o kısmı değiştirilerek giderilemez. Bu yüzden ölçekli birebir prototipler veya modeller kullanılır, hava tünellerinde deneyler veya analizler yapılır (Şekil 2.18). Aerodinamik sürüklenme ve kaldırma katsayısının düşürme tasarımındaki iki önemli unsurdur. Diğer önemli bir hususta taşıtın yan kuvvetlere verdiği tepkidir [29].



**Şekil 2.18 (a) Ferrari F1 Prototoip [30], (b) Ferrari F1 1/14 Model Araç**

### 2.5.1 Sürüklenme Katsayısını Azaltmak İçin Yapılan Çalışmalar

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

Bahsedilen önlemler sayesinde sürüklenme katsayısı; binek araçlarda 0.25'e, otobüslerde 0.5'e, motosikletlerde 0.4'e, kamyonlarda ise 0.65'e, düşürülmüştür. Hava akımı içinde akım yönüne dik olarak tutulan bir levha için bu değer 1.28, paraşütte 1.70, tabanca mermisinde 0.3, futbol topunda 0.29, yolcu uçaklarında 0.25, bomba ve yedek yakıt tankı taşımayan savaş uçaklarında 0.20 civarındadır.

Laboratuar çalışmalarında bulunan sonuçlar normal trafikte tespit edilen sonuçlara çoğunlukla uyuşmamaktadır. Çünkü araca etkiyen yan rüzgâr, yük durumu vb. faktörler sürüklenme katsayısına doğrudan etkimektedir.

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

$C_D$  değerini azaltma çalışmalarının sonucu olarak şu söylenebilir. Geliştirilen farklı önlemler sayesinde direnç kaybı oldukça düşürülebilmektedir ve hatta daha da düşürülebilir ancak bu amaç için uygulanacak ilave önlemlerin doğurabileceği maliyet artışı  $C_D$  değerinin küçülmesi sonucu ortaya çıkacak avantajı aşacağından bu gibi önlemler sadece deneme, geliştirme ve yarış gibi özel amaçlı araçlara uygulanabilmektedir. Bu tür araçlarda  $C_D$  değeri 0.20'ye düşebilmektedir. Bu konuda rekor 0.182 ile Mercedes'in C111 serisinin 1985'te geliştirdiği C111/4 modelindedir. Zaman değerini alt üst eden 1936 yapımı geliştirilmiş Mercedes W125 0.20'lik  $C_D$  değeri ile damla formuna en yakın araçlardan biridir [28].



**Şekil 2.19** 1936 yapımı Mercedes W125 [31]

## 2.5.2 Taşıtın Tasarımında İdeal Aerodinamik Şekil

Taşıtın şekli, yolcu sayısı ve koltukların yerleşimine göre belirlenir. Taşıtın maksimum kesit alanına göre tasarım yapılır. Kesit alanına göre teorik olarak taşıtın aerodinamik sürüklenme katsayısı bulunmaktadır. Günümüzün iyi tasarlanmış spor ve yarış otomobilleri ancak 0.2 ile 0.3 arasında sürüklenme katsayılarına sahiptir. Bu katsayı farkları çoğunlukla ideal şekilden sapmalardan (yolcu kabiniin şekli gibi) kaynaklanır. Tekerlekler arasındaki boşluk en önemli sapmayı gerçekleştirmektedir. Yolcu bölümü kısmı sürücünün yolu görebilmesi için gereklidir fakat şekil üzerinde düzgünce ilerleyen hava akımına karşı bir engeldir.

### Aerodinamik Direncin En Önemli Kaynakları;

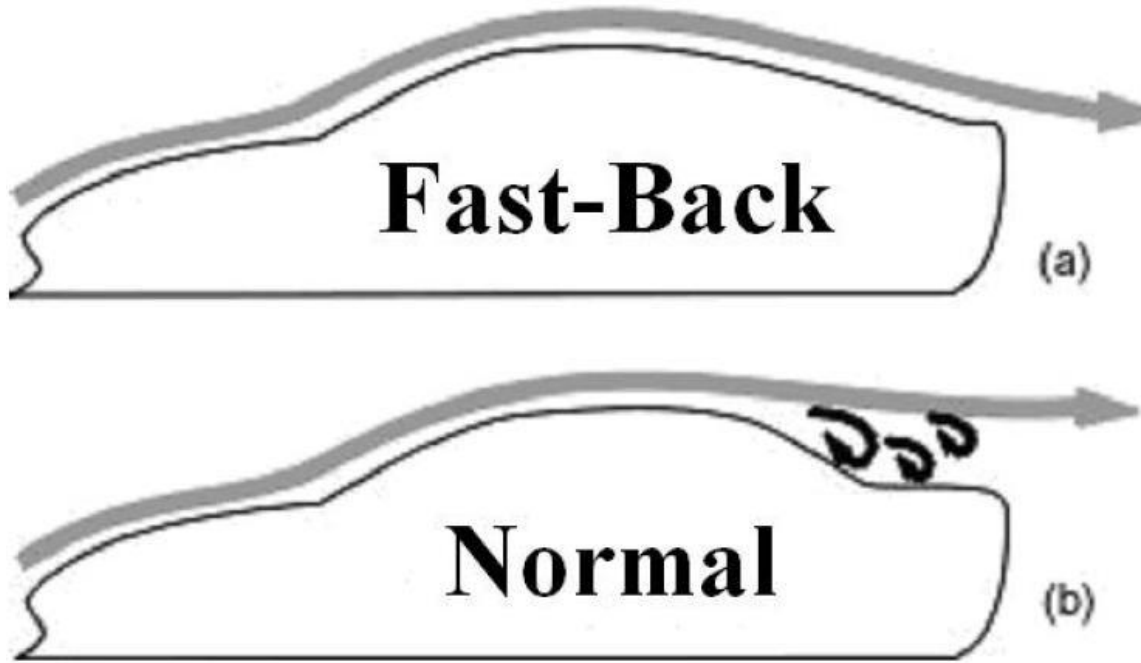
- **Gövde Direnci:** Basınç dağılımının yatay bileşeninden dolayı oluşur.
- **Akışkan Direnci:** Türbülansların oluşmasından ve aerodinamik kaldırma kuvvetinden dolayı oluşur.
- **Sürtünme Direnci:** Taşıt dış yüzeyinin hava ile temasından dolayı oluşur.
- **İç Hava Akımı:** Taşıt sistemi içindeki boşluklarda havanın dolaşımından dolayı oluşur.

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

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

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

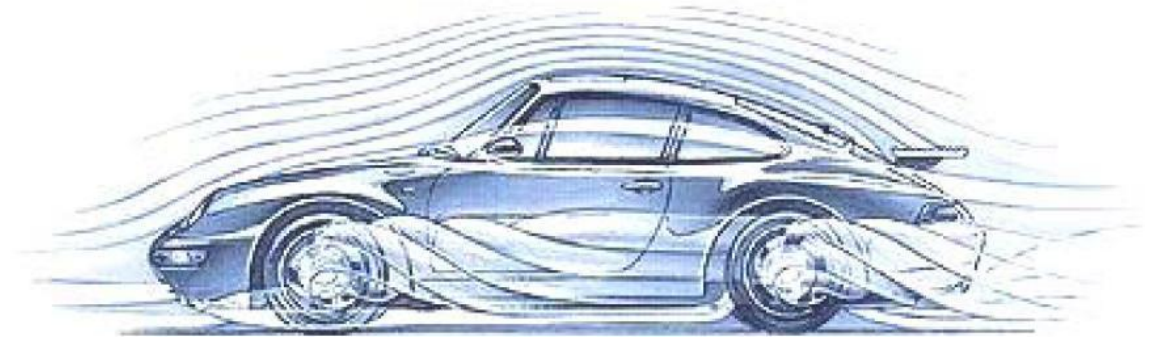
Taşıtın arka tarafının tasarımının aerodinamik direncinin düşürülmesi, Deneysel ölçümlerden taşıtın arka kısmının bölgesel hava akışına göre negatif eğimli olması gerektiği görülür. Gelen hava akımındaki türbülans oranı veya yüzeyin pürüzlülüğü gibi akımına göre eğimi  $3^0$  ila  $5^0$  yi geçmemelidir. Geçilirse hava akış ayrılığı tetiklenir. Bu fast – back olarak bilinen taşıt tasarımlarının ortaya çıkması sebep olmuştur (Şekil 2.20).



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

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

Şekil 2.21'den görüldüğü gibi ön lastikten sonra hava akımı, oluşan türbülanslarla taşıtın yan kenarı boyunca hareket ederken tekrar birleşirler. Arka lastiklerde meydana gelen hava akımı ayrılması genellikle taşıtın arka tarafındaki hava akımı ile birleşir. Bu durum arkada meydana gelen hava boşluğunun daha da büyümesine yol açar ve aerodinamik kuvveti artırır. Lastiklerin bulunduğu boşluğu kısmen veya tamamen kapatmak bu sorunu çözebilir. Arka lastiklerde tamamen kapatılabilmesine rağmen ön lastikler hareketli oldukları için çok zordur.



**Şekil 2.21** Taşıtın lastik boşluklarında meydana gelen hava akımı ayrılmasının şekli

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

### 3. METERYAL VE METOD

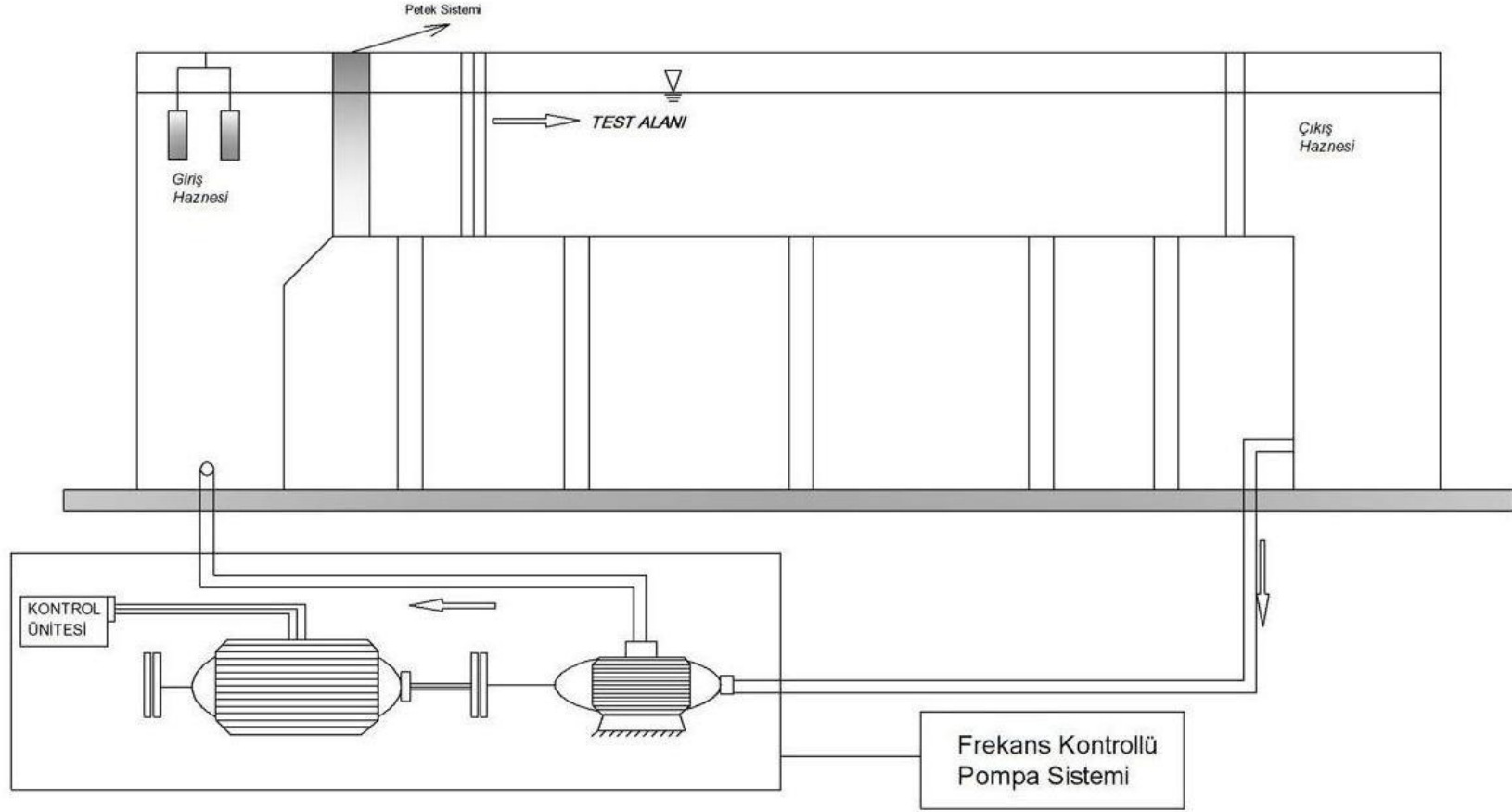
#### 3.1. Deney Düzeneği ve Yöntem

Deneyleyler, Adana Çukurova Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Akışkanlar Mekaniği Laboratuarındaki kapalı çevrim olarak çalışan (şekil 3.1)'deki açık su kanalı düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. (şekil 3.2)'de şematik olarak verilmiş olan kanal düzeneği giriş ve çıkıştaki iki su haznesi ve bu iki hazneyi birleştiren 1 m genişlik, 0.75 m derinlik ve 14 m uzunluğundaki açık su kanalından oluşmaktadır. Kanal tabanı ve yan duvarlar 15 mm kalınlığındaki saydam pleksiglas malzemeden yapılmış olup böylece ölçümler için pürüzsüz ve saydam bir yüzey elde edilmiştir. Suyun girişteki su tankından üniform olarak çıkmasını sağlamak amacıyla haznenin kanal kesitine ulaştığı bölgeye akış düzenleyici petek sistemleri yerleştirilerek kanal girişinde suyun mümkün olduğu kadar çalkantısız ve düzenli olarak girmesi sağlanmıştır. Kanalda su çevrimini sağlayan pompanın motor devri değiştirilerek kanal içerisindeki suyun hızı ayarlanabilmektedir (pompa kontrol nitesi).



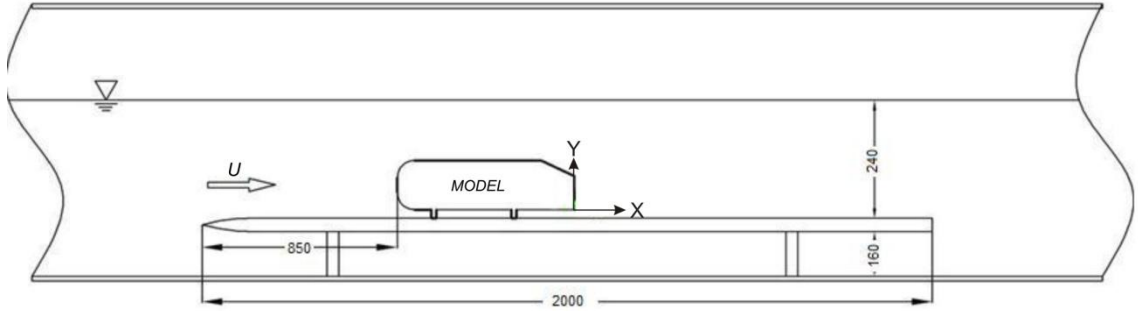
şekil 3.1 Deney kanalının görünümü



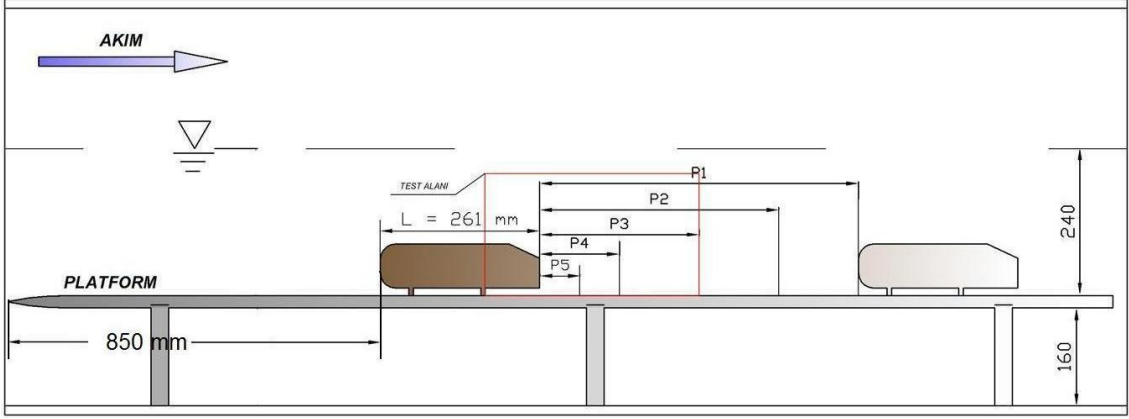


Şekil 3.2 Deney kanalının şematik gösterimi

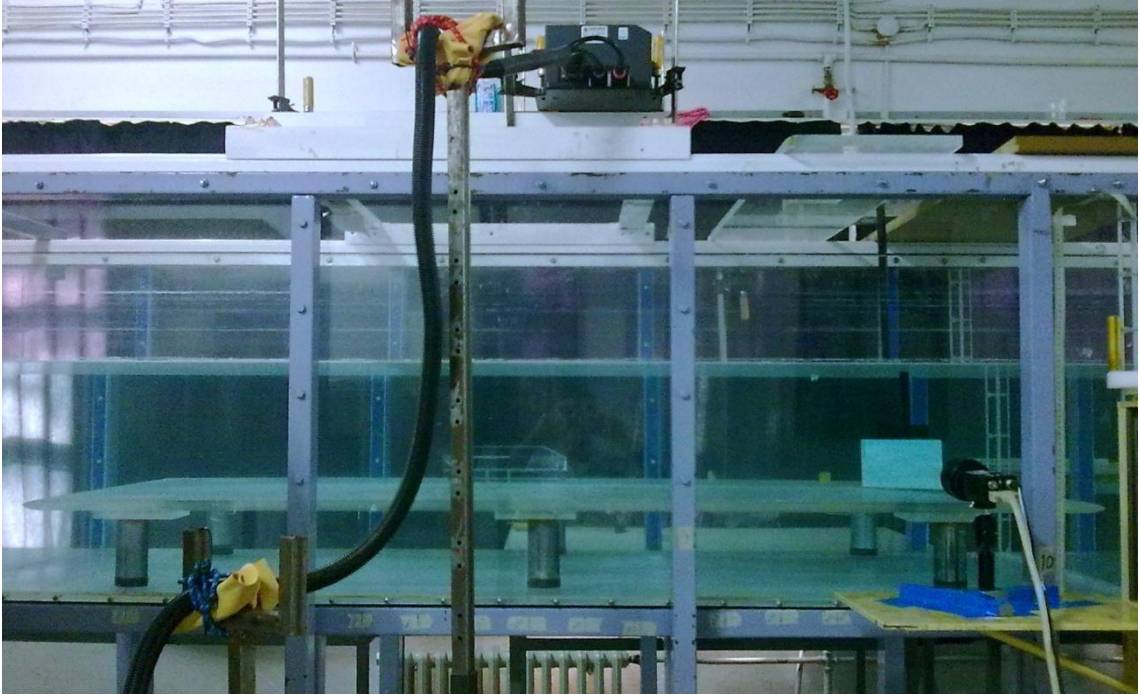
Kara taşıtlarının aerodinamiği ile ilgili yapılan deneysel çalışmalarda, aracın sabit yola göre bağıl olarak hareket ettiği gerçek yol koşullarının benzeşimi için kullanılan birçok yöntem vardır. Model araçların yükseltilmiş, sabit bir platform üzerine yerleştirilmesiyle gerçekleştirilen benzeşim tekniği en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir [33]. Bu çalışmada Şekil 3.3 ve 3.4’de görüldüğü gibi model araçlar, kanal başlangıcından 5 m uzaklığa kanal ile aynı genişlikteki, 2000 mm uzunluk ve 20 mm kalınlığa sahip, kanal tabanından üst yüzeyi 180 mm yükseklikte olan pleksiglastan yapılmış bir platform üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 3.5). Platformun giriş tarafındaki ucu merkez açısı  $15^0$  ‘lik uçak kanadı formu verilecek şekilde inceltilmiştir. Böylece akımın platforma girişi rahatlatılmıştır. Şekil 3.6’da teknik resmi verilen Ahmed modelinin  $\frac{1}{4}$  modeli pleksiglas malzemedan 2 adet yapılmıştır. Ahmed modellerinin içleri kanal içinde akışın etkisi ile hareket etmemesi için su ile doldurulmuştur. Hazırlanan Ahmed modellerinden birincisi platformun başından 850 mm Ahmed Modelinin ön ucu gelecek şekilde yerleştirilerek modelin bulunduğu noktada gelişmiş akım elde edilmeye çalışılmıştır. Deneylede platform üzerindeki su yüksekliği 240 mm de sabit tutulmuştur.



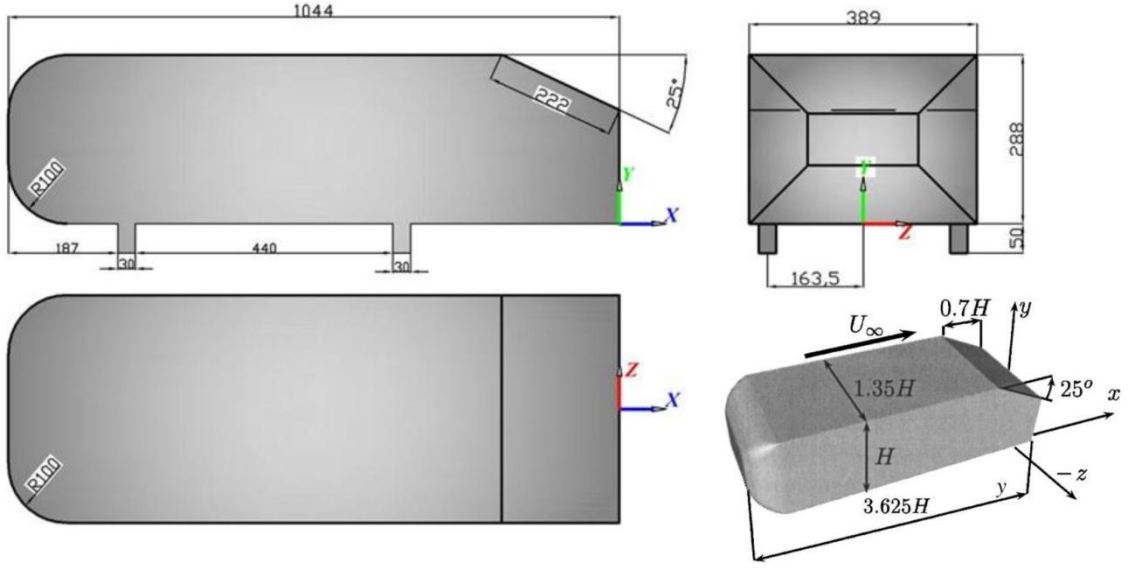
**Şekil 3.3** Tek Ahmed modeli için deney düzeneğinin şematik görünümü



Şekil 3.4 Ardışık Ahmed modeli için deney düzeneğinin şematik görünümü

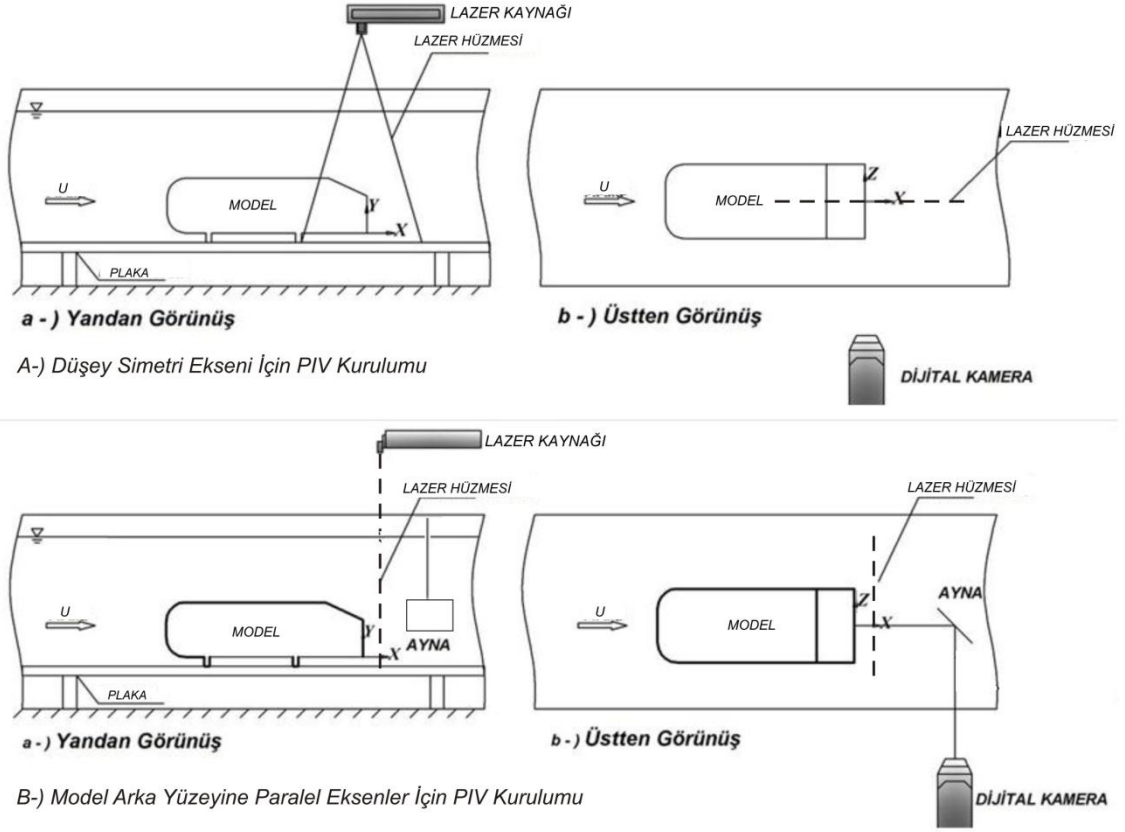


Şekil 3.5 Ahmed modeli için deney düzeneğinin görünümü



**Şekil 3.6** Orijinal Ahmed modelinin teknik resmi

Şekil 3.7 'de düşey ve model arka yüzeyine paralel olan eksenlerde görünümü verilen test alanındaki deneyler tek bir akım koşulunda yapılmıştır. Kanalin türbülans yoğunluğu % 0.5 civarındadır. Deneyler için, modeller olmadan test alanında platformun üzerinde yapılan ölçümler sonucunda serbest akım hızının 218 mm/s ve bu hızla hesaplanan Ahmed modelinin yüksekliğine bağlı Reynolds sayısı ise  $Re_H=1.5 \times 10^4$  olduğu saptanmıştır. İlk önce Ahmed Modelinin akış yapısını belirlemek için tek modelle deneyler yapılmıştır. Daha sonra arkadan yaklaşan aracın öndeki araca olan etkisini incelemek için iki araç arasındaki mesafenin Ahmed modelinin uzunluğunun iki katı olan pozisyondan başlamak üzere  $x/L=2, 1.5, 1, 0.5$  ve 0.3 için beş farklı pozisyonda deneyler tekrarlanmıştır.



**Şekil 3.7** Test alanının şematik görünümü

Ahmed modeli etrafındaki akış alanı PIV yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. PIV deney kurulumu şematik olarak Şekil 3.7’de verilmiştir.

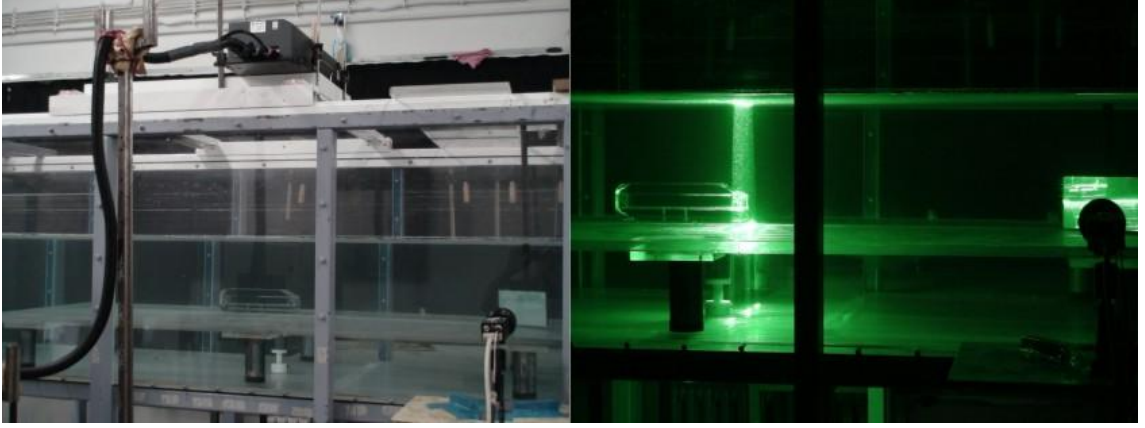
### Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV) Tekniği İle Akım Hızının Ölçülmesi

Akımın yapısını belirlemek için yapılan deneylerde, kızgın tel, kızgın film ve lazer doppler anemometreleri anlık hızların ölçülmesi için yaygın olarak kullanılan cihazlardır. Bu cihazların ortak özelliği aynı anda sadece tek bir noktada ölçüm yapabilmeleridir. Deney alanında farklı zamanlarda tek bir noktada yapılan ölçümlerle akım alanının özelliklerinin belirlenmesi ise özellikle ayrılmış akım bölgeleri ve karmaşık yapıya sahip akımların yapısını tanımlamada yetersiz kalabilmektedir.

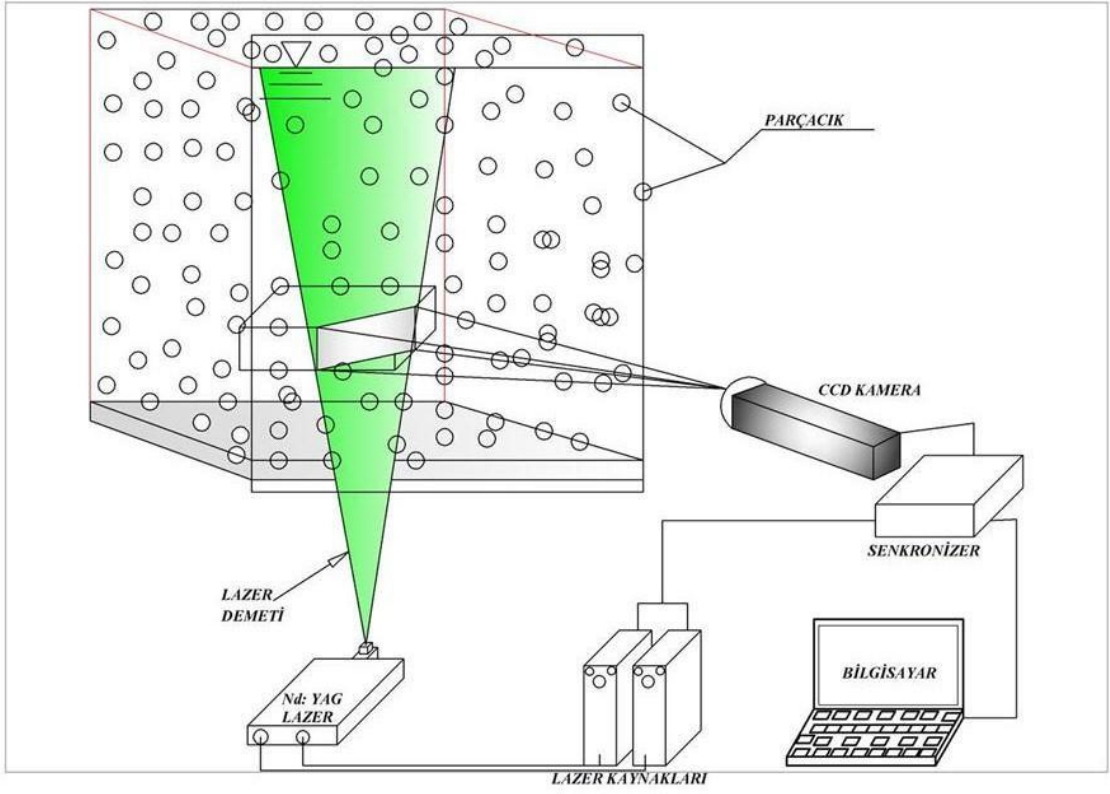
PIV yöntemi, akımı rahatsız etmeden hassas bir şekilde, aynı anda düzlemsel bir bölgedeki anlık hızları ölçerek akım karakteristiklerini belirlemektedir. Bu yöntem ile akım hızında hareket eden, mikron boyutundaki, küçük, metal kaplı, katı parçacıkların hızları aynı anda ölçülmektedir.

PIV tekniği ile yapılan hız ölçümlerinde parçacıkların akışkan hareketini takip ettiği düşüncesinden hareketle, akışkan parçacıklar ile beslenir. Ölçüm yapmak istenilen bölgeye lazer demeti gönderilerek bir görüntüleme yüzeyi oluşturulur (Şekil 3.8). Lazer belli aralıklarla ışıır ve iki ışına arasında CCD kamera ile görüntüler kayıt edilir. Elde edilen bu görüntüler, ağ olarak adlandırılan küçük bölgelere ayrılarak her bir ağ bölgesindeki parçacıkların yer değiştirmeleri bulunmaktadır. Alınan görüntüler birbirleriyle kros korelasyona sokulur. Bilgisayar yardımı ile elde edilen sinyaller işlenir ve kullanıcının arzu ettiği veri, sunum ve istatistiksel bilgilere dönüştürülür. Sunumlara örnek olarak; ölçüm yapılan alanda hız vektörleri, akım çizgileri ve vorteks dağılımı sayılabilir. Bu çalışmada kullanılan PIV sisteminin deney düzeneği Şekil 3.9’da şematik olarak görülmektedir.

Test alanının 1.5 mm kalınlığındaki lazer demetiyle aydınlatılması sonucu, lazerin aydınlattığı bölgedeki akıma bırakılmış olan 12 mikron çapındaki küresel parçacıkların 2ms zaman aralıklarında resimlerinin çekilmesi ve bu zaman aralığında çekilen iki resimdeki parçacıkların yer değişmesinden hız alanı elde edilmektedir. Çok küçük zaman aralıklarında, yüksek enerji ile parlayabilmesi, silindirik merceklerle ince bir demet haline getirilebilmesi sebebiyle test alanının aydınlatılmasında lazer kullanılması tercih edilen bir yöntemdir. Burada 532 Nm’ lik çift dalga boyuna sahip kızılötesi radyasyon dalgası gönderebilen her parlamada 120 mJ enerjiye sahip, 1.5 mm kalınlığında lazer demeti gönderen, çift darbeli Nd: Yag lazeri kullanılmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.8 Test alanının görünümü



Şekil 3.9 PIV deney düzeneğinin şematik görünümü



**Şekil 3.10** Lazer kaynağı

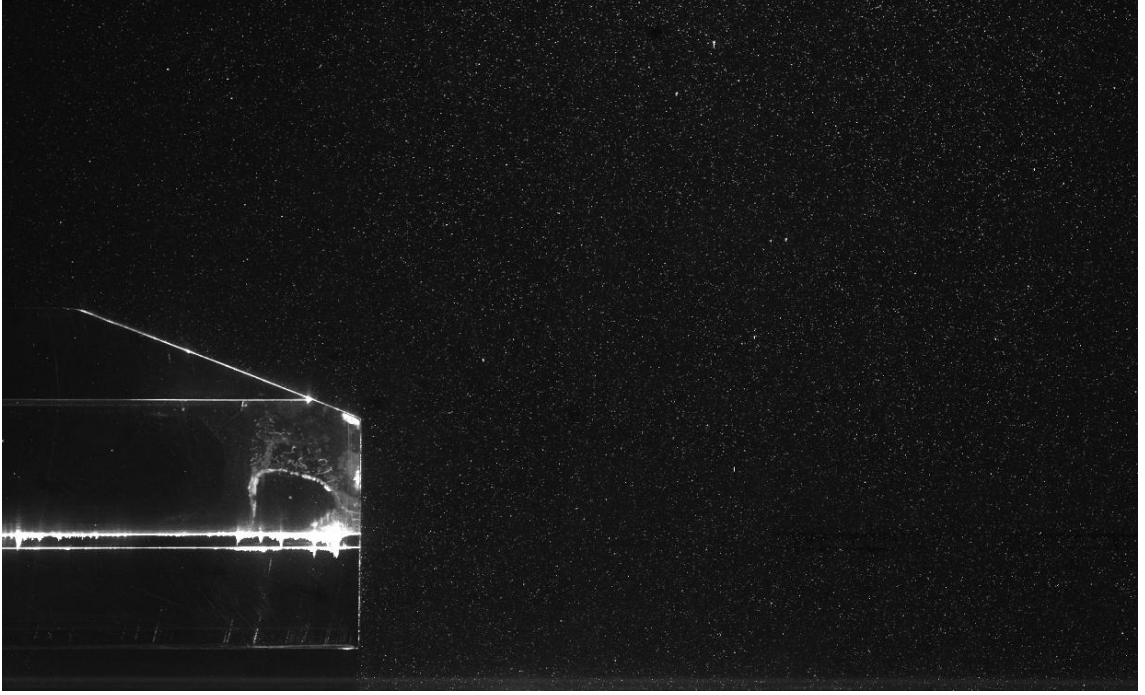
Ölçüm alanında aydınlatılan parçacıkların hareketlerinin yakalanabilmesi için yüksek çözünürlüklü bir CCD ( Charge Coupled Device ) kamera, lazer demetine dik bir pozisyonda yerleştirilmiştir (Şekil 3.8). Lazer parlaması ve kamera senkronize bir şekilde çalışmakta böylece lazer demetinin birinci anlık parlaması kamerada birinci kareye, ikinci parlaması da ikinci kareye kaydedilmekte ve ikinci kayıttan sonra her iki karede bilgisayara aktarılmaktadır. Bu çalışmada saniyede 15 adet görüntü çekebilen CCD kamera 1600x1186 piksel çözünürlüğe sahiptir ve 60 mm'lik objektif ile donatılmıştır.

Lazer ışığının sebep olduğu gölgelenme etkisinin azaltılması ve silindir katı sınırının daha hassas şekilde belirlenebilmesi Ahmed Modelinin etrafındaki akım bölgesi, arka ve ön bölgeye ayrılarak görüntüler kaydedilmiştir.

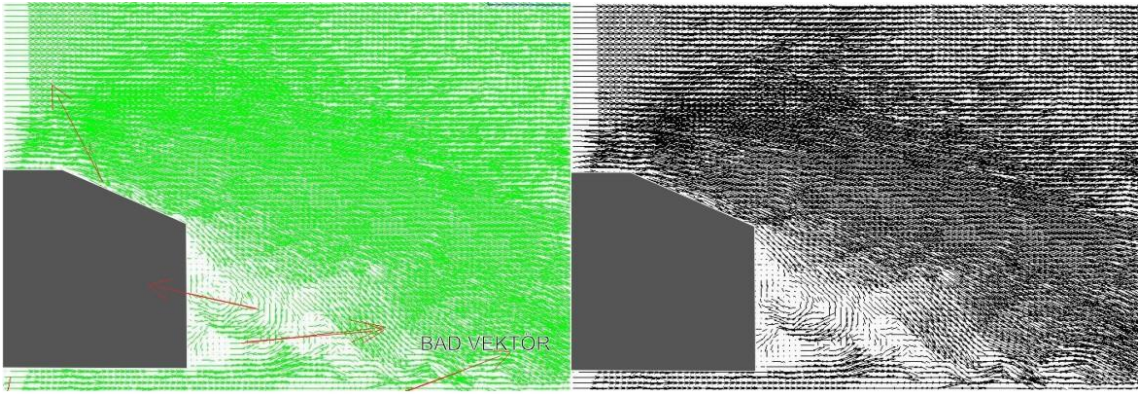
Yukarıda açıklandığı gibi, PIV' nin çalışma prensibini test alanı içerisinde aydınlatılan parçacıkların yer değiştirmesinin tespiti olarak özetlemek mümkündür. Bu yer değiştirmenin belirlenmesinde en çok kullanılan yöntemler parçacık izleme ve korelasyondur. Bu çalışmada, parçacıkların yer değiştirmesinin hesabı 64 x 64 sorgulama ekranı ile kros – korelasyon tekniği kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3.11'de



anlık akım alanı kamera görüntüsü, Şekil 3.12’de ise Ahmed Modelinin arka bölgesindeki akım alanı için kameradan aktarılan görüntüye kros – korelasyon uygulaması sonucu elde edilen işlenmemiş ve temizlenmiş vektör alanı örnek olarak verilmiştir.



Şekil 3.11 Ahmed Modelinin anlık akım alanı



A-) KROS-KOLERASYON İŞLEMİNDEN SONRAKİ HAM VEKTÖR ALANI

B-) İŞLENMİŞ VEKTÖR ALANI

Şekil 3.12 Ahmed Modelinin anlık kamera ve kros – korelasyon işleminden sonraki ham vektör alanı ve işlenmiş vektör alanı

Kameradan aktarılan anlık resimler bilgisayar içerisindeki bir resim karesi yakalayıcı ile okunmuş ve dijital resim dosyası formatında (TIFF) hafızaya kaydedilmiştir. Bu dijital resimlerin prosesi ve analizi DANTEC PIV sistemi içerisinde yer alan FLOWMAP yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Her bir bölgede toplam 350 anlık görüntü kaydedilmiştir.

FLOWMAP yazılımından elde edilen; ham vektör alanlarının işlenmesi, sorgulama alanı içerisindeki sınırların belirlenmesi, yansımadan ve gölgelenmeden oluşan “bad” vektörlerin tespiti ve bu hatalı vektörlerin kaldırılması için CLEANVEC yazılımı kullanılmıştır.

Şekil 3.12 – A’da verilen ham vektör alanındaki bad vektörlerin, CLEANVEC yazılımı kullanılarak yapılan ileri proses işlemleri ile düzeltilmesi sonucunda elde edilen nihai vektör alanı Şekil 3.12 – B’de görülmektedir.

### **3.2. Model Etrafındaki Akımın Cfd Modellenmesi**

Son yıllarda Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) yöntemlerinde kaydedilen gelişmeler ve bunlarla bağlantılı ticari yazılımların çoğalması ile sayısal modelleme tekniklerinin iki – üç boyutlu karmaşık düzenli ve değişken akımların analizinde, dolayısıyla Makine Mühendisliği kapsamında yer alan birçok akış yapısının tasarımında önemli kolaylıklar sağlamıştır. Akışkan ile yapı etkileşiminin fiziksel modeller ile laboratuvar ortamında test edilmesi, ön görülen performans ölçütlerinin sağlanıp sağlanmadığı hakkında önemli bilgilerin edinilmesine yardımcı olduğu aşikârdır. Ancak, fiziksel modellemede, ölçek etkilerinden kaynaklanan bazı hataların bulgulara yansıdığı da bilinmektedir. Diğer taraftan sayısal modelleme ile akımın daha kısa sürede ve ekonomik olarak çözülmesi ve tasarım işlemlerinin farklı koşullar için hızlı biçimde tekrarlanması mümkündür. Ancak CFD modellemelerinden elde edilen verilerin ne kadar gerçekçi olduğu ve kullanılabilirliği konusu, güncel tartışma konularından biridir. Bu bakımdan sayısal bulguların deneylerle doğrulanmasına yönelik çalışmaların çoğaltılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. HAD kapsamında Fluent, Ansys, Cobalt, Flow 3D vb. bir çok ticari paket program

geliştirilmiştir. Bu çalışmada temel denklemlerin sayısal çözümü için Fluent paket programı kullanılmıştır.

### 3.2.1. Temel Denklemler

Model etrafında oluşan sıkışmayan, türbülanslı, Newtonien akışkan akımı iki boyutlu olarak kabul edilebilir. Kütlenin ve momentumun korunumundan elde edilen denklemler kartezyen koordinatlarda aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad [3.1]$$

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + \frac{\partial}{\partial x} (\overline{-\rho u'^2}) + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{-\rho u' v'}) \quad [3.2]$$

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v + \frac{\partial}{\partial x} (\overline{-\rho u' v'}) + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{-\rho v'^2}) \quad [3.3]$$

Denklem 3.1, 3.2 ve 3.3'te u ve v hız bileşenlerini, p basıncı,  $\mu$  akışkanın dinamik viskozitesini,  $\rho$  akışkanın yoğunluğunu,  $\rho g$  yerçekiminin sebep olduğu kütleli kuvveti  $u'$  ve  $v'$  ise yatay ve düşey doğrultudaki türbülans hız sapmalarını ve t zamanı ifade etmektedir.  $-\overline{\rho u'^2}$  ( $= \tau_{xx}$ ),  $-\overline{\rho u' v'}$  ( $= \tau_{xy} \tau_{yx}$ ) ve  $-\overline{\rho v'^2}$  ( $= \tau_{yy}$ ) ise türbülans kayma gerilmelerini göstermektedir. Denklem (3.2) ve (3.3)'teki türbülans gerilmeleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\tau_{ij} = -\rho u'_i u'_j = \eta \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad [3.4]$$

Denklemden  $\eta$  türbülans viskozitesidir.

### 3.2.2. Türbülans Modelleri

Akışkan hareketinin CFD ile modellenmesinde, denklem (3.4)'teki  $\eta$  türbülans viskozitesinin belirlenmesi için çeşitli türbülans modelleri geliştirilmiştir (Wilcox, 2000). Bu çalışmadaki, sayısal modellemede aşağıdaki türbülans modelleri kullanılmıştır.

**Standart k-ε türbülans modeli:** Bu model ile türbülans viskozitesi, türbülans kinetik enerjisi, k ve onun kayıp nispetine, ε, bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir ( Launder ve Spalding, 1974 ).

$$\eta = \rho C_{\eta} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad [3.5]$$

(3.5) denkleminde (  $C_{\eta} = 0.09$  ) türbülans sabitidir. k-ε modelinde k ve ε değerlerinin bulunması için iki adet kısmi diferansiyel transport denkleminin çözümü gerekmektedir.

**Standart k-ω türbülans modeli:** Temelinde k-ε türbülans modelinin oluşturduğu iki denklemlilik türbülans modellerinden biri olan k-ω modelinde türbülans viskozitesi aşağıdaki ifade ile hesaplanmaktadır. ( Wilcox, 1988 )

$$\eta = \rho \frac{k}{\omega} \quad [3.6]$$

( 3.6 ) denklemindeki ω, özgül kayıp oranı olup birim türbülans kinetik enerji için türbülans kayıp oranını ( ε/k ) temsil etmekte olup aşağıdaki gibidir:

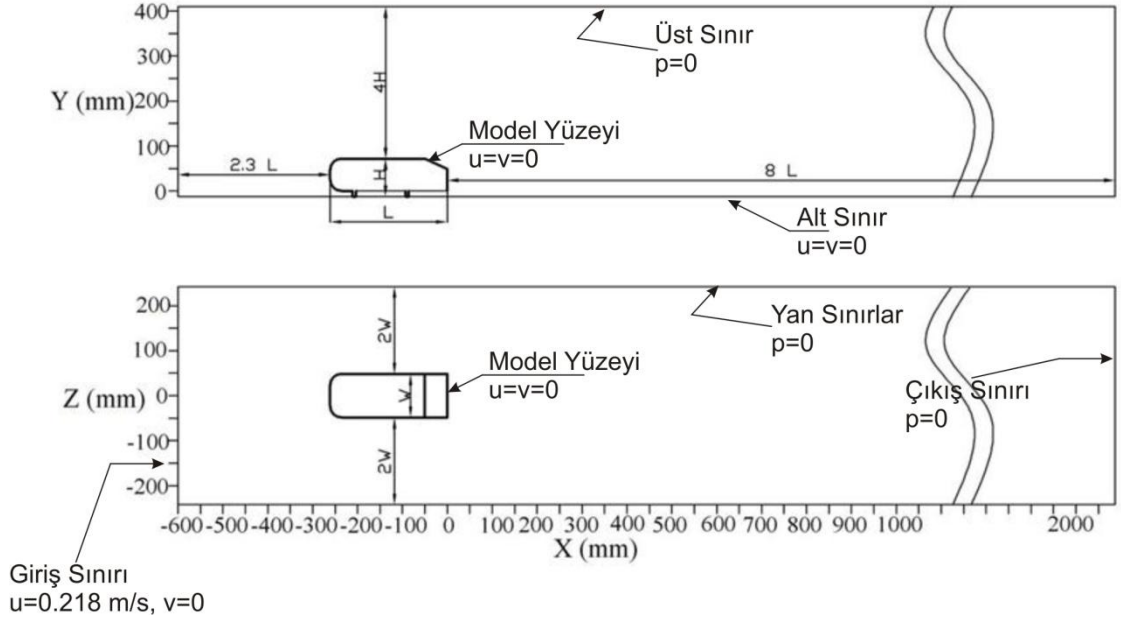
$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_{\eta} k} \quad [3.7]$$

Bu modelde k'nın yanı sıra ω için ikinci bir transport denkleminin çözülmesine ihtiyaç duyulmaktadır. k-ω modeli, k-ε modeline göre daha az bilinen bir model olmasına karşın, pozitif basınç gradyanının olduğu sınır tabakası akımlarında daha iyi sonuç verdiği bilinmektedir. ( Wilcox, 1988 )

### 3.2.3. Çözüm Bölgesi ve Sınır Şartları

Model ile etkileşim halindeki açık kanal akımının sayısal modeli için seçilen iki boyutlu sayısal hesaplama bölgesinin geometrisi ve boyutları Şekil 3.13'de verilmiştir. Çözüm bölgesinin üst sınırı, yan sınırları ve çıkış sınır şartı olarak basınç, P=0 değeri kullanılmıştır. Alt sınırdaki ve model yüzeyinde ise no-slip sınır şartı, yani yatay ve düşey hızlar için, u=v=0 kabulü yapılmıştır. Çözüm bölgesinin giriş sınırında yatay hız

bileşeni deneysel olarak elde edilmiş olan, üniform derinlik – ortalama hız değeri olarak  $u=218$  mm/s, ve düşey hız bileşeni  $v=0$  alınmıştır. Akım gelişiminin tamamlanabilmesi için platform başlangıcından model boyunun 2.3 katı, platform sonundan ise model boyunun 8 katı uzaklığa model platformun simetri eksenine yerleştirilmiştir.



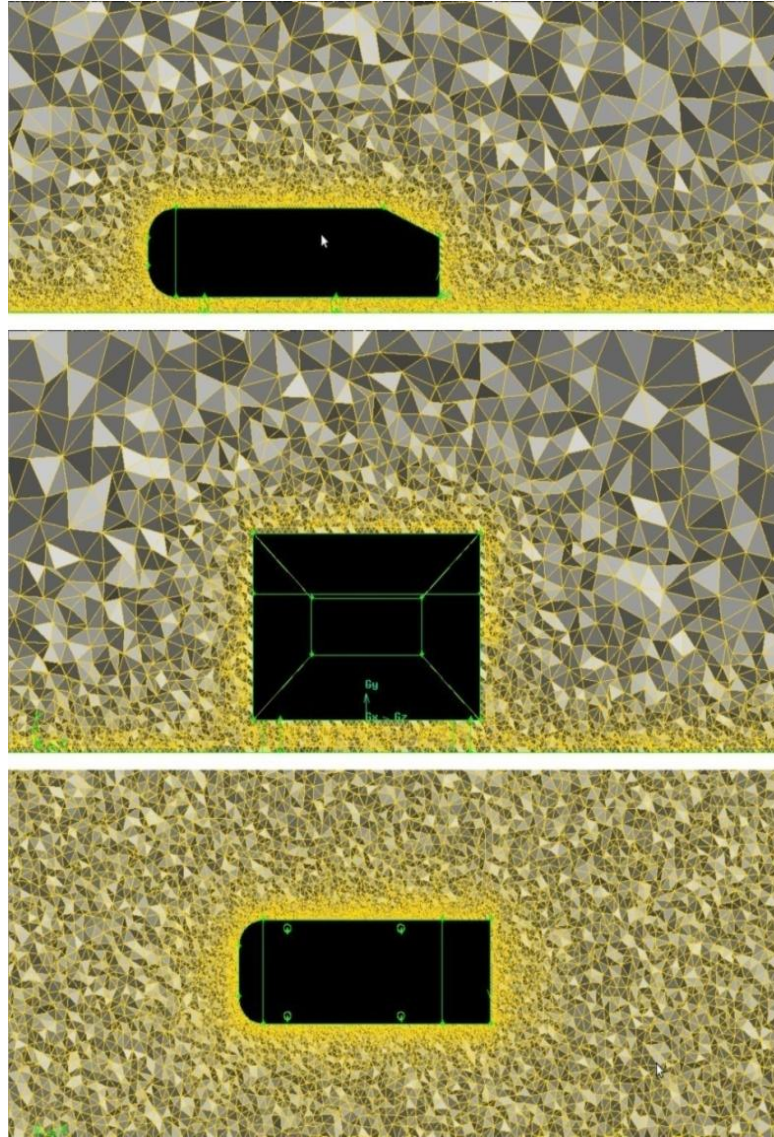
**Şekil 3.13** Sayısal hesaplama bölgesi ve sınır şartları

Sayısal model,  $Re_H = 1.5 \times 10^4$  için düzenli zamana bağlı akım şartları göz önüne alınarak çözülmüştür. Zamana bağlı çözümlerde  $\Delta t = 0.01$  saniyelik zaman artımları kullanılmıştır.

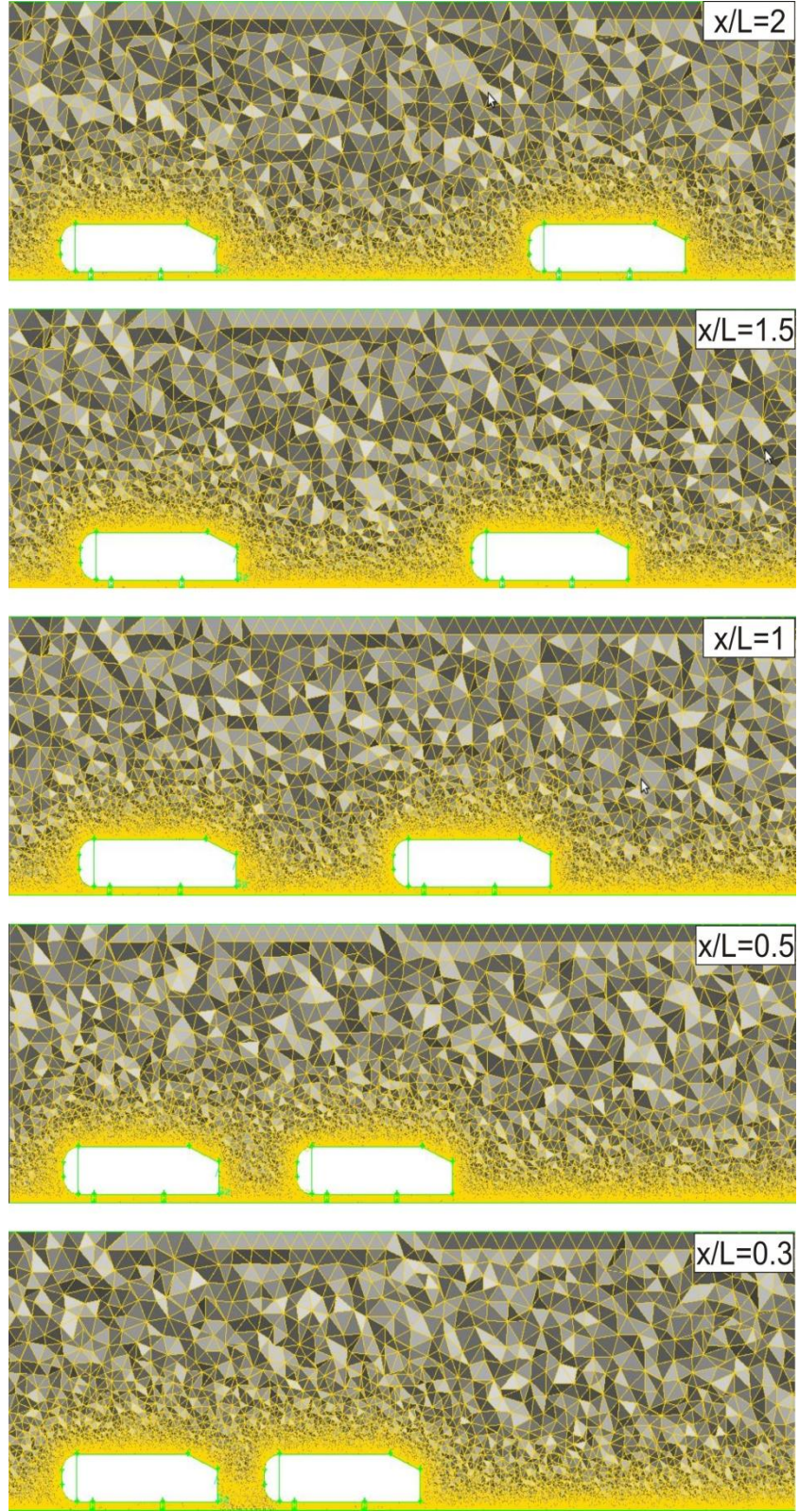
### 3.2.4. Sonlu Elemanlar Hesap Ağı

Tek Ahmed modeli ve ardışık olarak hareket eden ( $x/L = 2, 1.5, 1, 0.5$  ve  $0.3$  pozisyonları için) Ahmed modelinin çözüm bölgesinde sayısal hesap ve deneysel bulguların uyumlu olacağı en uygun sonlu eleman elemanlar ağının oluşturulması için yapılan ön çalışmalar sonucunda Şekil 3.14 ve 3.15'de verilen sonlu eleman ağları oluşturulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere modellere ve tabana yaklaştıkça sıklaşan ve yoğunlaşan, üçgensel elemanlardan oluşan 6 farklı sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur. Serbest kayma etkisi ve zamana bağlı değişen karaktere sahip olması sebebiyle, model

duvarlarında sık bir ağ kullanılması uygun görülmüştür. Çözüm bölgesinin tamamında çok sık ve yoğun bir ağ yapısı kullanmanın sebep olacağı gereksiz hesap yüküne engel olabilmek, fakat katı sınırlar yakınında daha yoğun ağ yapılarına olan yerel ihtiyaçları karşılayabilmek amacıyla sınırlardan  $\Delta_y = 2.9 \text{ mm}$  olan ağ boyutuyla başlayıp her kademedede %20 arttırarak  $\Delta_y = 32 \text{ mm}$ ' lik ağ boyutuna kadar genişleyen bir mesh atılmıştır. Tek Ahmed modeli ve ardışık olarak hareket eden 2 farklı Ahmed modeli için atılan mesh sayısı ortalama 8.900.000 civarındadır. Bu bütün meshlerde 2 adet max çarpıklık oranına ait (Çarpıklık oranı 0.78) mesh bulunmaktadır. Bütün modellere atılan ağlar 64 bitlik Linux işletim sistemine sahip 4GB'lık bir bilgisayarda tek hacme atılmıştır.



**Şekil 3.14** Tek Ahmed modeli etrafındaki sonlu elemanlar ağı



**Şekil 3.15** Ardışık olarak hareket eden 2 farklı Ahmed modeli etrafındaki sonlu elemanlar hesap ağı

## 4. TEK AHMED MODELİ İÇİN BULGULAR VE TARTIŞMA

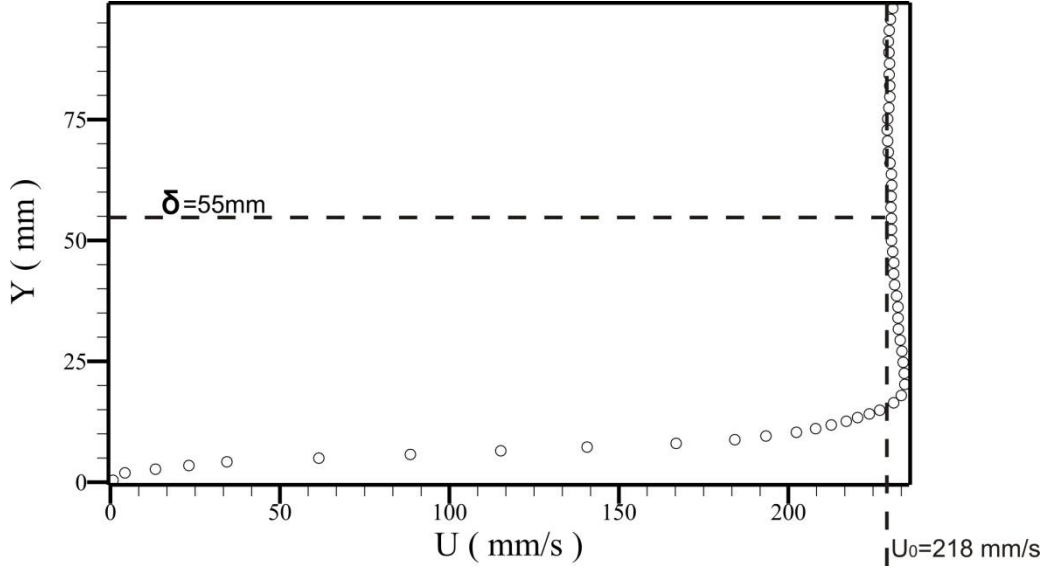
### 4.1 Deneysel Bulgular

Bu bölümde Ahmed Modeli etrafındaki akış yapısı deneysel olarak incelemek üzere bölgedeki akım hızları ölçülmüş ve bu ölçümlerden elde edilen hız vektörleri, akım çizgileri ve eş girdap eğrileri irdelenmiştir. Ayrıca anlık akım hızları ölçümlerinden Ahmed Modelinin arkasındaki vorteks yapısının gelişimi incelenmiştir.

Çalışmada kullanılan akım koşullarına ait serbest akım hızı, Ahmed Modeli yerleştirilecek akım alanında Ahmed modeli olmadan yapılan hız ölçümü ile belirlenmiştir. PIV tekniği kullanılarak elde edilen yatay hızların düşey dağılım grafikleri Şekil 4.1’de verilmiştir. Grafikte akım hızı tabandan belli bir yükseklikte üniforma yaklaştığı görülmektedir. Kanal taban sürtünmesinden etkilenmeyen bu hızlar, serbest akım hızı olarak kabul edilebilir (Price ve ark., 2002). Şekil 4.1’de verilen hız dağılımlarından, serbest akım hızı  $u_0=218$  mm/s olarak belirlenmiştir. Elde edilen serbest akım hızına karşılık gelen, Ahmed Modelinin yüksekliğine bağlı Reynolds sayısı ise  $Re_H= 1.5 \times 10^4$  olarak hesaplanmıştır.

Tabandan yükseklik olarak tanımlanan sınır tabakası kalınlığı bu çalışmada  $Re_H= 1.5 \times 10^4$  için  $\delta=55$ mm olduğu Şekil 4.1’de görülmektedir.



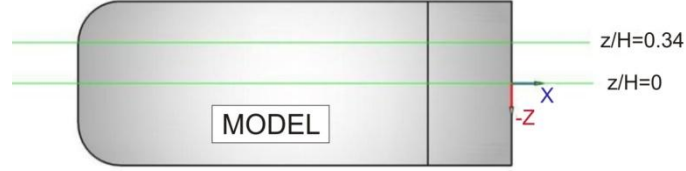


**Şekil 4.1** Ahmed modelinin olduğu noktada, Ahmed modeli olmadan elde edilen hız dağılımı

PIV ölçümlerinde gölgelendirme etkisi en aza indirmek ve model etrafındaki akış yapısını daha hassas olarak incelemek için düşey ekseninde modelin ön ve arka kısmı olmak üzere iki farklı bölgede incelenmiştir. Ayrıca düşey ekseninde bu iki bölge  $z/H=0$  ve  $z/H=0.34$  düzlemlerinde (Şekil 4.2), modelin arka yüzeyine paralel  $x/H= -0.69, -0.47, -0.24, 0, 0.27, 0.54, 0.82, 1.08H, 1.80, 2.72$  olmak üzere on farklı düzlemde incelenmiştir (Şekil 4.6).

Tek Ahmed modeli için elde edilen; akım alanında düşey ekseninin farklı düzlemleri için ortalama hız vektörleri  $\langle v \rangle$ , akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$  ve eş girdap eğrilerinin  $\langle \omega \rangle$  dağılımı Şekil 4.4 ve 4.5’de görülmektedir. Model arka yüzeyine paralel düzlemdeki ortalama hız vektörleri  $\langle v \rangle$ , akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$  ve eş girdap eğrileri  $\langle \omega \rangle$  ise Şekil 4.7, 4.8 ve 4.9’da verilmiştir. Burada kesikli çizgiler negatif (saat yönünde), sürekli çizgiler ise pozitif (saatin tersi yönünde ) girdap dağılımını göstermektedir.

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi düşey eksendeki incelemeler iki farklı düzlemde ve toplamda dört farklı çekimde gerçekleştirilmiştir. Çekilen ön ve arka görüntüler clean vec, tecplot ve corel draw bilgisayar paket programları ile birleştirilmiştir. [Bölüm 3 ]

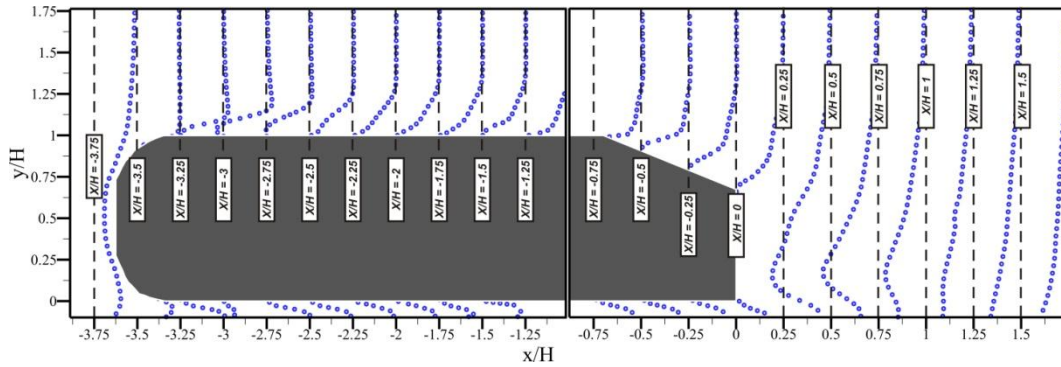


**Şekil 4.2** Ahmed modelinin düşey eksendeki lazer düzlemleri

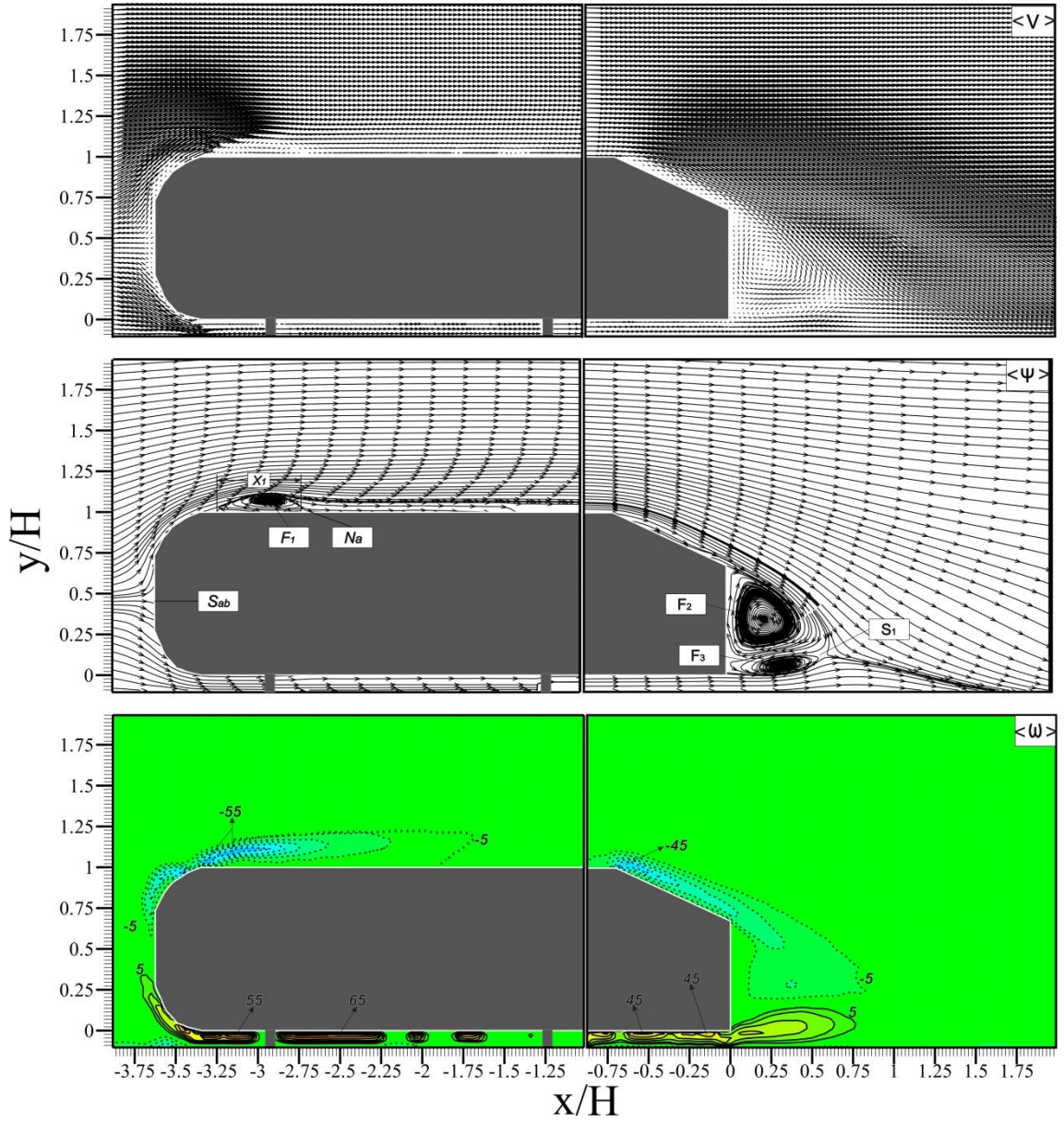
Şekil 4.4 ‘de düşey simetri ekseninde, modelin ön yüzündeki durgunluk noktasından ( $S_{ab}$ ) yukarı doğru yönelen akış, modelin ön üst köşesinden ayrılarak model üzerinde ayrılmış bir akış bölgesi oluşturmuştur. Bu ayrılmış akış bölgesi, model ön yüzünden  $x=0.91H$  mesafesindeki  $N_a$  noktasına kadar genişlemektedir. Ayrılmış akış bölgesinin kalınlığı  $y_1= 0.12H$ , genişliği ise  $x_1=0.51H$  kadardır.  $F_1$  noktası model ön yüzünden  $0.7H$  uzaklıktadır. Model arkasındaki  $25^0$  eğimli yüzeyde akış ayrılması tespit edilmemiştir. Model arkasındaki akış alanında (wake bölgesi) birbiri üzerinde ters yönde dönen, simetrik olmayan çevrinti çifti açıkça görülmektedir. Saat yönünde dönen çevrinti model arkasında daha büyük bir alanı kaplamaktadır. Şekil 4.4’de ki hız vektörleri  $\langle v \rangle$  ve akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$ , dağılımından model arka yüzeyine doğru yönelen ters akış ve model arka yüzeyindeki yukarı ve aşağıya doğru yönelmiş akış görülebilmektedir. Kara taşıtlarının arkasındaki ayrılmış akış bölgesinin büyüklüğünün araçlara etkileyen direnç kuvvetinde önemli rol oynadığı bilinmektedir [32]. Model arkasındaki ayrılmış akış bölgesi model arka yüzeyinden  $x=0.6H$  mesafesindeki  $S_1$  noktasına kadar genişlemektedir. [Bu değer daha önce Krajnovic ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarda  $0,60H-0,65H$  aralığında belirlenen değerlere uyumludur]  $S_1$  noktası plaka yüzeyinden  $y=0.29H$  yükseklikindedir.  $F_2$  ve  $F_3$  noktasının koordinatları sırasıyla  $x_2= 0.23H$ ,  $y_2= 0.34H$  ve  $x_3= 0.34H$ ,  $y_3= 0.059H$  dir. Şekil 4.3’te

düsey simetri eksenini için hız profilleri verilmiştir. Ahmed modelinin etrafındaki üç adet akış ayrılması ve buna bağlı ters akışlar hız profillerinde de görülmektedir.

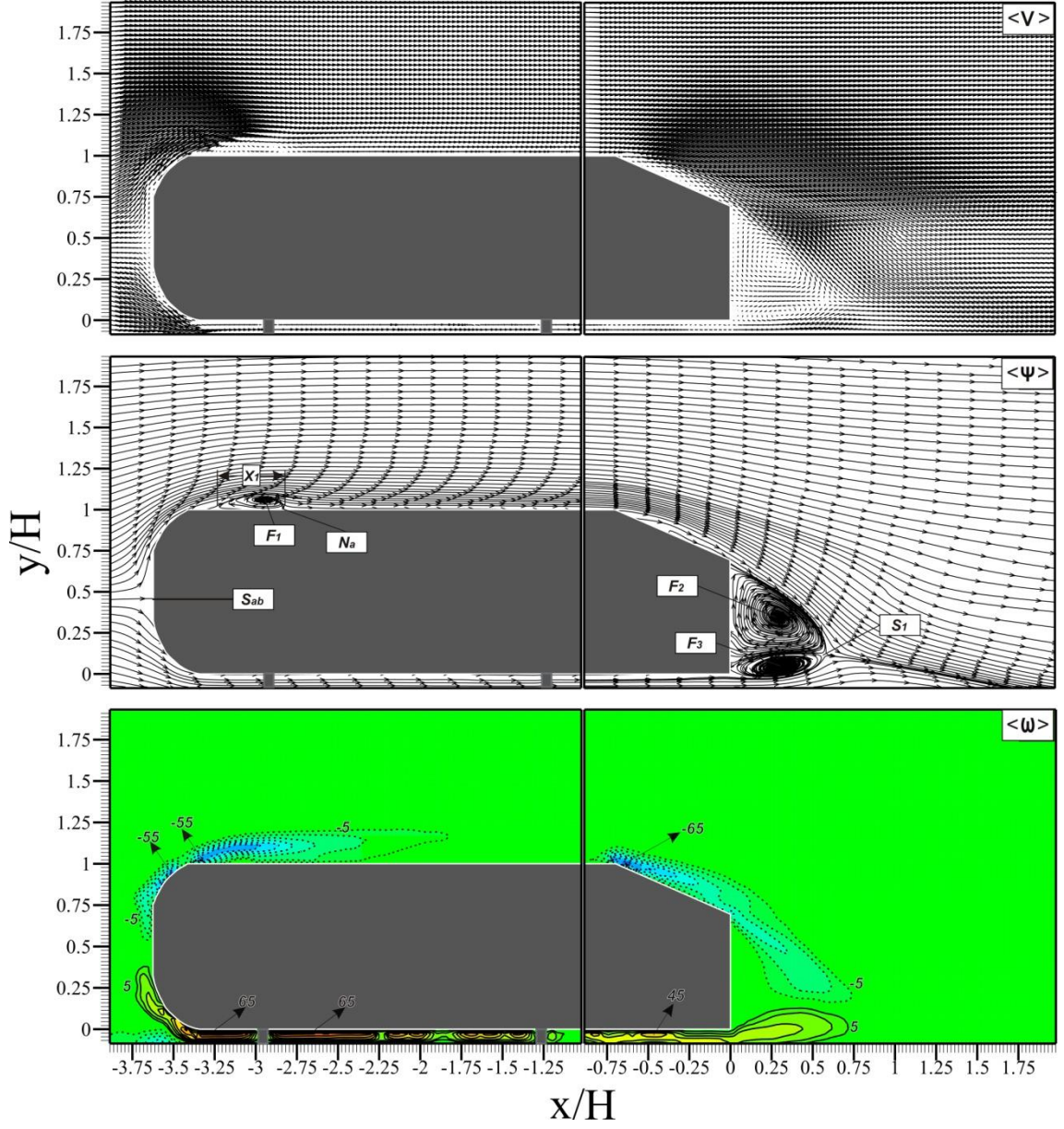
Şekil 4.5 'de ise düsey ekseninde  $z/H=0.34$  düzleminde, modelin ön yüzeyindeki durgunluk noktasından ( $S_{ab}$ ) yukarı doğru yönelen akış, bu düzlemde de model üzerinde ( $F_1$ ) ayrılmış akış bölgesini oluşturmaktadır. Bu ayrılmış akış bölgesi, model ön yüzeyinden  $x=0.8H$  mesafesindeki  $N_a$  noktasına kadar genişlediği tespit edilmiştir. Ayrılmış akış bölgesinin kalınlığı  $y_1=0.10H$ , genişliği ise  $x_1=0.39H$  kadardır.  $F_1$  noktası model ön yüzeyinden  $0.67H$  uzaklıktadır. Model arkasındaki akış alanında da birbiri üzerinde ters yönde dönen, simetrik olmayan çevrinti çifti açıkça görülmektedir. Saat yönünde dönen çevrinti model arkasında daha büyük bir alanı kaplamaktadır. Şekil 4.5'de ki hız vektörleri  $\langle v \rangle$  ve akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$ , dağılımından model arka yüzeyine doğru yönelen ters akış ve model arka yüzeyindeki yukarı ve aşağıya doğru yönelmiş akış görülebilmektedir. Model arkasındaki ayrılmış akış bölgesi model arka yüzeyinden  $x=0.57H$  mesafesindeki  $S_1$  noktasına kadar genişlemektedir.  $S_1$  noktası plaka yüzeyinden  $y=0.29H$  yüksekliktedir.  $F_2$  ve  $F_3$  noktasının koordinatları sırasıyla  $x_2=0.29H$ ,  $y_2=0.34H$  ve  $x_3=0.30H$ ,  $y_3=0.038H$  dır.



Şekil 4.3  $z/H=0$  kesitinde Ahmed modeli etrafındaki deneysel hız profilleri



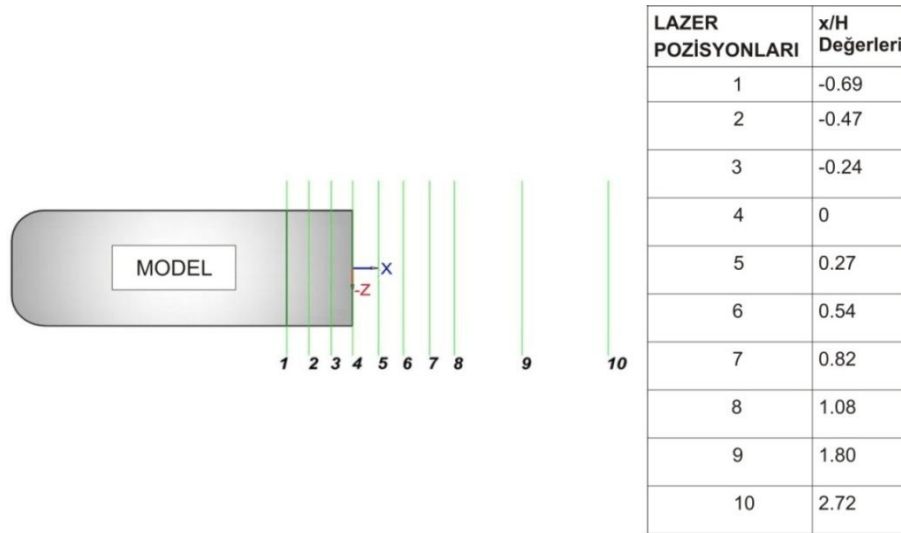
**Şekil 4.4**  $z/H=0$  düzleminde Ahmed modeli etrafındaki akış yapısının iki boyutlu; zaman ortalamalı hız vektörleri  $\langle v \rangle$ , akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$  ve eş girdap eğrileri  $\langle \omega \rangle$ , dağılımı ( $\langle \omega \rangle_{\min} = \pm 5 \text{ s}^{-1}$ ,  $\Delta \langle \omega \rangle = 10 \text{ s}^{-1}$ )



**Şekil 4.5**  $z/H=0.34$  düzleminde Ahmed modeli etrafındaki akış yapısının iki boyutlu; zaman ortalamalı hız vektörleri  $\langle v \rangle$ , akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$  ve eş girdap eğrileri  $\langle \omega \rangle$ , dağılımı ( $\langle \omega \rangle_{\min} = \pm 5 \text{ s}^{-1}$ ,  $\Delta \langle \omega \rangle = 10 \text{ s}^{-1}$ )

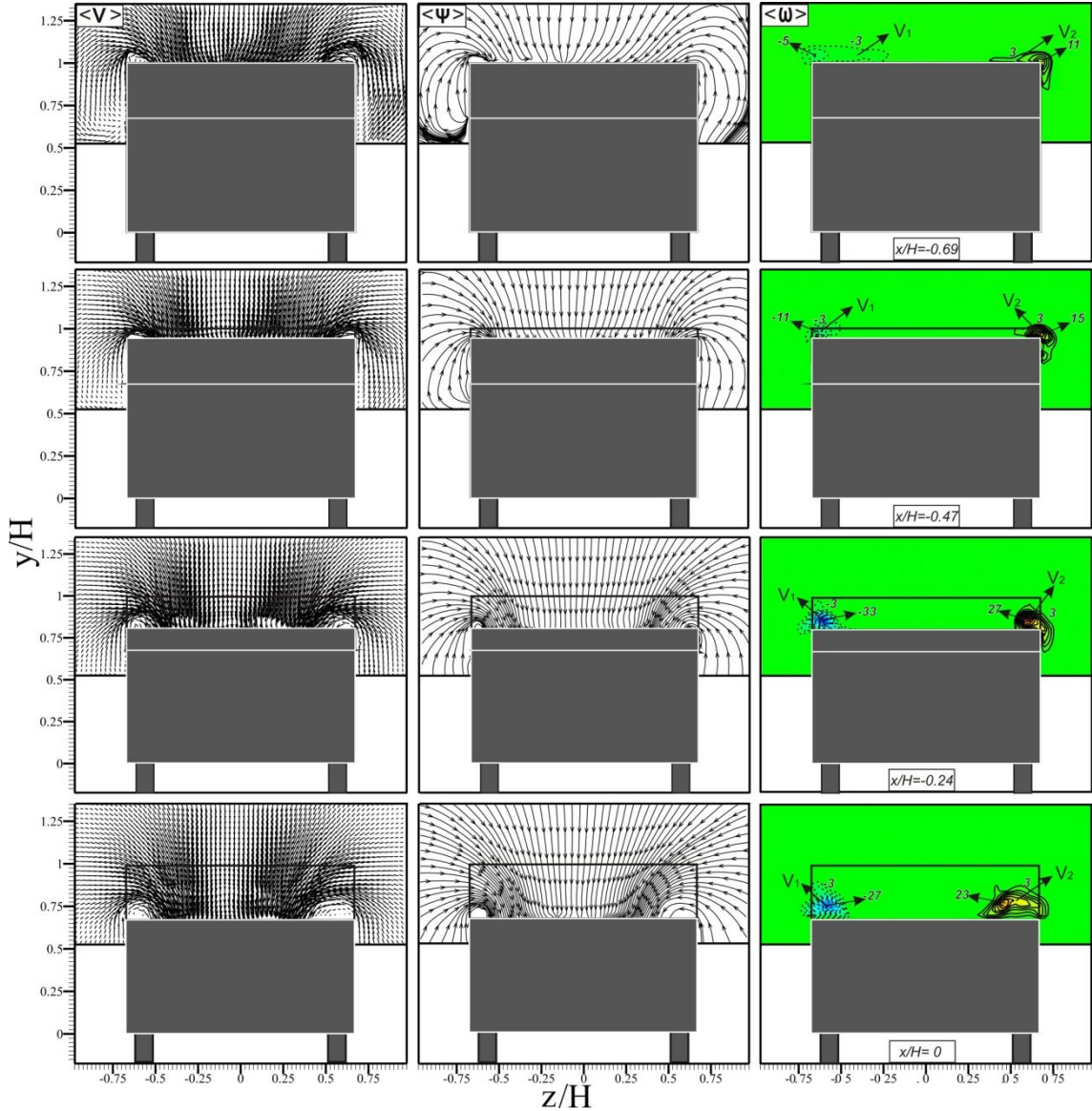
Burada Ahmed modelinin düşey ekseninde, iki farklı düzlemde incelemeler yapılmıştır. Modelin ön kısmında bir adet ( $F_1$ ), arka akış bölgesinde ise iki adet ( $F_2$ ,  $F_3$ ) akış ayrılması tespit edilmiştir. Bu düzlemlerdeki girdap merkezleri, durma noktaları, ayrılmış akım genişlikleri ve kalınlıkları verilmiştir. Ahmed modelinin ön üst bölgesinde oluşan  $F_1$  girdabının düzlemlere göre merkez noktaları, ayrılmış akım genişlikleri ve kalınlıkları ile durma noktaları verilerine bakılarak bu girdabın simetri ekseninden model yüzeyine doğru ilerledikçe küçüldüğü görülmektedir. Model arkasındaki akış ayrılma alanında birbiri üzerinde ters yönde dönen  $F_2$  ve  $F_3$  girdaplarının düzlemlere göre merkez koordinatları ve durma bölgesi verilerine bakılarak kesitlere göre farklılık gösterdiği tespit edilmiştir.  $F_2$  girdabının; simetri düzleminde Ahmed modelinin arkasından itibaren uzaklığı yaklaşık olarak modelin yüksekliğinin 0.23 katı iken  $z/H=0.34$  düzlemindeki uzaklığı 0.29 H olmuştur.  $F_2$  girdabının merkez noktası model yüzeyine yaklaştıkça x yönünde ilerlemesine rağmen bu girdabın boyutları küçülmektedir ve girdap dairesel bir yapıdan daha basık bir yapıya dönüşmektedir. Fakat  $F_3$  girdabının; merkez noktası  $z/H=0.34$  kesitinde modelin arka yüzeyine yaklaşmakta ve bu girdabın boyutu küçülmektedir.

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi model arka yüzeyine paralel ekseninde on farklı düzlemde çekimler yapılmış ve deney analizi yapılarak sonuçlar Şekil 4.7, 4.8 ve 4.9'da verilmiştir.



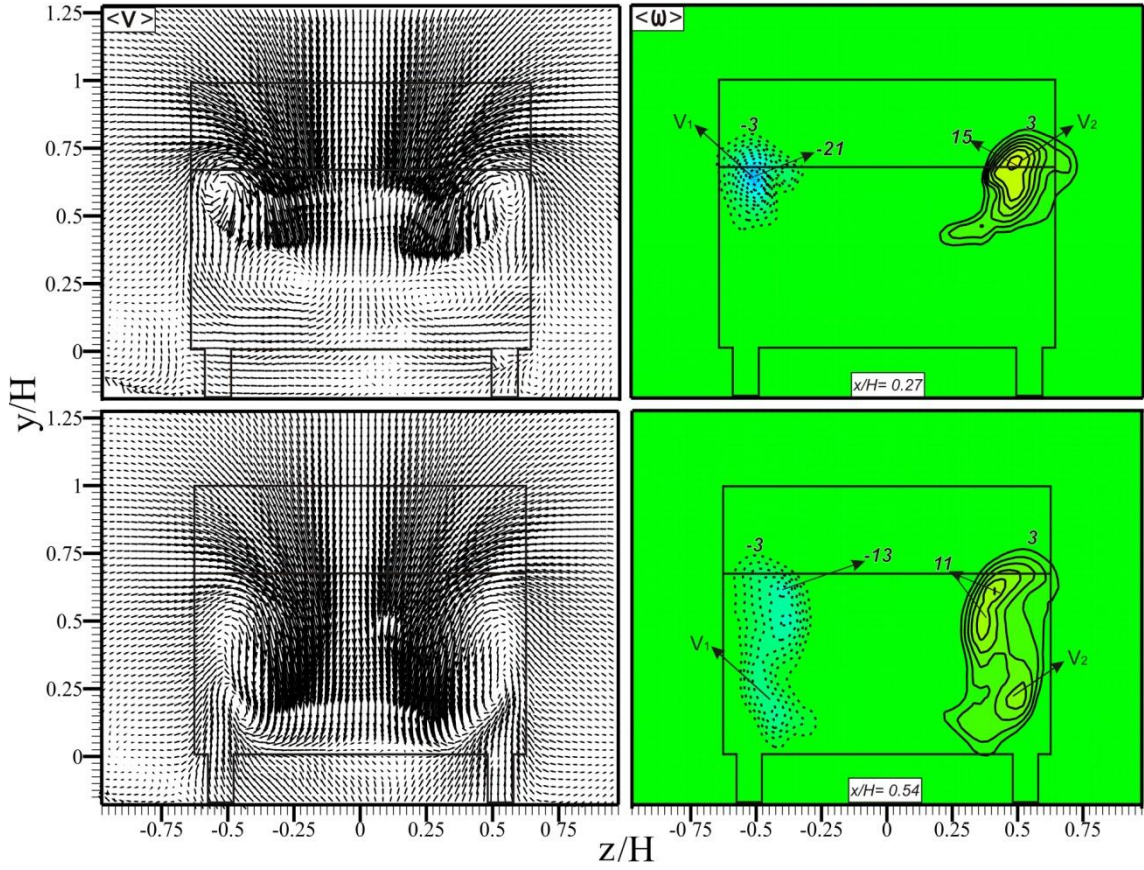
Şekil 4.6 Ahmed modelinin arka yüzeyine paralel eksenindeki lazer düzlemleri

Şekil 4.7’de model arka yüzeyine paralel  $x/H = -0.69, -0.47, -0.24$  ve  $0$  düzlemlerindeki ortalama hız  $\langle v \rangle$ , akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$  ve eş girdap eğrileri  $\langle \omega \rangle$  dağılımı görülmektedir. Şekildeki tüm akış alanlarında model arkasındaki eğimli yüzeyin oluşturduğu, modelin yan yüzeylerinden başlayıp eğimli yüzey üzerinde son bulan birbirine ters yönde yaklaşık olarak  $270^\circ$  dönen iki adet çevrintinin etkin olduğu açıkça görülmektedir. Çevrintilerin akış yönünde büyüdükleri akış yönündeki düzlemler boyunca akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$  ve eş girdap eğrilerinden  $\langle \omega \rangle$  görülmektedir.



Şekil 4.7 Model arka yüzeyine paralel düzlemlerde Ahmed modeli etrafındaki akış yapısının iki boyutlu; zaman ortalamalı hız vektörleri  $\langle v \rangle$ , akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$  ve eş girdap eğrileri  $\langle \omega \rangle$ , dağılımı ( $\langle \omega \rangle_{\min} = \pm 3 \text{ s}^{-1}$ ,  $\Delta \langle \omega \rangle = 2 \text{ s}^{-1}$ )

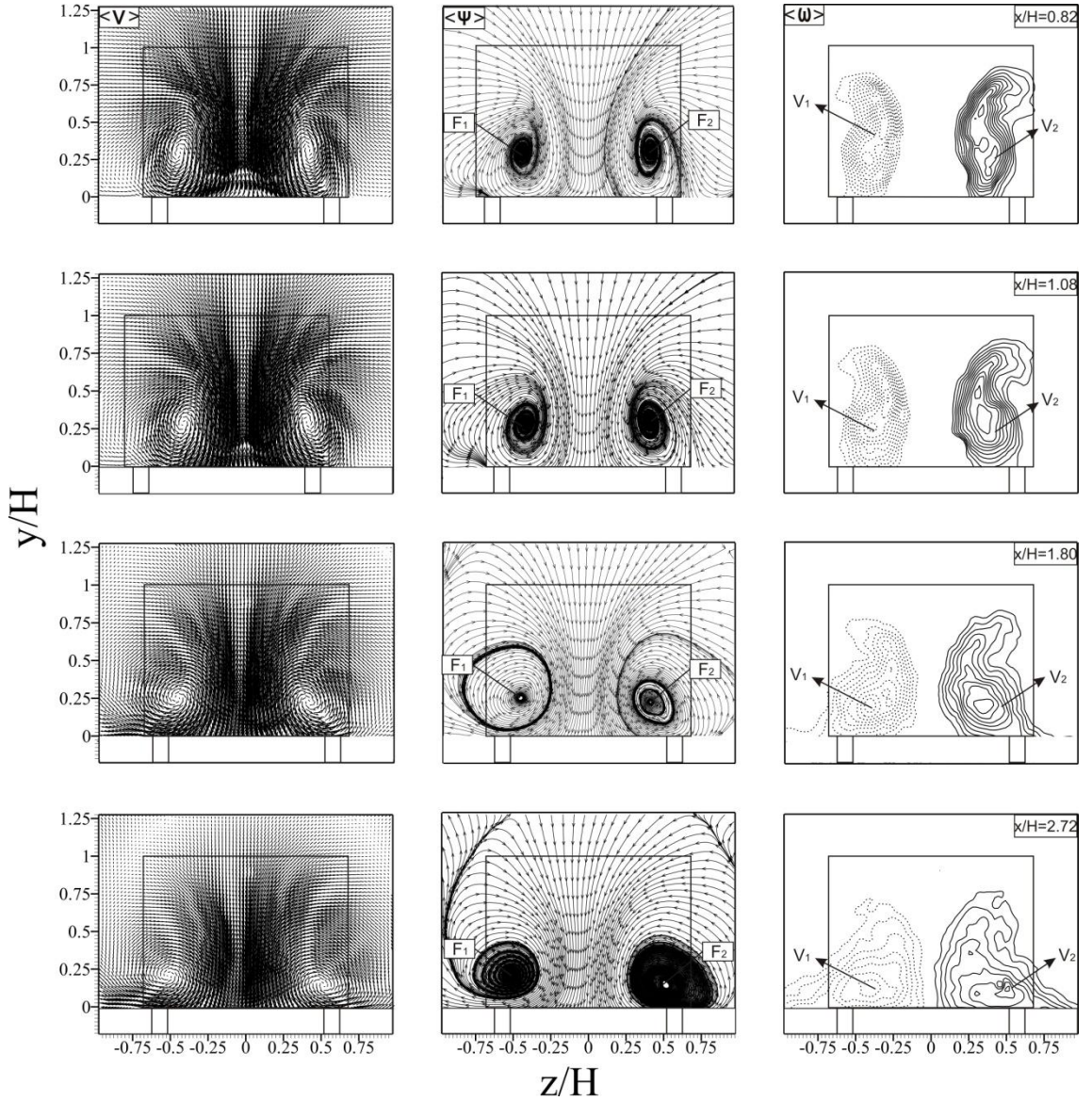
Şekil 4.8’de model arka yüzeyine paralel  $x/H= 0.27$  ve  $0.54$  düzlemlerindeki ortalama hız  $\langle v \rangle$  ve eş girdap eğrilerinin  $\langle \omega \rangle$  dağılımı görülmektedir. Şekildeki tüm akış düzlemlerinde Şekil 4.7’de anlatılan model arkasındaki eğimli yüzeyin oluşturduğu iki adet çevrinti  $x/H= 0.27$  düzleminde hareketini tamamladığı ve akış yönünde ilerledikçe  $x/H= 0.54$  düzleminde girdabın boyutsal olarak büyüdüğü gözlemlenmiştir.  $V_1$  ve  $V_2$  olarak adlandırılan girdapların bu boyutsal olarak büyümesi Şekil 4.8’de eş girdap eğrilerinin  $\langle \omega \rangle$  dağılımında daha net görülmektedir. Ayrıca girdaplardaki büyümenin etkisi ile maksimum hızlarda bir azalma tespit edilmiştir.



**Şekil 4.8** Model arka yüzeyine paralel düzlemlerde Ahmed modeli etrafındaki akış yapısının iki boyutlu; zaman ortalamalı hız vektörleri  $\langle v \rangle$  ve eş girdap eğrileri  $\langle \omega \rangle$  dağılımı ( $\langle \omega \rangle_{\min} = \pm 3 \text{ s}^{-1}$ ,  $\Delta \langle \omega \rangle = 2 \text{ s}^{-1}$ )



Şekil 4.9’da model arka yüzeyine paralel  $x/H = 0.82, 1.08, 1.82, 2.72$  düzlemlerindeki ortalama hız vektörleri  $\langle v \rangle$ , akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$  ve eş girdap eğrilerinin  $\langle \omega \rangle$  dağılımı görülmektedir. Şekildeki akış alanlarında model arkasındaki eğimli yanal yüzeylerin oluşturduğu birbirine göre ters yönde dönen iki adet güçlü çevrinti bu düzlemlerde de tespit edilmiştir.



**Şekil 4.9** Model arka yüzeyine paralel düzlemlerde Ahmed modeli etrafındaki akış yapısının iki boyutlu; zaman ortalamalı hız vektörleri  $\langle v \rangle$ , akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$  ve eş girdap eğrileri  $\langle \omega \rangle$ , dağılımı ( $\langle \omega \rangle_{\min} = \pm 2 \text{ s}^{-1}$ ,  $\Delta \langle \omega \rangle = 1 \text{ s}^{-1}$ )

Şekil 4.7, 4.8 ve 4.9’da çevrinti merkezleri akış yönünde aşağı doğru ilerleyerek modelin yerleştiği plaka yüzeyine yaklaşmaktadır. Çevrinti merkezi F1’in plakaya olan düşey mesafesi  $x/H= 0.27$  için  $y1= 0.6H$ ,  $x/H=0.82$  için  $y1=0.21H$ ,  $x/H= 1.08$  için  $y1= 0.17H$ ,  $x/H=1.80$  için  $y1= 0.05H$  ve  $x/H= 2.72$  için  $y1= -0.05H$  değerindedir. Çevrinti çiftlerinin ( F1 ve F2 ) merkezlerinin birbirine olan mesafeleri ise  $x/H= 0.27$  için  $z= 1.06H$ ,  $x/H=0.82$  için  $z=0.90H$ ,  $x/H= 1.08$  için  $z= 0.86H$ ,  $x/H=1.80$  için  $z1= 0.82H$  ve  $x/H= 2.72$  için  $z1= 0.80H$  değerindedir. Bütün düzlemlerde çevrinti çifti arasındaki aşağı doğru yönlenmiş akış alanı açıkça görülmektedir. Verilerden de anlaşıldığı üzere akış yönünde ilerledikçe girdap çifti basıklaşıp yayılarak model sınırlarının dışına doğru genişlemekte ve birbirine yaklaşmaktadır. Son düzlemde ise girdap merkezleri modelin ayakları seviyesine kadar inmektedir.

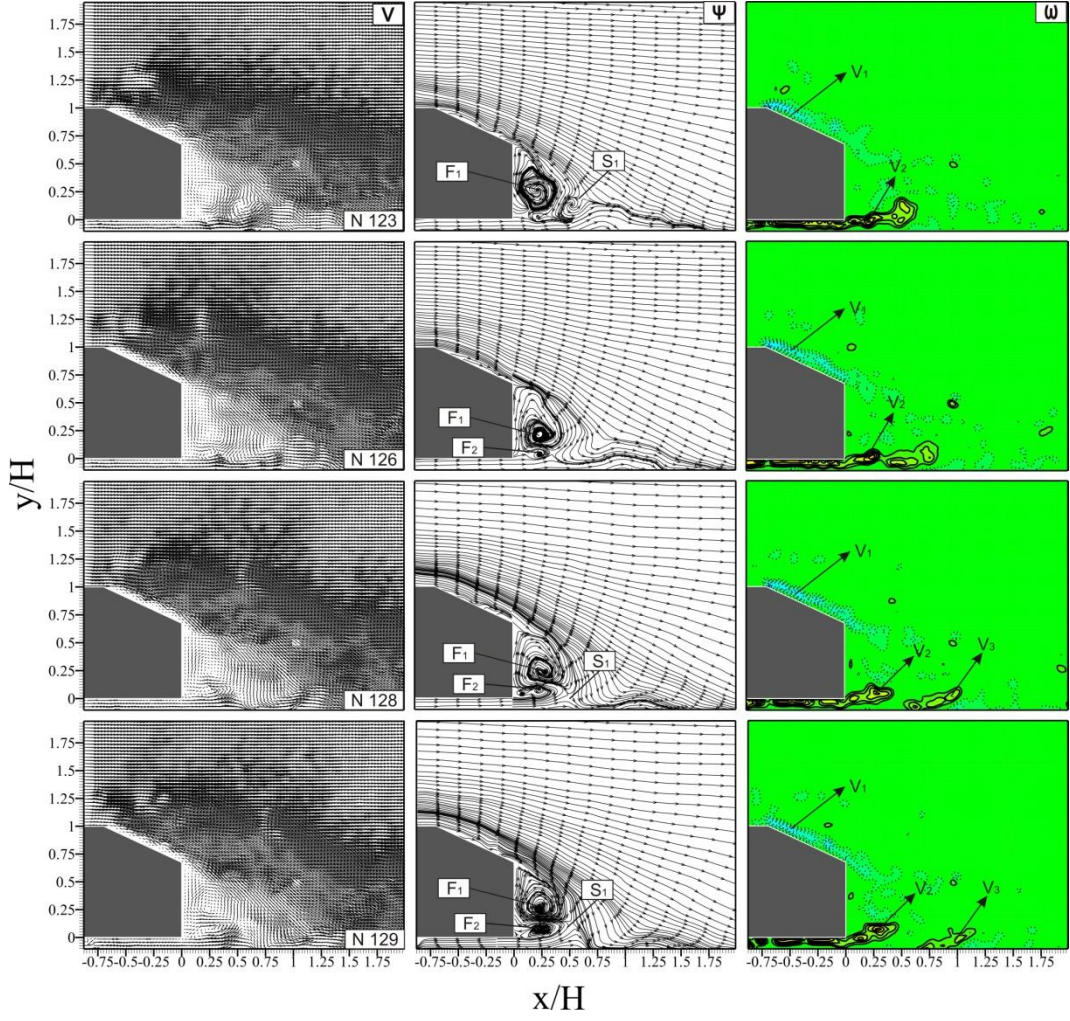
Modelin arka yüzeyine paralel eksende genel akış yapısı olarak akış yönünde ilerledikçe akışın aşağıya doğru hareket ederek genişlediği ve girdap merkezlerinin birbirine yaklaştığı görülmektedir.

Akım alanındaki zamansal ortalama sonuçlar, akımın genel yapısı hakkında bilgiye sahip olmak için yeterli görülse de, model etrafındaki akımın zamana göre değişen bir karaktere sahip olması sebebiyle, anlık akım görünüşleri önem kazanmaktadır. Özellikle akımın simetrik görünümünün bozulmasına neden olan model arkasındaki vorteks kopması oluşumunun belirlenebilmesi için anlık akım görüntülerini incelemek gerekmektedir.

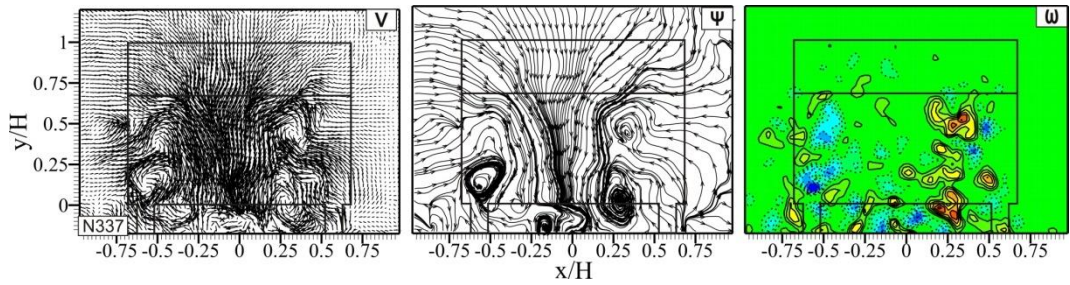
PIV ölçüm yönteminin üstünlüklerinden biri de ölçüm yapılan akış alanının tümüne ait anlık görüntülerin elde edilebilmesidir. Her ne kadar tamamen aynı görüntüye sahip olmasalar da, kendilerinden önce ve sonra gelen akım çizgilerinin görüntülerindeki benzerlikler göz önüne alınarak Şekil 4.10’da anlık akım görüntülerinin aynı resmin farklı zamandaki tekerrüründen ibret olduğu anlaşılmaktadır. Girdap içerisinde oluşan çok sayıdaki küçük girdapların akışın üç boyutlu olduğunun bir göstergesidir. Zaman ortalaması alınmış girdaplarda bu küçük ölçekli pozitif ve negatif çalkantı değerleri birbirlerini elimine etmektedir ve Şekil 4.4’deki gibi düzgün bir yapı oluşturmaktadır.

Şekil 4.10'da düşey simetri ekseni olan  $z/H=0$ 'da model arkasındaki anlık hız vektörleri  $v$ , akım çizgileri  $\psi$  ve eş girdap eğrilerinin  $\omega$ , dağılımı görülmektedir. Burada N elde edilen 350 adet anlık görüntü içerisinde seçilen anlık görüntünün sayısını göstermektedir. Model arkasındaki akış yapısı oldukça düzensizdir. Akış alanlarının gelişimi ve birbirleriyle olan etkileşimi açıkça görülmektedir. N 123'de eğimli yüzeyin alt köşesinden ayrılarak saat yönünde dönen akış alanının etkin olduğu görülmektedir. N 126'dan başlayarak model alt arka köşesinden ayrılarak saatin tersi yönde dönen akış alanının gelişimi gözlemlenebilir. Üst kısımdaki negatif girdap ( $V_1$ ) model eğik yüzeyinden ayrılmayarak akış yönünde uzamaktadır. Bu girdaptan kopan girdap parçacıklarının alt kısımdaki pozitif girdap ( $V_2$ ) ile etkileştiği görülmektedir. Bu girdap etkileşimlerinin modele dinamik yükler uygulayabileceği düşünülmektedir. Pozitif girdap ( $V_2$ ) akış yönünde ilerleyerek uzamakta ( N 123 ve 126 ) ve kopmaktadır ( $V_3$ , N 128 ve 129). Elde edilen anlık görüntülerde modelin yerleştiği plaka yüzeyinin neden olduğu negatif girdap parçacıkları da gözlemlenmiştir. Akışın plaka yüzeyine birleşme noktasının akış boyunca plaka yüzeyinde ileri – geri kararsız olarak hareket ettiği görülmektedir.

Şekil 4.11'de Ahmed modelinin arka yüzeyine paralel eksendeki  $x=1.08H$  düzlemindeki anlık hız vektörleri  $v$ , akım çizgileri  $\psi$  ve eş girdap eğrileri  $\omega$ , dağılımı verilmiştir. Anlık akış alanının ortalama akış alanından oldukça farklı olduğu ve ortalama akış alanındaki girdap çiftinin birçok anlık girdaptan meydana geldiği görülmektedir. Akış alanına ait 350 adet anlık görüntüden elde edilen animasyonlarda negatif ve pozitif girdapların birbirleriyle etkileşimi görülmektedir.

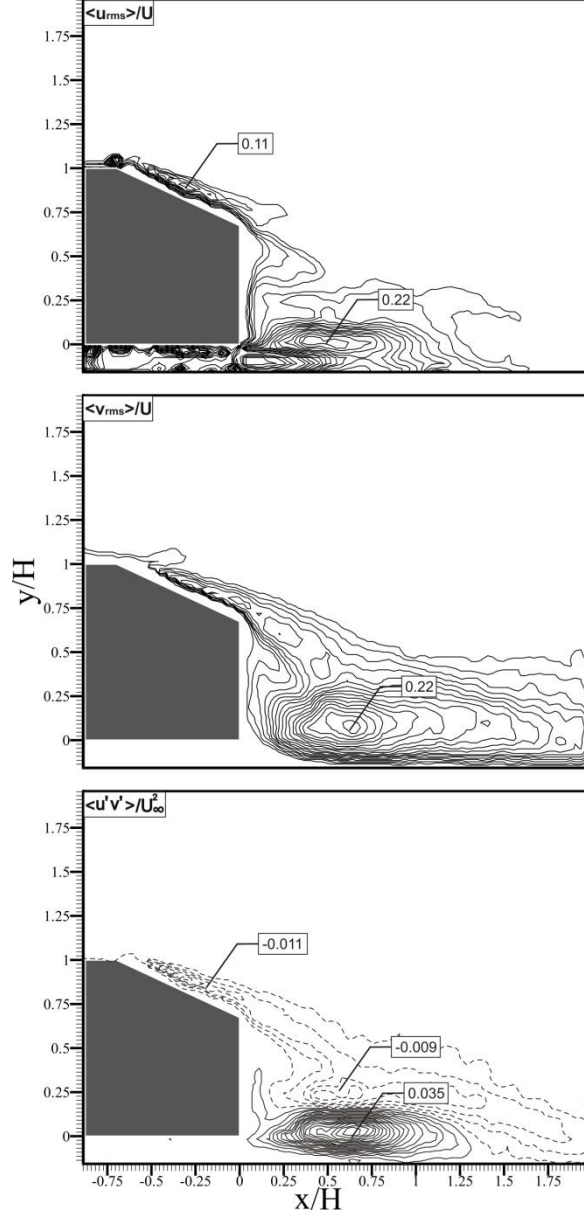


**Şekil 4.10** Ahmed modeli düşey simetri eksenindeki akış yapısının iki boyutlu; anlık hız vektörleri  $v$ , anlık akım çizgileri  $\psi$  ve anlık girdap  $\omega$  eş düzey eğrileri dağılımı ( $\omega_{\min}=\pm 10 \text{ s}^{-1}$ ,  $\Delta\omega=10 \text{ s}^{-1}$ )



**Şekil 4.11:** Ahmed modeli arka yüzeyine paralel eksenindeki akış yapısının iki boyutlu; anlık hız vektörleri  $v$ , anlık akım çizgileri  $\psi$  ve anlık girdap  $\omega$  eş düzey eğrileri dağılımı ( $\omega_{\min}=\pm 10 \text{ s}^{-1}$ ,  $\Delta\omega=10 \text{ s}^{-1}$ )

Şekil 4.12’de düşey simetri eksenini  $z=0$ ’da Ahmed modeli arkasındaki ortalama hız çalkantı şiddetleri  $\langle u_{rms} \rangle / U$  (akış yönündeki çalkantı hız bileşeninin karekök ortalaması),  $\langle v_{rms} \rangle / U$  (akışa dik yöndeki çalkantı hız bileşeninin karekök ortalaması) ve Reynolds gerilmesi,  $\langle u'v' \rangle / U^2$  dağılımları görülmektedir. Burada çalkantı şiddetleri serbest akım hızı,  $U$  ve Reynolds gerilmesi serbest akım hızının karesi,  $U^2$  ile boyutsuzlaştırılmıştır. Akış yönündeki yüksek çalkantı alanlarının modelin eğimli yüzeyinde ve model arkasında, plaka yüzeyine yakın bölgede olduğu görülmektedir. Model eğimli yüzeyindeki ve model arkasındaki maksimum  $\langle u_{rms} \rangle / U$  değerleri sırasıyla 0.11 ve 0.22 dir. Akışa dik yöndeki çalkantı dağılımı,  $\langle v_{rms} \rangle / U$  akış yönündeki,  $\langle u_{rms} \rangle / U$  dağılımıyla benzerlik gösterse de model arkasında daha uzun ve geniş bir alanı kaplamaktadır. Maksimum  $\langle v_{rms} \rangle / U$  değeri 0.22 dir. Şekil 4.12’de model arkasında, simetrik olmayan Reynolds gerilmesi,  $\langle u'v' \rangle / U^2$  dağılımı açıkça görülmektedir. Kesik çizgilerle gösterilen negatif Reynolds gerilmesi model eğik yüzeyinden başlayarak model arkasında yayılarak daha büyük bir alanı kaplarken sürekli çizgilerle gösterilen pozitif Reynolds gerilmesi alanı  $x/H=1.3$ ’e kadar genişlemektedir. Pozitif Reynolds gerilmesi alanının negatif alana göre daha yoğun olduğu görülmektedir. Maksimum mutlak negatif ve pozitif Reynolds gerilmesi değerleri sırasıyla 0.011 ve 0.035 dir.

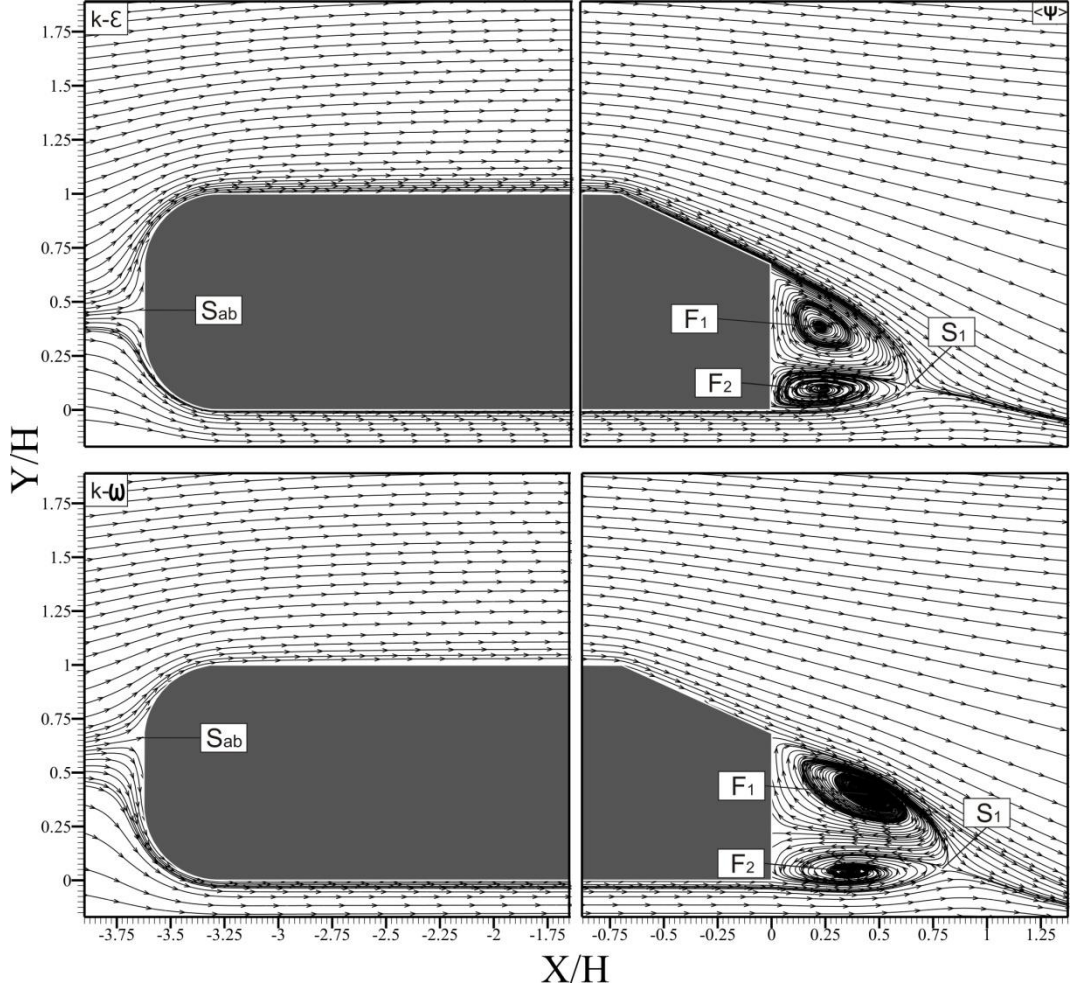


**Şekil 4.12:**Düşey simetri eksenini  $z/H=0$ 'da akış yönündeki hız çalkantıları  $\langle u_{rms} \rangle / U$ , akışa dik yöndeki hız çalkantıları  $\langle v_{rms} \rangle / U$  ve Reynolds gerilmesi  $\langle u'v' \rangle / U^2$ , dağılımı. ( $[\langle u_{rms} \rangle / U]_{min}=0.08$ ,  $\Delta \langle u_{rms} \rangle / U=0.01$ ,  $[\langle v_{rms} \rangle / U]_{min}=0.04$ ,  $\Delta \langle v_{rms} \rangle / U=0.01$ ,  $[\langle u'v' \rangle / U^2]_{min}=\pm 0.02$ ,  $\Delta \langle u'v' \rangle / U^2=0.02$ )

## 4.2. Sayısal Bulgular ve Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması

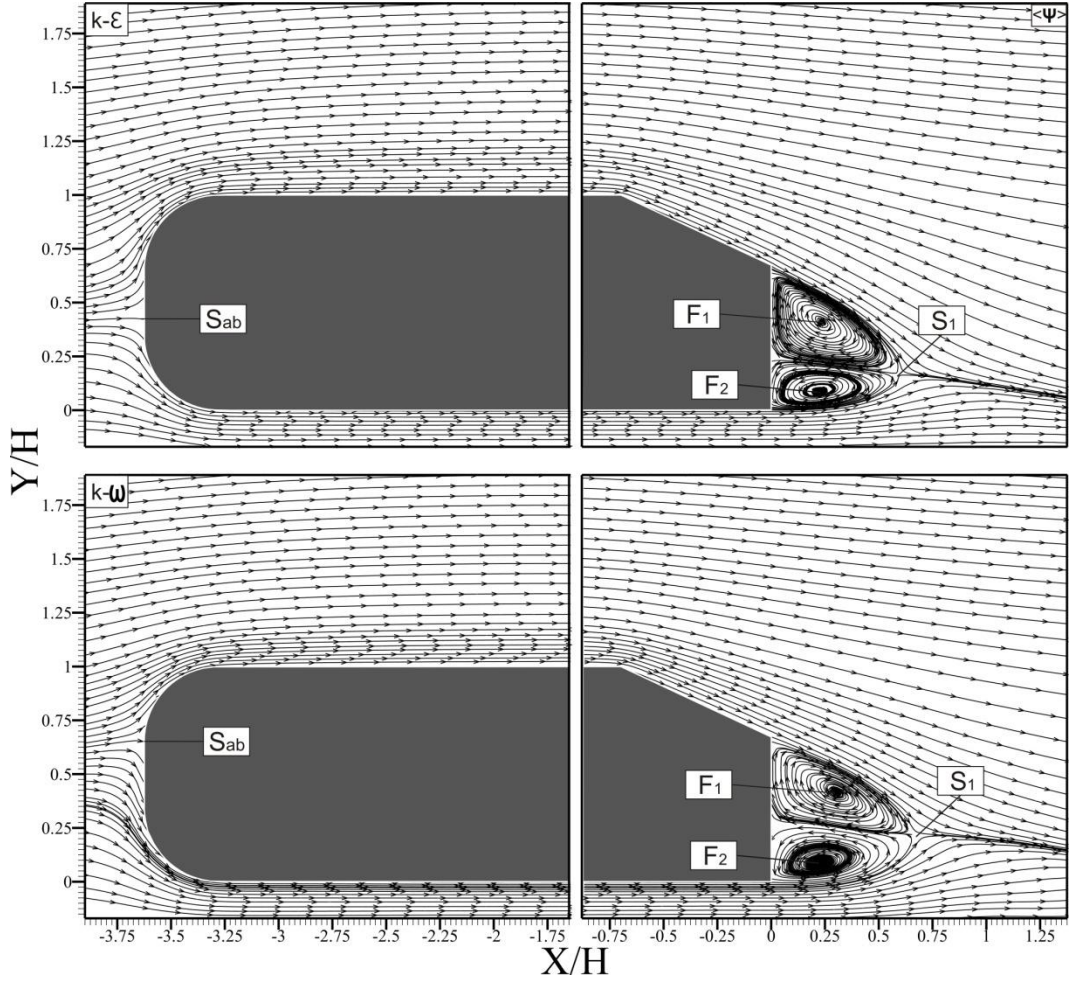
Bu bölümde tek Ahmed modeli  $Re_H = 1.5 \times 10^4$  için model etrafındaki akım alanı steady akım koşullarına göre sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel şartları ile aynı geometri ve boyutlara sahip olacak şekilde oluşturulan sayısal hesaplama bölgesi ve sonlu elemanlar hesap ağı Bölüm 3’de verilmiştir. Hesap ağının oluşturulmasında katı yüzeylere doğru daha sık mesh atılarak katı sıvı etkileşimindeki belirsizliklerin en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca hesap bölgesinin en önemli yerini oluşturan model üzerine yakın ve modelden etkilenen akım bölgelerinde ağ yapısında eleman sayısı artırılmıştır. Böylece hesapta hassasiyet gerektiren, modele yakın elemanların boyutları istenilen ölçüde elde edilmiştir. Modelden etkilenen akım bölgelerinde üniform eleman boyutları kullanılarak elde edilen ağ yapısı için  $k-\varepsilon$  ve  $k-\omega$  türbülans modellerinin akım alanına etkisi incelenmiş, elde edilen sayısal veriler deneysel bulgular ile karşılaştırılmıştır.

Düzenli akım kabulü ile model etrafında yapılan hesaplamalar sayesinde elde edilen teorik akım çizgileri Şekil 4.13, 4.14’de verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi, model arkasında iki farklı türbülans modeli ile elde edilen akım çizgileri hem kendi aralarında hem de Şekil 4.4 ve 4.5’te verilen tek Ahmed modelinin düşey ekseninde  $z/H=0$  ve  $z/H=0.34$  düzlemlerindeki deneysel bulgularla şekilsel olarak bir uyum içerisindedir. Şekillerde, bu uyum model ön üst bölgedeki ayrılma noktasında bir bozulma eğilimi göstermesine rağmen model arkasındaki akım bölgesinde uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Şekil 4.13 ve 4.14’de verilen akım çizgileri incelendiğinde, farklı türbülans modellerinin model etrafındaki ayrılma noktalarının yerlerini ve ayrılma bölgesinin geometrisini etkilediği belirlenmiştir.



**Şekil 4.13**  $z/H=0$  düzleminde Ahmed modeli etrafındaki akış yapısının  $k-\epsilon$  ve  $k-\omega$  türbülans modellerine göre iki boyutlu; zaman ortalamalı akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$  dağılımı





**Şekil 4.14**  $z/H=0.34$  düzleminde Ahmed modeli etrafındaki akış yapısının  $k-\epsilon$  ve  $k-\omega$  türbülans modellerine göre iki boyutlu; zaman ortalamalı akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$  dağılımı

Şekil 4.13 ve 4.14'den, k-ε metodu ile elde edilen model arka tarafındaki durma noktası yerinin ( $S_1$ ), k-ω metodu ile elde edilen ( $S_1$ ) durma noktasına göre modele daha yakın bir noktada olduğu ve model ön yüzündeki akım ayrılma noktasının ( $S_{ab}$ ) ise k-ε metodunda simetriye daha yakın olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.4 ve 4.5'teki deneysel akım çizgilerinden,  $S_1$  durma noktası model arka yüzeyinden;  $z/H=0$  düzleminde  $0.6H$ ,  $z/H=0.34$  düzleminde  $0.57H$  kadar uzaklıktadır. Bu değerler teorik bulgularda ise k-ε metodu ile sırası ile  $0.63H$  ve  $0.58H$  iken k-w metodunda  $0.78H$  ve  $0.65H$  değerlerindedir. Ayrıca model ön tarafındaki durma noktasında deneysel bulgulara k-ε türbülans modeli daha uyumlu sonuç vermiştir.

Farklı türbülans modelleri kullanarak hesaplanan model arkasındaki ayrılmış akış verileri koordinatları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

**Çizelge 4.1** Deneysel ve teorik bulgular tablosu

	Düşey Eksendeki Düzlemler	$S_1$ Durma Noktası Merkezinin Model Arka Yüzeyinden Uzaklığı (Boyutsuz)	F1 Girdap Merkezi (Boyutsuz)	F2 Girdap Merkezi (Boyutsuz)	Girdap Merkezlerinin Birbirine Olan Düşey Uzaklığı (Boyutsuz)
Deneysel	$z/H=0$	$0.6H$	( $0.23H, 0.34H$ )	( $0.30H, 0.06H$ )	$0.28H$
k-ε		$0.63H$	( $0.23H, 0.38H$ )	( $0.24H, 0.09H$ )	$0.31H$
k-ω		$0.78 H$	( $0.46H, 0.40H$ )	( $0.36H, 0.03H$ )	$0.37 H$
Deneysel	$z/H=0.34$	$0.57H$	( $0.29H, 0.34H$ )	( $0.3H, 0.04H$ )	$0.3H$
k-ε		$0.59H$	( $0.23H, 0.41H$ )	( $0.22H, 0.08H$ )	$0.33H$
k-ω		$0.66H$	( $0.3H, 0.41H$ )	( $0.22H, 0.09H$ )	$0.32H$

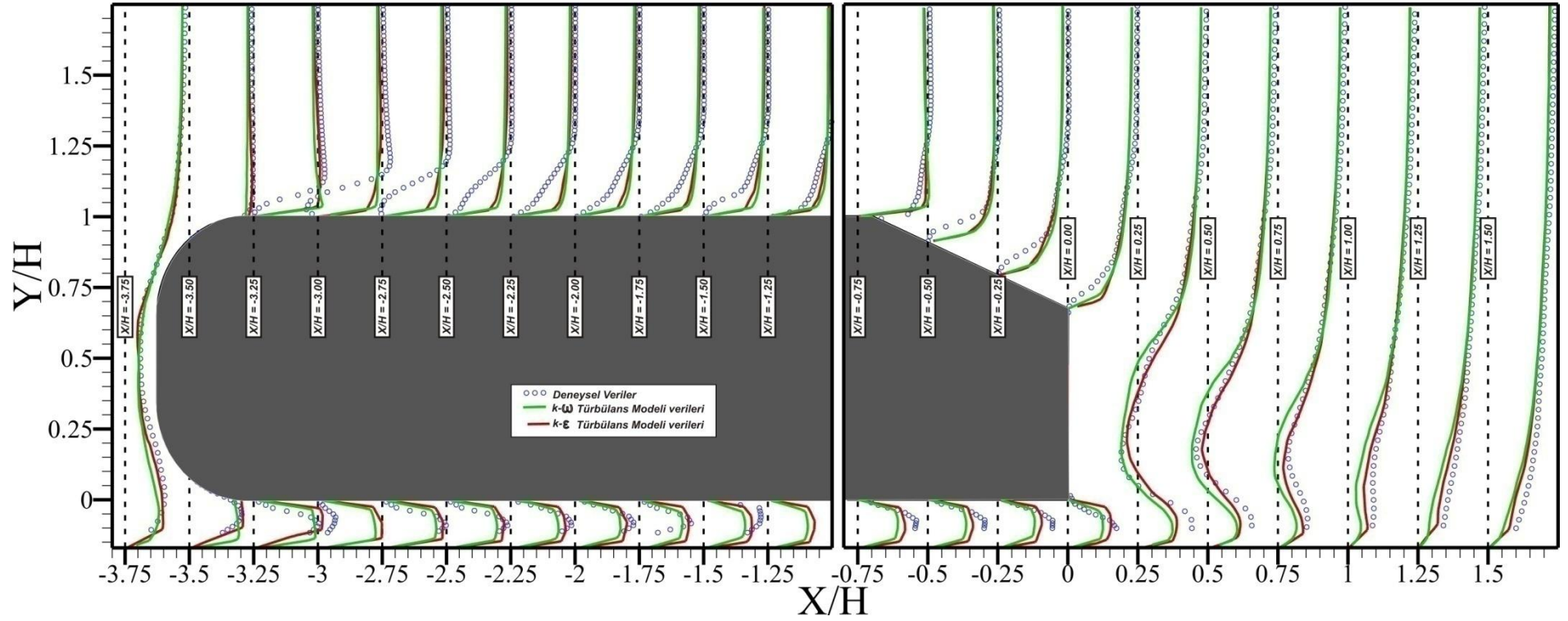
Çizelge 4.1'de türbülans modelleri değiştikçe model arkasındaki ayrılma bölgesinin de değiştiği açıkça görülmektedir. Bu çizelgedeki  $S_1$  değerleri incelendiği zaman her iki düzlem için de k-ω türbülans modelinin ayrılma bölgesi genişliği, k-ε türbülans modelindeki ayrılma bölgesi genişliğinden daha fazla olduğu açıkça

görülmektedir. Ayrıca girdap merkezlerinin koordinatları incelendiğinde k-ε modeli ile hesaplanan girdap merkezlerinin yatay ve düşey uzunluklarının ve girdap merkezlerinin arasındaki mesafenin deneysel bulgularla daha uyumlu olduğu belirlenmiştir.

İki farklı türbülans modeli kullanarak elde edilen model etrafındaki 21 farklı kesitte,  $x/H = (-3.75, -3.5, -3.25, -3, -2.75, -2.50, -2.25, -2, -1.75, -1.50, -1.25, -0.75, -0.50, -0.25, 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1, 1.25 \text{ ve } 1.50)$ , teorik ve deneysel hız dağılımları Şekil 4.15'te verilmiştir. Şekillerden, model arkasındaki akış alanlarında deneysel ve teorik hız dağılımlarının birbiriyle uyumlu olduğu, modelin eğimli yüzeyinin üst kısmında uyumun kısmen bozulduğu ve modelin ön üst akış ayrılma bölgesinde ise bu türbülans modellerinin uygun olmadığı görülmektedir.

Farklı türbülans modelleri ile elde edilen akış ayrılma yerleri ve model arka akış bölgesindeki değişimler hız dağılımlarına da yansımaktadır.  $x/H = -3.25$  düzleminden  $x/H = -2.5$  düzlemine kadar ve eğimli yüzey üzerinde deneysel bulgularda serbest akış hızına göre negatif hız gradyanları tespit edilmiştir. Ayrıca teorik ve deneysel bulgularda model arkasında  $x/H = 0.25, 0.50 \text{ ve } 0.75$  kesitlerinde de girdapların oluştuğu hız gradyanları da görülmektedir.

İki farklı türbülans modeli ile düzenli akım durumu için elde edilen teorik yatay hız dağılımları incelendiğinde, hız dağılımlarının hesaplanmasında, iki model içinde en zayıf olanının k- $\omega$  türbülans modeli olduğu ve k-ε türbülans modeli kullanarak elde edilmiş olan hız dağılımlarının deneysel verilere en yakın sonuçları verdiği tespit edilmiştir.



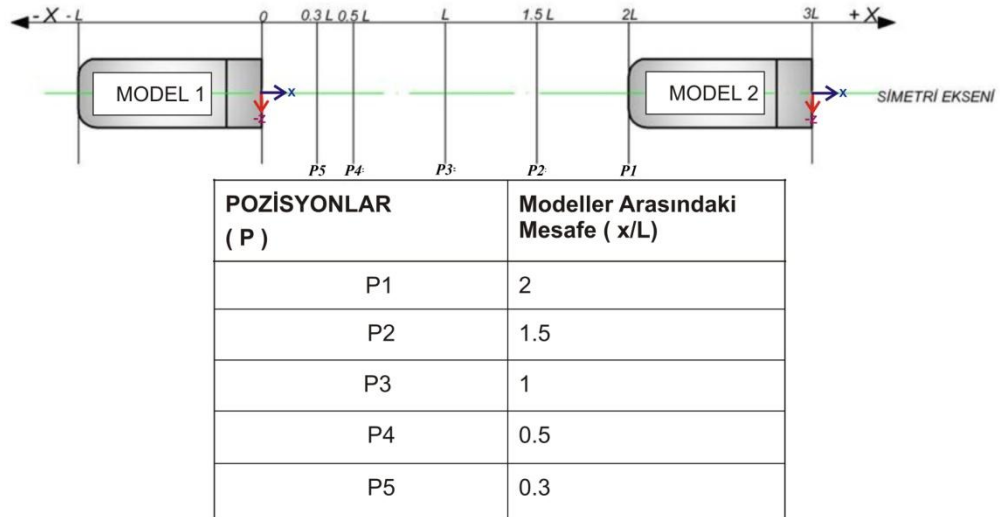
Şekil 4.15 Farklı türbülans modelleri ve PIV yöntemi ile elde edilen model etrafındaki akış yapısının hız dağılımlarının değişimi

## 5. ARDIŞIK KONUMLANMIŞ AHMED MODELİ İÇİN BULGULAR VE TARTIŞMA

### 5.1 Deneysel Bulgular

Bu bölümde Ahmed modelinin ardışık olarak hareketi sonucu iki model arasındaki akış yapısı deneysel olarak incelemek üzere bölgede akım hızları ölçülmüş ve bu ölçümlerden elde edilen ortalama hız vektörleri  $\langle v \rangle$ , akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$  ve eş girdap eğrilerinin  $\langle \omega \rangle$  dağılımı irdelenmiştir. Ayrıca anlık akım hızları ölçümlerinden Ahmed Modelinin arkasındaki vorteks yapısının gelişimi incelenmiştir.

Şekil 5.1’de gösterildiği üzere modeller arasındaki mesafe  $x/L = 2, 1.5, 1, 0.5, 0.3$  olmak üzere beş farklı pozisyon için dikey eksende iki farklı düzlemde ölçümler yapılmıştır.



Şekil 5.1 Ardışık Ahmed modellerinin deney konumları

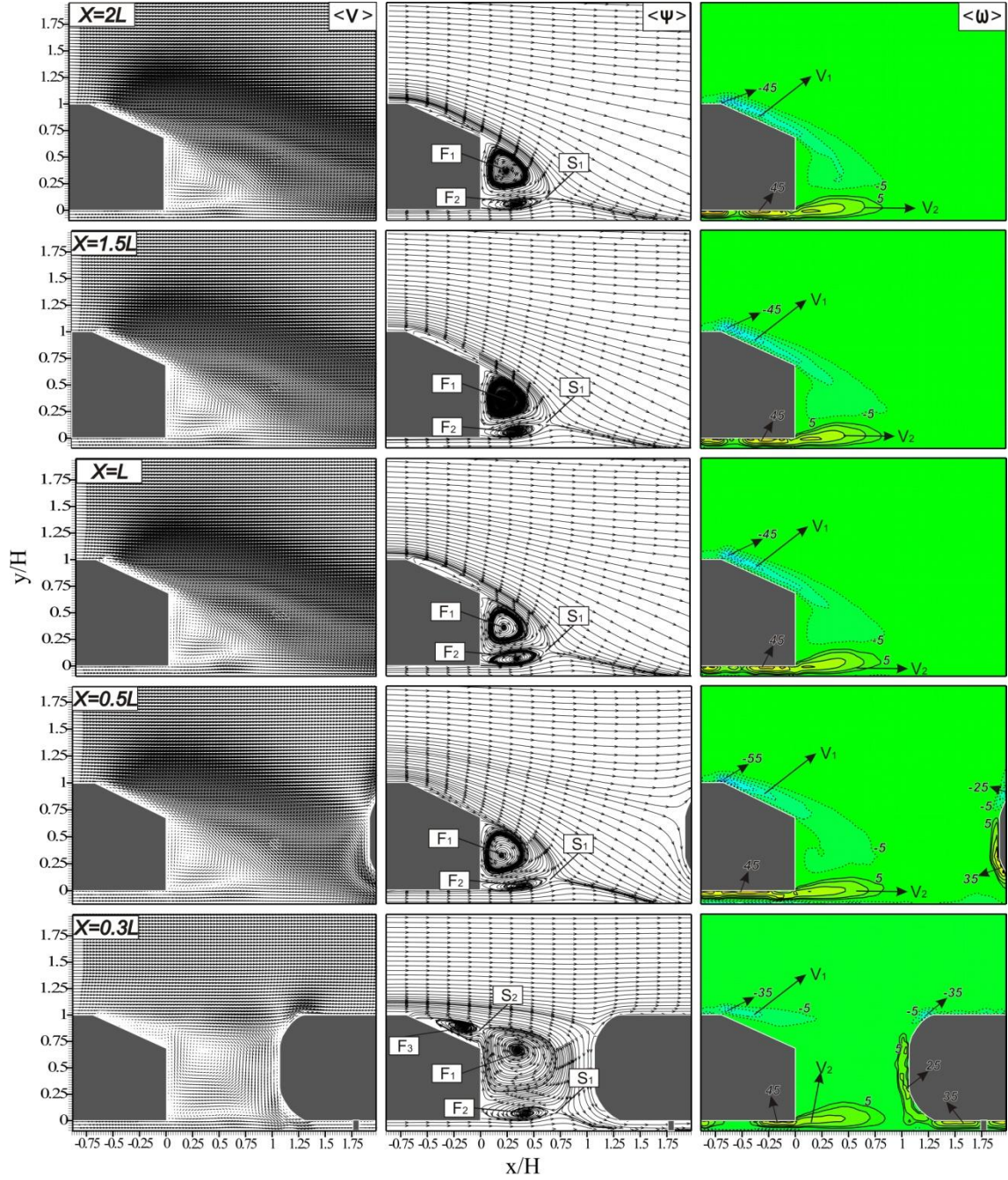
Bütün pozisyonlar için serbest akım hızı  $u_0=218$  mm/s olarak belirlenmiştir. Elde edilen serbest akım hızına karşılık gelen, Ahmed modelinin yüksekliğine bağlı Reynolds sayısı ise  $Re_H= 1.5 \times 10^4$  olarak hesaplanmıştır. Düşey ekseninde her pozisyon için  $z/H=0$  ve  $z/H=0.34$  düzlemlerinde çekimler yapılmıştır.

Şekil 5.2’de pozisyonlara göre Model 1 ile Model 2 arasında kalan akış bölgesinin (Şekil5.1) düşey simetri eksenindeki ( $z/H=0$ ) ortalama hız vektörleri  $\langle v \rangle$ , akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$  ve eş girdap eğrileri  $\langle \omega \rangle$ , dağılımı verilmiştir.

İki model arasındaki mesafenin  $x=2L$  olduğu pozisyonda model eğimli yüzey üzerinde akış ayrılması gözlenmemişse de bu yüzeyde eğimin başladığı noktadan itibaren ortalama hız vektörleri  $\langle v \rangle$  ve akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$  dağılımından eğimli yüzeyden yukarıya doğru yönelmiş akış görülebilmektedir. Bu akış yönelmesini iki araç arasındaki mesafenin  $x=1.5L$ ,  $x=L$  ve  $x=0.5L$  pozisyonlarında da görmekteyiz. Modeller arasındaki mesafenin  $x=0.3L$  olduğu pozisyonda bu akış yönelmesi  $F_3$  olarak adlandırılan ayrılmış akış bölgesini oluşturmuştur. Bu ayrılmış akış bölgesi Model 1’in arka yüzeyinden itibaren eğimli yüzeyin üzerinde  $-0.62H$  kadar bir mesafede başlamış ve koordinatları  $x_3=-0.16H$   $y_3=0.88H$  olan  $F_3$  ayrılmış akış bölgesini oluşturmuştur. Bu  $F_3$  girdabının genişliği  $0.42H$  kadardır ve model arka yüzeyinden itibaren  $0.008H$  mesafedeki  $S_2$  durma bölgesine kadar genişlemektedir.

Bütün pozisyonlarda düşey simetri ekseninde model arkasındaki akış alanında birbiri üzerinde ters yönde dönen simetrik olmayan çvrinti çifti açıkça görülmektedir. Saat yönünde dönen çvrinti (Negatif Girdap) model arkasında daha büyük bir alanı kaplamaktadır. Şekil 5.2’deki ortalama hız vektörleri  $\langle v \rangle$  ve akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$  dağılımından model arka yüzeyine doğru yönelen ters akış ve model arka yüzeyinde yukarı ve aşağıya doğru yönelmiş akış görülmektedir. Modeller arasındaki mesafenin;  $x=2L$ ,  $x=1.5L$  ve  $x=L$  olduğu pozisyonlarda model arkasındaki ayrılmış akış bölgesi model arkasından itibaren  $0.61H$  mesafedeki  $S_1$  noktasına,  $x=0.5L$  olduğu pozisyonda model arkasındaki ayrılmış akış bölgesi model arkasından  $0.64H$  mesafedeki  $S_1$  noktasına,  $x=0.3L$  olduğu pozisyonda model arkasındaki ayrılmış akış bölgesi model arkasından itibaren  $0.7H$  mesafedeki  $S_1$  noktasına, kadar genişlemektedir.

$F_1$  girdabının merkez koordinatları ve genişliği [ $x_1=0.24H$ ,  $y_1=0.34H$  ve genişliği Model 1'in arka yüzeyinden itibaren  $0.64H$  kadardır] ile  $F_2$  girdabının merkez koordinatları ve genişliği [ $x_2=0.34H$ ,  $y_2=0.056H$  ve genişliği model 1'in arka yüzeyinden itibaren  $0.61H$  kadardır] modeller arasındaki mesafe  $x=2L$ 'den  $x=L$ 'ye kadar olan pozisyonlarda sabittir. Modeller arasındaki mesafe  $x=0.5L$  iken  $F_1$  girdabı [Merkez koordinatları  $x_1=0.19H$  ve  $y_1=0.32H$  ve girdap genişliği  $0.67H$ ] arkadan gelen modelin etkisi ile öndeki modele yaklaşmış, plakaya doğru hareket etmiş ve genişlemiştir.  $F_2$  girdabı ise [Merkez koordinatları  $x_2=0.39H$  ve  $y_2=0.04H$  ve girdap genişliği  $0.63H$ ] öndeki modelden uzaklaşmış ve daha da uzamıştır. Modeller arasındaki mesafe  $x=0.3L$  olan pozisyonda ise  $F_1$  girdabı [Merkez koordinatları  $x_1=0.34H$  ve  $y_1=0.66H$  ve girdap genişliği  $0.85H$  kadardır] diğer pozisyonlara göre daha basıklaşıp genişlemiştir ve bu girdabın merkezi öndeki modelden uzaklaşıp yukarıya doğru hareket etmiştir.  $F_1$  girdabı Model 1'in (Şekil 5.1) arkasından itibaren  $0.85H$  mesafesine kadar genişlemiştir.  $F_2$  girdabında ise [Merkez koordinatları  $x_2=0.42H$  ve  $y_2=0.02H$  ve girdap genişliği  $0.69H$ ] şekilsel bir değişiklik gözlemlenmemesine rağmen, girdap merkezi öndeki modelden uzaklaşmış ve modelin üzerinde durduğu plakaya doğru ilerleme yapmıştır. Ayrıca  $F_2$  girdabı bu pozisyonda diğer pozisyonlara göre daha da geniştir.



**Şekil 5.2** Düşey simetri eksenini  $z/H=0$ 'da modeller arasındaki zaman ortalama hız vektörleri  $\langle \mathbf{v} \rangle$ , akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$  ve eş girdap eğrileri  $\langle \omega \rangle$  ( $\langle \omega \rangle_{\min} = \pm 5 \text{ s}^{-1}$ ,  $\Delta \langle \omega \rangle = 10 \text{ s}^{-1}$ ) dağılımı



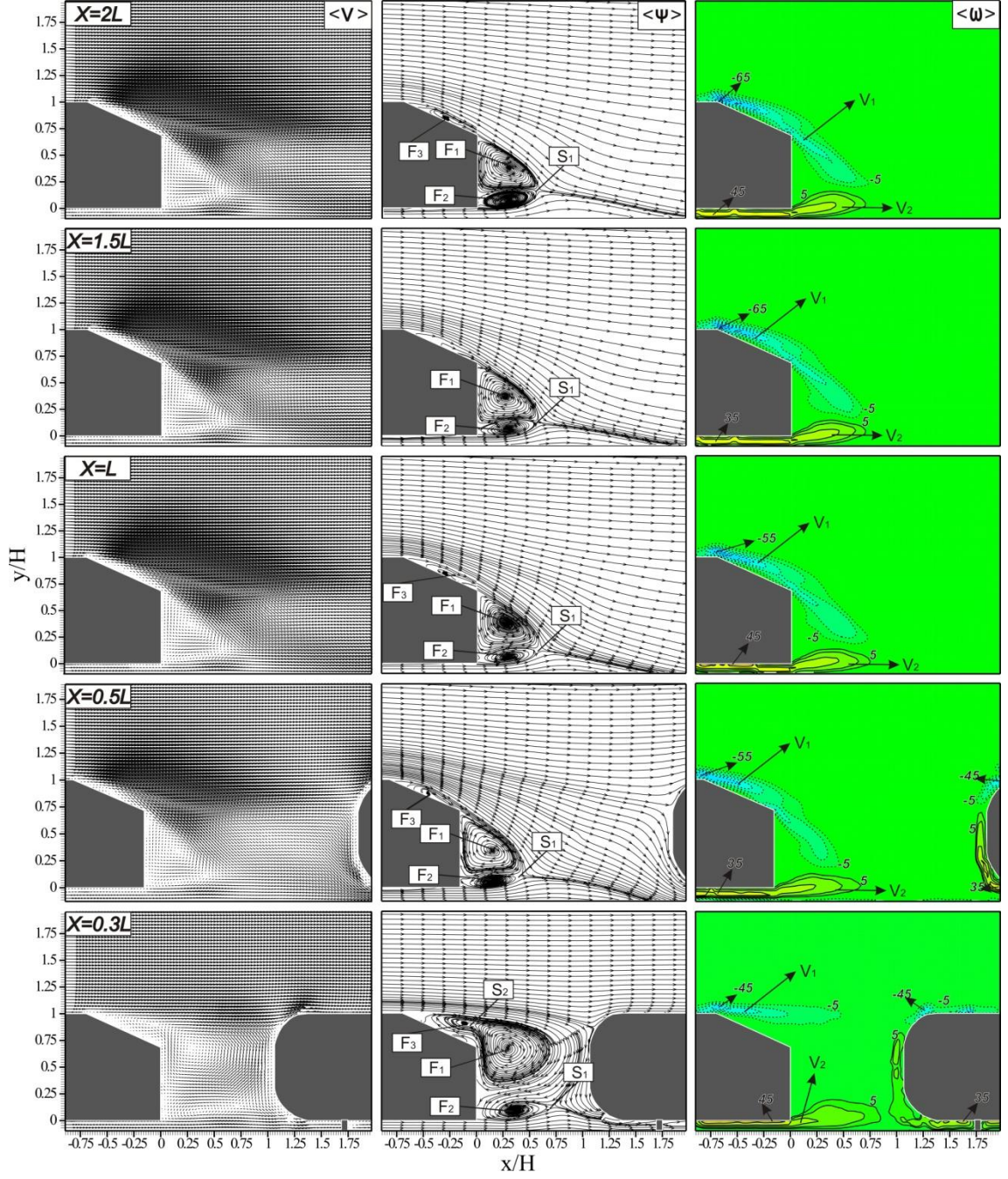
Şekil 5.3’de pozisyonlara göre Model 1’in (Şekil 5.1) düşey ekseninde  $z/H=0.34$  düzlemindeki ortalama hız vektörleri  $\langle v \rangle$ , akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$  ve eş girdap eğrileri  $\langle \omega \rangle$ , dağılımı verilmiştir.

İki model arasındaki mesafenin  $x=2L$  olduğu pozisyonda Model arkasında eğimli yüzey üzerinde akış ayrılması gözlenmiştir. Bu şekilde ortalama hız vektörleri  $\langle v \rangle$  ve akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$  dağılımından eğimli yüzeyden yukarıya doğru yönelmiş akış görülebilmektedir. Bu akış ayrılmasını iki araç arasındaki mesafenin  $x=L$ ,  $x=0.5L$  ve  $x=0.3L$  pozisyonlarında da görmekteyiz. Modeller arası mesafenin  $x=1.5L$  olduğu pozisyonda ise eğimli yüzey üzerinde akış ayrılması tespit edilmemiştir. Sözü edilen akış ayrılması  $F_3$  olarak adlandırılmış ve ayrılmış akış bölgesi  $x=2L$  pozisyonunda Model 1’in arka yüzeyinden itibaren eğimli yüzeyin üzerinde  $0.51H$  kadar bir mesafede başlamış ve son pozisyona geldiğinde ( $x=0.3L$ ) merkez koordinatları  $x_3=-0.11H$   $y_3=0.9H$  olan güçlü  $F_3$  girdabını oluşturmuştur. Bu  $F_3$  girdabı model arka yüzeyinden itibaren “ $-0.05H$ ” mesafedeki  $S_2$  durma bölgesine kadar genişlemektedir.

Bütün pozisyonlarda düşey ekseninde  $z/H=0.34$  düzleminde de model arkasındaki akış alanında birbiri üzerinde ters yönde dönen simetrik olmayan çevrinti çifti açıkça görülmekte fakat çevrinti boyutları simetri eksenine göre daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Saat yönünde dönen çevrinti ( Negatif Girdap ) model arkasında daha büyük bir alanı kaplamaktadır. Şekil 5.3’deki ortalama hız vektörleri  $\langle v \rangle$  ve akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$  dağılımından model arka yüzeyine doğru yönelen ters akış ve model arka yüzeyinde yukarı ve aşağıya doğru yönelmiş akış görülmektedir. Modeller arasındaki mesafenin;  $x=2L$ ,  $x=1.5L$ ,  $x=L$  ve  $x=0.5L$  olduğu pozisyonlarda model arkasındaki ayrılmış akış bölgesi model arkasından itibaren  $0.56H$  mesafedeki  $S_1$  noktasına,  $x=0.3L$  olduğu pozisyonda model arkasındaki ayrılmış akış bölgesi model arkasından itibaren  $0.7H$  mesafedeki  $S_1$  noktasına, kadar genişlemektedir.

$F_1$  girdabının merkez koordinatları ve genişliği, [ $x_1=0.27H$ ,  $y_1=0.37H$  ve genişliği model 1’in arka yüzeyinden itibaren  $0.56H$  kadardır] ile  $F_2$  girdabının merkez koordinatları ve genişliği, [ $x_2=0.29H$ ,  $y_2=0.06H$  ve genişliği Model 1’in arka

yüzeyinden itibaren  $0.56H$  kadardır] modeller arasındaki mesafe  $x=2L$ 'den  $x=0.5L$ 'ye kadar olan pozisyonlarda sabittir. Modeller arasındaki mesafe  $x=0.3L$  olan pozisyonda ise  $F_1$  girdabı [Merkez koordinatları  $x_1=0.29H$  ve  $y_1=0.67H$  ve girdap genişliği  $0.98H$  kadardır] diğer pozisyonlara göre şekilsel olarak daha dörtgensel bir yapıya dönüşmüş ve bu girdabın merkezi öndeki modelden uzaklaşıp yukarıya doğru hareket etmiştir. Bu girdap iki model arasında oldukça genişlemiş ve model 1'in arkasından itibaren  $0.98H$  mesafesinde son bulmuştur.  $F_2$  girdabında ise [Merkez koordinatları  $x_2=0.35H$  ve  $y_2=0.09H$  ve girdap genişliği  $0.7H$ ] şekilsel bir değişiklik gözlemlenmemesine rağmen, girdap merkezi öndeki modelden uzaklaşmış ve modelin üzerinde durduğu plakaya doğru ilerlemiştir. Ayrıca  $F_2$  girdabı bu pozisyonda diğer pozisyonlara göre daha da geniştir.



**Şekil 5.3** Düşey ekseninde  $z/H=0.34$  düzleminde modeller arasındaki zaman ortalamalı hız vektörleri  $\langle v \rangle$ , akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$  ve eş girdap eğrileri  $\langle \omega \rangle$ , ( $\langle \omega \rangle_{\min} = \pm 5 \text{ s}^{-1}$ ,  $\Delta \langle \omega \rangle = 10 \text{ s}^{-1}$ ) dağılımı

Akım alanındaki zamansal ortalama sonuçlar, akımın genel yapısı hakkında bilgiye sahip olmak için yeterli görülse de, Model etrafındaki akımın zamana göre değişen bir karaktere sahip olması sebebiyle, anlık akım görüntüleri önem kazanmaktadır. Özellikle akımın simetrik görünümünün bozulmasına neden olan model arkasındaki vorteks kopması oluşumunun belirlenebilmesi için anlık görüntülerini incelemek gerekmektedir.

PIV ölçüm yönteminin üstünlüklerinden biri olan ölçüm yapılan akış alanının tümüne ait anlık görüntülerin elde edilebilmesidir. Her ne kadar tamamen aynı görüntüye sahip olmasalar da, kendilerinden önce ve sonra gelen akım çizgilerinin görüntülerindeki benzerlikler göz önüne alınarak Şekil 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 ve 5.8’de anlık akım görüntülerinin aynı resmin farklı zamandaki tekerrüründen meydana geldiği anlaşılmaktadır. Girdap içerisinde oluşan çok sayıdaki küçük girdapların akışın üç boyutlu (3D) olduğunun bir göstergesidir. Zaman ortalaması alınmış girdaplarda bu küçük ölçekli pozitif ve negatif çalkantı değerleri birbirlerini elimine etmekte ve zaman ortalamalı görüntüleri oluşturmaktadır.

Şekil 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 ve 5.8’de pozisyonlara göre (Şekil 5.1) düşey simetri eksenindeki Model 1’in eğimli yüzeyden itibaren model arkasındaki akış alanının anlık hız vektörleri  $v$ , akım çizgileri  $\psi$  ve eş girdap eğrilerinin  $\omega$ , dağılımı verilmektedir. Bu şekillerdeki N her pozisyon için elde edilen 350 adet anlık görüntü içerisinde seçilen anlık görüntünün sıra numarasını vermektedir. Bütün şekillerde modeller arasındaki akış yapısı oldukça düzensizdir. Akış alanının gelişimi ve birbirleriyle olan iletişimi açıkça görülmektedir.

Şekil 5.4’de modeller arasındaki mesafenin  $x= 2L$  olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki anlık görüntüleri ile Model 1’in arka akış bölgesindeki akış alanlarının gelişimi görülmektedir. N 326’da eğimli yüzeyin alt köşesinden ayrılarak saat yönünde dönen akış alanının etkin olduğu görülmektedir. N 326’dan başlayarak N 331’e kadar anlık görüntüler incelendiğinde model alt arka köşesinden ayrılarak saatin tersi yönde dönen akış alanının gelişimi gözlemlenebilir. Üst kısımdaki negatif girdap ( $V_1$ ) model eğik yüzeyinden ayrılmayarak akış yönünde uzamaktadır. Bu girdaptan kopan parçacıkların ve girdabın uzantılarının alt kısımdaki pozitif girdap ile

( $V_2$ ) etkileşimleri görülmektedir. Pozitif girdap ( $V_2$ ) akış yönünde uzamakta ( N 326 ve N 329 ) ve kopmaktadır ( N 330 ve N 331 anlık görüntülerinde  $V_3$  ve  $V_4$  girdapları ).

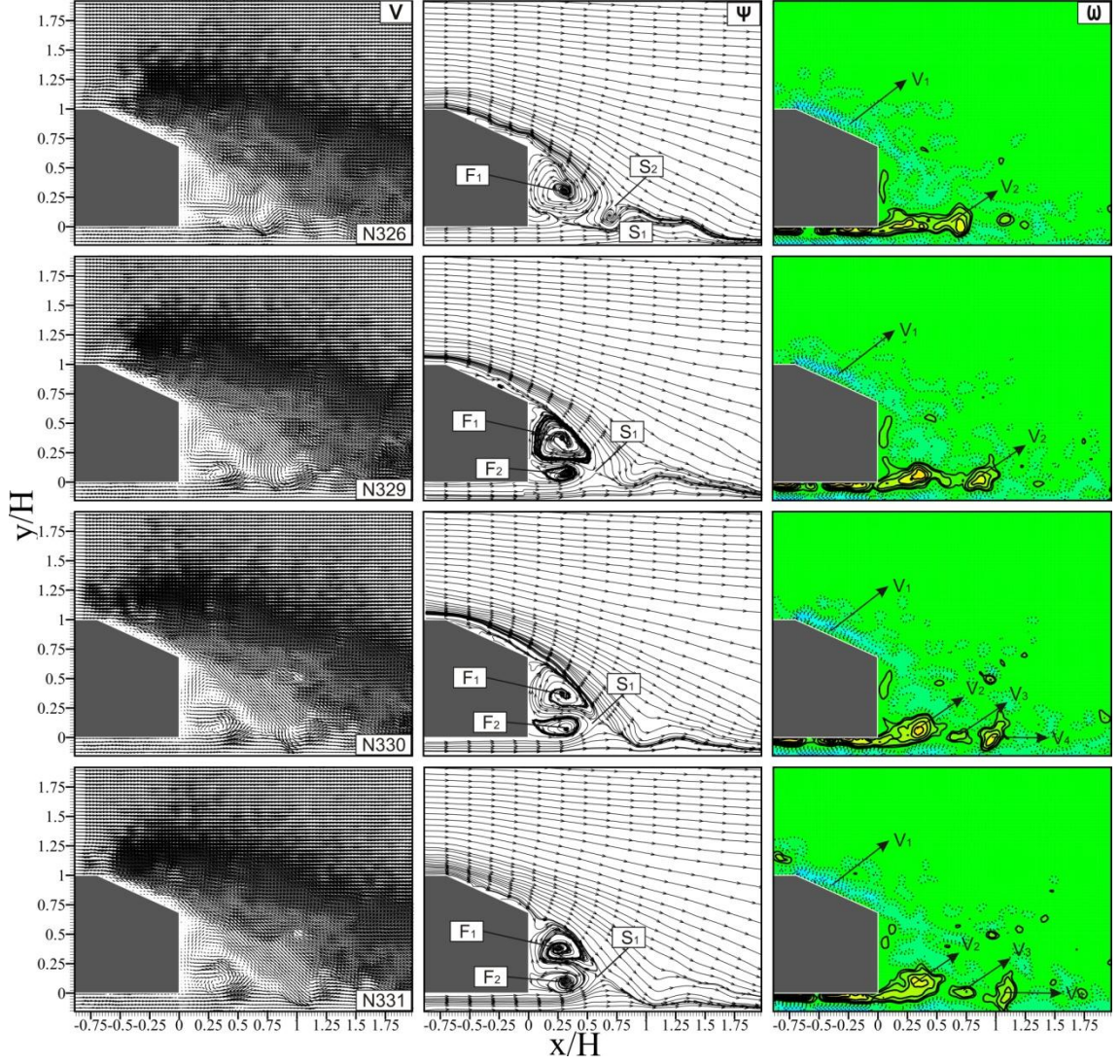
Şekil 5.5’de modeller arasındaki mesafenin  $x= 1.5L$  olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki anlık görüntüleri ile Model 1’in arka akış bölgesindeki akış alanlarının gelişimi görülmektedir. N 208’de eğimli yüzeyin alt köşesinden ayrılarak saat yönünde dönen akış alanının etkin olduğu görülmektedir. N 208’den başlayarak N 213’e kadar anlık görüntüler incelendiğinde model alt arka köşesinden ayrılarak saatin tersi yönde dönen akış alanının gelişimi gözlemlenebilir. Üst kısımdaki negatif girdap ( $V_1$ ) model eğik yüzeyinden ayrılmayarak akış yönünde uzamaktadır. Pozitif girdap ( $V_2$ ) akış yönünde uzamakta (N 208 ve N 210) ve kopmaktadır (N 212 ve N 213 anlık görüntülerinde  $V_3$  girdabı ).

Şekil 5.6’da modeller arasındaki mesafenin  $x= 1L$  olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki anlık görüntüleri ile Model 1’in arka akış bölgesindeki akış alanlarının gelişimi görülmektedir. N 235’de eğimli yüzeyin alt köşesinden ayrılarak saat yönünde dönen akış alanının etkin olduğu görülmektedir. N 235’den başlayarak N 242’ye kadar anlık görüntüler incelendiğinde model alt arka köşesinden ayrılarak saatin tersi yönde dönen akış alanının gelişimi gözlemlenebilir. Üst kısımdaki negatif girdap ( $V_1$ ) model eğik yüzeyinden ayrılmayarak akış yönünde uzamaktadır. Pozitif girdap ( $V_2$ ) akış yönünde uzamakta (N 235 ve N 239) ve kopmaktadır ( N 241 ve N 242 anlık görüntülerinde  $V_3$  girdabı ).

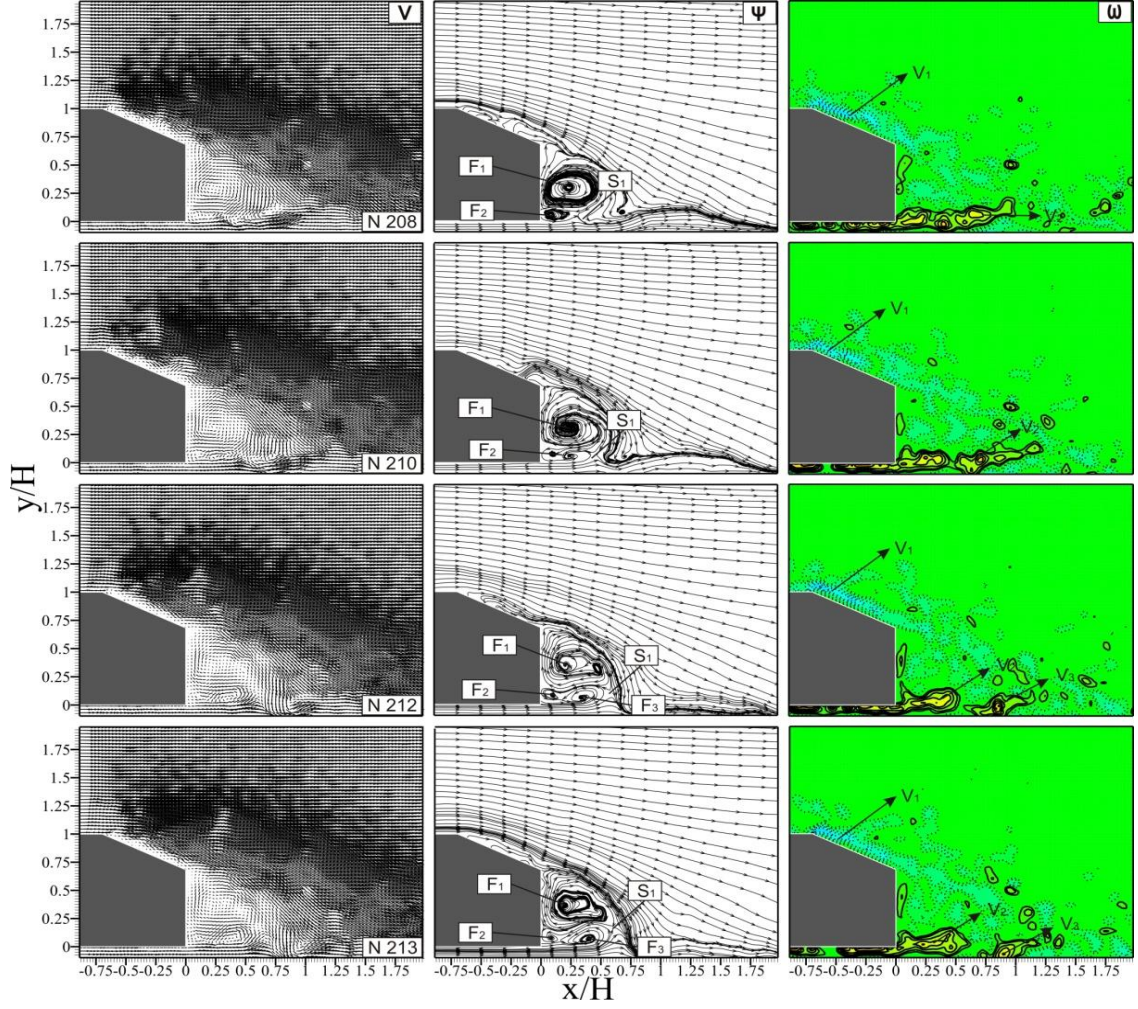
Şekil 5.7’de modeller arasındaki mesafenin  $x= 0.5L$  olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki anlık görüntüleri ile Modeller arasındaki akış bölgesinin gelişimi görülmektedir. N 300’de saat yönünde dönen Model 1’de (Şekil 5.1) eğimli yüzeyin üzerinde ( $V_1$ ) ve Model 2’nin (Şekil 5.1) ön üst kısmından başlayan ( $V_3$ ) akış alanlarının etkin olduğu görülmektedir. N 300’den başlayarak N 310’a kadar anlık görüntüler incelendiğinde saatin tersi yönde dönen Model 1’in alt arka köşesinden ayrılan akış alanını ( $V_2$ ), Model 2’nin ise ön bölgesinden başlayarak alt kısma doğru ilerleyen ( $V_4$ ) akış alanının gelişimi gözlemlenebilir. Model 1’in üst kısımdaki negatif girdap ( $V_1$ ) model eğik yüzeyinden ayrılmayarak akış yönünde uzamaktadır. Pozitif girdap ( $V_2$ ) akış yönünde uzamakta (N 300, N 304 ve N 309) ve kopmaktadır

(N 310, V5 girdabı). N 300'de Model 2'nin ön kısmında (V<sub>5</sub>) oluşan girdap uzayarak alt kısmındaki (V<sub>4</sub>) girdap ile birleşmiştir ( N 304, N 309 ve N 310 anlık görüntülerinde V<sub>4</sub> girdabı).

Şekil 5.8'de modeller arasındaki mesafenin  $x=0.3L$  olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki anlık görüntüleri ile Modeller arasındaki akış bölgesinin gelişimi görülmektedir. N 156'da saat yönünde dönen Model 1'de ( Şekil 5.1 ) eğimli yüzeyin üzerinde (V<sub>1</sub>) ve Model 2'nin ( Şekil 5.1 ) ön üst kısmından başlayan (V<sub>4</sub>) akış alanlarının etkin olduğu görülmektedir. N 156'dan başlayarak N 163'e kadar anlık görüntüler incelendiğinde saatin tersi yönde dönen Model 1'in alt arka köşesinden ayrılan akış alanını (V<sub>2</sub>), Model 2'nin ise ön bölgesinden başlayarak alt kısma doğru ilerleyen (V<sub>3</sub>) akış alanının gelişimi gözlemlenebilir. Model 1'in üst kısımdaki negatif girdap (V<sub>1</sub>) model eğik yüzeyinin üst köşesinden başlayarak akım yönünde hareket etmekte ve ilerleyen anlık görüntülerde girdaptan kopmalar meydana gelmektedir. Pozitif girdap (V<sub>2</sub>) akış yönünde uzamakta (N 156 ve N 158 ) ve Model 2'nin ön bölgesinden başlayıp alt bölgesine doğru yönlenen girdap (V<sub>3</sub>) ile birleşmektedir (N161, V<sub>2</sub>). N 163'de ise bu girdap koparak V<sub>2</sub> ve V<sub>3</sub> girdabını oluşturmaktadır. Oluşan V<sub>3</sub> girdabı Model 2'nin ön kısmından başlayarak çevrelemektedir.

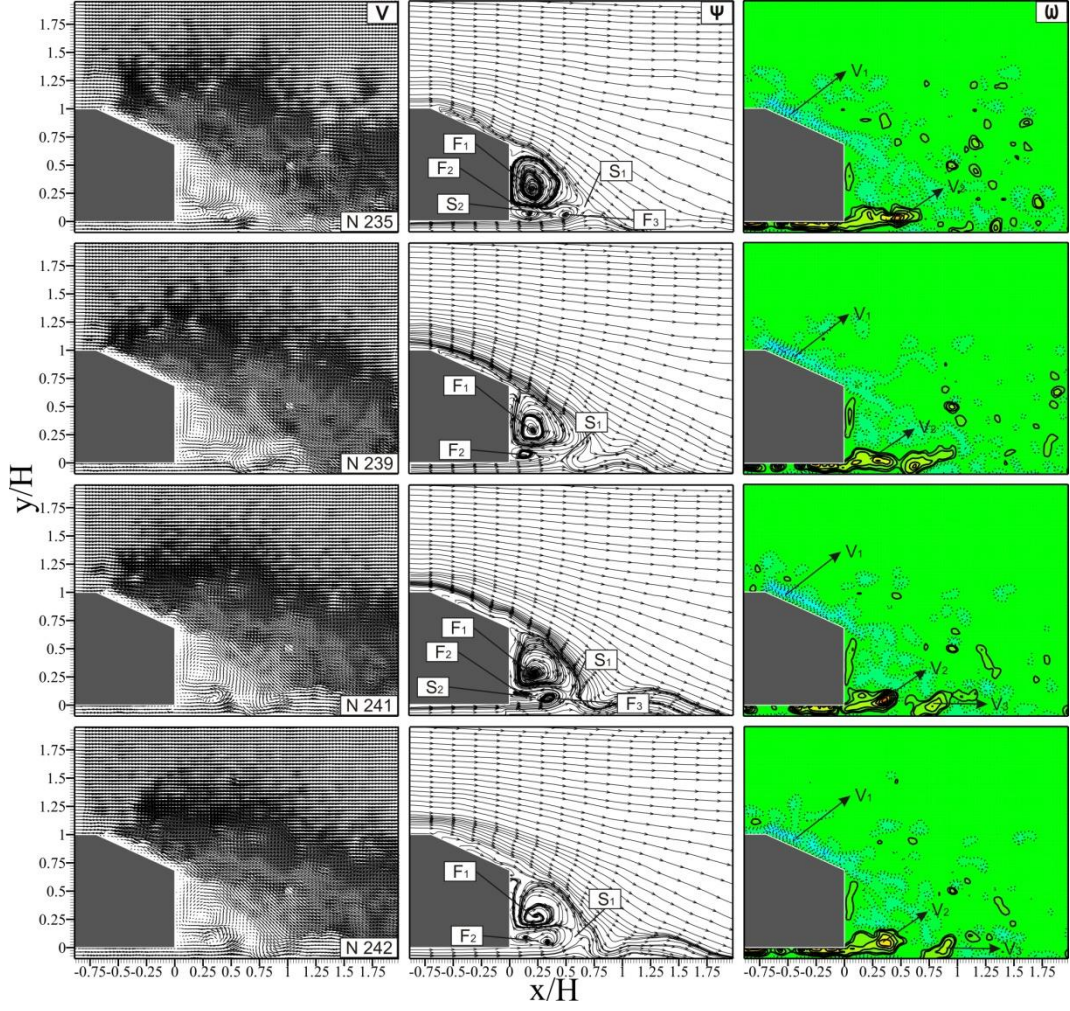


**Şekil 5.4** Modeller arasındaki mesafenin  $x=2 L$  olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki Model 1'in etrafındaki akış yapısının iki boyutlu; anlık hız vektörleri  $v$ , akım çizgileri  $\psi$  ve eş girdap eğrileri  $\omega$  dağılımı ( $\omega_{\min}=\pm 10 \text{ s}^{-1}$ ,  $\Delta\omega=10 \text{ s}^{-1}$ )

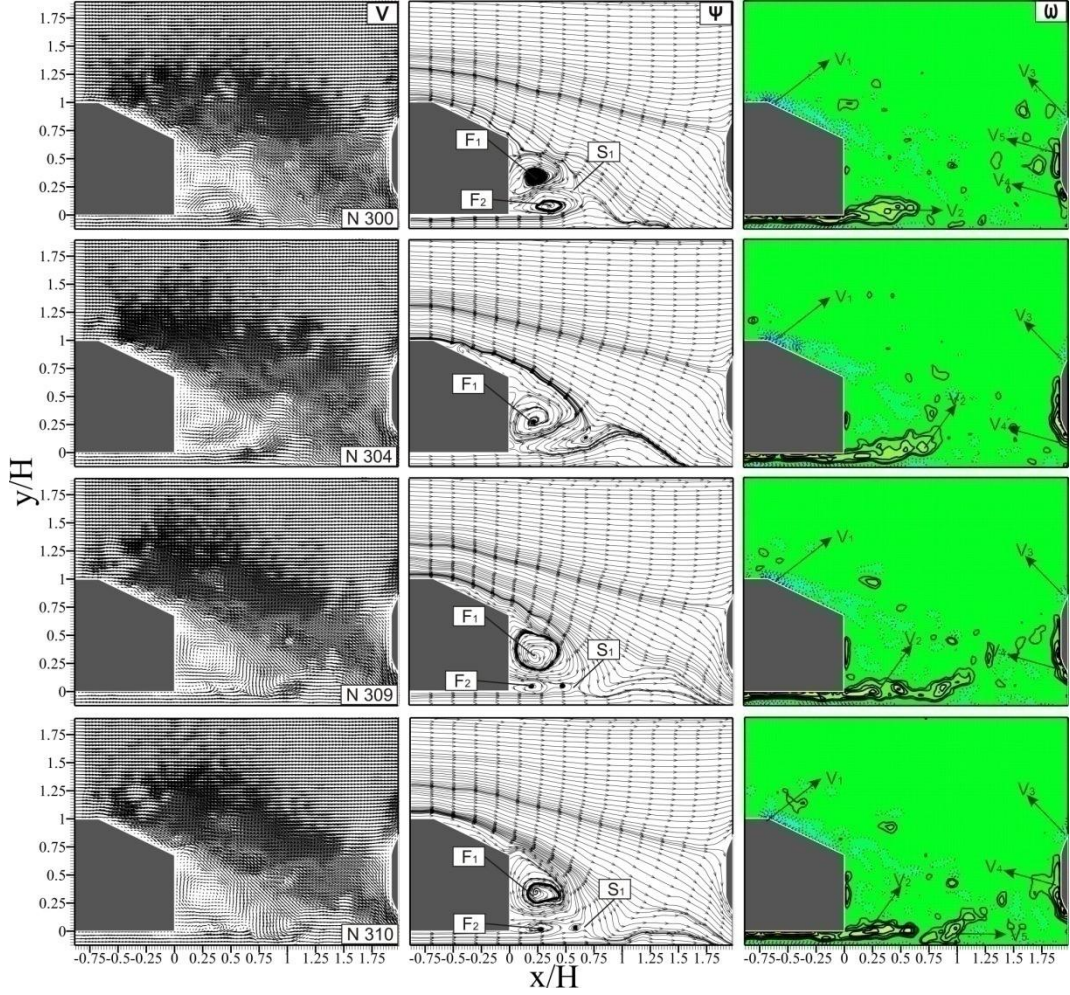


**Şekil 5.5** Modeller arasındaki mesafenin  $x=1.5 L$  olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki Model 1'in etrafındaki akış yapısının iki boyutlu; anlık hız vektörleri  $v$ , akım çizgileri  $\psi$  ve eş girdap eğrileri  $\omega$  dağılımı ( $\omega_{\min} = \pm 10 \text{ s}^{-1}$ ,  $\Delta\omega = 10 \text{ s}^{-1}$ )

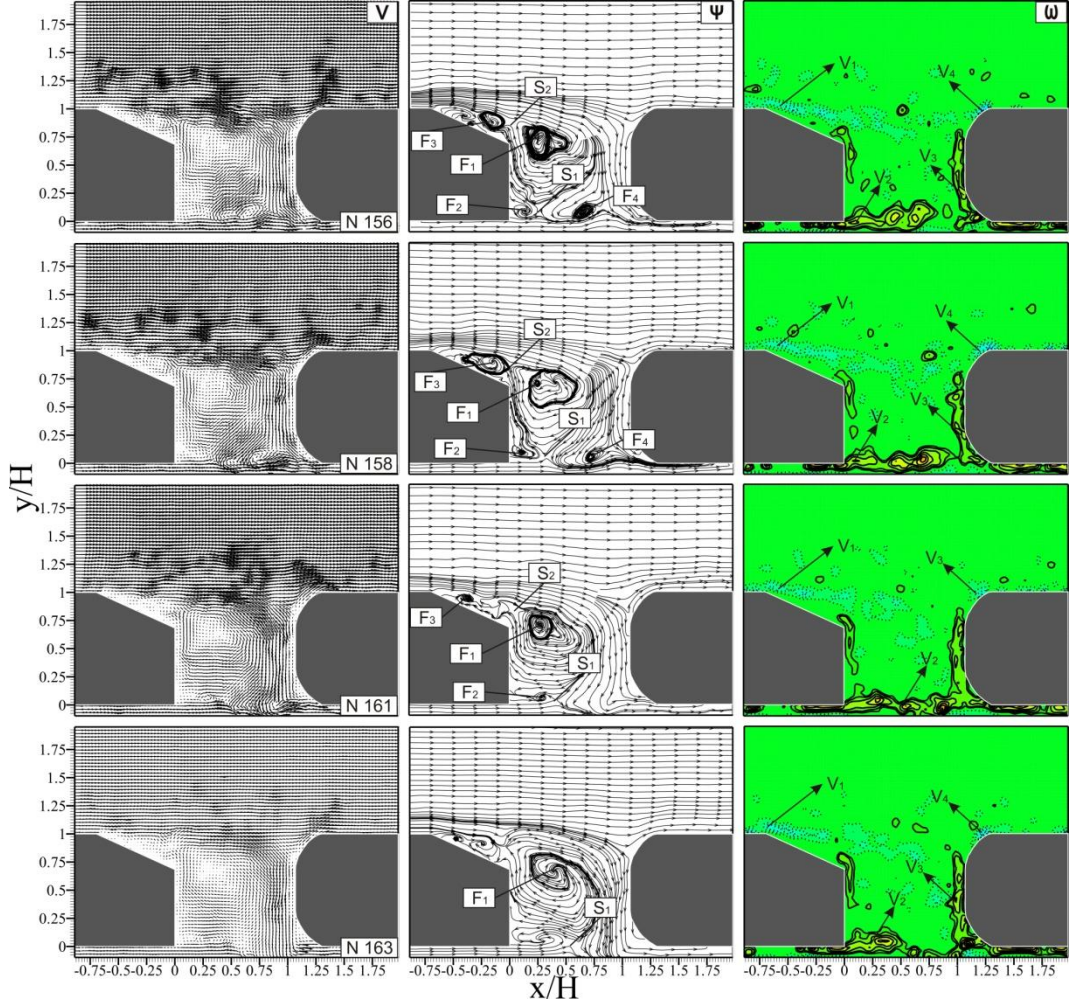




**Şekil 5.6** Modeller arasındaki mesafenin  $x=L$  olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki Model 1'in etrafındaki akış yapısının iki boyutlu; anlık hız vektörleri  $v$ , akım çizgileri  $\psi$  ve eş girdap eğrileri  $\omega$  dağılımı ( $\omega_{\min} = \pm 10 \text{ s}^{-1}$ ,  $\Delta\omega = 10 \text{ s}^{-1}$ )



**Şekil 5.7** Modeller arasındaki mesafenin  $x=0.5 L$  olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki Model 1'in etrafındaki akış yapısının iki boyutlu; anlık hız vektörleri  $v$ , akım çizgileri  $\psi$  ve eş girdap eğrileri  $\omega$  dağılımı ( $\omega_{\min}=\pm 10 \text{ s}^{-1}$ ,  $\Delta\omega=10 \text{ s}^{-1}$ )



**Şekil 5.8** Modeller arasındaki mesafenin  $x=0.3 L$  olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki Model 1'in etrafındaki akış yapısının iki boyutlu; anlık hız vektörleri  $v$ , akım çizgileri  $\psi$  ve eş girdap eğrileri  $\omega$  dağılımı ( $\omega_{\min}=\pm 10 \text{ s}^{-1}$ ,  $\Delta\omega=10 \text{ s}^{-1}$ )

Elde edilen anlık görüntülerde negatif girdaptan kopan parçacıkların ve girdabın uzantılarının alt kısımdaki pozitif girdaplar ile etkileşimleri görülmektedir. Bu girdap etkileşimlerinin modele dinamik yükler uygulayabileceği düşünülmektedir. Ayrıca modelin yerleştiği plaka yüzeyinin neden olduğu negatif girdap parçacıkları gözlemlenmiştir. Akışın plaka yüzeyine yerleşme noktasının akış boyunca plaka yüzeyinde ileri – geri kararsız olarak hareket ettiği görülmektedir.

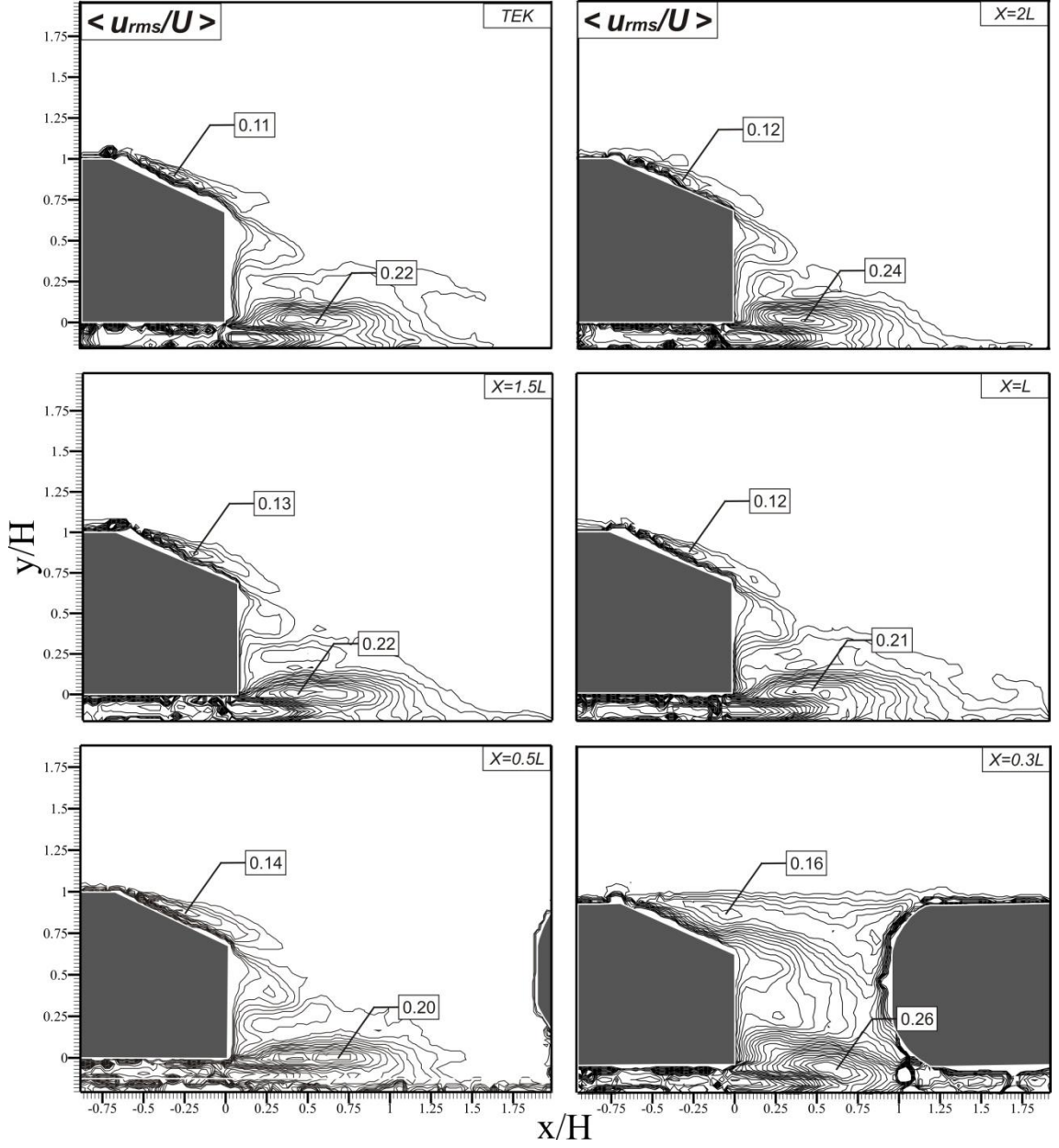
Farklı mesafelerdeki ( $x=2L, 1.5L, 1L, 0.5L, 0.3L$ ) ardışık Ahmed modelleri için ortalama hız çalkantı şiddetleri  $\langle u_{rms} \rangle / U$ ,  $\langle v_{rms} \rangle / U$  ve Reynolds gerilmesi,  $\langle u'v' \rangle / U^2$  dağılımları sırasıyla Şekil 5.9, 5.10 ve 5.11’de sunulmuştur. Burada çalkantı şiddetleri serbest akım hızı,  $U$  ve Reynolds gerilmesi serbest akım hızının karesi,  $U^2$  ile boyutsuzlaştırılmıştır.

Şekil 5.9’da farklı model mesafeleri için akış yönündeki çalkantı şiddeti  $\langle u_{rms} \rangle / U$ , dağılımı görülmektedir. Modeller arasındaki mesafe 0.3 model boyu ( $x=0.3L$ ) olana kadar akış alanındaki  $\langle u_{rms} \rangle / U$  dağılımlarının benzer olduğu görülmektedir. Modeller arasındaki mesafeler  $x=2L, 1.5L, L$  ve  $0.5L$  için tek Ahmed modeli arkasındaki  $\langle u_{rms} \rangle / U$  dağılımına benzer olarak yüksek çalkantı alanlarının modelin arka eğimli yüzeyinde ve model arkasında, plaka yüzeyine yakın bölgede olduğu görülmektedir. Modeller arasındaki mesafe  $x=0.3L$  olduğunda öndeki modelin arka eğik yüzeyindeki çalkantı alanı genişleyerek arkadaki modelin ön yüzeyine kadar uzamaktadır. İki model arasında düşük yoğunluklu çalkantı alanı ve plaka yüzeyine yakın bölgedeki yüksek yoğunluklu çalkantı alanı açıkça görülmektedir. Öndeki modelin eğimli yüzeyindeki maksimum  $\langle u_{rms} \rangle / U$  değerleri 0.12 den 0.16 ya artarken plaka yüzeyine yakın bölgede maksimum  $\langle u_{rms} \rangle / U$  değerleri  $x=2L-0.5L$  aralığında 0.24’den 0.20’ye düşmüş,  $x=0.3L$  için 0.26 değerini almıştır.

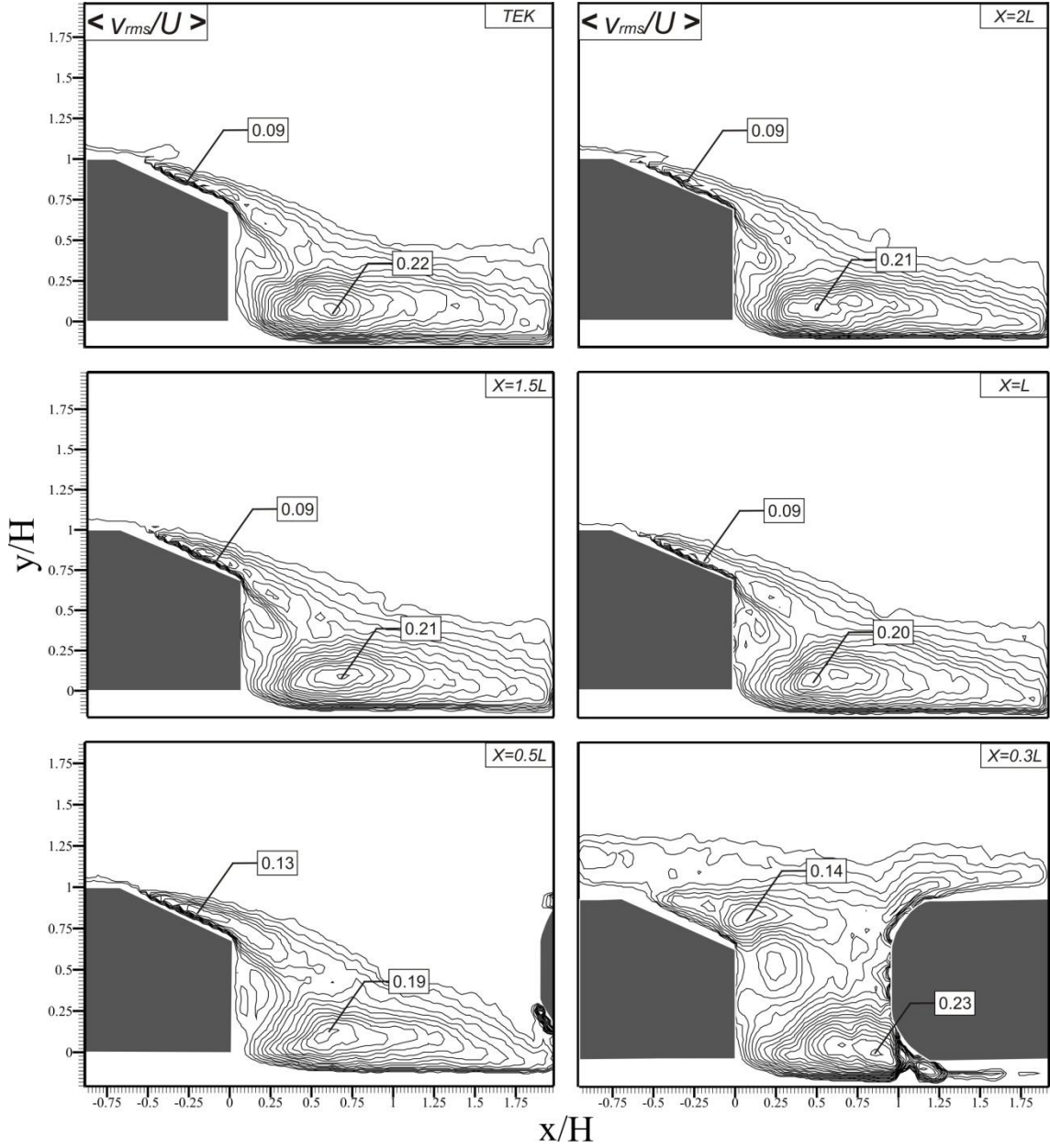
Şekil 5.10’da farklı model mesafeleri için akışa dik yöndeki çalkantı şiddeti  $\langle v_{rms} \rangle / U$  dağılımı sunulmuştur. Modeller arasındaki mesafeler  $x=2L, 1.5L, L$  ve  $0.5L$  için akış alanındaki  $\langle v_{rms} \rangle / U$  dağılımının tek Ahmed modeli arkasındaki  $\langle v_{rms} \rangle / U$  dağılımına benzer yapıda olduğu görülmektedir. Modeller arasındaki mesafenin  $x=0.3L$  olduğu konumda ön modelin eğik yüzeyindeki maksimum  $\langle v_{rms} \rangle / U$  değeri sağa doğru kayarak eğimli yüzeyin alt köşesine doğru ilerlemiş, iki model arasında, plakaya yakın

bölgedeki maksimum  $\langle v_{rms} \rangle / U$  değeri  $x/H=0.6$  noktasından  $x/H=0.8$  noktasına ilerlemiştir.

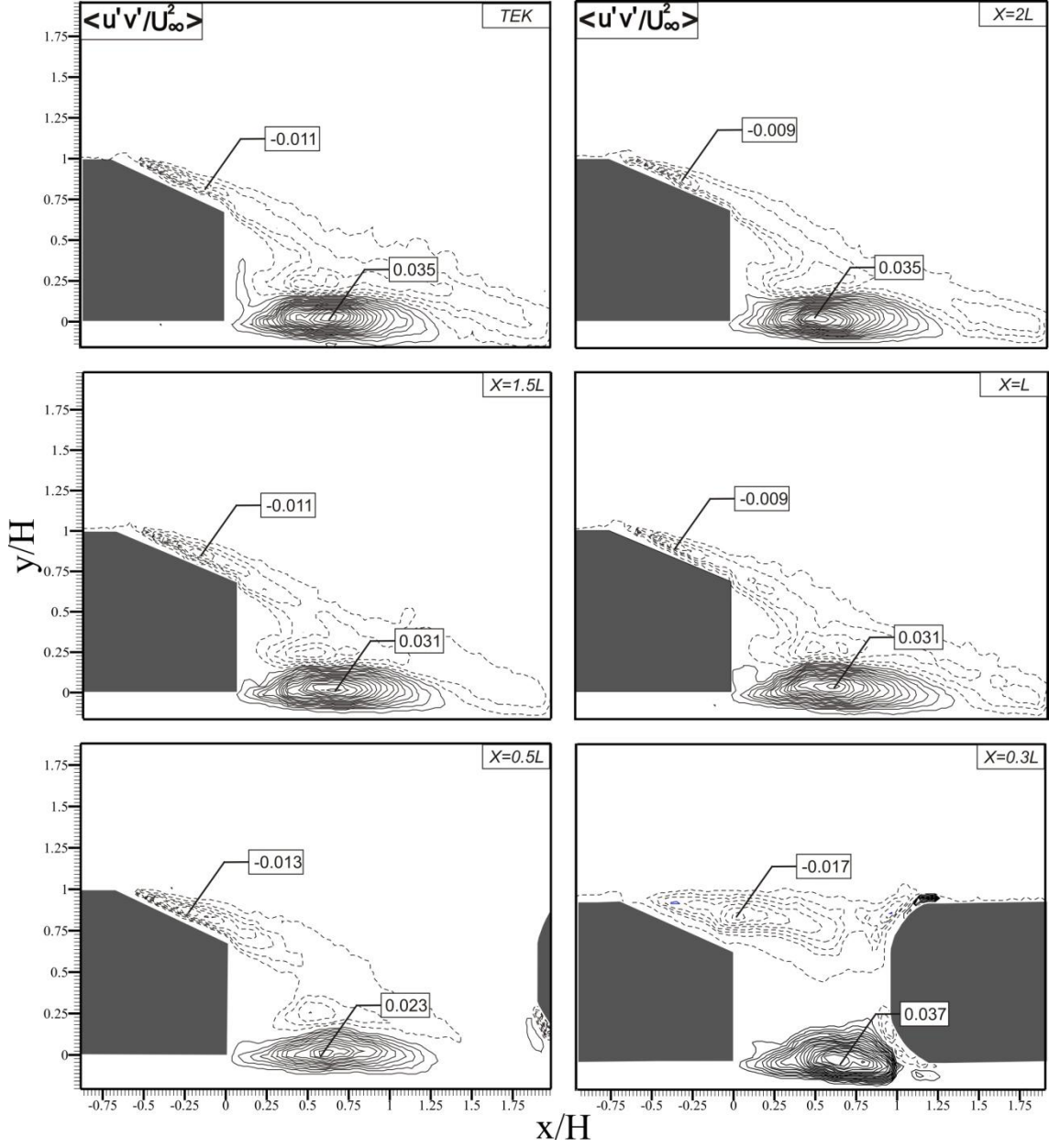
Şekil 5.11’de farklı model mesafeleri için Reynolds gerilmesi,  $\langle u'v' \rangle / U^2$  dağılımı görülmektedir. Modeller arasındaki mesafeler  $x=2L$ ,  $1.5L$ ,  $L$  ve  $0.5L$  için tek modele benzer olarak; kesik çizgilerle gösterilen negatif Reynolds gerilmesi alanı model eğik yüzeyinden başlayıp yayılarak model arkasında büyük bir bölgeyi kaplarken sürekli çizgilerle gösterilen pozitif Reynolds gerilmesi alanı plakaya yüzeyine yakın daha küçük bir bölgeyi kaplamaktadır. Modeller arasındaki mesafenin  $x=0.3L$  olduğu konum için negatif Reynolds gerilmesi alanı akım yönünde düzleşerek öndeki modelin üst köşesine kadar uzamaktadır. Akış alanındaki pozitif Reynolds gerilmesi alanı daralarak genişlemiş ve maksimum noktası sağa doğru ilerlemiştir. Maksimum negatif ve pozitif Reynolds gerilmesinin mutlak değerleri  $x=2L$ ,  $1.5L$  ve  $L$  için yaklaşık olarak sabit kalırken,  $x=0.3$  için artarak sırasıyla  $0.017$  ve  $0.035$  değerlerini almıştır.



**Şekil 5.9** Farklı mesafelerdeki ardışık Ahmed modelleri için düşey simetri eksenini  $z/H=0$ 'da akış yönündeki hız çalkantı şiddetleri  $\langle u_{rms} \rangle / U$ , dağılımı ( $[\langle u_{rms} \rangle / U]_{min}=0.04$ ,  $\Delta \langle u_{rms} \rangle / U=0.01$ )



**Şekil 5.10** Farklı mesafelerdeki ardışık Ahmed modelleri için düşey simetri eksenini  $z=0$ 'da akışa dik yöndeki hız çalkantı şiddetleri  $\langle v_{rms} \rangle / U$ , dağılımı ( $[\langle v_{rms} \rangle / U]_{min} = 0.05$ ,  $\Delta \langle v_{rms} \rangle / U = 0.01$ ).



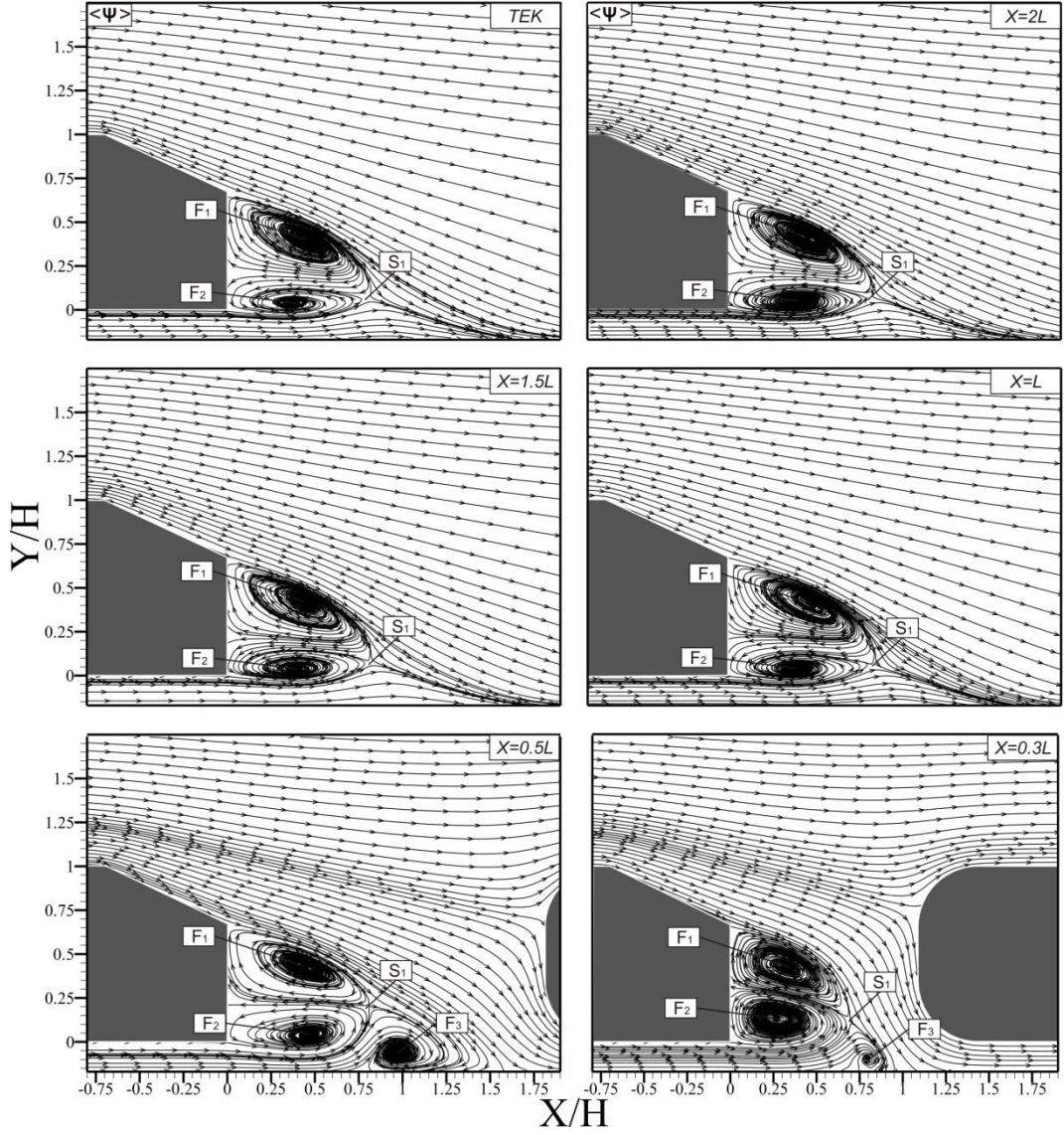
**Şekil 5.11** Farklı mesafelerdeki ardışık Ahmed modelleri için düşey simetri eksenini  $z=0$ 'da Reynolds gerilmesi  $\langle u'v' \rangle / U_\infty^2$ , dağılımı ( $[\langle u'v' \rangle / U_\infty^2]_{\min} = \pm 0.001$ ,  $\Delta \langle u'v' \rangle / U_\infty^2 = 0.002$ ).



## 5.2. Sayısal Bulgular ve Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması

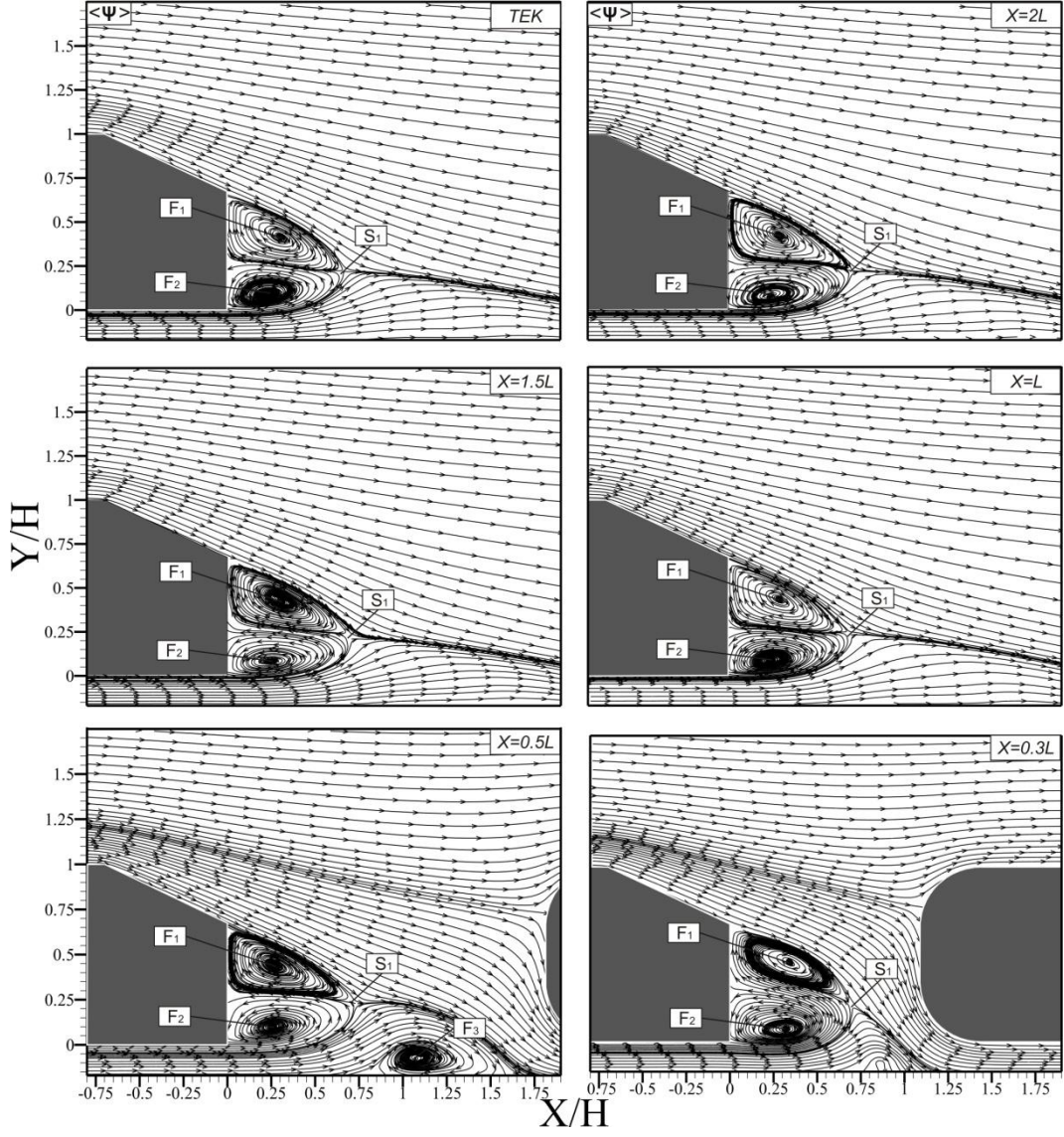
Bu bölümde, ardışık olarak hareket eden iki Ahmed modeli arasında kalan akış bölgesi,  $Re_H=1.5 \times 10^4$  için steady akım koşullarına göre sayısal olarak incelenmiştir. Deney şartları ile aynı geometri ve boyutlara sahip sayısal hesaplama bölgesi ve sonlu hesaplamalar ağı Bölüm 3’de verilmiştir. Hesap ağının oluşturulmasında katı yüzeylere doğru daha sık mesh atılarak katı – sıvı etkileşimindeki belirsizliklerin en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca hesap bölgesinin en önemli yerini oluşturan modellerin üzerine yakın ve modellerden etkilenen akım bölgelerinde ağ yapısında düzenlemeler yapılmıştır. Böylece hesapta hassasiyet gerektiren, modellere yakın elemanların boyutları istenilen ölçüde elde edilmiştir. Modellerden etkilenen akım bölgelerinde üniform eleman boyutları kullanılarak elde edilen ağ yapısı için  $k-\omega$  türbülans modelinin akım alanına etkisi incelenmiş, elde edilen sayısal veriler deneysel bulgular ile karşılaştırılmıştır.

Düzenli akım kabulü ile modeller etrafında yapılan hesaplamalar sayesinde pozisyonlara göre Model 1’in (Şekil 5.1) arka akım bölgesinde elde edilen teorik akım çizgileri Şekil 5.12 ve 5.13’de verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi, Model 1’in arka bölgesinde  $x/L=2, 1.5$  ve  $1$  olan pozisyonlarda elde edilen akım çizgileri Şekil 5.2 ve 5.3’de verilen aynı pozisyonlardaki deneysel bulgularla şekilsel bir uyum içerisindedir. Fakat  $z/H=0$  ve  $z/H=0.34$  düzlemlerinde düşey ekseninde  $x/L=0.5$  olan pozisyonda sayısal bulgularda Model 1’in arka bölgesinde oluşan F3 girdabı sayısal bulgularda tespit edilmemiştir,  $x/L=0.3$  olan pozisyonda deneysel bulgularda tespit edilen eğimli yüzeyin üzerindeki akış ayrılması, sayısal bulgularda tespit edilmemiştir ve deneysel bulgularda tespit edilemeyen Şekil 5.12 ve 5.13 ‘deki F<sub>3</sub> girdabı deneysel bulguların anlık görüntülerinde tespit edilmiştir.



**Şekil 5.12** Düşey ekseninde  $z/H=0$  düzleminde modeller arasındaki mesafenin değişme durumunda  $k-\omega$  türbülans modeline göre iki boyutlu; zaman ortalamalı akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$  dağılımı

Simetri eksenindeki  $F_1$  ve  $F_2$  girdabının durma noktası olan  $S_1$  noktasının hareketinin, Deneysel bulgulardaki hareketine yakın olduğu fakat değerlerinin uyuşmadığı görülmektedir. Modeller arasındaki mesafenin  $x/L=2$ 'den  $x/L=0.5$  olan pozisyona kadar  $S_1$  durma noktası model arka yüzeyinden itibaren  $0.8H$  civarında bir uzaklığa yerleşmiştir.  $x/L=0.3$  olan pozisyonda ise bu durma noktası model arka yüzeyinden itibaren arkadaki aracı etkisi ile  $0.68H$  mesafesine kadar sıkışmıştır. Ayrıca model arkasındaki  $F_1$  ve  $F_2$  girdapları son pozisyonda Model 1'e doğru yaklaşmışlardır.



**Şekil 5.13** Düşey ekseninde  $z/H=0.34$  düzleminde modeller arasındaki mesafenin değişme durumunda  $k-\omega$  türbülans modeline göre iki boyutlu; zaman ortalamalı akım çizgileri  $\langle \psi \rangle$  dağılımı

**Çizelge 5.1** Düşey eksenindeki  $z/H=0$  düzlemi için teorik ve deneysel bulgular tablosu

	Modeller Arasındaki Mesafe	S1 Durma Noktası Merkezinin Model Arka Yüzeyinden Uzaklığı (Boyutsuz)	F1 Girdap Merkezi (Boyutsuz)	F2 Girdap Merkezi (Boyutsuz)	F3 Girdap Merkezi (Boyutsuz)	F1 ve F2 Girdap Merkezlerinin Birbirine Olan Düşey Uzaklığı (Boyutsuz)
Deneysel	p1	0.61H	(0.24H,0.34H)	(0.34H,0.05H)	-----	0.29H
Sayısal	$x/L= 2$	0.8H	(0.45H,0.41H)	(0.40H,0.04H)	-----	0.37H
Deneysel	p2	0.61H	(0.24H,0.34H)	(0.34H,0.05H)	-----	0.29H
Sayısal	$x/L= 1.5$	0.8H	(0.43H,0.41H)	(0.39H,0.04H)	-----	0.37H
Deneysel	p3	0.61H	(0.24H,0.34H)	(0.34H,0.05H)	-----	0.29H
Sayısal	$x/L= 1$	0.83H	(0.48H,0.40H)	(0.39H,0.03H)	-----	0.37H
Deneysel	p4	0.64H	(0.19H,0.32H)	(0.39H,0.04H)	-----	0.28H
Sayısal	$x/L= 0.5$	0.8H	(0.43H,0.43H)	(0.46H,0.03H)	(0.9H,-0.06H)	0.4H
Deneysel	p5	0.7H	(0.34H,0.66H)	(0.42H,0.02H)	-----	0.65H
Sayısal	$x/L= 0.3$	0.68H	(0.33H,0.42H)	(0.26H,0.13H)	(0.8H,0.09H)	0.29H

**Çizelge 5.2** Düşey eksendeki  $z/H=0.34$  düzlemi için teorik ve deneysel bulgular tablosu

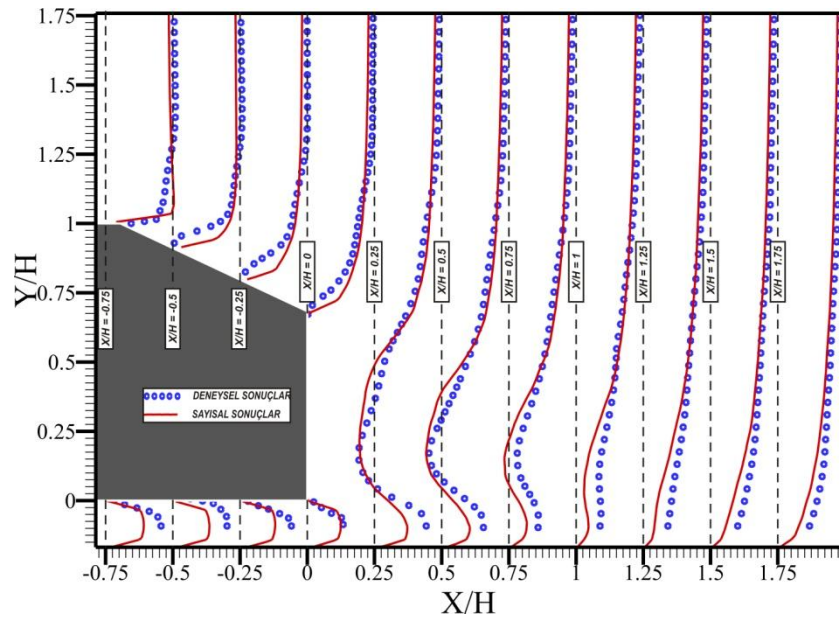
	Modeller Arasındaki Mesafe	S1 Durma Noktası Merkezinin Model Arka Yüzeyinden Uzaklığı (Boyutsuz)	F1 Girdap Merkezi (Boyutsuz)	F2 Girdap Merkezi (Boyutsuz)	F3 Girdap Merkezi (Boyutsuz)	F1 ve F2 Girdap Merkezlerinin Birbirine Olan Düşey Uzaklığı (Boyutsuz)
Deneysel	P1	0.56H	(0.27H,0.37H)	(0.29H,0.06H)	-----	0.31H
Sayısal	$x/L= 2$	0.7H	(0.29H,0.42H)	(0.24H,0.07H)	-----	0.35H
Deneysel	P2	0.56H	(0.27H,0.37H)	(0.29H,0.06H)	-----	0.31H
Sayısal	$x/L= 1.5$	0.7H	(0.30H,0.42H)	(0.24H,0.08H)	-----	0.34H
Deneysel	P3	0.56H	(0.27H,0.37H)	(0.29H,0.06H)	-----	0.31H
Sayısal	$x/L= 1$	0.7H	(0.29H,0.43H)	(0.24H,0.08H)	-----	0.35H
Deneysel	P4	0.56H	(0.27H,0.37H)	(0.29H,0.06H)	-----	0.31H
Sayısal	$x/L= 0.5$	0.72H	(0.26H,0.43H)	(0.25H,0.1H)	(1.07H,-0.07H)	0.33H
Deneysel	P5	0.7H	(0.29H,0.67H)	(0.35H,0.09H)	-----	0.58H
Sayısal	$x/L= 0.3$	0.68H	(0.34H,0.45H)	(0.32H,0.07H)	-----	0.38H

Çizelge 5.1 ve 5.2’de akış bölgesi ile ilgili deneysel ve sayısal bulgular verilmiştir. Modeller arasındaki mesafe değiştikçe ayrılma bölgesindeki değişiklik her iki bulguda da açıkça görülmektedir. Bu çizelgelerdeki  $S_1$  değeri incelendiği zaman her iki düzlem için de  $k-\omega$  türbülans modelinin ayrılma bölgesi genişliği, deneysel bulgulardaki ayrılma bölgesi genişliğinden daha fazla olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca girdap merkezleri arasındaki düşey mesafeler incelendiğinde ise P1, P2, P3 ve P4’te  $k-\omega$  türbülans modelinin deneysel bulgulara uyumlu olduğu fakat P5’te bu uyum bozulma eğilimi göstermiştir.

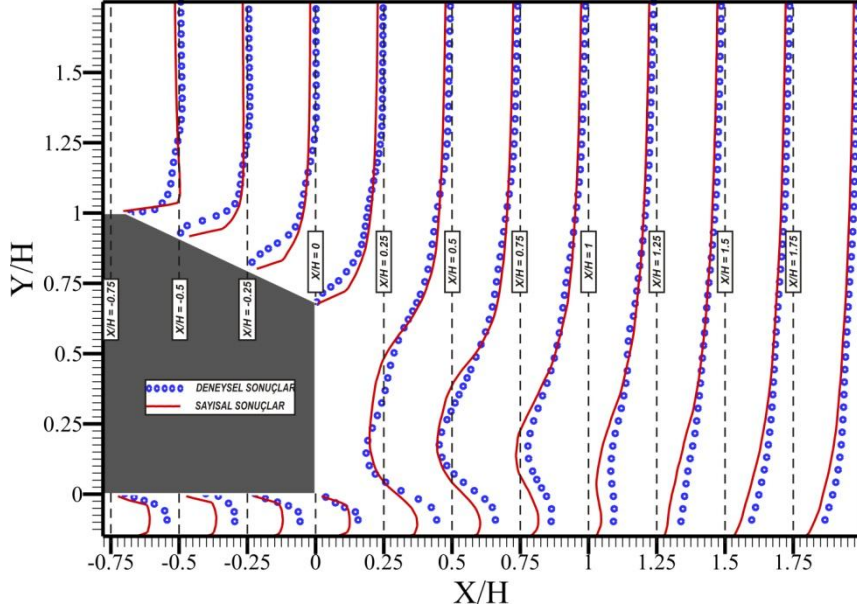
Ardışık hareket eden iki Ahmed modelinin 5 farklı pozisyonu için (Şekil 5.1) modeller arasında kalan akış bölgesinin k- $\omega$  türbülans modeli kullanarak elde edilen 11 farklı kesitte  $x/H=( -0.75, -0.50, -0.25, 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1, 1.25, 1.50$  ve  $1.75 )$  teorik ve deneysel hız dağılımları Şekil 5.14-5.18'de verilmiştir. Şekil 5.14-5.17'de modeller arasındaki akış alanlarında deneysel ve teorik hız dağılımlarının birbirine uyumlu olduğu fakat modelin eğimli yüzeyinin üst kısmında uyumun kısmen bozulduğu Şekil 5.17'de daha net olmak üzere görülmektedir. Şekil 5.18'de ise modeller arasındaki akış bölgesinde ve Model 1'in eğimli yüzeyinin üst kısmında bu uyum bozukluğunun kabul edilemeyecek seviyeye ulaştığı görülmektedir.

Şekil 5.14, 5.15, 5.16'daki  $x/H=1$  düzleminde  $x/H=1.75$  düzlemine kadar olan kesitlerdeki hız dağılımlarında serbest akış hızına göre negatif hız gradyanlarına rastlanmamıştır. Ahmed modelinin arka tarafındaki  $x/H=0, 0.25, 0.50$  ve  $0.75$  düzlemlerinde ise deneysel ve sayısal bulgularda negatif hız gradyanları tespit edilmiştir. Modelin eğimli yüzeyinin üzerinde de bu negatif hız gradyanları sadece deneysel bulgularda tespit edilmiştir. Şekil 5.17'de deneysel ve sayısal bulgularda akış bölgesinde Model 2'nin etkisi ile  $x/H=1.75$  düzlemindeki hız dağılımında görüldüğü üzere serbest akış hızına göre değerleri düşmüştür. Diğer düzlemlerdeki hız dağılımları ise Şekil 5.14-5.16'dakine benzer şekilde gerçekleşmiştir. Şekil 5.18'de  $x/H=-0.75$  düzleminde  $x/H=1$  düzlemine kadar olan hız dağılımlarında serbest akış hızına göre negatif hızlar deneysel bulgularda tespit edilmiştir. Bu negatif akış hızları sayısal bulgularda akış bölgesinin  $y/H=0.25$  değerine kadar uyumluluk gösterirken daha üst noktalarda bu uyumluluğun bozulduğu ve Model 1'in eğimli yüzeyinin üzerinde deneysel bulgularda tespit edilen negatif hız değerleri sayısal bulgularda tespit edilmemiştir.

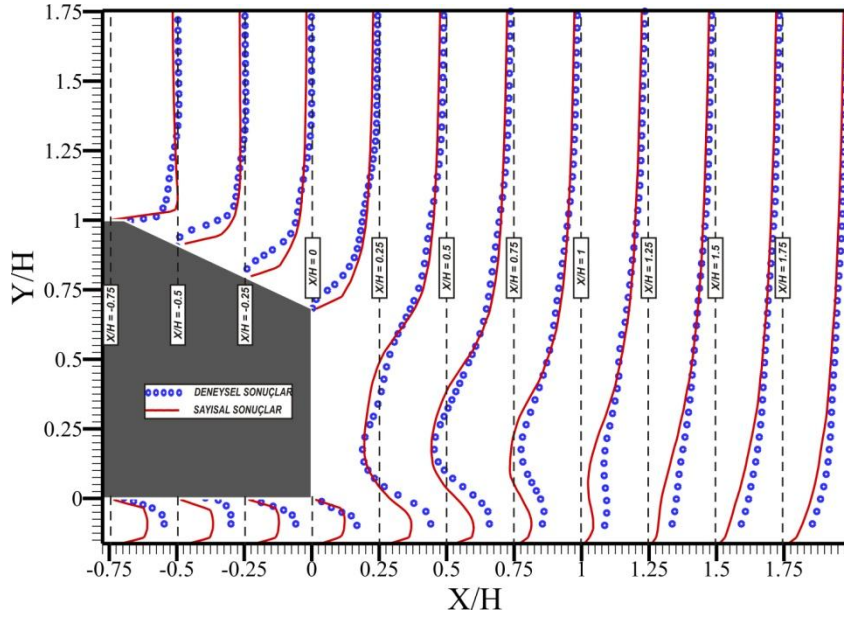
k- $\omega$  türbülans modeli ile düzenli akım durumu için elde edilen teorik yatay hız dağılımları incelendiğinde,  $x/L=2, 1.5$  ve  $1$  için bu türbülans modelinin uyumlu olduğu fakat diğer pozisyonlar için bu uyumun bozulduğu görülmektedir. k- $\omega$  türbülans modelinin modeller arasındaki mesafenin azaldığı durumlar için uygun olmadığı bu durumlarda farklı türbülans modellerinin denenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.



**Şekil 5.14** Modeller arasındaki mesafenin  $x=2L$  olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki Model 1'in etrafındaki deneysel ve sayısal olarak elde edilen model etrafındaki akış yapısının hız dağılımlarının değişimi

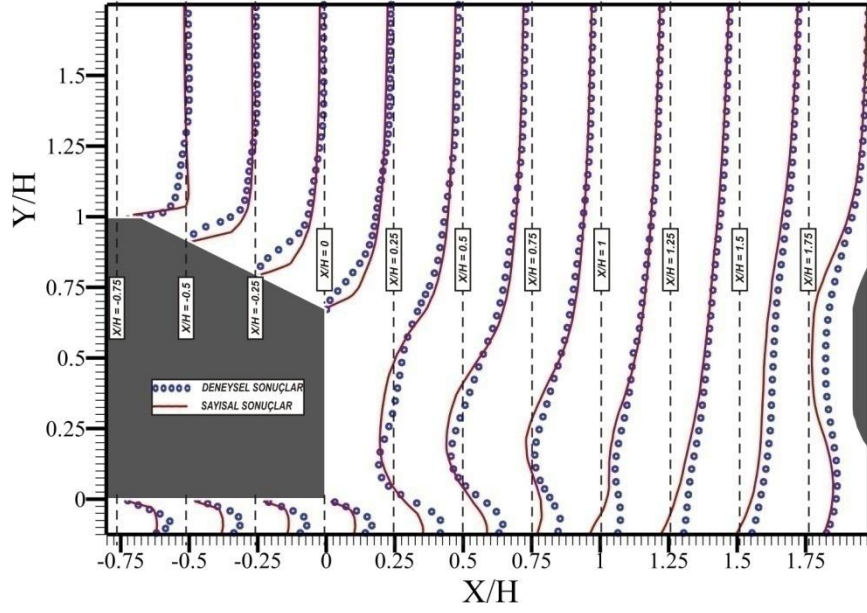


**Şekil 5.15** Modeller arasındaki mesafenin  $x=1.5L$  olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki Model 1'in etrafındaki deneysel ve sayısal olarak elde edilen model etrafındaki akış yapısının hız dağılımlarının değişimi

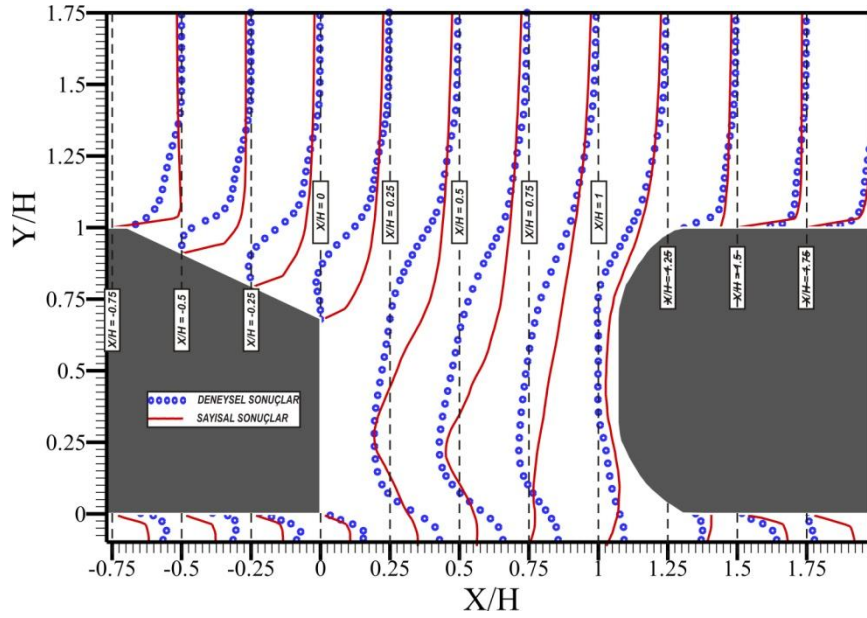


**Şekil 5.16** Modeller arasındaki mesafenin  $x=L$  olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki Model 1'in etrafındaki deneysel ve sayısal olarak elde edilen model etrafındaki akış yapısının hız dağılımlarının değişimi





**Şekil 5.17** Modeller arasındaki mesafenin  $x=0.5L$  olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki Model 1'in etrafındaki deneysel ve sayısal olarak elde edilen model etrafındaki akış yapısının hız dağılımlarının değişimi



**Şekil 5.18** Modeller arasındaki mesafenin  $x=0.3L$  olduğu pozisyon için düşey simetri eksenindeki Model 1'in etrafındaki deneysel ve sayısal olarak elde edilen model etrafındaki akış yapısının hız dağılımlarının değişimi

### 5.3 Sürüklenme Katsayısının ( $C_D$ ) Tek ve Ardışık Konumlara Göre Değişimi

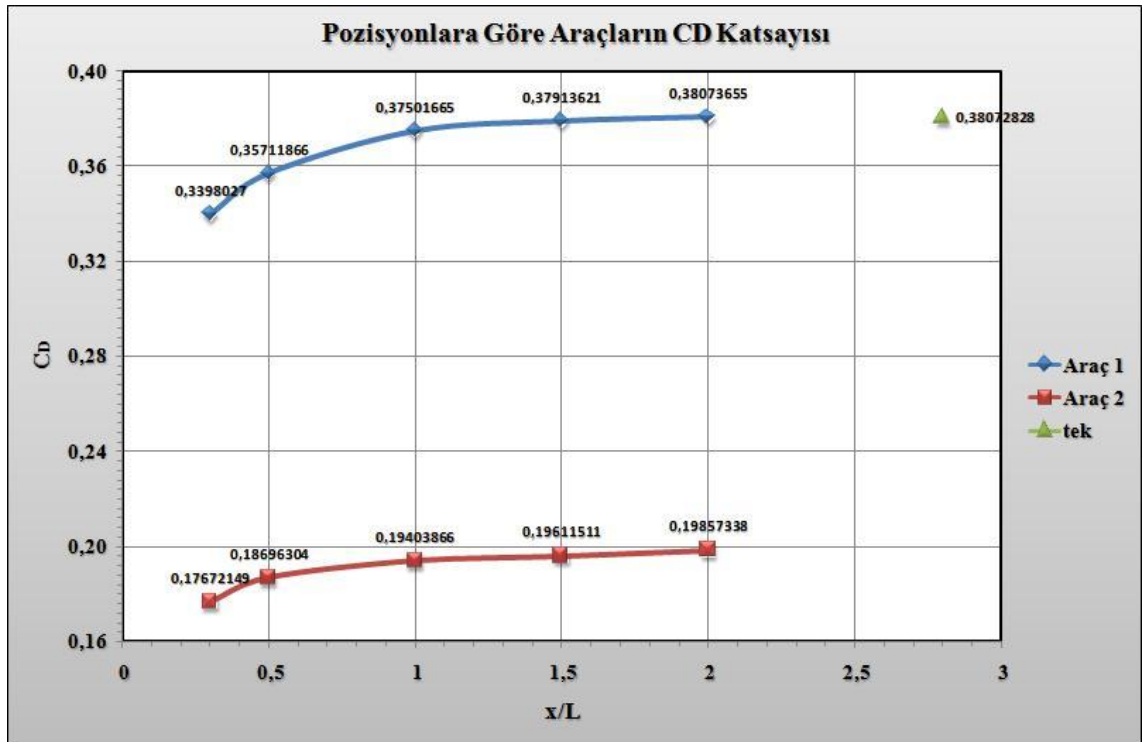
Sürüklenme katsayısı ( $C_D$ ), kaldırma katsayısı ( $C_L$ ) ve moment katsayısı ( $C_M$ ) otomobiller için aerodinamik karakteristiklerdir. Bu katsayılar küçüldükçe motorun oluşturmuş olduğu çeki kuvvetindeki kayıplar azalmakta ve daha az enerji harcanmaktadır. Karayolu taşıtlarına etkiyen en büyük aerodinamik kuvvet bileşeni genellikle aerodinamik sürüklenme kuvveti ve buna bağlı sürüklenme katsayısıdır ( $C_D$ ). Bir binek taşıtı için oluşan aerodinamik sürüklenme kuvvetinin ( $F_D$ ) % 90'dan fazlası şekil direnci nedeniyle oluşmaktadır. Aerodinamik sürüklenme kuvveti motorun sağladığı çeki kuvveti ile karşılanmaktadır. Onun için sürüklenme kuvveti, gerekli motor gücünde ve dolayısıyla da yakıt tüketiminde etkilidir.

Herhangi bir hızdaki yakıt tüketimi direkt olarak gerekli olan güç ile orantılıdır. Aerodinamik direnci yenmek için gerekli güç, motor gücünün büyük bir kısmını oluşturmaktadır.  $C_D$  değerinin azaltılması; binek araçlar için ekonomik açıdan, belli hıza çıkması istenen araca daha küçük motor takılabilmesi anlamına gelir. Yarış arabalarında ise yüksek performans hedeflendiğinden motor gücü sabit bir aracın daha yüksek hıza erişebilmesi  $C_D$  değerinin önemini ortaya koyar.

Şekil 5.19'da tek Ahmed modeli ve ardışık konumlanmış Ahmed modeli için sürüklenme katsayısı ( $C_D$ ) değişimi verilmiştir. Burada gösterilen araç 1 öndeki, araç 2 ise arkadaki modeli temsil etmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere tek model için  $C_D$  sürüklenme katsayısı 0.38 civarındadır. İlk pozisyonda ( $x/L=2$ ) öndeki model ile tek Ahmed modeli karşılaştırıldığında sürüklenme katsayıları eşittir fakat araçlar arasındaki mesafe azaldıkça sürüklenme katsayısında da düşüşler meydana gelmiştir.  $x/L=1$  olduğu pozisyona kadar model 1'in sürüklenme katsayısında çok fazla bir değişiklik olmazken,  $x/L=0.5$  ve  $0.3$  pozisyonlarında model 1'in sürüklenme katsayıları azalarak 0.33 seviyesine kadar inmiştir. Model 2'nin sürüklenme katsayısı ise ilk pozisyonda ( $x/L=2$ ) tek Ahmed modelinin sürüklenme katsayısının hemen hemen yarısı kadardır ( $C_D=0.19$ ). Ardışık olarak hareketin devamında model 2 için sürüklenme katsayısı azalmakta ve modeller arasındaki mesafenin  $x/L=0.3$  olduğu pozisyonda  $C_D$  katsayısı 0.17 seviyelerine kadar düşmüştür.

Bu verilere bakılarak öndeki aracın  $C_D$  sürüklenme katsayısı modeller arasındaki mesafenin model boyunun 2 katı olduğu pozisyonda tek başına hareket eden modele göre bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Aynı pozisyonda arkadan gelen aracın sürüklenme katsayısında yarı yarıya bir düşüş gözlenmiştir bu da arkadan gelen aracın enerji sarfiyatının daha az olduğunun bir göstergesidir. Tabii araçlar birbirine yaklaştıkça her iki aracın da sürüklenme katsayısında düşüşler meydana gelmiş,  $x/L=0.3$  pozisyonu her iki araç içinde sürüklenme katsayısının ( $C_D$ ) en düşük olduğu pozisyondur. Arkadaki aracın sürüklenme katsayısı düşüşü öndeki aracın akış baskısının çoğunu üzerine almasından kaynaklanmaktadır.

Bu durum Formula yarışlarında daha net görülmektedir. Öndeki otomobile fazla yavaşan bir yarış arabasının üzerindeki rüzgâr baskısı azalır, çünkü rüzgârın esas baskısını öndeki otomobil karşılar, arkadaki otomobilin sürati artar. Ancak dikkat edilmesi gereken bir husus vardır, ön tekerin piste olan teması bu durumda zayıflar. Saatte 300 km hızla giden bir araç birden bire açıkta kalıp esen rüzgârla karşı karşıya geldiğinde arabanın altından giren hava tekerlerin yerle olan temasını keser (Lift etkisi) ve aracı havalandırır [28].



**Şekil 5.19** Tek ve ardışık konumlanmış araçların  $C_D$  sürüklenme katsayısı

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, referans bir kara taşıtı olan Ahmed modeli etrafındaki akış yapısı tek ve 2 farklı Ahmed cismi ardışık olarak beş farklı pozisyonda ( $x/L=2, 1.5, 1, 0.5, 0.3$ ) deneysel olarak incelenmiştir. Bu deneyler, iki boyutlu türbülanslı akım,  $u_0=218$  mm/s serbest akım hızı için parçacık görüntülemeli hız ölçümü tekniği kullanılarak yapılan hız ölçümleri ile gerçekleştirilmiştir. Akım alanındaki zamansal ortalama hız vektörleri, akım çizgileri ve eş düzey girdap eğrilerinin yanı sıra, modeller etrafındaki düşey simetri ekseninde yüzeye dik doğrultuda hız profilleri belirlenmiş ve hız alanı ile ilgili bulgulara dayanarak modellerden etkilenen akımın yapısı irdelenmiştir. Modeller etrafındaki anlık hız alanı ölçümlerinden vortekslerin gelişimi ve kopmaları irdelenmiş, ayrıca modellerin çalkantı hızlarının ve Reynolds gerilmelerinin değişimi verilmiştir.

Tek ve ardışık olarak konumlanmış  $Re_H=1.5 \times 10^4$  koşulları için Ahmed modeli etrafındaki akımın hız alanı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) paket programı olan FLUENT ile sayısal olarak hesaplanmış ve deney bulguları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmadan; tek model için farklı türbülans modelleri ile, ardışık olarak konumlanmış modellerde ise tek bir türbülans modeli ile elde edilen sayısal bulgular verilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Tek Ahmed modeli için zamansal ortalama akım çizgileri desenleri incelenmesinden, düşey ekseninde her iki düzlemde de modelin ön üst bölgesinde ve model arka bölgesinde toplam iki adet akış ayrılmasının gözlemlenmiştir. Simetri ekseninde ön üst bölgede meydana gelen akım ayrılması model yüzeyine yaklaştıkça küçüldüğü tespit edilmiştir. Model arkasında meydana gelen simetrik olmayan birbirine göre ters yönde dönen üst üste yerleşmiş iki adet girdap vardır. Bu girdaplardan saat yönünde dönen negatif girdap, saatin tersi yönde dönen pozitif girdaba göre daha fazla yer kaplamaktadır. Model arkasındaki akış ayrılma alanında birbiri üzerinde ters yönde

dönen iki girdabın düzlemlere göre merkez koordinatları ve durma noktası verilerine bakılarak kesitlere göre farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Negatif girdabın merkez noktası model yüzeyine yaklaştıkça yatay ekseninde ilerlemesine rağmen boyutları küçülmektedir ve girdap dairesel bir yapıdan daha basık bir yapıya dönüşmektedir. Pozitif girdabın merkez noktası ise model yüzeyine doğru düşey ekseninde modelin arka yüzeyine yaklaşmakta ve boyutu küçülmektedir. Model arka yüzeyine paralel ekseninde on farklı düzlemde ölçümler yapılmıştır. Bu düzlemlerde model eğimli yüzey üst noktasından doğan simetrik çevrinti çifti, akış yönünde ilerledikçe basıklaşıp yayılarak model sınırlarının dışına doğru genişlemekte ve birbirine yaklaşmaktadır. Son düzlemde ise ( $x/H=2.72$ ) girdap merkezleri, modelin ayakları seviyesine kadar inmektedir.

- Deneysel verilerin anlık görüntüleri incelendiğinde girdapların model arkasında yoğunlaştığı görülmektedir. Bu girdap yoğunluğu, tek Ahmed modelinin çalkantı hızlarının ve Reynolds gerilmelerinin değişiminde de görülmektedir. Türbülans yoğunluğu modelin arka kısmında çalkantı hızları ve Reynolds gerilmeleri değerlerinden anlaşılmaktadır.

- Tek Ahmed modeli için FLUENT Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği paket programı ile iki farklı türbülans modeli kullanarak yapılan örnek sayısal analizler sonucu, düzenli akım durumunda model etrafındaki akım çizgilerinin deneysel bulgularla genel olarak bir uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Düzenli akım durumu için verilen hız dağılımları,  $k - \epsilon$  türbülans modelinin diğer türbülans modeline göre daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir. Kullanılan her iki türbülans modelinin de model eğimli yüzey üzerine gelindiğinde uyumun bozulduğunu görmekteyiz. Ayrıca burada Ahmed modeli etrafında oluşan  $C_D$  sürüklenme katsayısı, 0.38 olarak hesaplanmıştır. Sürüklenme katsayısının değerindeki en önemli etkenin aracın dış formu etrafındaki akış ayrılmaları olduğu söylenebilir.

- Ardışık olarak beş farklı pozisyonda ( $x/L=2, 1.5, 1, 0.5, 0.3$ ) konumlanmış iki adet Ahmed modelinde, modeller arasında oluşan akış yapısındaki değişiklikler tespit edilmiştir. Düşey ekseninde zaman ortalamalı hız vektörleri, akım çizgileri ve eş girdap eğrileri dağılımından  $x/L=1$  pozisyonuna kadar Ahmed modeli arkasındaki akış yapısında bir değişiklik olmadığı ve akış ayrılmasının model

arkasından 0.6H mesafesine kadar genişlediği tespit edilmiştir.  $x/L=0.5$  olduğu pozisyonda ise akış yapısında bir değişiklik olmazken, ayrılmış akış bölgesi model arkasından itibaren 0.64H mesafesine kadar genişlemiştir.  $x/L=0.3$  pozisyonunda model eğimli yüzey üzerinde pozitif yönde dönen bir girdap oluşmuştur. Bu girdap model eğimli yüzeyinin alt köşesi seviyelerine kadar genişlemektedir. Model arkasındaki akış ayrılması ise model arkasından itibaren 0.7H seviyelerinde son bulmaktadır.

- Ardışık konumlanmış Ahmed modeli için FLUENT Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği paket programı ile yapılan örnek sayısal analizler sonucu, düzenli akım durumunda model etrafındaki akım çizgilerinin deneysel bulgularla genel olarak bir uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Düzenli akım durumu için verilen hız dağılımlarının,  $k - \omega$  türbülans modelinin  $x/L=0.3$  pozisyonuna kadar iyi sonuç verdiği fakat son pozisyonda uyumun bozulduğu tespit edilmiştir.

- Sayısal bulgulardan  $C_D$  sürüklenme katsayıları elde edilmiştir. İlk pozisyonlarda öndeki model ile tek Ahmed modeli karşılaştırıldığında sürüklenme katsayıları eşittir fakat araçlar arasındaki mesafe azaldıkça sürüklenme katsayısında da düşüşler meydana gelmiştir.  $x/L=1$  olduğu pozisyona kadar öncül Ahmed modelinin sürüklenme katsayısında çok fazla bir değişiklik olmazken,  $x/L=0.5$  ve 0.3 pozisyonlarında öncül Ahmed modelinin sürüklenme katsayıları azalmıştır. Arkadaki modelde ise yaklaşan pozisyonlar için sürüklenme katsayısındaki değişim, öndeki modele benzer şekilde azalmıştır fakat her pozisyon için arkadaki modelin  $C_D$  sürüklenme katsayısı, öndeki modelin hemen hemen yarısı kadardır. En düşük sürüklenme katsayısı, modeller arasındaki mesafenin  $x/L=0.3$  olduğu pozisyon içindir. Sonuç olarak araçların takip mesafesi ne kadar az olursa araçların  $C_D$  sürüklenme katsayıları o derece düşmektedir. Öndeki ve arkadaki aracın orantılı olarak yakıt sarfiyatı da düşmektedir. Fakat arkadaki araç için lift etkisi dikkat edilmesi gereken bir husustur. Arkadan gelen araca etkiyen akım baskısının büyük bir kısmın öndeki araç engellediği için arkadaki araç sollamaya çıktığı zaman akımla karşı karşıya gelecek ve arabanın altından giren hava tekerlerin yerle olan temasını kesmek isteyecektir.

Yapılanlara ilave olarak, daha farklı Reynolds sayısı koşullarında yapılacak deneysel çalışmaların, modeller etrafındaki akıma etkisinin anlaşılmasında faydalı

olacağı düşünölmektedir. Ayrıca farklı sayısal çözüml yöntemleri, türbölans modelleri ve ağ yapıları kullanılarak, teorik verilerin deneyler ile doğrulanması konusunda yapılacak araştırmaların çoğaltılması önerilmektedir.

**KAYNAKLAR:**

- [1]. Çakmak, M.A. ( 2000 ). “ Kara Taşıtlarının Aerodinamik Açından İncelenmesi” , Mühendis Makine, 41, 489, 35.
- [2]. Ahmed, S.R., Ramm, G. (1984). G. Faltin, Some salient features of the time averaged ground vehicle wake, SAE Paper 840300,
- [3]. Duell, E.G., George, A.R. (1999). Experimental study of a ground vehicle body unsteady near wake, SAE Paper 1999-01-0812.
- [4]. Spohn, A., Gillieron, P. (2002). Flow separations generated by a simplified geometry of an automotive vehicle, IUTAM Symposium on Unsteady Separated Flows, 8-12 April, Toulouse, France.
- [5]. Lienhart, H., Becker, S. (2003). Flow and turbulente structure in the wake of a simplified car model, SAE Paper 2003-01-0656.
- [6]. Vio, G., Watkins, S., Mousley, P., Watmuff, J., Prasad, S.(2005). Flow structures in the near-wake of the Ahmed model, J. Fluids and Structures 20 ,673-695.
- [7]. Lienhart, H., Stoots, C., and Bercher, S. (2000). “ Flow and turbulence structures in the wake of a simplefied car model ( Ahmed Body ) “ DGLR Fach Symp.der AGSTAB.
- [8]. Okada, M., Sheridan, J. ve Thompson, M., Effect of Width-to-Height Ratio on Wake Structures of Simplified Vehicle Geometry.
- [9]. Watkins, F., Flow separations generated by a Simplified Geometry of an Automotive Vehicle 10th joint ERCOFTAC (SIG-15) – IAHR – QNET/CFD Workshop on Refined Turbulance Modelling October 10 – 11, 2002.
- [10]. Watkins, F., Zimmer, S., Alam, G. (2003). “ Mean and time – varying flow measurements on the surface of a family of idealesed road vehicles ” Experimental Thermal and Fluid Science 27 639 – 654.
- [11]. Noger C., Regardin C., Szechenyş E.(2005). “ İnvestigation of the transient aerodynamic phenomena associated with passing manoeuvres “ JOURNAL OF FLUIDS AND STRUCTURES Volume: 21 Issue: 3 Pages: 231 – 241.
- [12]. Brunn A., Nitsche W. (2006). “ Darg reduction of an Ahmed car model by means of active separation control at the rear vehicle slant “ New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics V Book . Volume: 92 Pages: 249 – 256.
- [13]. Brunn A., Wassen E., Sperber D.(2006). “ Conferece on Active Flow Control “ Sep 27 – 29, Tech. Univ. Berlin, Berlin / Germany
- [14]. Watkins S., Vio G.(2004). “ The effect of vehicle spacing on the aerodynamics car shape”
- [15]. Huang J.F., Chan T.L. and Zhou Y.(2009). “ Three dimensional flow structure measurements behind a queue of studied model vehicles ” ( 2009 )



- [16]. Hinterberger, C., Garcia, M. (2004). – Villalba and W. Rodi “ Large Eddy Simulation of flow around the Ahmed body “
- [17]. Kapadia, S. and Roy S. (2004). “ Detached – Eddy Simulation Over a Reference Ahmed Car Model “
- [18]. Guilmineau, E.(2008), “ Computational study of flow around a simplified car body “
- [19]. Minguez M., Pasquetti R. and Serre E.(2008), “ Large eddy simulation of flow over the Ahmed body car model “
- [20]. Minguez M., Pasquetti R. and Serre E.,” Spectral Vanising Viscosity Stabilized LES of the Ahmed Body Turbulent Wake “
- [21]. Krajnovic S., Davidson L. (2005), JOURNAL OF FLUIDS ENGINEERING – TRANSACTIONS OF THE ASME Volume :127, Issue:5, Pages: 907 – 918
- [22]. Corin, R.J., He, L. and Dominy, R.G. (2008). “ A CFD investigation in to the transient aerodynamic forces on overtaking road vehicle models “ ( 2008 )
- [23]. Clarke, J., Filippone, A. (2007). “ Unsteady Computational Analysis of Vehicle Passing Journal of Fluids Engineering Volume: 129 Pages: 359 – 367.
- [24]. Makato T., Toshio K., Takuji N., Takahide N. and Takaki N.(2009), “ Computational visualization of unsteady flow around vehicles using high performance computing “
- [25]. Guilmineau E., Chometon F.(2009), “ Effect of Side Wind on a Simplified Car Model “
- [26]. M. Gohlke, J.F. Beaudoin, M. Amielh and F. Anselmet (2007). “ Effect of Unsteady Separation on an Automotive Bluff – Body in Cross – Wind
- [27]. Hucho, W.H., (1998). Aerodynamics of road vehicles, Fourth Edition, SAE Inc., Harbound 896 p
- [28]. <http://tr.wikipedia.org/wiki/Aerodinamik>
- [29]. <http://www.tkscientist.8m.com>
- [30]. <http://cars.blogs.ca/images/Ferrari-F1-F2005.jpg>
- [31]. <http://www.marksf1models.co.uk/CMC/M-052-leftside2med.jpg>
- [32]. DEMİRCİOĞLU, T.K., (2007). “Bir araç modelinin aerodinamik analizi ve sonucu elemanlar yöntemi ile simülasyonu”
- [33]. SARI, F.M. (2007), “ Hafif ticari taşıtlarda taşıt ön formuna etkiyen hava direncinin aerodinamik analizi ve yakıt sarfiyatına etkisi”
- [34]. ÖNER, A. A. (2007). “Dairesel kesitli yatay elemanlar etrafındaki akımın deneysel olarak incelenmesi”

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel bilgiler

Adı Soyadı	Ata AĞIR
Doğum Yeri ve Tarihi	Sivas, 08/10/1985
Medeni Hali	Bekar
Yabancı Dil	İngilizce
İletişim Adresi	Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 58140-Sivas
E-posta Adresi	agir.ata85@gmail.com

### Eğitim ve Akademik Durumu

Lise	Sivas Lisesi, 2002
Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi, 2008
Yüksek Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi, Devam Etmekte

### İş Tecrübesi

Karaoğlu Doğalgaz A.Ş.	Makine Mühendisi, 2008 – 2009
Suşehri belediyesi	Proje Asistanı, 2009 – 2010

### Ödüller, Teşvikler ve Üyelikler

MMO	Asil Üye, 2008 –
-----	------------------