

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜZEYLERİNDEN DÜZGÜN ÜFLEME YAPILAN KARE KESİTLİ SİLİNDİR  
ETRAFINDAKİ AKIŞTA AERODİNAMİK ÖZELLİKLERİN  
DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Ahmet Ömür TURHAL**

**ŞUBAT 2008  
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI






YÜZEYLERİNDEN DÜZGÜN ÜFLEME YAPILAN KARE KESİTLİ SİLİNDİR  
ETRAFINDAKİ AKIŞTA AERODİNAMİK ÖZELLİKLERİN  
DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ

Makina Yük. Müh. Ahmet Ömür TURHAL

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
“Doktor (Makina Mühendisliği)”  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09.01.2008

Tezin Savunma Tarihi : 15.02.2008

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU   
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Orhan AYDIN   
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ayşe DALOĞLU   
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ertan BAYDAR   
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Tahir YAVUZ 

Enstitü Müdür V. : Doç. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2008

## ÖNSÖZ

Bu çalışmada; hava, kara ve deniz taşıtlarında önemli bir parametre olan direncin kontrol edilmesinde etkili yöntemlerden biri olan yüzeyden düzgün (yayılı) üfleme uygulamasının incelenmesi amacıyla, kare kesitli küt bir cismin çeşitli yüzeylerinden yapılan üflemenin yüzey basınç dağılımı, direnç katsayısı, kaldırma katsayısı ve Strouhal sayısı gibi aerodinamik parametreler üzerindeki etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

Doktora tez çalışmamın gerçekleşmesinde her türlü yardım ve desteğini gördüğüm, değerli bilgileri ile beni yönlendiren danışmanım ve hocam sayın Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU'na teşekkür ederim. Ayrıca tecrübelerinden faydalandığım ve büyük desteğini gördüğüm Yrd. Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma, KTÜ Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Laboratuvarı'nda kurulan deney düzeneği ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmaya katkısından dolayı KTÜ Makina Mühendisliği Bölümü'ne teşekkür ederim.

Ahmet Ömür TURHAL  
Trabzon 2008

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Küt Cisim Aerodinamiği.....	1
1.3. Küt Cisim ve Girdap Kopma Olayı.....	3
1.4. Sınır Tabaka kontrol Yöntemleri.....	7
1.4.1. Aktif Sınır Tabaka Kontrol Yöntemleri.....	7
1.4.2. Pasif Sınır Tabaka Kontrol Yöntemleri.....	10
1.5. Literatür Araştırması.....	11
1.6. Çalışmanın Bilimsel Önemi.....	12
1.7. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	13
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	15
2.1. Deneysel Çalışma.....	15
2.1.1. Rüzgar Tüneli ve Çalışma Bölgesi.....	15
2.1.2. Çalışmada Kullanılan Model ve Özellikleri.....	17
2.1.3. Ölçüm İşlemi ve Veri Analizi.....	20
2.1.3.1. IFA 100 Thermal Pro Paket Programı.....	21
2.1.3.2. Basınç Ölçümü.....	22
2.1.3.3. Hız ve Girdap Kopma Frekansı Ölçümü.....	23
2.1.4. Sinyal Şartlandırma İşlemi.....	24
2.1.4.1. Offset İşlemi.....	24
2.1.4.2. Gain İşlemi.....	25
2.1.4.3. Low Pass Filter İşlemi.....	25

2.1.4.4.	Veri Toplama İşlemi.....	25
2.1.5.	Basınç Ölçüm Cihazlarının Kalibrasyonu .....	26
2.1.6.	Hız Ölçüm Cihazının Kalibrasyonu .....	28
2.1.7.	Çalışmada Kullanılan Boyutsuz Sayılar .....	29
2.1.8.	Belirsizlik Analizi.....	32
2.1.8.1.	Boyutsuz Sayıların Belirsizlik Değerleri.....	33
2.1.8.2.	Bağımsız Değişkenlere Ait Belirsizlik Değerleri .....	35
2.2.	Sayısal Çalışma .....	39
2.2.1.	Temel Denklemler .....	39
2.2.2.	Sınır Koşulları .....	42
2.2.3.	Denklem Ayrıklaştırması.....	44
2.2.4.	Bölge Ayrıklaştırması.....	45
3.	BULGULAR .....	50
3.1.	Üflemez Durum için Kare Kesitli Silindir Etrafındaki Akış .....	50
3.2.	Yatay Kare Kesitli Silindir Yüzeylerinden Yapılan Üfleminin Etkisi .....	58
3.2.1.	Tek Yüzeyden Üfleme Durumu .....	59
3.2.2.	İki Yüzeyden Üfleme Durumu .....	66
3.2.3.	Üç Yüzeyden Üfleme Durumu.....	71
3.2.4.	Bütün Yüzeylerden Üfleme Durumu.....	76
3.3.	Diyagonal Kare Kesitli Silindir Yüzeylerinden Yapılan Üfleminin Etkisi ...	79
3.3.1.	Tek Yüzeyden Üfleme Durumu .....	80
3.3.2.	İki Yüzeyden Üfleme Durumu .....	85
3.3.3.	Bütün Yüzeylerden Üfleme Durumu.....	90
3.4.	Regresyon ve Spektrum Analizi .....	93
4.	TARTIŞMA.....	101
4.1.	Üfleminin Basınç Katsayısı Dağılımına Etkisi .....	101
4.2.	Üfleminin Direnç ve Kaldırma Katsayısına Etkisi .....	103
4.3.	Üfleminin Strouhal Sayısına Etkisi.....	104
5.	SONUÇLAR.....	106
6.	ÖNERİLER .....	109
7.	KAYNAKLAR.....	110

ÖZGEÇMİŞ

## ÖZET

Kare kesitli küt cisimler etrafındaki akış; yüksek yapılar etrafındaki rüzgâr hareketi, çeşitli ısı değiştirgeci uygulamaları, deniz, hava ve kara taşıtlarının bazı donanımları etrafındaki akış gibi çeşitli uygulamalarda ortaya çıkar. Bu türden tasarımlarda; direnç ve kaldırma kuvvetinin kontrolü, ısı geçişinin iyileştirilmesi veya ısı korumanın sağlanması gibi bazı temel amaçlar hedeflenir. Cisimlerin yüzeylerinden yapılan üfleme veya emme, cisim etrafındaki akışa ait çeşitli parametreleri denetim altına alma amacıyla bilinen yöntemlerdendir.

Bu tez çalışması kapsamında; akışa karşı yatay ve diyagonal konumlarda duran kare kesitli silindirin çeşitli yüzeylerinden yapılan üflemenin; direnç ve kaldırma katsayıları ve Strouhal sayısı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla, bir rüzgâr tüneli üç farklı Reynolds sayısında (10000, 16000, 24000) ve çeşitli üfleme hızlarında yapılan deneylerde akış içerisinde bulunan silindir yüzeylerinde basınç ölçümü ve silindirin arkasındaki iz bölgesinde girdap frekans ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca yatay kare kesitli silindir etrafındaki iki boyutlu türbülanslı akışta, uygun sınır koşulları ile model yüzeylerinden yapılan üfleme için geliştirilmiş olan bir bilgisayar programı yardımıyla direnç katsayısı ve kaldırma katsayısı değerleri sayısal olarak elde edilmiş ve deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla; “Kato-Launder” iyileştirmeli  $k-\epsilon$  türbülans modelinin kullanıldığı ve denklem sisteminin sonlu hacim yöntemine göre ayrıklaştırıldığı bir algoritma kullanılmıştır.

Çalışmada elde edilen bulgular göstermiştir ki; bütün üfleme uygulamaları içerisinde yatay kare silindirin üflemez duruma göre direnç katsayısındaki en yüksek düşüş üst-arka-alt yüzeylerden yüksek hızda yapılan üflemede ortaya çıkmaktadır. Direnç katsayısındaki en fazla artış ise ön yüzeyden yüksek hızda yapılan üflemede görülmüştür. Strouhal sayısı için en düşük değerler arka yüzeyden ve bütün yüzeylerden yapılan üfleme uygulamasında elde edilmiştir. Dolayısıyla girdap kontrolü açısından en ideal olanın arka yüzeyden yapılan üfleme uygulaması olduğu belirlenmiştir. Diyagonal kare silindir yüzeylerinden yapılan üflemede en düşük direnç katsayısı ön yüzeylerden yapılan üfleme durumunda elde edilmiştir. Diyagonal kare silindirin ön-üst yüzeyinden yapılan üfleme uygulamasında Strouhal sayısının değişmediği, diğer bütün üfleme uygulamalarında Strouhal sayısının artan üfleme katsayısı ile birlikte artmakta olduğu görülmüştür. Sayısal sonuçlar bir ve iki yüzeyden üfleme durumunda deneysel veriler ile uyum gösterirken, diğer üfleme uygulamalarında farklılıklar ortaya çıkmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Geçirgen Yüzeyle Kare Silindir, Üfleme, Basınç Katsayısı, Direnç ve Kaldırma Katsayısı, Girdap Frekansı

## SUMMARY

### **Experimental and Numerical Investigation of the Aerodynamic Parameters in the Flow around a Perforated Square Cylinder with Uniform Injection**

The flows around square section bluff bodies, such as high-rise buildings, fan-coils, some parts of ships and submarines, aircrafts and road vehicles etc., are encountered in practical applications. In such designs, it is aimed that the control of drag and lift force, the enhancement of heat transfer and the thermal protection. The injection or suction through the perforated surfaces of the bodies is a known method of controlling the various flow and aerodynamic parameters.

In the context of this thesis, the surface pressure distribution and the vortex shedding frequency were investigated for the flow around perforated horizontal and diagonal square cylinders with uniform injection through various surfaces. For this purpose, surface pressure measurements on each square cylinder (horizontal and diagonal) and vortex shedding frequency measurements in the wake region were performed at three different Reynolds numbers (10000, 16000, 24000) in a wind tunnel. The parameters considered were injection coefficient, position of perforated surface (i.e., top, rear, top-rear, all etc.), pressure coefficient, drag coefficient, lift coefficient and the Strouhal number. In addition, the drag and lift coefficients of the horizontal square cylinder were computed by a home made code which includes the uniform injection effects through surfaces with the proper boundary conditions. For this purpose, the  $k-\epsilon$  turbulence model with Kato and Launder modification was employed and the differential equations were discretized by the finite control volume method.

The results showed that the lowest drag coefficient of the horizontal square cylinder was obtained for the highest injection velocity through top-rear-bottom surfaces, while the highest value was obtained for the highest injection velocity through front surface. The lowest values of the Strouhal number were obtained for the injections through rear and all surfaces, which is the finest application for the vortex dynamics control. In case of the diagonal square cylinder, the lowest drag coefficient was obtained for the injection through front surfaces. The Strouhal number was increased with increasing injection velocity for the all configurations except the injection through front-top surfaces which the Strouhal number was constant. The numerical results showed a good agreement with the measurements of the injections through one and two surfaces, while some discrepancies were seen in other injection applications.

**Key Words:** Perforated Square Cylinder, Injection, Pressure Coefficient, Drag and Lift Coefficients, Vortex Frequency

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa No</b>
Şekil 1.1. Akış alanında bir cisme etkiyen kuvvetler.....	2
Şekil 1.2. En-boy oranı ile basınç ve sürtünme direnci yüzdesinin değişimi .....	2
Şekil 1.3. Cisim yüzeyinden ayrılmanın gerçekleşmesi .....	3
Şekil 1.4. Dairesel kesitli küt cisim etrafındaki akış.....	4
Şekil 1.5. Yüzey pürüzlülüğünün ayrılma noktası üzerindeki etkisi .....	5
Şekil 1.6. Karman girdap caddesi .....	5
Şekil 1.7. Kare kesitli cisim üzerindeki akışta ayrılma ve iz bölgesi.....	6
Şekil 1.8. Akış alanı içerisinde dönen küt cisim ve Magnus Etkisi .....	8
Şekil 1.9. Üfleme uygulaması.....	8
Şekil 1.10. Emme uygulaması .....	9
Şekil 1.11. MEMS düzeneği ve hareket yönü.....	9
Şekil 1.12. Pasif sınır tabaka kontrol yöntemlerine örnekler .....	10
Şekil 2.1. Çalışmanın yapıldığı rüzgâr tünelinin şematik görünüşü .....	16
Şekil 2.2. Rüzgâr tünelinin genel görünüşü .....	16
Şekil 2.3. Çalışma bölgesinin şematik görünüşü .....	17
Şekil 2.4. Çalışmada kullanılan modelin şematik resmi .....	18
Şekil 2.5. Çalışmada kullanılan modelin perspektif görünüşü.....	18
Şekil 2.6. Geçirgen yüzey ve basınç prizleri.....	19
Şekil 2.7. Uç levha montajı.....	19
Şekil 2.8. Ölçüm işleminde kullanılan cihazların şematik görünüşü .....	20
Şekil 2.9. IFA 100 Thermal Pro paket programı ekran görüntüsü.....	22
Şekil 2.10. IFA 100 sabit sıcaklık anemometresi ve Modus marka basınçölçer .....	23
Şekil 2.11. Offset işlemi ve sinyal değerlerinin düşürülmesi .....	24
Şekil 2.12. Gain işlemi ve sinyallerin yükseltilmesi.....	25
Şekil 2.13. Kalibrasyon işleminde kullanılan cihazların bağlantı şeması.....	26
Şekil 2.14. TSI Model 1125 kalibrasyon cihazının genel görünüşü .....	27
Şekil 2.15. Çalışmada kullanılan basınçölçerlerin kalibrasyon eğrileri.....	28
Şekil 2.16. Model 1220-20 sıcak film probu kalibrasyon eğrisi.....	29
Şekil 2.17. Akış alanı içerisinde küt cisme etki eden kuvvetler ve bileşikleri.....	30



Şekil 2.18.	Zaman bağımlı türbülanslı bir büyüklüğün girdap periyodu içerisindeki bileşenleri.....	40
Şekil 2.19.	Hesaplama bölgesi ve sınır koşulları .....	43
Şekil 2.20.	Ayrıklaştırılmış hesaplama bölgesi ve ağ düzenlemesi .....	46
Şekil 3.1.	Çeşitli koşullar için basınç katsayısının model yüzeylerindeki değişimi ...	51
Şekil 3.2.	Frekans ölçüm istasyonları .....	51
Şekil 3.3.	Re=22000 değerinde çeşitli istasyonlarda ölçülen frekans değerleri .....	52
Şekil 3.4.	Re=22000 değeri için çeşitli tünel düşey kesitlerinde ölçülen hız değerleri .....	53
Şekil 3.5.	Re=22000 değeri için 45°'lik model açısında çeşitli tünel düşey kesitlerinde ölçülen hız değerleri.....	54
Şekil 3.6.	St-x/D değişimi .....	55
Şekil 3.7.	Strouhal sayısının Reynolds sayısı ile olan değişimi.....	55
Şekil 3.8.	Üflemez durum için Re=4300 değerinde 0° ve 45°'lik model açısında farklı anlarda elde edilen akış gözlem resimleri .....	57
Şekil 3.9.	Re=10000 için tek yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri .....	60
Şekil 3.10.	Re=16000 için tek yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri .....	60
Şekil 3.11.	Re=24000 için tek yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri .....	61
Şekil 3.12.	Ön yüzeyden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	62
Şekil 3.13.	Üst yüzeyden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	62
Şekil 3.14.	Arka yüzeyden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	62
Şekil 3.15.	Ön yüzeyden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	63
Şekil 3.16.	Üst yüzeyden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	63
Şekil 3.17.	Arka yüzeyden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	64
Şekil 3.18.	Ön yüzeyden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	65
Şekil 3.19.	Üst yüzeyden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	65

Şekil 3.20.	Arka yüzeyden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	65
Şekil 3.21.	Re=10000 için iki yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri .....	66
Şekil 3.22.	Re=16000 için iki yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri .....	67
Şekil 3.23.	Re=24000 için iki yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri .....	67
Şekil 3.24.	Ön ve arka yüzeylerden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	68
Şekil 3.25.	Üst ve alt yüzeylerden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	68
Şekil 3.26.	Ön ve arka yüzeylerden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	69
Şekil 3.27.	Üst ve alt yüzeylerden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	69
Şekil 3.28.	Ön ve arka yüzeylerden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	70
Şekil 3.29.	Üst ve alt yüzeylerden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	70
Şekil 3.30.	Re=10000 için üç yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri .....	71
Şekil 3.31.	Re=16000 için üç yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri .....	72
Şekil 3.32.	Re=24000 için üç yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri .....	72
Şekil 3.33.	Üst-ön-alt yüzeylerden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	73
Şekil 3.34.	Üst-arka-alt yüzeylerden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	73
Şekil 3.35.	Üst-ön-alt yüzeylerden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	74
Şekil 3.36.	Üst-arka-alt yüzeylerden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	74
Şekil 3.37.	Üst-ön-alt yüzeylerden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	75
Şekil 3.38.	Üst-arka-alt yüzeylerden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	75
Şekil 3.39.	Re=10000 için bütün yüzeylerden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri .....	76

Şekil 3.40.	Re=16000 için bütün yüzeylerden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri .....	77
Şekil 3.41.	Re=24000 için bütün yüzeylerden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri .....	77
Şekil 3.42.	Bütün yüzeylerden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	78
Şekil 3.43.	Bütün yüzeylerden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	78
Şekil 3.44.	Bütün yüzeylerden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	79
Şekil 3.45.	Re=10000 için tek yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri .....	81
Şekil 3.46.	Re=16000 için tek yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri .....	81
Şekil 3.47.	Re=24000 için tek yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri .....	82
Şekil 3.48.	Ön-üst yüzeyden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	83
Şekil 3.49.	Arka-üst yüzeyden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	83
Şekil 3.50.	Ön-üst yüzeyden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	84
Şekil 3.51.	Arka-üst yüzeyden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	84
Şekil 3.52.	Ön-üst yüzeyden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	85
Şekil 3.53.	Arka-üst yüzeyden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	85
Şekil 3.54.	Re=10000 için iki yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri .....	86
Şekil 3.55.	Re=16000 için iki yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri .....	86
Şekil 3.56.	Re=24000 için iki yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri .....	87
Şekil 3.57.	Ön-üst ve ön-alt yüzeylerden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	87
Şekil 3.58.	Arka-üst ve arka-alt yüzeylerden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	88
Şekil 3.59.	Ön-üst ve ön-alt yüzeylerden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	88

Şekil 3.60.	Arka-üst ve arka-alt yüzeylerden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi .....	89
Şekil 3.61.	Ön-üst ve ön-alt yüzeylerden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	89
Şekil 3.62.	Arka-üst ve arka-alt yüzeylerden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	90
Şekil 3.63.	Re=10000 için bütün yüzeylerden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri .....	90
Şekil 3.64.	Re=16000 için bütün yüzeylerden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri .....	91
Şekil 3.65.	Re=24000 için bütün yüzeylerden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri .....	91
Şekil 3.66.	Bütün yüzeylerden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	92
Şekil 3.67.	Bütün yüzeylerden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	92
Şekil 3.68.	Bütün yüzeylerden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi.....	93
Şekil 3.69.	Yatay kare silindirin iz bölgesindeki $x/D=2,5$ ve $y/D=0,5$ noktasında Re=10000'de yapılan frekans spektrum ölçümleri.....	98
Şekil 3.70.	Yatay kare silindirin iz bölgesindeki $x/D=2,5$ ve $y/D=0,5$ noktasında Re=10000'de yapılan frekans spektrum ölçümleri.....	99
Şekil 3.71.	Diyagonal kare silindirin iz bölgesindeki $x/D'=2,5$ ve $y/D'=1$ noktasında Re=10000'de yapılan frekans spektrum ölçümleri .....	100
Şekil 4.1.	Arka yüzeyden yapılan üfleminin hız alanları üzerindeki etkisinin şematik gösterimi.....	102

## TABLULAR DİZİNİ

	<b>Sayfa No</b>
Tablo 2.1. Üflemeziz durumdaki GCI değerleri .....	48
Tablo 2.2. Bütün yüzeylerden $v_w=0,002$ m/s değeri ile üfleme durumunda GCI değerleri .....	49
Tablo 3.1. Yatay model için yapılan basınç ölçümlerine ait $C_Q$ üfleme katsayısı değerleri .....	58
Tablo 3.2. Diyagonal model için yapılan basınç ölçümlerine ait $C_Q$ üfleme katsayısı değerleri .....	80
Tablo 3.3. $C_D$ ile $C_Q$ ve $Re$ arasındaki regresyon analizi .....	95
Tablo 3.4. $C_L$ ile $C_Q$ ve $Re$ arasındaki regresyon analizi .....	96
Tablo 3.5. $St$ ile $C_Q$ arasındaki regresyon analizi.....	97

## SEMBOLLER DİZİNİ

a, b, c	: Regresyon katsayıları
A, B, C, D	: Kare modelin sırasıyla ön, alt, arka ve üst kenarları
AR	: Modelin genişliğinin, çap veya kenar uzunluğuna oranı, $AR=L/D$
$\overline{C_D}$	: Ortalama direnç katsayısı
$C_D$	: Direnç katsayısı
cell-num	: Alt bölgelerde genişleyen ağ yönündeki toplam hücre sayısı
$\overline{C_L}$	: Ortalama kaldırma katsayısı
$C_L$	: Kaldırma katsayısı
$C_{\mu}, C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\epsilon$	: Türbülans modeli sabitleri
$C_p$	: Basınç katsayısı
$C_Q$	: Üfleme katsayısı
D	: Model kenar uzunluğu [m]
D'	: Model köşegen uzunluğu [m]
$e_a$	: Bağlı hata
E	: Gerilim [Volt]
f	: Etkin girdap kopma frekansı [Hz]
$F_D$	: Cisme etki eden basınç kuvveti
$F_L$	: Cisme etki eden kaldırma kuvveti
GCI	: Ağ yakınsaklık indeksi
H	: Tünel yüksekliği [m]
k	: Türbülans kinetik enerjisi
L	: Model boyu [m]
N	: Hesaplama kullanılan toplam hücre sayısı
p	: Görünen kesme hatası derecesi
$P_\infty$	: Serbest akışın statik basıncı [ $N/m^2$ ]
$P_k$	: Türbülans kinetik enerjisi üretim miktarı
Q	: Üfleme debisi [ $m^3/s$ ]
r	: Ağ genişleme oranı
$R^2$	: Belirleme katsayısı

Re	: Reynolds sayısı, $Re = \frac{u_{\infty} D}{\nu}$
$r_{\mu}$	: Viskozite oranı
S	: Akışkanın simetrik şekil değişimi
St	: Strouhal sayısı, $St = \frac{f \cdot D}{u_{\infty}}$
$t^*$	: Boyutsuz zaman
t	: Zaman [s]
TL	: İki tabakalı yaklaşım
Tu	: Türbülans şiddeti
u, v	: Hız bileşenleri
$u_{\infty}$	: Serbest akış hız değeri [m/s]
$V_w$	: Üfleme-emme hızı [m/s]
$\hat{y}_i$	: Regresyon doğrusundan (veya eğrisinden) hesaplanan değer
$y_i$	: Deneysel değer
$\bar{y}_i$	: Deneysel değerlerin ortalaması
WF	: Duvar fonksiyonu
x, y	: Kartezyen koordinatlar
$\Delta A_i$	: i'inci hücrenin alanı
$\Delta C_D$	: $C_D$ değişimi [%]
$\Delta C_L$	: $C_L$ değişimi [%]
$\Delta C_Q$	: $C_Q$ değişimi [%]
$\Delta t$	: Zaman adımı
$\Delta t^*$	: Boyutsuz zaman adımı
$\Delta x_{\min}, \Delta y_{\min}$	: Silindire komşu ilk hücrenin ağ genişliği
$\varepsilon$	: Türbülans kinetik enerjisi yutulma miktarı
$\phi$	: Herhangi bir bağımlı değişken
$\phi_k$	: k'inci düğüm noktasındaki çözüm değeri
$\Gamma$	: Üfleme parametresi
$\kappa$	: Von Karman Sabiti ( $\kappa=0,4$ )
$\mu$	: Dinamik viskozite
$\mu_t$	: Türbülans viskozitesi

$\nu$	: Kinematik viskozite [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$\nu_t$	: Türbülanslı kinematik viskozite
$\rho$	: Yoğunluk [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\tau$	: Kayma gerilmesi
$\tau_w$	: Cidardaki kayma gerilmesi
$\Omega$	: Yerel vortisite ile orantılı dönme parametresi

### Üst indisler

'	: Çalkantılı büyüklük
—	: Zaman ortalamalı büyüklük
~	: Periyodik büyüklük
+	: Normalize büyüklük

### Alt indisler

ext	: Extrapole edilmiş değer
-----	---------------------------



## **1. GENEL BİLGİLER**

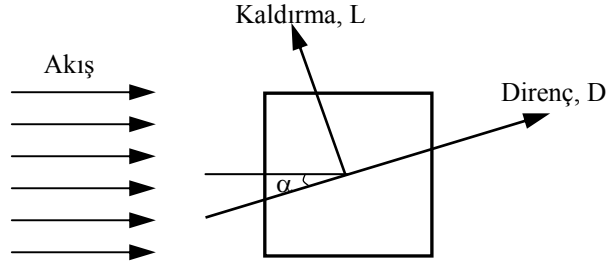
### **1.1. Giriş**

Bir akış içerisinde yer alan küt cisim ile ilgili uygulamalar birçok mühendislik uygulamasında ortaya çıkar. Yapılar ve taşıtlar akış alanı içerisinde yer alan küt şekilli cisimlerdir. Arabalar, uçaklar, denizaltılar gibi akışkan içerisinde hareket eden taşıtlar ve yüksek binalar, bacalar, petrol platformları gibi akış alanı içerisinde sabit duran cisimlerin akış ile olan etkileşimleri tasarım aşamasında birincil parametre olarak göz önüne alınmaktadır. Etrafındaki akış ile etkileşim içerisinde olan küt cisimlerin kesit şekline bağlı olarak yüzeylerinden gerçekleşen girdap kopması olayı akış kaynaklı şiddetli titreşimlere neden olmaktadır. Akış alanı içerisinde yer alan binaların şiddetli rüzgârlar karşısında titreşim ve gürültüye maruz kalmaları, akış alanı içerisinde hareket eden taşıtlarda ortaya çıkan şekil direnci nedeniyle yakıt tüketimlerinde ortaya çıkan artış, akışkan ve cisim etkileşiminin ne derece önemli olduğunu gösteren örneklerdir. Bu etkiyi denetim altına almak amacıyla uygulanan birçok yöntem ile girdap kopma frekansı, basınç dağılımı, direnç ve kaldırma katsayısı gibi aerodinamik özellikler istenilen düzeylere çekilebilmektedir.

### **1.2. Küt Cisim Aerodinamiği**

Bir cisim etrafındaki akışta akım çizgileri cismin yüzeyini takip etmiyor ve cismin geometrik şekli akışın yüzeyden ayrılmasına yol açıyorsa, cismin arkasında geniş bir iz bölgesi oluşuyorsa bu cisim aerodinamik anlamda küt cisim olarak tanımlanmaktadır (Cook, 1986). Bir cisme küt cisim denilebilmesi için akış alanı içerisinde akış doğrultusuna dik nispeten geniş bir yüzey alanına sahip olması ve akışı engelleme eğiliminin bulunması gerekmektedir.

Akış alanı içerisinde yer alan cisimler üzerinde akış kaynaklı belirli etkiler mevcuttur. Bu etkiler Şekil 1.1'de de görüldüğü gibi cisme serbest akış doğrultusunda etkiyen direnç kuvveti ve serbest akışa dik yönde etkiyen kaldırma kuvvetidir. Şekilde yer alan  $\alpha$  model açısını göstermektedir.

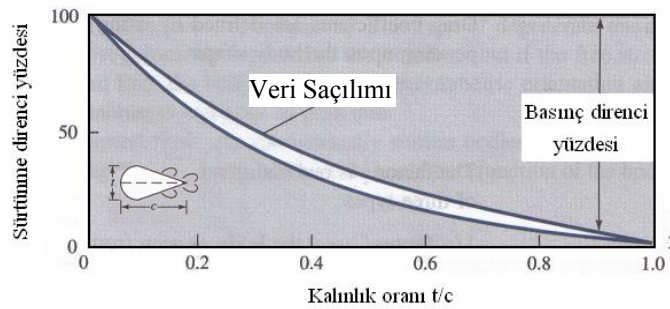


Şekil 1.1. Akış alanında bir cisme etkiyen kuvvetler

Direnç kuvveti cismin ön yüzeyinde ortaya çıkan yüksek basınç değeri ile arka yüzeyindeki ayrılma bölgesinde ortaya çıkan düşük basınç değerinin farkı ile yüzey sürtünmelerinden kaynaklanan direncin toplamı olarak belirlenmektedir. Uçak kanatları gibi aerodinamik yapıları cisimlerde viskoz etkilerden ve sürtünme kuvvetinden kaynaklanan direnç etkili olurken, kare veya dairesel kesitli silindir gibi küt cisimlerde basınç farkından kaynaklanan direnç kuvveti önem kazanmaktadır. Akış alanında bir cisme etki eden toplam direnç kuvveti;

$$C_D = C_{D, \text{sürtünme}} + C_{D, \text{basınç}} \quad (1.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Akışa paralel olarak duran ince uzun bir levhaya etki eden direnç kuvvetinin %90'lık kısmını, akışkanın yüzeye tutunup kalmasından dolayı sürtünme kuvvetinden kaynaklanan direnç oluştururken (ESDU-71012, 1971), bu değer küt cisimlerde %6 civarına kadar inmektedir (Bertin, 2002). Şekil 1.2'de artan en boy oranı ile birlikte cisim üzerine etkiyen direnç kuvvetinin oransal değişimi görülmektedir. En-boy oranının artışıyla birlikte cismin üzerine etkiyen sürtünme kaynaklı direnç azalmakta ve basınç farkı kaynaklı direnç değeri artmaktadır.

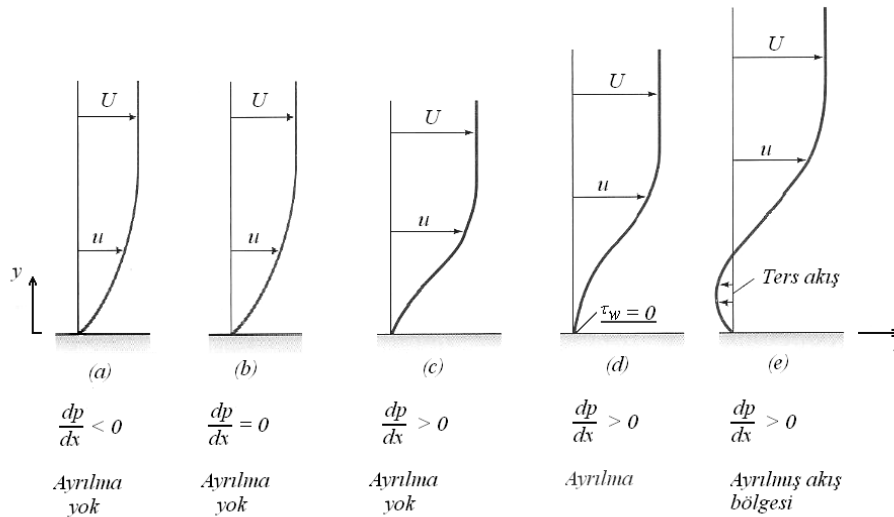


Şekil 1.2. En-boy oranı ile basınç ve sürtünme direnci yüzdesinin değişimi (White, 2001).

Kaldırma kuvveti ise cismin üst ve alt yüzeyine etki eden basınç kuvvetlerinin farkı şeklinde elde edilebilmektedir. Bu kuvvet cismin ağırlığına karşı koyduğu için aerodinamikte oldukça işe yarayan bir kuvvettir.

### 1.3. Küt Cisim ve Girdap Kopma Olayı

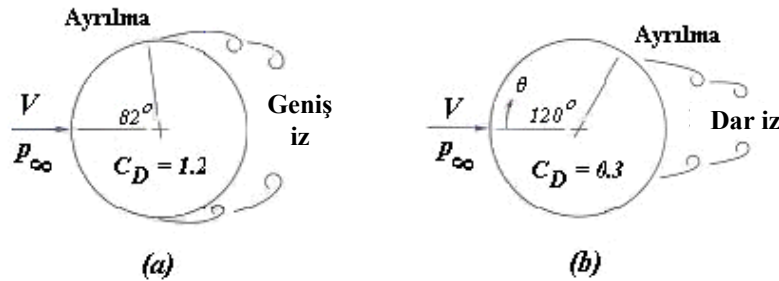
Küt cismin akışa geniş bir yüzey ile direnç göstermesi ve akışın belirli bir noktadan ayrılmasıyla girdap kopma (ilerleme) olayı (*Vortex Shedding*) meydana gelmektedir. Küt cisim yüzeyine çarpan akışkan hızı başlangıçta sıfır olmakta ve basınç en yüksek değerini almaktadır. Cisim yüzeyi boyunca hareket eden akışkandan dolayı ilk başta oluşan basınç gradyanının ( $dp/dx < 0$ ) yerini, cidar yakınında sürtünme kuvvetlerinin etkisiyle ters basınç gradyanı ( $dp/dx > 0$ ) alır. Cidardaki kayma gerilmesi değerinin sıfır olması durumunda ise ( $\tau_w = 0$ ,  $du/dy=0$ ) ayrılma gerçekleşir. Ayrılma noktasında yüzeye yakın akışkanın basınç gradyanını yenmek için yeterli enerjisi yoktur ve ileri hareketi olanaksızdır. Arkadan gelen akışkan, geri yöndeki akışa engel olduğu için sınır tabaka ayrılması oluşur. Sonrasında negatif basınç değerleriyle birlikte ortaya çıkan ters akış, yüzeyden ayrılmanın gerçekleştiğinin bir göstergesidir ve ayrılan akış cismin arkasında akışa ait bir karışım bölgesinin oluşmasına neden olur. Bu durum Şekil 1.3’de görülmektedir.



Şekil 1.3. Cisim yüzeyinden ayrılmanın gerçekleşmesi (White, 2001).

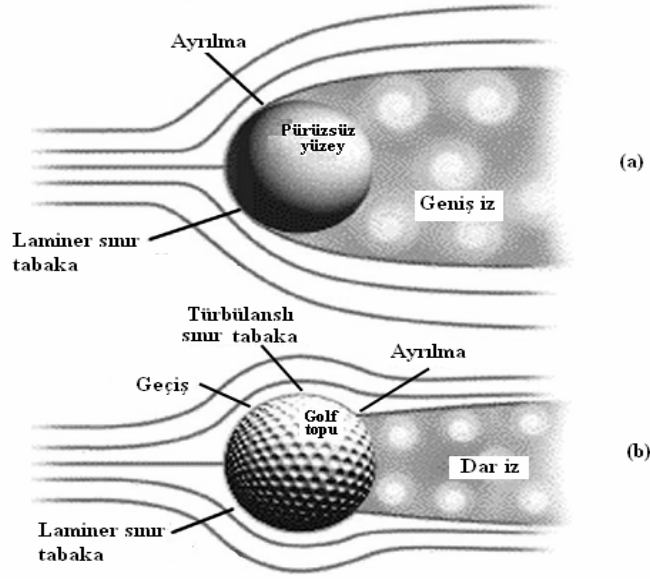
Akış içerisindeki cisim üzerinde oluşan sınır tabaka bir süre sonra cismin yüzeyinden ayrılır ve cisim arkasında bir iz bölgesinin oluşmasına neden olur. Ayrılma; küt cisimlerde cisim geometrisine bağlı olarak hızlı bir şekilde gerçekleşirken, aerodinamik yapıları cisimlerde akışın yüzeye tutunması ve yüzey boyunca hareket etmesi nedeniyle daha geç ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle küt cisimlerin arkasında oluşan iz bölgesi daha geniştir. Bu geniş iz bölgesinde bir karışım hareketi etkindir ve bu bölgede yüksek enerji kayıpları ortaya çıkar.

Bununla birlikte cisim yüzeyine temas eden akışkanın ayrılma noktası, cisim üzerinde etkili olan direnç kuvvetinin büyüklüğünü de etkilemektedir. Küt cisim üzerinden akışın ayrılması Reynolds sayısı, cisim geometrisi ve cismin yüzey pürüzlülüğü gibi unsurlara bağlı olarak gerçekleşmektedir. Örneğin; dairesel kesitli bir küt cisimde ayrılma noktası serbest akış hız değerinden etkilenmektedir. Artan Reynolds sayısı ile birlikte akış laminar özelliğini kaybederek türbülanslı bir yapıya büründüğü için ayrılma noktası cismin arkasına doğru hareket etmektedir. Şekil 1.4 (a) ve Şekil 1.4 (b)'den de görüldüğü gibi bu durumda ayrılma daha geç gerçekleşeceği için cismin arkasındaki iz bölgesi daralacak ve cisme etkiyen direnç kuvveti de düşecektir.



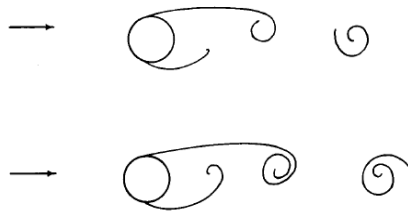
Şekil 1.4. Dairesel kesitli küt cisim etrafındaki akış; a) Laminer ayrılma, b) Türbülanslı ayrılma (White, 2001).

Benzer şekilde; cismin yüzey pürüzlülüğü de akışın ayrılma noktasını cismin arkasına doğru ötelemekte ve daralan iz bölgesi cisim üzerindeki basınç kaynaklı direnç kuvvetini düşürmektedir. Şekil 1.5'de pinpon ve golf topu etrafındaki akış durumunu gösteren bir resim görülmektedir. Yüzeyi nispeten daha pürüzlü olan golf topunun yüzeyinden ayrılma daha geç olmakta ve oluşan iz daha küçük olacağı için cisme etkiyen direnç kuvveti düşmektedir.



Şekil 1.5. Yüzey pürüzlülüğünün ayrılma noktası üzerindeki etkisi; a) Pinpon topu (pürüzsüz yüzey), b) Golf topu (pürüzlü yüzey) (URL-2, 2007).

Küt cisim üzerinde gerçekleşen bu ayrılma olayı sonrasında negatif basınç etkisiyle akış cisim kenarından içeri doğru dönme eğilimi gösterir ve girdap formuna ulaşmaya başlar. Bu olay cismin hem üst hem de alt köşesinde meydana gelir. Cismin her iki köşesi için de, akışa paralel bir kenarında sınır tabaka girdap formunu alırken diğer kenarda bir süre sonra girdap formuna sahip olacak olan bir başka sınır tabaka oluşmaya başlamaktadır. Cismin üst ve alt yüzeyinden oluşan girdaplar cisim kalınlığından dolayı birbirlerine temas etmemektedir. Ayrılma sonrası girdaplar büyüyerek belirgin bir boyuta ulaşırlar ve enerjilerini kaybedip serbest akışa karışmaya kadar model arkasında yol alırlar. Burada periyodik bir hareket söz konusudur. Sonuçta cisim arkasında periyodik olarak ortaya çıkıp kaybolan bu girdapların serbest akışa karışmaya kadar yol aldıkları bölgeye “Karman Girdap Caddesi” adı verilmektedir.



Şekil 1.6. Karman girdap caddesi (ESDU-71012, 1971).

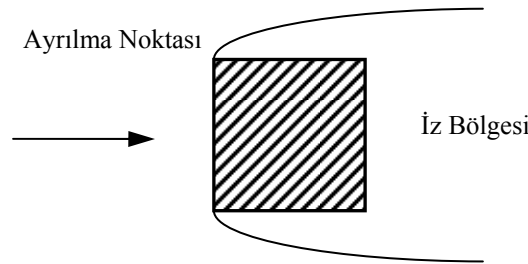
Dairesel kesitli bir silindir arkasındaki periyodik hareket, Reynolds sayısının  $10^2 < Re < 10^6$  aralığında boyutsuz frekansın yaklaşık olarak  $\omega D / (2\pi u_\infty) \cong 0.21$  değerinde oluşmaktadır (White, 2001). Strouhal sayısı olarak bilinen boyutsuz frekans;

$$St = \frac{f \cdot D}{u_\infty} \quad (1.2)$$

şeklinde tanımlanmakta olup, cismin kesit şeklinden ve Reynolds sayısından önemli ölçüde etkilenmektedir. Burada  $f$  cisim yüzeyinden kopan girdapların frekansını,  $D$  karakteristik uzunluğu ve  $u_\infty$  serbest akış hız değerini göstermektedir.

Cisim yüzeyinden kopan girdaplar akış içerisinde büyük ölçekli çalkantılara yol açmaktadırlar. Bununla birlikte artan Reynolds sayısı ile girdap kopma frekansı artmakta, gerek akış alanındaki cisimlerde gerek yapılarda şiddetli titreşimlere yol açmaktadır. Özellikle uygulamada esnek yapılarda girdap kopma frekansı değeri yapının doğal frekans değerine kadar çıkarak rezonans oluşumuna ve yapıda önemli hasarların ortaya çıkmasına yol açabilmektedir. Bu durum yapıların tasarımı aşamasında önemli bir parametre olarak göz önüne alınmaktadır.

Daha özellikli olarak kare kesitli küt cisim üzerindeki akışta, ayrılma noktasının yeri akış etkileriyle cismin arkasına doğru hareket etmemektedir. Bu hali ile kare kesitli küt cisim dairesele kesitli küt cisimden daha basit bir yapı ortaya koyar. Ayrılma; Reynolds sayısı ve serbest akışın türbülans şiddetinden bağımsız bir şekilde kare kesitli küt cismin üst ve alt kısmında yer alan keskin köşelerinde gerçekleşmektedir. Bu nedenle cisim arkasında geniş bir iz bölgesi oluşur. Şekil 1.7'de kare kesitli küt cisim üzerinden akışın ayrılması görülmektedir.



Şekil 1.7. Kare kesitli cisim üzerindeki akışta ayrılma ve iz bölgesi

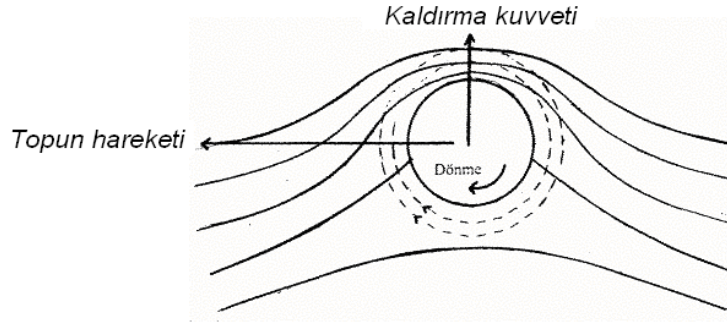
## 1.4. Sınır Tabaka Kontrol Yöntemleri

Akış alanındaki cismin akışkan ile olan etkileşimi kaçınılmazdır. Bu etkileşim esnasında direnç katsayısı, kaldırma katsayısı ve girdap kopma frekansları gibi aerodinamik büyüklükler ile ısı transfer katsayısı gibi ısı bir büyüklük ön plana çıkmaktadır. Akışkanın cisme teması ile ortaya çıkan sınır tabaka ve gerçekleşen ayrılma olayı bu büyüklükleri etkilemektedir. Sınır tabaka özelliklerinin istenilen düzeye çekilmesi ile akış alanındaki aerodinamik ve ısı bir büyüklükler uygun düzeylere çekilebilmektedir. Sınır tabakanın çeşitli yapay yöntemler ile denetim altına alınması mümkündür (Schlichting, 1979). Sınır tabaka denetim yöntemleri aktif ve pasif yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Aktif yöntemlerde cisim üzerinden akışkana çeşitli şekillerde enerji aktarımı söz konusu iken, pasif yöntemlerde cisim üzerindeki geometrik ve yapısal değişiklikler ile denetim söz konusudur.

### 1.4.1. Aktif Sınır Tabaka Kontrol Yöntemleri

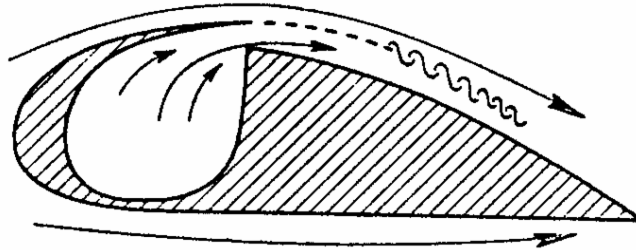
1. Katı Yüzeyin Hareket Ettirilmesi: Ayrılmayı önlemek amacıyla sınır tabaka oluşumunu durdurmaya yönelik bir yöntemdir. Akışkan ve katı yüzey arasındaki hız farkından dolayı ortaya çıkan sınır tabaka yapısı, katı yüzeyin hareket ettirilmesi suretiyle, hız farkı azaltılarak istenilen düzeye çekilebilmektedir (Schlichting, 1979).

Akış alanı içerisinde hareket ettirilen küt bir cismin üst yüzeyindeki akış cisme temas etmekte fakat ayrılmamaktadır. Alt yüzeyde ise, akış ve cisim hareketinin birbirlerinden farklı olması sebebiyle tam bir ayrılma oluşmaktadır. Örneğin bir ping-pong topu hava içinde hareket ederken eksenini etrafında dönerse kaldırma kuvvetine maruz kalır. Topun tepesi ana akım doğrultusunda dönüyorsa burada akım daha da hızlanırken alt kısımda da aynı şekilde yavaşlayacaktır. Bunun sonucunda iki yüzey arasında oluşan basınç farkından kaynaklanan kaldırma kuvveti yukarı doğrultuda etki edecek, buna karşın tersi doğrultuda dönerse aşağı doğrultuda tesir edecektir. Buna “Magnus Etkisi” denilmektedir. Bu durum şematik olarak Şekil 1.8’de görülmektedir.



Şekil 1.8. Akış alanı içerisinde dönen küt cisim ve Magnus Etkisi

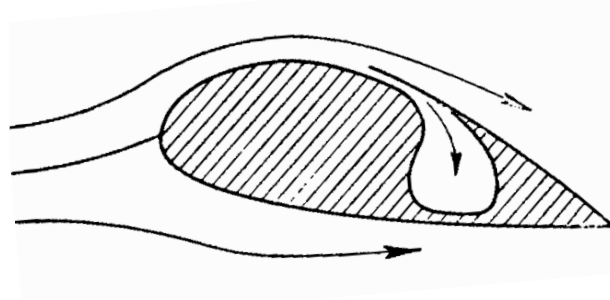
2. Üfleme: Sınır tabakanın hızlandırılması olarak ta adlandırılabilen bir yöntemdir. Enerjisini kaybetmiş ve yavaşlamış olan akışkan tabakasına ilave enerji verilerek ayrılmanın engellenmesi prensibine dayanmaktadır (Schlichting, 1979). Şekil 1.9'da aerodinamik bir cisim üzerinde ayrılmanın oluşacağı bölgeye yapılan üflemenin etkileri görülmektedir.



Şekil 1.9. Üfleme uygulaması (Schlichting,1979).

3. Emme: Cisim ile teması esnasında hızını kaybetmiş akışkan tabakasının cisim yüzeyinden emme yapılarak nispeten daha hızlı akışkan tabakası ile yerinin değiştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu şekilde hız kaybetmiş akışkan tabakasında oluşabilecek ayrılma durumu engellenebilmektedir. Şekil 1.10'da emme uygulaması ile hızını kaybetmiş olan akışkan tabakasının cisim yüzeyine yaklaştırılarak ayrılmanın engellendiği görülmektedir.

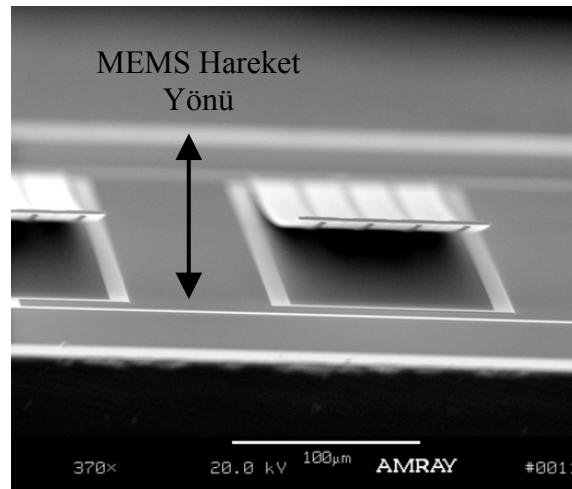




Şekil 1.10. Emme uygulaması (Schlichting,1979).

4. Yüzeyin Soğutulması: Süpersonik Mach sayılarının belirli sınırları içerisinde sınır tabakayı duvarın soğutulması yöntemiyle tamamen dengelemek mümkündür. Cidardan akışkana ısı transferi sınır tabakayı dengelediği için yüzeyin soğutulması yoluyla sınır tabakanın kontrol edilmesi sadece süpersonik akışlarda uygulanır. Soğutmaya sınır tabakanın kalınlığı azaltılabilir. Örneğin, en basit anlamda rüzgar tünellerinde çok kalın sınır tabakanın test bölgesindeki kullanılabilir alanı azaltacağı açıktır (Schlichting, 1979).

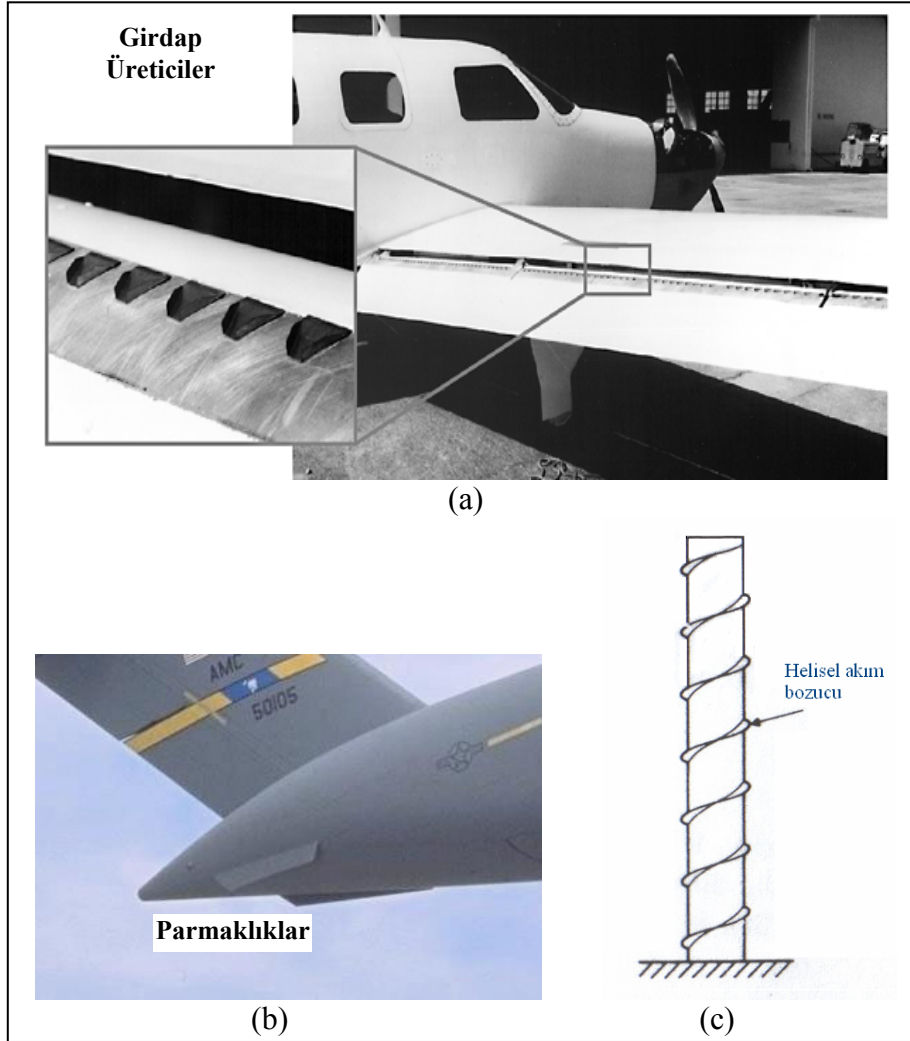
5. Mikro-Elektromekanik Uygulamalar (MEMS): MEMS sistemleri akış alanı içerisinde yer alan cisim üzerinde kullandıkları yüzey üzerinde gerçekleşen akış boyunca mekanik hareketler yardımıyla girdaplar üretirler. Bu girdaplar sınır tabaka dışındaki bölgeden sınır tabaka içerisine momentum transferi yaparlar ve ayrılmayı bu şekilde engellenmiş olurlar. Oldukça küçük boyutludurlar ve uygulamada sayıca çok fazla kullanılmaktadırlar (Borgeson, 2002).



Şekil 1.11. MEMS düzeneği ve hareket yönü (Borgeson, 2002).

### 1.4.2. Pasif Sınır Tabaka Kontrol Yöntemleri

Cisim geometrisindeki yapısal değişiklikleri içeren pasif sınır tabaka kontrol yöntemleri mühendislik uygulamalarında sıkça karşılaşılan yöntemlerdir. Temelde bu yöntemler küçük geometrik uygulamalar yardımıyla cisim üzerinde sınır tabaka oluşumu sağlamaya ve akış ayrılmasını engellenmeye çalışılmaktadır. Pasif kontrolde kullanılan elemanlar; girdap üreticiler, parmaklıklar, akım yönlendiriciler, yayıcılar, uygun şekilli cisimler şeklinde sıralanabilir (Şekil 1.12). Örneğin girdap üreticileri, MEMS sistemlerine benzer şekilde akış alanına yerleştirildiklerinde akış boyunca girdaplar üretmektedirler. Bu girdaplar serbest akış momentumunu sınır tabaka içerisine taşımakta ve duvar yakınındaki akışa transfer edilen momentum da ayrılmayı engellemektedir (Johnston, 1999).



Şekil 1.12. Pasif sınır tabaka kontrol yöntemlerine örnekler; a) Girdap üreticiler, b) Parmaklıklar, c) Uygun şekilli cisimlerden yararlanma

### 1.5. Literatür Araştırması

Konu ile ilgili olarak yapılmış olan çeşitli çalışmalarda; geçirgen yüzeyden yapılan üfleme veya emmenin, ortalama hız ve sıcaklık gradyanları, direnç katsayısı, ısı taşınım katsayısı gibi çeşitli büyüklükler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Simpson (1970); geçirgen ve geçirgen olmayan yüzey durumları için mevcut çalışmaları gözden geçirmiş ve mevcut logaritmik duvar kanunu ifadesini üfleme durumu da içerecek şekilde daha da geliştirmiştir. Schetz ve Nerney (1977); geçirgen yüzeyin normali doğrultusundaki üfleme hızına ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak türbülanslı sınır tabaka için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada türbülanslı sınır tabaka içerisindeki hız ve türbülans şiddetinin artan üfleme oranı ile artmakta olduğu sonucuna varmışlardır. Yang ve diğerleri (1994); bir basamak üzerinde ayrılan-tekrar temas eden akışta düzgün (üniform) ve normal yöndeki üflemenin etkisini deneysel olarak incelenmişlerdir. Bellettre ve diğerleri (1999) tarafından geçirgen bir yüzeyden türbülanslı sınır tabakaya yüzeyin normali yönünde yapılan üfleme sayısal olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel ölçümler ile kıyaslanmıştır. Hwang ve Linn (2000) düşük Reynolds sayılı  $k-\epsilon$  modeli ve doğrudan sayısal simülasyon ile üflemenin uygulandığı akışlar için dinamik ve ısı alanları belirlemeye çalışmışlardır. Meinert ve diğerleri (2001) yaptıkları çalışma ile türbülanslı sınır tabakaya geçirgen bir yüzeyden farklı bir gaz üflenmesinin duvar ile akış arasındaki ısı geçişini önemli ölçüde etkilediğini saptamışlardır. Kudriavtsev ve diğerleri (2001) düzlem geçirgen yüzey üzerindeki dış akışa uygulanan üflemeyle ilgili sayısal bir çalışma yapmışlar ve sonuçta sınır tabaka ve katı duvar arasındaki yüzeyde dirençte önemli bir düşüş olduğunu belirlemişlerdir. Çuhadaroğlu (2004) açılı üflemenin türbülanslı sınır tabaka özellikleri üzerindeki etkisini araştırmış ve yerel sürtünme katsayısı ile ısı sınır tabaka kalınlığının üfleme hızına ve açısına bağlı olarak değiştiğini belirlemiştir.

Geçirgen levha üzerinden yapılan üflemenin sınır tabaka özellikleri üzerindeki etkisine ilişkin çalışmaların sonuçları; küt cisim yüzeyinden yapılan üfleme gibi daha karmaşık geometrili çalışmalara ışık tutmuştur. Geçirgen levha üzerindeki türbülanslı sınır tabakaya yapılan üfleme ile ilgili birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen, küt cisim yüzeyinden yapılan üflemenin akış özellikleri üzerindeki etkisine ilişkin çalışma sayısı sınırlıdır. Bu çalışmalardan biri Hanneman ve Oertel (1989) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada levha üzerinden yapılan yetersiz arka sızmanın kararsız laminer akışlarda girdap caddesinin şiddetini azalttığını deneysel veriler ışığında sayısal olarak

kanıtlamışlardır. Schumm ve diğerleri (1994)'de laminer akışta art izin ısıtılması, enlemesine salınım ve arkadan sızıntı durumunda girdap kopması üzerine çalışmışlardır. Lyn ve diğerleri (1995)  $Re=21400$  değeri için iz yakınındaki bölgede Laser Doppler Anemometresi ile yaptıkları ölçüm sonuçlarına yer vermişlerdir. Bosch ve Rodi (1998) kare kesitli silindir etrafındaki girdap kopma olayını çeşitli türbülans modelleri için incelemişlerdir. Sonuçta standart  $k-\epsilon$  türbülans modelinin makul sonuçlar verdiğini belirlemişler ve en iyi sonuçların iki tabakalı yaklaşım ile Kato-Launder iyileştirmesinin bir arada kullanılması sonucunda elde edildiğini ortaya koymuşlardır. Silindirik kesitli küt cisim etrafından yapılan üflemeyle ilişkin Mathelin ve diğerleri (2001) tarafından yapılmış olan çalışma bu konuda yapılmış olan sınırlı sayıdaki çalışmalardan biridir. Bu çalışmada geçirgen dairesel silindir boyunca yapılan tam üflemenin soğutma etkinliği, deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Yine Mathelin ve diğerleri (2002) geçirgen dairesel kesitli silindir etrafındaki akışta bütün yüzeylerden üfleme durumunu sayısal olarak incelemişlerdir. Basıncın silindir arkasını terk etmesi ve üfleme ile dolma eğilimi göstermesi bu çalışmanın ortaya koyduğu bir sonuçtur. Fransson ve diğerleri (2004) Reynolds sayısının  $8,5-25 \times 10^3$  aralığında, dairesel silindir yüzeyinden yapılan üfleme veya emmenin direnç katsayısı ve Strouhal sayısı üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Üfleme miktarıyla birlikte silindir üzerindeki direnç katsayısının doğrusal bir şekilde arttığını ve emme ile etkili bir şekilde azaldığını tespit etmişlerdir. Bunun yanında Strouhal sayısının üfleme ile artarken emme ile azaldığını ortaya koymuşlardır. Younis ve Przulj (2004) kare ve dairesel kesitli silindir etrafındaki girdap kopması olayının hesaplanmasında standart  $k-\epsilon$  türbülans modelinin uygun duvar fonksiyonları ile iyileştirilmesinin deneysel veriler ile uyum sağladığını göstermişlerdir.

### **1.6. Çalışmanın Bilimsel Önemi**

Akış alanında yer alan dairesel, dikdörtgen veya kare kesitli küt cisimlere uygulamada sıkça rastlamak mümkündür. Akışkan ile cismin etkileşimi sonucunda ortaya çıkan dinamik yükler, titreşim ve gürültü gibi etkenler uzun yıllardır tasarım aşamasında mühendisler tarafından göz önüne alınmaktadır. Örneğin, akış alanı içerisinde yer alan yüksek yapılar üzerinde oluşan basınç dağılımlarından dolayı bu yapıların titreşim ve gürültüye maruz kaldığı, bunların göz önüne alınmaması durumunda yapıya zarar verebileceği bilinmektedir. Bununla birlikte küt cisim etrafındaki akış esnasında ortaya

çıkan aerodinamik parametreler son derece karmaşık olmasına rağmen birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

Geçirgen bir yüzey boyunca yapılan emme ve üflemenin, türbülanslı sınır tabaka özelliklerini kontrol etmek için uygulanan etkili bir yöntem olduğu bilinmektedir. Yüzeyden yapılan emme ve üfleme; son yıllarda sayısal ve deneysel akışkanlar dinamiği alanında önemli bir inceleme konusu durumuna gelmiştir ve bu konu araştırmacılar tarafından incelenmeye devam etmektedir. Üfleme uygulaması düzlem levha üzerinde nispeten daha kalın bir sınır tabaka oluşmasını sağlamakta, yüzeydeki sürtünmeyi azaltmakta ve böylece direnç düşmektedir. Üfleme aynı zamanda, türbin kanatları ve uzay aracı lüleleri gibi yüksek sıcaklıkların ortaya çıktığı yüksek hızlı sistemlerde film tabakası oluşturma ile soğutma yapılmasında kullanılmaktadır. Ana akış hızı ile kıyaslandığı zaman üfleme hızı etkisinin düşük kalmasına rağmen, duvar yakınında artan momentum geçişi ile birlikte yüzeydeki sürtünme önemli ölçüde değişmektedir.

Bilindiği üzere sınır tabaka kontrolü, akışkanlar dinamiğinin en önemli çalışma alanlarından biridir. Sınır tabaka kontrol edilerek cismin üzerine etkiyen direnç kuvveti de kontrol edilebilmektedir. Sınır tabaka kontrolü hava, kara ve deniz taşıtlarında yakıt tüketiminin azaltılması, yapıların şiddetli rüzgârlar karşısında sağlamlığının artırılması ve maruz kaldıkları titreşimlerin azaltılması gibi konularda direncin azaltılması amacıyla uygulanabilmektedir. Üfleme yardımı ile küt cisim üzerinde oluşan sınır tabaka kontrol edilebilmekte ve bu sayede cisme etki eden basınç dağılımları, direnç katsayısı, kaldırma katsayısı ve girdap kopma frekansları gibi aerodinamik büyüklükler denetim altına alınabilmektedir.

### **1.7. Tezin Amacı ve Kapsamı**

Bu tez çalışmasında, türbülanslı bir akış içerisinde yer alan kare kesitli küt cismin çeşitli yüzeylerinden yapılan üflemenin; basınç dağılımları, direnç katsayısı, kaldırma katsayısı ve girdap kopma frekansları gibi aerodinamik büyüklükler üzerindeki etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla yapılmış olan deneylerde küt cisim olarak dört yüzeyinden üfleme yapılabilen kare kesitli silindir göz önüne alınmıştır. Kare kesitli küt cisim; akış alanı içerisine akış ile  $0^\circ$  ve  $45^\circ$  (diyagonal durum) açı yapacak şekilde yerleştirilerek çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sayısal kısmında da; geliştirilmiş olan bir bilgisayar programı yardımıyla, akış alanı içerisine  $0^\circ$ lik açı ile

yerleştirilmiş kare kesitli küt cisim yüzeyinden yapılan üflemenin aerodinamik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Direnç ve kaldırma katsayısı sayısal olarak hesaplanmış ve deneysel veriler ile olan uyum belirlenmiştir.

Literatürde dairesel kesitli küt cisim yüzeyinden yapılan üfleme durumuna ilişkin deneysel ve sayısal çalışmaların yer almasına karşın; kare kesitli küt cisim yüzeyinden yapılan üfleme durumuna ilişkin çalışma mevcut değildir. Bu çalışma; ele alınan konuda yapılmış ilk araştırma özelliğini taşımaktadır.

Tez, dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde genel bilgiler ve literatür araştırmasına yer verilmiştir. Yapılan çalışmaların yer aldığı ikinci bölümde; deneysel ve sayısal çalışmalar iki ayrı kısım halinde anlatılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular üçüncü bölümde verilirken; dördüncü bölümde bulguların değerlendirilmesine ve tartışmaya yer verilmiştir. Beşinci bölümde elde edilen sonuçlar yer alırken, altıncı bölümde gelecekte yapılabilecek çalışmalara ilişkin önerilere yer verilmiştir.

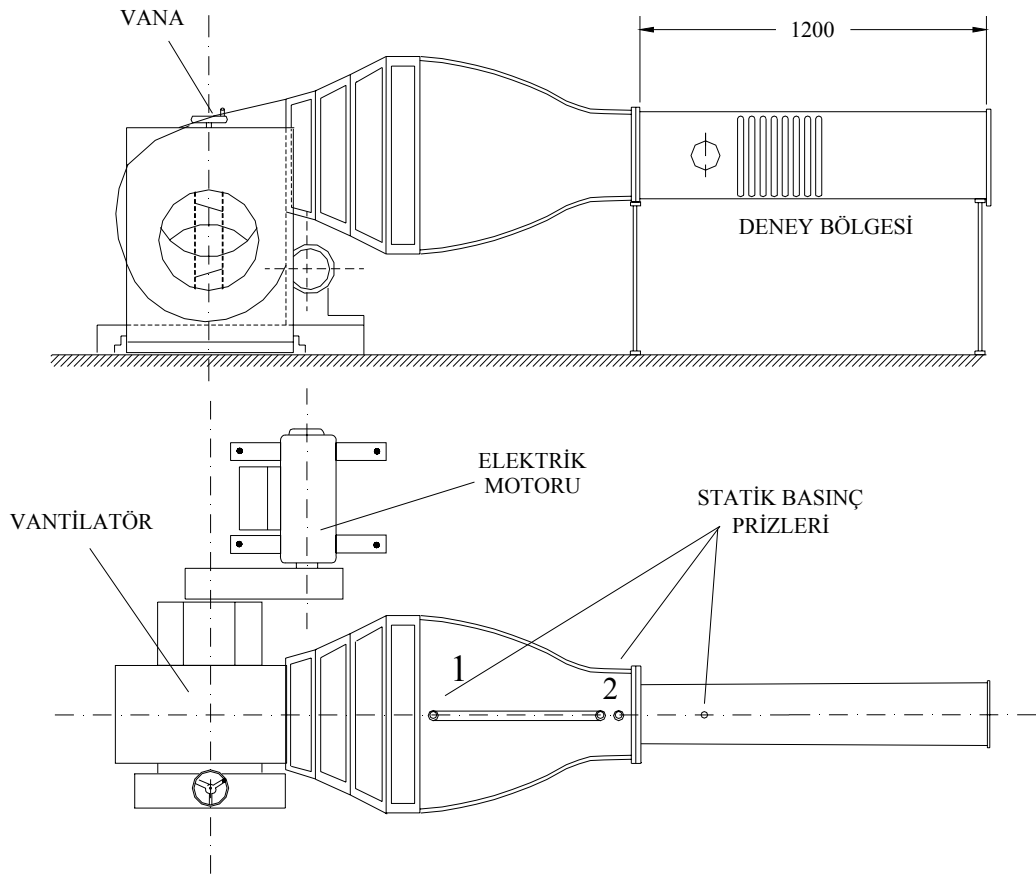
## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR**

### **2.1. Deneysel Çalışma**

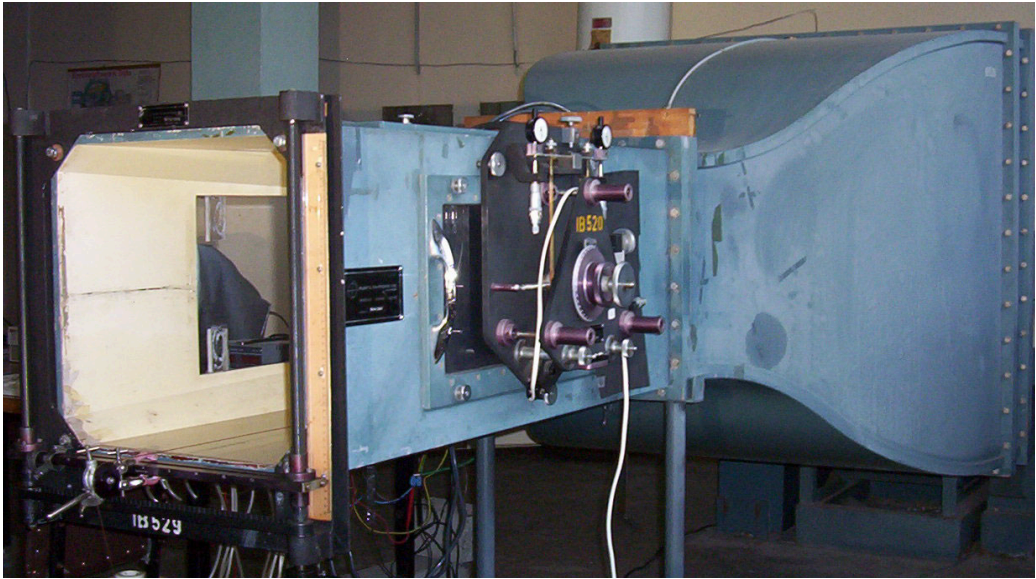
#### **2.1.1. Rüzgâr Tüneli ve Çalışma Bölgesi**

Deneysel çalışma KTÜ Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Laboratuvarı'nda bulunan TE44 model rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr tüneli 457×457 mm'lik bir test bölgesine sahip düşük hızlı üfleme tip bir tünel olup, 18kW gücünde bir motora sahiptir. Bir kayış-kasnak mekanizması yardımıyla motor, rüzgâr tünelinin fanını hareket ettirmekte ve tünelin yan tarafında bulunan bir bölmeden emilen hava tünel içerisine gönderilmektedir. Fan tarafından emilen hava ilk olarak bir bez filtreden geçmekte ve giriş kanalına ulaşmaktadır. Buradaki düzgün olmayan akış sabit bir basınç yayıcısı içerisinde yer alan tel elekler sayesinde düzenli aksel hıza dönüşmektedir. Bu noktadan sonra hava akışı; daha da düzgünleşeceği iki adet düzeltici ızgaranın olduğu tünelin en geniş kesitli alanına sahip bölgeye ulaşır. Burada akış bir miktar daha düzgünleşerek 7,3/1'lik daralma oranına sahip daralma konisine iletilir. Kullanılan rüzgâr tünelinin şematik resmi Şekil 2.1'de ve genel görünüşü Şekil 2.2'de görülmektedir.

Daralma konisi, akış esnasında çalışma bölgesi boyunca yer alan köşe dolguları yardımıyla sınır tabakanın düzeltilmesi işlemini gerçekleştirmektedir. Bu sayede keskin köşelerden dolayı ortaya çıkabilecek olan olumsuzluklar giderilmektedir. Ayrıca çalışma bölgesindeki ortalama hız değerinin hesaplanmasında kullanılan "Rüzgâr Tüneli Referans Basınç Değeri" daralma konisinde yer alan statik basınç prizleri yardımıyla elde edilmektedir.



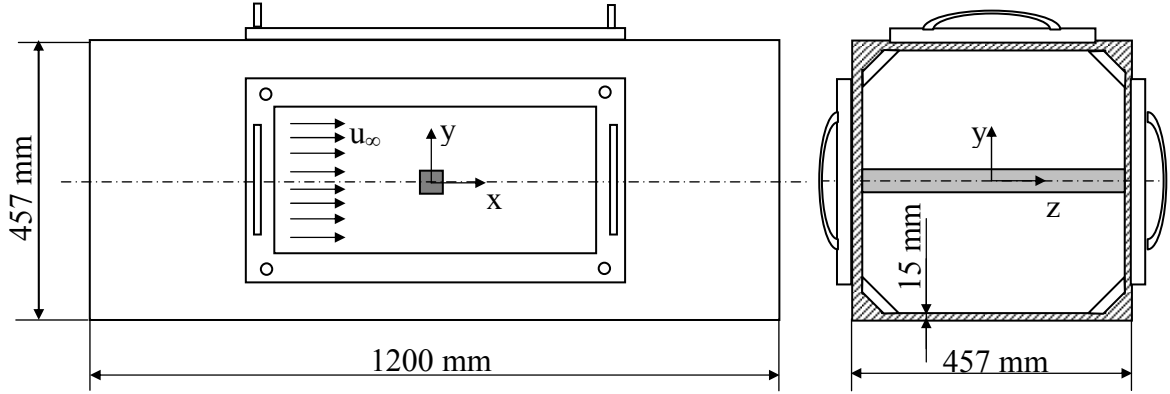
Şekil 2.1. Çalışmanın yapıldığı rüzgâr tünelinin şematik görünüşü



Şekil 2.2. Rüzgâr tünelinin genel görünüşü



Yapılan çalışmada modelin bağlandığı ve ölçümlerin alındığı rüzgâr tünelinin 457×457 mm boyutlarındaki orijinal çalışma bölgesi kullanılmıştır. Çalışma bölgesinin boyu 1200 mm uzunluğunda olup yan ve üst kısımlarda 305×610 mm boyutlarında toplam üç adet pleksiglass malzemeden yapılmış pencere yer almaktadır. Kullanılan kare kesitli model tünelin iki yanında yer alan pleksiglass pencerelerin üzerindeki açıklıklar kullanılarak merkezlenmiştir. Çalışma bölgesi ve modelin konumu şematik olarak Şekil 2.3’de gösterilmiştir.

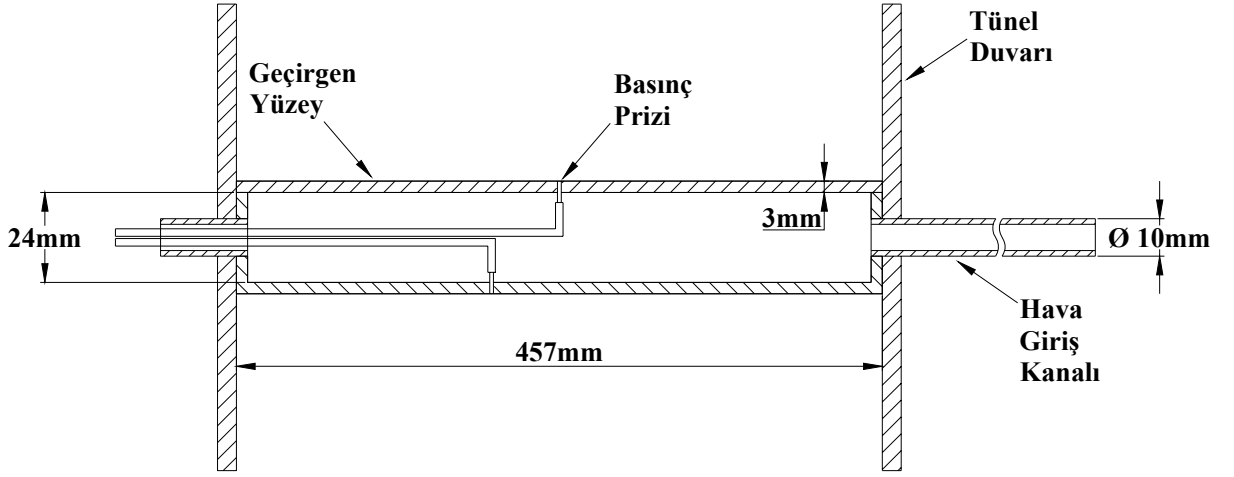


Şekil 2.3. Çalışma bölgesinin şematik görünüşü (Akansu, 2004).

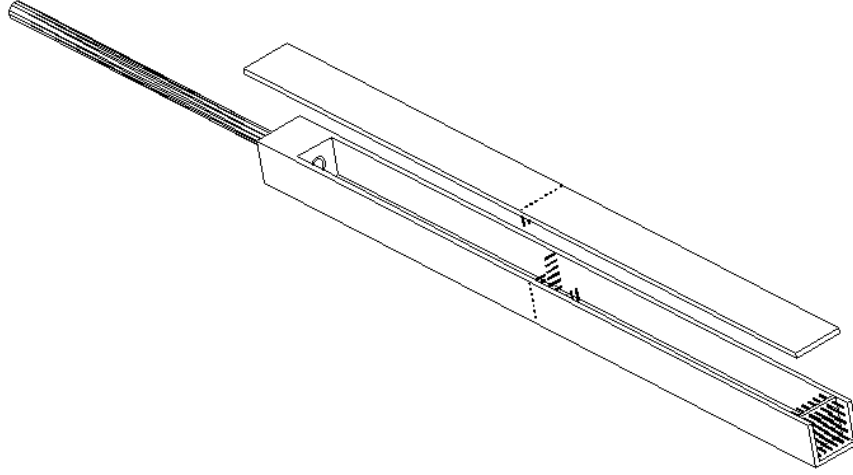
Boş tünelde yapılan hız taraması sonucunda serbest akış türbülans şiddeti değerleri  $Re=10000$  için %1,5,  $Re=16000$  için %1 ve  $Re=24000$  için ise yine %1 olarak elde edilmiştir. Artan tünel hız değeri ile birlikte serbest akışın türbülans şiddeti de azalmaktadır. Düşük hız değerlerinde, tünelin üfleme tip olması sebebiyle emilen havanın sabit basınç yayıcısında kararsızlığının artması türbülans şiddetlerini arttırmaktadır (Akansu, 2004).

### 2.1.2. Çalışmada Kullanılan Model ve Özellikleri

Deneysel çalışmada dört yüzeyinden üfleme yapılabilecek şekilde tasarlanmış ve imal edilmiş kare kesitli bir silindir kullanılmıştır. Modelin imalatında temel malzeme olarak hafif ve kolay işlenebilir olması bakımından pleksiglass malzeme tercih edilmiştir. Kullanılan modelin şematik ve perspektif görünüşü Şekil 2.4 ve Şekil 2.5’de verilmiştir.



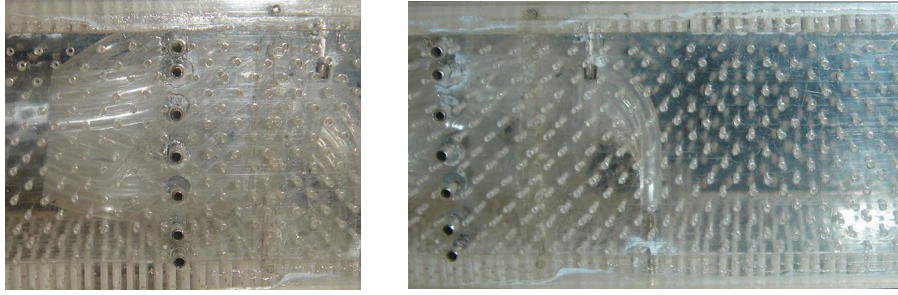
Şekil 2.4. Çalışmada kullanılan modelin şematik resmi



Şekil 2.5. Çalışmada kullanılan modelin perspektif görünüşü

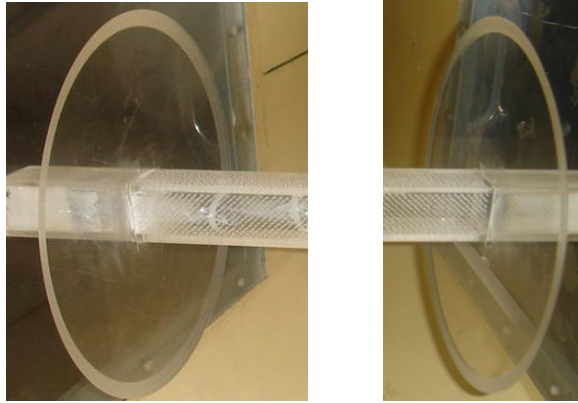
30×30×457 mm boyutlarında keskin köşeli olarak imal edilen model isteğe bağlı olarak dört yüzeyinden de üfleme yapılabilecek şekilde geçirgen olarak yapılmıştır. İmalat esnasında model içerisine basınç prizlerinin yerleştirilebilmesi için model 4 parçalı olarak tasarlanmıştır. 457×24×3 mm'lik düz parçalar bir araya getirilerek, basınç prizlerinin montajına elverişli içi boş kare kesitli bir silindir imal edilmiştir. Her bir parçanın imalatında 0,5 mm'lik bir matkap ucu kullanılarak uçlarından itibaren 60 mm'lik kısımlar hariç tüm yüzeyleri 2 mm'lik aralıklarla delinerek geçirgen yüzeyler elde edilmiştir. Her

yüzeyde 1477 adet delik bulunmaktadır. Modelin yaklaşık olarak orta bölgesine 1,3 mm'lik bir matkap ucu yardımıyla enine 7 adet delik açılmış ve bu deliklere 0,8 mm iç çaplı basınç prizleri yerleştirilmiştir. Model üzerinde, her yüzeyde 7 adet olmak üzere toplam 28 adet basınç prizi mevcuttur. Ölçümlerde kullanılan basınçölçer basınç prizlerinin bağlantısı sert plastik hortum ile yapılmıştır. İmal edilen modelde küt cisim formunu koruyabilmesi için köşelerin 90°'lik bir açığa sahip olmasına dikkat edilmiştir. Şekil 2.6'da geçirgen yüzey ve basınç prizleri görülmektedir.



Şekil 2.6. Geçirgen yüzey ve basınç prizleri

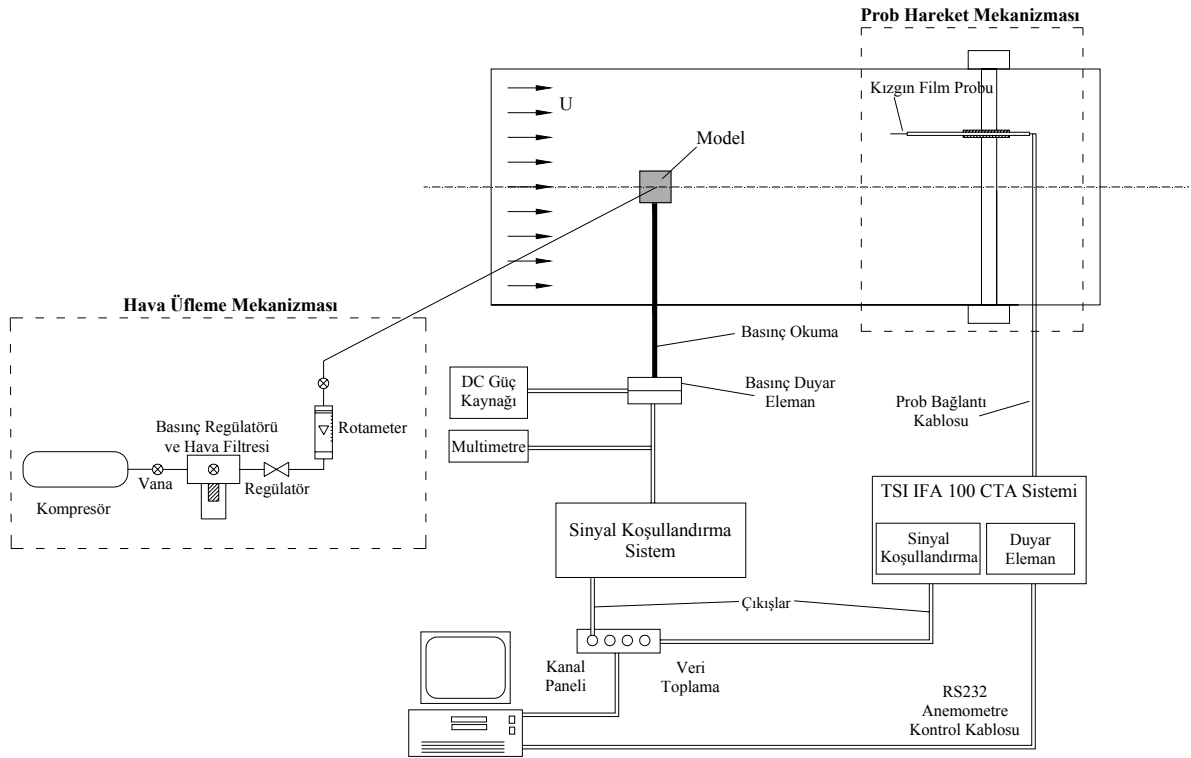
Hazırlanan modelin uç kısımlarından 60 mm içeride iki adet uç levha (end plate) bağlanmıştır. Bilindiği üzere tünel yan duvarlarında oluşan sınır tabaka, model üzerinde belirgin bir etki yaratmaktadır (Bearman ve Wadcock, 1973). Kullanılan uç levhalar bu etkiyi en aza indirmektedir. 200 mm çapında 4 mm kalınlığından dairesel olarak hazırlanmış ve modelin geçirgen yüzey başlangıç noktasına modelle 90°'lik açı yapacak şekilde bağlanmıştır.



Şekil 2.7. Uç levha montajı

### 2.1.3. Ölçüm İşlemi ve Veri Analizi

Ölçümlerde iki adet basınçölçer, sıcak film probu, IFA 100 sabit sıcaklık anemometresi ve IFA 100 Thermal Pro yazılımı kullanılmıştır. Ölçüm işleminde kullanılan cihazlar şematik olarak Şekil 2.8’de görülmektedir. Yapılan çalışmada akış ortamı içerisinde yer alan modelin bir yüzeyinden yapılan üflemenin etkisini görebilmek için üfleminin olmadığı ve olduğu durumlarda model yüzeyinden basınç değerleri ölçülmüştür. Kızgın film probu Plint&Partner firması yapımı TR500 model iki boyutlu olarak yatay ve düşey doğrultuda 500 mm hareket edebilen hareket mekanizması yardımıyla konumlandırılmıştır. Mekanizma üzerindeki kolun çevrilmesiyle prob en az 2 mm yol almaktadır. Model içerisinden havanın üflenmesini sağlayan mekanizma; hava tankı, basınç regülatörü, hava filtresi ve rotametreden oluşmaktadır. Regülatör hava kaynağında belirli bir basınç değerine ulaşarak depolanan havanın iletimi sırasında ortaya çıkan süreksizlikleri gidermekte ve üflenecek hava miktarı rotametre yardımıyla belirlenmektedir.



Şekil 2.8. Ölçüm işleminde kullanılan cihazların şematik görünüşü

### 2.1.3.1. IFA 100 Thermal Pro Paket Programı

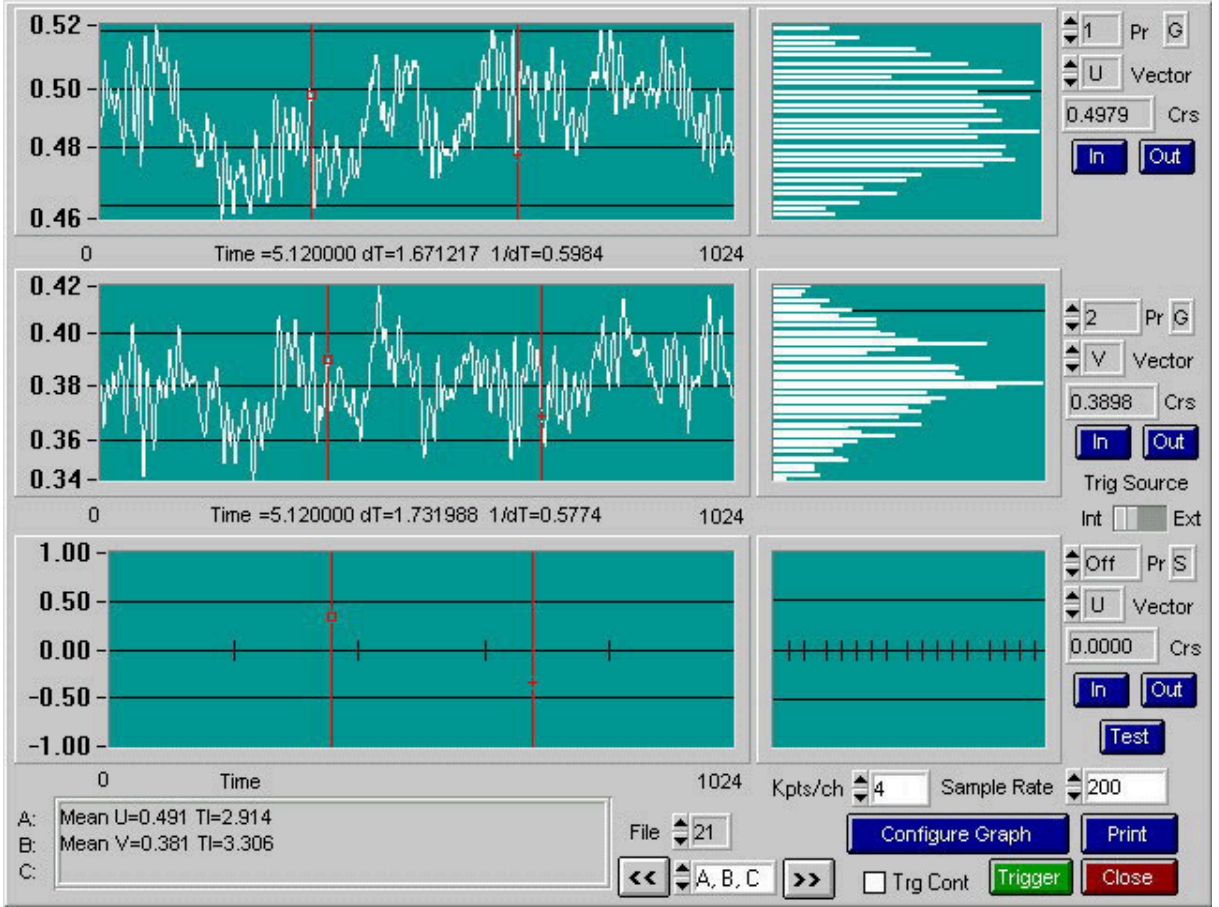
IFA 100 sabit sıcaklık anemometresinin kontrolünde kullanılan IFA100 Thermal Pro paket programı dört kısımdan oluşmaktadır. Bunlar anemometre kontrol (IFA100 Configure), kalibrasyon (Calibration), veri oluşturma (Data Acquisition) ve ileri analiz (Post Analysis) kısımlarıdır (Akansu, 2004).

Anemometre kontrol kısmında anemometre ile bağlantı halinde olan bilgisayardan yapılabilecek ayarlar, bağlantı kontrolü, ölçüm cihazlarının bağlı olduğu kanal kontrolü gibi temel işlemler yerine getirilmektedir.

Kalibrasyon kısmı ile sistemde kullanılacak ölçüm aletlerinin kalibrasyonu sağlanmaktadır. Kalibrasyon işlemi ile ölçüm cihazlarının hangi basınç veya hız değerinde hangi gerilimi üreteceklerine ilişkin olarak üst ve alt değerler belirlenmektedir. Bu işlem sırasında elde edilen veriler “\*.cl” uzantılı olarak kaydedilmektedir. Bu dosya daha sonra veri oluşturma programı bünyesinde kullanılarak gerilim cinsinden elde edilen verilerin hız veya basınç cinsinden karşılığı elde edilmektedir.

Veri oluşturma programında öncelikle A/D karttaki kanallara bağlı olan problemlere ait kalibrasyon dosyaları çağrılarak, ölçüm verilerinin kaydedileceği “\*.R\*” (\*.R01, \*.R02, vb.) uzantılı dosyalar seçilmektedir. Anemometrenin offset ve gain değerleri de bu kısımdan değiştirilebilmekte, ölçüm esnasında okunacak veri sayısı ve bu verilerin okunma frekansları (sample rate) ile yüksek frekanslı gürültülerin filtre edilebilmesi için “low pass filter” değerleri bu kısımdan ayarlanabilmektedir. Ölçümleri yapılan veriler ekranda hem değer hem de grafiksel olarak görülebilmektedir. Kalibrasyon ile deney ölçümleri sırasında ortam şartlarındaki değişimden kaynaklanan hatalar program tarafından düzeltilebilmektedir. Bu nedenle ölçüm esnasında ortam basıncı ve sıcaklığı, harici olarak program tarafından istenmektedir (Akansu, 2004). Şekil 2.9’da IFA 100 Thermal Pro paket programına ilişkin bir ekran görüntüsü görülmektedir. Burada iki ayrı kanala bağlanmış olan basınçölçerlerden elde edilen veriler sayısal ve grafiksel olarak görülebilmektedir.

İleri analiz kısmında ise programda elde edilen verilerin analizleri yapılabilmekte ve ortalama hız, türbülans şiddeti, standart sapma, normal ve kayma gerilmeleri gibi istatistiksel hesaplamaların sonuçları grafiksel olarak elde edilebilmekte, spektral analiz gibi ileri dereceden işlemler gerçekleştirilebilmektedir. Bunun yanında ölçümler esnasında depolanan veriler isteğe bağlı olarak metin dosyası şeklinde alınabilmektedir (TSI, 1992).



Şekil 2.9. IFA 100 Thermal Pro paket programı ekran görüntüsü

Yapılan çalışmalarda anemometre ile bağlantı halinde Windows 98 işletim sistemine sahip HP PII 200 donanımlı bir bilgisayar kullanılmıştır.

### 2.1.3.2. Basınç Ölçümü

Çalışmada daralma konisinin giriş ve çıkış kesitinde bulunan basınç prizleri ile referans basınç farkını ölçmek için ve model yüzeylerindeki basınç değerlerini ölçmek için toplam iki adet basınçölçer (*pressure transmitter*) kullanılmıştır. Bunun için Modus firması tarafından üretilmiş olan iki adet T30 serisi basınçölçer kullanılmıştır. Bunlardan model yüzeyindeki basınç değerlerinin belirlenmesinde kullanılan basınç ölçer 0-3 inS (0-76,2 mmSS) basınç aralığında, rüzgar tüneli daralma konisinden referans basınç farkını ölçmek için kullanılan basınç ölçer ise 0-2 inS (0-50,8 mmSS) basınç aralığında ölçüm yapabilmektedir. Basınçölçerlerin her ikisi de ayrı birer güç kaynağı ile beslenmektedir. İki

basınçölçere de birer direnç ilave edilerek gösterdiği değerin mA'den Volt'a dönüşümü yapılmıştır. Elde edilen veriler bilgisayara aktarılıp depolanmadan önce anemometrenin sinyal şartlandırıcısı olan TSI Model 157 sinyal şartlandırıcısı yardımıyla gürültü ve ortam kaynaklı istenmeyen sinyallerden arındırılmaktadır. Daha sonra bilgisayara bağlanmış veri aktarım kartı yardımıyla ve Thermal Pro yazılımı ile basınç ölçümleri gerçekleştirilmektedir. Ölçümler esnasında kullanılan basınçölçer ve IFA 100 sabit sıcaklık anemometresi Şekil 2.10'da görülmektedir.



Şekil 2.10. IFA 100 sabit sıcaklık anemometresi ve Modus marka basınçölçer

### 2.1.3.3. Hız ve Girdap Kopma Frekansı Ölçümü

Hız ve girdap kopma frekanslarının ölçülmesinde TSI firması tarafından yapılmış olan IFA100 kızgın telli sabit sıcaklık anemometresi ile sıcak film probu kullanılmıştır. Sistem; Model 150 anemometre, Model 157 sinyal şartlandırıcı ve Model 158 ana kabin şeklinde üç bölümden oluşmaktadır. İki kanallı olarak yapılmış olan anemometre birden fazla probun bağlanmasına ve ölçüm yapılmasına izin vermektedir. Elde edilen veriler UEI firması yapımı 12 bit'lik A/D bir kart yardımıyla bilgisayara aktarılarak depolanmış ve yine aynı firma ürünü IFA 100 ThermalPro paket programı yardımıyla işlenmiştir.

Kızgın telli sabit sıcaklık anemometresinin çalışma prensibi sistem tarafından ısıtılan çok ince bir tel ile etrafındaki akışkan arasında gerçekleşen taşınım ile ısı transferi esasına dayanmaktadır. Prob ucundaki algılayıcı tele verilen akım, telin çevresindeki akışkan ile

yaptığı ısı transferi ile orantılıdır. Bu şekilde transfer edilen ısıya bağlı olarak kalibre edilmiş bir sistem sayesinde hız değeri belirlenebilmektedir.

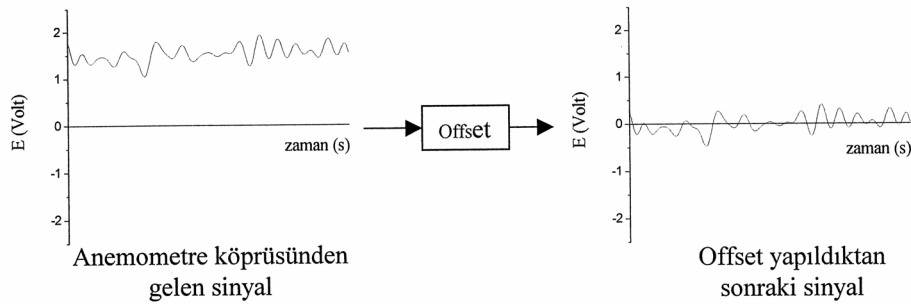
Prob yardımıyla akış içerisinde algılanan değerler anemometre yardımıyla seçilen değerlere göre offset, gain ve filter işlemlerine tabii tutularak bilgisayar tarafından kaydedilmektedir. Bu veriler IFA 100 ThermalPro yazılımı sayesinde işlenerek hız değerleri “\*.V\*” şeklindeki dosyalara kaydedilmektedir. Bunun yanında girdap kopma frekansları için aynı yazılım sayesinde spektral analiz yapılabilmektedir.

#### 2.1.4. Sinyal Şartlandırma İşlemi

Ölçüm cihazlarından elde edilen değerler anemometrenin bünyesinde yer alan Model 157 sinyal şartlandırıcı vasıtasıyla şartlandırılmaktadır. Bu işlemde sinyal; öncelikle kullanılabileceği uygun bir aralığa çekilmekte, sonra belirginleştirilmesi amacıyla güçlendirilmekte ve çeşitli nedenlerden oluşan gürültü ile parazitlerden arındırılmaktadır. Sinyal sırasıyla “Offset”, “Gain” ve “Low Pass Filter” işlemlerine tabi tutulmaktadır.

##### 2.1.4.1. Offset İşlemi

Bu işlem ile sinyaller istenilen aralığa çekilmektedir. Bunun için offset değeri kadar gerilim sinyalden çıkartılmaktadır. Bu sayede veri aktarma kartının çalışma aralığında olan çıkış sinyalleri elde edilebilmektedir. Örneğin, bu çalışmada kullanılan veri aktarma kartı  $\pm 5V$  aralığında çalışmaktadır. Bu nedenle anemometreden gelen sinyaller veri aktarma kartına girmeden önce işlenebilmek için bu aralığa çekilmelidir. Offset işlemi Şekil 2.11’de görülmektedir.

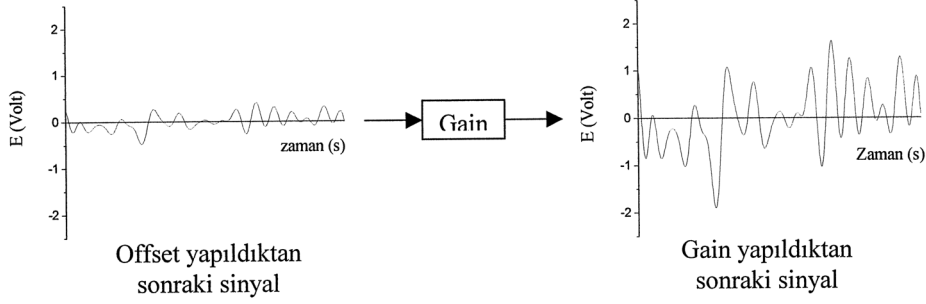


Şekil 2.11. Offset işlemi ve sinyal değerlerinin düşürülmesi (Akansu, 2004).



### 2.1.4.2. Gain İşlemi

Gain işlemi sinyali kuvvetlendirmek için uygulanan bir işlemdir. Offset işlemine tabi tutularak şartlandırılan sinyal Şekil 2.12’de de görüldüğü gibi gain işlemi ile yeniden şartlandırılarak değeri yükseltilir.



Şekil 2.12. Gain işlemi ve sinyallerin yükseltilmesi (Akansu, 2004).

### 2.1.4.3. Low Pass Filter İşlemi

Low Pass Filter işlemi düşük frekanstaki sinyallerin geçmesi fakat yüksek frekanstaki sinyallerin filtre edilmesidir. Bu filtreleme, gain işlemi uygulanarak kuvvetlendirilen sinyalin yüksek frekanstaki gürültü ve istenmeyen sinyallerden arındırılması için kullanılır. Bu şekilde okunan sinyaldeki gürültü ve titreşimler giderilebilmektedir.

### 2.1.4.4. Veri Toplama İşlemi

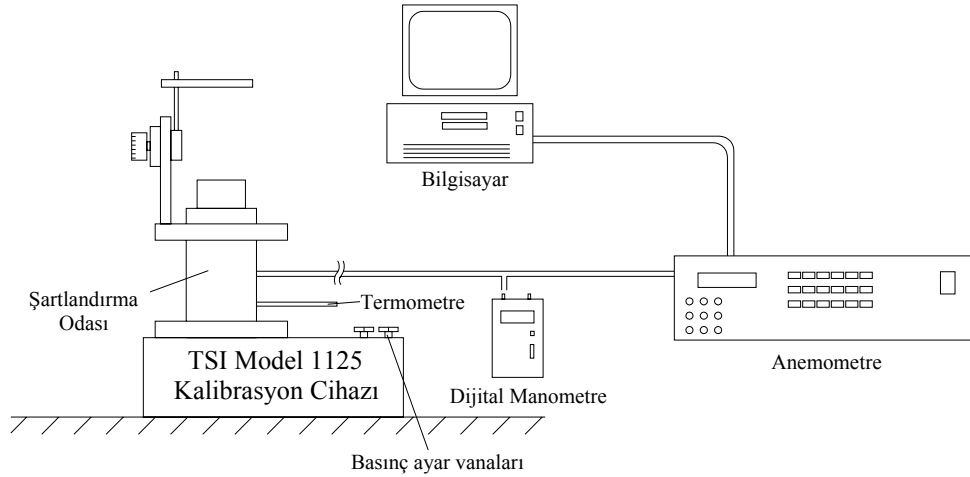
Thermal Pro programında; ölçülecek veri sayısı, uygulanacak Low Pass Filter değeri, örnekleme frekansı (Sample Rate) gibi parametrelerin uygun seçilmesi gerekmektedir. Veri sayısı 1024 verinin katları şeklinde değişirken örnekleme frekansı bir saniyede elde edilen veri sayısını ifade etmektedir. Ölçüm zamanı ise veri sayısının örnekleme frekansına oranı şeklindedir.

Yapılan çalışmada basınç sinyalleri 200 örnek/s oranında ve 100 Hz’lik Low-Pass Filter işlemi yardımıyla elde edilmiştir. Yani bir basınç prizinden saniyede 200 ölçüm alınmıştır. Her bir ortalama basınç değeri 40,96 s boyunca alınan 8192 verinin ortalaması alınarak elde edilmiştir. En iyi çözünürlüğü elde edebilmek için offset ve gain değerleri

sırasıyla 0 ve 1 V alınmıştır. Hız ölçümünde ise 1000 örnek/s oranında ve 300 Hz Low Pass Filter değerleri kullanılmıştır. Sonuçta 4,096 s boyunca 4096 veri elde edilmiştir. Offset ve gain değerleri basınç ölçümünde olduğu gibi 0 ve 1 V alınmıştır. TSI ThermalPro yazılımı kullanılarak 12 bit'lik A/D dönüştürücüsü yardımıyla sinyal şartlandırma işleminden sonra bu sinyallerin statik halleri elde edilmiş ve bilgisayara kaydedilmiştir. Basınç ölçümlerindeki deneysel kararsızlığın  $\pm 4\%$ 'den az olduğu tespit edilmiştir.

### 2.1.5. Basınç Ölçüm Cihazlarının Kalibrasyonu

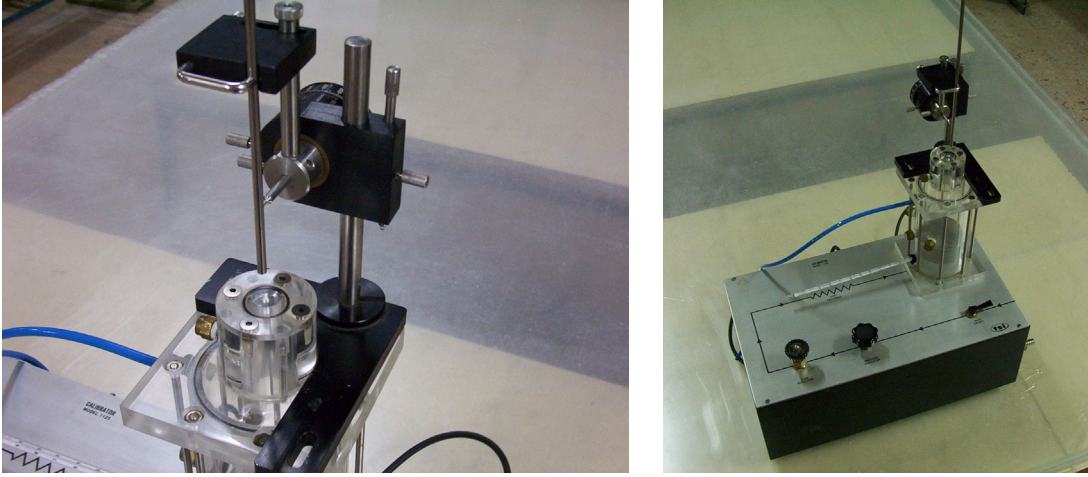
Yapılan çalışmada Modus marka T30 tipinde 0-50,8 mmSS (0-2 inS) ve 0-76,2 mmSS (0-3 inS) ölçüm aralıklarına sahip iki adet basınçölçer kullanılmıştır. Basınçölçerler 22 V'luk doğru akım kaynağı yardımıyla beslenmektedir. Basınç ölçerlerin çıkış değeri 4-20 mA olduğu için bağlantı elemanlarına 250 ohm'luk birer direnç ilave edilerek bu değer 1-5 V olarak değiştirilmiştir. Bu sinyaller incelendiğinde ölçüm sisteminden kaynaklanan önemli bir gürültü olduğu tespit edilmiş ve bu yüzden öncelikle sinyal şartlandırıcıya bağlandıktan sonra bilgisayara bağlanarak ölçümler alınmıştır.



Şekil 2.13. Kalibrasyon işleminde kullanılan cihazların bağlantı şeması

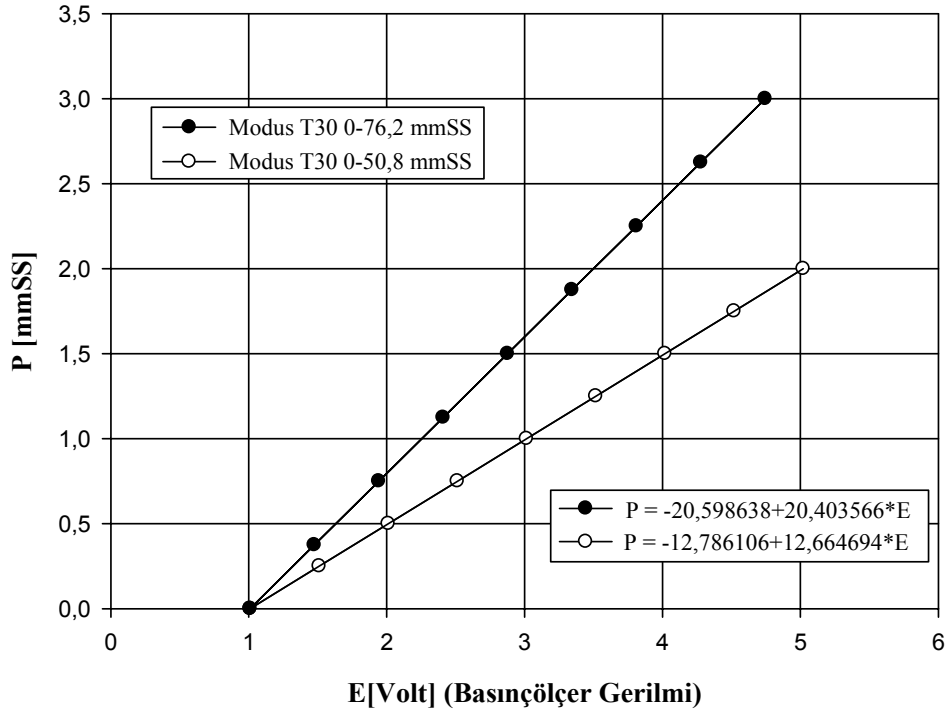
Yapılan deneyler sırasında ortam sıcaklığındaki artış veya azalmadan dolayı basınçölçerlerin çıkış sinyallerinde, yani boşta iken anemometre tarafından okunan değerlerde, ortam sıcaklığındaki değişime bağlı olarak az veya çok bir değişim meydana

gelmektedir. Bu farkı gidermek amacıyla kalibrasyon esnasında basınç ölçerlerin boşa çalışma durumuna karşılık gelen basınç değeri, yani tünelde akış yok iken atmosfer basıncına karşılık anemometrenin okuduğu basınç değeri kaydedilmiş ve "Zero" veya "Başlangıç" değeri olarak ta ifade edilebilen bu değer her ölçümden önce ayarlanmıştır. Yapılan kalibrasyonda ölçümler için kullanılan programın aynısı yani "IFA Thermal Pro" yazılımının "kalibrasyon" seçeneği kullanılmıştır.



Şekil 2.14. TSI Model 1125 kalibrasyon cihazının genel görünüşü

Kalibrasyon esnasında TSI Model 1125 kalibrasyon cihazı kullanılmıştır. Bir kompresörden sağlanan basınçlı hava kalibrasyon cihazına ulaştırılmış, dijital bir manometre yardımıyla o an kalibre edilen basınçölçerin alt ve üst değer aralığına göre vanalar yardımıyla basınç ayarlanmıştır. Kalibrasyon cihazının şartlandırma odasına bağlı bulunan sert plastik hortum sırasıyla basınçölçerin uçlarına bağlanarak şartlandırma odasındaki basınç değeri basınçölçere iletilmiştir. Bu basınç değerine karşılık gelen V cinsinden elektrik sinyali anemometre ve yazılım yardımıyla kaydedilmiştir. Sonuçta yazılım yardımıyla elde edilen bu değerler için doğrusal formda bir bağıntı program tarafından uydurulmuştur. Şekil 2.15'de elde edilen bu bağıntı ve basınçölçerlerin kalibrasyon eğrileri görülmektedir.

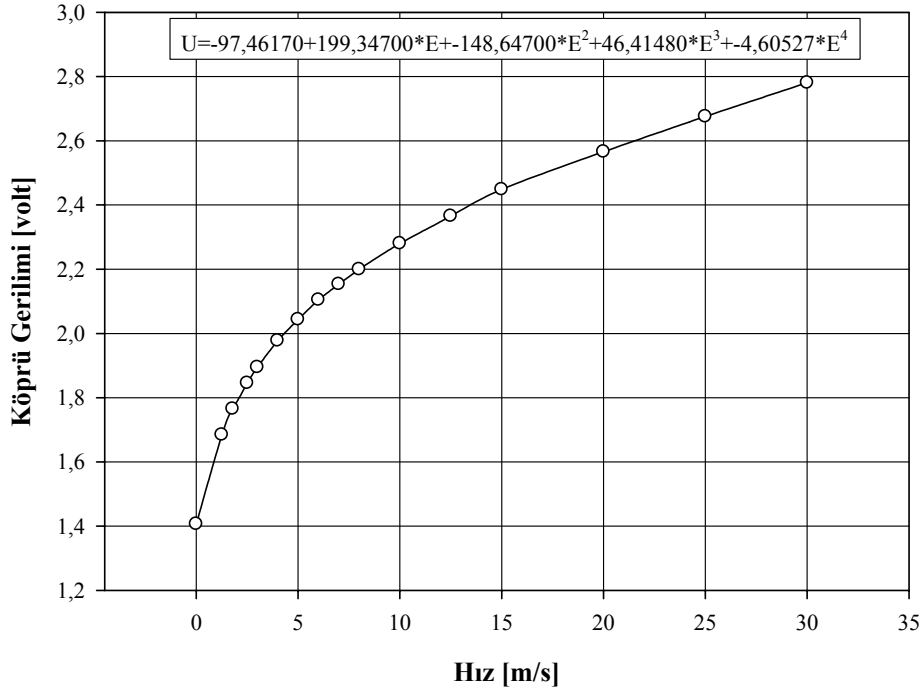


Şekil 2.15. Çalışmada kullanılan basınçölçerlerin kalibrasyon eğrileri

### 2.1.6. Hız Ölçüm Cihazının Kalibrasyonu

Hız ölçümünde kullanılan sıcak film probunun kalibrasyonu basınçölçerlerin kalibrasyonunda olduğu gibi TSI Model 1125 kalibrasyon cihazı ile yapılmıştır. Sıcak film probu çalışmada kullanılan rüzgar tüneli serbest akış hız değerlerini karşılamak amacıyla 0-30 m/s hız aralığında toplam 16 ölçüme göre kalibre edilmiştir. Kalibrasyon TSI Model 1125 cihazının şartlandırma odasının hemen üst kısmında yer alan “yüksek hız kalibrasyon bölgesinde” gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sıcak film probu ile uç akış ölçüleceği için, yani prob rüzgar tüneli içerisine akış ile paralel bir şekilde sabitleneceği için, kalibrasyon buna göre gerçekleştirilmiştir.

Kalibrasyon esnasında belirli hız değerlerine karşılık elde edilen köprü gerilimleri anemometre tarafından kaydedilmektedir. Sonuçta elde edilen kalibrasyon verileri için IFA 100 ThermalPro yazılımı dördüncü dereceden bir polinom oluşturmakta ve grafiğin görülmesine olanak sağlamaktadır. Şekil 2.16’da Model 1220-20 sıcak film probunun kalibrasyon grafiği görülmektedir.



Şekil 2.16. Model 1220-20 sıcak film probu kalibrasyon eğrisi

### 2.1.7. Çalışmada Kullanılan Boyutsuz Sayılar

Çalışmada elde edilen bulguların değerlendirilmesinde Reynolds sayısı, basınç katsayısı, direnç katsayısı, kaldırma katsayısı ve Strouhal sayısı gibi boyutsuz sayılar kullanılmıştır. Serbest akışın yapısı için bir ölçü olan Reynolds sayısı;

$$Re = \frac{u_{\infty} \cdot D}{\nu} \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $u_{\infty}$  serbest akış hız değeri,  $D$  akışa dik karakteristik uzunluk ve  $\nu$  kinematik viskozitedir.

Akış içerisinde yer alan cismin akışkan ile etkileşimi sonucunda akışkan kaynaklı bir basınç etkisi altında olduğu daha önceki bölümde ifade edilmişti. Model yüzeyindeki fark statik basınç değerinin, akış alanı içerisindeki cisme akışkan tarafından uygulanan dinamik basınç değerine olan oranı şeklinde tanımlanan boyutsuz sayı basınç katsayısı olarak adlandırılmakta ve şu şekilde ifade edilmektedir.

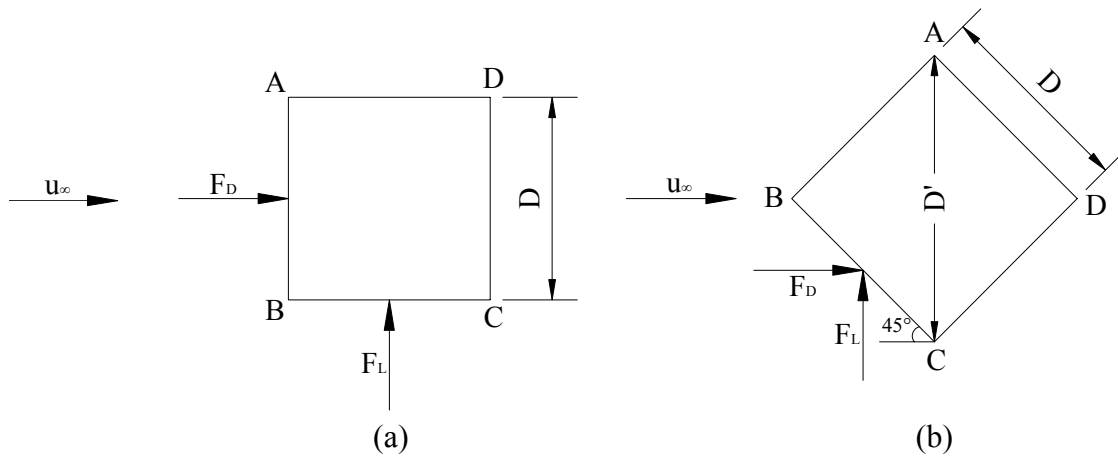
$$C_p = \frac{p - p_\infty}{(1/2)\rho u_\infty^2} \quad (2.2)$$

Burada  $p_\infty$  serbest akışkanın statik basıncını,  $p$  modelin yüzeyindeki basıncı ve  $\rho$  akışkanın yoğunluğunu göstermektedir.

Cisim üzerindeki basınç ve sürtünme kuvvetlerinin oluşturduğu direnç etkisi ve kaldırma kuvvetlerinin oluşturduğu kaldırma etkisi, direnç katsayısı ve kaldırma katsayısı şeklinde iki boyutsuz sayı ile tanımlanmaktadır. Direnç ve kaldırma katsayıları;

$$C_D = \frac{F_D}{(1/2)u_\infty^2.D.L}; \quad C_L = \frac{F_L}{(1/2)u_\infty^2.D.L} \quad (2.3)$$

şeklindedir. Burada  $F_D$  cisim üzerine etki eden direnç kuvvetini gösterirken,  $F_L$  cisim üzerine etki eden kaldırma kuvvetini ifade etmektedir. Kare kesitli bir cisme etki eden direnç ve kaldırma kuvvetleri, cisme etki eden basıncın yüzeyler üzerindeki integrasyonu ile elde edilir. Direnç kuvveti cismin ön ve arka yüzeyine etkiyen basıncın integrallerinin farkından tespit edilirken kaldırma kuvveti üst ve alt yüzeyine etkiyen basıncın integrallerinin farkı yardımıyla belirlenir. Şekil 2.17'de akış alanı içerisinde  $0^\circ$  ve  $45^\circ$  açı ile duran kare kesitli küt cisim yüzeyine etkiyen akış kaynaklı kuvvetler görülmektedir.



Şekil 2.17. Akış alanı içerisinde küt cisme etki eden kuvvetler ve bileşkeleri; a) Akışa  $0^\circ$  (yatay) durumu, b) Akışa  $45^\circ$  (diyagonal) durumu

Buna göre akış alanı içerisinde  $0^\circ$  açılı ile yer alan küt cisim için Şekil 2.17 (a)'nın da yardımı ile direnç ve kaldırma katsayıları;

$$C_D = \frac{\int_{AB} C_p \cdot ds - \int_{CD} C_p \cdot ds}{D} \quad (2.4)$$

$$C_L = \frac{\int_{BC} C_p \cdot ds - \int_{DA} C_p \cdot ds}{D} \quad (2.5)$$

şeklinde yazılırken, akış alanı içerisinde  $45^\circ$ 'lik açılı ile yer alan cisme ilişkin direnç ve kaldırma katsayıları;

$$C_D = \frac{\int_{DA} C_p \cdot \cos \theta \cdot ds + \int_{AB} C_p \cdot \sin \theta \cdot ds - \int_{BC} C_p \cdot \cos \theta \cdot ds - \int_{CD} C_p \cdot \sin \theta \cdot ds}{D'} \quad (2.6)$$

$$C_L = \frac{- \int_{DA} C_p \cdot \sin \theta \cdot ds + \int_{AB} C_p \cdot \cos \theta \cdot ds + \int_{BC} C_p \cdot \sin \theta \cdot ds - \int_{CD} C_p \cdot \cos \theta \cdot ds}{D'} \quad (2.7)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Buradaki  $D$  ve  $D'$  akışa dik izdüşüm yükseklikleridir.

Model yüzeyinden girdapların ayrılma sıklığı konusunda bilgi veren ve küt cisim aerodinamiğindeki en önemli parametrelerden biri olan Strouhal Sayısı;

$$St = \frac{f \cdot D}{u_\infty} \quad (2.8)$$

şeklinde yazılmaktadır. Burada  $f$  model yüzeyinden kopan girdabın etkin frekansı,  $D$  karakteristik model kenar uzunluğu ve  $u_\infty$  serbest akış hızıdır.

### 2.1.8. Belirsizlik Analizi

Deneysel olarak elde edilen sonuçların doğruluk yüzdeleri belirsizlik analizi ile anlaşılabilir. Yapılan ölçümler esnasında deney düzeneğinden ve ölçüm araçlarından kaynaklanabilecek belirsizlikler dikkate alınmalıdır. Deneysel çalışmalarda oluşabilecek belirsizlikler iki türdür.

1. Sistemik belirsizlik de denilen ve tekrarlanan ölçümlerde aynı miktarda ortaya çıkan belirsizlikler olup, her ölçümde aynı oldukları için uygun bir kalibrasyon işlemi ile ortadan kaldırılabilirler.

2. Rastgele oluşan düzensiz belirsizlikler olup, her ölçümde farklılık gösterdikleri için ortadan kaldırılamazlar (Holman, 1994).

Yapılmış olan deneysel ön çalışmada, hem ölçülen hem de hesaplanan parametrelere ait belirsizlik değerleri Fox ve McDonald (1994) tarafından ortaya konulan hesaplama yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Bu yöntemle göre; deneyde ölçülen  $x_i$  bağımsız değişkenlerine bağlı olarak hesaplanan herhangi bir R sonuç değeri, matematiksel olarak;

$$R = R(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.9)$$

şeklinde ifade edilir. Herhangi bir  $x_i$  değişkeninde ortaya çıkan bir  $\delta x_i$  değişimi, R değerinde;

$$\delta R_i = \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i \quad (2.10)$$

kadarlık bir değişime neden olur. Uygulamalarda bu denklemin R'ye bölünerek normalize edilmiş şeklinin kullanılması daha uygundur. Sonuç olarak;

$$\frac{\delta R_i}{R} = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i = \frac{x_i}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} \frac{\delta x_i}{x_i} \quad (2.11)$$

elde edilir. (2.11) ifadesi  $x_i$  değerlerindeki değişim sonucu ortaya çıkan belirsizlik aralığını tahmin etmede kullanılabilir. Bunun için belirsizlik aralığı ifadesi,  $x_i$  'ye bölünerek;



$$u_{R_i} = \frac{x_i}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} u_{x_i} \quad (2.12)$$

elde edilir. Bütün  $x_i$ 'ler için belirsizlik aralığının toplam etkisinin R üzerinde oluşturmuş olduğu belirsizlik ise;

$$\frac{\partial R}{R} = \left[ \left( \frac{x_1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_1} \frac{\delta x_1}{x_1} \right)^2 + \left( \frac{x_2}{R} \frac{\partial R}{\partial x_2} \frac{\delta x_2}{x_2} \right)^2 + \dots + \left( \frac{x_n}{R} \frac{\partial R}{\partial x_n} \frac{\delta x_n}{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.13)$$

şeklinde yazılabilir (Fox ve McDonald, 1994). Burada her bir alt değişkene ait belirsizlik  $u_i = \delta x_i / x_i$  olarak yazıldığında, sonuca ait toplam belirsizlik;

$$u_R = \left[ \left( \frac{x_1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_1} u_1 \right)^2 + \left( \frac{x_2}{R} \frac{\partial R}{\partial x_2} u_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{x_n}{R} \frac{\partial R}{\partial x_n} u_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.14)$$

olarak elde edilebilir.

### 2.1.8.1. Boyutsuz Sayıların Belirsizlik Değerleri

$Re = u_\infty \cdot D / \nu$  şeklinde tanımlanan Reynolds sayısı için belirsizlik değeri,  $u_\infty$ , D ve  $\nu$  bağımsız değişkenleri cinsinde (2.14) eşitliği kullanılarak;

$$u_{Re} = \left[ \left( \frac{u_\infty}{Re} \frac{\partial Re}{\partial u_\infty} u_{u_\infty} \right)^2 + \left( \frac{D}{Re} \frac{\partial Re}{\partial D} u_D \right)^2 + \left( \frac{\nu}{Re} \frac{\partial Re}{\partial \nu} u_\nu \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.15)$$

belirlenmektedir. Burada her bir bağımsız değişkenin türev değeri bulunacak olursa;

$$\frac{\partial Re}{\partial u_\infty} = \frac{D}{\nu}; \quad \frac{\partial Re}{\partial D} = \frac{u_\infty}{\nu}; \quad \frac{\partial Re}{\partial \nu} = (-1) \frac{u_\infty \cdot D}{\nu^2}$$

(2.15) eşitliğinde yerine yazıldığında, Re sayısına ait toplam belirsizlik;

$$u_{Re} = \left[ \left( \frac{u_{\infty} D}{u_{\infty} D v} u_{u_{\infty}} \right)^2 + \left( \frac{u_{\infty} u_{\infty}}{u_{\infty} D v} u_D \right)^2 + \left( \frac{u_{\infty} D}{u_{\infty} D} (-1) \frac{u_{\infty} D}{v^2} u_v \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\Rightarrow u_{Re} = \left[ (u_{u_{\infty}})^2 + (u_D)^2 + ((-1)u_v)^2 \right]^{1/2} \quad (2.16)$$

eşitliği ile elde edilir. Benzer şekilde Strouhal sayısı için belirsizlik ifadesi  $f$ ,  $D$  ve  $u_{\infty}$ 'a bağlı olarak

$$u_{St} = \left[ (u_f)^2 + (u_D)^2 + ((-1)u_{u_{\infty}})^2 \right]^{1/2} \quad (2.17)$$

eşitliği ile bulunabilmektedir.

$C_p = \Delta P / (1/2) \rho u_{\infty}^2$  şeklinde tanımlanan basınç katsayısına ait belirsizlik,  $\Delta P$ ,  $\rho$  ve  $u_{\infty}$  bağımsız değişkenlerine bağlıdır. (2.14) ifadesi kullanılarak;

$$u_{C_p} = \left[ \left( \frac{\Delta P}{C_p} \frac{\partial C_p}{\partial \Delta P} u_{\Delta P} \right)^2 + \left( \frac{\rho}{C_p} \frac{\partial C_p}{\partial \rho} u_{\rho} \right)^2 + \left( \frac{u_{\infty}}{C_p} \frac{\partial C_p}{\partial u_{\infty}} u_{u_{\infty}} \right)^2 \right] \quad (2.18)$$

elde edilir. Buradaki türev ifadeleri;

$$\frac{\partial C_p}{\partial \Delta P} = \frac{1}{\frac{1}{2} \rho u_{\infty}^2}; \quad \frac{\partial C_p}{\partial \rho} = \frac{(-1) \Delta P}{\frac{1}{2} \rho^2 u_{\infty}^2}; \quad \frac{\partial C_p}{\partial u_{\infty}} = \frac{(-2) \Delta P}{\frac{1}{2} \rho u_{\infty}^3}$$

şeklinde elde edilir ve (2.18) ifadesinde yerine yazılarak;

$$u_{C_p} = \left[ \left( \frac{\frac{\Delta P}{\Delta P} \frac{1}{\frac{1}{2} \rho u_{\infty}^2}}{\frac{1}{2} \rho u_{\infty}^2} u_{\Delta P} \right)^2 + \left( \frac{\frac{\rho}{\Delta P} \frac{(-1) \Delta P}{\frac{1}{2} \rho^2 u_{\infty}^2}}{\frac{1}{2} \rho u_{\infty}^2} u_{\rho} \right)^2 + \left( \frac{\frac{u_{\infty}}{\Delta P} \frac{(-2) \Delta P}{\frac{1}{2} \rho u_{\infty}^3}}{\frac{1}{2} \rho u_{\infty}^2} u_{u_{\infty}} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\Rightarrow u_{C_p} = \left[ (u_{\Delta P})^2 + ((-1)u_p)^2 + ((-2)u_{u_x})^2 \right]^{1/2} \quad (2.19)$$

basınç katsayısına ait belirsizlik ifadesi elde edilebilir.

Çalışmada kullanılan boyutsuz sayıların belirsizlik değerlerinin bulunabilmesi için, bu boyutsuz sayılara ilişkin her bir bağımsız değişkene ait belirsizlikler ayrı ayrı belirlenmelidir. Bu değerler, ilgili cihazların belirsizlik değerleri için kullanılan ölçüm cihazlarının kullanım kılavuzları ve ilgili değişkenlerin belirsizlik değerleri için de benzer çalışmalarda belirsizlik değerleri kullanılarak bulunmuştur (Holman, 1994; Fox ve McDonald, 1994; Akansu, 2004).

### 2.1.8.2. Bağımsız Değişkenlere Ait Belirsizlik Değerleri

Hız ölçümündeki belirsizlik;

$u_1$  : Anemometreye ait belirsizlikler,  $u_1 \cong \%0,5$

$u_2$  : Kalibrasyon cihazından ve kalibrasyon işleminden oluşan belirsizlik,  $u_2 \cong \%1,5$

$u_3$  : Lineerleştirme veya kalibrasyon eğrisi nedeniyle oluşan belirsizlik,  $u_3 \cong \%0,4$

$u_4$  : 15 m/s'lik hızda ve  $\partial U / \partial E = 36 \text{ m} / \text{sn} / \text{volt}$  'luk değişim için 10 volt aralığında

A/D dönüştürücü kartın çözünürlüğünde oluşan belirsizlik,  $u_4 \cong \%0,34$

$u_5$  : Prob pozisyonundaki  $1^\circ$ 'lik hata nedeniyle hızda oluşan belirsizlik,  $u_5 \cong \%0,016$

$u_6$  : Sadece prob çalışma sıcaklığında,  $1^\circ\text{C}$ 'lik sıcaklık değişimi nedeniyle hızda oluşan belirsizlik,  $u_6 \cong \%1,8$

$u_7$  : Sadece hava yoğunluğunda  $1^\circ\text{C}$ 'lik sıcaklık değişimi nedeniyle hızda oluşan belirsizlik,  $u_7 \cong \%0,4$

$u_8$  : Ortam basıncında 10kPa'lık değişim nedeniyle hızda oluşan belirsizlik,  $u_8 \cong \%0,6$

Buna göre hız ölçümündeki toplam belirsizlik;

$$\begin{aligned} u_U &= \left[ u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_8^2 \right]^{1/2} \\ &= \left[ 0,5^2 + 1,5^2 + 0,4^2 + 0,34^2 + 0,016^2 + 1,8^2 + 0,4^2 + 0,6^2 \right]^{1/2} \\ &= \%2,6 \end{aligned}$$

olarak elde edilir.

Model kenar uzunluğunda oluşan belirsizlik;

$u_9$  : 30 mm kenar uzunluğuna sahip kare kesitli model için imalattan dolayı ortaya çıkan 0,2 mm'lik fark nedeniyle oluşan hata;

$$u_9 = \frac{0,2}{30} \times 100 = 0,7; \quad u_9 = u_d = \%0,7$$

şeklinde elde edilir.

Havanın kinematik viskozitesinde oluşan belirsizlik;

20°C civarındaki ortam sıcaklığındaki 1°C'lik değişim için kinematik viskozitede ortaya çıkabilecek belirsizlik;

$$\begin{array}{c} \overbrace{\hspace{10em}} \\ 19,5^\circ\text{C} \qquad \qquad 20^\circ\text{C} \qquad \qquad 20,5^\circ\text{C} \end{array}$$

$$u_{10} = \frac{v(20,5) - v(20)}{v(20,5)} \times 100 = \frac{15,136 - 15,09}{15,136} \times 100 = 0,3; \quad u_{10} = u_v = \%0,3$$

olarak elde edilir.

Basınç ölçümünde oluşan belirsizlik;

$u_{11}$  : Basınç ölçerden kaynaklanan toplam belirsizlik,  $u_{11} \cong \%1$

$u_{12}$  : Basınç ölçerin kalibrasyon işleminden kaynaklanan belirsizlik,  $u_{12} \cong \%2,5$

$u_{13}$  : Ortam sıcaklığındaki 2°C'lik sıcaklık değişimi nedeniyle basınç ölçerin sıfır basıncında oluşan belirsizlik,  $u_{13} \cong \%0,1$

$u_{14}$  : 15mmSS basınçta ve  $\partial P / \partial E = 23\text{mmSS}$ 'luk değişim için 10volt aralığındaki 12bit'lik A/D dönüştürücü kartın çözünürlüğünde oluşan belirsizlik,  $u_{14} \cong 0,4$

$u_{15}$  : Modelin 5° hatalı yerleştirilmesi nedeniyle basınç değerinin en fazla olduğu model ön yüzeyindeki durma noktasında ortaya çıkan belirsizlik,  $u_{15} \cong 1,7$

Buna göre basınç ölçümünde oluşan toplam belirsizlik;

$$\begin{aligned} u_{\Delta P} &= \left[ u_{11}^2 + u_{12}^2 + u_{13}^2 + u_{14}^2 + u_{15}^2 \right]^{1/2} \\ &= \left[ 1^2 + 2,5^2 + 0,1^2 + 0,4^2 + 1,7^2 \right]^{1/2} = \%3,2 \end{aligned}$$

olarak elde edilebilir.

Havanın yoğunluğunda oluşan belirsizlik;

Havanın yoğunluğu için belirsizlik ifadesi (2.14) eşitliği yardımıyla;

$$\begin{aligned} u_{\rho} &= \left[ \left( \frac{\frac{P}{R.T} \frac{1}{R.T} u_P}{\frac{P}{R.T}} \right)^2 + \left( \frac{\frac{T}{R.T} \frac{(-1)P}{R.T^2}}{\frac{P}{R.T}} \right)^2 \right]^{1/2} \\ \Rightarrow u_{\rho} &= \left[ (u_P)^2 + (-1)(u_T)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (2.20)$$

olarak elde edilir. Buradaki P ve T için ortam basıncında olabilecek 100 Pa ve ortam sıcaklığında olabilecek 1°C'lik değişime göre olan belirsizlikler bulunarak (2.20) eşitliğinde yerine yazılıp havanın yoğunluğundan kaynaklanan belirsizlik bulunabilir.

$$u_{\rho} = \left[ 0,1^2 + 2,5^2 \right]^{1/2} = \%2,5$$

Debi ölçümünde meydana gelen belirsizlik;

$u_{16}$  : Kompresör çıkış basıncı düşüşünden kaynaklanan belirsizlik;  $u_{15} \cong \%0,5$

$u_{17}$  : Rotametrede meydana gelebilecek belirsizlik;  $u_{16} \cong \%1,5$

$u_{18}$  : Rotametrede okumadan kaynaklanan belirsizlik;  $u_{17} \cong \%0,5$

$u_{19}$  : Bağlantı noktalarından kaynaklan belirsizlik;  $u_{18} \cong \%0,5$

Sonuçta model yüzeyinden yapılan üfleme debisinin belirlenmesi esnasında oluşabilecek belirsizlik;

$$u_{m_{\text{uf}}} = \left[ u_{16}^2 + u_{17}^2 + u_{18}^2 + u_{19}^2 \right]^{1/2} = \left[ 0,5^2 + 1,5^2 + 0,5^2 + 0,5^2 \right]^{1/2} = \%1,7$$

olarak elde edilir.

Girdap kopma frekansında oluşan belirsizlik;

$u_{20}$  : 1000 Hz ile hız ölçümü yapılması durumunda 4096 veri alınması durumunda, spektral analizde göz önüne alınan çözünürlüğün 0,25 Hz olması sebebiyle, en düşük girdap kopma frekansı olan 50 Hz civarındaki değer için ortaya çıkan belirsizlik;  $u_{19} \cong \%0,5$

$u_{21}$  : Anemometrenin frekans karakteristiği nedeniyle oluşan belirsizlik, kullanılan frekans değerinin yarısına karşılık gelen kesme frekansının %50 sinden aşağıda ise göz önüne alınmaz (Jorgensen, 2002).  $u_{20} \cong 0$

Girdap kopma frekansında ortaya çıkan belirsizlik bu durumda;

$$u_f = \left[ u_{20}^2 + u_{21}^2 \right]^{1/2} = \%0,5$$

şeklinde bulunur.

Direnç ve kaldırma katsayısındaki ortaya çıkan belirsizlik, basınç ölçüm işleminde ortaya çıkan belirsizlik ve basınç dağılımında düzgün olmayan model açısından kaynaklanan farktan dolayı ortaya çıkan belirsizlik şeklinde ifade edilebilir.

Sonuçta bağımlı değişkenlere ait belirsizlikler (U, d, v,  $\Delta P$  ve  $\rho$ ) sırasıyla (2.16), (2.17) ve (2.18) eşitliklerinde yerlerine yazılırsa boyutsuz sayılara ait toplam belirsizlikler bulunabilir.

$$\text{Reynolds için; } u_{Re} = \left[ 2,6^2 + 0,7^2 + 0,3^2 \right]^{1/2} = \%2,7$$

$$\text{Strouhal sayısı için; } u_{St} = \left[ 2,6^2 + 0,7^2 + 0,5^2 \right]^{1/2} = \%2,7$$

$$\text{Basınç katsayısı için; } u_{C_p} = \left[ 3,2^2 + 2,5^2 + 2,6^2 \right]^{1/2} = \%4,8$$

$$\text{Direnç katsayısındaki belirsizlik; } u_{C_D} = \left[ 4,8^2 + 2,6^2 \right]^{1/2} = \%5,5$$

$$\text{Kaldırma kuvvetindeki belirsizlik; } u_{C_L} = \left[ 4,8^2 + 3,8^2 \right]^{1/2} = \%6,1$$

## 2.2. Sayısal Çalışma

### 2.2.1. Temel Denklemler

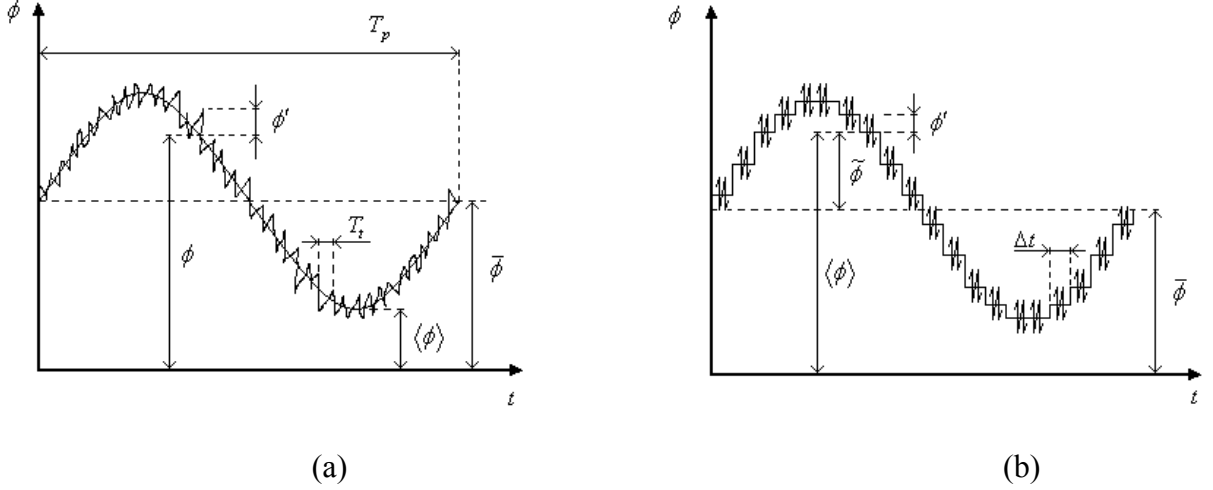
Ele alınan olan problem geçirgen yüzeyli ve kare kesitli bir silindir etrafındaki türbülanslı akışın hesaplanması üzerine olup, Kato-Launder iyileştirmeli  $k-\epsilon$  türbülans modeli kullanılarak hesaplar yapılmıştır. Günümüzde türbülanslı akışların hesaplanmasında çeşitli türden modeller kullanılmakta olup, her birinin özellikleri farklıdır. Örneğin; anlık momentum (Navier-Stokes) denklemlerinin, türbülanslı akıştaki çok küçük düzeydeki uzunluk ölçeğinin hemen altında kalacak düzeyde bir sayısal ağ üzerinde doğrudan sayısal çözümünü esas alan “Doğrudan Sayısal Benzeşim (DNS)” yöntemi, günümüzdeki teknolojinin henüz elvermediği düzeyde yüksek hızlı bilgisayarlara gereksinim göstermektedir. Türbülanslı akıştaki küçük ve büyük ölçekli girdapçıkların bir filtre fonksiyonu ile birbirinden ayrılması ve küçük ölçekli girdapçıklara DNS yöntemi uygulanırken, büyük ölçekli girdapçıkların uygun bir türbülans modeli ile çözümünü amaçlayan “Büyük Girdap Benzeşimi (LES)” yöntemi ile yüksek hızlı bilgisayarlarda çözümler üretilebilmekte ve çeşitli akış problemleri sayısal olarak incelenebilmektedir. Bu yönü ile LES yöntemi, DNS yöntemine göre daha fazla probleme uygulanabilme avantajına sahiptir.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan türbülans modellerinden biri, anlık hareket (Navier-Stokes) denklemlerinin zaman ortalamasının alınması ile elde edilen Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemlerine dayalı olan ve türbülans kinetik enerjisi ve bu enerjinin yutulma miktarını esas alan  $k-\epsilon$  türbülans modelidir. Bu modelin DNS ve LES yöntemlerine göre daha uzun bir geçmişe sahip olması nedeniyle kullanılmış olduğu problem sayısı oldukça fazladır. Dolayısıyla  $k-\epsilon$  türbülans modeli ile yapılan inceleme sonuçlarının diğer çalışmalarla etkin bir şekilde karşılaştırılması olanağı vardır.

Periyodik girdap hareketinin ortaya çıktığı geçici rejimli akışlar için Reynolds ortalamasının alındığı zaman dilimi dışında, ortalama büyüklüklerin belirli bir periyot dahilinde değişmesi söz konusudur. Geçici rejimli (zaman bağımlı) akışlar için girdap periyodunda tanımlanan bir “Grup Ortalama (Ensemble Average)” işlemine gereksinim vardır. Buna göre akış alanındaki  $\phi$  büyüklüğü için Şekil 2.18’deki notasyonlar ile;

$$\phi(t) = \bar{\phi} + \tilde{\phi}(t) + \phi' = \langle \phi \rangle(t) + \phi' \quad (2.21)$$

ayrışması yapılır. Burada  $\bar{\phi}$ ; ilgili büyüklüğün zaman ortalamalı bileşeni,  $\tilde{\phi}(t)$  periyodik bileşen ve  $\phi'$ 'de türbülanslı çalkantı bileşenidir.



Şekil 2.18. Zaman bağımlı türbülanslı bir büyüklüğün girdap periyodu içerisindeki bileşenleri a) Türbülans büyüklüğünün sürekli ortam değişimi, b) Zaman adımlı davranış (sayısal)

Bu çalışmada göz önüne alınan grup ortalamalı süreklilik ve Navier-Stokes denklemleri şu şekildedir:

$$\frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_j} = 0 \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \langle u'_i u'_j \rangle \right] \quad (2.23)$$

Bu denklemlerde ortaya çıkan  $\langle u'_i u'_j \rangle$  Reynolds gerilmeleri için girdapçık viskozitesine dayalı olan Boussinesq yaklaşımı ile;



$$\langle u'_i u'_j \rangle = \langle v_t \rangle \left( \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \langle k \rangle \quad (2.24)$$

şeklinde kullanılmıştır. Bu yaklaşım; Reynolds gerilmelerinin yerel grup ortalamalı hız gradyanları ve  $v_t$  girdapçık viskozitesi ile orantılı olduğu varsayımına dayalıdır. Bu çalışmada Kato ve Launder iyileştirmesini (Kato ve Launder, 1993) içeren k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Bu iyileştirme; standart k-ε türbülans modelinde akış alanında küt cisim önünde yer alan durma bölgelerinde ortaya çıkan türbülans kinetik enerjisinin aşırı üretiminin önüne geçmekte ve iz bölgesindeki girdap hareketinin simetri eksenini düşey yönde de geçmesini sağlayarak, deneysel verilere daha yakın sonuç almayı sağlamaktadır. Kullanılan türbülans modeline ilişkin denklemler;

$$\frac{\partial \langle k \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle k \rangle}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{\langle v_t \rangle}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \langle k \rangle}{\partial x_j} \right] + P_k - \langle \varepsilon \rangle \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial \langle \varepsilon \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{\langle v_t \rangle}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle}{\partial x_j} \right] + C_1 P_k \frac{\langle \varepsilon \rangle}{\langle k \rangle} - C_2 \frac{\langle \varepsilon \rangle^2}{\langle k \rangle} \quad (2.26)$$

$$\langle v_t \rangle = C_\mu \langle k \rangle^2 / \langle \varepsilon \rangle \quad (2.27)$$

şeklindedir. Türbülans kinetik enerjisi  $\langle k \rangle$ 'nin üretimini gösteren  $P_k$  için Kato-Launder iyileştirmesi;

$$P_k = C_\mu \langle \varepsilon \rangle S \Omega, \quad S = \frac{\langle k \rangle}{\langle \varepsilon \rangle} \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right]^2}, \quad \Omega = \frac{\langle k \rangle}{\langle \varepsilon \rangle} \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right]^2}$$

olarak tanımlanmaktadır (Kato ve Launder, 1993). Burada S; akışkanın simetrik şekil değişimi ve  $\Omega$  yerel vortisite ile orantılı olan bir dönme parametresidir. k-ε türbülans modeli sabitleri ise;  $\sigma_k = 1,0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ ,  $C_1 = 1,44$ ,  $C_2 = 1,92$  ve  $C_\mu = 0,09$  olarak göz önüne alınmıştır.

### 2.2.2. Sınır Koşulları

Hesaplama bölgesinin giriş sınırı Şekil 2.19'da de görüldüğü gibi silindirin ön yüzeyinin ortası referans alınmak üzere silindirden  $x/H=-4,5$  uzaklığındadır. Bu sınırda hız ve türbülans büyüklükleri için sabit değerler tanımlanmıştır:

$$\langle \bar{u} \rangle = (u_{\infty}, 0), \quad \langle T \rangle = T_{\infty}, \quad \langle k \rangle = 1,5(Tu.u_{\infty})^2, \quad \langle \varepsilon \rangle = C_{\mu} \langle k \rangle^2 / v_{t-in} \quad (2.28)$$

Giriş sınırında türbülans kinetik enerjisinin yutulma miktarı  $\langle \varepsilon \rangle$ ;  $r_{\mu} = v_{t-in} / \nu$  şeklinde tanımlanmış olan viskoziteler oranından hesaplanan  $v_{t-in}$  değerine bağlı olarak (2.27) eşitliğinden hesaplanmıştır. Literatürde  $x/H=-4,5$  uzaklığındaki giriş sınırı için yaygın olarak önerilen  $r_{\mu} = 100$  değeri esas alınmıştır (Bosch ve Rodi, 1998).

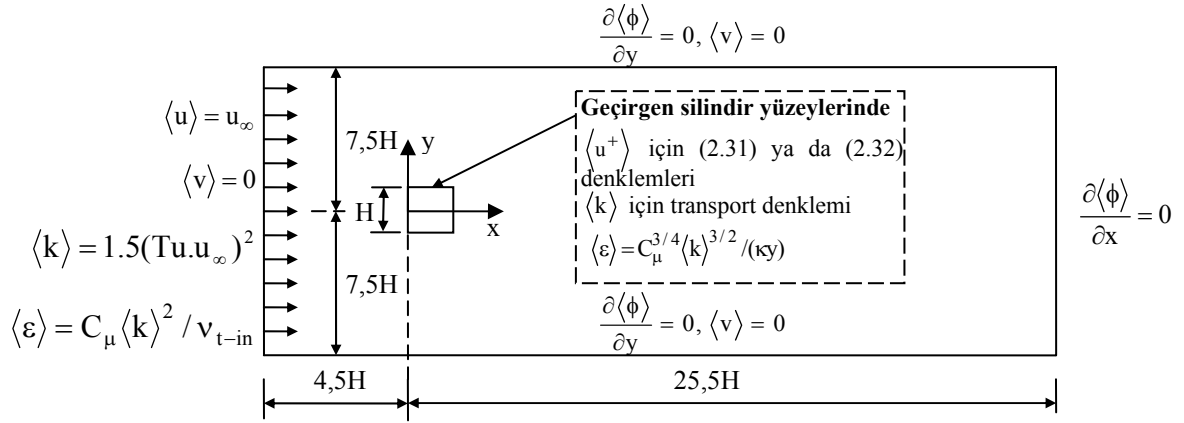
Serbest sınırlarda (alt ve üst sınırlar) akış alanının tam gelişmiş olduğu göz önüne alınarak, değişkenlerin sınırların normali yönündeki gradyanlarının ve normal (düşey) yöndeki hızın sıfır değer aldığı;

$$\frac{\partial \langle \phi \rangle}{\partial y} = 0, \quad \langle v \rangle = 0 \quad (2.29)$$

koşulları kullanılmıştır.

Referans noktasına göre  $x/H=25,5$  uzaklığında yer alan çıkış sınırında ise bütün değişkenler için akış yönünde sıfır gradyan koşulu göz önüne alınmıştır:

$$\frac{\partial \langle \phi \rangle}{\partial x} = 0 \quad (2.30)$$



Şekil 2.19. Hesaplama bölgesi ve sınır koşulları

Sayısal algoritmada geçirgen yüzey yakınlarda laminer ve logaritmik alt tabakaları esas alan iki ayrı bağıntı kullanılmıştır.  $y$  yönü duvara normal yön olarak göz önüne alındığında laminer alt tabaka için boyutsuz hız bağıntısı;

$$\langle u^+ \rangle = \frac{\exp(\langle y^+ \rangle \langle v_w^+ \rangle) - 1}{\langle v_w^+ \rangle} \quad (2.31)$$

ve türbülanslı alt tabaka için;

$$\langle u^+ \rangle = \left\{ \frac{\langle v_w^+ \rangle}{4\kappa} \ln \left| \frac{\langle y^+ \rangle}{y_p^+} \right| + \left( 1 + u_p^+ \langle v_w^+ \rangle \right)^{1/2} \right\} \frac{1}{\kappa} \ln \left| \frac{\langle y^+ \rangle}{y_p^+} \right| + u_p^+ \quad (2.32)$$

bağıntısı esas alınmıştır. Burada yer alan sabitler için  $u_p^+ = y_p^+ = 11,5$  ve  $\kappa=0.4$  değerleri kullanılmıştır (Çuhadaroğlu, 2004). Sonuç olarak bu çalışmada kullanılan duvar fonksiyonları

$$\langle u^+ \rangle = \begin{cases} \langle y^+ \rangle < y_p^+ \text{ için (2.31) eşitliği} \\ \langle y^+ \rangle \geq y_p^+ \text{ için (2.32) eşitliği} \end{cases} \quad (2.33)$$

şeklinde özetlenebilir. Katı sınır yakınlığında türbülanslı alt tabaka içerisinde türbülans kinetik enerjisi üretiminin bu enerjinin yutulması ile yaklaşık aynı düzeyde olması nedeniyle bu bölgelerde yerel bir denge olduğu bilinmektedir. Katı sınır yakınlığında  $\langle k \rangle$  türbülans kinetik enerjisi mevcut transport denkleminin çözümü ile hesaplanırken,  $\langle \varepsilon \rangle$  yutulma miktarı ise türbülans kinetik enerji denkleminde üretim=yutulma koşulundan elde edilen;

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{C_{\mu}^{3/4} \langle k \rangle^{3/2}}{\kappa y} \quad (2.34)$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır.

### 2.2.3. Denklem Ayrıklaştırması

Sayısal hesaplamada sonlu hacim yöntemine göre ayrıklaştırılmış olan cebirsel denklemler kullanılmıştır. Bilindiği üzere sonlu hacim yönteminde; hesaplama bölgesindeki sonlu boyutlara sahip bir hacim (alan) parçası üzerinde ilgili diferansiyel denklem sınır değerler göz önüne alınarak bütün doğrultularda sırası ile integre edilmekte ve kaynak terimler gibi integre edilemeyen terimler için ortalama değer teoreminden yararlanılarak cebirsel denklemler elde edilmektedir.

Yatay ve düşey hız bileşenlerinin hesaplanmasına yarayan momentum denklemlerinin integre edildiği sonlu hacimler (momentum hücreleri); sıcaklık, türbülans kinetik enerjisi, basınç ve diğer skaler büyüklüklerin integre edildiği sonlu hacimlere (temel hücreler) göre yatay (u hızı için) ve düşey (v hızı için) yönde yarım hacim kadar kaydırılmış şekilde göz önüne alınmıştır. Bu şekilde düzenlenmiş olan çapraz hacimlerin merkezlerinde elde edilmiş olan hız değerleri, basınç hesabının yapıldığı hacmin yatay ve düşey sınırlarında yer aldığından basınç için sürücü bir kuvvet oluşturmaktadır (Patankar, 1980).

Basınç, türbülans kinetik enerjisi, türbülans kinetik enerji yutulma miktarı gibi bağımlı değişkenlerin hücre sınırlarında yer alan ara değerleri için “hybrid” yöntemi (Patankar, 1980) ve hız bileşenlerinin ara değerleri için “quick” yöntemi kullanılarak açık (ekspilisit) çözüm yapılmıştır. Silindir yüzeylerinde momentum ve enerji denklemlerinin integrasyon sınır değerleri için, hız ve sıcaklık gradyanlarına bağlı olan eşitleri kullanılır. Bu nedenle;

ayrıklaştırılmış denklemlerde katı sınırlardaki momentum akıları yerine, bu akıların duvar fonksiyonları ile olan

$$Q_{\text{wall}} = \delta x \cdot \rho \cdot v \cdot (\partial \langle u \rangle / \partial y) = \delta x \cdot \langle \tau_{\text{wall}} \rangle = \delta x \cdot \rho \cdot \langle u_{\tau}^2 \rangle = \delta x \cdot \rho \cdot \left\{ \langle u_p \rangle / \left\{ \text{du var fonksiyonu} \right\} \right\}^{1/2}$$

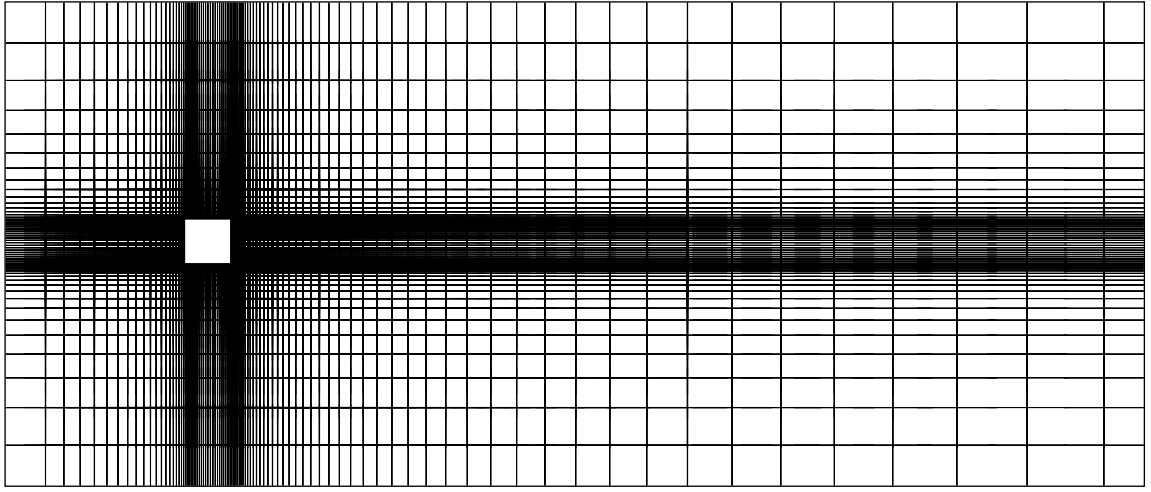
ilişkileri göz önüne alınmıştır.

Bu çalışmada kullanılan sayısal çözüm yöntemi, ayrıklaştırılmış denklem sisteminin boyutsuz zaman adımında ( $\Delta t^* = \Delta t \cdot u_{\infty} / H = 0,001$ ) Gauss-Seidel yöntemi ile ardışık olarak çözümlenmesine dayalıdır. Ardışık çözümün yapıldığı her yeni zaman adımında MAC (Marker and Cell) yöntemi kullanılarak basınç hesaplanmış ve süreklilik denklemini sağlayacak şekilde hız bileşenleri düzeltilmiştir. Bu işlem; her bir temel hücrede basınçtaki değişim  $10^{-4}$  gibi küçük bir değer altında kalıncaya kadar ardışık olarak sürdürülür ve tekrar yeni zaman adımında diğer değişkenlerin hesabına geçilir. Ayrıklaştırılmış denklemlerin ardışık çözümü, model arkasında periyodik girdap hareketinin ortaya çıktığı yeterli bir zaman değerine kadar ( $t^* = 200$ ) sürdürülür ve sonuçlar yazdırılır. Bu çalışmada incelenen problem ile ilgili sayısal hesaplamalar 1,6 GHz işlemciye sahip bir dizüstü bilgisayarda yapılmıştır.

#### 2.2.4. Bölge Ayrıklaştırması

Hesaplama bölgesinin ayrıklaştırılmasında ortogonal bir ağ sistemi göz önüne alınmış ve katı yüzeylerin (kare silindir) yakınında sıklaşan, silindirden uzaklaştıkça genişleyen düzgün olmayan bir ağ düzeni kullanılmıştır (Şekil 2.20). Hesaplama bölgesindeki ağ düğüm noktaları önem sırasına göre üç bölgeye ayrılmıştır. Kare silindirin ön yüzeyindeki bölge yatay doğrultudaki (x-yönündeki) tüm ağ düğüm noktalarının %25'ini oluştururken, silindirin üst-alt yüzeylerindeki bölgeler % 25'lik kısmını, arka yüzeyinde yer alan bölge ise %50'lik kısmını oluşturmaktadır. Bunun yanında kare silindirin üst-alt yüzeyindeki bölgeler düşey doğrultudaki (y-yönündeki) toplam ağ düğüm noktalarının %30'unu ve ön-arka yüzeyindeki bölgeler %40'ını teşkil etmektedir. Ağ aralıkları,  $r = \left[ (x_L / (\Delta x_i)_{\min}) (r - 1) + 1 \right]^{1/\text{cell-num}}$  açık bağıntısına bağlı olarak, kare silindir civarında sıklaşan düzgün olmayan bir ağ modeline göre düzenlenmiştir. Burada  $x_L$  alt bölge uzunluğu, cell-num alt bölgede ağ genişleme yönündeki düğüm sayısı,  $(\Delta x_i)_{\min}$  silindire bitişik ilk hücre genişliğidir. Sayısal belirsizliği belirlemek amacıyla, hesaplamalar

geçirgen ve geçirgen olmayan kare silindir etrafında  $128 \times 80$ ,  $96 \times 60$  ve  $72 \times 46$  olmak üzere üç geometrik benzer ağ düzenlemesinde gerçekleştirilmiştir. Ağ genişleme oranları, yatay doğrultuda bütün ağ sistemleri için silindirin ön kısmında  $r=1,0856$ , kenarlar boyunca  $1,0054$  ve silindirin arkasında  $1,0641$  olmak üzere sabit tutulmuştur. Yatay doğrultuda ise ağ,  $y=0$  değerine bağlı olarak simetriktir ve genişleme oranları silindirin üst-alt yüzeylerinde  $r=1,1657$  ve köşeler boyunca  $1,0054$  olarak alınmıştır.



Şekil 2.20. Ayrılaştırılmış hesaplama bölgesi ve ağ düzenlemesi

Her bir ağ sisteminde yakınsama elde edildikten sonra, sayısal sonuçlara ait belirsizlikler Richardson'un ekstrapolasyon teorisine dayalı olan ağ yakınsaklık indeksi (*GCI-Grid Convergence Index*) kullanılarak değerlendirilmiştir [Roache, 1997; URL1, 2000; Cadafalch vd., 2002]. Yönteme ait işlem adımları aşağıda verilmiştir. Üç farklı ağ sisteminden hesaplanmış olan herhangi bir  $\phi$  büyüklüğü için, görünen kesme hatası derecesi  $p$  aşağıdaki ifade ile hesaplanmaktadır.

$$r = \frac{1}{\ln(r_{21})} \ln \left| \frac{\epsilon_{32}}{\epsilon_{21}} \right| q(p) \quad (2.35)$$

$$q(p) = \ln \left[ \frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \right] \quad (2.36)$$

$$s = 1 \cdot \text{sign}(\epsilon_{32} / \epsilon_{21}) \quad (2.37)$$

Burada  $r$ , ( $r=r_{kaba}/r_{hassas}$ ) ağ iyileştirme faktörü,  $h$ , ( $h = \left[ \sum_{i=1}^N (\Delta A_i) / N \right]^{1/2}$ ) temsili ağ boyutu,  $\Delta A_i$ ,  $i$ 'inci hücrenin alanı,  $N$ , hesaplamada kullanılan toplam hücre sayısı,  $\varepsilon_{32} = \phi_3 - \phi_2$ ,  $\varepsilon_{21} = \phi_2 - \phi_1$ ,  $\phi_k$  ise  $k$ 'inci düğüm noktasındaki çözümü göstermektedir.  $\phi$  için hesaplanan ekstrapole edilmiş değerler;

$$\phi_{\text{ext}}^{21} = (r_{21}^p \phi_1 - \phi_2) / (r_{21}^p - 1) \quad (2.38)$$

$$\phi_{\text{ext}}^{32} = (r_{32}^p \phi_2 - \phi_3) / (r_{32}^p - 1) \quad (2.39)$$

şeklindedir. Yaklaşık bağıl hatalar;

$$e_a^{21} = \left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| \quad (2.40)$$

$$e_a^{32} = \left| \frac{\phi_2 - \phi_3}{\phi_2} \right| \quad (2.41)$$

ve ekstrapole edilmiş bağıl hatalar;

$$e_{\text{ext}}^{21} = \left| \frac{\phi_{\text{ext}}^{12} - \phi_k}{\phi_{\text{ext}}^{12}} \right| \quad (2.42)$$

ile birlikte ağ yakınsaklık indeksi değerleri;

$$GCI^{21} = \frac{F_s e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \quad (2.43)$$

$$GCI^{32} = \frac{F_s e_a^{32}}{r_{32}^p - 1} \quad (2.44)$$

ifadeleri ile belirlenmektedir. Burada  $F_s=1,25$  değeri iki veya daha fazla ağ çalışmaları için önerilmektedir [Roache, 1997]. Bu çalışmada elde edilmiş olan GCI sonuçları ortalama direnç katsayısı için elde edilmiş olup, çalışmada kullanılmış olan 96×60'luk ağ sisteminin sonuçlar üzerindeki sayısal belirsizliğini göstermektedir. Tablo 2.1'de, seçilmiş olan üç

farklı ağ sisteminde üflemez durumda zaman ortalamalı direnç katsayısı  $\overline{C_D}$  için olan sayısal belirsizlik değerleri görülmektedir. Buradan da görüldüğü gibi sayısal belirsizlik, 72×46'lık ağdan ve 96×60 ağ sistemine geçişte %5,4 iken, 96×60'lık ağdan ve 124×80 ağ sistemine geçişte %1,25 değerine düşmektedir. Diğer bir deyişle bu çalışmada 96×60 ağ sistemi için elde edilmiş olan sonuçlar, daha hassas olan 128×80'lik ağ sistemine göre elde edilecek olan sonuçlara göre %1,25 daha kabadır. Bu değer elde edilmiş olan sonuçların oldukça iyi bir hassasiyet taşımakta olduğunu göstermektedir.

Tablo 2.1. Üflemez durumdaki GCI değerleri

i	1	2	3
Grid	128x80	96x60	72x46
N	10240	5760	3312
h	0,02096	0,02795	0,03686
$r=h_{i+1}/h_i$	1,33		1,32
$\phi(\overline{C_D})$	2,2026	2,1329	1,8558
$ \phi_{i+1}-\phi_i $	0,0697		0,2771
p	5.015		
$\phi_{ext}$	2,2245		2,2245
$e_a$	3,17%		13%
$e_{ext}$	0,98%	4,1%	16,6%
GCI	1,25%		5,4%

Tablo 2.2'de, bütün yüzeylerden  $v_w=0,02$  m/s hız değerinde yapılan üfleme durumunda ortalama direnç katsayısına ilişkin GCI değerleri yer almaktadır.  $\overline{C_D}$  katsayısındaki belirsizlik de, bütün yüzeylerden üfleme durumunda ağ sisteminin kaba ağ sisteminden ince ağ sistemine iyileştirilmesi ile %30,8 değerinden %18,3 değerine düşmektedir. Bu çalışmada, üfleme hız değerleri değişmekle birlikte yatay doğrultuda ön yüzeyde 0,00624, üst-alt yüzeylerde 0,00404 ve arka yüzeyde 0,00838 m, düşey doğrultuda ise ön yüzeyde 0,00784, ön-arka yüzeylerde 0,00404 ve üst yüzeyde 0,00784 m minimum ağ genişliği değerlerinin kullanıldığı 96×60'lık ağ sistemi kullanılmıştır.



Tablo 2.2. Bütün yüzeylerden  $v_w=0,002$  m/s değeri ile üfleme durumunda GCI değerleri

i	1	2	3
Grid	128x80	96x60	72x46
N	10240	5760	3312
h	0,02096	0,02795	0,03686
$r=h_{i+1}/h_i$	1,33		1,32
$\phi(\overline{C_D})$	2,3849	2,1962	1,9155
$ \phi_{i+1}-\phi_i $	0,1887		0,2807
p	1,508		
$\phi_{ext}$	2,736		2,736
$e_a$	7,9%		12,8%
$e_{ext}$	12,8%	19,7%	30%
GCI	18,3%		30,8%

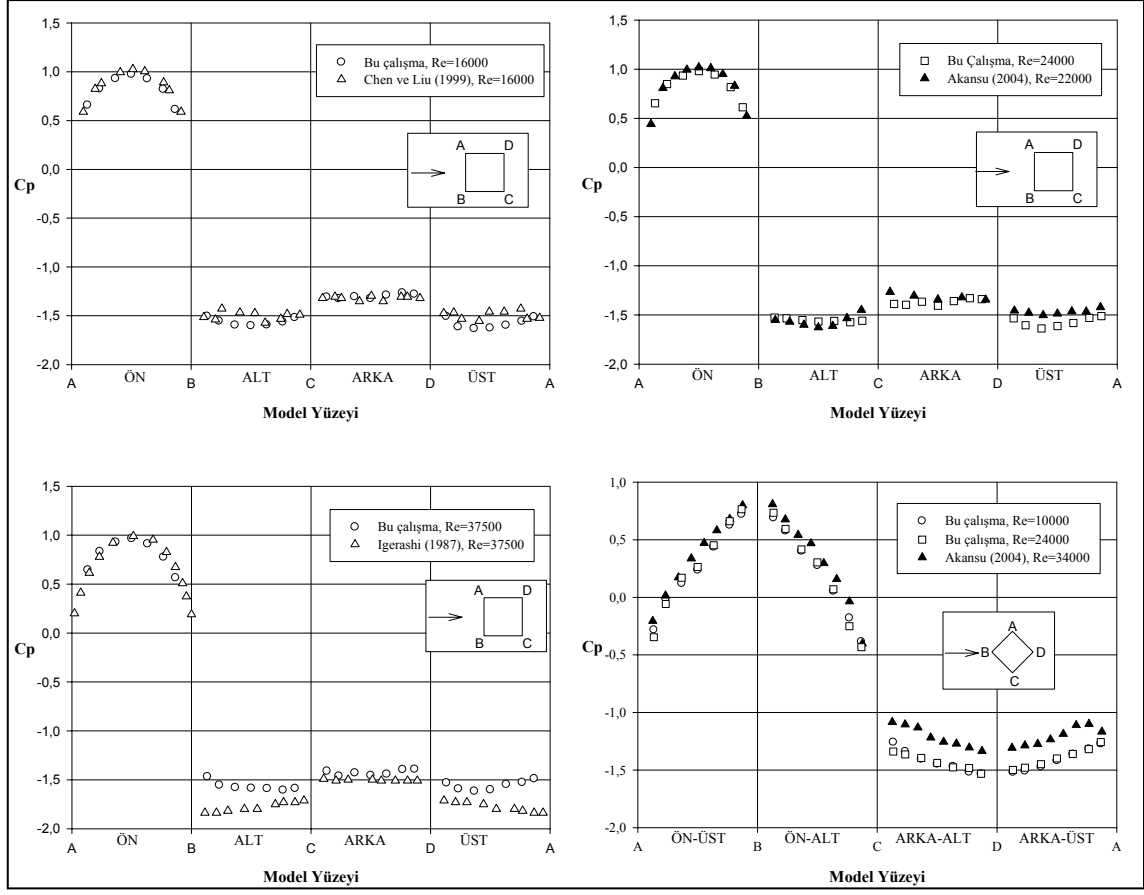
### 3. BULGULAR

Çalışmada; yatay ve diyagonal durumlardaki kare kesitli küt cisim yüzeyinden yapılan düzgün üfleminin yüzey basıncı, direnç katsayısı, kaldırma katsayısı ve Strouhal sayısı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiş ve bazı durumlar için sayısal inceleme de yapılmıştır. Literatürde yer alan veriler ile karşılaştırma yapılabilmesi için; model yüzeyinden üfleminin olmadığı durumda akış alanı içerisinde yer alan modelin etrafındaki akışkan ile etkileşimi incelenmiştir. Çalışmada kullanılan bilgisayar programı akış alanı içerisinde 0°'lik model açısı (yatay durum) için geliştirilmiş olduğundan bu duruma ilişkin sayısal ve deneysel bulgular karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

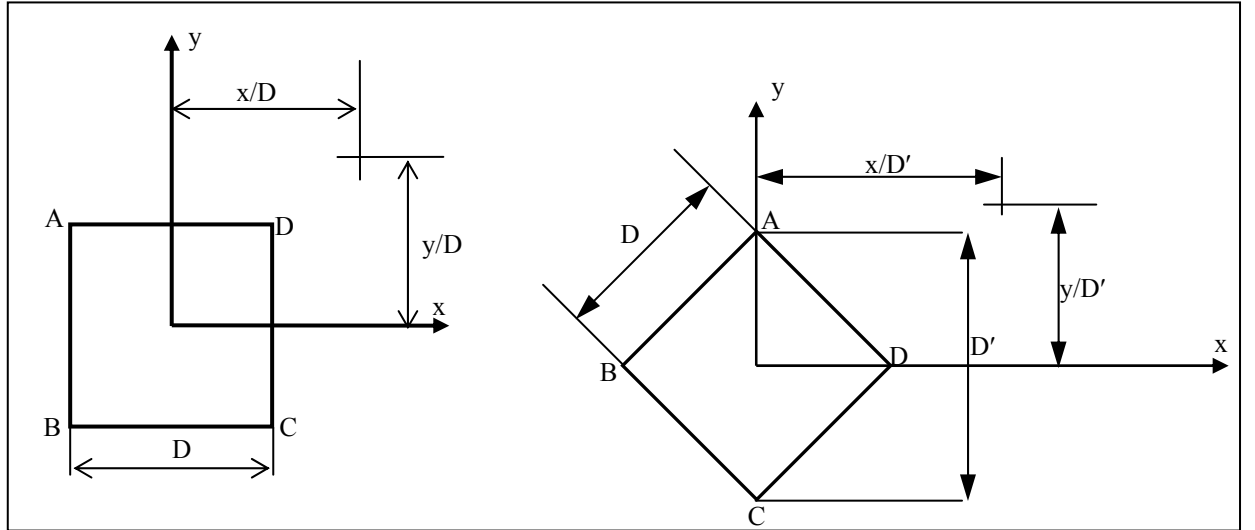
#### 3.1. Üflemez Durum İçin Kare Kesitli Silindir Etrafındaki Akış

30 mm'lik kenar uzunluğuna sahip kare kesitli silindir model için üfleminin olmadığı durumda  $Re=16000$ ,  $24000$  ve  $37500$  değerleri için basınç dağılımları elde edilmiş ve literatürde farklı araştırmacılar tarafından elde edilmiş olan bulgular ile karşılaştırılmıştır. Akışa göre 0° ve 45°'lik model (diyagonal) açısına ilişkin basınç katsayısı dağılımları Şekil 3.1'de görülmektedir. 0°'lik model açısı sonuçları; modelin akışa göre ön yüzeyinin orta noktasında yani durma noktasında basınç katsayısının yaklaşık en yüksek değeri olan  $C_p \cong 1$  değerine ulaşmakta olduğunu ve sonuçların literatür ile uyum içerisinde olduğunu göstermektedir.

Kare kesitli modelden ayrılan girdapların frekansını belirlemek amacıyla kızgın film probu kullanılmıştır. Prob; tünel içerisinde model arkasında belirli x ve y istasyonlarına yerleştirilerek ölçümler alınmıştır. İlk aşamada probun model arkasında yer alacağı istasyon belirlenmiştir. Bunun için model kenar uzunluğu  $D=30$  mm referans değer olarak göz önüne alınmış ve çeşitli  $x/D$ ,  $y/D$  boyutsuz konumlarında ölçümler yapılmıştır.



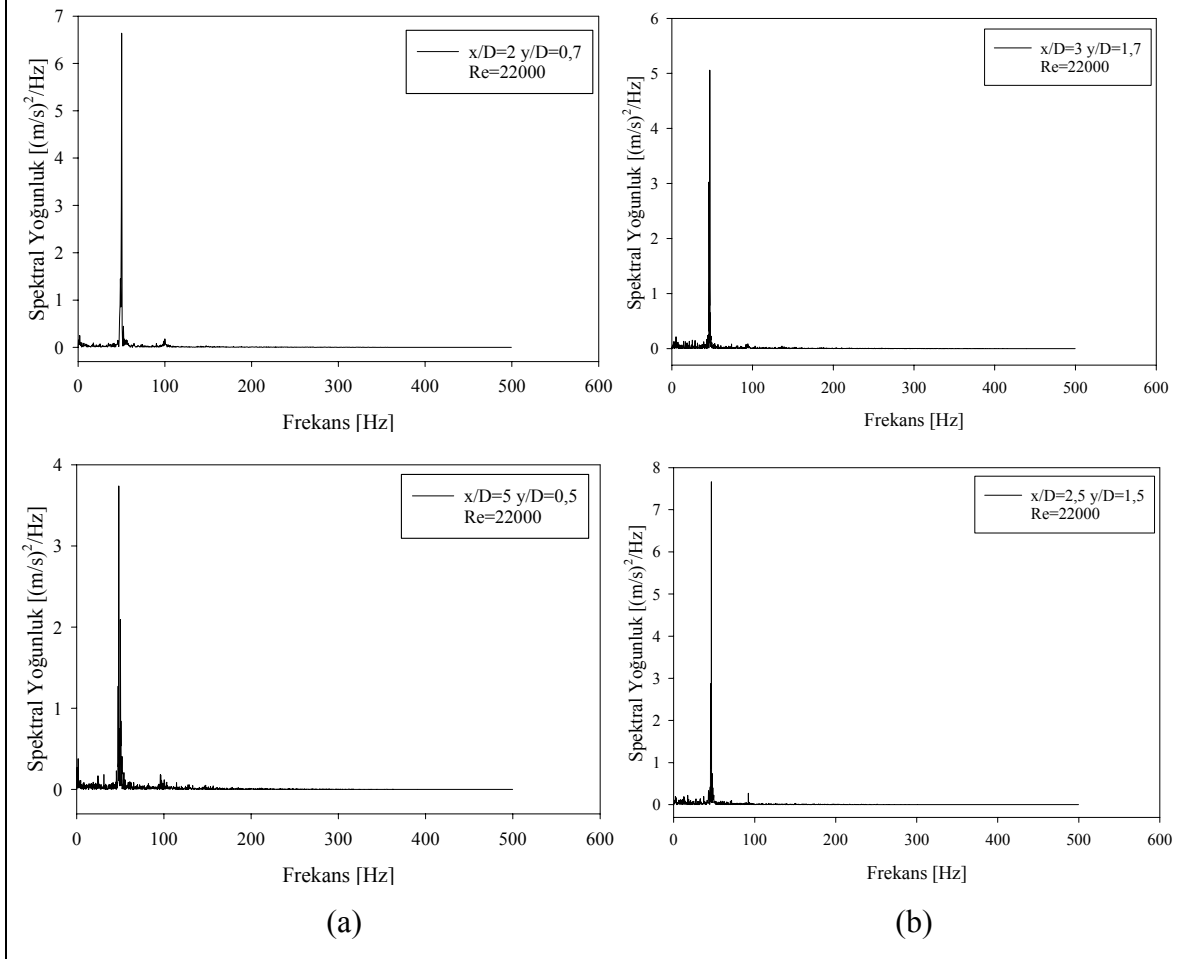
Şekil 3.1. Çeşitli koşullar için basınç katsayısının model yüzeylerindeki değişimi



Şekil 3.2. Frekans ölçüm istasyonları

Hız ölçümlerinin spektral yoğunluğu modelden ayrılan girdapların frekansları hakkında kesin bir bilgi sağlamaktadır. Girdap frekansı spektral yoğunluğun pik değere

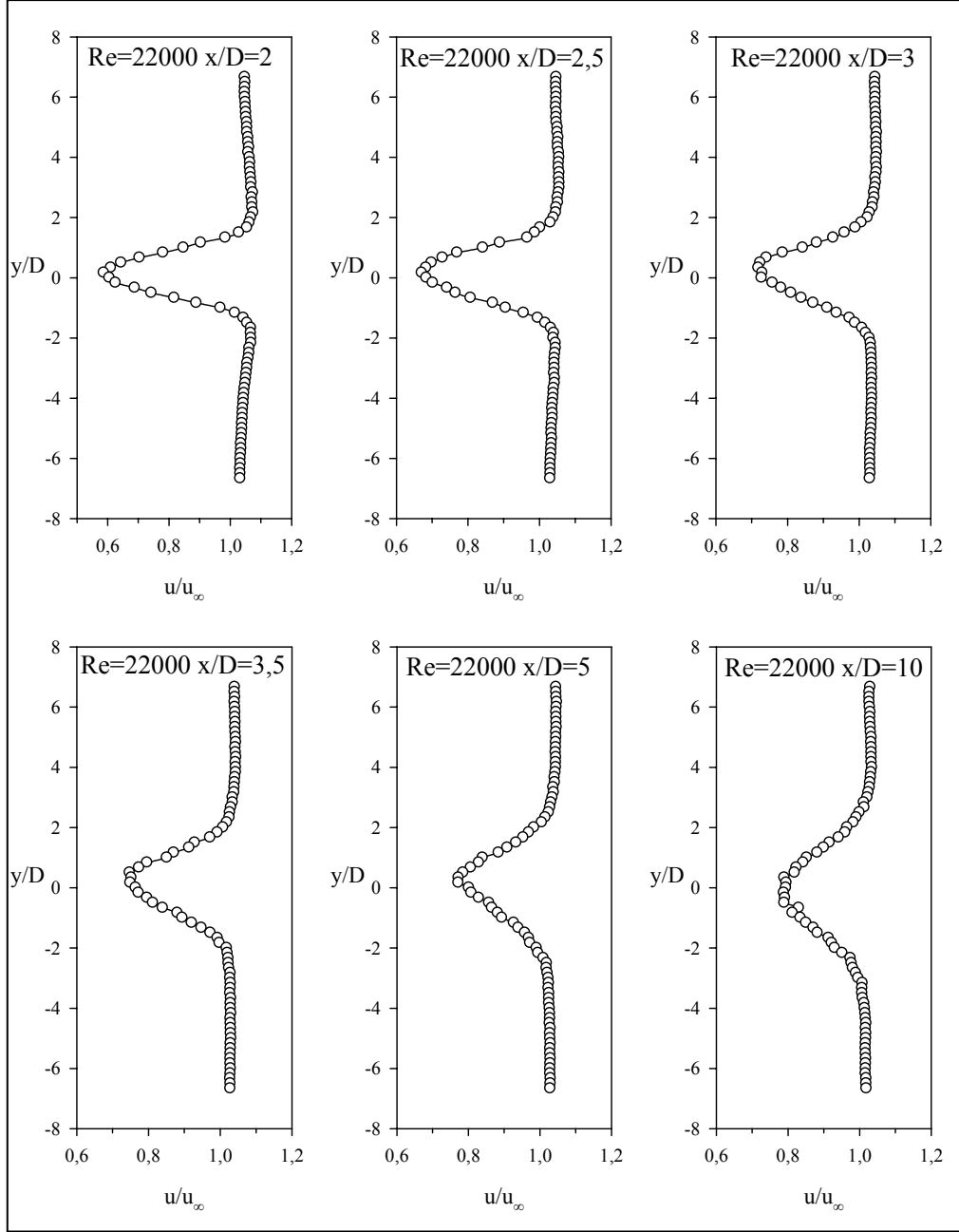
ulaştığı tekil bir nokta olarak belirlenmektedir. Şekil 3.3’de çeşitli istasyonlarda ölçülen hız değerlerine ilişkin spektral yoğunluk dağılımları görülmektedir.



Şekil 3.3. Re=22000 değerinde çeşitli istasyonlarda ölçülen frekans değerleri a) 0° model açısı, b) 45° model açısı

Burada da görüldüğü gibi Re=22000 değeri için girdap frekansı  $f=50$  Hz civarındadır ve değişik  $x/D$  ve  $y/D$  oranlarında bu değer sabit kalmaktadır.

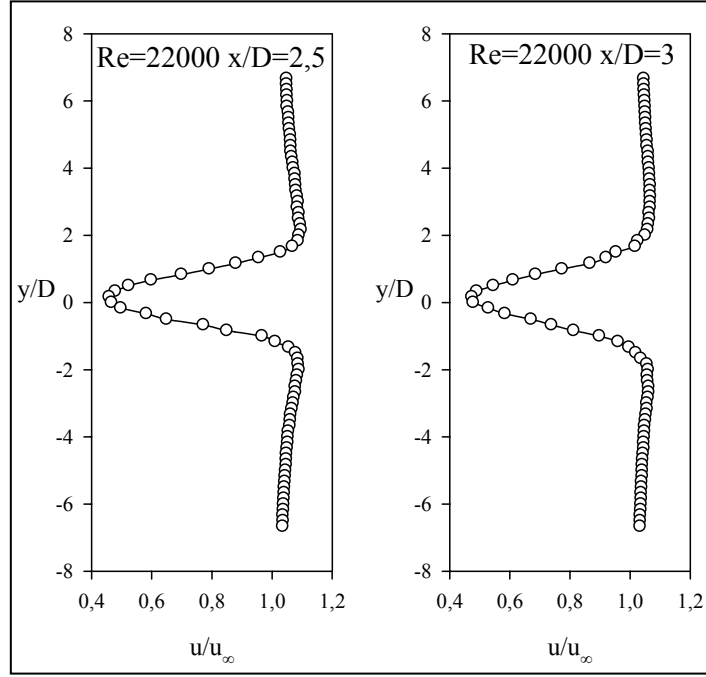
Rüzgâr tüneli boyunca modelden çeşitli uzaklıklarda düşey yönde yapılan hız taramasına ilişkin grafikler Şekil 3.4’de görülmektedir. Bu ölçümlerde tünel düşey eksenini boyunca 5 mm’lik aralıklar ile hız değerleri ölçülmüştür. Bu hız taraması model arkasında oluşan iz bölgesinin uzunluğu hakkında bir fikir vermektedir.



Şekil 3.4.  $Re=22000$  değeri için çeşitli tünel düşey kesitlerinde ölçülen hız değerleri

Bu grafiklerde  $y/D=0$  değeri civarında boyutsuz hız değerinde ( $u/u_\infty$ ) belirgin bir düşüş olduğu görülmektedir. Bu düşüşün olduğu  $y/D$  aralığı modelin arkasında oluşan iz bölgesinin genişliğini göstermektedir.  $x/D$  yönünde modelden uzaklaştıkça ani hız düşümlerinin gerçekleştiği  $\pm y/D$  aralığı daralmakta ve merkez civarındaki hız değerleri giderek artmaktadır. Örneğin  $x/D=2$  durumunda ani hız düşümünün olduğu bölge, yani model arkasındaki iz bölgesinin düşey genişliği  $y/D=\pm 2$  değeri civarındadır. Buna göre

$x/D=2$  istasyonunda yapılacak ölçümlerde ölçüm sağlığı açısından prob konumu düşey ekseninde  $|y/D|>2$  değeri civarında seçilmelidir. Benzer şekilde  $45^\circ$ lik model açısında yapılan hız taraması sonucu elde edilen grafikler Şekil 3.5'te görülmektedir.

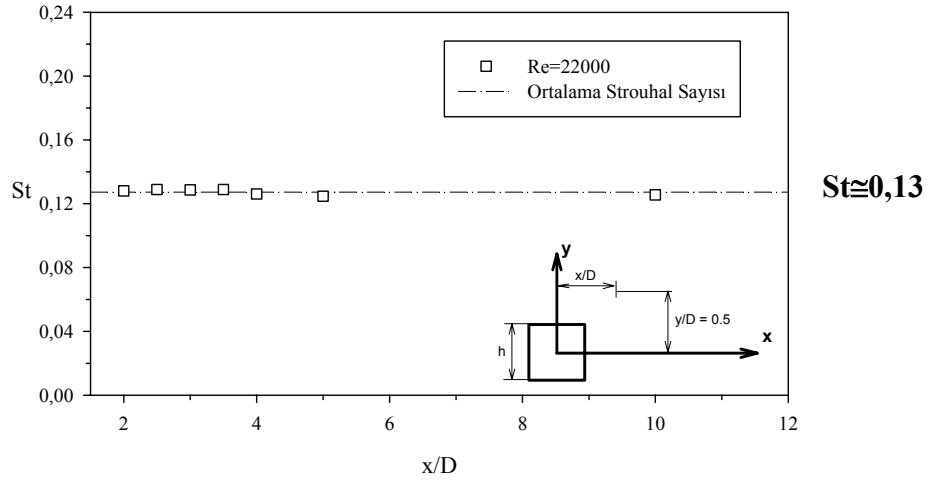


Şekil 3.5.  $Re=22000$  değeri için  $45^\circ$ lik model açısında çeşitli tünel düşey kesitlerinde ölçülen hız değerleri

Yapılan bu ön çalışmalar sonucunda, frekans ölçümlerinin probun konumuna ait  $x/D$  oranından etkilenmediği belirlenmiştir. Kızgın film probunun konumu olarak,  $0^\circ$ lik model açısında  $x/D=2,5$   $y/D=0,5$  istasyonu,  $45^\circ$ lik model açısında  $x/D=2,5$   $y/D=1$  istasyonu seçilmiştir.

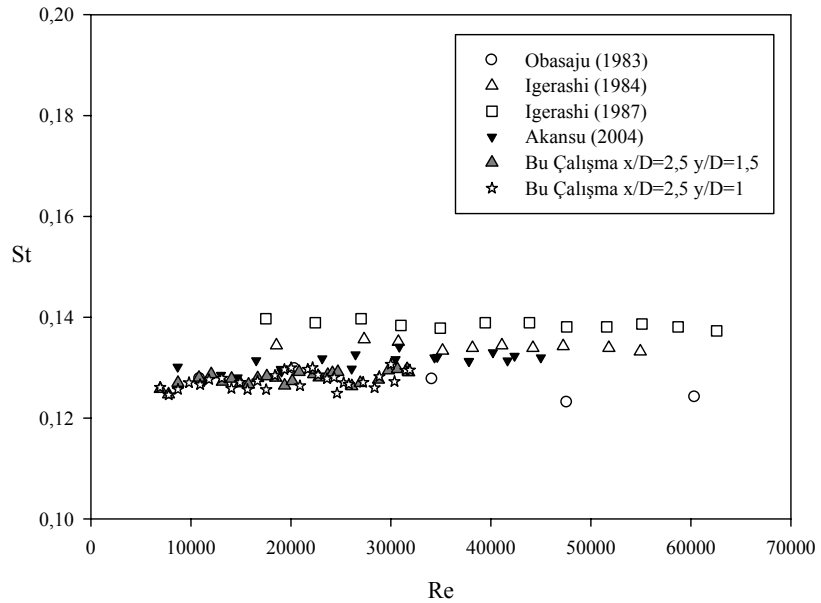
Strouhal sayısı ( $St=f.D/u_\infty$ ) hesabında uygun istasyonda ölçülen tekil pikin frekans değeri  $f$  (etkin frekans) kullanılmıştır.  $u_\infty$  serbest akış hızı ise; rüzgar tüneli daralma konisinde ölçülen referans basınç değerinden yararlanılarak hesaplanmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda Strouhal sayısı literatür ile uyumlu bir şekilde yatay durum için  $St \approx 0,13$  ve diyagonal durum için  $St \approx 0,17$  olarak elde edilmiştir.

Şekil 3.6'da Strouhal sayısının  $x/D$  oranı ile değişimi görülmektedir. Burada da görüldüğü gibi tünel boyunca yatay doğrultuda değişen ölçüm istasyonunun konumu Strouhal sayısını etkilememektedir.



Şekil 3.6. St-x/D değişimi

Strouhal sayısı; Reynolds sayısının rüzgar tünelinin çalışma aralığı olan  $Re = 8000-32000$  değerleri arasındaki değerlerde büyük bir değişim sergilememektedir. Bunun nedeni; artan Reynolds sayısı ile birlikte etkin girdap frekansının da artmasına rağmen, serbest akış hız değerinin de artmasıdır. Şekil 3.7’de artan Reynolds sayısı ile Strouhal sayısı değişimi ve literatürde yer alan değerler bir arada görülmektedir. Bu çalışmada elde edilen ölçümler literatürdeki veriler ile uyum içerisindedir.



Yapılan çalışmalarda kullanılan model yüzeylerinden üflenen hava debisi boyutsuz bir üfleme katsayısına dönüştürülmüş ve elde edilen sonuçlar bu katsayı üzerinden değerlendirilmiştir. Üfleme katsayısı;

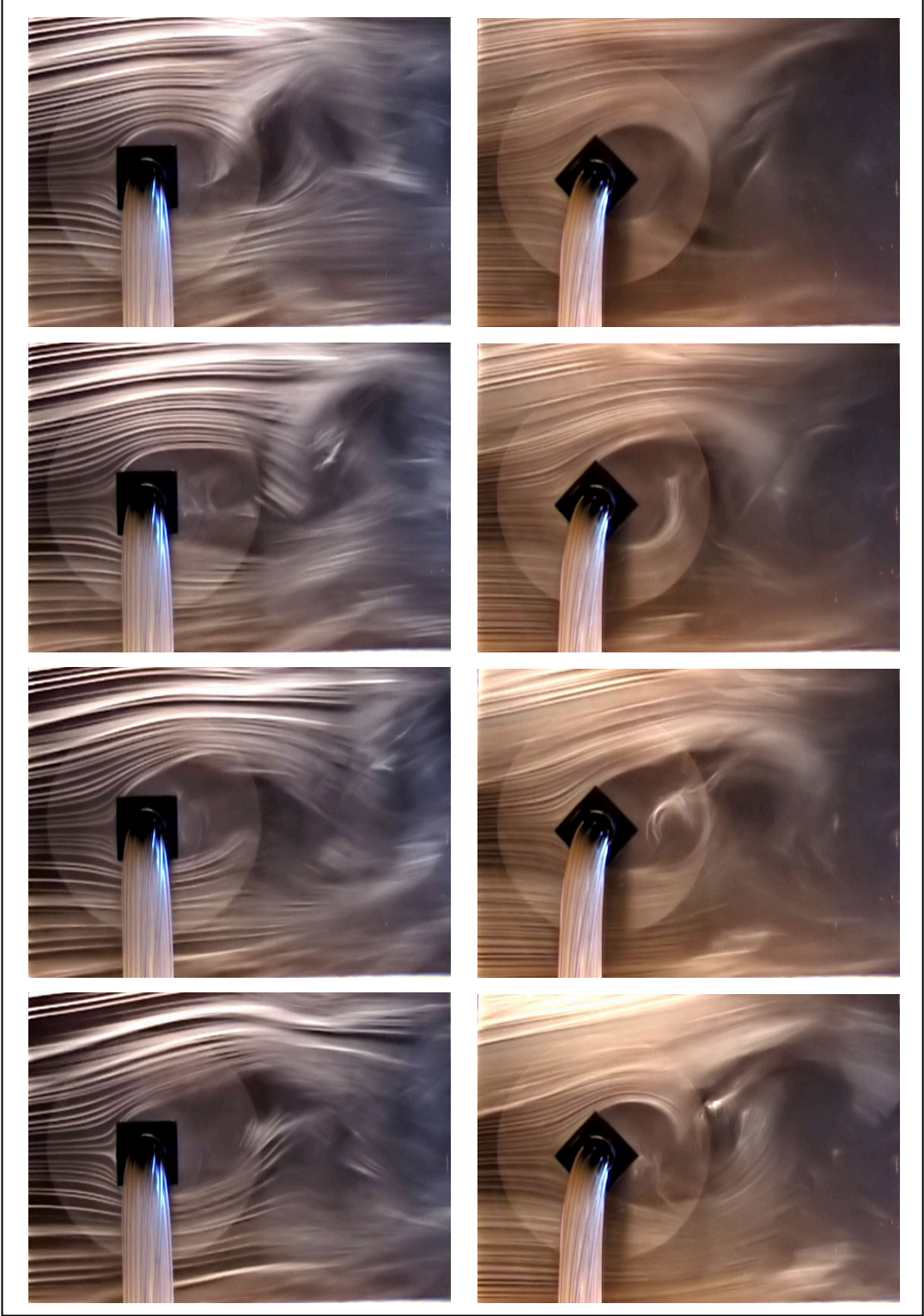
$$C_Q = \frac{Q}{D.L.u_\infty} \quad (3.1)$$

şeklinde tanımlanmış olup, burada Q model yüzeyinden üflenen hava debisi ( $m^3/s$ ), D model yüksekliği (m), L model boyu (m) ve  $u_\infty$  tünel serbest akış hız değeridir (m/s).

30 mm kenar uzunluğuna sahip kare kesitli model için boyut oranı ( $AR=L/D$ ) 15 olarak elde edilmiştir. West ve Apelt (1982), boyut oranının  $4 < AR < 10$  aralığında olması durumunda Strouhal sayısında herhangi bir değişimin olmadığını ifade etmiştir. Bununla birlikte, Chen ve Liu (1999), yaptıkları çalışmada değeri  $AR=15$  için üç boyutluluğun öneminin kalmadığını belirtmişlerdir. Blokaj oranı ise (Blokaj Oranı= $D/H$ ) yatay silindir için %6,6, diyagonal silindir için %9,3 olarak bulunmuştur. Igerashi (1984), blokaj oranının %2,5 ile %10 arasında olması durumunda Strouhal sayısının 0,13-0,14 aralığında değerler aldığını belirlemiştir. Yine aynı çalışmada blokaj oranının %2,5 ile %7,5 arasında olması durumunda basınç dağılımlarının bundan etkilenmediği bulunmuştur.

Rüzgâr tüneline 0° ve 45°'lik model açısında,  $Re=4300$  değeri için üflemenin olmadığı durumda yapılan akış gözlem çalışması sonucunda elde edilen akış durumuna ilişkin resimler Şekil 3.8'de görülmektedir. Her iki durumda da duman yardımıyla belirginleştirilen akım iplikçiklerinin model yüzeyinden ayrılması, model arkasında oluşturdukları iz bölgesi ve girdaplar görülmektedir.



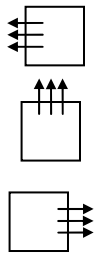
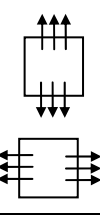
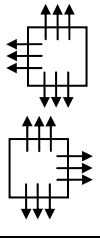
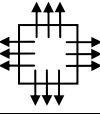


Şekil 3.8. Üflemeziz durum için  $Re=4300$  değerinde  $0^\circ$  ve  $45^\circ$ 'lik model açısında farklı anlarda elde edilen akış gözlem resimleri

### 3.2. Yatay Kare Kesitli Silindir Yüzeylerinden Yapılan Üflemenin Etkisi

Tünel içerisine 0°'lik açı ile yerleştirilmiş yatay modelin bir, iki, üç ve dört yüzeyinden yapılan üfleme için olan çeşitli konfigürasyonlar ve üfleme katsayısı değerleri değerler Tablo 3.1'de topluca görülmektedir.

Tablo 3.1. Yatay model için yapılan basınç ölçümlerine ait  $C_Q$  üfleme katsayısı değerleri

	Re=10000						Re=16000						Re=24000								
	0	0,0040	0,0059	0,0099	0,0158	0,0198	0,0237	0	0,0025	0,0037	0,0062	0,0099	0,0124	0,0148	0	0,0016	0,0025	0,0041	0,0066	0,0082	0,0099
	0	0,0040	0,0059	0,0099	0,0158	0,0198	0,0237	0	0,0025	0,0037	0,0062	0,0099	0,0124	0,0148	0	0,0016	0,0025	0,0041	0,0066	0,0082	0,0099
	0	0,0079	0,0119	0,0198	0,0317	0,0396	0,0475	0	0,0049	0,0074	0,0124	0,0198	0,0247	0,0297	0	0,0033	0,0049	0,0082	0,0132	0,0165	0,0198
	0	0,0119	0,0178	0,0297	0,0475	0,0593	0,0712	0	0,0074	0,0111	0,0185	0,0297	0,0371	0,0445	0	0,0049	0,0074	0,0124	0,0198	0,0247	0,0297
	0	0,0158	0,0237	0,0396	0,0633	0,0791	0,0950	0	0,0099	0,0148	0,0247	0,0396	0,0495	0,0593	0	0,0066	0,0099	0,0165	0,0264	0,0330	0,0396

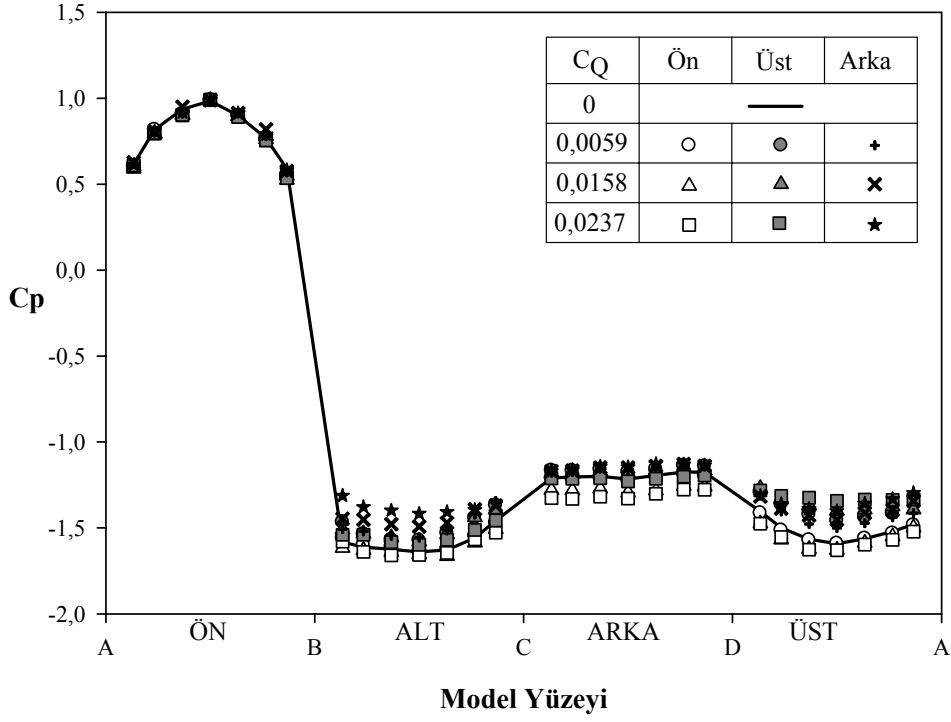
İki veya daha fazla sayıda yüzeyden yapılan üflemede; üfleme hızını düşürmemek için fazla sayıda yüzeyden yapılan üfleme durumlarında debi değeri de artırılmıştır. Bu sayede üfleme yapılan yüzey sayısındaki artış ile birlikte üfleme debisi de artırılarak, yüzeylerden yapılan üfleminin hızı sabit tutulmuştur.

Girdap frekansı ölçümlerinde üfleme katsayısı aralığı bütün üfleme konfigürasyonları için daha geniş tutularak ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümlerde üfleme katsayısı 0,059 değerine kadar artırılmıştır.

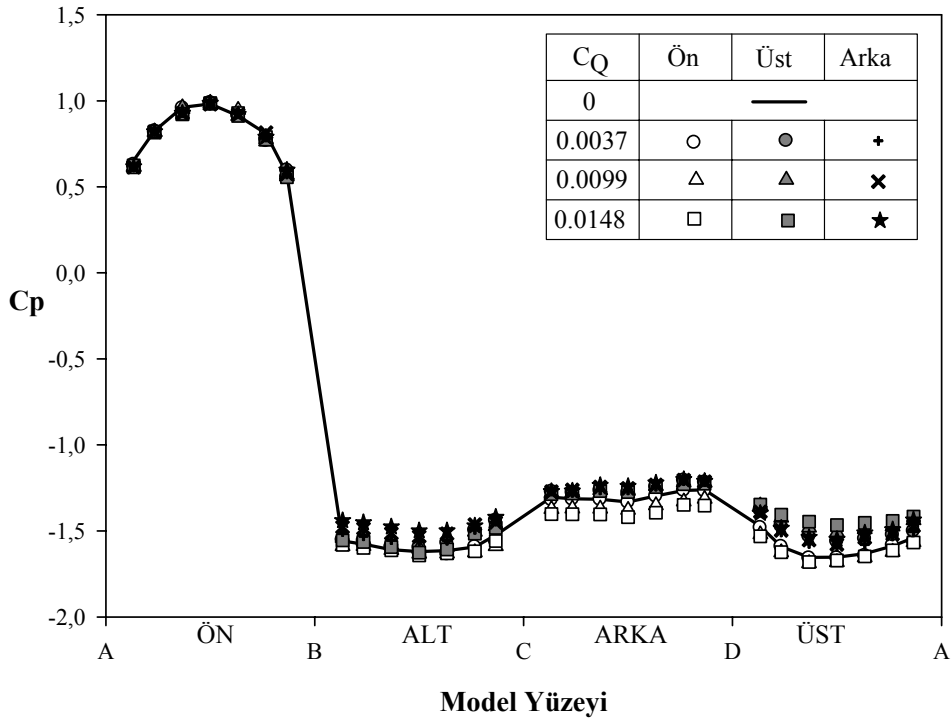
### 3.2.1. Tek Yüzeyden Üfleme Durumu

Bir yüzeyden üfleme durumuna ilişkin ölçümler, rüzgâr tüneli serbest akış hız değerine bağlı olarak belirlenmiş olan  $Re=10000$ ,  $Re=16000$  ve  $Re=24000$  değerleri için gerçekleştirilmiştir. Toplam olarak 7 farklı  $C_Q$  değerinde elde edilen sonuçlardan belirli  $C_Q$  değerleri için olanlar seçilerek basınç katsayısı değişimleri çizilmiştir. Bunun yanında direnç katsayısı, kaldırma katsayısı ve Strouhal sayısının  $C_Q$  ile olan değişim grafikleri de çizilmiştir.  $Re=10000$  değerinden  $Re=24000$  değerine doğru gidildikçe, rüzgâr tünelinin serbest akış hız değeri de artmaktadır. Yüzeylerden yapılan üflemenin debisi deney sisteminden kaynaklanan nedenlerle aynı oranda artırılamadığı için, yüksek  $Re$  sayısında model yüzeyinden yapılan üflemenin akış üzerindeki etkisi daha sınırlı bir aralıkta incelenmiştir. Bu nedenle  $Re=24000$  değeri için olan basınç katsayısı değişim grafiği diğer Reynolds sayılarına göre, daha sınırlı bir üfleme katsayısı aralığındaki değerler için çizilmiştir.

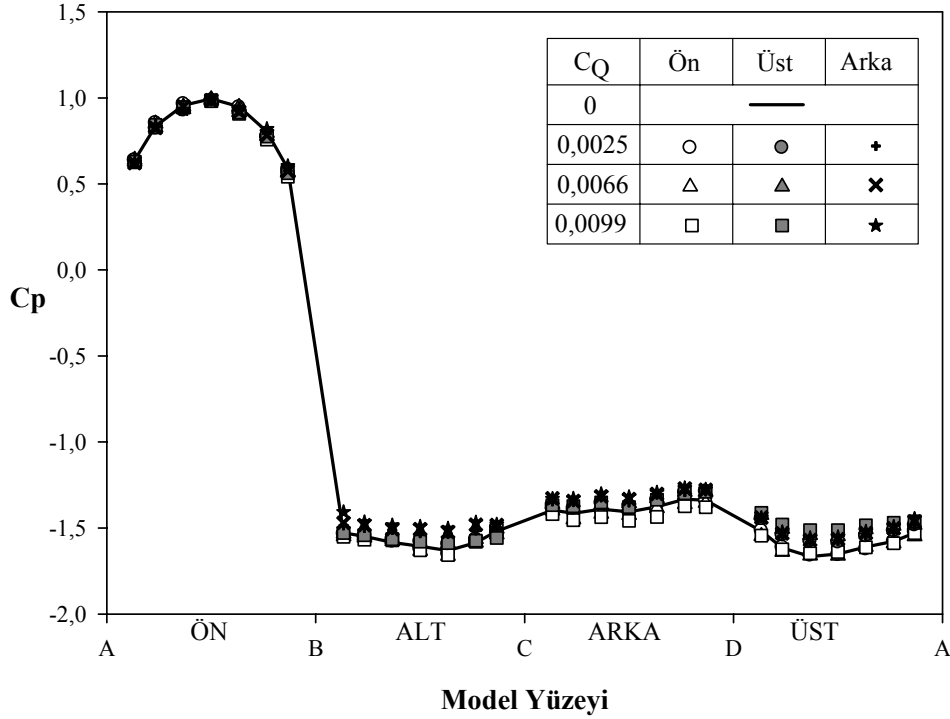
Tek yüzeyden üfleme durumuna ilişkin basınç dağılımı grafikleri üç ayrı Reynolds sayısı için Şekil 3.9, 3.10 ve 3.11'de görülmektedir. Modelin herhangi bir tek yüzeyinden üfleme durumunda ön yüzeydeki basınç katsayısı dağılımı; Reynolds sayısı, üfleme katsayısı ve üfleme yapılan yüzeyin konumundan hiç etkilenmemektedir. Modelin ön yüzeyinden yapılan üfleme, modelin arka yüzeyindeki basınç değerini üflemesiz duruma göre hafifçe azaltmakta ve bu bölgedeki negatif basınç değerinde az da olsa bir artışa neden olmaktadır. Üst yüzeyden yapılan üflemede, artan üfleme katsayısı ile birlikte, modelin üst yüzeyindeki basınç katsayısının artma eğilimi gösterdiği, alt ve arka yüzeylerdeki basınç dağılımlarının üfleme katsayısından çok az düzeyde etkilendiği görülmektedir. Modelin arka yüzeyinden yapılan üfleme, üst ve alt yüzeylerdeki basınç değerlerini simetrik bir şekilde arttırmakta ve dolayısıyla basınç katsayısı değerini de arttırmaktadır.



Şekil 3.9.  $Re=10000$  için tek yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri



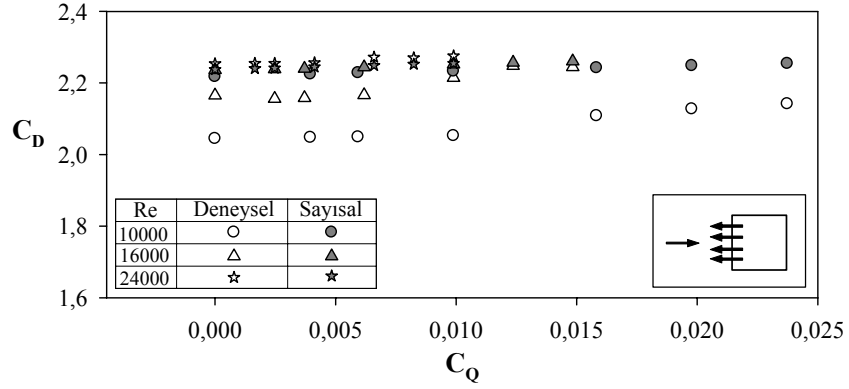
Şekil 3.10.  $Re=16000$  için tek yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri



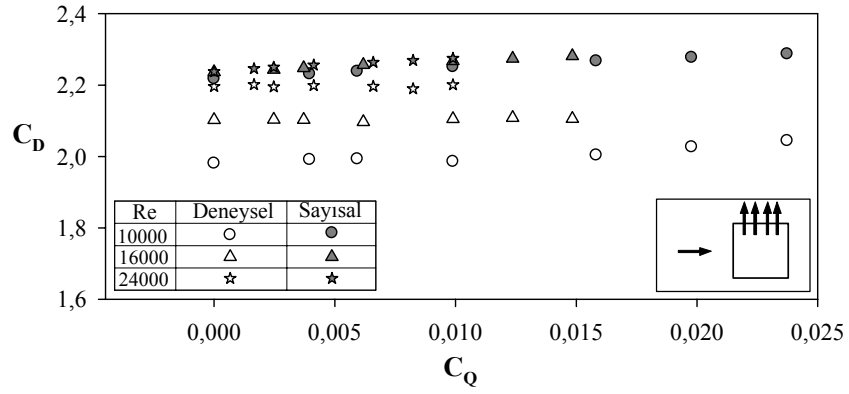
Şekil 3.11.  $Re=24000$  için tek yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri

Ön yüzeyden yapılan üflemede artan üfleme katsayısı ile birlikte sadece  $Re=10000$  için direnç katsayısında hafif bir artma eğilimi olduğu Şekil 3.12’de görülmektedir. Benzer davranış üst yüzeyden yapılan üfleme durumunda da görülmektedir (Şekil 3.13). Orta ve yüksek  $Re$  sayılarında direnç katsayısının ön veya üst yüzeylerden yapılan üflemeden etkilenmediği görülmektedir. Benzer şekilde arka yüzeyden yapılan üflemin direnç katsayısı üzerinde belirgin bir değişime yol açmadığı Şekil 3.14’de görülmektedir.

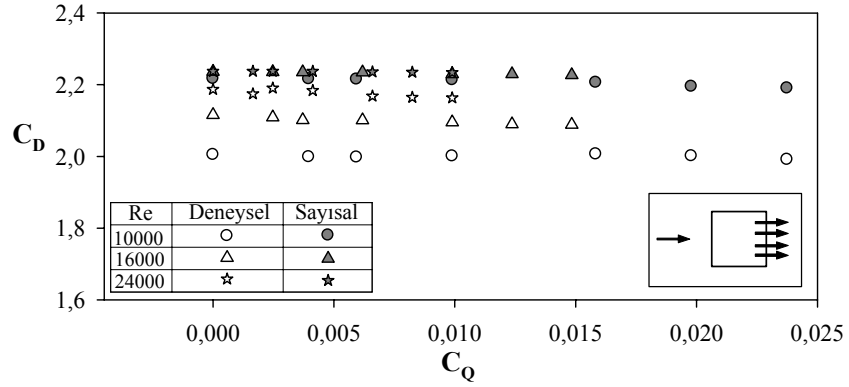
Burada üflemez duruma karşılık gelen  $C_Q=0$  değerinde farklı  $Re$  sayılarında farklı direnç katsayılarının elde edilmiş olması, “delik pürüzlülüğü” ile açıklanabilir. Zira, üflemez durumda pürüzsüz kare silindir için Reynolds sayısına bağlı olmayan direnç katsayısı; burada değişken üfleme katsayısı için ölçüm yapılan modelin delikli yüzeyinin üflemez duruma ait ölçümlerde de zorunlu olarak açık kalacak olması nedeniyle, deliklerden kaynaklanan bir pürüzlülüğe de bağlı olmaktadır. Diğer bir deyişle; yatay kare kesitli silindir için delik pürüzlülüğü  $Re$  sayısı ile artmakta ve direnç katsayısında da bir artış ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.12. Ön yüzeyden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi

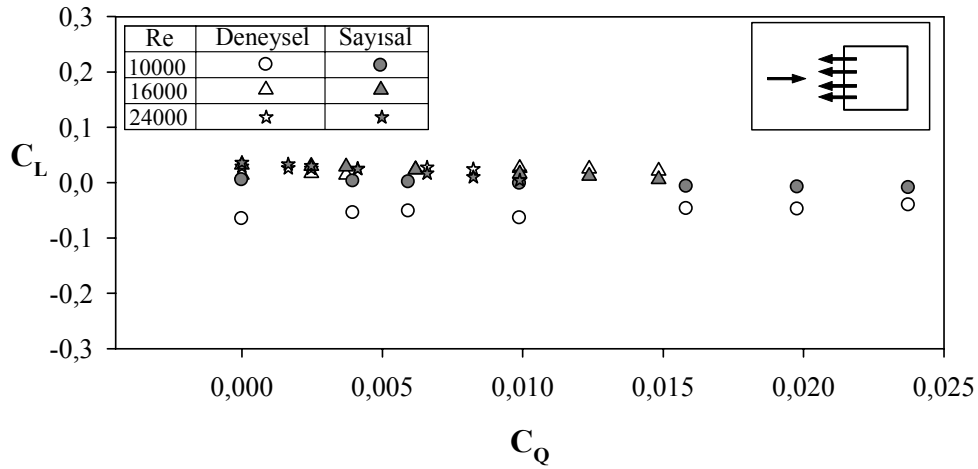


Şekil 3.13. Üst yüzeyden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi

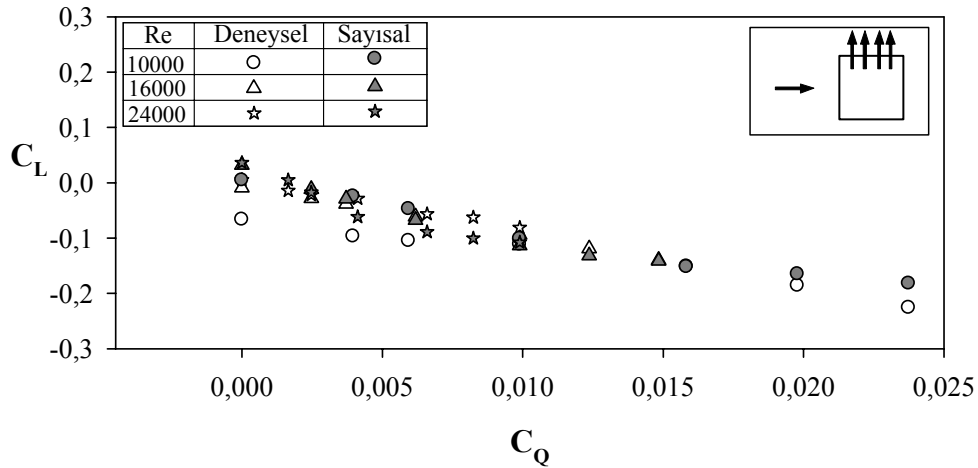


Şekil 3.14. Arka yüzeyden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi

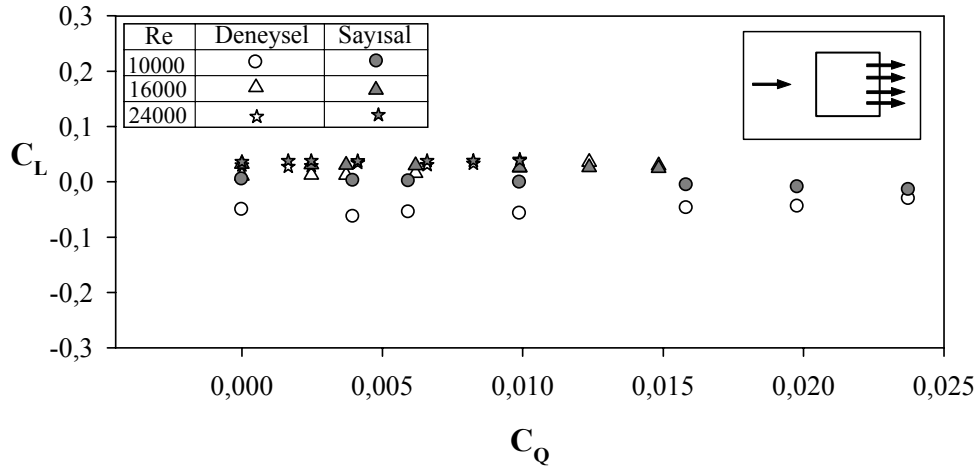
Kaldırma katsayısı değişim grafiklerinde de görüldüğü gibi, ön ve arka yüzeyden yapılan üflemenin akışın simetrisini bozmaması nedeniyle, üfleme katsayısının bu durumlar için kaldırma katsayısı üzerinde bir etkisi yoktur (Şekil 3.15 ve 3.17). Üst yüzeyden yapılan üfleme; modelin üst yüzeyindeki basınç dağılımını önemli ölçüde etkilediği için, hem deneysel hem de sayısal bulgular iyi bir uyum içerisinde kaldırma kuvveti katsayısının artan üfleme katsayısı ile düştüğünü göstermektedir (Şekil 3.16).



Şekil 3.15. Ön yüzeyden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi



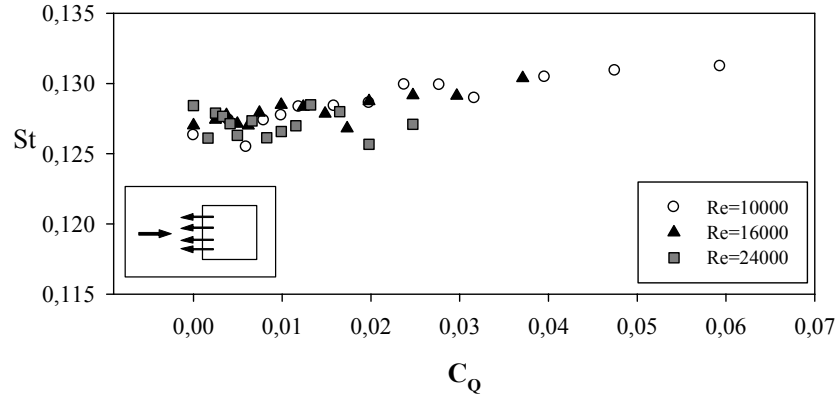
Şekil 3.16. Üst yüzeyden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi



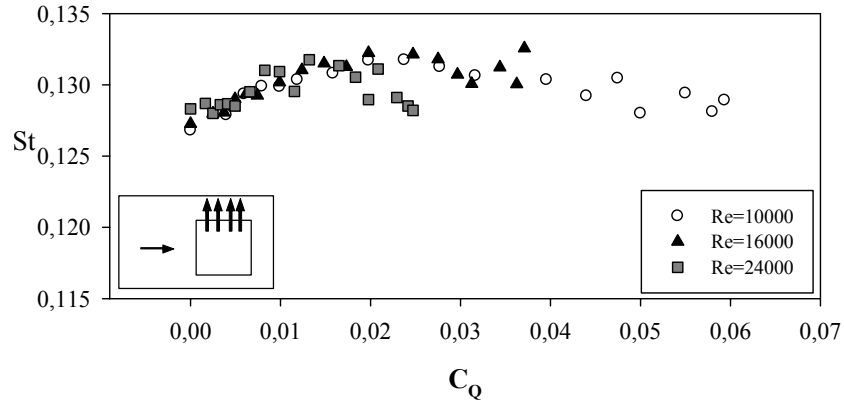
Şekil 3.17. Arka yüzeyden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi

Şekil 3.18’de de görüldüğü gibi; ön yüzeyden üfleme durumunda Strouhal sayısı düşük ve orta  $Re$  sayısı için üfleme katsayısı ile artış göstermekte, yüksek  $Re$  sayısı için üfleme katsayısından etkilenmemektedir. Üst yüzeyden yapılan üfleme durumunda ise  $Re=10000$  için  $C_Q=0,0277$ ,  $Re=16000$  için  $C_Q=0,0173$  ve  $Re=24000$  için  $C_Q=0,0115$  üfleme katsayısı değerlerine kadar artış gösteren Strouhal sayısı, bu değerden yüksek üfleme katsayılarında azalma göstermektedir (Şekil 3.19). Şekil 3.20’de arka yüzeyden yapılan üfleme durumunda orta ve yüksek  $Re$  sayılarında artan üfleme katsayısı ile birlikte  $St$  sayısının değişmediği, ancak  $Re=10000$  için artan üfleme katsayısı ile birlikte  $St$  sayısında önemli bir düşüşün olduğu görülmektedir. Bunun nedeni; düşük  $Re$  sayısında tünel serbest akış hızı ile arka yüzeyden üfleme hızı arasındaki fark artan üfleme hızı ile azalacağından, model arkasındaki girdap oluşma özellikleri de değişmekte ve bu nedenle yüksek üfleme katsayısı değerlerinde  $St$  sayısında düşüş ortaya çıkmaktadır.

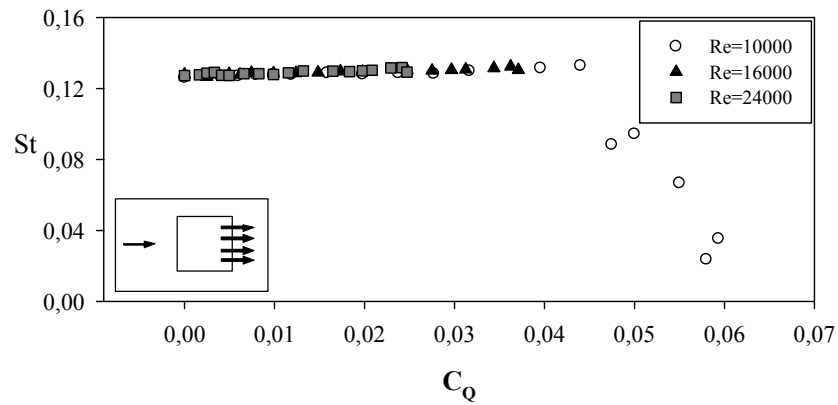




Şekil 3.18. Ön yüzeyden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi



Şekil 3.19. Üst yüzeyden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi

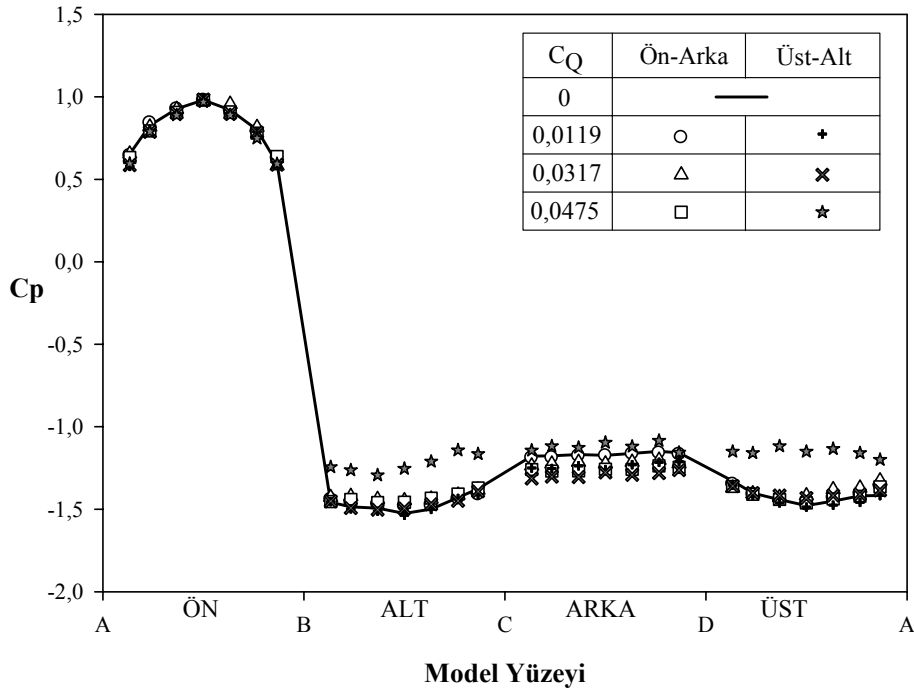


Şekil 3.20. Arka yüzeyden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi

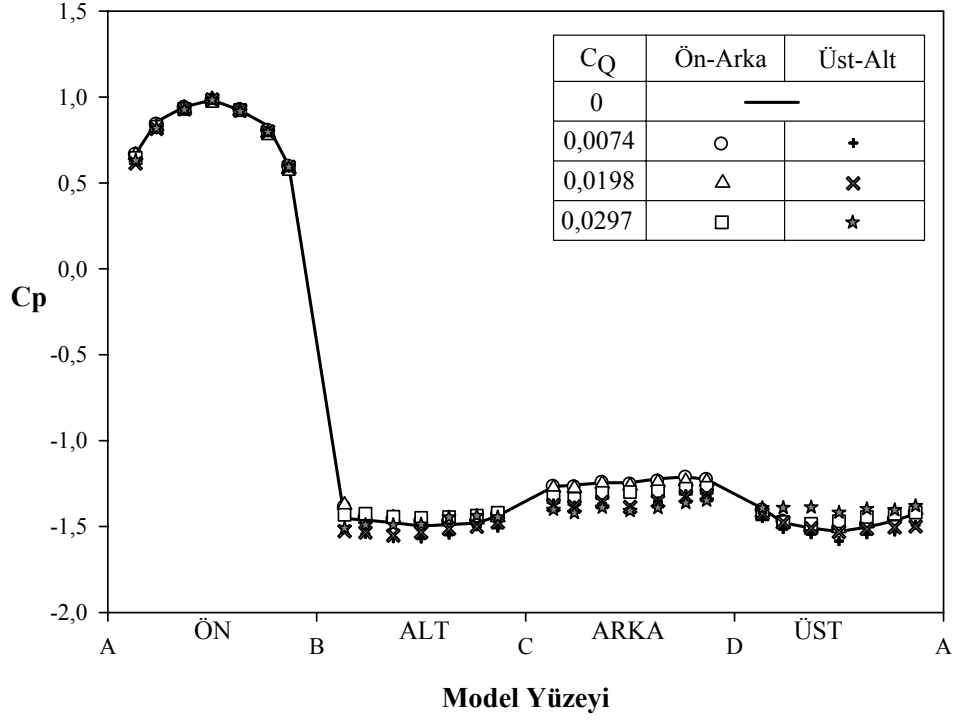
### 3.2.2. İki Yüzeyden Üfleme Durumu

İki yüzeyden yapılan üflemin etkisi modelin ön ve arka yüzeyinden aynı anda yapılan üfleme ile üst ve alt yüzeyinden aynı anda yapılan üfleme durumları için incelenmiştir. Ön ve arka yüzeyden aynı anda yapılan üflemede modelin ön yüzeyindeki basınç dağılımı, tek yüzeyden yapılan üfleme durumuna benzer şekilde üfleme katsayısı ve rüzgâr tüneli serbest akış hızından etkilenmemektedir. Ön ve arka yüzeylerden yapılan üfleme durumunda model yüzeylerindeki basınç katsayısı dağılımında belirgin bir değişiklik olmadığı görülmektedir (Şekil 3.21, 3.22, 3.23).

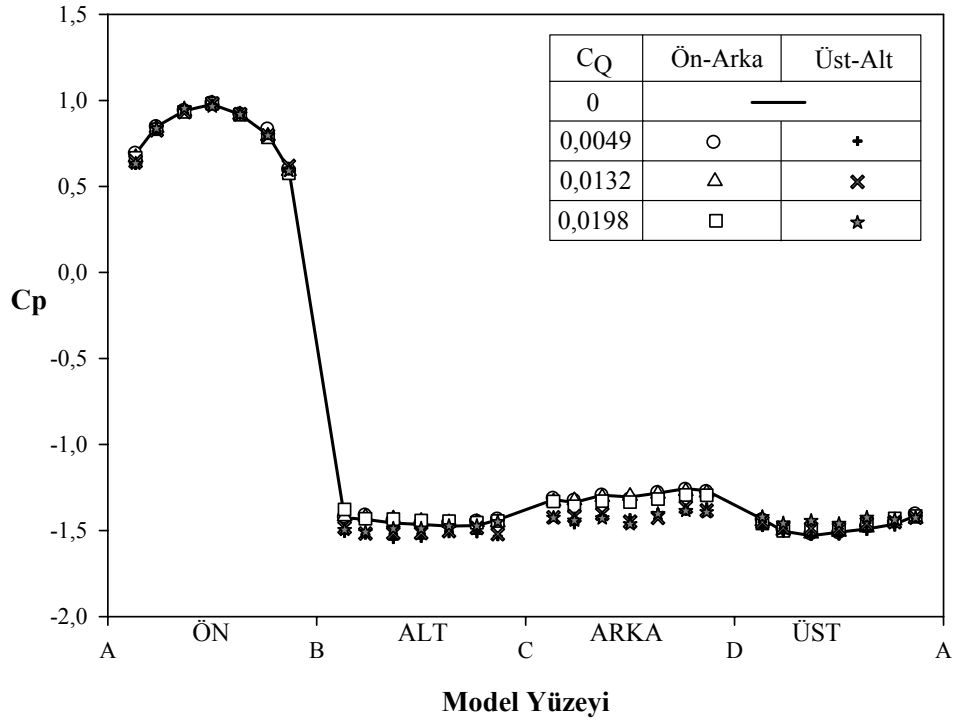
$Re=10000$  için üst ve alt yüzeylerden yapılan üfleme durumunda modelin üst ve alt yüzeylerinde basıncın üflemez duruma göre önemli düzeyde artmakta olduğu, yüksek  $Re$  sayısında ise üst ve alt yüzey basınçlarında önemli bir değişim olmayıp, sadece arka yüzey basıncında hafif bir düşme olduğu gözlenmektedir.



Şekil 3.21.  $Re=10000$  için iki yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri

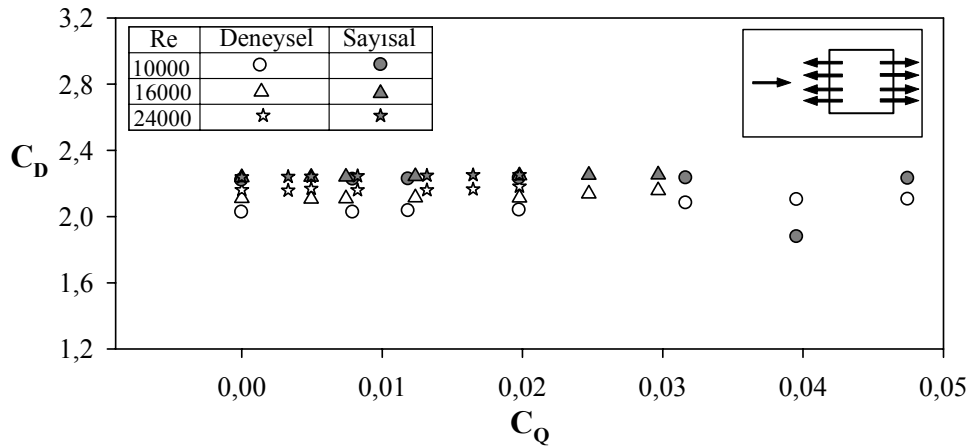


Şekil 3.22.  $Re=16000$  için iki yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri

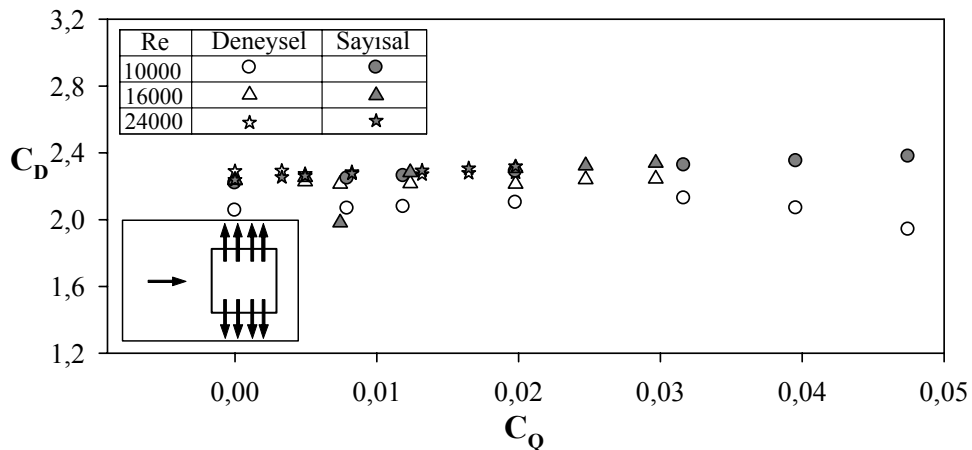


Şekil 3.23.  $Re=24000$  için iki yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri

Şekil 3.24'te ön ve arka yüzeyden yapılan üflemenin; basınç katsayısındaki değişmezliğe bağlı olarak direnç katsayısını da etkilemediği görülmektedir. Benzer şekilde üst ve alt yüzeylerden yapılan üfleme durumunda direnç katsayısında belirgin bir değişim gözlenmemektedir (Şekil 3.25). Ancak, üst ve alt yüzeylerden yapılan üfleme durumuna ilişkin sayısal sonuçlar, bütün Re sayılarında direnç katsayısının üfleme katsayısı ile hafif bir artma eğilimi içerisinde olduğunu göstermektedir.

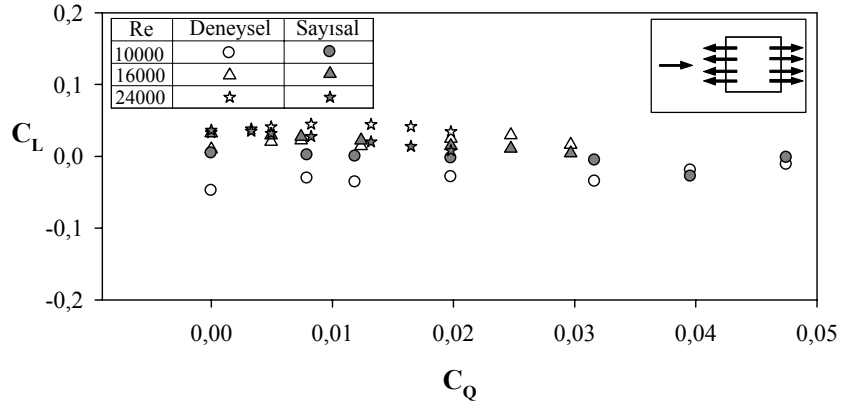


Şekil 3.24. Ön ve arka yüzeylerden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi

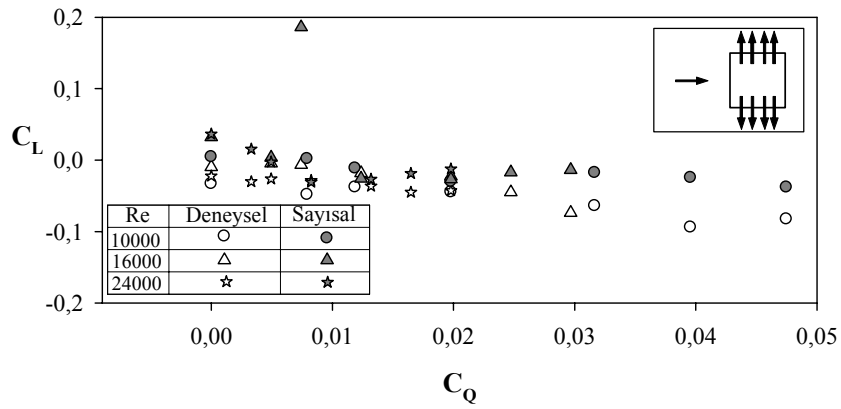


Şekil 3.25. Üst ve alt yüzeylerden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi

Orta ve yüksek Re sayılarında modelin ön ve arka yüzeyinden aynı anda yapılan üfleme, modelin üst ve alt yüzeylerindeki basınç dağılımlarını etkilemediği için buna bağlı olarak kaldırma kuvveti katsayısının da değişmediği, Şekil 3.26'da görülmektedir. Sadece düşük Re sayısında (10000) kaldırma katsayısı artan üfleme katsayısı ile hafif bir artma eğilimi göstermektedir. Üst ve alt yüzeylerden yapılan üfleme durumunda ise, bütün Re sayılarında artan üfleme katsayısı ile birlikte kaldırma katsayısında hafif bir düşme eğilimi görülmektedir (Şekil 3.27). Ön-arka ve üst-alt yüzeylerden yapılan üfleme uygulamaları modele göre simetrik uygulamalar olmasına rağmen, kaldırma katsayısında hafif bir değişimin ortaya çıkmış olması, modelin tam simetriyi sağlayacak şekilde konumlanmamasından ortaya çıkan hatadan kaynaklanmaktadır.

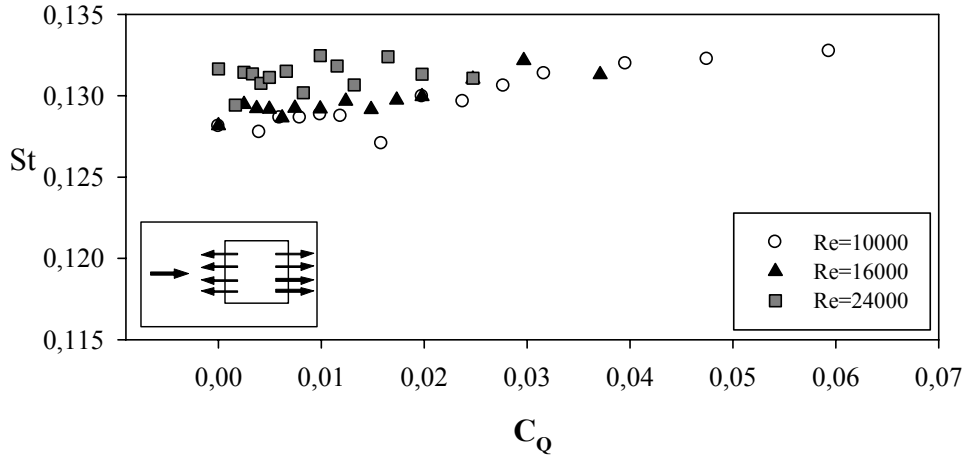


Şekil 3.26. Ön ve arka yüzeylerden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi

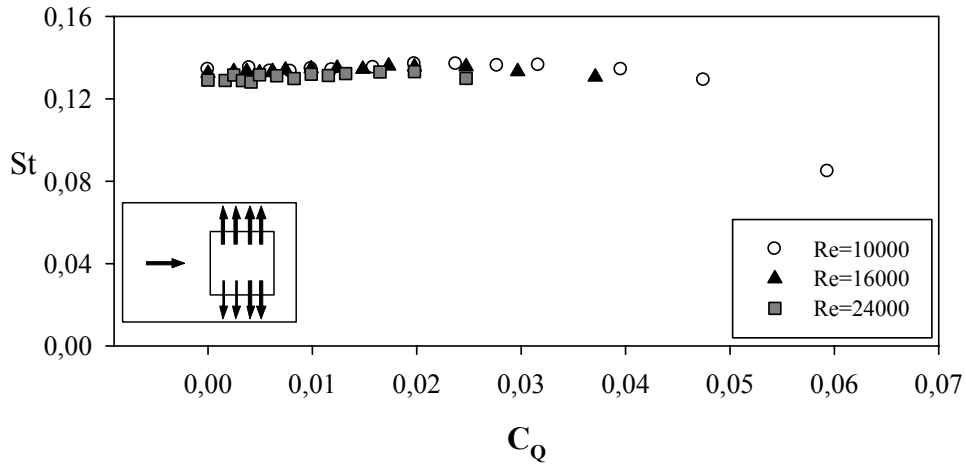


Şekil 3.27. Üst ve alt yüzeylerden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi

Ön ve arka yüzeylerden yapılan üflemede düşük ve orta Re sayılarında, artan üfleme katsayısı ile birlikte Strouhal sayısı da belirgin bir şekilde artmaktadır (Şekil 3.28).  $Re=24000$  değeri için olan artış diğer Reynolds sayısı değerlerine göre çok daha az olmaktadır. Şekil 3.29'da ise üst ve alt yüzeylerden yapılan üflemenin Strouhal sayısı üzerindeki etkisi görülmektedir. Her üç Reynolds sayısı için de artan üfleme katsayısı ile birlikte hafif düzeyde bir artış ve sonrasında azalma gözlenmektedir.  $Re=10000$  değeri için  $C_Q=0,0396$  üfleme katsayısı değerinden sonra Strouhal sayısında belirgin bir düşme ortaya çıkmaktadır.



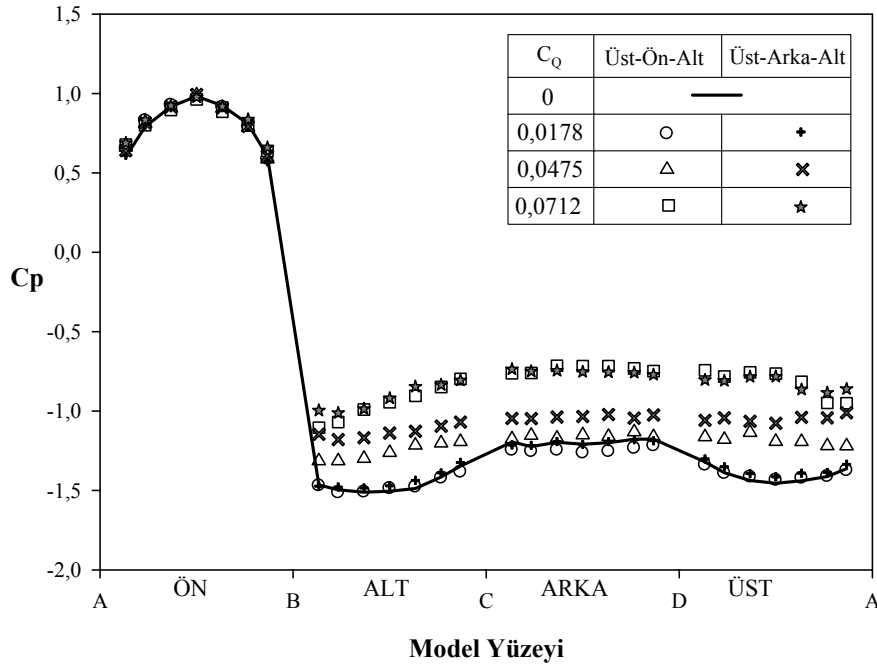
Şekil 3.28. Ön ve arka yüzeylerden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi



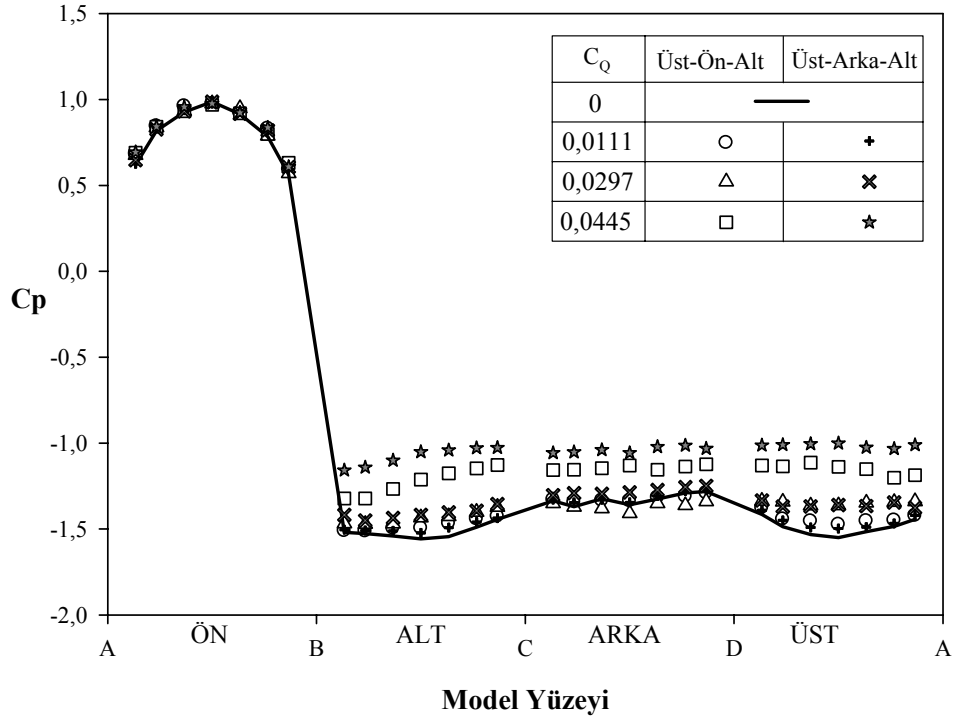
Şekil 3.29. Üst ve alt yüzeylerden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi

### 3.2.3. Üç Yüzeyden Üfleme Durumu

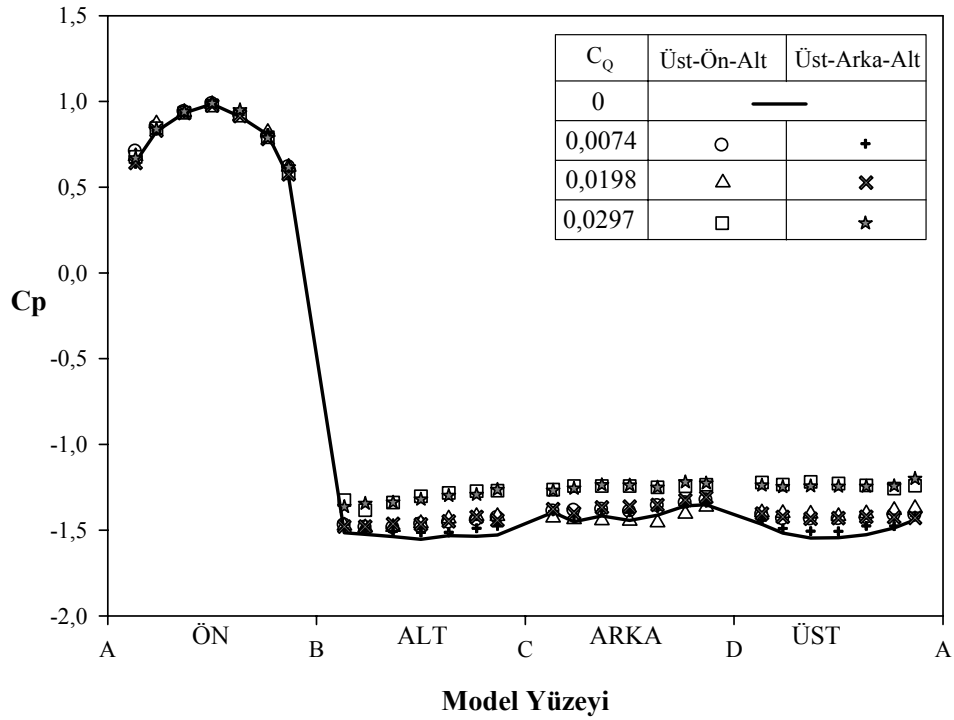
Üç yüzeyden üfleme, modelin eş zamanlı olarak üst, ön ve alt yüzeyleri ile üst, arka ve alt yüzeylerinden yapılan üfleme durumlarına ilişkin olarak yapılan çalışmaları kapsamaktadır. Üst-ön-alt ve üst-arka-alt yüzeylerden yapılan üfleme ile model yüzeylerinde ortaya çıkan basınç katsayısı dağılımları sırasıyla  $Re=10000$ ,  $16000$  ve  $24000$  değerleri için Şekil 3.30, 3.31 ve 3.32’de görülmektedir. Üst, ön ve alt yüzeyden aynı anda yapılan üfleme, düşük üfleme katsayısında modelin yüzeylerindeki basınç dağılımını etkilememektedir. Ancak Şekil 3.30’da da görüldüğü gibi  $Re=10000$  değerinde  $C_Q=0,0475$  için modelin üst ve alt yüzeylerinde simetrik olarak basınç değerlerinde belirgin bir artış gözlenmektedir. Benzer şekilde  $C_Q=0,0712$  değeri için modelin üst ve alt yüzeylerinin yanı sıra arka yüzeydeki basınçlarda da belirgin bir artış ortaya çıkmaktadır. Bu davranış  $Re=16000$  ve  $24000$  değerleri için yüksek üfleme katsayılarında da görülmektedir (Şekil 3.31 ve 3.32). Üst-arka-alt yüzeylerden yapılan üfleme durumunda ise artan üfleme katsayısı ile birlikte modelin üst, arka ve alt yüzeyindeki basınç değerlerinde önemli ölçüde artış ortaya çıkmaktadır. Bu artışın düzeyi artan rüzgâr tüneli serbest akış hız değeri ile birlikte azalmaktadır.



Şekil 3.30.  $Re=10000$  için üç yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri



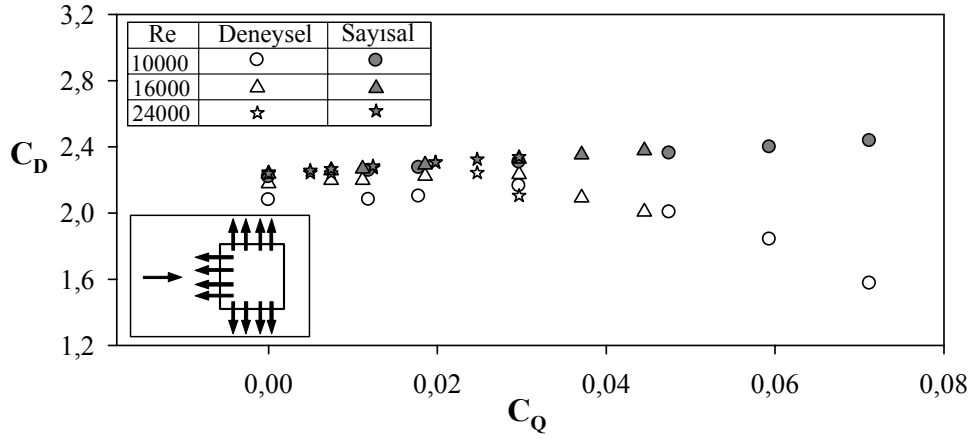
Şekil 3.31.  $Re=16000$  için üç yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri



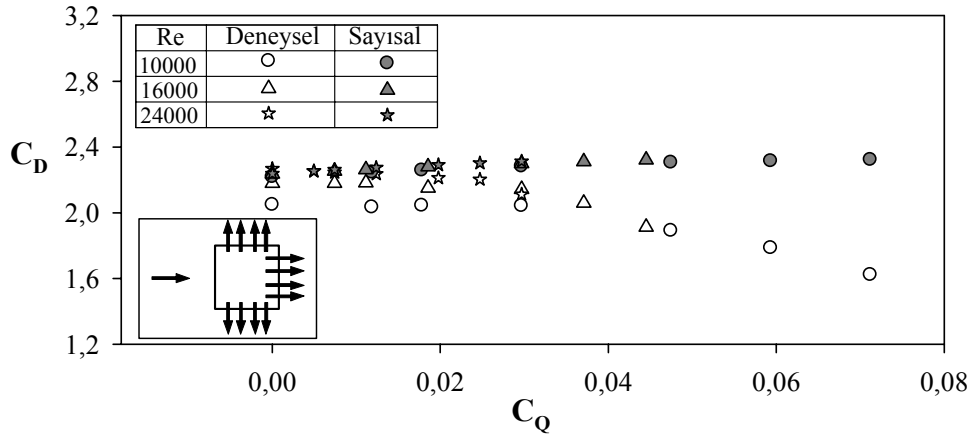
Şekil 3.32.  $Re=24000$  için üç yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri



Üst-ön-alt yüzeylerden yapılan üfleme durumunda artan üfleme katsayısı ile birlikte, her üç Reynolds sayısı için de, direnç katsayısı değerleri azalma eğilimi göstermektedir (Şekil 3.33). Şekil 3.34'te ise üst-arka-alt yüzeylerden yapılan üflemin direnç katsayısını belirgin bir şekilde azalttığı görülmektedir. Şekil 3.33 ve Şekil 3.34'te yer alan sayısal bulgular, yüksek  $C_Q$  değerlerinde deneysel bulgulardan sapma göstermiştir.

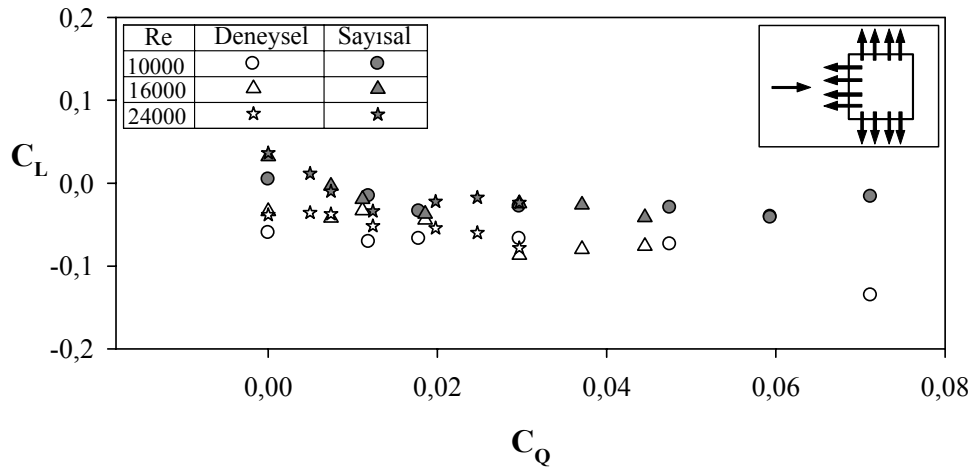


Şekil 3.33. Üst-ön-alt yüzeylerden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi

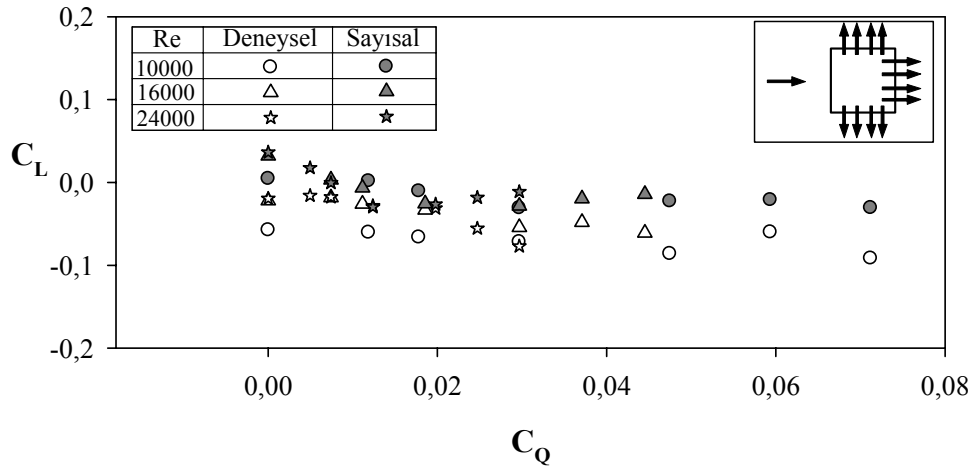


Şekil 3.34. Üst-arka-alt yüzeylerden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi

Şekil 3.35 ve 3.36’da, deneysel ve sayısal çalışma sonuçlarına göre elde edilmiş olan kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişim grafikleri görülmektedir. Burada da görüldüğü gibi beklentilere uygun olarak, her iki farklı üç yüzeyden yapılan üfleme uygulaması modele göre simetrik uygulamalar olduğundan, kaldırma katsayısında belirgin bir değişiklik ortaya çıkmamıştır.

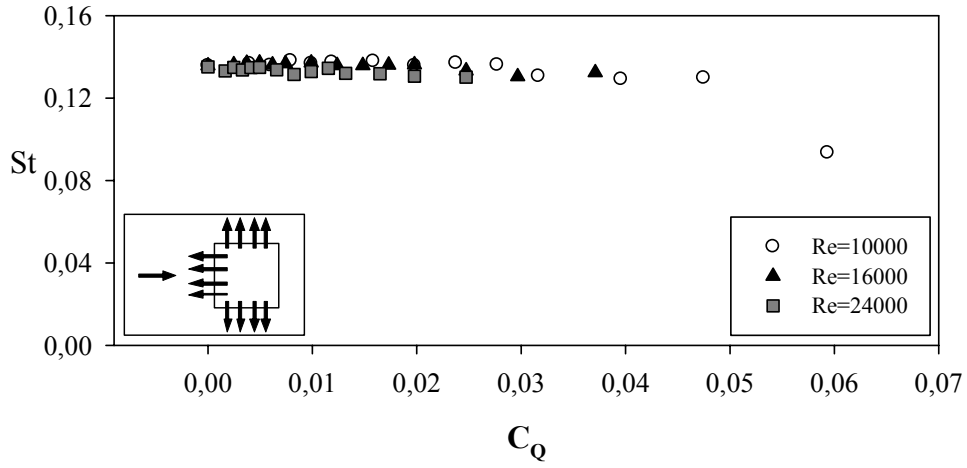


Şekil 3.35. Üst-ön-alt yüzeylerden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi

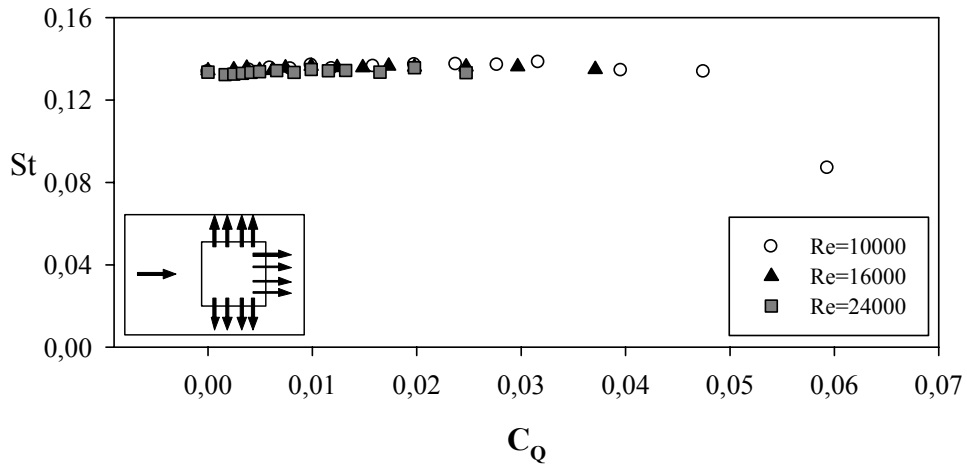


Şekil 3.36. Üst-arka-alt yüzeylerden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi

Üst-ön-alt yüzeylerden yapılan üfleme durumuna ilişkin olarak, artan üfleme katsayısı ile birlikte Strouhal sayısında hafif bir azalma olduğu, Şekil 3.37’de görülmektedir. Bu azalma eğilimi, özellikle  $Re=10000$  için  $C_Q=0,0396$  değerinden sonra daha da güçlenmektedir. Üst-arka-alt yüzeylerden yapılan üfleme durumunda ise, üfleme katsayısında belirli bir düzeye kadar olan artış Strouhal sayısı değerleri üzerinde belirgin bir değişime yol açmamakta, ancak  $Re=10000$  değeri için yüksek üfleme katsayılarında diğer üç yüzey konfigürasyonuna benzer şekilde Strouhal sayısında belirgin bir düşüş ortaya çıkmaktadır (Şekil 3.38).



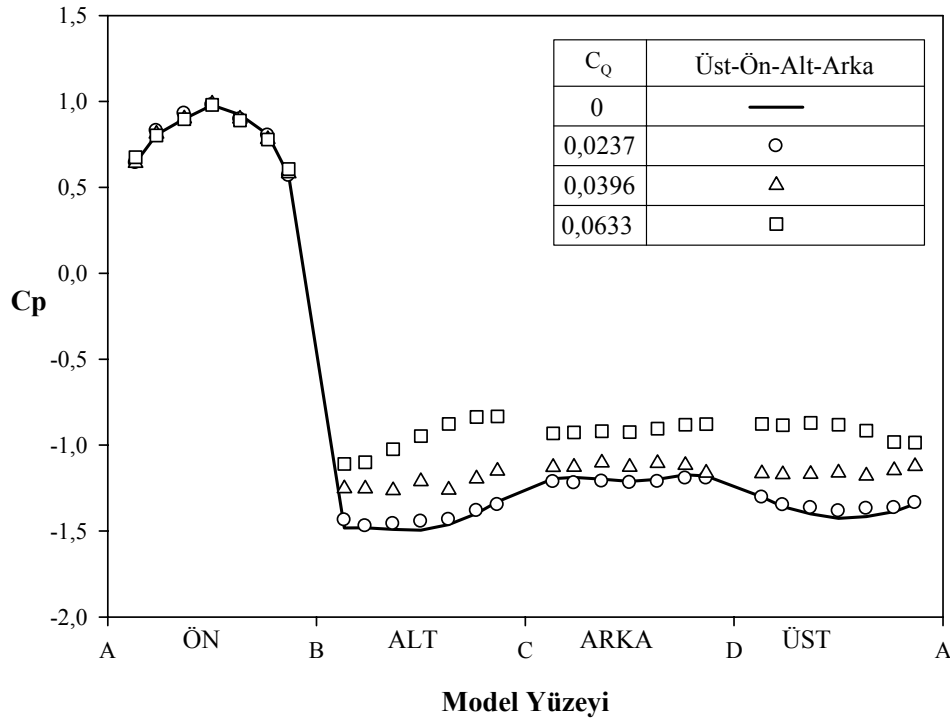
Şekil 3.37. Üst-ön-alt yüzeylerden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi



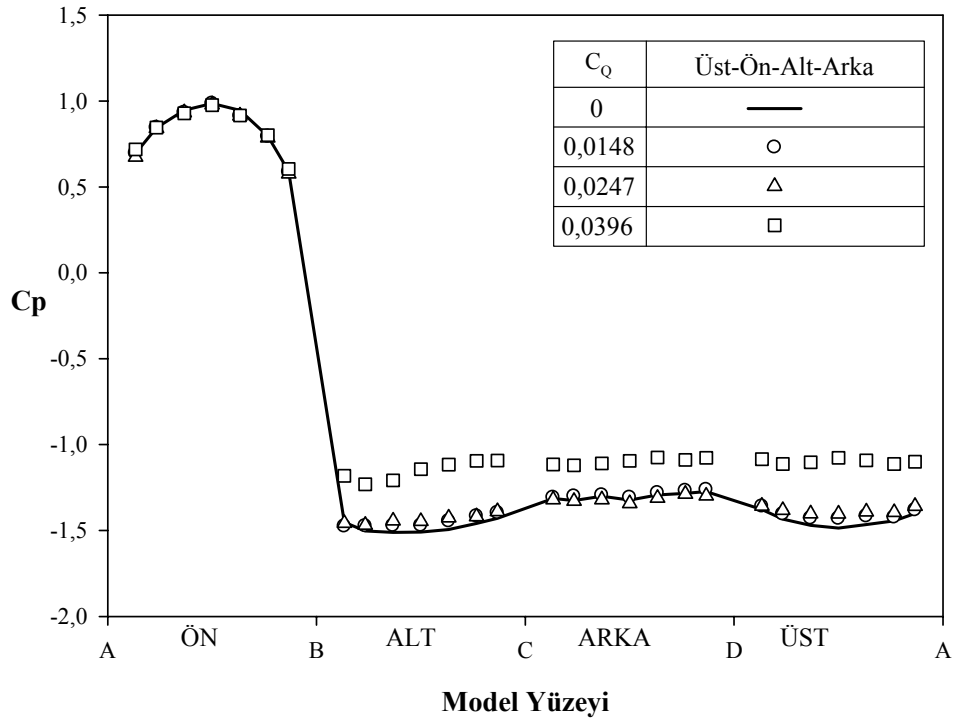
Şekil 3.38. Üst-arka-alt yüzeylerden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi

### 3.2.4. Bütün Yüzeylerden Üfleme Durumu

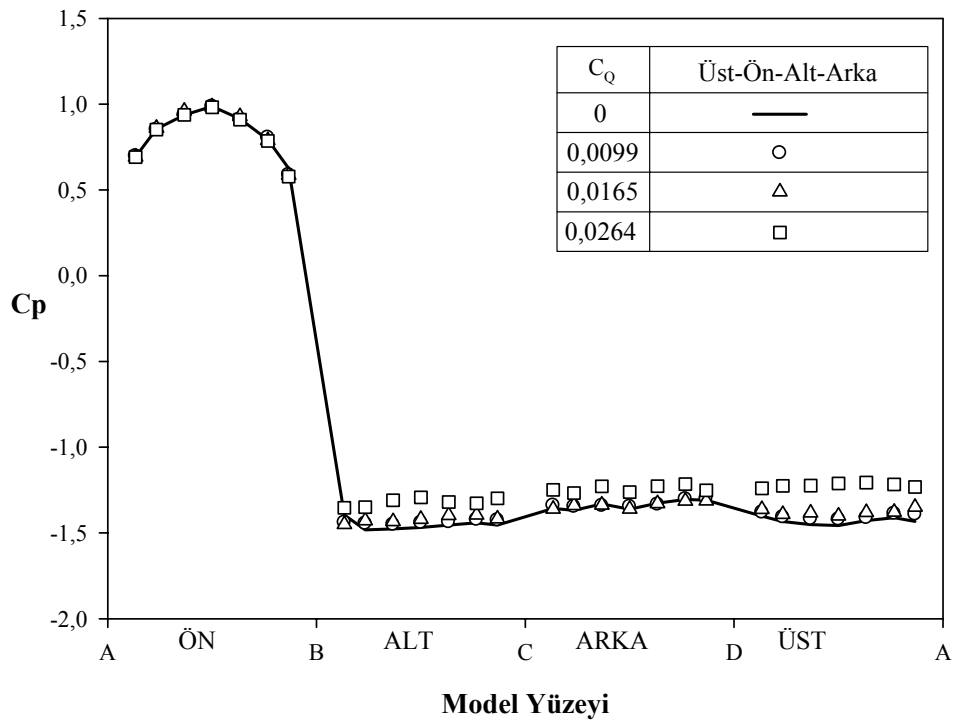
Kare kesitli silindirin dört yüzeyinden birden yapılan üflemede modelin ön yüzeyindeki basınç dağılımı; tek, iki ve üç yüzeyden yapılan üfleme durumlarına benzer şekilde, üfleme katsayısı ve rüzgâr tüneli serbest akış hız değerinden etkilenmemektedir. Her üç Reynolds sayısı için de elde edilen sonuçlardan düşük üfleme katsayısı değerlerinde kare kesitli modelin yüzeylerindeki basınç değerlerinde belirgin bir değişim olmadığı görülmektedir. Bütün Reynolds sayılarında ve yüksek üfleme katsayılarında üst ve alt yüzeylerin yanı sıra arka yüzeydeki basınçta da düşme olduğu görülmektedir (Şekil 3.39, 3.40 ve 3.41). Üç yüzeyden üfleme uygulamasına benzer şekilde, artan serbest akış hız değeri ile birlikte üfleme uygulamasının basınç dağılımı üzerindeki etkinliği azalmaktadır.



Şekil 3.39.  $Re=10000$  için bütün yüzeylerden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri

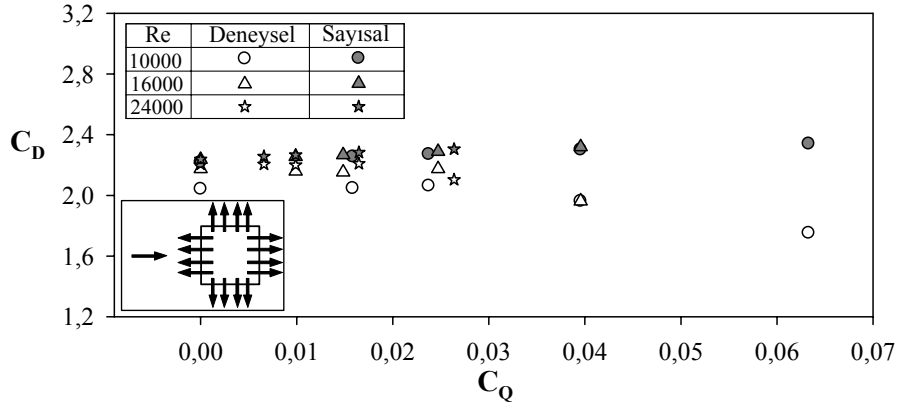


Şekil 3.40.  $Re=16000$  için bütün yüzeylerden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri



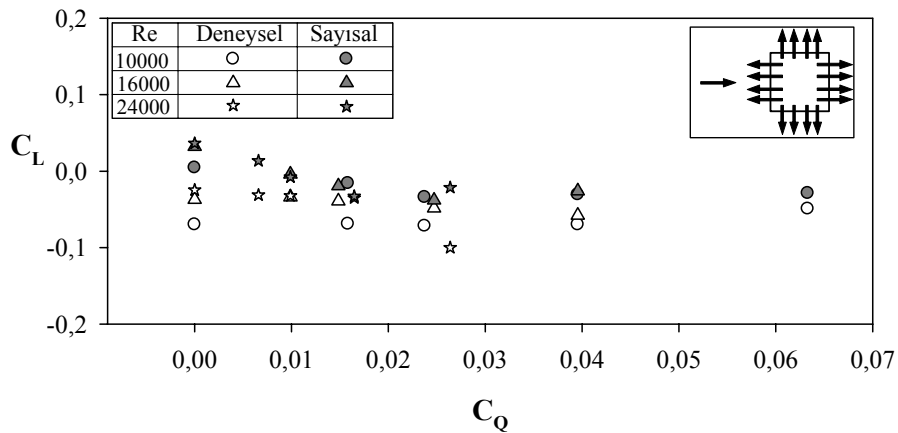
Şekil 3.41.  $Re=24000$  için bütün yüzeylerden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri

Modelin bütün yüzeylerinden yapılan üfleme durumunda artan üfleme katsayısı ile birlikte deneysel direnç katsayısı değerleri hafifçe azalırken, sayısal direnç katsayısı değerleri ise bunun tersine hafifçe artmaktadır (Şekil 3.42). Bütün yüzeylerden yapılan üfleme uygulaması ön ve arka yüzeyler arasındaki toplam basınç farkını azalttığından, direnç katsayısında düşme olması doğal bir sonuçtur.



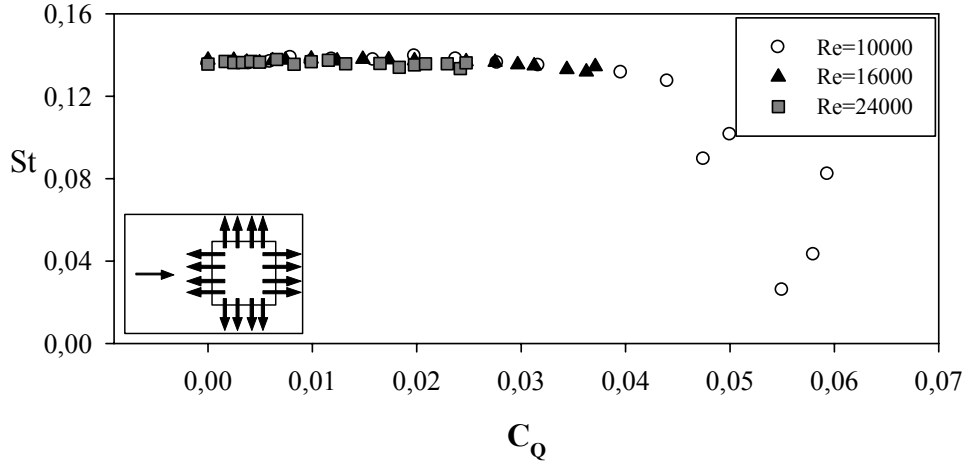
Şekil 3.42. Bütün yüzeylerden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi

Kaldırma kuvveti katsayısının üfleme katsayısı ile değişimini gösteren Şekil 3.43'te, sayısal ve deneysel çalışma sonucunda elde edilen bulguların birbirleri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.43. Bütün yüzeylerden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi

Bütün yüzeylerden üfleme durumunda artan üfleme katsayısı ile birlikte Strouhal sayısı değişimi Şekil 3.44'te görülmektedir. Artan üfleme katsayısı ile birlikte Strouhal sayısı orta ve yüksek Re sayılarında değişmezken, düşük Re sayısında yüksek üfleme katsayılarında St sayısında belirgin bir düşme ortaya çıkmaktadır.

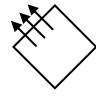
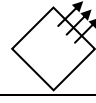





Şekil 3.44. Bütün yüzeylerden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi

### 3.3. Diyagonal Kare Kesitli Silindir Yüzeylerinden Yapılan Üflemenin Etkisi

45°'lik açı ile (diyagonal şekilde) akış alanı içerisine yerleştirilmiş olan kare kesitli silindirin bir, iki ve dört yüzeyinden yapılan üflemenin etkisi sadece deneysel olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmada kullanılan bilgisayar programının sadece yatay kare silindir için çözüm üretecek yapıda olması nedeniyle diyagonal kare silindir için sadece deneysel bulgular elde edilmiştir. Diyagonal model için yapılan çalışmalarda ele alınan konfigürasyonlar ve üfleme katsayıları Tablo 3.2'de topluca görülmektedir.

Tablo 3.2. Diyagonal model için yapılan basınç ölçümlerine ait  $C_Q$  üfleme katsayısı değerleri

	Re=10000						Re=16000						Re=24000								
	0	0,0040	0,0059	0,0099	0,0158	0,0198	0,0237	0	0,0025	0,0037	0,0062	0,0099	0,0124	0,0148	0	0,0016	0,0025	0,0041	0,0066	0,0082	0,0099
	0	0,0079	0,0119	0,0198	0,0317	0,0396	0,0475	0	0,0049	0,0074	0,0124	0,0198	0,0247	0,0297	0	0,0033	0,0049	0,0082	0,0132	0,0165	0,0198
	0	0,0158	0,0237	0,0396	0,0633	0,0791	0,0950	0	0,0099	0,0148	0,0247	0,0396	0,0495	0,0593	0	0,0066	0,0099	0,0165	0,0264	0,0330	0,0396
	0	0,0079	0,0119	0,0198	0,0317	0,0396	0,0475	0	0,0049	0,0074	0,0124	0,0198	0,0247	0,0297	0	0,0033	0,0049	0,0082	0,0132	0,0165	0,0198
	0	0,0158	0,0237	0,0396	0,0633	0,0791	0,0950	0	0,0099	0,0148	0,0247	0,0396	0,0495	0,0593	0	0,0066	0,0099	0,0165	0,0264	0,0330	0,0396

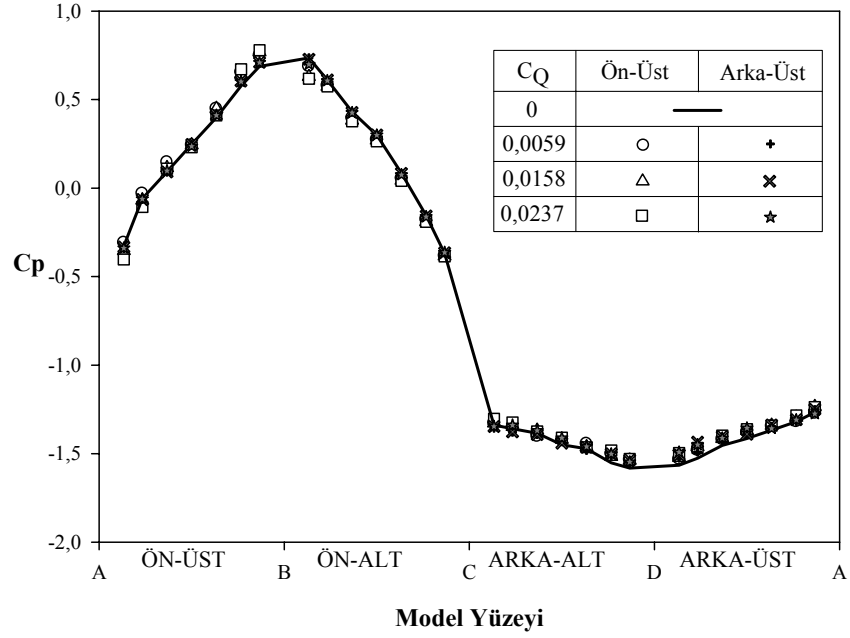
Diyagonal model için elde edilen sonuçların yatay model için elde edilen sonuçlardan en belirgin farklılığı; diyagonal durumda yapılan üflemin modelin ön yüzeyindeki basınç dağılımını da etkilemesidir. Ön yüzeylerden yapılan üfleme, basınç değerlerini üflemin mertebesine göre belirli oranda etkilemektedir. Diyagonal durumdaki modelin ön köşesindeki basınç katsayısı değeri, bu noktada ölçme prizinin olmayışı nedeniyle ölçülememiştir. Ancak ön köşenin alt ve üst yüzeylerindeki basınç değişimleri izlendiğinde ön köşede basınç katsayısının 1 değerini alacağı kestirilebilir.

### 3.3.1. Tek Yüzeyden Üfleme Durumu

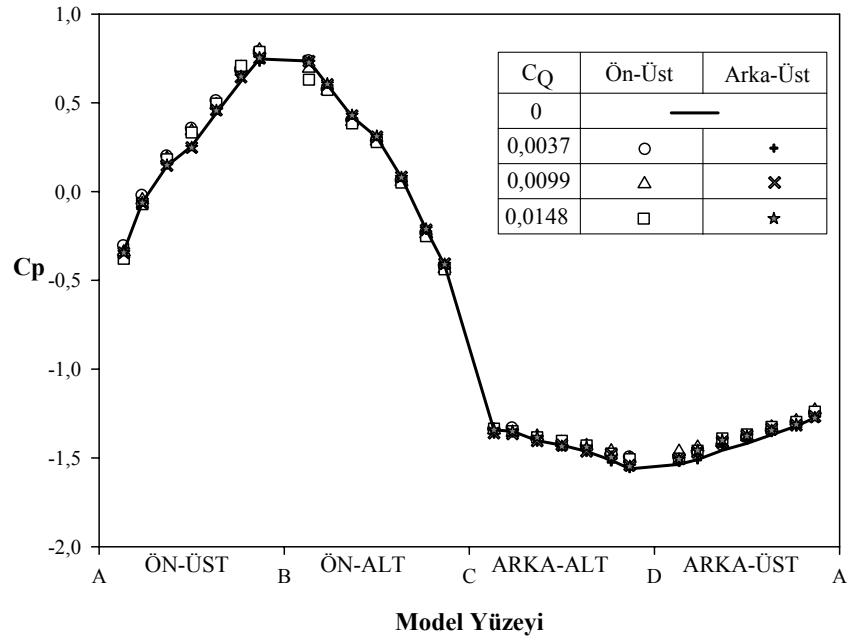
Akış alanı içerisinde diyagonal konumda duran kare kesitli modelin ön-üst ve arka-üst yüzeylerinden yapılan üflemin basınç dağılımları üzerindeki etkisi, farklı Reynolds sayısı değerleri için Şekil 3.45, 3.46 ve 3.47'de görülmektedir. Ön-üst yüzeyden yapılan üfleme durumunda artan üfleme katsayısı ile birlikte arka-alt ve arka-üst yüzeylerdeki basınç değerleri çok az da olsa bir miktar artmaktadır. Bunun yanı sıra üfleme yapılan ön-üst yüzeyin B köşesi yakınında artan üfleme katsayısı ile basınç katsayısı değerinde artış gözlenirken, ön-alt bölgenin B köşesine yakın kısmında basınç katsayısında düşme olduğu gözlenmektedir (Şekil 3.45). Arka-üst yüzeyden yapılan üfleme durumunda modelin ön-üst ve ön-alt yüzeylerindeki basınç dağılımlarında belirgin bir değişiklik olmadığı



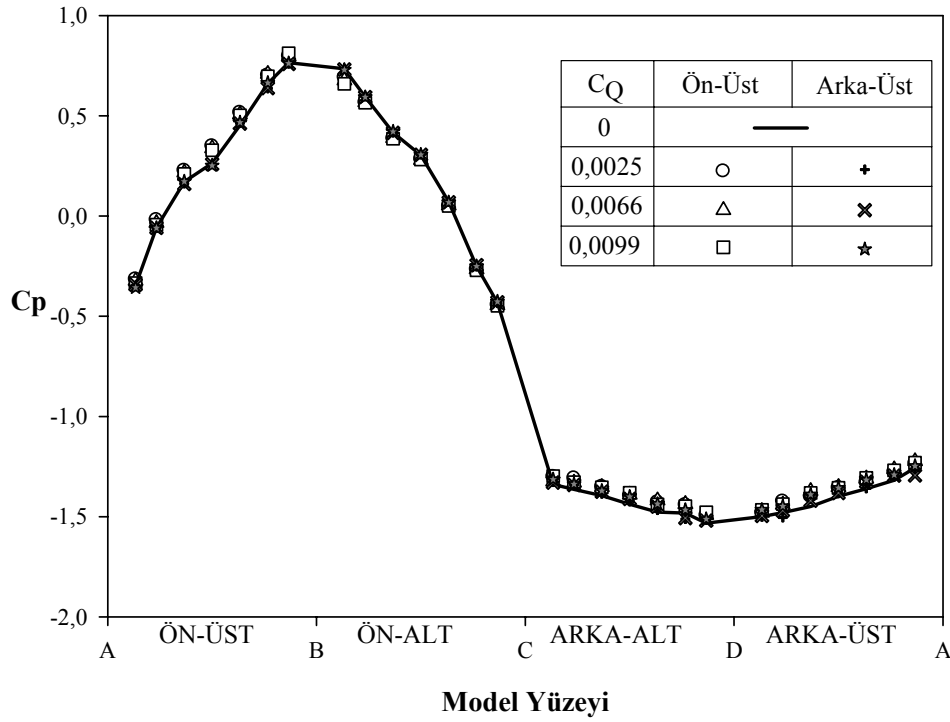
gözlenmiştir. Ancak arka-üst ve arka-alt yüzelerde ve özellikle bu iki yüzeyin kesişme noktası olan D noktası civarında basınç katsayısı üfleme etkisi ile hafifçe artmaktadır.



Şekil 3.45.  $Re=10000$  için tek yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri



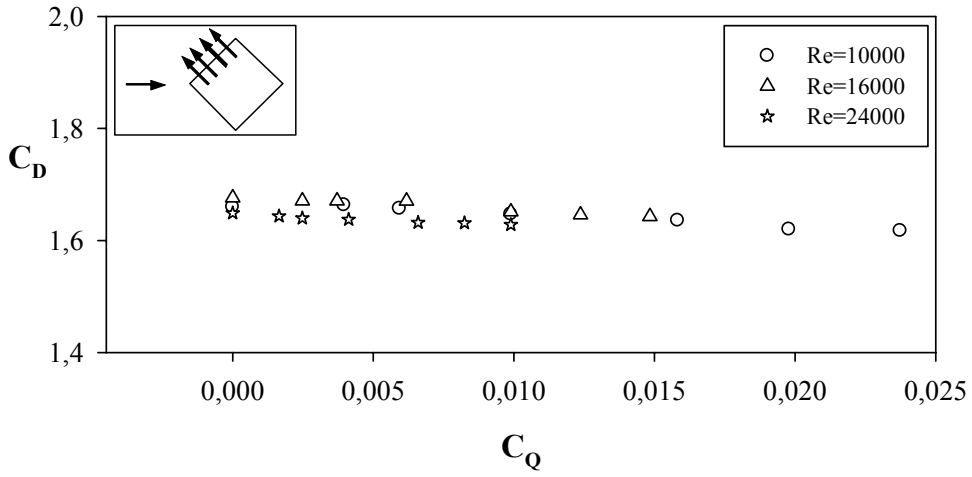
Şekil 3.46.  $Re=16000$  için tek yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri



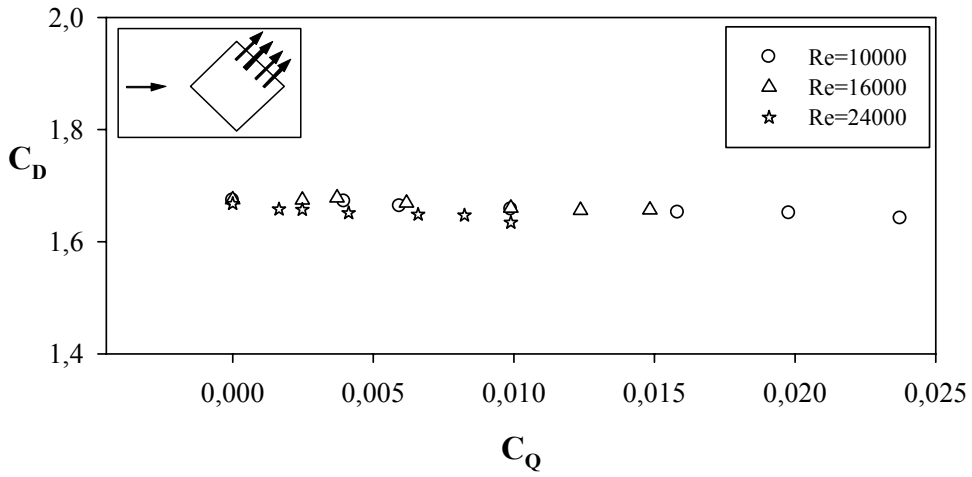
Şekil 3.47.  $Re=24000$  için tek yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri

$45^\circ$ lik açı ile akış alanı içerisinde yer alan diyagonal model için direnç ve kaldırma katsayısı değerleri hesaplanırken, yatay durumdaki modelden farklı olarak her bir yüzeydeki basınç katsayısı dağılımı göz önüne alınmaktadır. Direnç ve kaldırma katsayıları, ilgili bileşen yönündeki basınç kuvvetlerinden yararlanılarak (2.6), (2.7) bağıntılarından hesaplanmıştır.

Ön-üst yüzeyden yapılan üflemede, Şekil 3.48'de de görüldüğü üzere, artan üfleme katsayısı ile birlikte direnç katsayısında azalma olmaktadır. Ön-üst, arka-üst ve arka-alt yüzeylerde artan üfleme katsayısı ile ortaya çıkan hafif basınç artışı ve ön-alt yüzeyde ortaya çıkan hafif basınç düşüşü ve dolayısıyla sonuçta ön ve arka yüzeyler arasındaki toplam basınç farkı azalması bu sonucu doğurmaktadır. Aynı nedenlerden dolayı arka-üst yüzeyden yapılan üfleme durumunda da artan üfleme katsayısı ile birlikte direnç katsayısı değerleri azalmaktadır (Şekil 3.49).

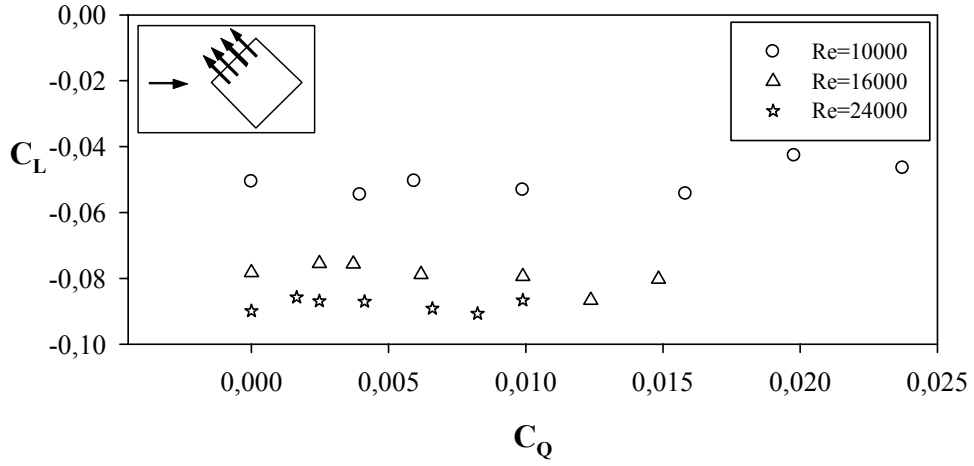


Şekil 3.48. Ön-üst yüzeyden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi

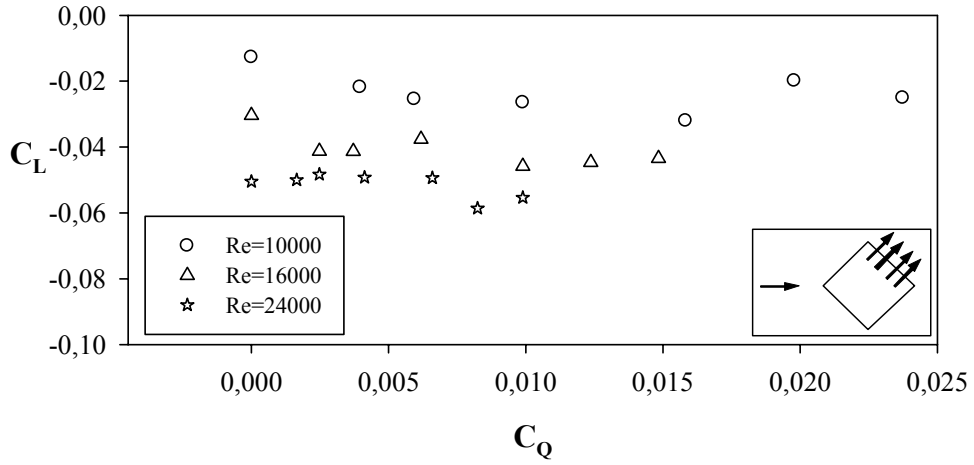


Şekil 3.49. Arka-üst yüzeyden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi

Artan üfleme katsayısı ile birlikte ön-üst yüzeyden yapılan üfleme durumunda kaldırma katsayısında belirgin bir değişiklik gözlenemez iken, arka-üst yüzeyden yapılan üfleme durumunda her üç Reynolds sayısı değeri için de kaldırma katsayısında azalma olduğu görülmektedir. Bu duruma ilişkin grafikler Şekil 3.50 ve 3.51’de görülmektedir. Üfleme katsayısı ile olan değişimler kaldırma katsayısının davranışı hakkında fikir vermektedir.

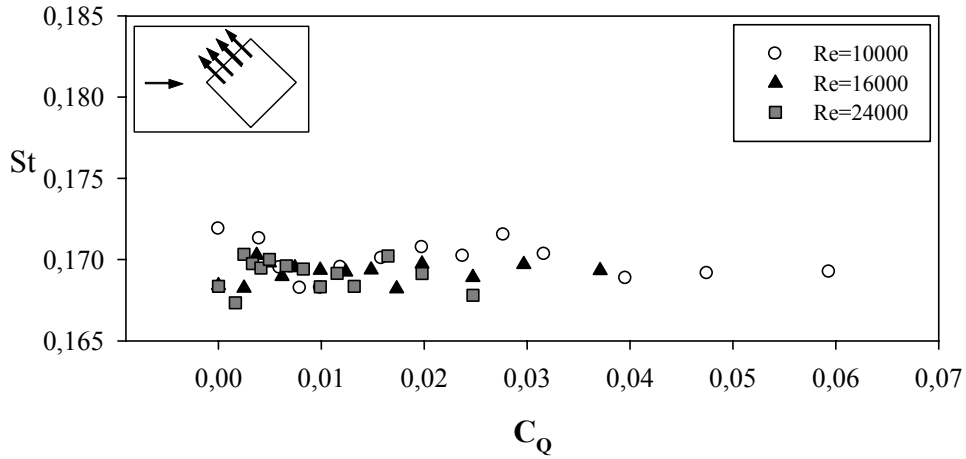


Şekil 3.50. Ön-üst yüzeyden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi

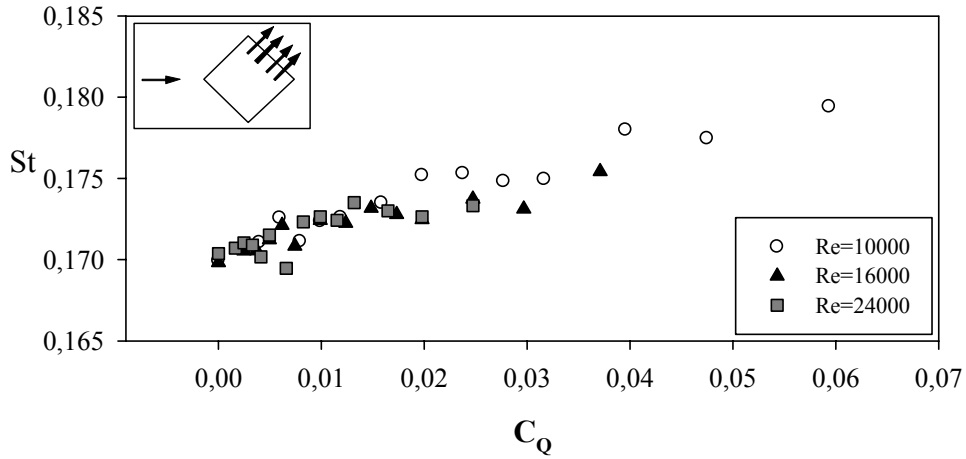


Şekil 3.51. Arka-üst yüzeyden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi

Şekil 3.52 ve 3.53'te, diyagonal durumda bir yüzeyden üfleme durumuna ilişkin üfleme katsayısı ile Strouhal sayısı değişimleri görülmektedir. Ön-üst yüzeyden yapılan üfleme durumunda artan üfleme katsayısı değeri ile birlikte Strouhal sayısında belirgin bir değişim olmadığı görülmektedir (Şekil 3.52). Bununla birlikte arka-üst yüzeyden yapılan üfleme durumunda bir önceki durumdan farklı olarak artan üfleme katsayısı ile birlikte Strouhal sayısında her üç Reynolds sayısı için de belirgin bir artış olduğu gözlenmektedir (Şekil 3.53).



Şekil 3.52. Ön-üst yüzeyden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi

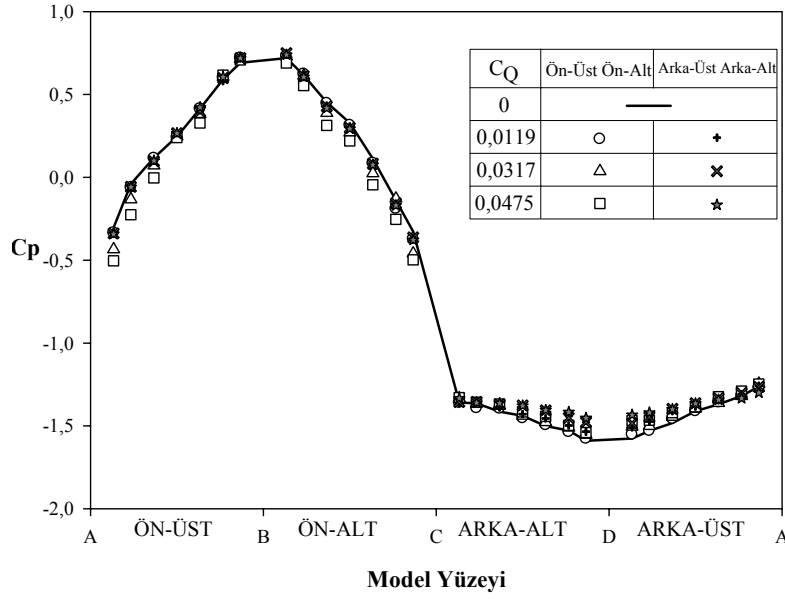


Şekil 3.53. Arka-üst yüzeyden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi

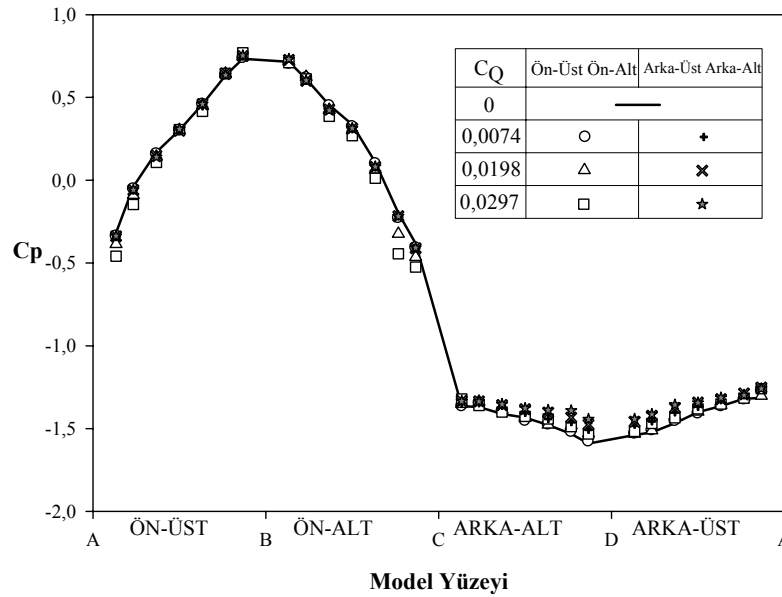
### 3.3.2. İki Yüzeyden Üfleme Durumu

Modelin ön-üst ve ön-alt yüzeylerinden aynı anda yapılan üflemede, üfleme yapılan yüzeyler daha belirgin olmak üzere modelin ön ve arka yüzeyleri üflemeden etkilenmektedir. Ön-üst ve ön-alt yüzeylerde ortaya çıkan basınç dağılımları, üflemede duruma göre üfleme miktarına bağlı olarak farklılık göstermekte ve basınç değerleri belirgin bir düzeyde azalmaktadır. Arka-üst ve arka-alt yüzeylerden yapılan üfleme durumunda, basınç değerleri artan üfleme katsayısı ile artmaktadır. Arka-üst ve arka-alt

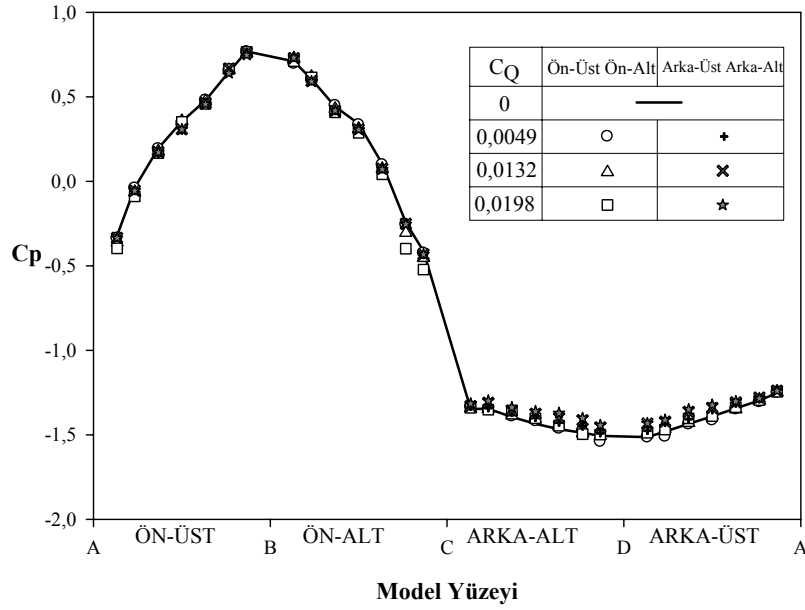
yüzeylerden aynı anda yapılan üflemede ise modelin ön yüzündeki basınç katsayısı dağılımı bu uygulamadan etkilenmezken, arka yüzlerdeki basınç katsayısı değerleri arka köşe olan D noktası civarında daha belirgin olmak üzere artmaktadır (Şekil 3.54, 3.55, 3.56).



Şekil 3.54.  $Re=10000$  için iki yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri

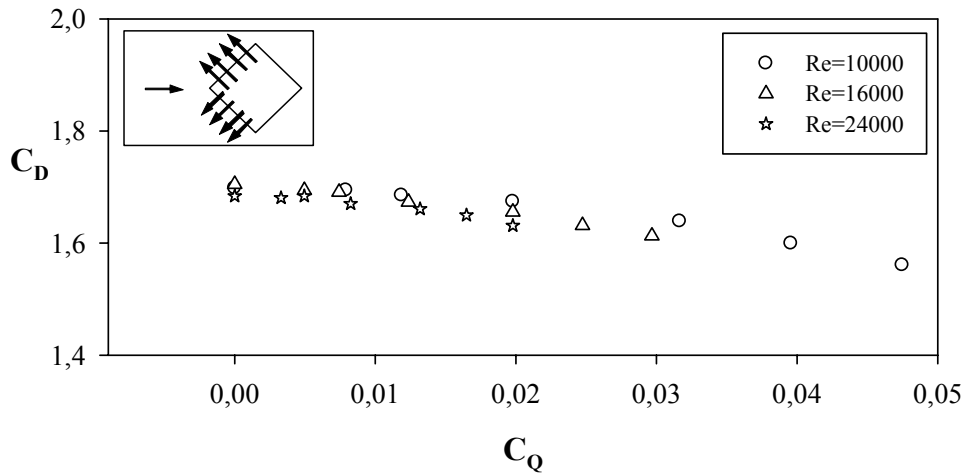


Şekil 3.55.  $Re=16000$  için iki yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri

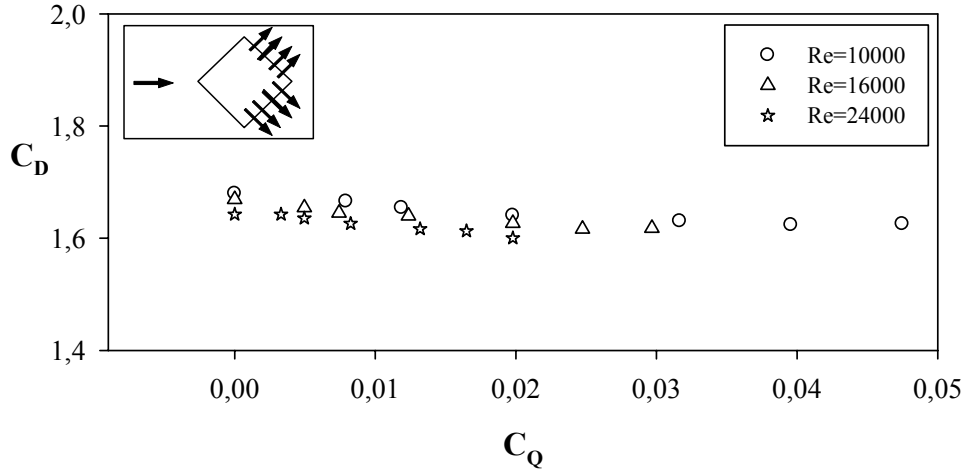


Şekil 3.56.  $Re=24000$  için iki yüzeyden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri

Şekil 3.57'de görülen direnç katsayısı değişimleri; ön-üst ve ön-alt yüzeylerden eş zamanlı yapılan üflemede, artan üfleme katsayısı ile birlikte direnç katsayısının düşmekte olduğunu göstermektedir. Diyagonal durumda modelin ön yüzeyleri ve arka yüzeyleri arasındaki toplam basınç farkının azalması da bu davranışı desteklemektedir. Şekil 3.58'de de, arka-üst ve arka-alt yüzeylerden yapılan üfleminin aynı nedenle direnç katsayısını düşürdüğü görülmektedir.

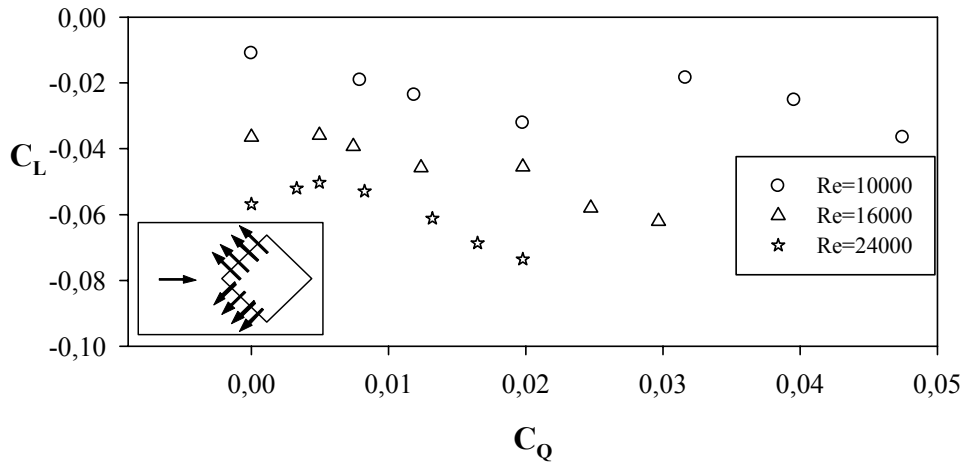


Şekil 3.57. Ön-üst ve ön-alt yüzeylerden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi



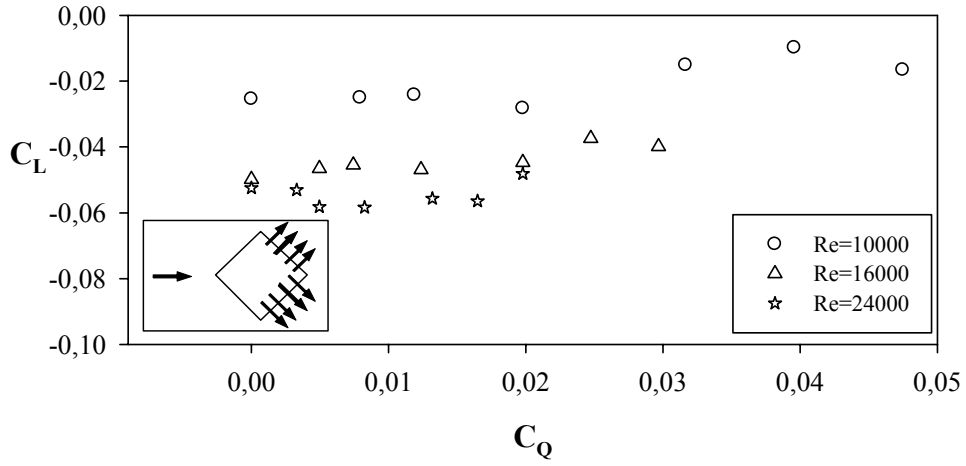
Şekil 3.58. Arka-üst ve arka-alt yüzeylerden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi

Şekil 3.59 ve 3.60'ta kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile olan değişim grafikleri görülmektedir. Burada görüldüğü gibi her iki farklı iki yüzeyden üfleme uygulaması; akışa göre simetrik uygulamalar olduğundan sıfır civarında değerler alması gereken kaldırma katsayısı, beklentilere uygun olmayan bir şekilde artan üfleme katsayısı ile artma ya da azalma eğilimi göstermektedir.



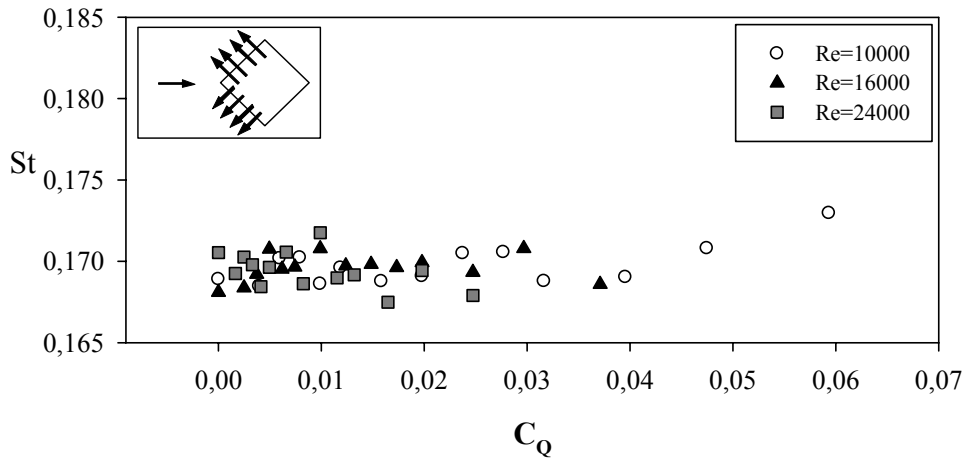
Şekil 3.59. Ön-üst ve ön-alt yüzeylerden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi



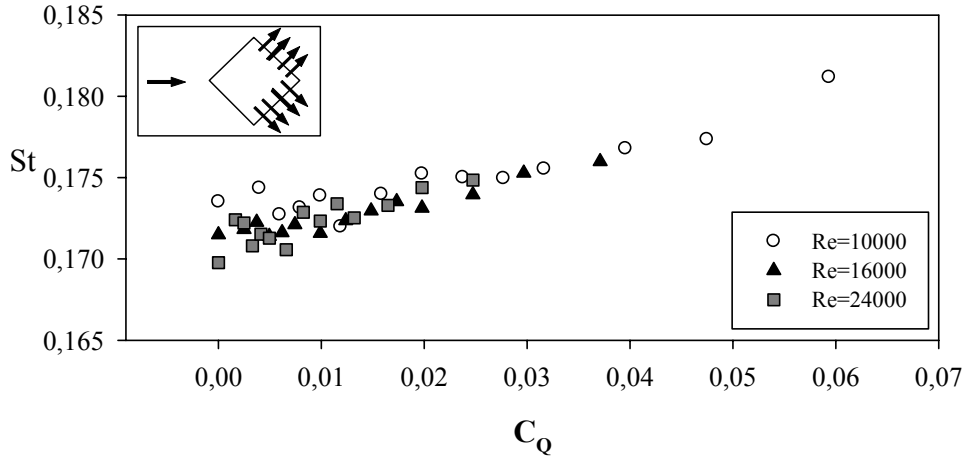


Şekil 3.60. Arka-üst ve arka-alt yüzeylerden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi

Ön-üst ve ön-alt yüzeylerden yapılan üflemede Strouhal sayısı değerlerinin artan üfleme katsayısı değeriyle birlikte belirgin bir değişim göstermediği, Şekil 3.61'de görülmektedir. Ancak sadece  $Re=10000$  değeri için  $C_Q=0,0396$  değerinden sonra Strouhal sayısı değerlerinde hafif bir artış olduğu görülmektedir. Şekil 3.62'de ise arka-üst ve arka-alt yüzeylerden yapılan üflemede, Strouhal sayısının artan üfleme katsayısı değeri ile birlikte artmakta olduğu görülmektedir.



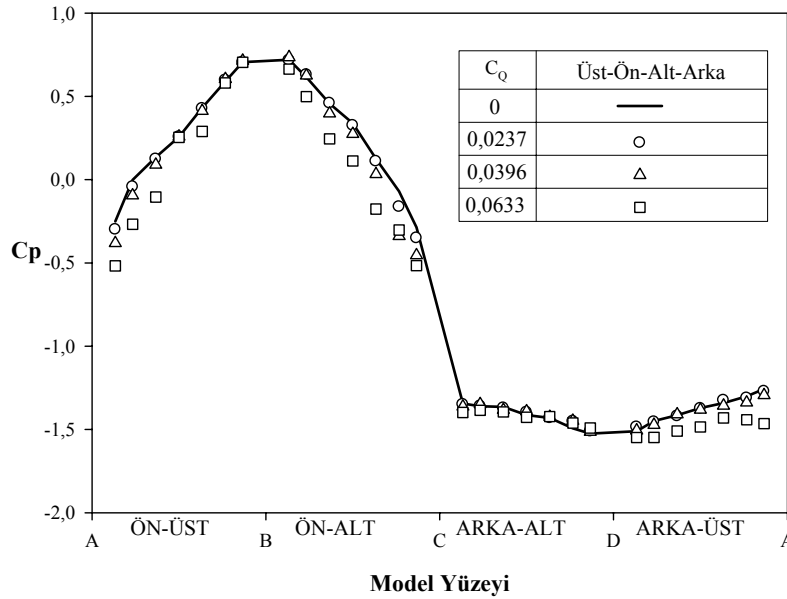
Şekil 3.61. Ön-üst ve ön-alt yüzeylerden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi



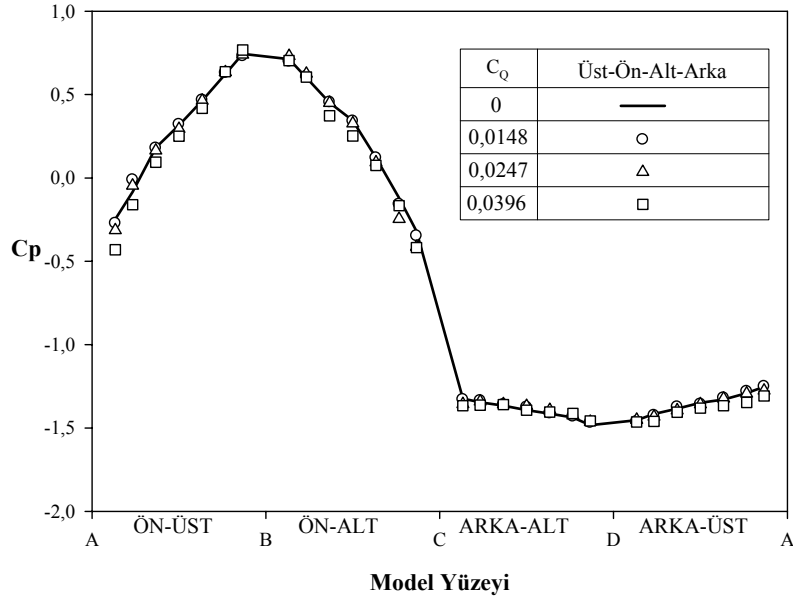
Şekil 3.62. Arka-üst ve arka-alt yüzeylerden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi

### 3.3.3. Bütün Yüzeylerden Üfleme Durumu

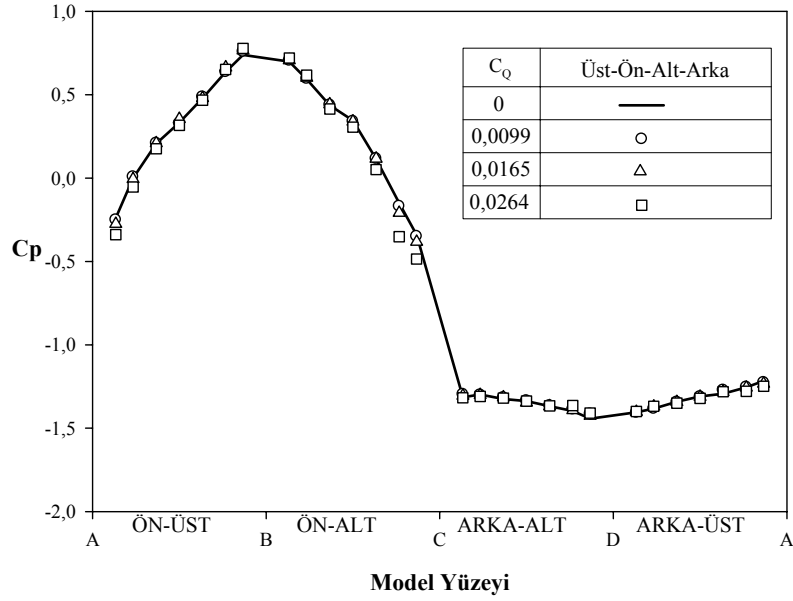
Akış alanı içerisinde diyagonal durumda duran kare kesitli modelin dört yüzeyinden de aynı anda yapılan üflemede,  $Re=10000$  için model etrafındaki basınç dağılımları ön-üst ve ön-alt yüzeylerde değişiklik göstermekte ve basınç değerleri azalmaktadır. Şekil 3.63'te ise yüksek  $Re$  sayısında üfleme katsayısının basınç katsayısı dağılımını etkilemediği açıkça görülmektedir.



Şekil 3.63.  $Re=10000$  için bütün yüzeylerden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri

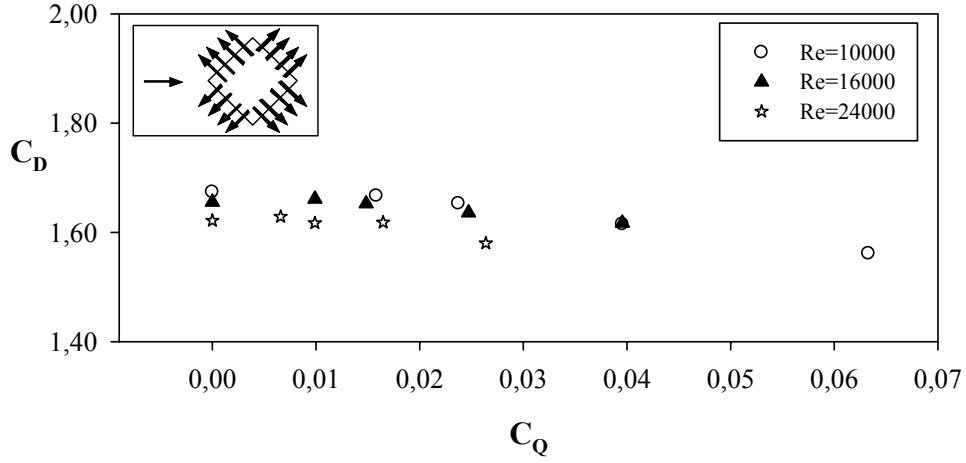


Şekil 3.64.  $Re=16000$  için bütün yüzeylerden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri



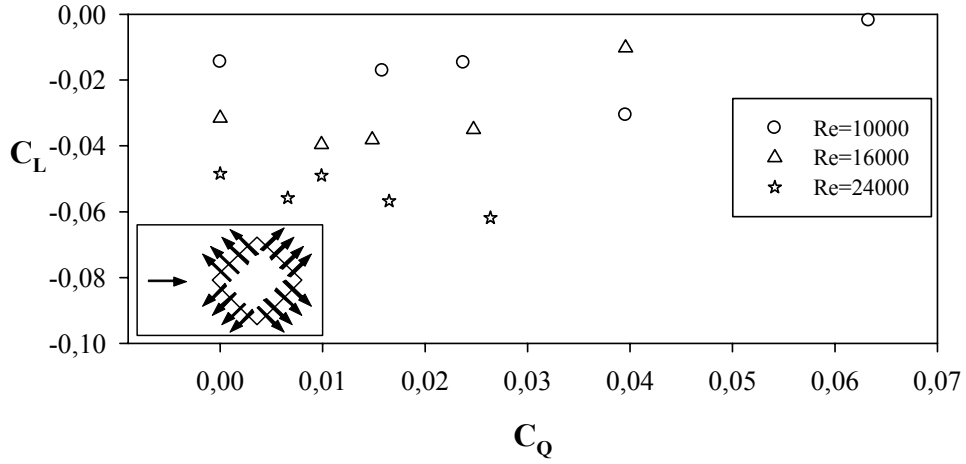
Şekil 3.65.  $Re=24000$  için bütün yüzeylerden yapılan üflemede basınç katsayısı değişimleri

Şekil 3.66'da bütün yüzeylerden yapılan üfleme durumunda, artan üfleme katsayısı ile birlikte üflemesiz duruma göre direnç katsayısında belirgin bir düşme olduğu görülmektedir.



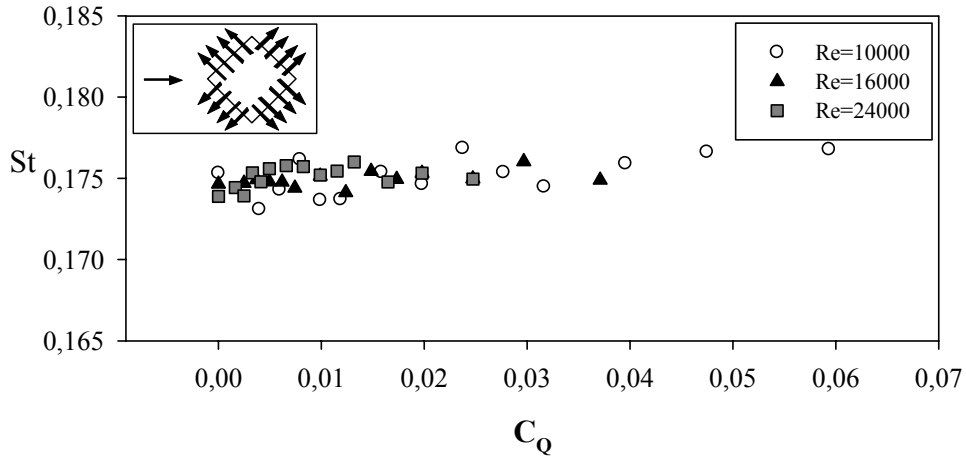
Şekil 3.66. Bütün yüzeylerden üflemede direnç katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi

Kaldırma katsayısı ile üfleme katsayısının değişimi Şekil 3.67’de görülmektedir.



Şekil 3.67. Bütün yüzeylerden üflemede kaldırma katsayısının üfleme katsayısı ile değişimi

Bütün yüzeylerden yapılan üflemede, Strouhal sayısı ile üfleme katsayısının değişimleri Şekil 3.68’de görülmektedir. Artan üfleme katsayısı değerleri ile birlikte Strouhal sayısı değerlerinde az da olsa bir artış ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.68. Bütün yüzeylerden üflemede Strouhal sayısının üfleme katsayısı ile değişimi

### 3.4. Regresyon ve Spektrum Analizi

Elde edilen deneysel bulgular kullanılarak değişkenler arasındaki fonksiyonel ilişkiler için regresyon analizi yapılmıştır. Bunun için ele alınan bağımlı değişkenler  $C_D$  direnç katsayısı,  $C_L$  kaldırma katsayısı ve  $St$  Strouhal sayısı olmak üzere, her birinin bağımsız değişkenler  $C_Q$  üfleme katsayısı ve Reynolds sayısı ile olan ilişkileri için uygun analitik bağıntılar elde edilmiştir. Bu bağıntılar ve tanımlanan ilişkiler için belirleme katsayıları topluca Tablo 3.3, 3.4 ve 3.5'te verilmiştir. Burada yer alan  $R^2$  belirleme katsayısı; ilişkilerin düzeyi hakkında fikir veren bir büyüklük olup,

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (3.2)$$






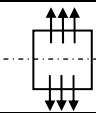



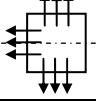



şeklinde tanımlanmıştır. Burada;  $\hat{y}_i$  regresyon doğrusundan (veya eğrisi) ile hesaplanan değer,  $y_i$  deneysel değer ve  $\bar{y}$  de deneysel değerlerin ortalamasıdır. Açıktır ki; bütün deneysel değerlerin regresyon doğrusu ile çakışması durumunda  $R^2=1$  ve bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasında hiçbir ilişkinin olmadığı durumda da  $R^2=0$  sonucu elde edilir. Belirleme katsayısının 0,7-0,9 aralığındaki değerleri orta düzeyde bir ilişkiyi gösterirken; 0,9'dan büyük değerleri ilişkilerin kuvvetli olduğu anlamına gelmektedir.

Direnç katsayısı ile ilgili verilere ait doğrusal regresyon analiz sonuçları göstermektedir ki; direnç katsayısı büyük ölçüde üfleme katsayısına bağlı olup, Reynolds sayısına olan bağımlılık göz ardı edilebilecek düzeydedir. Ayrıca, ilişkilere ait belirleme katsayısı değerleri de ilişkilerin en az orta veya kuvvetli düzeyde olduğunu göstermektedir. Buradaki  $C_D = a + b.C_Q + c.Re$  bağıntısında yer alan  $C_Q$  üfleme katsayısına ait “b” katsayısının (+) işareti direnç katsayısı ile üfleme katsayısı arasındaki ilişkinin doğru orantılı olduğunu gösterirken, (-) işaretinin ters orantıyı gösterdiğine dikkat edilmelidir (Tablo 3.3).


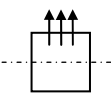
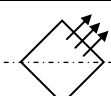
Tablo 3.3’te ayrıca üfleme katsayısındaki her bir %100’lük artışın direnç katsayısında meydana getirdiği değişiklik % olarak verilmiştir. Buna göre direnç katsayısındaki en yüksek düşme %2,73 ile üst-arka-alt yüzeylerden üfleme uygulamasında ortaya çıkmaktadır. Bu uygulamada üfleme katsayısının 5 katına çıkması durumunda direnç katsayısında üflemesiz duruma göre yaklaşık %14 kadar bir düşme olacağı görülmektedir. Öte yandan, sadece ön yüzeyden üfleme durumunda, direnç katsayısında önemli düzeyde bir artış olacağı da görülmektedir.

Tablo 3.4’te, asimetric üfleme uygulamaları için kaldırma katsayısı ile üfleme katsayısı arasındaki doğrusal regresyon analiz sonuçları görülmektedir. Burada da görüldüğü gibi, sadece üst yüzeyden üfleme uygulamasında en kuvvetli ilişki elde edilirken diğerlerindeki ilişkiler orta düzeydedir. Ayrıca, yatay konumda üst yüzeyden yapılan üflemenin ve diyagonal durumda üst-arka yüzeyden yapılan üflemenin kaldırma katsayısını önemli ölçüde düşürmekte olduğu da Tablo 3.4’te görülmektedir.

Tablo 3.3.  $C_D$  ile  $C_Q$  ve  $Re$  arasındaki regresyon analizi

Yerleşim	$C_D = a + b \cdot C_Q + c \cdot Re$					
	$C_D$					
	a	b	c	$R^2$	$\Delta C_Q$ (%)	$\Delta C_D$ (%)
	1,8963	4,6351	0,000015	0,9180	100	2,19
	1,692	-2,3419	-0,000002	0,7171	100	-1,41
	1,8506	1,4596	0,000014	0,9757	100	0,72
	1,6935	-1,6194	-0,0000013	0,7596	100	-0,96
	1,9022	-1,0717	0,00001	0,9682	100	-0,53
	1,9722	-1,1284	0,00001	0,7932	100	-0,54
	1,9399	1,6044	0,000009	0,9181	100	0,78
	1,7335	-2,9418	-0,000002	0,9469	100	-1,73
	1,7044	-1,4134	-0,0000027	0,8989	100	-0,84
	2,0749	-5,4009	0,00001	0,7332	100	-2,52
	2,0039	-5,6560	0,00001	0,9054	100	-2,73
	2,0367	-4,8249	0,000009	0,8424	100	-2,30
	1,7233	-1,6997	-0,0000036	0,8566	100	-1,01














Tablo 3.4.  $C_L$  ile  $C_Q$  ve  $Re$  arasındaki regresyon analizi

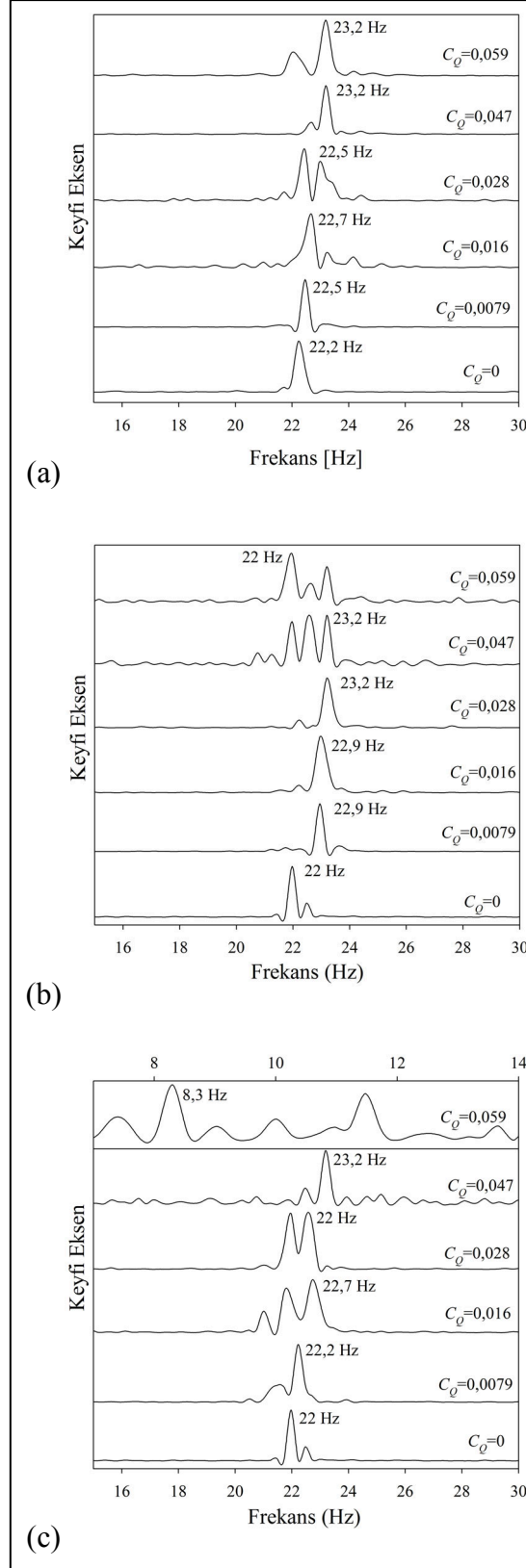
Yerleşim	$C_L=a+b.C_Q+c.Re$					
	$C_L$					
	a	b	c	$R^2$	$\Delta C_Q$ (%)	$\Delta C_L$ (%)
	-0,0318	0,1744	-0,000003	0,8324	100	2,87
	-0,0818	-7,2837	0,000003	0,9659	100	-58,20
	0,0009	-0,4114	-0,000002	0,8564	100	-17,58

Strouhal sayısı ile üfleme katsayısı arasındaki değişim grafiklerinde parabolik ilişkiler gözlemlendiğinden regresyon analizi de parabolik ilişki için yapılmıştır. Burada yer alan belirleme katsayıları incelendiğinde, ilişkilerin çoğunlukla orta düzeyde ve geri kalanında da zayıf düzeyde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, özellikle yüksek üfleme katsayılarında girdap frekans ölçümlerinde ortaya çıkan saçılmadır. Frekans ölçümlerinde bu çalışmada sadece etkin frekanslar göz önüne alınmıştır. İkincil frekanslar göz önüne alınmamıştır. Bu durumda elde edilen frekans değerlerinin modelden ayrılan girdapların dışında farklı girdap oluşumlarına ait olma olasılığı da mevcuttur. Diğer bir deyişle; artan üfleme etkisi ile birlikte ortaya çıkan ikincil girdaplara ait frekanslar ile birincil girdaplara ait frekansların hangi girdap oluşumuna ait olduğunu belirlemek mümkün olmamıştır. Nitekim Şekil 3.69, 3.70 ve 3.71’de yer alan frekans spektrum grafiklerinde de görüldüğü gibi etkin frekansların yanı sıra iz bölgesinde ikincil frekanslar da ortaya çıkmaktadır. Özellikle yüksek üfleme katsayılarında ikincil frekanslar artmakta ve dolayısıyla belirsizlik de artmaktadır. Burada sadece etkin frekanslar göz önüne alınarak değerlendirme yapma yoluna gidilmiştir.

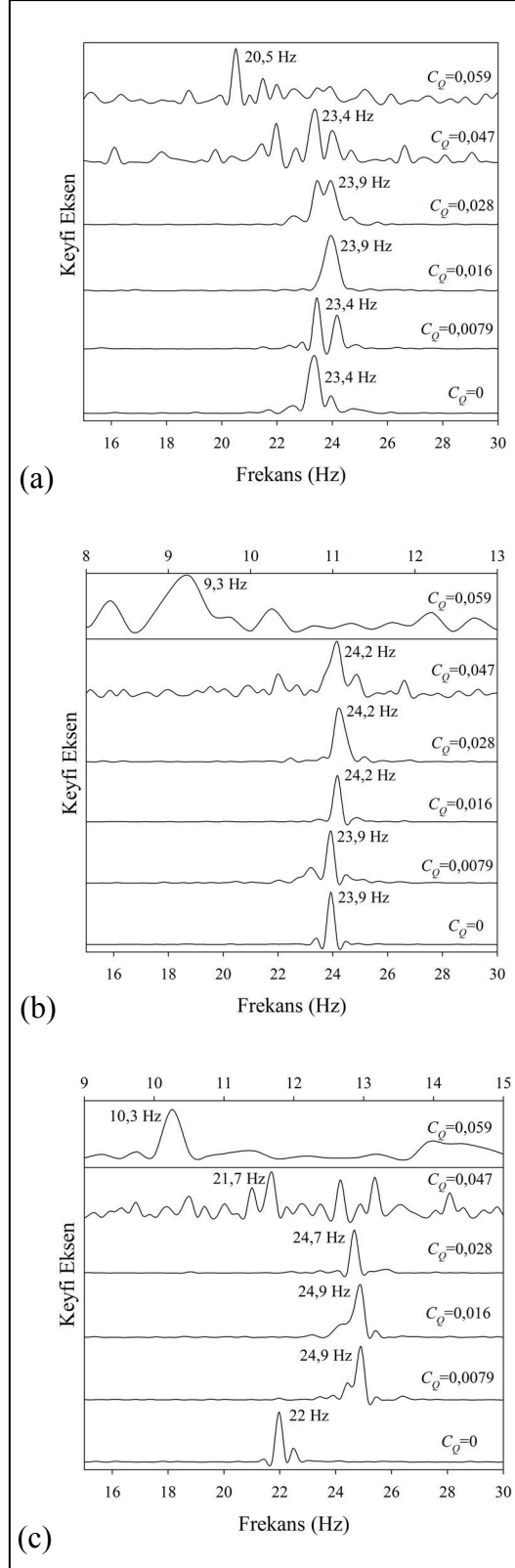


Tablo 3.5. St ile  $C_Q$  arasındaki regresyon analizi

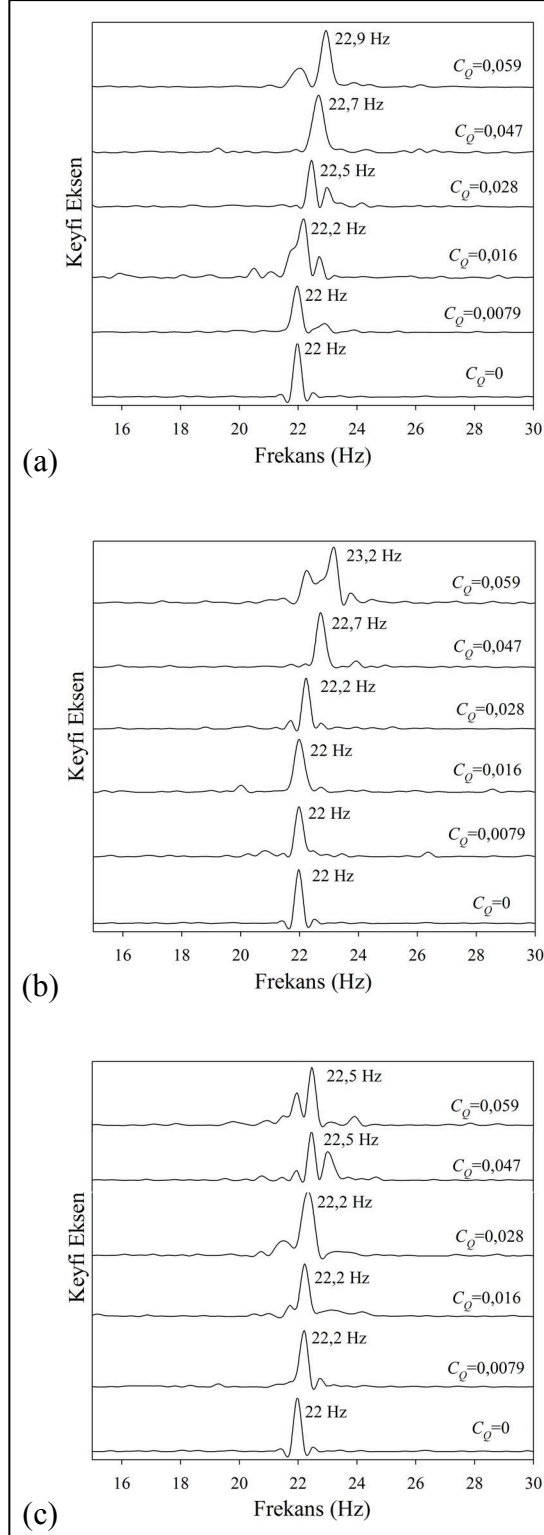
Yerleşim	$St=a+b.C_Q+c.C_Q^2$			
	St			
	a	b	c	$R^2$
	0,1269	0,0640	0,3313	0,6121
	0,1693	0,0124	-0,2315	0,0036
	0,1281	0,2063	-3,5341	0,5140
	0,1704	0,1644	-0,2432	0,8730
	0,1187	1,8917	-52,1669	0,8385
	0,1281	0,9008	-24,1498	0,7542
	0,1295	0,0366	0,3917	0,2697
	0,1697	-0,0488	1,5108	0,2061
	0,1716	0,0903	1,0452	0,8330
	0,1335	0,4380	-16,1135	0,7648
	0,1304	0,8361	-22,7470	0,7371
	0,1304	1,4168	-44,9614	0,8043
	0,1747	0,0221	0,2100	0,2762



Şekil 3.69. Yatay kare silindirin iz bölgesindeki  $x/D=2,5$  ve  $y/D=0,5$  noktasında  $Re=10000$ 'de yapılan frekans spektrum ölçümleri. a) Ön yüzeyden, b) Üst yüzeyden, c) Arka yüzeyden üfleme



Şekil 3.70. Yatay kare silindirin iz bölgesindeki  $x/D=2,5$  ve  $y/D=0,5$  noktasında  $Re=10000$ 'de yapılan frekans spektrum ölçümleri. a) Üst-alt yüzeylerden, b) Üst-arka-alt yüzeylerden, c) Bütün yüzeylerden üfleme



Şekil 3.71. Diyagonal kare silindirin iz bölgesindeki  $x/D'=2,5$  ve  $y/D'=1$  noktasında  $Re=10000$ 'de yapılan frekans spektrum ölçümleri. a) Arka-üst yüzeyden, b) Arka yüzeylerden, c) Bütün yüzeylerden üfleme

## 4. TARTIŞMA

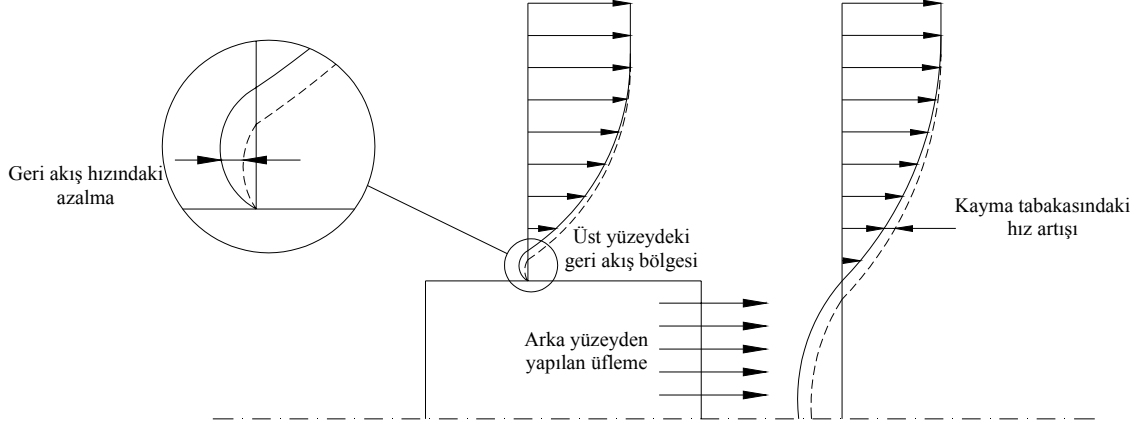
### 4.1. Üfleminin Basınç Katsayısı Dağılımına Etkisi

Elde edilen bulgulardan da görüldüğü gibi; çeşitli yüzeylerinden üfleme yapılan kare kesitli silindir yüzeylerindeki basınç katsayısı dağılımı, üfleme yapılan yüzeye, silindirin duruş şekline ve üfleme katsayısına bağlı olarak değişmektedir. Kare silindir yüzeylerinden yapılan üfleme; silindirin bu yüzeyindeki akışa üfleme doğrultusunda düşük ölçüde bir momentum kazandırmaktadır. Bu uygulama ile üfleme yapılan yüzeyde ayrılmış olan sınır tabaka içerisinde hız ve basınç alanları değişmeye başlar. Hız ve basınç alanlarında ortaya çıkan bu değişiklik; uygulamanın koşullarına bağlı olarak aerodinamik parametrelerin de değişmesine neden olur. Örneğin, sadece üst yüzeyden yapılan üfleme bu yüzeydeki geri akış hız gradyanını azaltır. Hız gradyanındaki düşme bu yüzeydeki basıncın belirli ölçüde artmasına neden olur. Şekil 3.9'da da görüldüğü gibi üst yüzeyden  $C_Q=0,0237$  değeri ile yapılan üfleme bu yüzeydeki basınç katsayısında belirgin bir artışa neden olmaktadır.

Yatay kare kesitli silindirin yüzeylerinin yakınındaki akışın hız alanlarında ortaya çıkan yapı değişikliği, sadece üfleme yapılan yüzey ile sınırlı değildir. Örneğin, sadece ön yüzeyden ana akışa ters yönde yapılmakta olan üfleme; yatay kare silindirin ön köşelerinden geçen akışı belirli ölçüde hızlandırır ve bu köşelerden ayrılmakta olan sınır tabakayı inceltici bir etki yaratır. Bu nedenle, üst ve alt yüzeylerde daha hızlı bir geri akış bölgesi ortaya çıkar. Geri akıştaki hızlanma üst ve alt yüzeylerde basıncın az da olsa düşmesine neden olur. Ayrıca üst ve alt yüzeyler boyunca veya yakınında ortaya çıkan bu ters akış hızlanmasından modelin arkasındaki iz bölgesindeki kayma tabakası hız gradyanı da etkilenir ve arka yüzeyde akış hızlanır. Bu da doğal olarak arka yüzeyde basıncın düşmesine yol açar. Bu etki açık olarak;  $C_Q=0,0237$  değeri ile ön yüzeyden yapılan üflemede arka yüzey basınç katsayısının düşmesinden de Şekil 3.9'da görülmektedir.

Sadece arka yüzeyden yapılan üfleme uygulaması ise; model arkasındaki iz bölgesinde yer alan kayma tabakası hız gradyanını belirli ölçüde azaltır. İz bölgesinde gradyan yapısı düşen kayma tabakası da modelin alt ve üst yüzeylerindeki ayrılmış sınır tabakalar içerisindeki geri akış hızlarını yavaşlatır (Şekil 4.1). Alt ve üst yüzeylerdeki geri akış hızında ortaya çıkan azalma da basınçta artışa yol açar. Bu etki Şekil 3.9'da yer alan,

$C_Q=0,0237$  değeri ile arka yüzeyden yapılan üfleme için olan basınç katsayısı değişiminde de açık olarak görülmektedir.



Şekil 4.1. Arka yüzeyden yapılan üflemenin hız alanları üzerindeki etkisinin şematik gösterimi

Ön ve arka yüzeylerin her ikisinden birden yapılan üfleme ise; arka yüzeyden yapılan üfleminin üst ve alt yüzeylerde oluşturduğu etkinin yanı sıra, ön yüzeyden yapılan üfleminin de etkisini taşımaktadır. Bu durumda ön yüzeyden yapılan üfleminin üst ve alt yüzeylerdeki basınç düşürücü etkisi ile arka yüzeyden yapılan üfleminin üst ve alt yüzeylerdeki basınç artırıcı etkisi üst üste gelir ve üst-alt yüzeylerdeki basınç dağılımında belirgin bir değişiklik ortaya çıkmaz. Bu analizi; Şekil 3.21’de  $C_Q=0,0475$  değeri ile ön ve arka yüzeylerden yapılan üfleme için olan basınç katsayısı değişimi açık olarak doğrulamaktadır.

Üst ve alt yüzeylere eklenen ön yüzeyden üfleme uygulaması ve üst-alt yüzeylere eklenen arka yüzeyden üfleme uygulaması sonuçları birbirleri ile karşılaştırıldığında yukarıda ön-arka yüzeylerden yapılan üfleme analizi daha da kesinleşmektedir. Gerçekten de Şekil 3.30 ve 3.31’de belirgin bir şekilde görüldüğü gibi; üst-ön-alt yüzeylerden yapılan üfleme uygulamasında üst ve alt yüzeylerde ortaya çıkan basınç artışı, üst-arka-alt yüzeylerden yapılan üfleme uygulamasında üst ve alt yüzeylerde ortaya çıkan basınç artışından daha azdır. Bunun nedeni; ön yüzeyden yapılan üfleme uygulamasının üst ve alt yüzeylerde basıncı düşürücü bir etki sağlarken, arka yüzeyden yapılan üfleme uygulamasının basıncı artırıcı bir etkisinin olmasıdır.

Yatay kare silindir için bütün yüzeylerden yapılan üfleme uygulaması; her bir tekil üfleme uygulaması etkilerinin bir toplamı olarak görülebilir. Nitekim Şekil 3.39'da görülen basınç katsayısı dağılımları; her bir yüzeyden yapılan üflemenin hem kendine ait yüzey hem de diğer yüzeyler üzerindeki etkilerini taşımaktadır. Bu etkilerin niteliği ve niceliği her bir tekil üfleme uygulamasına ait olan bulguların ayrı ayrı incelenmesi ile kolayca anlaşılabilir.

Burada vurgulanması gereken bir diğer nokta da düşük (10000), orta (16000) ve yüksek (24000) olmak üzere üç farklı Re sayısında yapılmış olan deneylerden elde edilen bulguların düşük Re sayısı için oldukça belirgin olmasına karşın, yüksek Re sayısındaki bulgulara ait değerlerin birbirlerine yakın olmasıdır. Bunun nedeni; deney düzeneğinde model yüzeyinden üfleme sağlayan sistemin en fazla  $Q=0,0032\text{m}^3/\text{s}$  değerinde debi sağlayabilmesidir. Deneylerde Re sayısındaki artış tünel serbest akış hızının artırılması ile sağlandığından, bu durumda üfleme katsayısı da ( $C_Q=Q/(DLU_\infty)$ ) artan serbest akış hızına bağlı olarak düşmektedir. Sonuç olarak Re sayısı arttıkça üfleme katsayısı deney aralığı da azalmaktadır. Bu durum özellikle yüksek Re sayısı için olan bulguların değerlendirilmesinde belirli bir zorluk yaratmıştır. Ancak orta ve yüksek Re sayılarında düşük  $C_Q$  değerleri için elde edilmiş olan bulguların  $Re=10000$  elde edilmiş olan bulgular ile paralellik göstermekte olduğu da görülmüştür.

Diyagonal durumdaki kare silindirin ön yüzeylerinden (ön-üst ve ön-alt) arka yüzeylerinden (arka-üst ve arka-alt) ayrı ayrı yapılan üflemler için elde edilen bulgular incelendiğinde; sadece üfleme yapılan yüzeylerdeki yapının değişmekte olduğu ve üfleme yapılmayan yüzeylerdeki yapının etkilenmediği görülmüştür. Sadece ön yüzeylerden yapılan üfleme; sağladığı momentum nedeniyle yüzeydeki ayrılmamış sınır tabaka akışını hızlandırmakta ve bu yüzeylerde belirli bir basınç düşümü olmaktadır. Sadece arka yüzeylerden yapılan üfleme ise bu yüzeylerdeki ikincil (girdap bölgesi) akışa ait sınır tabaka akışını yavaşlatmakta ve bu yüzeylerde de basınç artışı ortaya çıkmaktadır. Diyagonal kare silindirin bütün yüzeylerinden yapılan üfleme durumunda bu etkiler üst üste gelerek, modelin ön ve arka yüzeyleri arasındaki basınç farkı daha da azalmaktadır.

#### **4.2. Üflemenin Direnç ve Kaldırma Katsayısına Etkisi**

Deneylerden elde edilen direnç katsayısı değerleri tamamen modelin ön ve arka yüzeyleri arasındaki basınç kuvvetleri farkı ile hesaplandığından, basınç katsayısı

değişimleri direnç katsayısı değişimlerinin elde edilmesinde belirleyici olmuştur. Diğer bir deyişle; modelin ön ve arka yüzeylerindeki toplam basınç farkı değişimi modelin direnç katsayısı değişimi anlamına gelmektedir.

Bu tez çalışmanın amaçlarından bir tanesi olan yüzeylerden üfleme uygulamasının direnç katsayısının denetimi amacıyla kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bazı üfleme uygulamaları direnç katsayısını artırırken, bazı üfleme konfigürasyonları direnç katsayısının düşmesini sağlamıştır. Aerodinamik açıdan istenen özellik ise direnç katsayısının düşük olmasıdır. Bu açıdan bakıldığında; üst-arka-alt yüzeylerden, üst-ön-alt yüzeylerden ve bütün yüzeylerden yapılan üfleme uygulamasında direnç katsayısında belirgin bir düşmenin olduğu görülmektedir. Deneysel bulgulara dayalı olarak yapılan regresyon analizi ile elde edilen fonksiyonel ilişkilere göre; direnç katsayısındaki en yüksek düşüş üst-arka-alt yüzeylerden yapılan üfleme uygulamasında ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla kare silindir etrafındaki akışta uygun tasarım ilkeleri ile yapılacak bu türden bir düzenleme ile düşük direnç katsayılı bir akış elde edilebilir.

Öte yandan çalışmada göz önüne alınan bir diğer parametre olan kaldırma katsayısı, cisme etkiyen kaldırma kuvveti hakkında önemli bir bilgi sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında yapılmış olan deneylerden simetrik üfleme durumlarına ait olan bulguların pratik bir anlamı yoktur. Sadece yatay kare silindir için üst yüzey, diyagonal kare silindir için de üst-ön ve üst-arka yüzeylerden üfleme şeklinde olan asimetric uygulamalar üzerinde değerlendirme yapılmıştır. Buna göre yatay kare silindirin üst yüzeyinden yapılan üflemede bu yüzey üzerindeki geri akışın yavaşlaması nedeniyle basınç ta artmaktadır. Bu nedenle üflemez duruma göre kaldırma etkisi azalmakta ve model aşağı doğru basılmaya zorlanmaktadır. Diyagonal kare durumunda ön-üst ve arka-üst yüzeylerden yapılan üflemlerin model geometrisine bağlı olarak yüzey basınç dağılımı üzerinde fazla etkili olmaması nedeniyle, kaldırma katsayılarında da belirgin bir değişiklik ortaya çıkmamıştır. Diyagonal kare durumunda sadece alt yüzeyden yapılacak üflemenin kaldırma katsayısını düşüreceği kesindir. Dolayısıyla bu durum aerodinamik açıdan göz önünde bulundurulması gereken bir uygulama olarak not edilmelidir.

### **4.3. Üflemenin Strouhal Sayısına Etkisi**

Aerodinamikte önemli olan bir diğer parametre de Strouhal sayısıdır. St sayısı cisim arkasında ortaya çıkan periyodik girdap hareketinin dinamiği hakkında önemli bir fikir



vermektedir. Periyodik girdap hareketinin cisim üzerinde oluşturduğu yüksek frekanslı enine titreşim etkisi aerodinamikteki pek çok durumda istenmeyen bir sonuçtur. Dolayısıyla böyle durumlarda bu etkiyi azaltacak şekilde girdap hareketinin denetim altına alınması gerekir.

Strouhal sayısı doğrudan doğruya iz bölgesindeki girdapların oluşma hızı ile ilgilidir. Bu açıdan bakıldığında yüksek St sayısı daha kısa zamanda ve dolayısıyla daha yüksek frekansta oluşan girdaplar anlamına gelmektedir. Bu tez çalışmasında etkin frekans ölçümlerinden elde edilen bulgular göstermektedir ki çeşitli üfleme uygulamaları girdap oluşum hızını yavaşlatmakta ve daha düşük frekanslı bir girdap oluşumu ortaya çıkarmaktadır. Fransson vd. (2004) tarafından yapılmış olan çalışmada;  $Re=8300$  için yüzeylerinden  $\Gamma=5$  ( $\Gamma=100v_w/u_\infty$ ) üfleme parametresi ile düzgün üfleme yapılan dairesel kesitli silindir etrafındaki akışta Strouhal sayısının üflemesiz duruma göre yaklaşık olarak %25 düzeyinde düşme gösterdiği gözlenmiştir. Bu çalışmadaki  $\Gamma=5$  üfleme parametresi, bu tez çalışmasında yatay kare silindirin bütün yüzeylerinden  $C_Q=0,057$  üfleme katsayısı ile yapılan üfleme karşılık gelmektedir. Bu tez çalışmasında da  $Re=10000$  için  $C_Q$  üfleme katsayısının 0,04 değerinden daha yüksek değerlerinde yatay kare silindir için bütün yüzeylerden yapılan üflemede St sayısında belirgin bir düşme olduğu ve bu düşmenin  $C_Q=0,057$  için yaklaşık %54 düzeyinde olduğu Şekil 3.44'ten görülmektedir. Bu sonuç; tüm yüzeylerinden üfleme yapılan yatay kare silindir etrafındaki akışta, dairesel kesitli silindir etrafındaki akışa göre Strouhal sayısının çok daha fazla düzeyde düştüğünü göstermektedir.

Strouhal sayısı için olan parabolik regresyon analizi sonuçlarında yer alan “c” katsayısı üzerinde yapılan inceleme göstermektedir ki; yatay kare silindir için Strouhal sayısında ortaya çıkan en yüksek düşüşler arka yüzeyden yapılan üflemede ve bütün yüzeylerden yapılan üflemede ortaya çıkmıştır (Tablo 3.5). Bu bulgu göstermektedir ki; iz bölgesindeki girdap hareketi büyük ölçüde arka yüzeyden yapılan üflemeden etkilenmektedir. Arka yüzeyden iz bölgesine yapılan momentum ilavesi yüzey üzerindeki sınır tabakayı kalınlaştırarak yavaşlatmakta ve dolayısıyla girdap oluşum hızını yavaşlatarak frekansı düşürmektedir. Dolayısıyla daha da yüksek hızlarda yapılacak olan üflemenin iz bölgesindeki zaman bağımlı periyodik yapıyı tamamen daimi bir yapıya dönüştürmesi beklenebilir. Bu da iz bölgesindeki periyodik girdaplı yapının etkin bir yöntemle denetim altına alınabileceğini göstermektedir.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada; üç farklı Reynolds sayısı (10000, 16000, 24000) ve üfleme yapılan çeşitli yüzey konfigürasyonları için üfleme katsayısının  $C_Q = 0,00165-0,095$  arasındaki değerlerine bağlı olarak kare kesitli silindir yüzeylerindeki basınç dağılımları, direnç ve kaldırma katsayıları, model arkasındaki girdap kopma frekansları ile Strouhal sayısı değişimleri elde edilmiştir. Bunun yanında yatay kare silindir için direnç ve kaldırma katsayısı değerleri, geliştirilmiş bir bilgisayar programı yardımıyla sayısal olarak hesaplanmış ve deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar şu şekilde ifade edilebilir:

1. Bütün parametreler için her üç Reynolds sayısında da elde edilen değişimler aynı davranışı göstermekte olup, sadece silindir yüzeylerindeki delik pürüzlülüğünden kaynaklanan bir fark ortaya çıkmıştır. Zira bilindiği üzere köşeli cisimler etrafındaki akışta direnç ve kaldırma katsayısı gibi özellikler Reynolds sayısından bağımsızdır. Diğer bir deyişle; herhangi bir parametre için olan değişim, üfleme katsayısının yanı sıra Reynolds sayısındaki değişime paralel olarak değişen delik pürüzlülüğüne de bağlıdır.
2. Geçirgen yatay kare silindir yüzeylerindeki basınç dağılımları; üfleme etkisi ile yüzeyde değişen sınır tabaka hız dağılımına bağlı olarak, sadece üflemenin yapıldığı yüzeyde değil diğer yüzeylerde de değişmektedir. Örneğin, üst yüzeyden yapılan üfleme sadece bu yüzeydeki basıncı artırırken, ön yüzeyden yapılan üfleme ön yüzeydeki basınç dağılımını etkilememekte ve arka yüzeydeki basıncı düşürmekte; arka yüzeyden yapılan üfleme, hem arka yüzey basıncını hem de üst ve alt yüzeylerdeki basıncı artırmaktadır.
3. Üfleme yapılan ve üfleme yapılmayan yüzeylerdeki basınç dağılımlarının üfleme yapılan yüzeylere bağlı olarak değişmesi nedeniyle, üfleme yapılan yüzeylere ait konfigürasyonlar da fazla sayıda seçilerek deneyler yapılmıştır. Deney sonuçları göstermiştir ki; yatay kare silindirin arka yüzeyindeki en düşük basınç dağılımı ön yüzeyden yapılan üflemede ortaya çıkmaktadır. Arka yüzeydeki en yüksek basınç dağılımı ise, üst-arka-alt yüzeylerden yapılan üflemede ortaya çıkmaktadır.

4. Yatay kare silindir için üflemez duruma göre direnç katsayısındaki en fazla düşüş, ön ve arka yüzeyler arasındaki en düşük toplam basınç farkını sağlayan üst-arka-alt yüzeylerden yüksek hız ile yapılan üflemede ortaya çıkmaktadır. Direnç katsayısındaki en fazla artış ise, ön ve arka yüzeyler arasındaki en yüksek basınç farkına neden olan ön yüzeyden yüksek hızda yapılan üflemede görülmüştür.
5. Yatay kare silindirin üst yüzeyinden yapılan üfleme, kaldırma katsayısını üfleme katsayısındaki her bir birim artış için %17,58 kadar azaltmaktadır. Bu sonuç; yatay kare silindirin üst yüzeyinden yapılacak emme ya da alt yüzeyinden yapılacak üfleme ile kaldırma katsayısının arttırılabileceği anlamına gelmektedir.
6. Yatay kare silindir arkasındaki periyodik girdap hareketinin temel ölçüsü olan Strouhal sayısı için en düşük değerler, arka yüzeyden ve bütün yüzeylerden yapılan üfleme uygulamasında elde edilmiştir. Dolayısıyla, girdap kontrolü açısından en ideal olanı arka yüzeyden yapılan üfleme uygulamasıdır.
7. Yatay kare silindirin yüzeylerinden yapılan üfleme uygulamalarının göz önüne alınan parametreler üzerindeki etkileri incelendiğinde; yüzeylerden tekil üfleme uygulamalarının ayrı ayrı etkilerinin nicelik olarak toplanması birkaç yüzeyden üfleme uygulaması gibi birleşik uygulamaların nicelik etkisine eşit bir sonuç vermemektedir. Örneğin; üfleme katsayısındaki her birim artış, ön yüzeyden yapılan üflemede direnç katsayısında %2,19 kadar bir artışa yol açmakta ve üst-alt yüzeylerden yapılan üfleme direnç katsayısında -%0,54 kadar bir düşme sağlamakta iken, üst-ön-alt yüzeylerden aynı anda yapılan üflemede direnç katsayısı yukarıdaki etkilerin toplamı olan %1,61'lik artış yerine -%2,52 düzeyinde düşme göstermektedir. Bu sonuç; birleşik üfleme uygulamalarının yüzeylerdeki basınç dağılımını ayrıca etkilediğini ve tekil uygulamalara ait etkilerin toplamından bağımsız olduğunu göstermektedir.
8. Geçirgen diyagonal kare silindir yüzeylerinden yapılan üfleme için konfigürasyonların tamamında, yatay kare silindirden farklı olarak ön ve arka yüzeyler arasındaki toplam basınç farkı, üfleme etkisi ile her durumda azalmaktadır.
9. Diyagonal kare silindir yüzeylerinden yapılan üflemede en düşük direnç katsayısı, ön yüzeylerden yapılan üfleme durumunda elde edilmiştir. Direnç katsayısının en az düşme gösterdiği uygulama ise, arka yüzeylerden yapılan üfleme olarak belirlenmiştir.

10. Diyagonal kare silindirin üst yüzeylerinden yapılan üfleme kaldırma katsayısını önemli ölçüde artırmaktadır. Bu sonuç; diyagonal kare silindirin üst yüzeylerinden yapılacak emme ya da alt yüzeylerinden yapılacak üfleme ile kaldırma katsayısının önemli ölçüde düşürüleceği anlamına gelmektedir.
11. Diyagonal kare silindirin ön-üst yüzeyinden yapılan üfleme uygulamasında Strouhal sayısının değişmediği, diğer bütün üfleme uygulamalarında Strouhal sayısının artan üfleme katsayısı ile birlikte artmakta olduğu görülmüştür. Bu sonuç; üfleme uygulaması ile diyagonal kare silindir etrafındaki akışta girdap denetiminin yapılamayacağını göstermektedir. Ancak; yapılacak emme uygulaması ile girdap denetiminin sağlanabileceği düşünülmektedir.
12. Çalışmadan elde edilen sonuçlar; aerodinamikte direnç kontrolü açısından, yüzeyden üfleme uygulamasının etkin bir yöntem olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Uygun teknikler kullanılarak hava, deniz ve kara taşıtlarında yüzeyden üfleme uygulaması yapılarak direnç ve girdap kontrolü yapılabilir.

## 6. ÖNERİLER

Bu çalışmada geçirgen yüzeylerinden üfleme yapılan kare kesitli silindir etrafındaki akışta, temel aerodinamik parametreler deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Ele alınmış olan problem literatürde daha önceden incelenmemiş olduğundan, çalışmadan elde edilen bulguların kıyaslanması olanağı olmamıştır. Çalışma için öngörülen hedeflere ulaşılmış olup, elde edilen bulgular üzerinde gerekli tartışma ve değerlendirmeler yapılmıştır. Bununla birlikte; ele alınan problemin farklı yönlerden ve daha gelişmiş donanımlar ile incelenmesi, konunun literatürdeki yerini daha da genişletecek ve yeni teknolojik gelişmelere ışık tutacaktır. Bu bağlamda çalışma sonucunda yapılabilecek öneriler şu şekilde ifade edilebilir:

1. Dikdörtgen, daire, oval ya da diğer aerodinamik geometrilere sahip cisimlerin yüzeylerinden yapılan üflemin akış alanı ve akış parametreleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi, konuya daha da genişlik kazandıracaktır.
2. Üfleme uygulamasının yanı sıra çeşitli geometrilere sahip cisim yüzeylerinden yapılacak emme uygulaması da önemli bulgular verecektir. Bu açıdan bakıldığında özellikle asimetrik emme uygulamasının kaldırma kuvvetinin denetim altına alınmasında ve arka yüzeyden emme uygulamasının girdap denetiminde etkili sonuçlar vereceği beklenebilir.
3. Yüzeylerinden üfleme yapılan geçirgen cisimler etrafındaki akışta hız alanı ölçümlerinin de yapılması ve bu sayede özellikle sınır tabaka kalınlıklarının belirlenmesi daha detaylı analiz yapma olanağı verecektir. Ayrıca cisim arkasındaki iz bölgesinin uzunluğunda ortaya çıkacak değişimlerin de belirlenmesi mümkün olacaktır.
4. Yapılabilecek yeni deneylerde kullanılacak olan cihazların daha duyarlı olması ve ileri teknoloji ürünü olması, deneylerdeki belirsizliklerin azaltılması bakımından önemli olacaktır.
5. Ele alınan problem ısı geçişi açısından da önemlidir. Üfleme ya da emme uygulamasının ısı geçişinin iyileştirilmesi veya ısıl koruma sağlama yönlerinden etkili sonuçlar vermesi beklenebilir.

## 7. KAYNAKLAR

- Akansu, Y.E., 2004. Ardışık Olarak Yerleştirilen Farklı Geometrilere Sahip Küt Cisimlerin Aerodinamik Karakteristiklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Bearman, P.W. ve Wadcock, A.J., 1973. The Interaction Between A Pair of Circular Cylinder Normal to a Stream, J. Fluid Mech., 61, 3, 499-511.
- Bellettre, J., Bataille, F. ve Lallemand, A., 1999. A New Approach For The Study of Turbulent Boundary Layers With Blowing, Internat. J. Heat Mass Transfer, 42, 2905-2920.
- Bertin, J.J., 2002. Aerodynamics for Engineering Prentice Hall, London, England.
- Borgeson, D.M., 2002. Boundary Layer Control Using Micro-Electromechanical Systems (MEMS), Masters Thesis, Airforce Institute of Technology, Ohio, USA.
- Bosch, G. ve Rodi, W., 1998. Simulation of Vortex Shedding Past a Square Cylinder with Different Turbulence Models, Int. J. Num. Methods in Fluids, 28, 601-616.
- Bouris, D. ve Bergeles, G., 1999. 2D LES of Vortex Shedding from a Square Cylinder, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 80, 31-46.
- Cadafalch J., Perez-Segarra C.D., Cònsul R. ve Oliva A., 2002. Verification of Finite Volume Computations on Steady-State Fluid Flow and Heat Transfer, ASME Journal of Fluids Engineering, 124, 11-21.
- Chen, M.J. ve Liu, C.H., 1999. Vortex Shedding and Surface Pressures on a Square Cylinder At Incidence to a Uniform Air Stream, Int. J. Heat Fluid Flow, 20, 592-597.
- Cook, N.J., 1986. The Designer Guide to Wind Loading on Building Structures : Part 1, Butterworths, London, England.
- Çuhadaroğlu, B., 2004. Numerical Study of Turbulent Boundary Layers with Heat Transfer and Tangential Transpiration, International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 14, 6, 760-782.
- ESDU, 1971. Fluid Forces on Non-Streamline Bodies – Background Notes and Description of the Flow Phenomena, ESDU Item No, 71012.
- Fox, R.W. ve McDonald, A.T., 1994. Introduction to Fluid Mechanics, John Wiley and Sons, Fourth Edition, New York.

- Fransson, J.H.M., Konieczny, P. ve Alfredsson, P.H., 2004. Flow Around a Porous Cylinder Subject to Continuous Suction or Blowing, Journal of Fluids and Structures, 19, 1031-1048.
- Hannemann, K. ve Oertel, Jr., H., 1989. Numerical Simulation of the Absolutely and Convectively Unstable Wake, J. Fluid Mech., 199, 55-88.
- Holman, J.P., 1994. Experimental Methods for Engineers, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Hwang C.B. ve Lin, C.A., 2000. Low Reynolds Number  $k$ - $\epsilon$  Modelling of Flows with Transpiration, Int. J. Num. Methods in Fluids, 32, 495-514.
- Igerashi, T., 1984. Characteristic of the Flow Around a Square Prism, Bulletin of the JSME, 27, 231, 1858-1865.
- Igerashi, T., 1987. Fluid Flow and Heat Transfer Around Rectangular Cylinder (The Case of a Width/Height Ratio of Section of 0.33~1.5, Int. J. Heat Mass Transfer, 30, 893-901.
- Johnston, J.P., 1999. Pitched and Skewed Vortex Generator Jets for Control of Turbulent Boundary Layer Separation: A review, Third ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, July.
- Jorgensen, F.E., 2002. How to Measure Turbulence with Hot-Wire Anemometers – A Practical Guide, DANTEC Dynamics, Technical note.
- Kato, M. ve Launder, B.E., 1993. The Modeling of Turbulent Flow Around Stationary and Vibrating Square Cylinders, In Proceedings of the Ninth Symposium on Turbulent Shear Flows, Kyoto, 10-14.
- Kudriavtsev, V., Braun M.J. ve Hendricks, R.C., 2001. Virtual Experiments on Drag Reduction in: Proceedings of the CASI, Toronto, 1-6.
- Lyn, D.A., Einav, S., Rodi, W. ve Park, J.H., 1995. A Laser-Doppler Velocimetry Study of Ensemble-Averaged Characteristics of the Turbulent Near Wake of a Square Cylinder, J. Fluid Mech., 304, 285-319.
- Mathelin, L., Bataille, F. ve Lallemand, A., 2001. Blowing Models for Cooling Surfaces, Int. J. Therm. Sci., 40, 969-980.
- Mathelin, L., Bataille, F. ve Lallemand, A., 2002. The Effect of Uniform Blowing on The Flow Past a Circular Cylinder, Journal of Fluids Engineering, 124, 452-464.
- Meinert, J., Huhn, J., Serbest, E. ve Haidn, O.J., 2001. Turbulent Boundary Layers with Foreign Gas Transpiration, J. Spacecraft and Rockets, 38, 191-198.

- Obesaju, E.D., 1983. An Investigation of the Effects of Incidence on the Flow around a Square Section Cylinder, Aeronautical Quarterly, 34, 243-259.
- Patankar, S.V., 1980. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, New York.
- Roache P.J., 1997. Quantification of Uncertainty in Computational Fluid Dynamics, Annual Review of Fluid Mechanics, 29, 123-160.
- Schetz, J.A. ve Nerney, B., 1977. Turbulent Boundary Layer with Injection and Surface Roughness, AIAA, 15, 1288-1293.
- Schlichting, H., 1979. Boundary-Layer Theory, Seventh Edition, McGraw-Hill, New York.
- Schumm, M., Berger, E. ve Monkewitz, P., 1994. Self-Excited Oscillations in the Wake of Two-Dimensional Bluff Bodies and Their Control. Journal of Fluid Mechanics, 271, 17- 53.
- Simpson, R.L., 1970. Characteristics of Turbulent Boundary Layers at Low Reynolds Numbers with and without Transpiration, J. Fluid Mech., 42, 769-802.
- TSI, 1992. IFA 100 System Intelligent Flow Analyzer, Instruction Manual, TSI Incorporated, St-Paul.
- URL-1, <http://journaltool.asme.org/templates/JFENumAccuracy.pdf>, 27 Aralık 2000.
- URL-2, <http://www.aerospaceweb.org/question/aerodynamics/q0215.shtml>, 11 Nisan 2007.
- West, G.S. ve Apelt, C.J., 1982. The Effect of Tunnel Blockage and Aspect Ratio on the mean Flow Past a Circular Cylinder with Reynolds Numbers Between  $10^4$ - $10^5$ , Journal of Fluid Mechanics, 114,361-377.
- White, F.M., 2001. Fluid Mechanics, The McGraw Companies, USA.
- Yang, J.T., Tsai, B.B. ve Tsai, G.L., 1994. Separated-Reattaching Flow Over a Backstep with Uniform Normal Mass Bleed, J. Fluids Eng., 116, 29-35.
- Younis, B.A. ve Przulj, V.P., 2006. Computation of Turbulent Vortex Shedding, Computational Mechanics 37, 408-425.



## **ÖZGEÇMİŞ**

Ahmet Ömür TURHAL, 1976 yılında Kayseri’de doğdu. 1992 yılında Kayseri Sümer Lisesi’nden mezun oldu. 1994 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü’ne girdi. Temmuz 1998 yılında bu bölümden mezun oldu. Eylül 1998’de K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda başladığı Yüksek Lisans programını Temmuz 2002’de tamamladı ve aynı yıl doktora eğitimine başladı. Halen eğitime devam etmekte olup, alanıyla ilgili kaynakları kullanabilecek derecede İngilizce bilmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.