

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ORCID :** - - -

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :** / /

**Tezin Savunma Tarihi :** / /

**Tez Danışmanı :**

**ORCID :** - - -

**Trabzon**

## ÖNSÖZ

Bu çalışmada; birçok mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda önemli yeri olan cisimler etrafındaki akışta aktif bir akış kontrol yöntemi olarak da bilinen yüzeyden yapılan üfleme ve emmenin akış alanı ve ısı transferi üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Pratik uygulamalarda direnç ve ısı transferi kontrolünde kullanılan üfleme-emme uygulamasında cismin geometrisi, üfleme-emmenin yapıldığı yüzey ve üfleme-emmenin şiddeti önemli parametrelerdir. Çalışma kapsamında kare, beşgen, daire ve eliptik kesitli silindirler etrafındaki akışta üfleme ve emmenin etkisi incelenmiş ve literatürde henüz yer almayan özgün bulgular elde edilmiştir.

Çalışma süresince ve tüm doktora öğrenimimde vermiş olduğu sonsuz destek ve göstermiş olduğu anlayışı için danışman hocam sayın Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU'na, teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Bu tezin hazırlanması esnasında yanımda olan ve destek veren eşim Pardis KAFIL ve maddi manevi desteklerini esirgemeyen annem Solhiyeh BEHNOUD, babam Mohammad VAKHSHOURI ve kardeşim Elshan Vakhshouri'e teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışmasını çok sevdiğim oğlum John VAKHSHOURI'e ithaf ediyorum.

Mir Elyad VAKHSHOURI

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Geçirgen yüzeyli cisimler etrafındaki akışta cisimden yapılan üfleme ve emmenin akış ve ısı transferi üzerindeki etkisinin incelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU‘ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim 13/08/2020.

Mir Elyad VAKHSHOURI

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XV
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Küt Cisim Aerodinamiği.....	1
1.2.1. Direnç ve Kaldırma.....	2
1.2.2. Akış Ayrılması .....	5
1.3. Akış Kontrol Yöntemleri .....	8
1.3.1. Aktif Akış Kontrol Yöntemleri.....	9
1.3.1.1. Üfleme ve Emme .....	10
1.3.1.2. Katı Yüzeyin Hareket Ettirilmesi .....	13
1.3.1.3. Yüzey ve Akışkan Arasında Isı Transferi.....	13
1.3.1.4. Mikro-Elektromekanik Uygulamalar (MEMS).....	14
1.4. Pasif Akış Kontrol Yöntemleri .....	14
1.5. Literatür Araştırması.....	16
1.6. Tez Çalışmasının Bilimsel Önemi .....	19
1.7. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	20
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	21
2.1. Türbülanslı Akış ve Temel Denklemler .....	21
2.1.1. Keskin Köşeli Geometri ler Etrafındaki Akışa Ait Türbülans Modeli .....	23
2.1.2. Eğrisel Geometri ler Etrafındaki Akışa Ait Türbülans Modeli .....	24
2.2. Çalışmada Kullanılan Boyutsuz Sayılar .....	28
2.3. Hesaplama Bölgesi ve Sınır Koşulları .....	30

2.4.	Denklemlerin Ayrıklaştırması .....	33
2.5.	Bölge Ayrıklaştırması ve Ağ Yapıları .....	36
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA .....	47
3.1.	Kare Kesitli Silindir Etrafındaki Akış .....	48
3.1.1.	Üfleme ve Emmenin Direnç Katsayısı Üzerindeki Etkisi .....	49
3.1.2.	Üfleme ve Emmenin Basınç Dağılımı Üzerindeki Etkisi.....	56
3.1.3.	Üfleme ve Emmenin Sıcaklık Dağılımı ve Nusselt Sayısı Üzerindeki Etkisi .....	57
3.2.	Beşgen Kesitli Silindir Etrafındaki Akış .....	61
3.2.1.	Üfleme ve Emmenin Direnç Katsayısı Üzerindeki Etkisi .....	61
3.2.2.	Üfleme ve Emmenin Basınç Dağılımı Üzerindeki Etkisi.....	71
3.2.3.	Üfleme ve Emmenin Sıcaklık Dağılımı ve Nusselt Sayısı Üzerindeki Etkisi .....	72
3.3.	Dairesel Kesitli Silindir Etrafındaki Akış.....	74
3.3.1.	Üfleme ve Emmenin Direnç katsayısı Üzerindeki Etkisi .....	75
3.3.2.	Üfleme ve Emmenin Basınç Dağılımı Üzerindeki Etkisi.....	80
3.3.3.	Üfleme ve Emmenin Sıcaklık Dağılımı ve Nusselt Sayısı Üzerindeki Etkisi .....	82
3.4.	Eliptik Kesitli Silindir Etrafındaki Akış .....	83
3.4.1.	Üfleme ve Emmenin Direnç katsayısı Üzerindeki Etkisi .....	83
3.4.2.	Üfleme ve Emmenin Kaldırma Katsayısı Üzerindeki Etkisi .....	86
3.4.3.	Üfleme ve Emmenin Basınç Dağılımı Üzerindeki Etkisi.....	94
3.4.4.	Üfleme ve Emmenin Sıcaklık Dağılımı ve Nusselt Sayısı Üzerindeki Etkisi .....	100
4.	SONUÇLAR.....	107
5.	KAYNAKLAR .....	112

ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

GEÇİRGEN YÜZEYLİ CİSİMLER ETRAFINDAKİ AKIŞTA CİSİMDEN YAPILAN ÜFLEME  
VE EMMENİN AKIŞ VE ISI TRANSFERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mir Elyad VAKHSHOURI

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU  
2020, 118 Sayfa

Bu tez çalışmasında, akış alanı içerisinde yer alan çeşitli geometrilere sahip geçirgen yüzeyle silindirlere aktif akış kontrol yöntemi olarak da tanımlanan, yüzeylerden uygulanan üniform üfleme ve emmenin akış alanı ve ısı transferi üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Sıkıştırılmaz türbülanslı ( $Re \cong 22000$ ) akışın grup ortalamalı Navier-Stokes denklemlerinin çözümünde, Sonlu Hacim Yöntemi, akışın modellenmesinde “Kato-Lauder” iyileştirmeli  $k-\varepsilon$  türbülans modeli ve Reynolds Gerilme Modeli (RSM) kullanılmıştır. En uygun durumları belirlemek üzere kare kesitli silindirin ön, arka, üst-alt ve tüm yüzeylerinden; beşgen kesitli silindirin ön ve tüm yüzeylerinden; dairesel kesitli silindirin tüm yüzeylerinde ve ayrıca eliptik kesitli silindirlere tüm ve yarı üst yüzeylerinden uygulanan üfleme ve emmenin, akış ve ısı transferi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgular direnç, kaldırma, basınç katsayıları ve Nusselt sayısı gibi parametrelerin, üfleme ve emme uygulamasının belirli durumlarında önemli derecede etkilendiğini göstermektedir. Ayrıca çeşitli üfleme-emme durumları için iz bölgesindeki akış yapısı da etkilenmekte olup, direnç kuvvetinde önemli ölçüde düşmelerin olduğu görülmüştür. Silindir yüzeylerinden uygulanan emme ısı transferini iyileştirirken, üflemenin ısı transferini azaltmakta olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Üfleme ve emme, Geçirgen yüzeyle silindir, Isı transferi, Türbülanslı akış

PhD. Thesis

SUMMARY

ANALYSIS OF THE EFFECTS OF INJECTION AND SUCTION ON FLOW AND HEAT  
TRANSFER IN THE FLOW AROUND PERMEABLE BODIES

Mir Elyad VAKHSHOURI

Karadeniz Technical University  
Institute of Physical Sciences  
Mechanical Engineering Department  
Supervisor: Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU  
2020, 118 Pages

In the present thesis, the effects of uniform injection and suction through the surfaces of various permeable bodies which are also defined as the active flow control method on the flow and heat transfer has been investigated numerically. The finite-volume method has been used to solve the ensemble-averaged Navier-Stokes equations for incompressible flow at moderate Reynolds number ( $Re \cong 22000$ ) with the  $k-\varepsilon$  and Reynolds Stress (RSM) turbulence model equations, including the Kato-Launder's modification. To find the optimum conditions, the effects of injection and suction through the front, rear, top-bottom and all surfaces of the square cylinder; the front and all surfaces of the pentagonal cylinder; the all surfaces of the circular cylinder and also the half top and all surfaces of elliptical cylinders are studied. The results reveal that parameters such as drag, lift, pressure coefficient and Nusselt number are influenced drastically in some cases as well as flow field parameters. Besides, the flow structure in the vortex shedding also affected by various injection-suction cases, and significant decreases in drag force have been observed. It has been further found that applying suction through the surfaces of the cylinder enhances the heat transfer while applying injection reduces it.

**Key Words:** Injection and suction, Permeable cylinder, Heat transfer; Turbulent flow



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.1.	Akım çizgileri; a) aerodinamik (streamlined) cisim, b) küt (bluff) cisim (Patel, 1989) .....	2
Şekil 1.2.	Akış alanında bulunan cisme etkiyen direnç ve kaldırma kuvvetleri (Çengel ve Cimbala, 2017) .....	2
Şekil 1.3.	İki boyutlu bir cisim üzerine etki eden basınç ve viskoz kuvvetleri (Çengel ve Cimbala, 2017) .....	3
Şekil 1.4.	Bir uçağın ön bakış alanı (Burgers, 2017) .....	4
Şekil 1.5.	Akım çizgileri ve iz bölgesi; a) Akışa paralel düz levha, b) Akışa dik düz levha, c) Akışa dik silindir (Homsy vd., 2000) .....	5
Şekil 1.6.	Sınır tabaka hız profil şeklinin basınç gradyanının bir fonksiyonu olarak karşılaştırılması ( $dP/dx = -U dU/dx$ ); a) Pozitif, b) Sıfır, c) Hafif negatif, d) Ayrılma noktası, e) Negatif (Çengel ve Cimbala, 2017) .....	6
Şekil 1.7.	Küt cismin yüzeyinden ayrılan sınır tabaka ve arkasındaki iz bölgesi (White, 2010) .....	6
Şekil 1.8.	Yüzey pürüzlülüğünün ayrılma noktası üzerindeki etkisi; a) Pürüzsüz yüzey, b) Pürüzlü yüzey (URL-1, 2007) .....	7
Şekil 1.9.	Dairesel kesitli silindir etrafındaki akış yapısı ve iz bölgesi üzerinde Reynolds sayısının etkisi (Schlichting ve Gersten, 2017) .....	8
Şekil 1.10.	Akış kontrol çalıştırıcı tiplerinin sınıflandırılması (Cattafesta ve Sheplak, 2011) .....	10
Şekil 1.11.	Teğetsel üfleme (Schlichting ve Gersten, 2017) .....	11
Şekil 1.12.	Teğetsel üfleme için sınır tabakanın içerisinde yarığın hemen arkasındaki hız dağılımı (Schlichting ve Gersten, 2017) .....	11
Şekil 1.13.	Teğetsel emme (Schlichting ve Gersten, 2017) .....	11
Şekil 1.14.	Sınır tabakadaki akım çizgilerinin yoğun üfleme ile yön değiştirmesi (Schlichting ve Gersten, 2017) .....	12
Şekil 1.15.	Akış alanı içerisinde dönen küt cisim üzerindeki Magnus Etkisi .....	13
Şekil 1.16.	Pasif akış kontrolünde kullanılan bazı teknikler; a) Gurney kanatçığı, b) Girdap üretici, c) Tümsek, d) Sızma, e) Ayırıcı plaka (Wang ve Feng, 2019) .....	15
Şekil 2.1.	Zaman bağımlı türbülanslı bir büyüklüğün girdap periyodu içerisindeki bileşenleri; a) Türbülans büyüklüğünün sürekli ortam değişimi, b) Zaman adımlı davranış .....	22

Şekil 2.2.	Hesaplama bölgesi ve sınır koşulları; a) Kare silindir, b) Beşgen silindir, c) Daire ve eliptik silindir .....	31
Şekil 2.3.	İki boyutlu kontrol hacmi .....	34
Şekil 2.4.	İki boyutlu hesaplamalı ağ.....	36
Şekil 2.5.	Ağ yapılarının sınıflandırılması; a) Yapılandırılmış, b) Yapılandırılmamış ve c) Hibrit .....	37
Şekil 2.6.	Çarpıklığın belirlenmesinde kullanılan açılar.....	38
Şekil 2.7.	İki boyutlu hücrede düzgünlük parametresi .....	39
Şekil 2.8.	İki boyutlu hücrede en-boy parametresi .....	39
Şekil 2.9.	Kare silindir durumu için hesaplama bölgesi ( $452 \times 322$ ); a) Tüm hesaplama bölgesi, b) Silindire yakın bölgenin büyütülmüş görünümü.....	40
Şekil 2.10.	Beşgen silindir durumu için birinci hesaplama bölgesi ( $666 \times 382 \times 178$ ); a) Tüm hesaplama bölgesi, b) ve c) Silindire yakın bölgenin büyütülmüş görünümü .....	41
Şekil 2.11.	Beşgen silindir durumu için ikinci hesaplama bölgesi ( $357 \times 276$ ); a) Tüm hesaplama bölgesi, b) ve c) Silindire yakın bölgenin büyütülmüş görünümü .	42
Şekil 2.12.	Dairesel silindir durumu için hesaplama bölgesi; a) Tüm hesaplama bölgesi, b) Silindire yakın bölgenin büyütülmüş görünümü .....	43
Şekil 2.13.	Eliptik silindir durumu için birinci hesaplama bölgesi; a) Tüm hesaplama bölgesi, b) Silindire yakın bölgenin büyütülmüş görünümü .....	43
Şekil 2.14.	Eliptik silindir durumu için ikinci hesaplama bölgesi; a) Tüm hesaplama bölgesi, b) Silindire yakın bölgenin büyütülmüş görünümü .....	44
Şekil 3.1.	Yüzeylerinden üfleme ve emme uygulanmayan kare silindirin merkez çizgisi üzerindeki $\bar{u}/u_\infty$ değeri .....	48
Şekil 3.2.	Kare kesitli silindirin arka yüzeyinden yapılan üfleme için direnç katsayısının $\Gamma_{corr}$ ile değişimi.....	49
Şekil 3.3.	Kare silindirin tüm yüzeylerinden yapılan üfleme için direnç katsayısının $\Gamma_{corr}$ ile değişimi .....	51
Şekil 3.4.	Akış alanı içerisinde yer alan kare silindir için çeşitli üfleme-emme konfigürasyonlarında direnç katsayısının $\Gamma$ ile değişimi.....	52
Şekil 3.5.	Kritik direnç katsayılarının ortaya çıktığı üfleme-emme durumlarındaki ortalama akım çizgileri .....	53
Şekil 3.6.	Kritik direnç katsayılarının ortaya çıktığı üfleme-emme durumlarındaki eş hız dağılımları .....	54
Şekil 3.7.	Kritik direnç katsayılarının ortaya çıktığı üfleme-emme durumlarındaki ortalama hız vektörleri .....	56

Şekil 3.8.	Kare kesitli silindir yüzeylerinde ortalama basınç katsayısının değişimi .....	57
Şekil 3.9.	Silindirin merkez çizgisi üzerindeki çeşitli üfleme-emme değerleri için boyutsuz ortalama sıcaklık dağılımı; a) Ön yüzey, b) Üst-alt yüzeyler, c) Arka yüzey, d) Tüm yüzeyler .....	58
Şekil 3.10.	Çeşitli üfleme-emme durumları için zaman ortalamalı $Nu$ sayısının $\Gamma$ ile değişimi .....	60
Şekil 3.11.	Akış alanı içerisinde yer alan beşgen silindir için, direnç katsayısının $\Gamma$ ile değişimi .....	62
Şekil 3.12.	Bazı kritik üfleme-emme durumları için zaman ortalamalı akım çizgileri .....	62
Şekil 3.13.	Tüm yüzeylerden uygulanan üfleme-emmede bazı $\Gamma$ değerleri için eş hız dağılımları .....	63
Şekil 3.14.	Tüm yüzeylerden uygulanan üfleme-emmede bazı $\Gamma$ değerleri için cisim yakın civarında ortalama hız vektörleri .....	66
Şekil 3.15.	Ön yüzeylerden uygulanan üfleme-emmede bazı $\Gamma$ değerleri için eş hız dağılımları .....	67
Şekil 3.16.	Ön yüzeylerden uygulanan üfleme-emmede bazı $\Gamma$ değerleri için cisim yakın civarında ortalama hız vektörleri .....	70
Şekil 3.17.	Beşgen kesitli silindir yüzeylerindeki ortalama basınç katsayısının değişimi; a) Tüm yüzeylerden uygulanan üfleme-emme, b) Ön yüzeylerden uygulanan üfleme-emme .....	71
Şekil 3.18.	Beşgen kesitli silindirin merkez çizgisi üzerindeki çeşitli üfleme-emme değerleri için boyutsuz ortalama sıcaklık dağılımı; a) Ön yüzey, b) Tüm yüzeyler .....	73
Şekil 3.19.	Beşgen kesitli silindir için çeşitli üfleme-emme durumlarında zaman ortalamalı $Nu$ sayısının $\Gamma$ ile değişimi .....	74
Şekil 3.20.	Akış alanı içerisinde yer alan dairesel kesitli silindir için direnç katsayısının $\Gamma$ ile değişimi .....	76
Şekil 3.21.	Bazı üfleme-emme durumlarında ortalama akım çizgileri .....	76
Şekil 3.22.	Bazı üfleme-emme durumları için eş hız dağılımları .....	77
Şekil 3.23.	Bazı üfleme-emme durumları için cisim yakın civarındaki ortalama hız vektörleri .....	79
Şekil 3.24.	Dairesel kesitli silindir yüzeyinde ortalama basınç katsayısının değişimi .....	81
Şekil 3.25.	Dairesel kesitli silindirin yüzeyinde ortalama basınç katsayısının çeşitli $\Gamma$ değerlerindeki değişimi .....	81
Şekil 3.26.	Dairesel kesitli silindirin merkez çizgisi üzerinde çeşitli $\Gamma$ değerleri için boyutsuz ortalama sıcaklığın değişimi .....	82
Şekil 3.27.	Akış alanı içerisinde yer alan dairesel kesitli silindir için zaman ortalamalı	

	<i>Nu</i> sayısının $\Gamma$ ile değişimi .....	83
şekil 3.28.	$AR = 0.5$ değerine sahip eliptik kesitli silindir için direnç katsayısının $\Gamma$ ile değişimi .....	84
şekil 3.29.	$AR = 0.25$ değerine sahip eliptik kesitli silindir için direnç katsayısının $\Gamma$ ile değişimi .....	85
şekil 3.30.	$AR = 0.125$ değerine sahip eliptik kesitli silindir için direnç katsayısının $\Gamma$ ile değişimi .....	86
şekil 3.31.	Çeşitli en/boy oranlarındaki eliptik kesitli silindir için 40 delikten yapılan üfleme-emmede kaldırma katsayısının $\Gamma$ ile değişimi .....	87
şekil 3.32.	Akış alanı içerisinde yer alan eliptik kesitli silindirlerin yarı üst yüzeyinden uygulanan üfleme-emmede kaldırma katsayısının delik sayısına bağlı olarak $\Gamma$ ile değişimi .....	88
şekil 3.33.	$AR = 0.5$ oranındaki eliptik kesitli silindir in yarı üst yüzeyinden yapılan üfleme-emmede eş hız dağılımları .....	88
şekil 3.34.	$AR = 0.5$ oranındaki eliptik kesitli silindir in yarı üst yüzeyinden yapılan üfleme-emmede ortalama hız vektörleri .....	89
şekil 3.35.	$AR = 0.25$ oranındaki eliptik kesitli silindir in yarı üst yüzeyinden yapılan üfleme-emmede eş hız dağılımları.....	90
şekil 3.36.	$AR = 0.25$ oranındaki eliptik kesitli silindir in yarı üst yüzeyinden yapılan üfleme-emmede ortalama hız vektörleri .....	91
şekil 3.37.	$AR = 0.125$ oranındaki eliptik kesitli silindir in 160 deliğe sahip yarı üst yüzeyinden yapılan üfleme-emmede eş hız dağılımlar .....	92
şekil 3.38.	$AR = 0.125$ oranındaki eliptik kesitli silindir in 160 deliğe sahip yarı üst yüzeyinden yapılan üfleme-emmede ortalama hız vektörleri .....	93
şekil 3.39.	$AR = 0.5$ oranına sahip eliptik kesitli silindir in üst yüzeyinden uygulanan üflemede basınç katsayısının değişimi .....	95
şekil 3.40.	$AR = 0.5$ oranına sahip eliptik kesitli silindir in üst yüzeyinden uygulanan emmede basınç katsayısının değişimi .....	95
şekil 3.41.	$AR = 0.5$ oranına sahip eliptik kesitli silindir in yarı üst yüzeylerinden uygulanan üfleme ve emmede üflemez yarı alt yüzeylerde basınç katsayısının değişimi .....	96
şekil 3.42.	$AR = 0.25$ oranına sahip eliptik kesitli silindir in üst yüzeyinden uygulanan üflemede basınç katsayısının değişimi .....	97
şekil 3.43.	$AR = 0.25$ oranına sahip eliptik kesitli silindir in üst yüzeyinden uygulanan emmede basınç katsayısının değişimi .....	97
şekil 3.44.	$AR = 0.25$ oranına sahip eliptik kesitli silindir in yarı üst yüzeylerinden uygulanan üfleme ve emmede üflemez yarı alt yüzeylerde basınç katsayısının değişimi .....	98

Şekil 3.45. $AR = 0.125$ oranına sahip 160 delikli eliptik kesitli silindirin üst yüzeyinden uygulanan üflemede basınç katsayısının değişimi .....	99
Şekil 3.46. $AR = 0.125$ oranına sahip 160 delikli eliptik kesitli silindirin üst yüzeyinden uygulanan emmede basınç katsayısının değişimi .....	99
Şekil 3.47. $AR = 0.125$ oranına sahip 160 delikli eliptik kesitli silindirin yarı üst yüzeylerinden uygulanan üfleme ve emmede üflemez yarı alt yüzeylerde basınç katsayısının değişimi .....	100
Şekil 3.48. $AR = 0.5$ oranına sahip eliptik kesitli silindirin merkez çizgisi üzerinde boyutsuz sıcaklık değişimi a) Tüm yüzeylerden üfleme-emme, b) Yarı üst yüzeyden üfleme-emme .....	101
Şekil 3.49. $AR = 0.25$ oranına sahip eliptik kesitli silindirin merkez çizgisi üzerinde boyutsuz sıcaklık değişimi a) Tüm yüzeylerden üfleme-emme, b) Yarı üst yüzeyden üfleme-emme .....	102
Şekil 3.50. $AR = 0.125$ oranına sahip eliptik kesitli silindirin merkez çizgisi üzerinde boyutsuz sıcaklık değişimi a) Tüm yüzeylerden 40 delikten üfleme-emme, b) Yarı üst yüzeyden 40 delikten üfleme-emme, c) Tüm yüzeylerden 160 delikten üfleme-emme, d) Yarı üst yüzeyden 160 delikten üfleme-emme ....	103
Şekil 3.51. $AR = 0.5$ oranına sahip eliptik kesitli silindir için zaman ortalamalı $Nu$ sayısının $\Gamma$ ile değişimi .....	105
Şekil 3.52. $AR = 0.25$ oranına sahip eliptik kesitli silindir için zaman ortalamalı $Nu$ sayısının $\Gamma$ ile değişimi .....	106
Şekil 3.53. $AR = 0.125$ oranına sahip eliptik kesitli silindir için zaman ortalamalı $Nu$ sayısının $\Gamma$ ile değişimi .....	106

## TABLULAR DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 2.1. Düzeltilmiş üfleme-emme katsayısı için $a$ ve $b$ değerleri .....	45
Tablo 2.2. Kare silindir durumu için ağ yoğunluğunun detayları .....	45
Tablo 2.3. Beşgen silindir durumu için ağ yoğunluğunun detayları .....	45
Tablo 2.4. Dairesel silindir durumu için ağ yoğunluğunun detayları .....	45
Tablo 2.5. En boy oranı 0.5 olan eliptik silindir durumu için ağ yoğunluğunun detayları .	45
Tablo 2.6. En boy oranı 0.25 olan eliptik silindir durumu için ağ yoğunluğunun detayları.....	46
Tablo 2.7. En boy oranı 0.125 olan eliptik silindir durumu için ağ yoğunluğunun detaylar.....	46

## SEMBOLLER DİZİNİ

$A$	$[m^2]$	: Ön bakış alanı
$\vec{A}$	[-]	: Yüzey alan vektörü
$AR$	[-]	: Modelin genişliğinin, çap veya kenar uzunluğuna oranı, $AR = H/L$
$C_1, C_2, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_{\varepsilon 3}, C_{\mu}, \sigma_{\varepsilon}, \sigma_k$	[-]	: Türbülans modelleri sabitleri
$C_D, C_d$	[-]	: Direnç katsayısı
$C_{ij}$	[-]	: RSM türbülans modeli taşınım terimi
$C_L$	[-]	: Kaldırma katsayısı
$C_P$	[-]	: Basınç katsayısı
$C_F$	[-]	: Perforasyon yoğunluğu
$D$	[m]	: Karakteristik uzunluk
$D_{L,ij}$	[-]	: RSM türbülans modeli molekular yayılım terimi
$D_{T,ij}$	[-]	: RSM türbülans modeli türbülanslı yayılım terimi
$E$	[-]	: RSM türbülans modelindeki toplam enerji
$f$	[Hz]	: Periyodik hareketin frekansı
$F(\phi)$	[-]	: Bir $\phi$ değişkeni için mekânsal ayrıklaştırma
$F_D$	[-]	: Cisme etki eden direnç kuvveti
$F_{ij}$	[-]	: RSM türbülans modeli dönme kaynaklı gerilme üretimi terimi
$F_L$	[-]	: Cisme etki eden kaldırma kuvveti
$G_{ij}$	[-]	: RSM türbülans modeli kaldırma kaynaklı gerilme terimi
$h$	$[W/m^2K]$	: Isı taşınım katsayısı
$H$	[m]	: Silindirin kenar veya çap uzunluğu
$I$	[-]	: Türbülansın şiddeti
$k$	$[W/mK]$	: Isı iletim katsayısı
$k$	[-]	: Türbülans kinetik enerjisi

$L$	[m]	: Karakteristik uzunluk
$n$	[-]	: Silindir yüzeyindeki delik sayısı
$Nu$	[-]	: Nusselt sayısı
$\overline{Nu}$	[-]	: Ortalama Nusselt sayısı
$P$	[N/m <sup>2</sup> ]	: Cismin yüzeyindeki alana etkiyen basınç
$P_{ij}$	[-]	: RSM türbülans modeli gerilme üretimi terimi
$P_k$	[-]	: Türbülans kinetik enerjisi (k)'nın üretimi
$Pr$	[-]	: Prandtl sayısı
$Pr_t$	[-]	: Prandtl sayısı
$P_\infty$	[N/m <sup>2</sup> ]	: Serbest akışın statik basıncını
$r_\mu$	[-]	: Viskozite oranı
$Re$	[-]	: Reynolds sayısı
$S$	[-]	: Akışkanın simetrik şekil değişme tensörü
$S_\phi$	[-]	: $\phi$ 'nin kaynak terimi
$St$	[-]	: Struhal sayısı
$T_0$	[K]	: Refrans sıcaklık
$T_w$	[K]	: Duvar sıcaklığı
$T_\infty$	[K]	: Serbest akım sıcaklığı
$u, U$	[m/s]	: Yatay hız
$u_w, v_w, V_n$	[m/s]	: Silindir yüzeylerinden uygulanan hız
$U_\infty$	[m/s]	: Yukarı akım (serbest akım) hızı
$v$	[m/s]	: Düşey hız
$\vec{v}$	[-]	: Hız vektörü
$u'_i u'_j$	[-]	: Reynolds gerilmeleri
$u'_j T'$	[-]	: Isı akısı
$V$	[m <sup>3</sup> ]	: Kontrol hacmi
$x, y$	[-]	: Kartezyen koordinatlar
$Y_M$	[-]	: RSM türbülans modelinde dilasyon yutulması terimi
$\Gamma$	[-]	: Üfleme-emme katsayısı
$\Gamma_{corr}$	[-]	: Düzeltilmiş üfleme-emme katsayısı



$\Gamma_\phi$	[-]	: $\phi$ 'nin yayılım (diffusion) katsayısı
$\Delta t$	[s]	: Zaman adımı
$\varepsilon$	[-]	: Türbülans kinetik enerjisi yutulma miktarı
$\varepsilon_{ij}$	[-]	: RSM türbülans modeli yutulma terimi
$\delta_{ij}$	[-]	: Kronecker delta
$\theta$	[°]	: Diferansiyel alanının normalinin akış yönü ile yaptığı açıdır
$\theta_{max}$	[°]	: En büyük hücre veya yüzey açısı
$\theta_{min}$	[°]	: En küçük hücre veya yüzey açısı
$\theta_e$	[°]	: Hücre veya yüzeyin eşkenar açısı
$\kappa$	[-]	: Von Karman sabiti
$\mu$	[kg/m. s]	: Dinamik viskozite
$\mu_0$	[kg/m. s]	: Refrans viskozite
$\mu_t$	[kg/m. s]	: Türbülanslı dinamik viskozite
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	: Kinematik viskozite
$\nu_t$	[-]	: Türbülanslı kinematik viskozite
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	: Yoğunluk
$\tau_w$	[-]	: Cidardaki kayma gerilmesi
$\phi$	[-]	: Herhangi bir bağımlı değişken (skaler büyüklük)
$\phi_{ij}$	[-]	: RSM türbülans modeli basınç kaynaklı gerilme
$\Omega$	[-]	: Yerel vortisite
$\nabla_\phi$	[-]	: $\phi$ 'nin gradyanı

### Alt indisler

$0$	: Refrans değer
$C$	: Soğuk duvar
$max$	: Maksimum değer
$min$	: Minimum değer
$n$	: Normal yön

$T, t$	: Türbülans
$W, w$	: Duvar değeri
$\infty$	: Yukarı akım (serbest akım) değeri
$\phi$	: Herhangi bir bağımlı değişken (skaler büyüklük)

### Üst indisler

'	: Çalkantılı büyüklük
—	: Zaman ortalamalı büyüklük
~	: Periyodik büyüklük
→	: Vektörel büyüklük

### Özel karakterler

DNS	: Doğrudan Sayısal Benzeşim
LES	: Büyük Girdap Benzeşimi
RSM	: Reynolds Gerilme Modeli
RANS	: Reynolds-ortalamalı Navier-Stokes

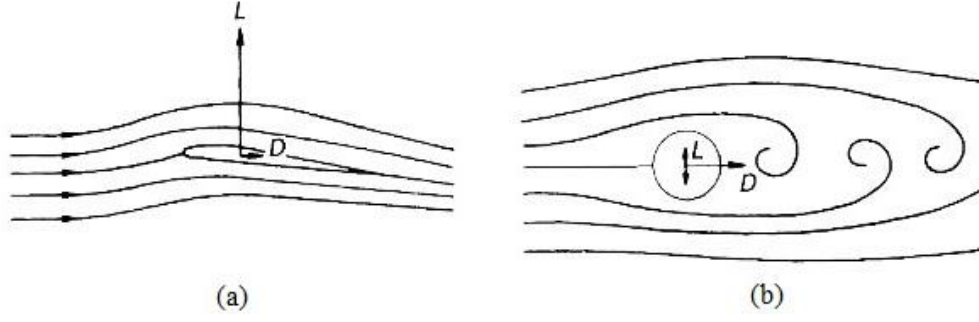
## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Cisimler etrafındaki akışta; yüksek binalar, köprüler, petrol platformları, mikroelektromekanik (MEMS) sistemler ve ısı değiştirgeçleri gibi akış alanı içerisinde sabit duran cisimler ve araba, uçak, denizaltı gibi akış alanı içerisinde hareket eden taşıtlar üzerinde aerodinamik kuvvetler etkili olup, bu etki sonucunda akış kaynaklı problemler ortaya çıkmaktadır. Cisimler etrafındaki akışta; cismin akış içerisinde hareketine karşı gelen direnç kuvveti veya cisimlerin kesit şekli ve akış hızlarından kaynaklanan akış ayrılması, titreşim ve dalgalanan kuvvetler gibi çeşitli özellikler ortaya çıkar. Bu özellikler ve cisimlerin arkasındaki girdap yapısı; endüstriyel ve mühendislik uygulamalarının tasarım aşamasında birer inceleme parametresi olarak göz önüne alınmaktadır. Bu parametreler arasında titreşim kontrolü, dinamik yükleme, kaldırma ve direnç kontrolü, akustik etkileri azaltma, yüksek hızlı sistemlerin ısı kontrolü ve ısı değiştirgeçlerinde ısı transferinin iyileştirilmesi sayılabilir. Bu etkilerin neden olduğu olumsuzlukların giderilmesi veya azaltması için aktif ve pasif akış kontrol yöntemleri kullanılmaktadır.

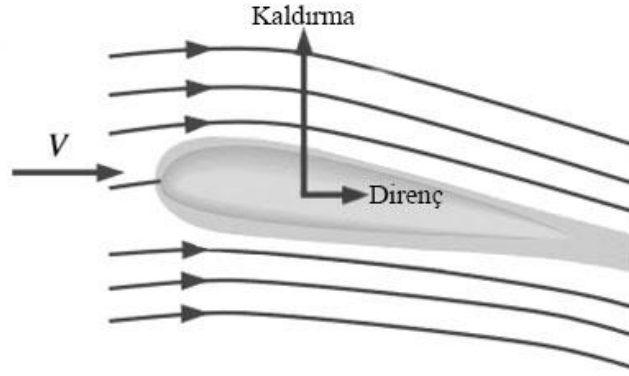
### 1.2. Küt Cisim Aerodinamiği

Küt cisim; yüzeyinin büyük bir kısmı boyunca akış ayrılmasının ortaya çıktığı bir gövde olarak tanımlanabilir. Küt cisimlerin aerodinamik özellikleri genel olarak aerodinamik cisimlerden farklıdır. Uçak kanatları gibi aerodinamik cisimlerde yuvarlak bir burun, ince bir profil ve keskin bir arka kenar bulunur (Şekil 1.1 a). Bu cisimlerde akış ayrılma bölgesi oldukça küçüktür ve kaldırma kuvveti direnç kuvvetine göre çok daha yüksektir. Öte yandan küt cisim kararsız davranış gösterebilen geniş bir akış ayrılması bölgesine sahiptir ve direnç kuvveti kaldırma kuvveti ile karşılaştırılabilir düzeydedir (Şekil 1.1 b).



Şekil 1.1. Akım çizgileri; a) aerodinamik (streamlined) cisim, b) küt (bluff) cisim (Patel, 1989).

Yukarıda da bahsedildiği gibi bir cismin etrafındaki akışta, cisme etkiyen kuvvetler mevcuttur. Şekil 1.2’de görüldüğü gibi cismin etrafındaki akış doğrultusunda ortaya çıkan aerodinamik kuvvet direnç kuvveti (drag), akışa dik yönde etkiyen aerodinamik kuvvet kaldırma kuvveti (lift) olarak tanımlanır.



Şekil 1.2. Akış alanında bulunan cisme etkiyen direnç ve kaldırma kuvvetleri (Çengel ve Cimbala, 2017).

### 1.2.1. Direnç ve Kaldırma

Bir akışkanın katı bir cisim etrafındaki hareketinde akışkan yüzeye dik olarak basınç ve yüzeye paralel olarak viskoz kuvvetleri uygular. Ortaya çıkan basınç ve viskoz kuvvetlerin akış yönündeki bileşenine direnç kuvveti ve akış yönüne dik olarak etki eden bileşenine kaldırma kuvveti denir. Direnç, tıpkı sürtünme gibi çoğunlukla arzu edilmeyen

bir etkidir ve bunu en aza indirebilmek önemli bir hedeftir. Örneğin direnç kuvvetinin minimuma düşürülmesi otomobiller, denizaltılar ve hava taşıtlarındaki yakıt tüketiminin azaltılması; şiddetli rüzgârlara maruz kalan yapıların dayanıklılığı ve gürültü ile titreşimin azalmasını sağlar. Ancak otomobil frenlemesi gibi bazı durumlarda direnç çok faydalı etki sağlamaktadır ve bu gibi durumlarda da direncin yüksek olması önem kazanır (Çengel ve Cimbala, 2017).

Şekil 1.3'te görüldüğü gibi cismin yüzeyindeki  $dA$  diferansiyel alanına etkiyen basınç kuvveti ve viskoz kuvvetler sırasıyla  $PdA$  ve  $\tau_w dA$ 'dır. İki boyutlu akışta  $dA$ 'ya etkiyen diferansiyel direnç ve kaldırma kuvvetleri aşağıdaki gibidir;

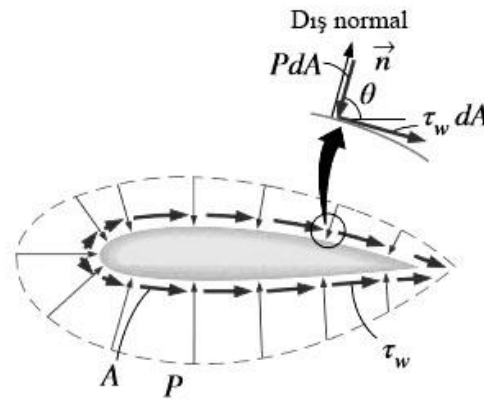
$$dF_D = -P dA \cos \theta + \tau_w dA \sin \theta \quad (1.1)$$

$$dF_L = -P dA \sin \theta - \tau_w dA \cos \theta \quad (1.2)$$

Burada  $\theta$ ;  $dA$  diferansiyel alanına ait normalin akış yönü ile yaptığı açıdır. (1.1) ve (1.2) denklemlerinden integral alınırsa;

$$\text{Direnç kuvveti: } F_D = \int_A dF_D = \int_A (-P \cos \theta + \tau_w \sin \theta) dA \quad (1.3)$$

$$\text{Kaldırma kuvveti: } F_L = \int_A dF_L = - \int_A (P \sin \theta + \tau_w \cos \theta) dA \quad (1.4)$$



Şekil 1.3. İki boyutlu bir cisim üzerine etki eden basınç ve viskoz kuvvetleri (Çengel ve Cimbala, 2017).

Direnç ve kaldırma kuvvetleri; akışkanın yoğunluğu  $\rho$ , yukarı akım (gelen akış) hızı  $U_\infty$  ve aralarında cismin büyüklüğünün, şeklinin, duruş biçiminin de bulunduğu bir dizi parametreye bağlı olup çeşitli durumlar için bu kuvvetlerin kullanımı pratik değildir. Bunun yerine cismin direnç ve kaldırma karakteristiklerini temsil eden uygun boyutsuz sayılarla çalışma yapmanın daha elverişli olduğu bilinmektedir.

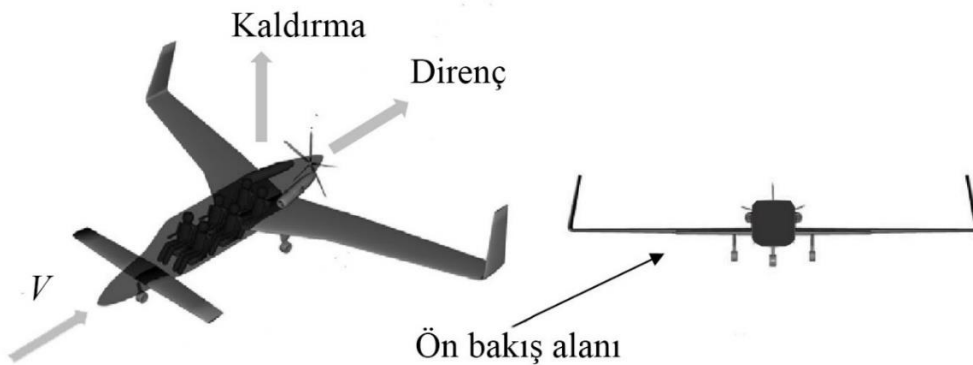
$$\text{Direnç katsayısı: } C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A} \quad (1.5)$$

$$\text{Kaldırma katsayısı: } C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A} \quad (1.6)$$

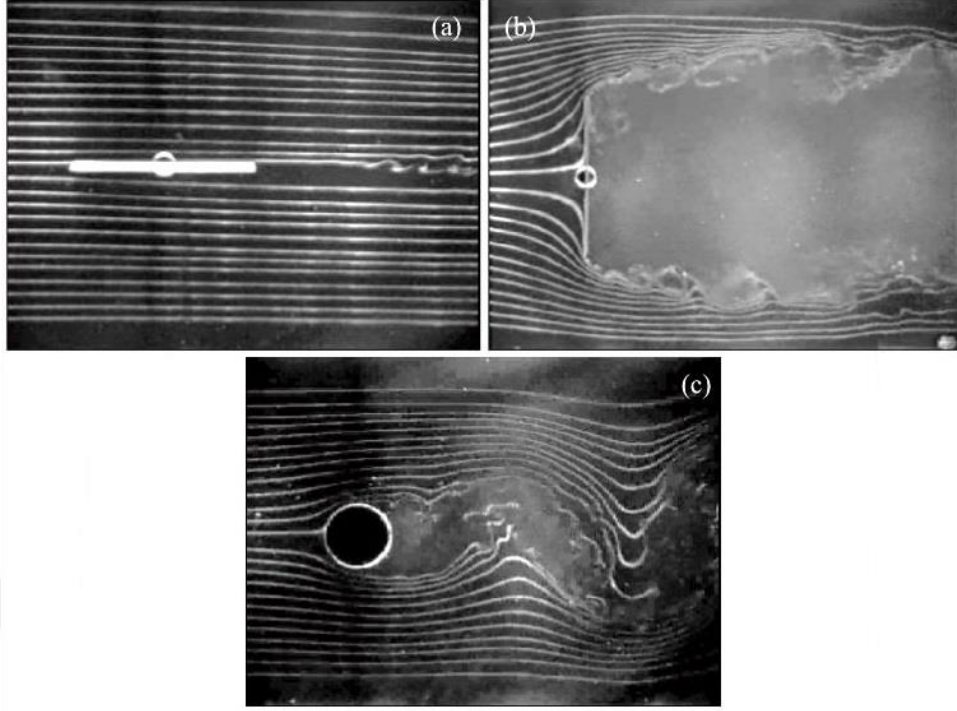
Burada  $A$  ön bakış alanı olup bir başka deyişle, cisme yaklaşan akış yönünden bakan bir kişi tarafından görülen alandır (Şekil 1.4). Toplam direnç kuvveti ( $F_D$ ); sürtünme ile basınç kuvvetinin birleşik etkisi olup, küt bir cisme akış doğrultusunda uygulanan net kuvvettir. Şekil 1.5'te de görüldüğü gibi akışa paralel düz levha için direnç kuvveti; bütünüyle sürtünme direncinden ( $F_{D,sürtünme}$ ), akışa dik düz levha için ise tamamen basınç direncinden ( $F_{D,basınç}$ ) kaynaklanır. Öte yandan akışa dik silindir için direnç kuvveti her ikisinden (ağırlıklı olarak basınç direncinden) oluşmaktadır.

$$F_D = F_{D,sürtünme} + F_{D,basınç} \quad (1.7)$$

$$C_D = C_{D,sürtünme} + C_{D,basınç} \quad (1.8)$$



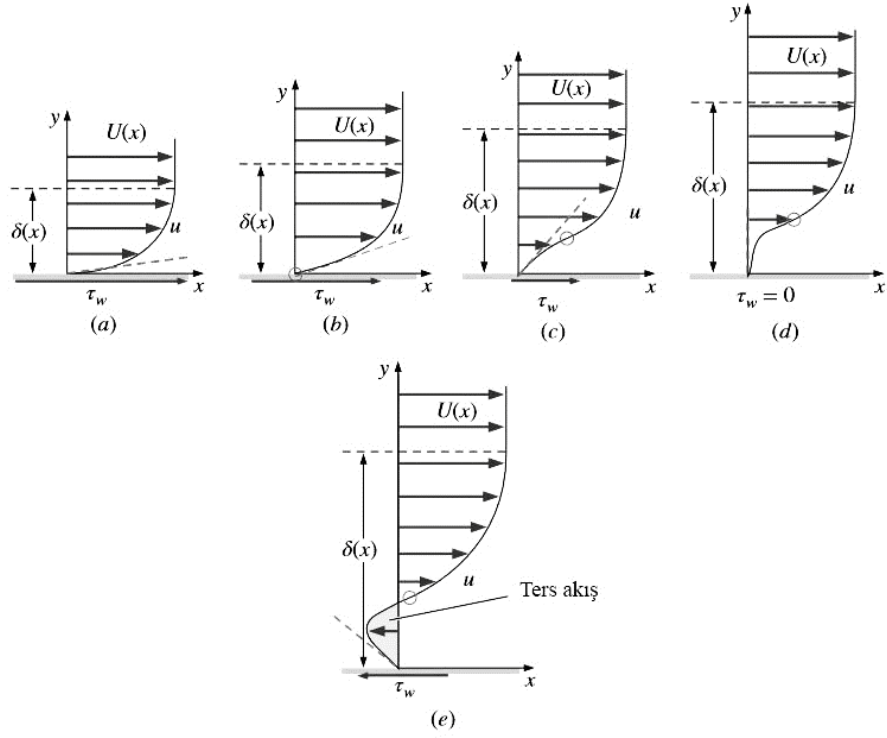
Şekil 1.4. Bir uçağın ön bakış alanı (Burgers, 2017).



Şekil 1.5. Akım çizgileri ve iz bölgesi; a) Akışa paralel düz levha, b) Akışa dik düz levha, c) Akışa dik silindir (Homsy vd., 2000).

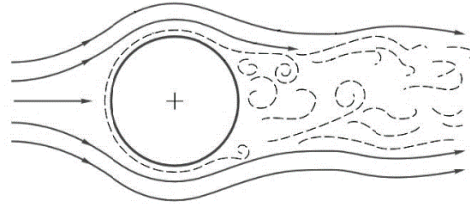
### 1.2.2. Akış Ayrılması

Akışın veya sınır tabakanın yüzeyden ayrılması tamamen basınç dağılımı ile ilişkilidir. Özellikle küt cisimler etrafındaki akışta ortaya çıkan bu durumda, hareketli akışkan içerisinde sabit duran veya akışkan içerisinde hareket eden küt bir cismin yüzeyine çarpan akışkan hızı başlangıçta sıfır olup, basıncı maksimum değerini almaktadır. İlk başta cisim yüzeyindeki ( $dP/dx < 0$ ) basınç gradyanı, cidar yakınında sürtünme kuvvetlerinin de etkisiyle ters basınç gradyanına ( $dP/dx > 0$ ) dönüşür. Cidardaki kayma gerilmesi değerinin sıfır olduğu durumda ise ( $\tau_w = \mu \frac{du}{dy} = 0$ ) akış ayrılması gerçekleşir. Ayrılma noktasında yüzeye yakın akışkanın basınç gradyanını yenmek için yeterli enerjisi yoktur ve dış basınç etkisiyle ters yönde harekete başlar (Şekil 1.6).



Şekil 1.6. Sınır tabaka hız profil şeklinin basınç gradyanının bir fonksiyonu olarak karşılaştırılması ( $dP/dx = -U dU/dx$ ); a) Pozitif, b) Sıfır, c) Hafif negatif, d) Ayrılma noktası, e) Negatif (Çengel ve Cimbala, 2017).

Ayrılma durumunda ana akış yönünden gelen akışkan, geri yöndeki akışa engel olur ve bir noktada akış yüzeyden ayrılır. Yüzeyden ayrılan akış, cismin arkasında düzenli bir girdap hareketinin olduğu bir iz bölgesi meydana getirir (Şekil 1.7).



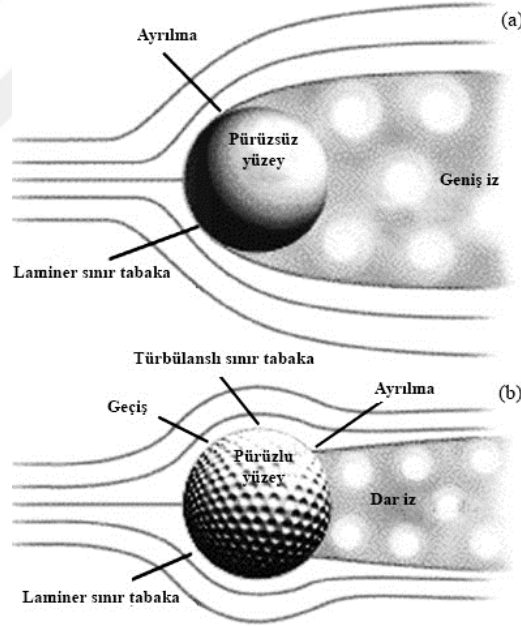
Şekil 1.7. Küt cismin yüzeyinden ayrılan sınır tabaka ve arkasındaki iz bölgesi (White, 2010).



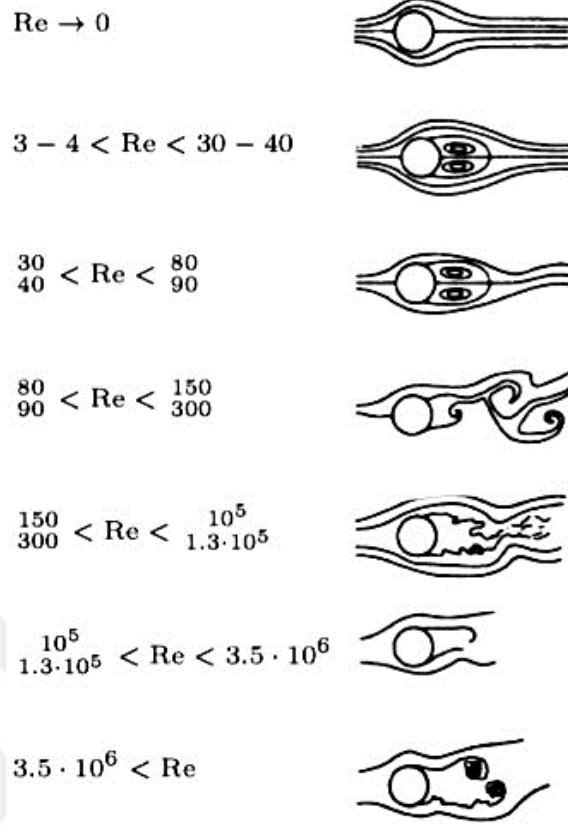
Yüzeyden ayrılarak cismin arkasında Karman caddesi olarak ortaya çıkan bu bölgedeki girdaplar ana akış hızından daha küçük bir hız ile hareket ederler. Bu periyodik hareketin frekansı  $f$  olmak üzere tanımlanan Strouhal sayısı:

$$St = \frac{fD}{U_\infty} \quad (1.9)$$

şeklindedir. Strouhal sayısı periyodik hareketin ana akış hareketine göre olan bir ölçüsünü verir. Burada  $D$  karakteristik uzunluk ve  $U_\infty$  serbest akış hız değerini göstermektedir (Schlichting, 1979; White, 2010). Ayrılma noktasının konumu; Reynolds sayısı, yüzey pürüzlülüğü ve serbest akıştaki çalkantıların düzeyi gibi bir çok etkene bağlıdır (Şekil 1.8 ve Şekil 1.9). Ayrıca katı yüzeyin geometrisinde keskin köşeler veya ani değişimler yoksa ayrılmanın tam olarak nerede olduğunu kestirmek oldukça zordur (Çengel ve Cimbala, 2017).



Şekil 1.8. Yüzey pürüzlülüğünün ayrılma noktası üzerindeki etkisi; a) Pürüzsüz yüzey, b) Pürüzlü yüzey (URL-1, 2007).



Şekil 1.9. Dairesel kesitli silindir etrafındaki akış yapısı ve iz bölgesi üzerinde Reynolds sayısının etkisi (Schlichting ve Gersten, 2017).

### 1.3. Akış Kontrol Yöntemleri

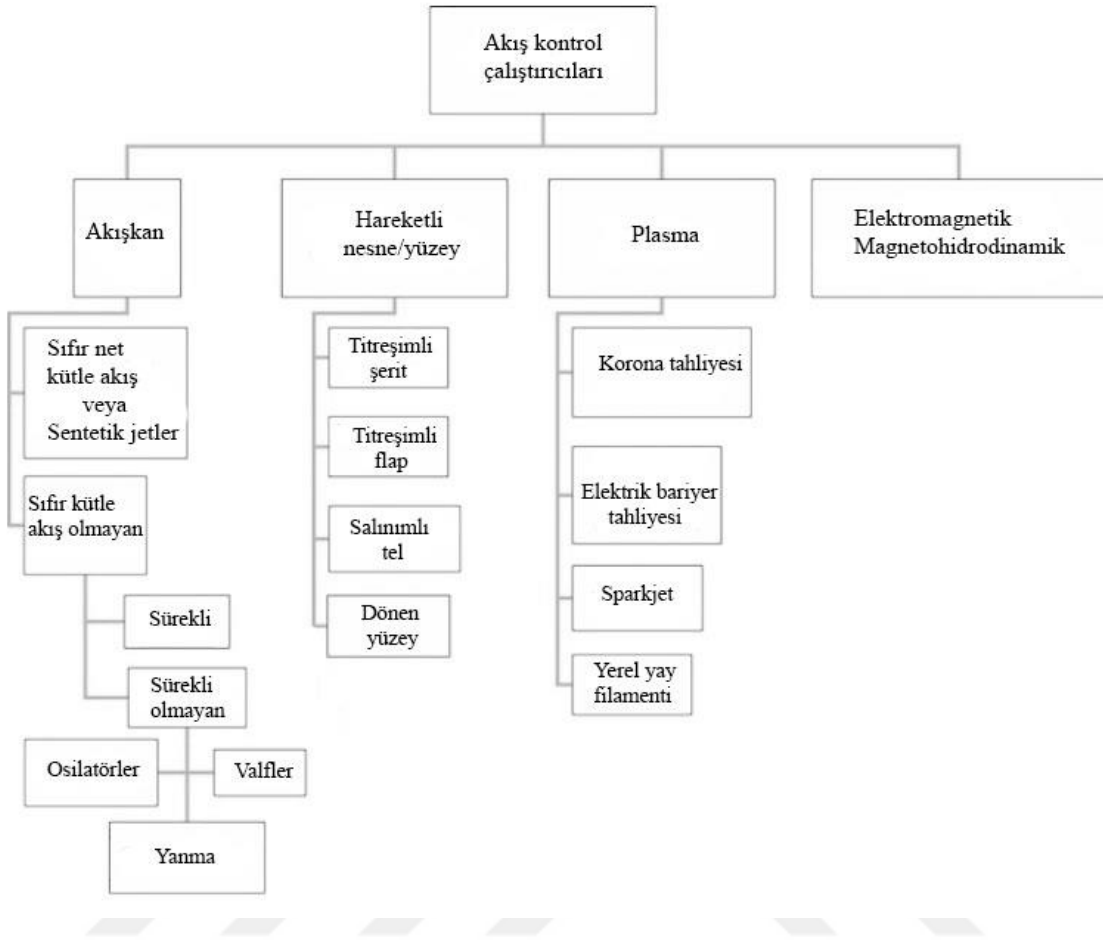
Cisimlerin akış ortamı içinde bulunması ve akışkan ile olan etkileşimi nedeniyle, akış kaynaklı sınır tabaka ve akış ayrılması ortaya çıkmaktadır. Bu özellikler direnç ve kaldırma katsayısı, girdap kopma frekansı ve ısı transferi gibi aerodinamik ve ısıl davranışı etkilemektedir (Schlichting ve Gersten, 2017). Bu büyüklüklerin akış-cisim etkileşimi üzerindeki olumsuz etkilerinin ortadan kaldırılması veya azaltılması; akış alanının istenilen kısmının, doğal şeklinin veya karakterinin uygun şekilde değiştirilmesi çeşitli aktif ve pasif yöntemlerle mümkün olmaktadır (Gad-el-Hak, 2000). Aktif yöntemlerde cisim üzerinden akışkana çeşitli şekillerde enerji aktarımı söz konusu iken, pasif yöntemlerde ilave bir güç kullanılmaksızın sistemde çeşitli geometrik ve yapısal değişiklikler yapılmaktadır. Bu yöntemlerin kullanımında sistemin özellikleri göz önüne alınıp optimum yöntem

kullanılmalıdır. Aktif akış kontrol yönteminde ilave güç gereksiniminin pasif yöntemde olmamasına rağmen aktif akış kontrol yöntemlerinde kontrol mekanizmasının ihtiyaca göre kullanılabilir olması önemli bir avantaj sağlar.

### **1.3.1. Aktif Akış Kontrol Yöntemleri**

Akış ortamına ilave enerji veya güç transferinin yapıldığı herhangi bir aktif akış kontrol sistemi üç ana bileşenden oluşur: çalıştırıcı (actuator), denetleyici (controller) ve sensör. Aktif akış kontrol yöntemlerini optimize etmek için Şekil 1.10'da görüldüğü gibi çeşitli çalıştırıcı tipleri kullanılmaktadır. Bazı önemli aktif akış kontrol yöntemleri şunlardır:

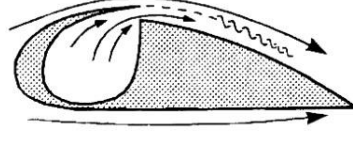
- Üfleme ve emme
- Katı yüzeyin hareket ettirilmesi
- Yüzey ve akışkan arasında ısı transferi
- Mikro-elektromekanik uygulamalar (MEMS)



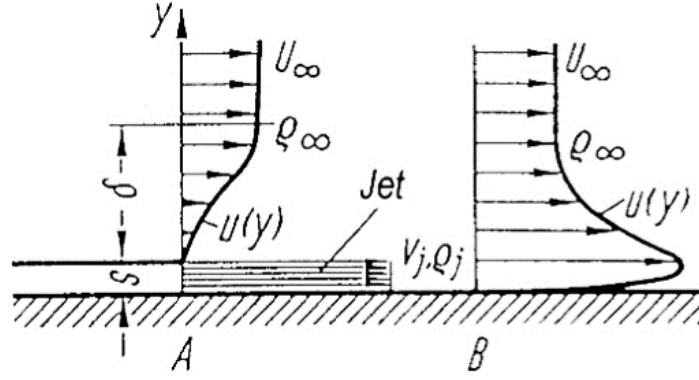
Şekil 1.10. Akış kontrol çalıştırıcı tiplerinin sınıflandırılması (Cattafesta ve Sheplak, 2011).

### 1.3.1.1. Üfleme ve Emme

Üfleme ve emme akış ortamı içerisindeki cismin yüzeyinden teğetsel ve sürekli olarak yapılabilmektedir. Teğetsel üfleme (Şekil 1.11); sınır tabakada enerjisini kaybetmiş ve yavaşlamış olan akışkana ilave enerji sağlamaktan ibarettir. Akış ayrılması, sınır tabakaya kinetik enerji beslemesi ile ortadan kalkar. Örneğin uçak kanatlarında flapların etkisi ön kısımdan teğetsel üfleme yapmak suretiyle artmaktadır. Şekil 1.12’de görüldüğü gibi sınır tabakada teğetsel üfleme konumunun hemen arkasında, bir duvar jeti profili oluşmaktadır (Schlichting ve Gersten, 2017).

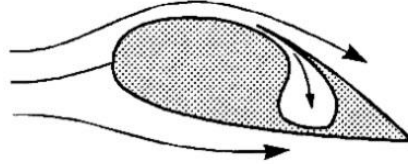


Şekil 1.11. Teğetsel üfleme (Schlichting ve Gersten, 2017).



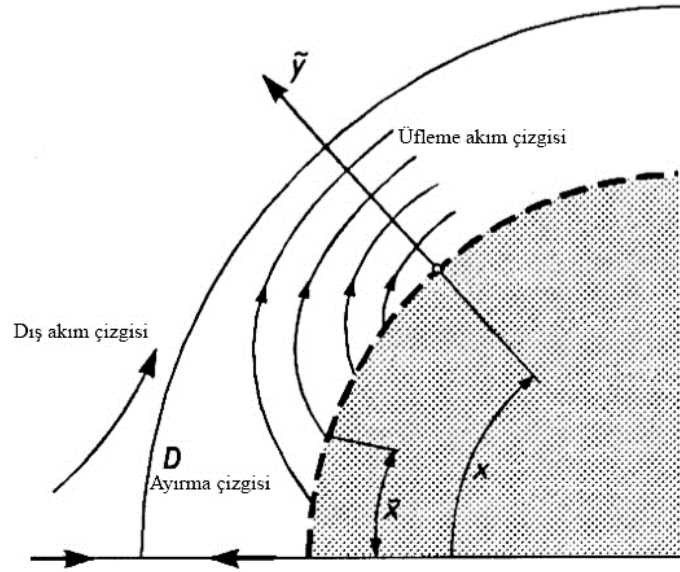
Şekil 1.12. Teğetsel üfleme için sınır tabakanın içerisinde yarığın hemen arkasındaki hız dağılımı (Schlichting ve Gersten, 2017).

Teğetsel emmede (Şekil 1.13); sınır tabakanın ayrılması yüzeyden yapılan emme ile önlenir. Sınır tabakadaki yüzeye temas eden düşük enerjili akışkan, ayrılmadan önce daha hızlı akışkan tabakası ile yerini değiştirir. Emme yarığının arkasında, belirli bir basınç artışının üstesinden gelebilecek yeni bir sınır tabaka oluşmaktadır. Yarığın uygun bir şekilde düzenlenmişse bazı durumlarda akış hiç ayrılmaz (Schlichting ve Gersten, 2017).



Şekil 1.13. Teğetsel emme (Schlichting ve Gersten, 2017).

Sürekli üflemede; geçirgen gözenekli (porous) veya üniform delikli (perforated) yüzeyden sürekli olarak yapılan üfleme durumunda, duvar kayma gerilmesi ve sürtünmesi azalır, fakat üfleme yoğun bir şekilde yapılırsa sınır tabakanın çok kalınlaşmasına neden olur. Şekil 1.14’de yüzeyden üflenen yoğun akışı serbest akıştan ayıran çizgi, sınır tabakanın kenarı olup ayırma çizgisi olarak adlandırılmıştır. Bu çizgideki hız daimi olmayıp, çizgiye yakın sürekli bir geçiş sağlayan sürtünmeli bir tabaka oluşturmaktadır. Sınır tabakadaki duvar sıcaklığından ( $T_w$ ) serbest akış sıcaklığına ( $T_\infty$ ) geçiş de bu tabakada gerçekleşmektedir. Genellikle yüzeyden yapılan sürekli ve yoğun üfleme duvar ve akış arasındaki ısı transferini büyük ölçüde azaltmaktadır. Bu durum teknik olarak terleme soğutmasında (transpiration cooling) kullanılır. Sürekli emme yönteminde düşük enerjili akışkan ortamdan emilip yerini daha hızlı akışkan almakta ve böylece ayrılma önlenerek cismin arkasındaki iz bölgesinin genişliği azaltılmaktadır. Sınır tabakanın stabilitesi ve türbülansa geçiş, sürekli emme ve üfleme ile büyük ölçüde etkilenmektedir. Emme her zaman sınır tabakayı dengeler (Schlichting ve Gersten, 2017).

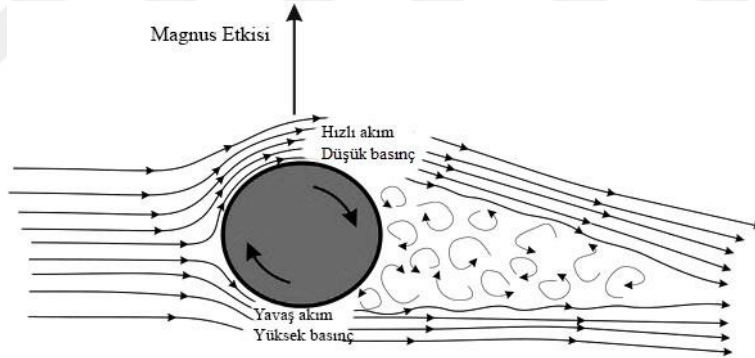


Şekil 1.14. Sınır tabakadaki akım çizgilerinin yoğun üfleme ile yön değiştirmesi (Schlichting ve Gersten, 2017).

### 1.3.1.2. Katı Yüzeyin Hareket Ettirilmesi

Sınır tabaka, katı duvar ve dış akış arasındaki hız farkından ortaya çıkar. Katı duvarın akış yönünde hareket ettirmesi hız farkının ortadan kaldırılmasını ve ayrılmanın önlenmesini sağlar. Ayrıca yüzeyin hareketi, duvarın yakınında akışa ilave momentum sağlamaktadır.

Prandtl; üniform akış içine yerleştirilmiş bir silindirin kendi eksenine etrafında dönmesinin etkilerini incelemiştir. Silindirin duvar ve serbest akışın aynı yönde hareket ettiği tarafında, ayrılma tamamen ortadan kalkarken diğer tarafında çok daha erken olarak ortaya çıkmaktadır. Oluşan bu asimetri, silindir üzerinde akış yönüne dik açılı bir kuvvete neden olur. Bu önemli olay “Magnus Etkisi” olarak tanımlanmaktadır (Gad-el-Hak, 2000). Örneğin akış alanı içinde hareket eden bir top, eksenine etrafında dönerse kaldırma kuvvetine maruz kalır. Topun üst yüzeyi akış doğrultusunda dönüyorsa akım daha da hızlanırken alt kısımda da aynı şekilde yavaşlar ve oluşan basınç farkından kaynaklanan kaldırma kuvveti topa yukarı yönde etki eder (Şekil 1.15).



Şekil 1.15. Akış alanı içerisinde dönen küt cisim üzerindeki Magnus Etkisi

### 1.3.1.3. Yüzey ve Akışkan Arasında Isı Transferi

Sıvılarda küt cismin yüzeyinden akışkana, gazlarda akışkandan cismin yüzeyine geçen ısı, hız profiline negatif bir katkı sağlamakta ve bu nedenle ayrılma noktasının daha uzağa doğru ilerlemesine neden olmaktadır. Her ne kadar bu kontrol yöntemi hem su hem de hava için başarıyla uygulanmış olsa da, ayrılmayı önlemedeki kullanımı sadece yüksek hızlı gaz akışları için uygulanmıştır. Sıkıştırılabilir bir gaz içindeki bir cismin yüzeyi soğutulursa,

yüzeye yakın akışkanın yoğunluğu artar ve viskozitesi azalır. Viskozitenin azalması hız gradyanını artırır ve duvarın yakınında hızın artmasına sebep olur. Bunun yanında gradyanın artması yüzeye yakın akışkan parçacıkları için daha büyük bir momentum sağlar ve böylece sınır tabaka ayrılmasına karşı direnç artar (Gad-el-Hak, 2000).

#### **1.3.1.4. Mikro-Elektromekanik Uygulamalar (MEMS)**

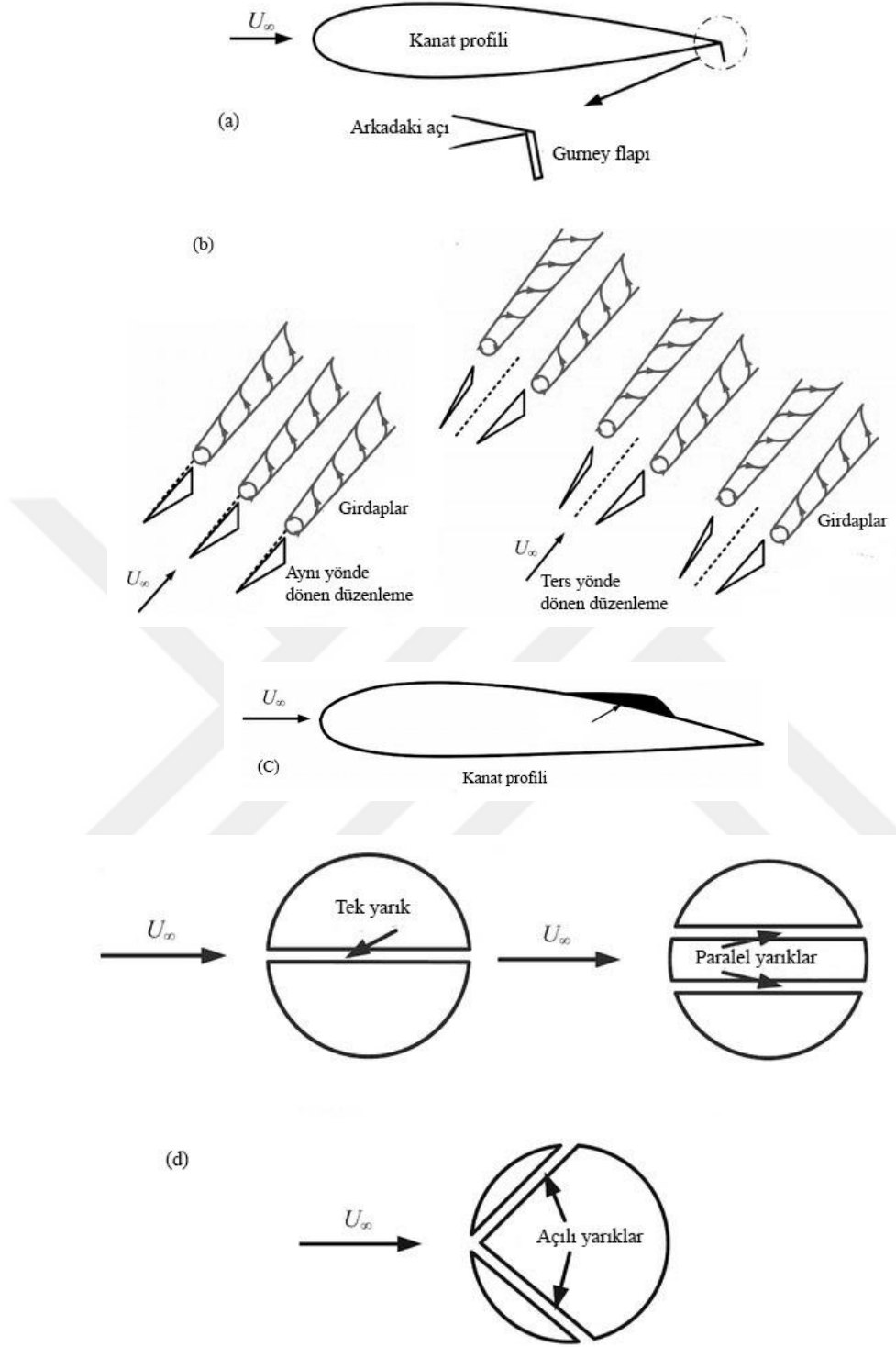
Mikro-elektromekanik sistemler (MEMS); karakteristik uzunluğu 1 mm'den az ancak 1 mikrondan fazla olan, elektriksel ve mekanik bileşenleri bulunan cihazları ifade eder (Gad-el-Hak, 2006). Bu yöntem sınır tabaka ve dış akış arasındaki momentum değişimini artırma prensibine dayanmaktadır. MEMS'ler mekanik hareketler yardımıyla akış alanı içerisinde yer alan cisim üzerinde girdaplar üretirler. Bu girdaplar sınır tabaka dışındaki bölgeden sınır tabaka içerisine momentum transferi sağlar ve ayrılma bu şekilde engellenmiş olur (Borgeson, 2002).

#### **1.4. Pasif Akış Kontrol Yöntemleri**

Pasif akış kontrol yöntemlerinde harici bir enerji kullanılmadan cismin üzerinde geometrik yapısal değişiklikler yapılarak veya ek aygıtlar eklenerek akış alanı kontrol altına alınmaktadır. Bu yöntemde yapılan geometrik değişiklikler yardımıyla cismin üzerinde sınır tabaka oluşumu sağlanarak akış ayrılması engellenir. Şekil 1.16'da görülen pasif kontrol yönteminde kullanılan bazı teknikler şu şekildedir:

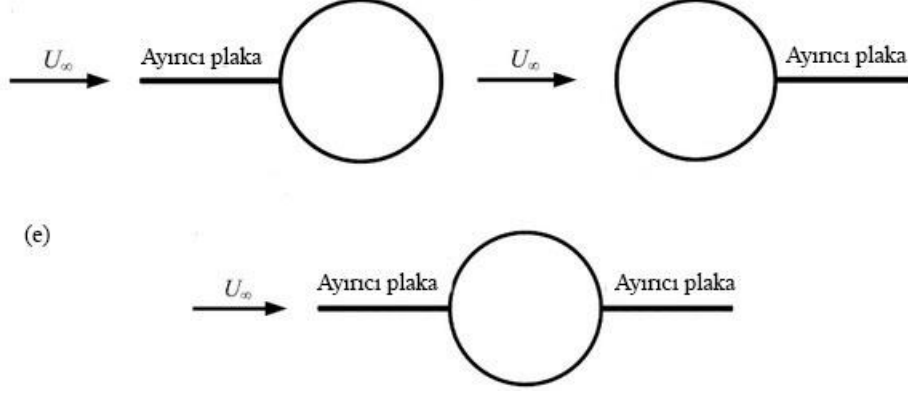
- Gurney kanatçığı
- Girdap üretici
- Tümsek uygulaması
- Yüzey pürüzlülüğü
- Sızma
- Ayırıcı levha





Şekil 1.16. Pasif akış kontrolünde kullanılan bazı teknikler; a) Gurney kantaçığı, b) Girdap üretici, c) Tümsek, d) Sızma, e) Ayırıcı plaka (Wang ve Feng, 2019).

Şekil 3.16'in devamı



### 1.5. Literatür Araştırması

Günümüze değin pasif akış kontrol yöntemi ile ilgili çeşitli araştırmalar ve çalışmalar yapılmıştır. Örneğin sinüzoidal ön ve arka yüzeylerin kullanımı Darekar ve Sherwin (2001) tarafından incelenmiştir. Hangan ve Kim (2003) yarık akışı kullanarak ayrılmayı önlemeye çalışmışlardır. Ayırıcı levha kullanımı Hwang ve Yang (2007); Shukla ve Govardhan (2009) tarafından uygulanmıştır. Kontrol levhalarının kullanıldığı akış kontrolü Malekzadeh ve Sohankar (2012); Bao ve Tao (2013); Malekzadeh ve diğerleri (2017) tarafından araştırılmıştır. Zhu ve Yao (2015); (Sarioglu vd., 2005); (Fırat vd., 2015) kontrol çubukları kullanarak girdap kaynaklı titreşimleri önlemeye çalışmışlardır. Başka bir çalışmada, bir çekici römork aracında sürüklenme kuvvetinin iyileştirilmesi, pasif akış kontrol yöntemleri ile Akansu ve diğerleri (2016) tarafından deneysel olarak araştırılmıştır.

Aktif akış kontrol yöntemlerinde kontrol mekanizmasının ihtiyaca göre açılıp kapanabilmesi ve şiddetinin kontrol edilebilmesi araştırmacılar tarafından bir avantaj olarak değerlendirilmiş ve konu üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Cismin geçirgen yüzeylerinden uygulanan üfleme ve emme Fransson ve diğerleri (2004) tarafından araştırılmıştır. Chen ve Abury (2005); Huang ve diğerleri (2017) elektromanyetik kuvvetler yardımıyla akış ayrılmasını önlemeye çalışmışlardır. Dönerek salınan cisim Fujisawa ve diğerleri (2005) tarafından uygulanmıştır. Sevilla ve Martínez-Bazán (2004) yüzeyden yapılan sızıntıyı araştırmışlardır. Bao ve Tao (2013) salınımlı bir folyo kullanarak iz

bölgesini kontrol altına almışlardır. Bovand ve diğerleri (2015) harici bir manyetik alan uygulaması ile akış ayrılmasını önlemeye çalışmışlardır.

Geçirgen veya düzgün delikli yüzeylerden ana akışa yapılan üfleme ve emmenin etkilerini inceleyen çok sayıda makale yayınlanmıştır. Simpson (1970) türbülanslı sınır tabakanın üfleme üflemez düşük Reynolds sayısındaki özelliklerini gözden geçirmiştir. Schetz ve Nerney (1977) türbülanslı sınır tabakayı, yüzeyin normal yönündeki üfleme ve yüzey pürüzlülüğü durumunda deneysel olarak araştırmış ve üfleme oranının artırılmasının türbülanslı sınır tabakadaki hız ve türbülans yoğunluğunu arttırdığı bulgusuna ulaşmışlardır. Yang ve diğerleri (1994) bir basamak üzerinde ayrılan-tekrar temas eden akışta düzgün (uniform) ve normal yöndeki üflemenin etkisini deneysel olarak incelemiştir. Bu çalışmadaki ölçümlerin sonuçlarına göre; normal yöndeki üfleme, sirkülasyon bölgesindeki ters yatay hızını, ters akış oranını, türbülans yoğunluğunu ve Reynolds kayma gerilmesini önemli ölçüde düşürmektedir. Bellettre ve diğerleri (1999) geçirgen yüzeyli bir levha kullanarak türbülanslı sınır tabakaya yapılan üflemeyi incelemiş ve üfleme oranının, sürtünme faktörü ve ısı transferinin azaltmasında önemli bir rolü olduğunu gözlemlemiştir. Hwang ve Lin (2000) kanal akışında, düşük Reynolds sayılı  $k-\epsilon$  modeli ve doğrudan sayısal simülasyon (DNS) ile üflemenin uygulandığı akışlar için dinamik ve ısı alanları belirlemiştir. Meinert ve diğerleri (2001) yaptıkları çalışmada sınır tabakaya geçirgen bir yüzeyden yapılan farklı bir gaz üflenmesinin duvar ile akış arasındaki ısı transferi ve yüzey sürtünmesi üzerindeki etkisini incelemiştir. Kudriavtsev ve diğerleri (2001) yaptıkları sayısal çalışmada, düzlem geçirgen yüzeyden dış akışa uygulanan üflemenin etkisini araştırmışlar. Elde edilen sonuçlar sınır tabaka ile katı duvar arasındaki sürtünmede önemli düşüş olduğunu göstermektedir. Yüzeyin bir kısmından mikro üfleme yoğunluğunu analiz etmek için düz bir levha üzerindeki düşük hızlı bir gaz akışının sayısal incelenmesi Bazovkin ve diğerleri (2012) tarafından yapılmıştır. Kornilov ve diğerleri (2015) düz plaka üzerinde pürüzsüz geçirgen bir duvardan yapılan hava üflemesinin sıkıştırılmaz türbülanslı sınır tabaka özellikleri üzerindeki etkisini sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar plaka boyunca yüzey sürtünme katsayısının değerlerinde etkin bir azalma olduğunu göstermektedir.

Geçirgen levhalar üzerindeki türbülanslı sınır tabakaya yapılan üfleme ile ilgili birçok sayısal ve deneysel çalışma yapılmış olmasına rağmen, akış alanında cisim yüzeyinden uygulanan üfleme ve emmenin aerodinamik parametreler ve ısı transferi üzerindeki etkilerini inceleyen sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Hannemann ve Oertel (1989);  $Re = 200$  değeri

için düz bir levhanın arkasındaki akış ayrılmasını araştırmışlar ve levha üzerinden yapılan arka sızmanın girdap caddesinin şidetini azalttığı sonucuna varmışlardır. Çeşitli emme ve üfleme hızlarıyla geçirgen yüzeyli kare silindir etrafındaki akışta Strouhal sayısı Ling ve diğerleri (1993) tarafından sayısal olarak analiz edilmiştir. Schumm ve diğerleri (1994) deneysel olarak çeşitli küt cisimlerin arkasındaki ayrılma bölgesindeki Karman-caddesini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada; iz bölgesinin ısıtılması, enlemesine salınım ve arkadan sızıntı gibi farklı kontrol yöntemleri kullanmışlardır. Mathelin ve diğerleri (2002) silindir etrafındaki hidrodinamik ve termal sınır tabakanın, uygulanan üfleme ile güçlü bir şekilde etkilenmekte olduğunu deneysel olarak ortaya koymuşlardır. Ling ve Fang (2002);  $Re = 100$  değerindeki akışta yüzeyden emme ve üfleme oranı ve üfleme-emme konumunun kaldırma ve sürtünme kuvvetleri ve girdap yapıları üzerindeki etkilerini sayısal olarak araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar; farklı üfleme ve emme koşulları için iz bölgesindeki asimetrinin bastırabileceğini ve sürtünme kuvvetinin azaltılabileceğini göstermektedir. Fransson ve diğerlerinin (2004) yaptıkları deneysel çalışmada; geçirgen yüzeyli dairesel silindir yüzeylerinden sürekli ve orta seviyede yapılan üfleme ve emmenin akış alanı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Uygulanan üfleme ve emmenin, yüzey basınç dağılımı, Strouhal sayısı ve iz bölgesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Türbülanslı akış içerisinde yer alan kare silindirin delikli bir yüzeyi boyunca yapılan düzgün üfleme ve emmenin basınç dağılımı ve sürtünme katsayısının üzerindeki etkileri Çuhadaroğlu ve diğerleri (2007) tarafından incelenmiştir. Elde edilmiş olan bulgular kare silindir etrafındaki basınç dağılımının ve direnç katsayısının, delikli yüzeyin konumu ve üfleme-emme oranından etkilendiğini göstermektedir. Dong ve diğerleri (2008) tarafından sunulmuş olan etkili bir yöntemde küt cisimlerin girdap kaynaklı titreşimlerini bastırmak için silindir etrafına birleşik üfleme ve emme uygulanmıştır. Çuhadaroğlu ve Turan (2009) kare silindir etrafındaki türbülanslı akışta çeşitli yüzeylerden uygulanan düzgün (üniform) üfleme ve emmenin etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlarda Nusselt sayısı, sürtünme katsayısı ve girdap bölgesinin belirli yüzeylerinden uygulanan üfleme ve emme durumundan etkilendiğini görülmüştür. Çuhadaroğlu (2009) geçirgen yüzeyli bir kare silindir duvarlarından uygulanan düzgün üfleme ve emmenin akış alanı ve bazı aerodinamik parametreler üzerindeki etkilerini  $Re = 21400$  değeri için sayısal olarak incelemiştir. Sayısal bulgular artan emme hızının, neredeyse tüm emme uygulamalarında sürtünme katsayısını düşürmekte olduğunu gösterirken, üst ve alt yüzeylerden uygulanan emmenin iz bölgesinin hareketini zayıflatmakta olduğunu

göstermiştir. Bir diğer deneysel çalışmada Turhal ve Çuhadaroğlu (2010);  $Re = 10000$ , 16000 and 24000 değerleri için diagonal ve yatay düzgün delik yüzeyli kare silindir etrafındaki akışı araştırmışlardır. Elde edilmiş olan bulgulara göre; diagonal silindirin üst-arka, arka ve tüm yüzeylerinden uygulanan üfleme, tüm Reynolds sayısı değerleri için sürtünme katsayısını düşürmektedir. Aynı şekilde yatay kare silindirin tüm yüzeylerinden yapılan üfleminin sürtünme katsayısını düşürmekte olduğunu belirlemişlerdir. Çuhadaroğlu ve Turan'ın (2012) yapmış olduğu bir başka sayısal çalışmada  $Re = 21400$  değeri için, üfleme ve emmenin ısı transferi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre belirli yüzeylerden uygulanan üfleme ısı koruma sağlarken, emme ise ısı transferini iyileştirmektedir. Sohankar ve diğerleri (2015) kare silindir yüzeylerinden uygulanan üfleme ve emmenin, akış ayrılması, iz bölgesi ve ısı transferi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada en ideal sonuç; emmenin silindirin tüm yüzeylerinden uygulandığı durumda elde edilmiştir. Teimourian ve diğerleri (2017) kare silindir etrafındaki üfleme ve emmenin iz bölgesindeki etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre; hız profili, akış yapısı ve iz bölgesi, farklı yüzeylerden uygulanan üfleme ve emme durumundan etkilenmektedir. Bunun yanında tüm yüzeyleri delikli olan kare silindirin, diğer durumlara kıyasla, türbülans kinetik enerjisi üretiminde en fazla azalmayı sağlamaktadır.

### 1.6. Tez Çalışmasının Bilimsel Önemi

Akış alanında yer alan küt cismin akışkan ile olan etkileşimi sonucunda ortaya çıkan problemler, endüstriyel ve mühendislik uygulamalarının tasarım aşamasında en önemli parametre olarak göz önüne alınmaktadır. Bu bağlamda titreşim, dinamik yükleme, kaldırma ve direnç, akustik olaylar ve ısı transferinin iyileştirilmesi gibi problemler için akış kontrol yöntemleri kullanılarak cisimler etrafındaki akış karakteristiklerinin iyileştirilmesi sağlanmaktadır.

Cismin yüzeyinden yapılan emme ve üfleme, sınır tabaka özelliklerini kontrol etmek için uygulanan etkili bir aktif akış kontrol yöntemi olarak bilinmektedir. Bu yöntem sayısal ve deneysel akışkanlar dinamiği alanında önemli bir inceleme konusu olup araştırmacılar tarafından incelenmeye devam etmektedir. Yüzeyden yapılan üfleme ve emme sayesinde cisim üzerindeki basınç dağılımı, cismin direnç ve kaldırma katsayısı, girdap kopma

frekansları ve ısı transferi gibi aerodinamik ve ısıl parametreler denetim altına alınabilmektedir.

### 1.7. Tezin Amacı ve Kapsamı

Literatürde dairesel, kare, dikdörtgen kesitli küt cisim yüzeyinden yapılan üfleme ve emme durumuna ilişkin kısıtlı sayıda deneysel ve sayısal çalışmaların yer almasına karşın; bu klasik geometriler dışında kesite sahip küt cisimlerin yüzeyinden yapılan üfleme durumuna ilişkin çalışma mevcut değildir. Özellikle gazdan-gaza veya gazdan-sıvıya ısı geçişi şeklinde çalışan ısı değiştirgeçlerindeki ısı transferinin iyileştirilmesinde, tez çalışması kapsamında ele alınmış olan yüzeyden üfleme uygulamasının etkili bir yöntem olduğu tahmin edilmektedir. Nitekim konu ile ilgili bazı sayısal çalışmalar bu öngörüğü destekler niteliktedir.

Tez kapsamında ilk olarak kare kesitli bir silindir etrafındaki akışta çeşitli yüzeylerden yapılan üfleme ve emmenin, akış, aerodinamik parametreler ve ısı transferi üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular yapılan deneysel çalışmalarla büyük ölçüde uyum halindedir.

Çalışmada klasik kare geometrisinin yanı sıra beşgen, dairesel ve eliptik kesitli geometrilerine sahip silindirlerin etrafındaki akış değerlendirilmiş ve hesaplamalar yapılmıştır. Literatürde henüz incelenmemiş olan geometriler için çeşitli yüzeylerden yapılan üfleme-emmenin özellikle direnç katsayısı açısından kare kesitli geometriye göre belirgin bir iyileştirme sağlamakta olduğu görülmüştür. Çalışmada küt cisimden narin (aerodinamik) cisme geçişi sembolize eden farklı en/boy ( $AR$ ) oranlarına sahip eliptik kesitli cisimler üzerinden yapılan üfleme-emmenin etkisi de incelenip kıyaslamalar yapılmıştır.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Türbülanslı Akış ve Temel Denklemler

Türbülanslı akış araştırmalarının 1970’li yıllardan itibaren hız kazanmasındaki önemli etken hesaplama tekniklerinin geliştirilmesi ve yeni yazılımların ortaya çıkması olmuştur. Bunlardan ilki, Deardorff (1970) tarafından önerilen “Büyük Girdap Benzeşimidir (LES)”. Ardından Orszag ve Patterson (1972) ilk “Doğrudan Sayısal Benzeşim (DNS)” modelini önermişlerdir. Ayrıca Launder ve Spalding (1972) ile Launder ve diğerleri (1975) “Reynolds-ortalamalı Navier-Stokes (RANS)” yaklaşımını literatüre kazandırmışlardır.

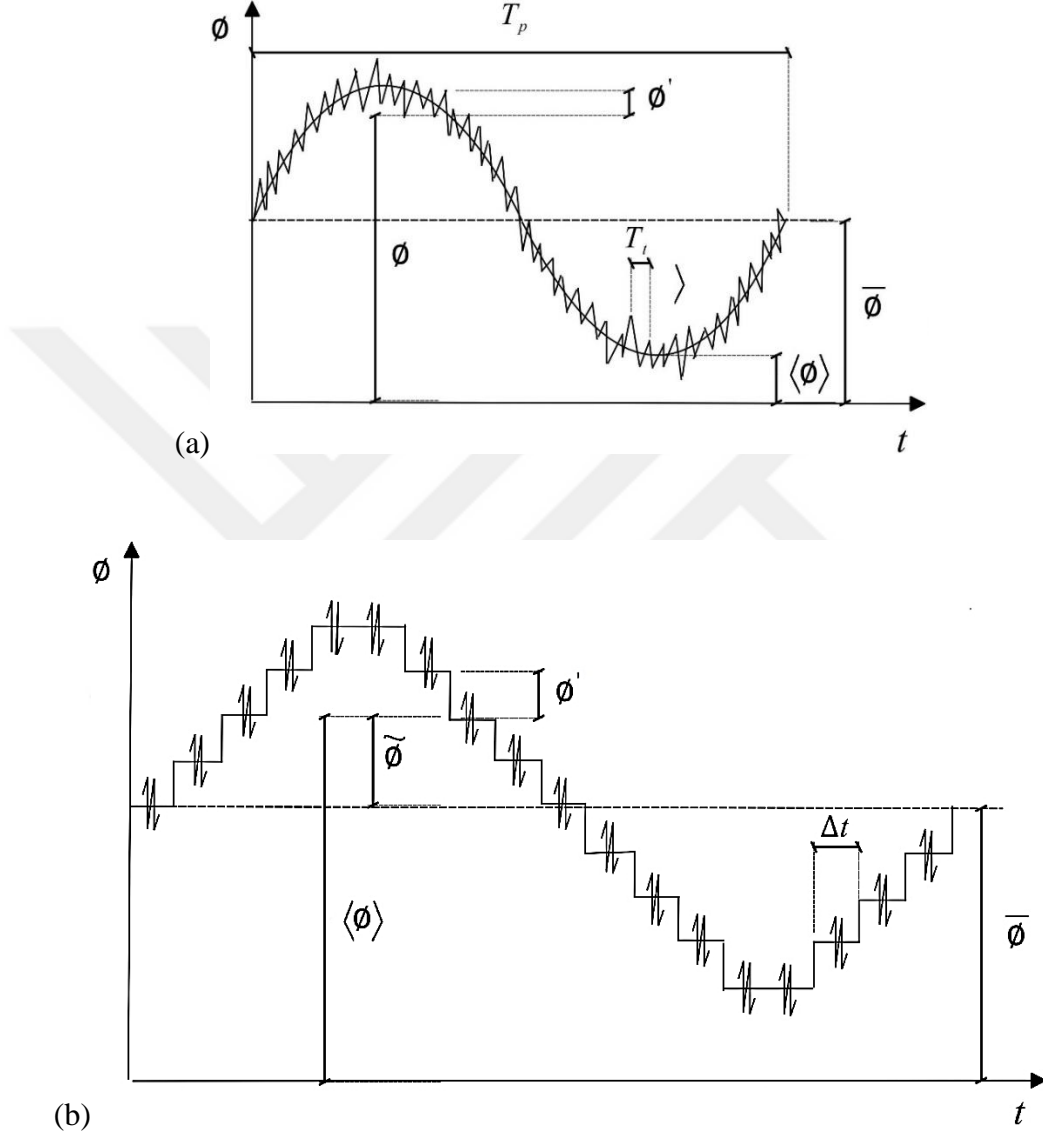
DNS yönteminde Navier-Stokes denklemleri herhangi bir türbülans modeli olmadan doğrudan sayısal olarak çözülmektedir. Bu yaklaşım türbülansın tüm mekânsal ve zamansal ölçeklerinin çözülmesi gerektiği anlamına gelmektedir. Hesaplama ağındaki tüm türbülansın ölçekleri, en küçük ölçeklerden (Kolmogorov ölçekleri) büyük integral ölçeklere kadar çözülmektedir. Bu nedenle ağ noktalarının ve zaman adımlarının sayısı fazla olup, bir simülasyonu tamamlamak için gereken işlemlerin sayısı  $Re^3$  olarak tahmin edilmektedir.

LES tekniğinde türbülanslı akışın büyük ölçekli hareketleri (büyük girdapçıklar) doğrudan hesaplanırken yalnızca küçük ölçekli (sub-grid scale-SGS) hareketler modellenmektedir. Bu nedenle hesaplama zamanında DNS'e göre önemli bir düşüş sağlanmaktadır. Ayrıca bu yöntemde simülasyonu tamamlamak için gereken işlemlerin sayısı yaklaşık olarak  $Re^2$  düzeyindedir.

RANS modelleri ise karmaşık türbülanslı akışları hesaplamak için en ekonomik yaklaşımı sunmaktadır. Bu modellerde, büyük ölçeklerden küçük ölçeklere kadar her şeyin modellenmesi gerekmektedir ve sadece ortalama büyüklükler doğrudan hesaplanmaktadır. Sonuç olarak simülasyonu tamamlamak için gereken işlemler en fazla  $Re$  mertebesinde. Bu modellerin tipik örnekleri,  $k-\epsilon$  ve  $k-\omega$  modellerdir. RANS modelleri birçok mühendislik uygulaması için uygundur ve kabul edilebilir düzeyde hassasiyet seviyesini sağlamaktadırlar. RANS modellerinin hiçbiri evrensel olmadığından, belirli bir uygulama için hangi modelin en uygun olduğuna araştırılarak karar verilmelidir.

Sürekli (daimi) rejimli akışlardaki zaman ortalama büyüklükler, küt cismin etrafındaki geçici rejimli (zaman bağımlı) akış alanındaki toplu hareket nedeniyle, iz bölgesinde periyodik bir bileşen içermektedir. Böylece geçici rejimli akışlar için girdap periyodunda tanımlanan bir “Grup Ortalama (Ensemble Average)” işlemine gereksinim

vardır. Buna göre Şekil2.1’de görülen  $\phi(t) = \bar{\phi} + \tilde{\phi}(t) + \phi' = \langle \phi \rangle(t) + \phi'$  tanımındaki anlık akış büyüklüğü  $\phi(t)$ , zaman ortalamalı  $\bar{\phi}$ , periodik  $\tilde{\phi}(t)$  ve çalkantılı  $\phi'$  bileşenlerinden oluşmaktadır.



Şekil 2.1. Zaman bağımlı türbülanslı bir büyüklüğün girdap periyodu içerisindeki bileşenleri; a) Türbülans büyüklüğünün sürekli ortam değişimi, b) Zaman adımli davranış

Zaman ortalamasının ve periyodik kısmın birleşimi, bu sayısal çalışmada da ele alınan, grup ortalama bileşeni  $\langle \phi \rangle(t)$  olarak adlandırılır. Akış değişkenleri için bu formun



ifadelerini anlık süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinde yerine yazıp ortalaması alınır, Navier-Stokes ve enerji denklemleri şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - (\overline{u'_i u'_j}) \right] \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\nu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_j} - (\overline{u'_j T'}) \right] \quad (2.3)$$

Bu denklemlerde ortaya çıkan Reynolds gerilmeleri  $(\overline{u'_i u'_j})$  ve türbülanslı ısı akısı  $(\overline{u'_j T'})$  için girdapçık viskozitesine dayalı olan Boussinesq yaklaşımı ile;

$$-(\overline{u'_i u'_j}) = \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (2.4)$$

$$-(\overline{u'_j T'}) = \frac{\nu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (2.5)$$

karşılıkları kullanılmaktadır. Bu yaklaşım; Reynolds gerilmelerinin ve türbülanslı ısı akısının yerel grup ortalamalı hız gradyanları ve  $\nu_t$  girdapçık viskozitesi ile orantılı olduğu varsayımına dayalıdır.

### 2.1.1. Keskin Köşeli Geometriler Etrafındaki Akışa Ait Türbülans Modeli

Çalışmada kare ve beşgen (beşgen) kesitli geometriler için Kato ve Launder iyileştirmesinin (Kato ve Launder, 1993) uygulandığı standard  $k-\varepsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır. Kato ve Launder iyileştirmesi, durma bölgelerinde ortaya çıkan türbülans kinetik enerjisinin aşırı üretiminin önüne geçmekte olup, iz bölgesindeki girdap hareketinin simetri eksenini düşey yönde de geçmesini sağlamaktadır. Türbülanslı kinetik enerjinin üretimi, Kato-Launder modifikasyonuna dayanarak vortisite ve gerilme hızı olarak ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \varepsilon \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 P_k \frac{\varepsilon}{k} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.7)$$

$$\nu_t = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (2.8)$$

$$P_k = C_\mu \varepsilon S \Omega \quad (2.9)$$

$$S = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2} \quad (2.10)$$

$$\Omega = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2} \quad (2.11)$$

Burada  $P_k$ ; türbülans kinetik enerjisi,  $S$ ; akışkanın simetrik şekil değiştirme tensörü ve  $\Omega$  yerel vortisite parametresidir.  $k$ - $\varepsilon$  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.

### 2.1.2. Eğrisel Geometriler Etrafındaki Akışa Ait Türbülans Modeli

Daire ve oval kesitli geometriler etrafındaki akış için en eksiksiz klasik türbülans modelini temsil eden ve Reynolds Gerilme Transport Modelleri olarak da bilinen Reynolds Gerilme Modeli (RSM) kullanılmıştır. Bu modelleme yaklaşımı Chou (1945) ve Rotta (1951) tarafından yapılan çalışmalara dayanmaktadır. RSM'de; eddy viskozite yaklaşımı yerine Reynolds gerilme tensörünün bileşenleri doğrudan hesaplanır. Bu modelde Reynolds gerilmeleri, transport denklemleri kullanılarak doğrudan çözülür ve türbülanslı akış alanlarındaki karmaşık etkileşimlerin açıklanmasını sağlayan sonuçlar verir.

$\overline{u'_i u'_j}$  Reynolds gerilmelerine ait transport denklemi;

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\overline{\rho u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) = & - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + p (\delta_{kj} \overline{u'_i} + \delta_{ik} \overline{u'_j}) \right] + \\ \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right] - \rho \left( \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) - \rho \beta \left( g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta} \right) + & \overline{p' \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)} - \end{aligned}$$

$$2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} - 2\rho\Omega_k \left( \overline{u'_j u'_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \varepsilon_{jkm} \right)$$

şeklindedir. Bu denklemin sembol gösterimi: Yerel Zaman Türevi +  $C_{ij} = D_{T,ij} + D_{L,ij} + P_{ij} + G_{ij} + \phi_{ij} - \varepsilon_{ij} + F_{ij}$  (2.12)

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada  $C_{ij}$  taşınım,  $D_{T,ij}$  türbülanslı yayılım,  $D_{L,ij}$  moleküler yayılım,  $P_{ij}$  gerilme üretimi,  $G_{ij}$  kaldırma kaynaklı gerilme üretimi,  $\phi_{ij}$  basınç kaynaklı gerilme,  $\varepsilon_{ij}$  yutulma ve  $F_{ij}$  dönme kaynaklı gerilme üretimi terimlerini tanımlamaktadır. Burada yer alan  $C_{ij}$ ,  $D_{L,ij}$ ,  $P_{ij}$  ve  $F_{ij}$  terimlerinin modellenmesi gerekmezken  $D_{T,ij}$ ,  $G_{ij}$ ,  $\phi_{ij}$  ve  $\varepsilon_{ij}$  terimlerinin modellenerek denklemlerin kapatılması (closure) gerekmektedir.

Türbülanslı yayılım  $D_{T,ij}$ , Daly ve Harlow'un (1970) genelleştirilmiş gradyan yayılma modeli ile modellenebilir. Ancak bu denklem sayısal dengesizliklere neden olmaktadır. Bu nedenle türbülanslı yayılıma için şu ilişki kullanılmaktadır (Lien ve Leschziner, 1994):

$$D_{T,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right) \quad (2.13)$$

Burada türbülanslı viskozite  $\mu_t$ , (2.8) denkleminde hesaplanmaktadır.  $\sigma_k = 0.82$  değeri ise Lien ve Leschziner (1994) tarafından önerilmiştir.

Basınç kaynaklı gerilme terimi  $\phi_{ij}$ , Gibson ve Launder (1978); Fu ve diğerleri (1987) ve Launder (1989) tarafından yapılan önerilere göre modellenmiştir.  $\phi_{ij}$  modellenmesinde kullanılan klasik yaklaşım;

$$\phi_{ij} = \phi_{ij,1} + \phi_{ij,2} + \phi_{ij,w} \quad (2.14)$$

şeklindedir. Burada  $\phi_{ij,1}$ , izotropiye geri dönüş terimi olarak da bilinen yavaş basınç şekil değiştirme terimi  $\phi_{ij,2}$  hızlı basınç şekil değiştirme terimi ve  $\phi_{ij,w}$ , duvar yansıma terimini temsil etmektedir. Yavaş basınç şekil değiştirme;

$$\phi_{ij,1} = -C_1 \rho \frac{\varepsilon}{k} \left[ \overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} \delta_{ijk} \right] \quad (2.15)$$

şeklinde modellenir. Burada  $C_1 = 1.8$ 'dir. Hızlı basınç şekil değiştirme terimi;

$$\phi_{ij,2} = -C_2 \left[ \left( P_{ij} + F_{ij} + \frac{5}{6} G_{ij} - C_{ij} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left( P + \frac{5}{6} G - C \right) \right] \quad (2.16)$$

şeklinde modellenmektedir. Burada  $C_2 = 0.6$ 'dir.  $P_{ij}$ ,  $F_{ij}$ ,  $G_{ij}$  ve  $C_{ij}$ , (2.12) denklemindeki gibi tanımlanmıştır.

Duvar yansıma terimi  $\phi_{ij,w}$ , duvar yakınındaki normal gerilmelerin yeniden dağıtılmasından sorumludur. Bu terim; duvara paralel olan gerilmeleri artırırken, duvara dik olan normal yöndeki gerilmeleri azaltma eğilimindedir. Bu terim;

$$\begin{aligned} \phi_{ij,w} = C'_1 \frac{\varepsilon}{k} \left( \overline{u'_k u'_m n_k n_m} \delta_{ij} - \frac{3}{2} \overline{u'_i u'_k n_j n_k} - \frac{3}{2} \overline{u'_j u'_k n_i n_k} \right) \frac{C_l k^{3/2}}{\varepsilon d} + \\ C'_2 \left( \phi_{km,2} n_k n_m \delta_{ij} - \frac{3}{2} \phi_{ik,2} n_j n_k - \frac{3}{2} \phi_{jk,2} n_i n_k \right) \frac{C_l k^{3/2}}{\varepsilon d} \end{aligned} \quad (2.17)$$

şeklinde modellenir. Burada  $C'_1 = 0.5$ ,  $C'_2 = 0.3$ ,  $n_k$ ,  $x_k$ 'nin duvara normal bileşeni,  $d$  duvara dik yöndeki uzaklık ve  $C_l = C_\mu^{3/4} / \kappa$  olarak tanımlanmaktadır ( $C_\mu = 0.09$  ve  $\kappa$  von Karman sabiti = 0.4187).

Kaldırma etkisiyle ortaya çıkan üretim terimleri;

$$G_{ij} = (\overline{J_i U_j} + \overline{J_j U_i}) = -\beta (g_i \overline{u_i \theta} + g_j \overline{U_i \theta}) \quad (2.18)$$

$$\overline{U_i \theta} = \frac{\mu_t}{\rho \Gamma_t} \left( \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (2.19)$$

olarak modellenir. Burada  $\text{Pr}_t$ , enerji için türbülanslı Prandtl sayısı olup 0.85 değerindedir.

Türbülans kinetik enerjisi Reynolds gerilme tansörü göz önüne alınarak elde edilir:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} (P_{ii} + G_{ii}) - \varepsilon (1 + 2M_t^2) \quad (2.21)$$

burada  $\sigma_k = 0.82$  ve türbülans Mach sayısı,  $M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}}$  eşit olup  $a$  ses hızını temsil etmektedir. Görüldüğü gibi (2.21) denklemi  $k$ - $\varepsilon$  türbülans modelinde kullanılan (2.6) denkleminin aynısıdır.

Yutulma tansörü ise;

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} (\rho \varepsilon + Y_M) \quad (2.22)$$

şeklinde modellenir. Burada  $Y_M = 2\rho\varepsilon M_t^2$  “dilitasyon yutulması” terimi olarak Sarkar ve Balakrishnan (1990) tarafından önerilmiştir.

Skaler yutulma oranı, standart  $k$ - $\varepsilon$  modeline benzer bir transport denklemi ile hesaplanır:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] C_{\varepsilon 1} \frac{1}{2} [P_{ii} + C_{\varepsilon 3} G_{ii}] \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.23)$$

Burada  $\sigma_\varepsilon = 1$ ,  $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1.92$  ve  $C_{\varepsilon 3} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right|$  olarak kullanılmaktadır (Henkes vd., 1991).  $C_{\varepsilon 3}$  terimi yerçekimsel vektöre göre yerel akış yönünün bir fonksiyonu olarak değerlendirilir. Burada  $v$ , akış hızının düşey bileşeni ve  $u$ , akış hızının yatay bileşenidir.

Reynolds gerilme modeli ile türbülanslı ısı taşınımı (transport), Reynolds'un türbülanslı momentum transferine benzerlik kavramı kullanılarak aşağıdaki şekilde modellenmiştir:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right] \quad (2.2.4)$$

Burada  $E$  toplam enerji ve  $(\tau_{ij})_{eff}$  deviatorik gerilme tansörü olarak tanımlanmaktadır (URL-2, 2009).

## 2.2. Çalışmada Kullanılan Boyutsuz Sayılar

Akışkanlar dinamiğinde kullanılmakta olan boyutsuz sayılar farklı ölçeklerdeki ve farklı akışkan özelliklerine sahip akışlar arasında karşılaştırma yapma olanağı sağlamaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde bazı boyutsuz sayılar kullanılmıştır. Bölüm 1.2.1’de de yer verildiği gibi cisim üzerindeki basınç ve sürtünme kuvvetlerinin oluşturduğu direnç etkisi ve kaldırma kuvvetlerinin oluşturduğu kaldırma etkisi, direnç (1.5) ve kaldırma (1.6) katsayıları olarak tanımlanmıştır.

Atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlerine oranı olarak tanımlanan ve serbest akışın yapısı için bir ölçü olan Reynolds sayısı;

$$Re = \frac{U_{\infty} D}{\nu} \quad (2.25)$$

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

Diğer bir boyutsuz parametre ise ısı transferinin en önemli göstergesi olan Nusselt sayısıdır. Nusselt sayısı, söz konusu akışkanda taşınım ile meydana gelen ısı transfer değerinin iletim ile meydana gelen ısı transfer değerine oranı olarak tanımlanır:

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (2.26)$$

Akış içerisinde yer alan cismin etrafındaki basınç dağılımı aerodinamik incelemelerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak bu incelemelerde basıncın mutlak değeri yerine bir katsayı şeklindeki tanımlama tercih edilmektedir. Basınç katsayısı cismin yüzeyindeki mutlak ve statik basınç fark değerinin, akış alanı içerisindeki cisme akışkan tarafından uygulanan dinamik basınç değerine olan oranı olarak;

$$C_p = \frac{P - P_{\infty}}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2} \quad (2.27)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $P_{\infty}$  serbest akışkanın statik basıncını,  $P$  cismin yüzeyindeki basıncı,  $\rho$  akışkanın yoğunluğunu ve  $U_{\infty}$  serbest akış hız değerini göstermektedir.

Üfleme ve emme uygulamasının iz bölgesindeki sıcaklık alanı üzerindeki etkilerini görebilmek ve ısı transferini analiz etmek için, boyutsuz ortalama sıcaklık  $\theta$ ;

$$\theta = \frac{T_{\infty} - \bar{T}}{T_{\infty} - T_w} \quad (2.28)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada  $T_{\infty}$ ,  $\bar{T}$  ve  $T_w$  sırasıyla girişteki sıcaklık, zaman ortalamalı yerel sıcaklık ve duvar (üfleme) sıcaklığıdır.

Çalışmanın temel özelliği olan cisim yüzeylerinden üfleme veya emmeyi karakterize eden sayı olarak literatürde de bilinen üfleme-emme katsayısı  $\Gamma$ ;

$$\Gamma = \left( \frac{v_w}{u_{\infty}} \right) \quad (2.29)$$

şeklinde yüzeyden yapılan üfleme-emme hızının ana akış hızına oranı olarak tanımlanmaktadır. Ancak bu boyutsuz sayının; iki boyutlu akışa uygun olacak şekilde yüzeydeki üfleme-emme yoğunluğunu ifade eden ve üfleme-emme delik sayısı ( $n$ ), üfleme-emme yapılan toplam delik boyu ( $\Sigma L_h$ ) ve üfleme-emme yüzey boyuna ( $L_s$ ) bağlı olarak tanımlanan “perforasyon yoğunluğu” ( $C_r = n \Sigma L_h / L_s$ ) ile düzeltilmesi uygun olacaktır. Bu sayede üfleme-emme etkisinin delikli yüzey özelliklerini de taşıması sağlanmış olur. Bu kapsamda çalışmada tanımlanan düzeltilmiş üfleme-emme katsayısı:

$$\Gamma_{corr} = C_r \cdot \Gamma \quad (2.30)$$

$\Gamma$ 'ya ek olarak kullanılmıştır. Çalışmada göz önüne alınmış olan silindirler için (2.30) bağıntısında yer alan  $C_r$  perforasyon yoğunlukları Tablo 2.1'de verilmiştir.

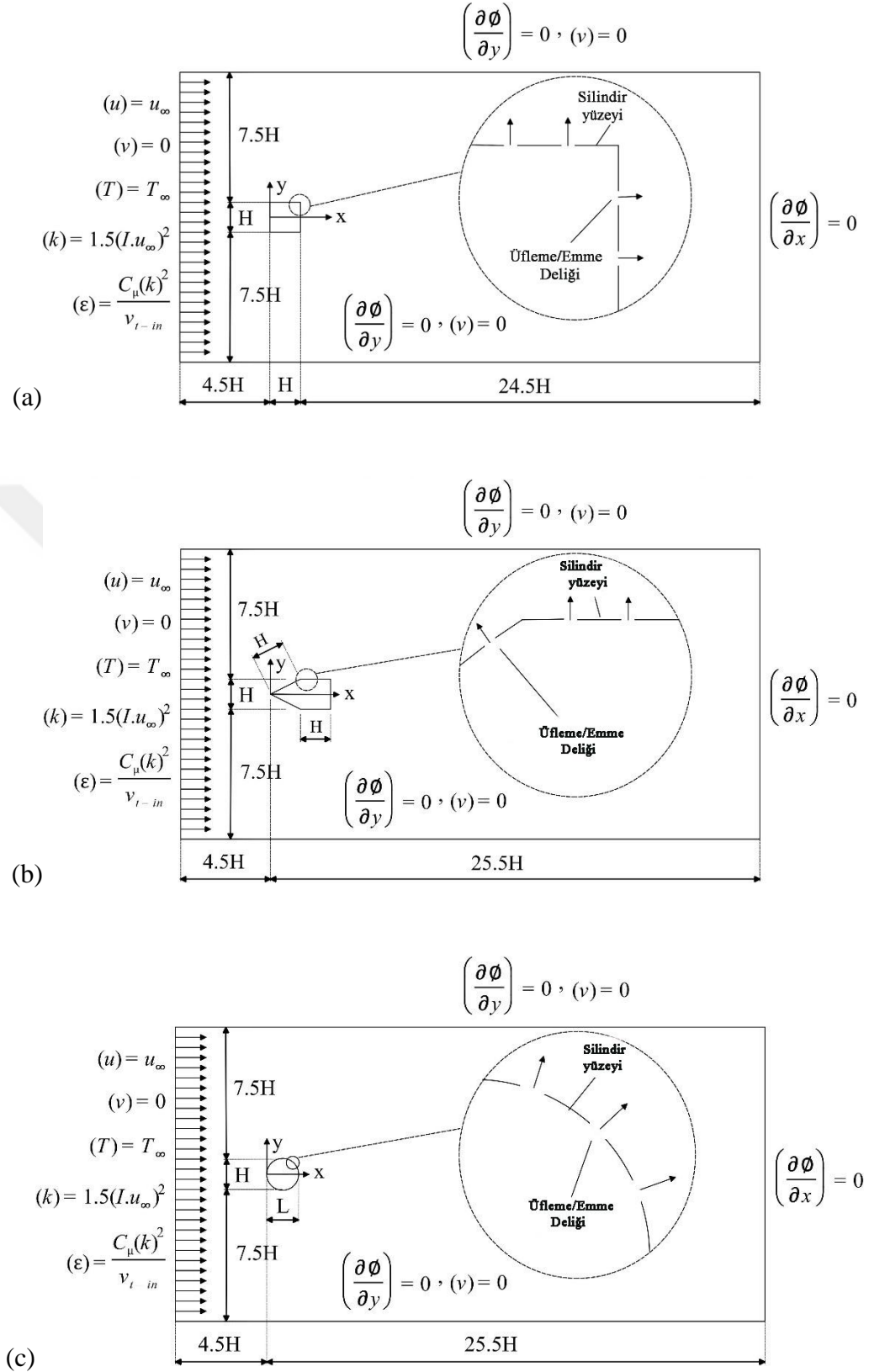
Tablo 2.1. Düzeltilmiş üfleme-emme katsayısı için  $a$  ve  $b$  değerleri

Silindir		Üfleme-emme yüzeyi	Yüzey(ler)deki delik sayısı $n$	Delikler oranı $\Sigma L_h/L_s$	$C_F$
Kare		Ön yüzey	40	0.2	8
		Arka yüzey	40		8
		Üst/alt yüzeyler	80		16
		Tüm yüzeyler	160		32
Beşgen		Ön yüzeyler	40	0.2	8
		Tüm yüzeyler	200		40
Daire		Tüm yüzey	40	0.064	2.56
Eliptik	$H/L = 0.5$	Tüm yüzey	40	0.042	1.68
		Yarı üst yüzey	20		84
	$H/L = 0.25$	Tüm yüzey	40	0.024	0.96
		Yarı üst yüzey	20		0.48
	$H/L = 0.125$	Tüm yüzey	40	0.012	0.48
		Yarı üst yüzey	20		0.24
		Tüm yüzey	160	0.048	7.68
		Yarı üst yüzey	80		3.84

### 2.3. Hesaplama Bölgesi ve Sınır Koşulları

Çalışmada yer alan her bir geometrik durum için hesaplama bölgeleri (Şekil 2.2) ve sınır koşulları aşağıdaki gibidir:





Şekil 2.2. Hesaplama bölgesi ve sınır koşulları; a) Kare silindir, b) Beşgen silindir, c) Daire ve eliptik silindir

Her bir durum için hesaplama bölgesinin sınırları aynı olup, giriş sınırındaki koşulları;

$$(u = u_{\infty}), k = 1.5(I \cdot u_{\infty})^2, \varepsilon = \frac{c_{\mu} k^2}{v_{t-in}}, T = T_{\infty} \quad (2.31)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada türbülans şiddeti ( $I$ ), %5'tir. Giriş sınırında türbülans kinetik enerjisinin yutulma değeri ( $\varepsilon$ );  $r_{\mu} = \frac{v_{t-in}}{\nu}$  şeklinde tanımlanmış olan viskoziteler oranından hesaplanan  $v_{t-in}$  değerine bağlı olarak (2.8) eşitliğinden hesaplanmıştır. Literatürde  $x/H = -4,5$  uzaklığındaki giriş sınırı için yaygın olarak önerilen  $r_{\mu} = 100$  değeri esas alınmıştır (Bosch ve Rodi, 1998). Viskozite ise, Sutherland yasası tarafından üç katsayı ile verilmektedir:

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + S}{T + S} \quad (2.32)$$

Burada  $T_0 = 273.11$  K,  $S = 110.56$  K ve referans viskozite  $\mu_0 = 1.716 \times 10^{-5}$  kg/(ms) olarak tanımlanmıştır. Girişteki akışkan özellikleri ise,  $T_{\infty} = 373$  K,  $Re \cong 22000$ ,  $\rho = 1$  kg/m<sup>3</sup> ve  $u_{\infty} = 0.38$  m/s olarak kullanılmıştır.

Hesaplama bölgesinin alt ve üst (serbest) sınırlarında akış alanının tam gelişmiş olduğu göz önüne alınarak, değişkenlerin sınırların normali yönündeki gradyanlarının ve hızın sıfır değer aldığı koşul kullanılmıştır:

$$\left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = 0, (v = 0) \quad (2.33)$$

Referans noktasından  $x/H = 25.5$  uzaklığında yer alan çıkış sınırında, bütün değişkenler için akış yönünde sıfır gradyan koşulu kullanılmıştır:

$$\left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = 0 \quad (2.34)$$

Kare silindirin alt ve üst yüzeylerinde;

$$(v = v_w), \Gamma = \left(\frac{v_w}{u_\infty}\right), k = 1.5(I \cdot v_w)^2, \varepsilon = \frac{C_\mu k^2}{v_{t-in}}, T = T_w \quad (2.35)$$

sınır koşulları kullanılmıştır. Burada  $v_w$  sınırların normali yönündeki üfleme ve emme hızı olarak tanımlanmaktadır. Silindir yüzeyinin sıcaklığı ise  $T_w = 273$  K olarak tanımlanmıştır.

Kare silindir ön ve arka yüzeylerinde de benzer şekilde;

$$(u = u_w), \Gamma = \left(\frac{u_w}{u_\infty}\right), k = 1.5(I \cdot u_w)^2, \varepsilon = \frac{C_\mu k^2}{v_{t-in}}, T = T_w \quad (2.36)$$

sınır koşulları kullanılmıştır. Burada  $u_w$  sınırların normali yönündeki üfleme ve emme hızı olarak tanımlanmıştır. Silindir yüzey sıcaklığı ise yine  $T_w = 273$  K'dir.

Beşgen silindirin alt, üst ve arka sınırlarında (2.35) ve (2.36) koşulları geçerli olup silindirin ön sınırında;

$$(V = V_n), \Gamma = \left(\frac{V_n}{u_\infty}\right), k = 1.5(I \cdot V_n)^2, \varepsilon = \frac{C_\mu k^2}{v_{t-in}}, T = T_w \quad (2.37)$$

koşulları kullanılmıştır. Burada  $V_n$  ön yüzeylerin normali yönündeki üfleme ve emme hızı olarak tanımlanmaktadır.

Daire ve oval silindirler için tek bir yüzey tanımlanıp, yüzeyin sınırlarında (2.37)'deki koşullar kullanılmıştır. Ayrıca eliptik silindirler için en/boy oranı,  $AR = H/L$  şeklinde olup,  $H$  elipsin kısa çapı ve  $L$  elipsin uzun çapı olarak tanımlanmaktadır.

#### 2.4. Denklemlerin Ayrıklaştırması

Yapılan çalışmadaki tüm simülasyonlarda, sıkıştırılamaz akış için SIMPLE algoritmasına dayalı olarak sonlu hacim yöntemi (Finite Volume Method) kullanılmıştır. Sonlu hacim yöntemi, integral yapıdaki korunum denklemlerinin doğrudan fiziksel boşlukta (uzay) ayrıştırıldığı tekniğe verilen addır. Bu yöntem, hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde (Computational Fluid Dynamics) en temel yaklaşım olarak görülen hücre ortalama işlemine dayanmaktadır (Hirsch, 2007). Sonlu hacim yönteminde, diferansiyel hacimler üzerindeki

korunum yasalarını temsil eden kısmi diferansiyel denklemler, sonlu hacimler (elementler veya hücreler) üzerindeki ayrık cebirsel denklemlere dönüştürülmektedir (Moukalled vd., 2016). Herhangi bir  $\phi$  büyüklüğüne ait transport denkleminin ayrıklaştırılması, korunum denklemi dikkate alınarak keyfi bir  $\forall$  kontrol hacmi için;

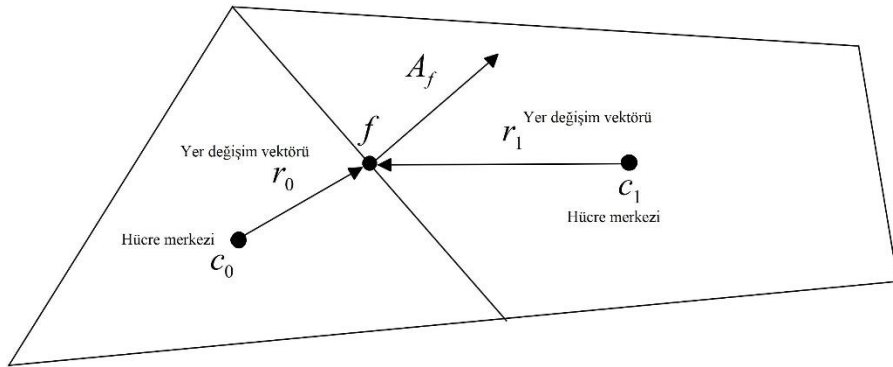
$$\int_{\forall} \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} d\forall + \oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_{\forall} S_{\phi} d\forall \quad (2.38)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada  $\rho$  yoğunluk;  $\vec{v}$  hız vektörü;  $\vec{A}$  yüzey alan vektörü;  $\Gamma$ ,  $\phi$  'nin yayılım (diffusion) katsayısı;  $\nabla \phi$ ,  $\phi$  'nin gradyanı ve  $S_{\phi}$ , kaynak terimi göstermektedir.

(2.38) denklemi hesaplama bölgesindeki tüm kontrol hacmi veya hücreye uygulanmaktadır. Şekil 2.3'te gösterilen İki boyutlu bir kontrol hacmi için (2.38) denkleminin ayrıklaştırılması sonucu;

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} \forall + \sum_f^{N_{faces}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma \nabla \phi_f \cdot \vec{A}_f + S_{\phi} \forall \quad (2.39)$$

elde edilmektedir. Burada  $N_{faces}$  hücreyi saran yüzey sayısı;  $\phi_f$ ,  $f$  yüzeyinden geçen (taşınan)  $\phi$  değeri;  $\rho_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$  yüzeydeki kütle akısı;  $\vec{A}_f$ ,  $f$  yüzeyin alan vektörü;  $\nabla \phi_f$ ,  $\phi$  'nin  $f$  yüzeyindeki gradyanı ve  $\forall$  hücrenin hacmini göstermektedir (URL-3, 2009).



Şekil 2.3. İki boyutlu kontrol hacmi

Hücre yüzeylerinde skaler değerlerini oluşturmak ve ikincil difüzyon terimlerini ve hız türevlerini hesaplamak için gradyanların hesaplamasına (değerlendirmesine) ihtiyaç vardır.  $\phi$  değişkeninin  $\nabla\phi$  gradyanı, akış korunum denklemlerinde yer alan taşınım (convection) ve yayılım (diffusion) terimlerinin ayrıklaştırması için kullanılmaktadır. Bu çalışmada hücre tabanlı en küçük kareler yöntemi (Least Square Cell Base) gradyanların ayrıklaştırılması için seçilmiştir. (2.39) denklemindeki taşınım terimlerinin ayrıklaştırması için  $\phi_f$  yüzey değerinin bilinmesine gereksinim vardır. Bunun için hücre merkezlerindeki  $\phi$  değerlerinden interpolasyon yapılır. Upwind interpolasyon yönteminde  $\phi_f$  yüzey değeri, (2.39) denklemindeki normal hızın yönüne bağlı olarak hücrenin yukarı akım değeri olarak alınır. First-order-upwind yönteminde bir nokta ve second-order-upwind yönteminde iki nokta kullanarak hesaplamaların yapılması, bu iki yöntemin temel farkıdır. First-order-upwind yöntemi genellikle second-order-upwind yöntemine göre daha iyi ve hızlı yakınsama sağlamaktadır; fakat second-order-upwind yönteminden elde edilen sonuçlar daha doğrudur. Bu nedenle basınç, momentum, enerji, türbülans kinetik enerjisi ve yutulma oranının ayrıklaştırması için ilk başta first-order-upwind ve sonrasında second-order-upwind yöntemi kullanılmıştır. Geçici rejimli (sürekli olmayan) akışlar için, temel denklemlerin hem mekân hem de zaman içerisinde ayrıklaştırılması gerekmektedir. Zamansal ayrıklaştırmada difransiyel denklemlerindeki tüm terimlerin,  $\Delta t$  zaman adımında integrasyonu yapılmaktadır. Bir  $\phi$  değişkeni için zamana göre değişim (time evolution);

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = F(\phi) \quad (2.40)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Zamana göre türevin, ileri fark yöntemi kullanılarak ayrıklaştırmasından, first-order ve second-order zamansal ayrıklaştırmaları;

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = F(\phi) \quad (2.41)$$

$$\frac{3\phi^{n+1} - 4\phi^n + \phi^{n-1}}{2\Delta t} = F(\phi) \quad (2.42)$$

olarak elde edilir. Burada  $n + 1$ ;  $\phi$ 'nin  $t + \Delta t$  zaman düzeyindeki değeri,  $n$ ;  $\phi$ 'nin  $t$  zaman düzeyindeki değeri ve  $n - 1$ ;  $\phi$ 'nin  $t - \Delta t$  zaman düzeyindeki değerlerini temsil etmektedir.  $F$  fonksiyonu ise herhangi bir mekânsal ayrıklaştırmayı göstermektedir.

Ayrıklaştırılan zaman türevlerinin değerlendirilmesi için, implicit ve explicit yöntemler kullanılmaktadır.

Implicit zaman integrasyon yönteminde,  $F(\phi)$  fonksyonu ileri zaman düzeyinde değerlendirilmektir:

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = F(\phi^{n+1}) \quad (2.43)$$

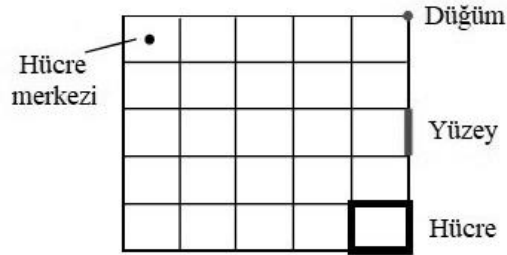
$$\phi^{n+1} = \phi^n + \Delta t F(\phi^{n+1}) \quad (2.44)$$

(2.44) denklemi, bir sonraki zaman adımına geçmeden önce her zaman düzeyinde tekrarlı bir şekilde çözülebilmektedir. Implicit yöntemin avantajı, zaman adım büyüklüğüne göre koşulsuz olarak kararlı olmasıdır (URL-4, 2009). Bu çalışmada, zaman ayrıklaştırması için sabit zaman adımlı second-order-implicit yöntem kullanılmıştır.

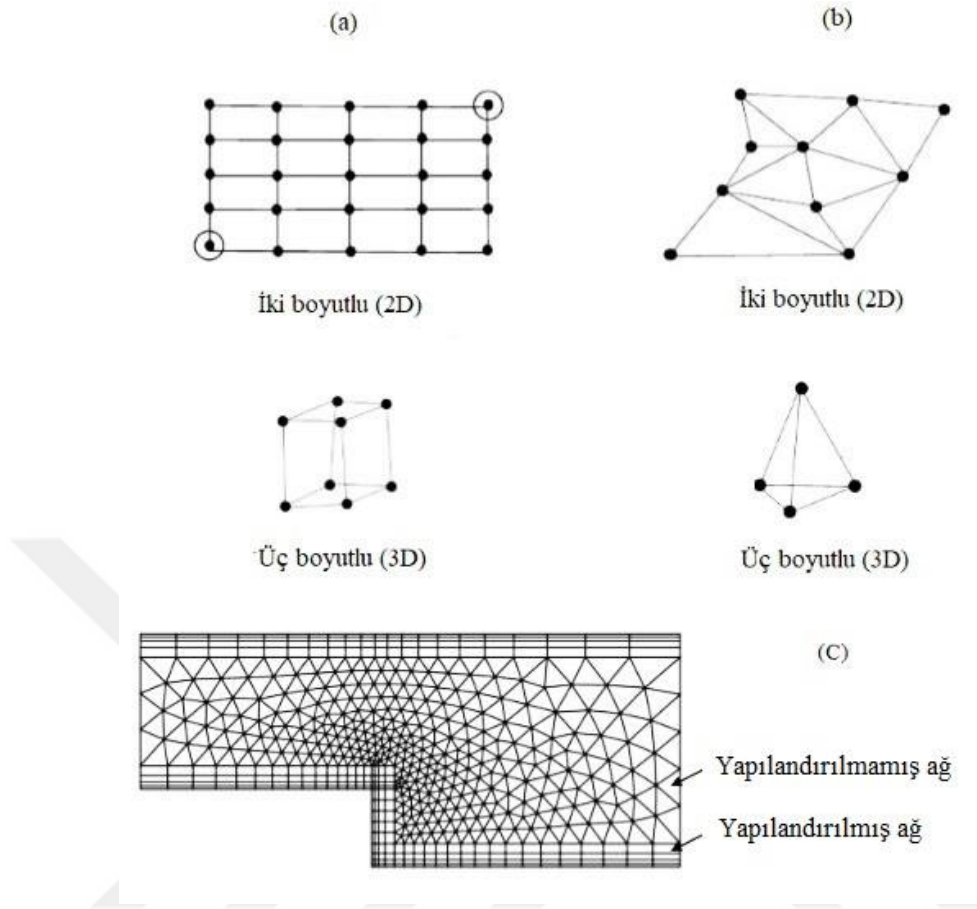
Çalışmada kullanılan tüm denklemlerin çözümü için yakınsama kriteri  $10^{-6}$  olarak seçilmiş ve bütün sayısal analizlerde bu kriter dikkate alınarak yakınsama sağlanıncaya kadar iteratif çözümlere devam edilmiştir.

## 2.5. Bölge Ayrıklaştırması ve Ağ Yapıları

Temel denklemler ayrıklaştırıldıktan sonra, hesaplama bölgesi içindeki düğümlerin, yüzeylerin ve hücrelerin uygun bir ağ yapısı oluşturularak tanımlanması gerekmektedir (Şekil 2.4). Hesaplamalı akışkanlar dinamiğindeki kullanılan ağ sistemleri, yapılandırılmış (Structured), yapılandırılmamış (Unstructured) ve hibrit (Hybrid) olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 2.5).



Şekil 2.4. İki boyutlu hesaplamalı ağ



Şekil 2.5. Ağ yapılarının sınıflandırılması; a) Yapılandırılmış, b) Yapılandırılmamış ve c) Hibrit

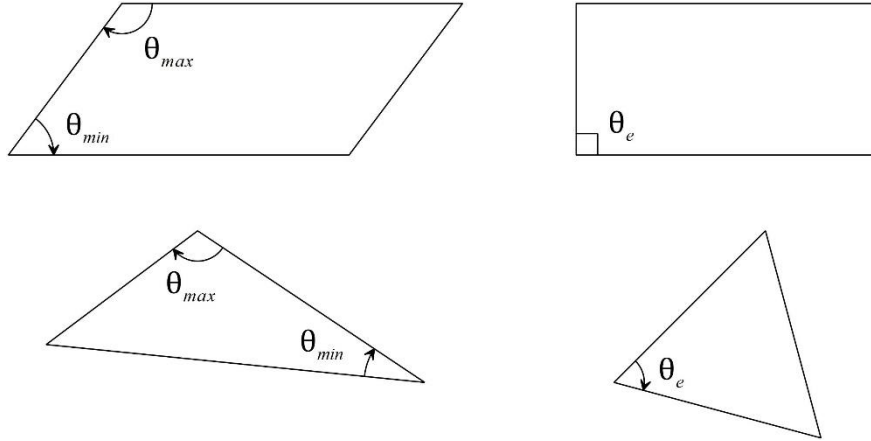
Şekil 2.5'te görüldüğü gibi yapılandırılmış ağlar; iki boyutlu simülasyonlarda dörtgen (Quad) ve üç boyutlu simülasyonlarda altı yüzlü (Hexahedral) elemanlardan ve yapılandırılmamış ağlar iki boyutlu simülasyonlarda üçgen (Tri) ve üç boyutlu simülasyonlarda dört yüzlü (Tetrahedral) elemanlardan oluşmaktadır. Düzgün geometrilere kullanılan yapılandırılmış ağlar, (i, j, k) gibi indislerle sıralanır, böylece bu tamsayılar için herhangi bir değer uzaysal bir konuma karşılık gelir ve topolojisi bir sonraki indislerle kolayca ilişkilendirilir. Karmaşık geometrilerin etrafına sarılması daha kolay olan yapılandırılmamış ağlar böyle bir sıralamaya sahip değildir. Bu nedenle bir düğüm tek bir tamsayı dizini ile ilişkilendirilir. Hibrit ağlar, yapılandırılmış ve yapılandırılmamış ağlardan oluşmaktadır ve bu ağları verimli bir şekilde bütünleştirir. Geometrinin düzenli olan kısımlarında yapılandırılmış ve düzensiz olmayan kısımlarında yapılandırılmamış ağlar kullanılır (Moukalled vd., 2016); (D. Liseikin, 2017); (Bakker, 2006); (Feszty ve Jakubik,

2012). Ağ yapısının kalitesi hesaplama bölgesinin analizinde kritik bir rol oynamaktadır. Örneğin, daha iyi ağ kalitesi yakınsama oranını arttırırken, kötü şekillendirilmiş ağlar, yakınsama için gereken hesaplama zamanını artırarak sayısal hataya neden olmaktadır. Bu nedenle doğru sonuçlar elde etmek için hesaplama bölgesi, uygun ağ yapısı kullanılarak ayrıklaştırılmalıdır.

Genel olarak bir ağ sisteminin kalitesi çarpıklık (Skewness), düzgünlük (Smoothness) ve en-boy oranı (Aspect Ratio) gibi bazı parametrelere bağlıdır. Tüm hücre ve yüz şekillerine uygulanan yaygın çarpıklık (Şekil 2.6);

$$\text{Çarpıklık} = \max \left[ \frac{\theta_{max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e} \right] \quad (2.45)$$

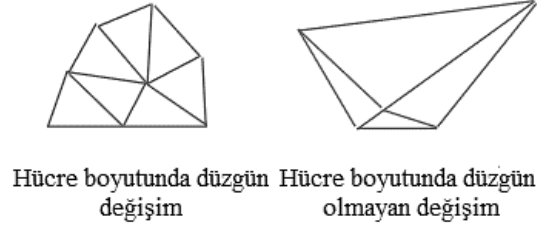
şeklinde hesaplanır. Burada  $\theta_{max}$ ; en büyük hücre veya yüzey açısı,  $\theta_{min}$ ; en küçük hücre veya yüzey açısı ve  $\theta_e$ ; hücre veya yüzeyin eşkenar açısı (üçgen için  $60^\circ$  ve dörtgen için  $90^\circ$ ) olarak tanımlanmaktadır. Bir hücre veya yüzey için çarpıklık 1 (en kötü) ve 0 (en iyi) değerleri arasında değişmekte olup, 0.85 değeri altında olması istenmektedir (D. Liseikin, 2017); (Bakker, 2006).



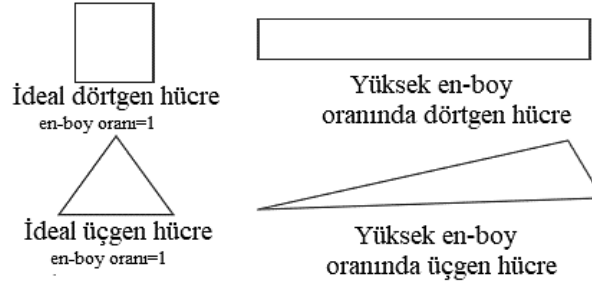
Şekil 2.6. Çarpıklığın belirlenmesinde kullanılan açılar

Düzgünlük olarak tanımlanan parametrede hücre veya yüzey boyutundaki değişiklik kademeli olmalıdır (Şekil 2.7). Hücrelerin veya yüzeylerin en boy oranı ise en uzun kenar uzunluğunun en kısa kenar uzunluğuna oranıdır ve bir eşkenar üçgen veya kare için 1'e eşittir (ideal durumda) (Şekil 2.8); (Bakker, 2006).



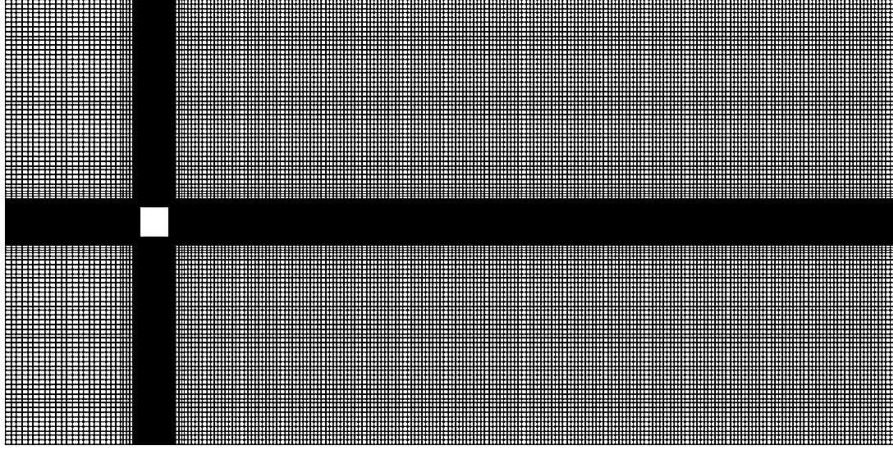


Şekil 2.7. İki boyutlu hücrede düzgünlük parametresi

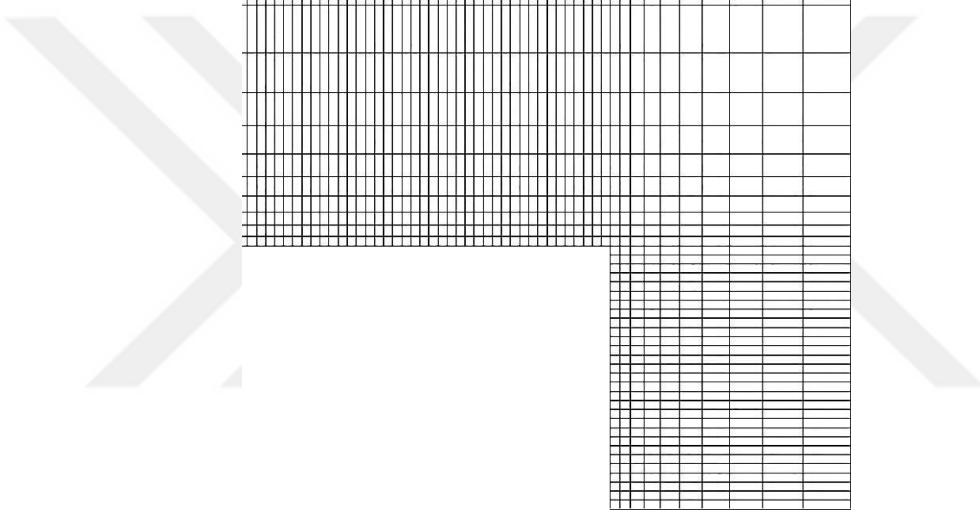


Şekil 2.8. İki boyutlu hücrede en boy parametresi

Çarpıklık, düzgünlük ve en boy oranı parametreleri ideal olarak dikkate alınan bu çalışmada, hesaplama bölgesinde yer alan silindirin geometrisi ve üfleme-emme durumuna bağlı olarak yapılandırılmış, yapılandırılmamış ve hibrit ağ sistemleri kullanılmıştır. Kare ve beşgen kesitli silindirler için yapılandırılmış ağ sistemi kullanılırken, daire ve oval silindirler için her üç model test edilmiştir (Şekil 2.9-15).

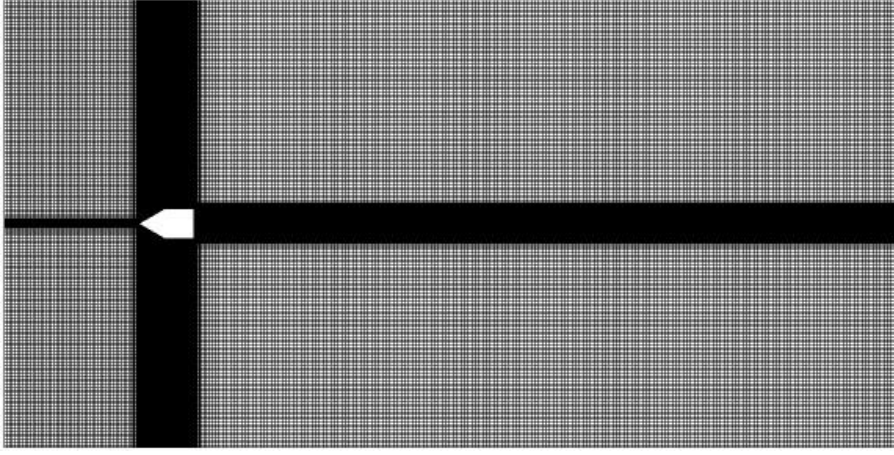


(a)

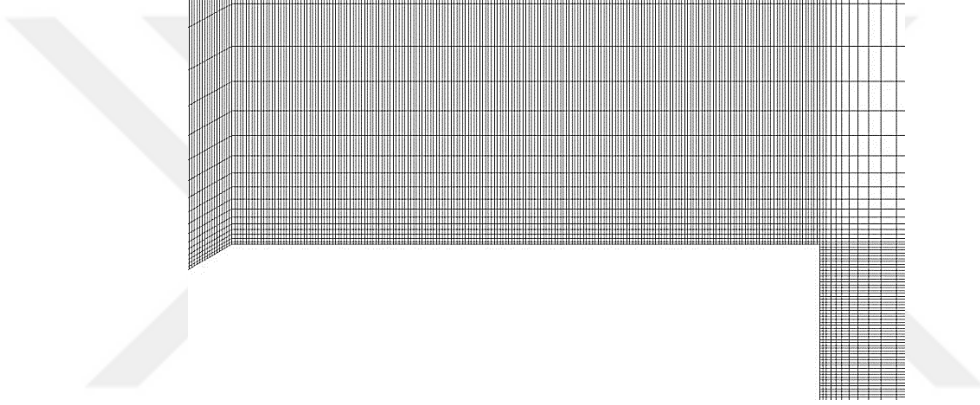


(b)

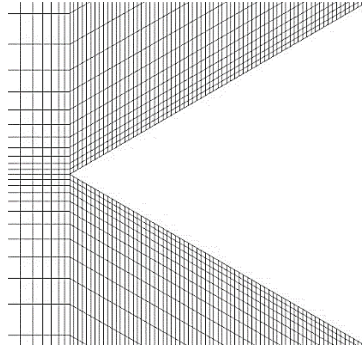
Şekil 2.9. Kare silindir durumu için hesaplama bölgesi ( $452 \times 322$ ); a) Tüm hesaplama bölgesi, b) Silindire yakın bölgenin büyütülmüş görünümü



(a)

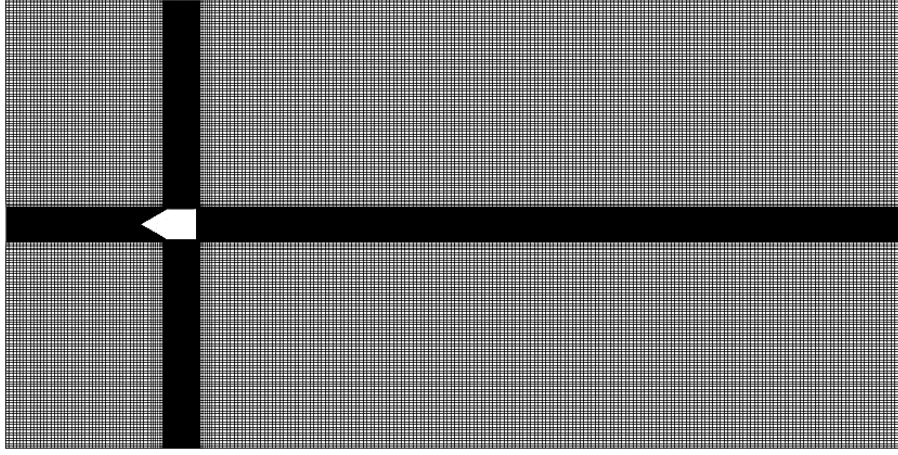


(b)

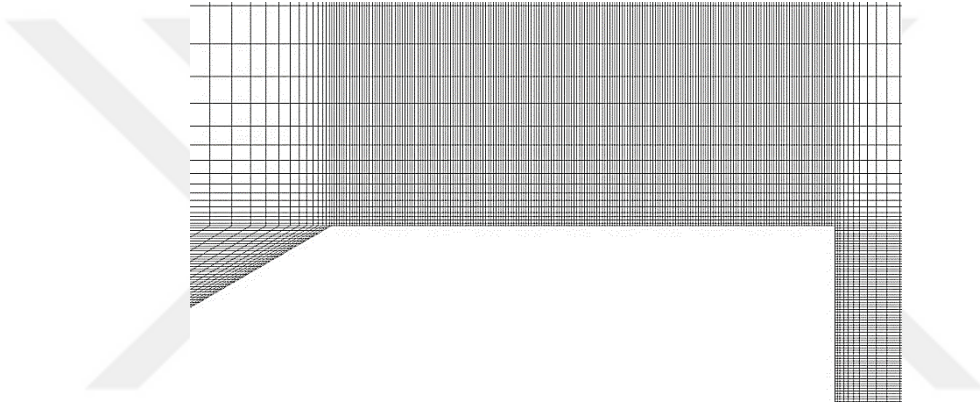


(c)

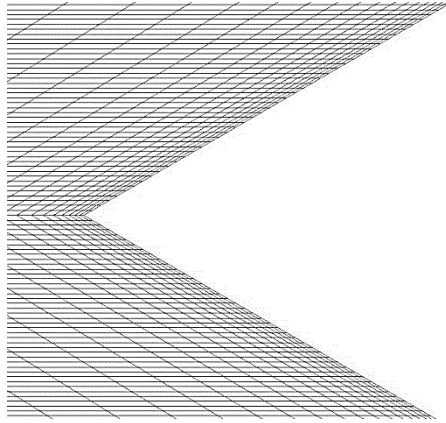
Şekil 2.10. Beşgen silindir durumu için birinci hesaplama bölgesi ( $666 \times 382 \times 178$ ) (162061 eleman) (160600 düğüm); a) Tüm hesaplama bölgesi, b) ve c) Silindire yakın bölgenin büyütülmüş görünümü



(a)

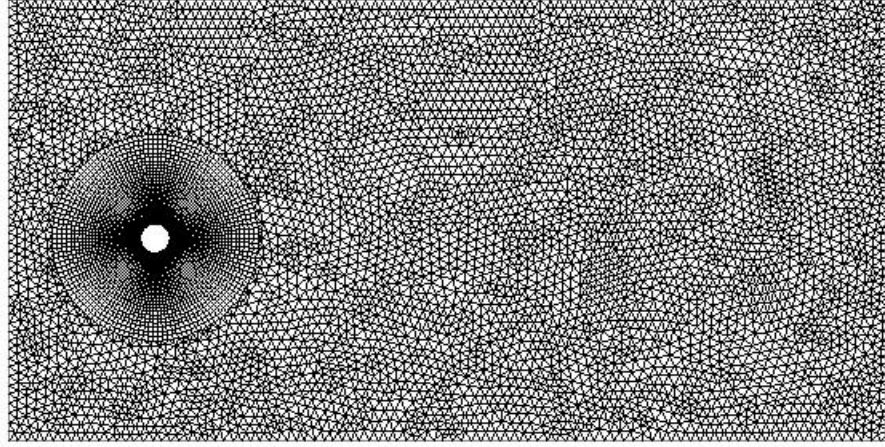


(b)

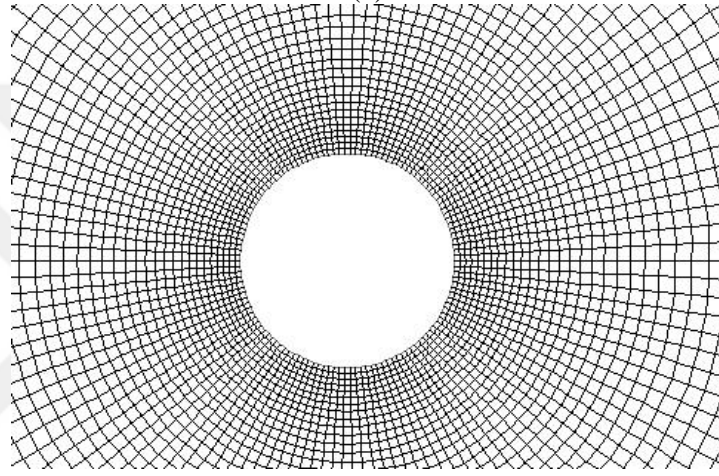


(c)

Şekil 2.11. Beşgen silindir durumu için ikinci hesaplama bölgesi ( $357 \times 276$ ) (90499 eleman) (89660 düğüm); a) Tüm hesaplama bölgesi, b) ve c) Silindire yakın bölgenin büyütülmüş görünümü

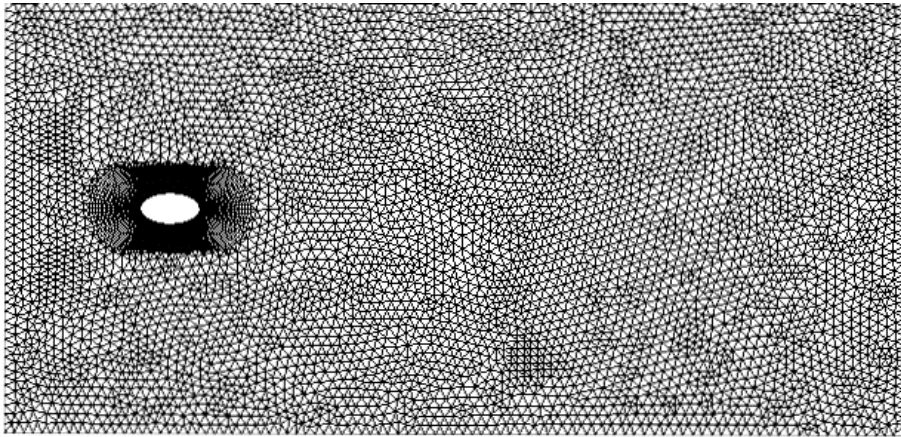


(a)



(b)

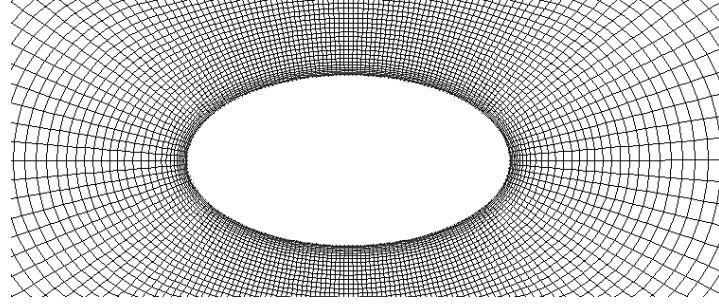
Şekil 2.12. Dairesel silindir durumu için hesaplama bölgesi; a) Tüm hesaplama bölgesi, b) Silindire yakın bölgenin büyütülmüş görünümü



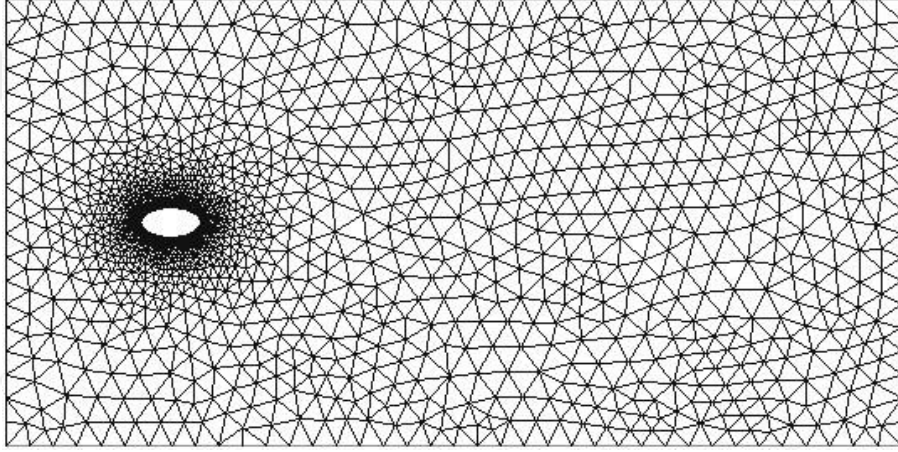
(a)

Şekil 2.13 Eliptik silindir durumu için birinci hesaplama bölgesi; a) Tüm hesaplama bölgesi, b) Silindire yakın bölgenin büyütülmüş görünümü

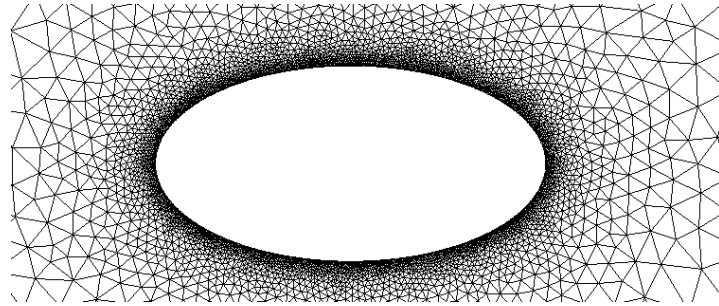
Şekil 2.13'in devamı



(b)



(a)



(b)

Şekil 2.14. Eliptik silindir durumu için ikinci hesaplama bölgesi; a) Tüm hesaplama bölgesi, b) Silindire yakın bölgenin büyütülmüş görünümü

Hesaplama bölgesinde yer alan cismin yüzeylerinden yapılan üfleme-emme debisini arttırmak için, yüzeylerdeki perforasyon oranının artırılması gerekmektedir. Perforasyon oranının artması, yüzeydeki düğüm sayısını arttırmaktadır ve sonuç olarak da yüzeylerin etrafındaki ağ yoğunlaşmaktadır.

Ağ yapısının, sonuçlar üzerindeki etkisini değerlendirmek için tüm çalışmalarda farklı ağ yapıları ve ağ yoğunlukları (ağ genişliği) test edilmiştir. Örnek olarak Tablo 2.1-6'da görüldüğü gibi, ağın yoğunlaşmasının sonuçlar üzerindeki etkisi ihmal edilir seviyede olduğu gözlemlenmiştir (% 2'den az). Böylece çalışmanın ağdan bağımsız olduğu sonucuna varılarak tüm simülasyonlar I. ağ ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2.2. Kare silindir durumu için ağ yoğunluğunun detayları

Ağ no.	$M \times N$	Minimum ağ yüzeyi alanı ( $m^2$ )	Maksimum ağ yüzeyi alanı ( $m^2$ )	$\Gamma = 0$		$\Gamma = 0.0005$		$\Gamma = -0.0005$	
				$C_d$	$Nu$	Tüm yüzeyler		Tüm yüzeyler	
				$C_d$	$Nu$	$C_d$	$Nu$	$C_d$	$Nu$
I	$452 \times 322$	$4.88 \times 10^{-3}$	$1.88 \times 10^{-1}$	2.23	115	1.80	97	1.75	144
II	$552 \times 382$	$4.88 \times 10^{-3}$	$8.73 \times 10^{-2}$	2.25	117	1.81	98	1.75	146

Tablo 2.3. Beşgen silindir durumu için ağ yoğunluğunun detayları

Ağ no.	$M \times N$	Minimum ağ yüzeyi alanı ( $m^2$ )	Maksimum ağ yüzeyi alanı ( $m^2$ )	$\Gamma = 0$		$\Gamma = 0.02$		$\Gamma = -0.02$	
				$C_d$	$Nu$	Tüm yüzeyler		Tüm yüzeyler	
				$C_d$	$Nu$	$C_d$	$Nu$	$C_d$	$Nu$
I	$357 \times 276$	$8.386 \times 10^{-3}$	$1.245 \times 10^{-1}$	1.37	114	1.27	70	1.34	133
II	$666 \times 382$	$4.224 \times 10^{-3}$	$1.270 \times 10^{-1}$	1.39	110	1.28	71	1.36	131

Tablo 2.4. Dairesel silindir durumu için ağ yoğunluğunun detayları

Ağ no.	Hücre Sayısı	Minimum ağ yüzeyi alanı ( $m^2$ )	Maksimum ağ yüzeyi alanı ( $m^2$ )	$\Gamma = 0$		$\Gamma = 0.02$		$\Gamma = -0.02$	
				$C_d$	$Nu$	Tüm yüzeden		Tüm yüzeden	
				$C_d$	$Nu$	$C_d$	$Nu$	$C_d$	$Nu$
I	36779	$4.004 \times 10^{-3}$	$4.909 \times 10^{-1}$	1.20	117	1.019	108	0.970	120
II	14666	$2.478 \times 10^{-2}$	$4.958 \times 10^{-1}$	1.20	115	1.019	110	0.971	120
III	119215	$4.067 \times 10^{-3}$	$1.683 \times 10^{-1}$	1.22	117	1.021	111	0.970	122

Tablo 2.5. En boy oranı 0.5 olan eliptik silindir durumu için ağ yoğunluğunun detayları

Ağ no.	Hücre Sayısı	Minimum ağ yüzeyi alanı ( $m^2$ )	Maksimum ağ yüzeyi alanı ( $m^2$ )	$\Gamma = 0$		$\Gamma = 0.02$		$\Gamma = -0.02$	
				$C_d$	$Nu$	Tüm yüzeden		Tüm yüzeden	
				$C_d$	$Nu$	$C_d$	$Nu$	$C_d$	$Nu$
I	82000	$3.991 \times 10^{-3}$	$3.410 \times 10^{-1}$	0.58	107	0.585	108	0.56	124
II	15223	$2.456 \times 10^{-3}$	1.242	0.57	109	0.578	110	0.55	126
III	98566	$4.995 \times 10^{-3}$	$1.879 \times 10^{-1}$	0.58	108	0.584	108	0.56	123

Tablo 2.6. En boy oranı 0.25 olan eliptik silindir durumu için ağ yoğunluğunun detayları

Ağ no.	Hücre Sayısı	Minimum ağ yüzeyi alanı ( $m^2$ )	Maksimum ağ yüzeyi alanı ( $m^2$ )	$\Gamma = 0$		$\Gamma = 0.02$		$\Gamma = -0.02$	
				$C_d$	$Nu$	Tüm yüzeden		Tüm yüzeden	
				$C_d$	$Nu$	$C_d$	$Nu$	$C_d$	$Nu$
I	79397	$3.185 \times 10^{-3}$	$5.120 \times 10^{-1}$	0.332	99	0.336	99.4	0.329	107
II	24717	$2.405 \times 10^{-3}$	1.293	0.328	101	0.339	101	0.331	109
III	160365	$3.178 \times 10^{-3}$	$1.821 \times 10^{-1}$	0.331	99	0.336	99.1	0.328	107

Tablo 2.7. En boy oranı 0.125 olan eliptik silindir durumu için ağ yoğunluğunun detayları

Ağ no.	Hücre Sayısı	Minimum ağ yüzeyi alanı ( $m^2$ )	Maksimum ağ yüzeyi alanı ( $m^2$ )	$\Gamma = 0$		$\Gamma = 0.6$		$\Gamma = -0.6$	
				$C_d$	$Nu$	Tüm yüzeden		Tüm yüzeden	
				$C_d$	$Nu$	$C_d$	$Nu$	$C_d$	$Nu$
I	145267	$2.055 \times 10^{-3}$	$5.573 \times 10^{-1}$	0.242	82	0.48	12	0.360	220
II	45403	$2.487 \times 10^{-3}$	1.253	0.242	81	0.49	12	0.355	224
III	226177	$1.260 \times 10^{-3}$	$1.828 \times 10^{-1}$	0.241	82	0.48	12	0.360	219



### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında bir akış içerisinde durmakta olan çeşitli kesit geometrilerine sahip silindirlerin yüzeylerinden yapılan üfleme-emme uygulamasının direnç katsayısı, akış alanı ve ısı transferi üzerindeki etkileri iki boyutlu olarak incelenmiştir. Konu ile ilgili olan literatürde; üzerinde en fazla çalışma yapılmış olan geometri kare kesitli silindir olduğu için öncelikle bu geometri için inceleme yapılmıştır. Yine literatürde yer alan daire kesitli silindir yüzeylerinden yapılan üfleme-emme uygulaması incelenmiştir. Literatürde henüz incelenmemiş olan düzgün olmayan beşgen ve eliptik kesitli silindirler çeşitli geometrik oranlar için incelenmiş ve elde edilmiş olan bulgular değerlendirilmiştir. Sayısal olarak yapılan çalışmada göz önüne alınmış olan temel inceleme parametresi üfleme-emme katsayısı  $\Gamma$  dir. Çalışmadan elde edilen bulguların diğer çalışmalarla kıyaslanmasında uyum sağlanabilmesi için her bir inceleme durumuna ait olarak tanımlanmış olan ve önceki bölümde de detaylı olarak yer verilmiş olan düzeltilmiş üfleme-emme katsayısı  $\Gamma_{corr}$  da göz önüne alınmıştır.

Yüzeylerinden üfleme-emme yapılan geometriler etrafındaki akış için ilgili literatürde kısıtlı sayıda deneysel çalışma olduğundan, sadece kare silindir için sayısal bulguların deneysel verilerle kıyaslaması yapılarak sayısal bulguların geçerliliği ve doğruluğu test edilmiştir. Ayrıca üfleme-emme uygulamasının olmadığı durumlara ait deneysel bulgular da kıyaslama amacıyla kullanılmıştır. Konu ile ilgili olarak literatürde yer alan ve Turhal ve Çuhadaroğlu (2010) tarafından kare kesitli silindir için yapılmış olan deneysel çalışmadan elde edilmiş olan bulgular bu çalışmadan elde edilmiş olan sayısal bulgular ile kıyaslanmış ve oldukça iyi bir uyum elde edilmiştir. Bu uyum; çalışmanın diğer geometriler için de yapılmasında önemli bir motivasyon sağlamıştır.

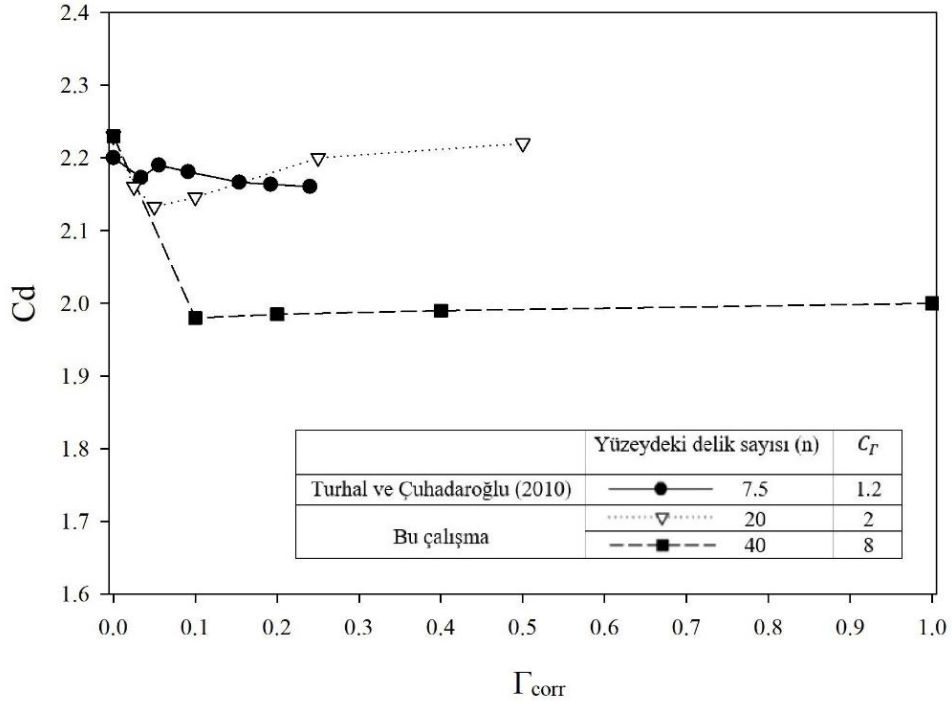
Her bir silindir için elde edilen bulgular;  $\Gamma$  üfleme-emme katsayısının  $C_D$  direnç katsayısı ile olan değişimi, silindir yakın civarındaki akışın yapısı ve iz bölgesi üzerindeki etkisi, silindir ile akış arasında ortaya çıkan ve ısı transferin ölçüsü olan Nusselt sayısı ile ilişkisini vermektedir. Ayrıca bazı geometriler için boyut oranlarındaki değişimlerin de etkisi incelenmiştir. Tipik geometriler olan kare ve daire kesitli silindirlere ait bulguların, pratikte yaygın olarak akış-cisim etkileşimi olan ısı değiştirgeçler vb. uygulamalarda yararlı bilgiler sağlayacağı beklenmektedir. Ayrıca düzgün olmayan beşgen ve eliptik kesitli geometrilerin uzay ve deniz taşıtları vb. uygulamalar için yararlı olacağı düşünülmektedir.



Şekilde de görüldüğü gibi kare silindirin yakın iz bölgesinde deneysel çalışmalar ile oldukça iyi bir uyum vardır. Silindirden uzaklaşıldıkça ortaya çıkan sapmalar, yapılan çalışmalarda göz önüne alınmış olan farklı özelliklerden kaynaklanmaktadır. Üfleme-emmesiz durum için elde edilen bu uyum, çalışmada kullanılan yöntemlerin ve koşulların geçerli olduğunu, yüzeylerden üfleme-emme uygulaması incelemesi yapılabilmesine elverişli olduğunu göstermektedir.

### 3.1.1. Üfleme ve Emmenin Direnç Katsayısı Üzerindeki Etkisi

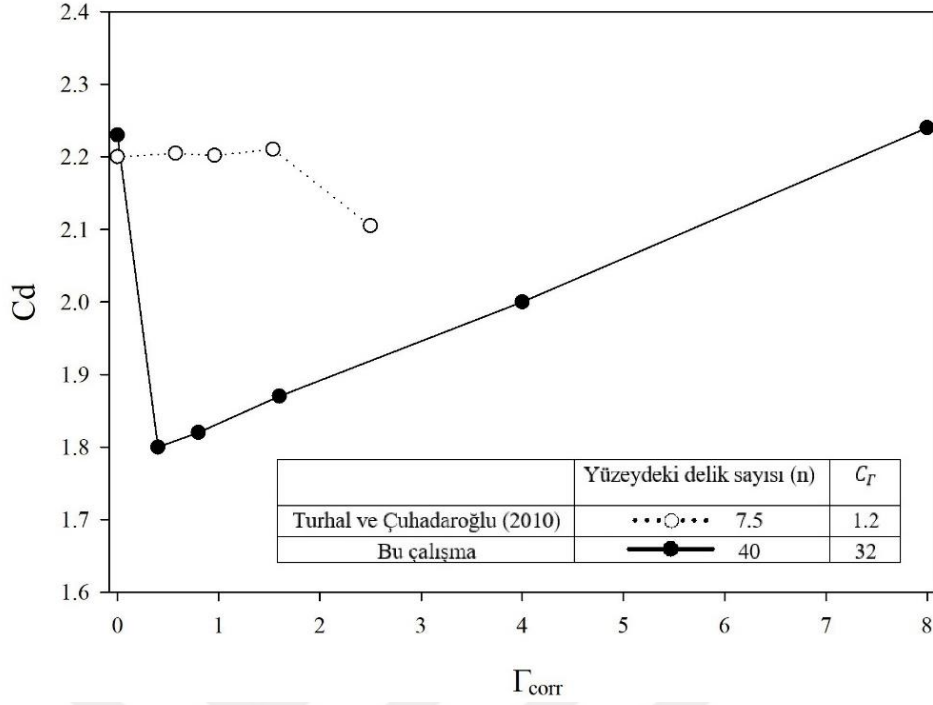
Yüzeyden yapılan üflemenin yüzeydeki delik sayısı ve üfleme yoğunluğu ile ilişkili olacağı açıktır. Bölüm 2’de yer verilmiş olan perforasyon yoğunluğu ( $C_F$ ) ile birlikte tanımlanmış olan düzeltilmiş üfleme katsayısı  $\Gamma_{corr}$  farklı çalışmaların kıyaslanması amacıyla göz önüne alınmıştır. Bu çalışmada da test amaçlı olarak kare kesitli silindirin arka yüzeylerinden farklı  $C_F$  değerleri için yapılan üfleme ile Turhal ve Çuhadaroğlu (2010) tarafından  $Re = 24000$  için yapılmış olan deneysel çalışmadaki direnç katsayısının değişimleri kıyaslamalı olarak Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.2. Kare kesitli silindirin arka yüzeyinden yapılan üfleme için direnç katsayısının  $\Gamma_{corr}$  ile değişimi

Şekilde de görüldüğü gibi; bu çalışmada kare silindirin arka yüzeyinden  $C_r = 2$  için yapılan üfleme ile Turhal ve Çuhadaroğlu (2010) tarafından yapılan çalışmada  $C_r = 1.2$  için elde edilmiş olan direnç değişimleri arasında oldukça yakın bir uyum vardır. Artan  $C_r$  değerleri için direnç katsayısında hafif bir düşme davranışı olduğu görülmektedir. Bu durum yüzeyin perforasyon yoğunluğunun artmasından kaynaklanmaktadır. Diğer bir deyişle yüzeyden yapılan üfleme sadece  $F$  üfleme-emme katsayısına bağlı olmayıp, yüzeydeki delik sayısına ve üfleme yapılan deliklerin yüzeydeki oranına da bağlıdır. Yüzeydeki delik sayısının artması ile birlikte yüzeyin yapısı sanal bir pürüzlü yüzey özelliğine dönüşmektedir. Yüzeyden çok düşük hızlarda yapılan üfleme ya da emme yüzeyin dalgalı bir geometrik yapıya dönüşmesini ve akışın bu dalgalı yapı üzerinde tipik bir pürüzlü yüzey gibi davranış göstermesine neden olmaktadır. Bilindiği gibi yüzey pürüzlülüğü direnç üzerinde etkili olan bir özelliktir. Üfleme/emme etkisinin artması ile birlikte direnç katsayısı üzerindeki etki ortadan kalkmakta ve direnç katsayısı sabit kalmaktadır. Çalışma kapsamında kare kesitli silindirin ön veya arka yüzeylerinden yapılan üfleme durumlarında  $C_r = 8$  değeri için sonuçlar elde edilmiştir.

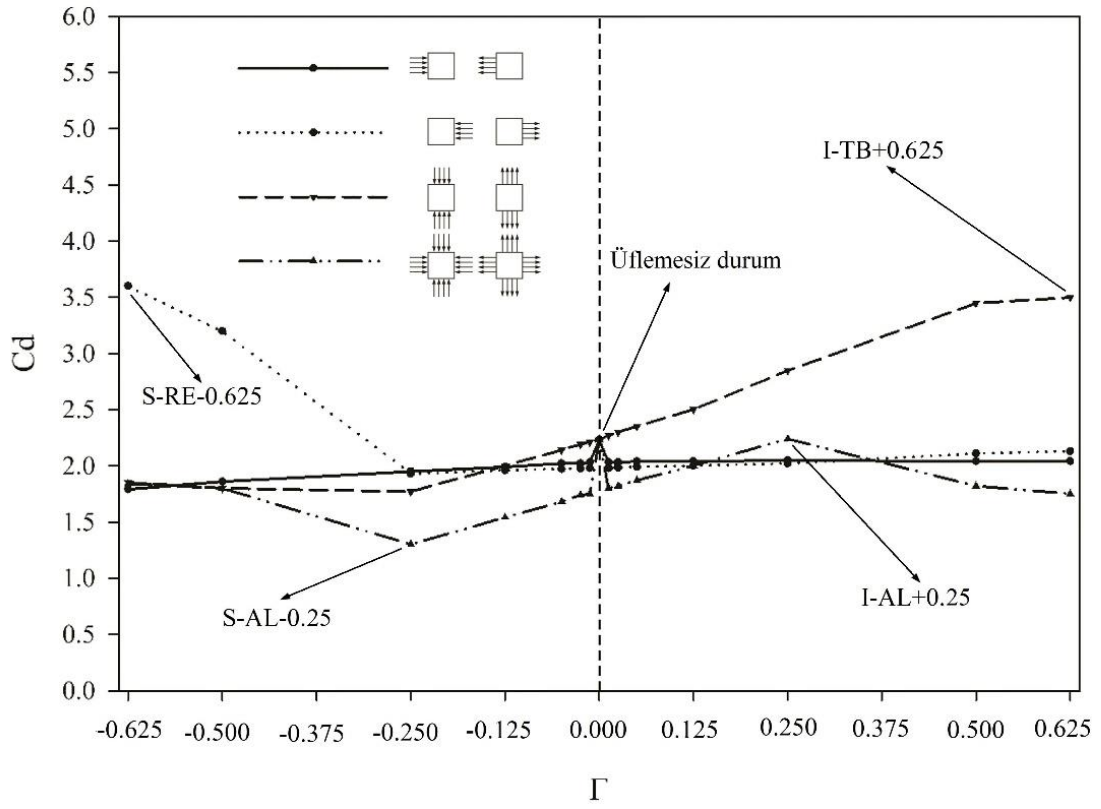
Şekil 3.3'te delikli silindirin tüm yüzeylerinden uygulanan üfleme durumundaki direnç katsayısının düzeltilmiş üfleme-emme katsayısı ile olan değişimi, Turhal ve Çuhadaroğlu'nun (2010)  $Re = 24000$  için elde edilmiş olan deneysel verileri ile kıyaslanmıştır. Elde edilen bulgular; silindirin tüm yüzeylerinden düşük üfleme katsayılarında uygulanan üfleme ve emmenin (Şekil 3.4), arka yüzeyden yapılan üflemede olduğu gibi, direnç katsayısında ani bir düşmeye neden olduğunu, sonrasında artmakta olduğunu göstermektedir. Bu davranış düşük etkili üfleme ya da emmenin (Şekil 3.4) bir "yüzey pürüzlülüğü etkisi" oluşturduğunu ve dolayısıyla yüzey basınç dağılımında değişmeye neden olarak direnç katsayısında dar bir aralıkta düşmeye yol açtığını göstermektedir.



Şekil 3.3. Kare silindirin tüm yüzeylerinden yapılan üfleme için direnç katsayısının  $\Gamma_{corr}$  ile değişimi

Şekil 3.4'te direnç katsayısının çeşitli üfleme-emme durumları için  $\Gamma$  ile olan değişimleri görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi üst ve alt yüzeylerden yapılan üfleme/emme dışındaki tüm konfigürasyonlarda düşük üfleme/emme katsayısı değerlerinde direnç katsayısında ani bir düşme ortaya çıkmakta ve üflemesiz değer civarında bir “külâh” görüntüsü elde edilmektedir. Külâh yüksekliği tüm yüzeylerden yapılan üfleme/emmede ön ya da arka yüzeylerden yapılan üflemeye göre daha yüksektir. Bu davranış üfleme emmenin neden olduğu “sanal pürüzlülüğün” ön ve arka yüzeyin her ikisinde birden ortaya çıkmış olmasından ve dolayısıyla yüzeydeki basınç dağılımı üzerindeki etkisinin daha da artmasından kaynaklanmaktadır. Üst ve alt yüzeylerden yapılan üflemede üflemesiz değer civarında herhangi bir değişikliğin olmadığı ve değişimin monoton olarak devam ettiği görülmektedir. Silindirin ön yüzeyinden yapılan üfleme ve emmenin üflemesiz değere yakın bölge dışında direnç katsayısını hemen hemen hiç etkilemediği görülmektedir. Silindirin arka yüzeyinden yapılan emmede de  $\Gamma = -0.25$  değerine kadar direnç katsayısında belirgin bir değişimin olmadığı ancak  $\Gamma = -0.25$  değerinden daha düşük emme durumlarında direnç katsayısı önemli ölçüde artmaktadır. Örneğin  $\Gamma = -0.5$  değerinde üflemesiz duruma göre artış %43 ve  $\Gamma = -0.625$  (S-RE-0.625) değerinde de %60 civarındadır. Üst-alt yüzeylerden yapılan üfleme durumunda artan üfleme katsayısı ile birlikte direnç katsayısında monoton

bir artış olduğu ve  $\Gamma = 0.625$  (I-TB +0.625) için direnç katsayısında üflemez duruma göre % 57'lik bir artışın ortaya çıktığı görülmektedir. Üst-alt yüzeylerden yapılan emmede  $\Gamma = -0.25$  değerine kadar monoton bir düşme olduğu ve  $\Gamma = -0.25$  değerindeki emme için direnç katsayısında üflemez duruma göre %20'lik azalma olduğu görülmektedir. Bu değer altındaki emme katsayılarında direnç katsayısında bir değişim ortaya çıkmamaktadır. Genel olarak bakıldığında üst-alt yüzeyler yapılan üflemenin direnç katsayısını artırmakta olduğu, emmenin ise düşürmekte olduğu görülmüştür.

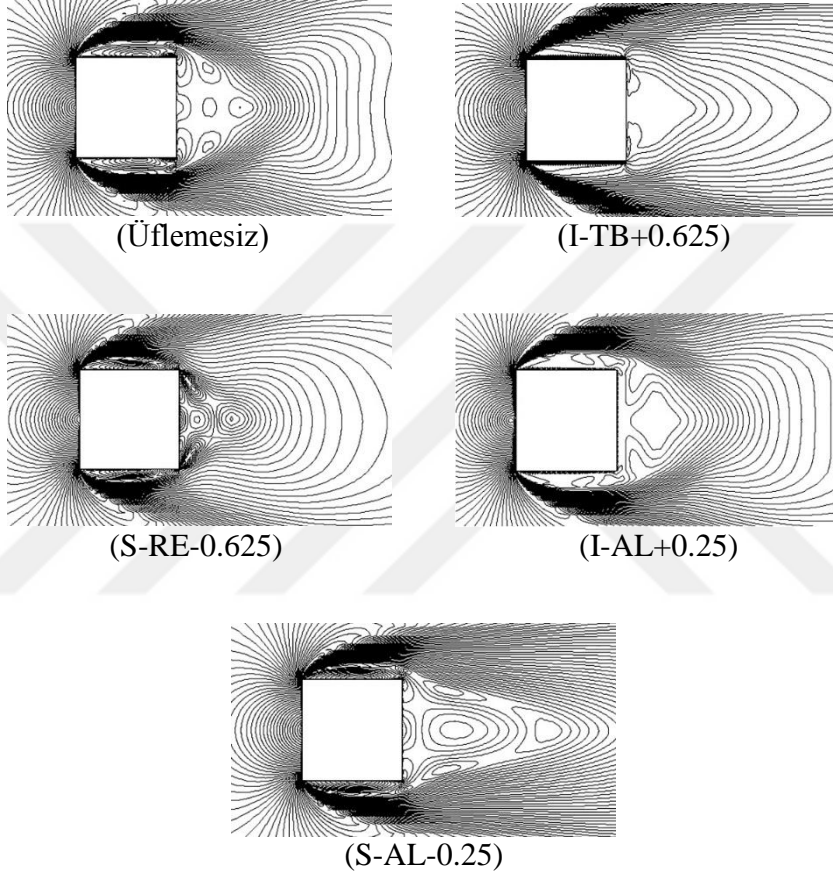


Şekil 3.4. Akış alanı içerisinde yer alan kare silindir için çeşitli üfleme-emme konfigürasyonlarında direnç katsayısının  $\Gamma$  ile değişimi ( $Re \approx 22000$ )

Silindirin tüm yüzeylerinden yapılan üfleme ve emmede  $-0.25 \leq \Gamma \leq 0.25$  aralığında direnç katsayısı üflemez duruma göre %40 daha düşük değerinden üflemez durumdaki değerine kadar monoton bir şekilde artış göstermektedir. Üfleme katsayısının 0.25'ten büyük değerlerinde direnç katsayısı hafifçe düşmekte, emme katsayısının -0.25'ten düşük değerlerinde ise direnç katsayısında tekrar artış ortaya çıkmaktadır.

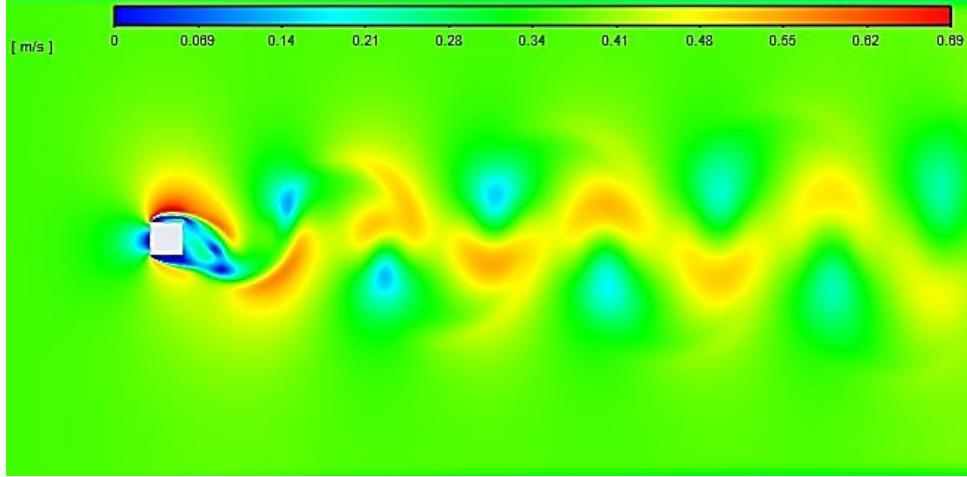
Şekil 3.4'te vurgulandığı gibi çeşitli üfleme-emme konfigürasyonlarında  $C_d$  direnç katsayısı kritik değerler almaktadır. Bu kritik değerlerin ortaya çıktığı akış durumlarına ait

zaman ortalamalı akım çizgileri, eş hız dağılımları ve ortalama hız vektörleri Şekil 3.5-3.7’de gösterilmiştir. Şekil 3.5’te de görüldüğü gibi;  $C_d$  direnç katsayısı için kritik değerlerin ortaya çıktığı üfleme emmeli akışlarda ön köşelerden belirgin bir akış ayrılması ortaya çıkarken emmeli durumlarda akış ayrılması en düşük düzeye gerilemekte ve cisim arkasındaki iz bölgesi kısalmaktadır.

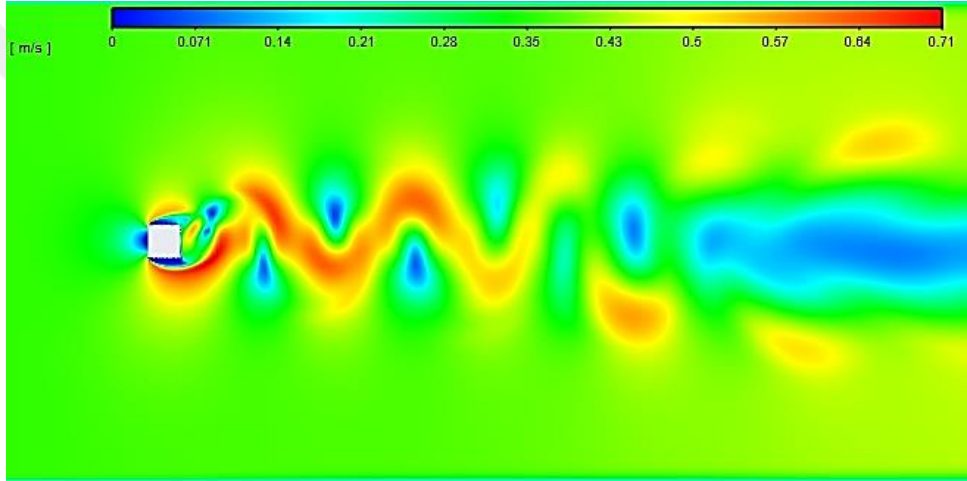


Şekil 3.5. Kritik direnç katsayılarının ortaya çıktığı üfleme-emme durumlarındaki ortalama akım çizgileri ( $Re \cong 22000$ )

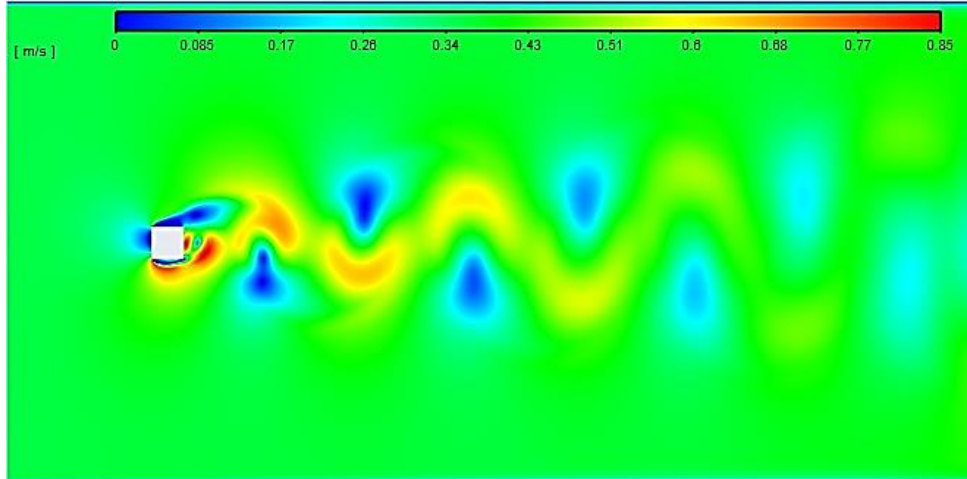
Şekil 3.6’da görülen kritik değerlere ait eş hız dağılımları göstermektedir ki; yüzeylerden yapılan üfleme ile periyodik girdap hareketli iz bölgesinde ana akış hızı artarken, girdapların enerjisi üfleme emmeli duruma göre düşmektedir. Yüzeylerden yapılan emmede ise hem ana akışın hem de girdapların enerjisinde belirgin bir düşme olduğu görülmektedir.



(Üflemesiz)



(I-TB+0.625)

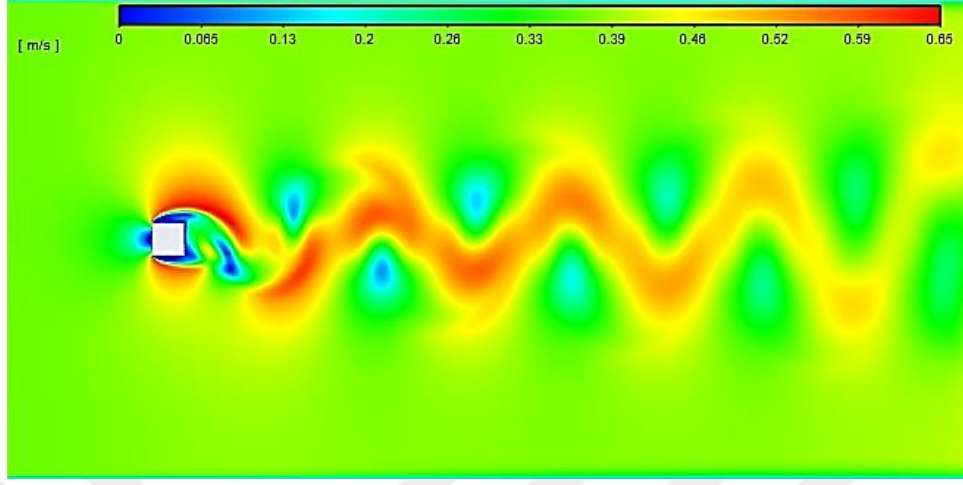


(S-RE-0.625)

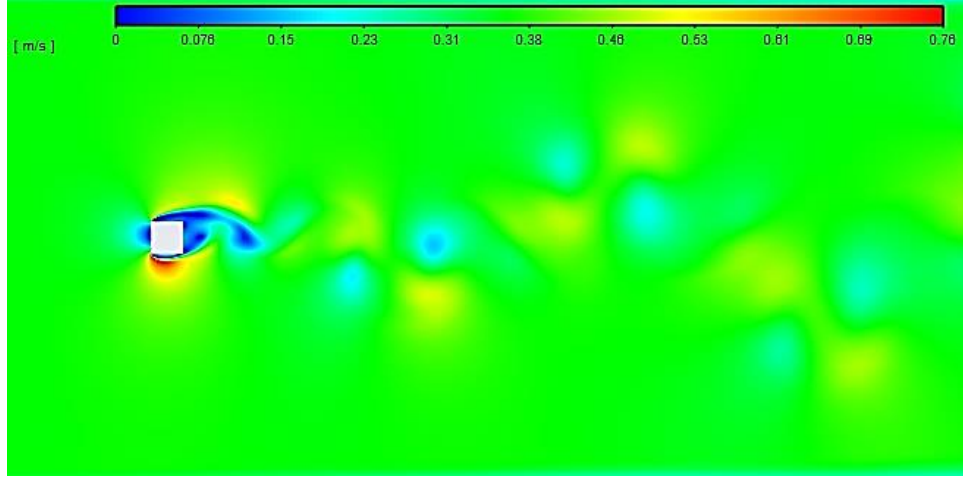
Şekil 3.6. Kritik direnç katsayılarının ortaya çıktığı üfleme-emme durumlarındaki eş hız dağılımları ( $Re \cong 22000$ )



Şekil 3.6'in devamı

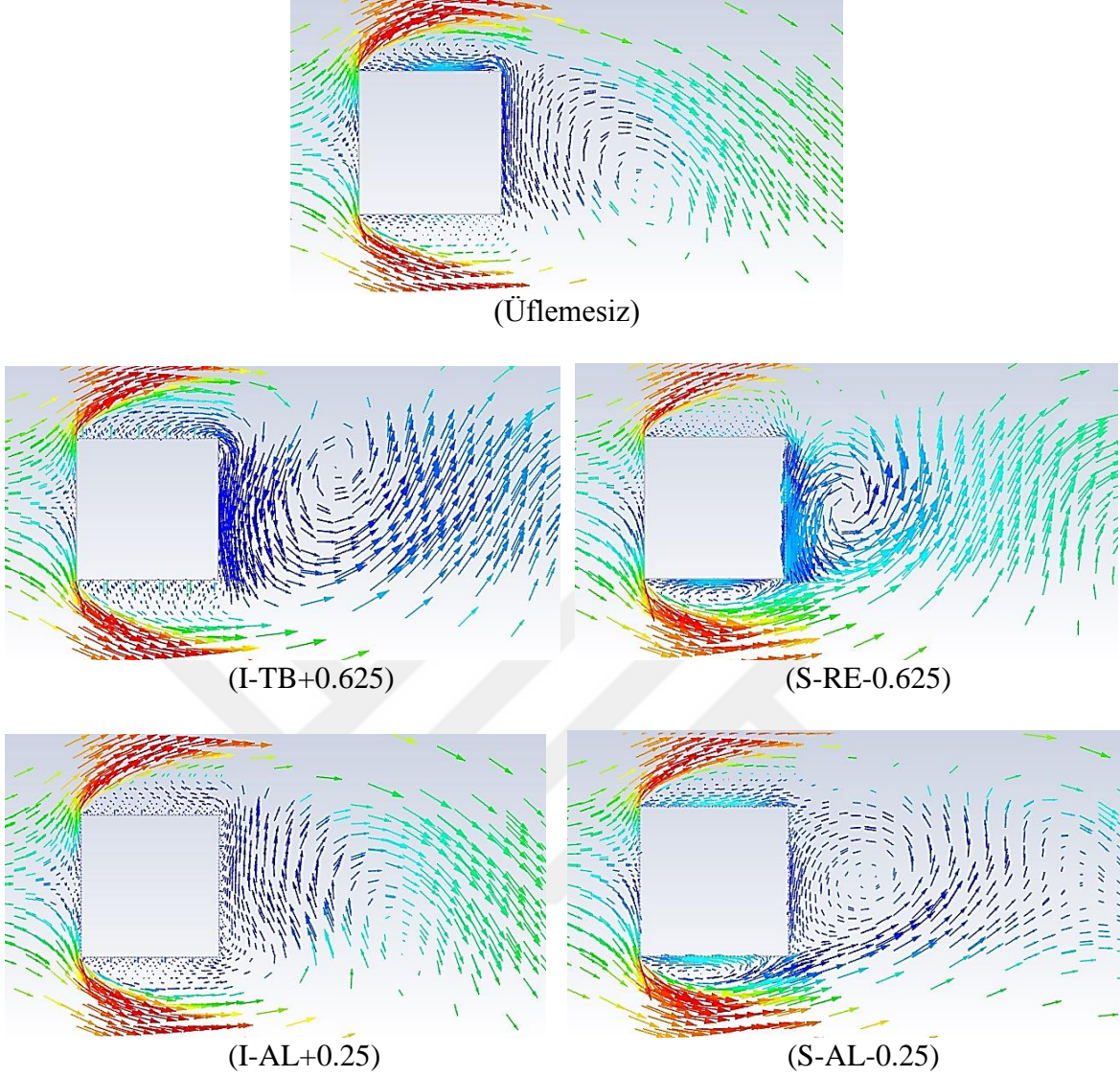


(I-AL+0.25)



(S-AL-0.25)

Şekil 3.7'de kare silindirin yakın civarına ait ortalama hız vektörleri dağılımından görüldüğü gibi üflemez duruma göre kıyaslama yapıldığında; tüm yüzeylerden  $\Gamma = 0.25$  için yapılan üflemeyle ait hız vektörleri ile üflemez duruma ait hız vektörleri büyük bir benzerlik göstermektedir. Nitekim her iki duruma ait direnç katsayıları da yaklaşık olarak aynı düzeydedir. Öte yandan direnç katsayılarının yaklaşık olarak aynı düzeyde olduğu üst-alt yüzeylerden  $\Gamma = 0.625$  ile yapılan üfleme ve arka yüzeyden  $\Gamma = -0.625$  ile yapılan emme durumlarına ait hız vektörleri dağılımları da benzerlik taşımaktadır. Bu davranışlar göz önüne alındığında kare kesitli silindir etrafındaki akışta  $C_d$  direnç katsayısının kritik değerler aldığı durumların akışın yapısı ile doğrudan bağlantılı olduğu ve ortaya çıkan enerji ve akış yapısı değişimlerinin direnç katsayısı üzerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır.

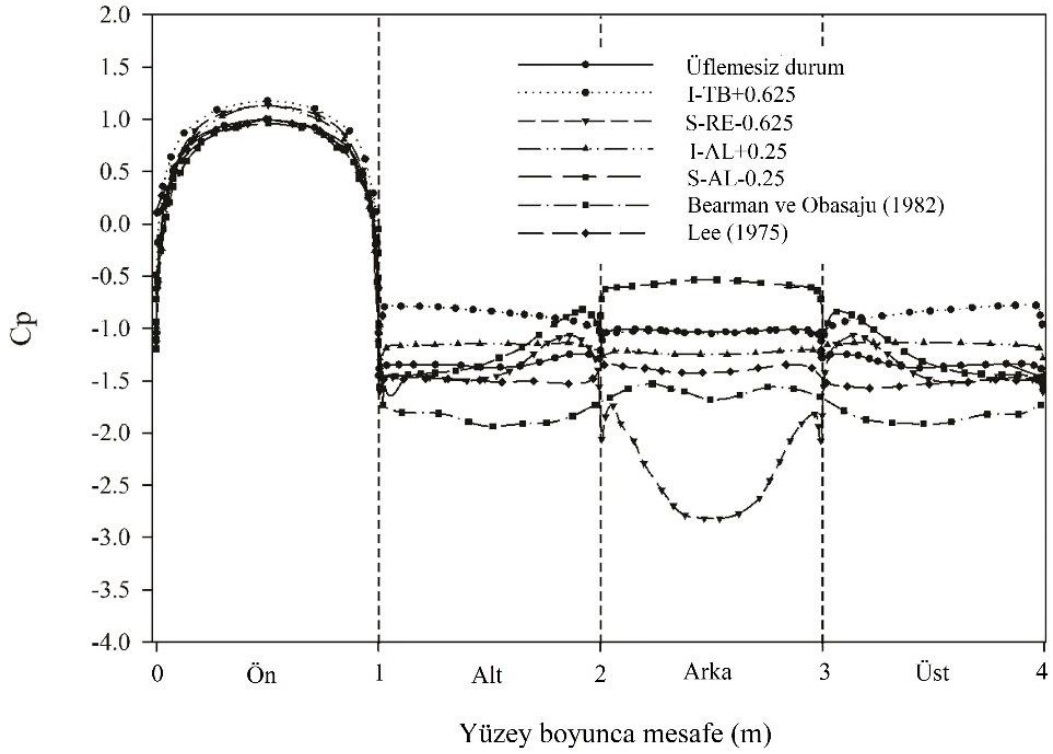


Şekil 3.7. Kritik direnç katsayılarının ortaya çıktığı üfleme-emme durumlarındaki ortalama hız vektörleri ( $Re \cong 22000$ )

### 3.1.2. Üfleme ve Emmenin Basınç Dağılımı Üzerindeki Etkisi

Ortalama basınç katsayısının ( $C_p$ ) çevresel dağılımı Şekil 3.8'de görülmektedir. Üflemez duruma ait bulgular literatürde mevcut olan Lee (1975); Bearman ve Obasaju (1982) tarafından yapılan deneysel çalışmalarla kıyaslamalı olarak karşılaştırılmış ve iyi bir uyum elde edilmiştir. Şekil 3.4'te gösterilmiş olan kritik  $C_d$  değerlerine ait akış durumlarına ait değişimlerden görüldüğü gibi ön yüzeydeki basınç dağılımı tüm konfigürasyonlar için yaklaşık olarak aynı kalmakta iken, diğer yüzeylerdeki (alt, arka ve üst) basınç katsayısı,  $\Gamma$ 'ya bağlı olarak değişmektedir. Üst ve alt yüzeylerdeki basınç katsayısı dağılımları her

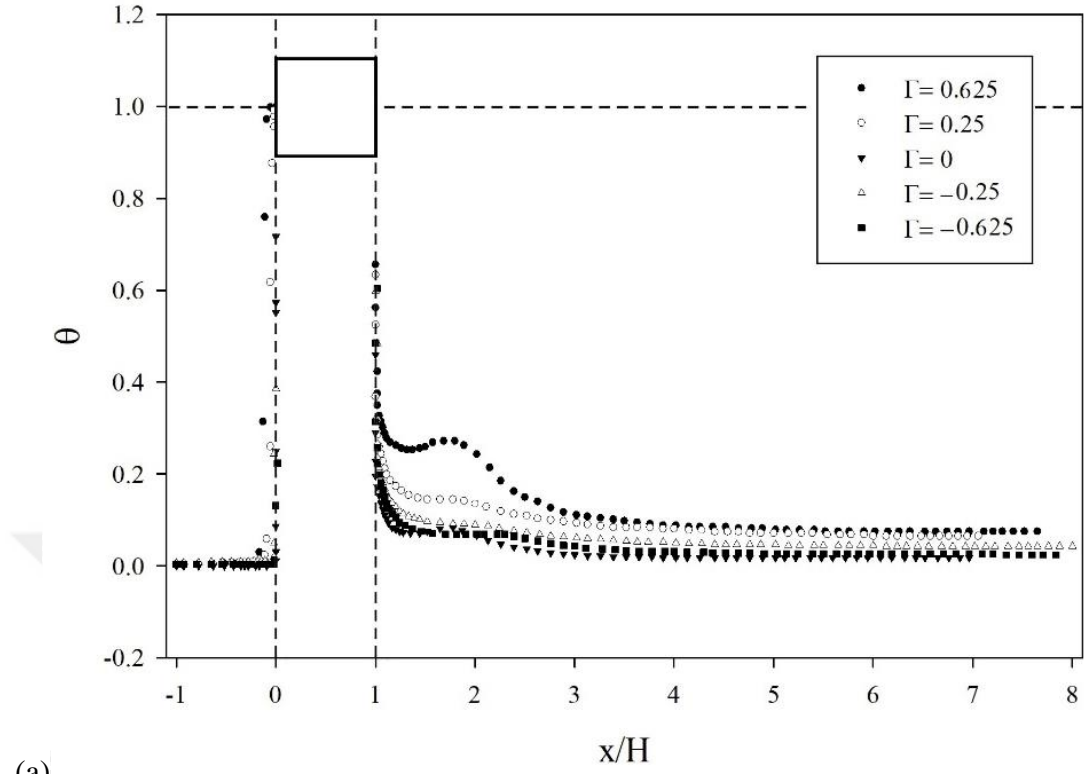
durumda simetri nedeniyle aynı kalmaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi; tüm yüzeylerden emme (S-AL-0.25) durumunda ön ve arka yüzeylerdeki toplam basınç farkı en az olmakta ve Şekil 3.4'te görülen en düşük direnç katsayısı değeri ortaya çıkmaktadır. Öte yandan, arka yüzeyden  $\Gamma = -0.625$  değerinde yapılmakta olan emme durumunda (S-RE-0.625) ise ön ve arka yüzeyler arasındaki toplam basınç farkı en yüksek değere çıkmakta ve doğal olarak en yüksek direnç katsayısı elde edilmektedir.



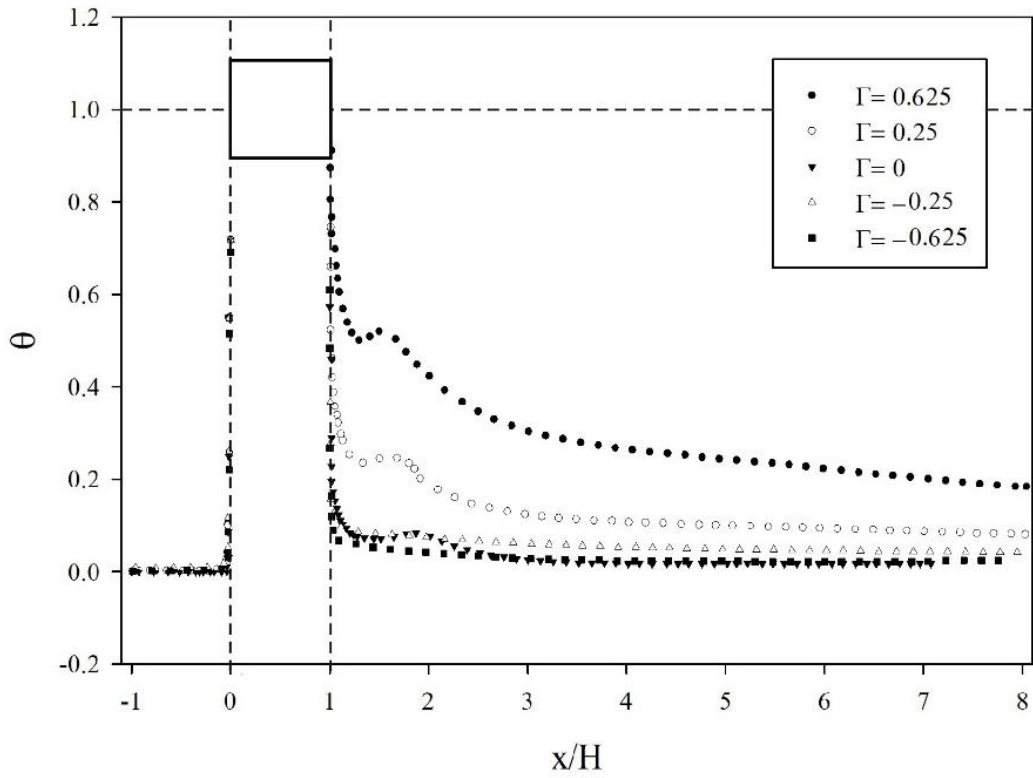
Şekil 3.8. Kare kesitli silindir yüzeylerinde ortalama basınç katsayısının değişimi  
( $Re \cong 22000$ )

### 3.1.3. Üfleme ve Emmenin Sıcaklık Dağılımı ve Nusselt Sayısı Üzerindeki Etkisi

Çalışma kapsamında yüzeyden yapılan üfleme-emmenin ısıl etkileri akış alanındaki boyutsuz sıcaklık dağılımları ve Nusselt sayıları ile incelenmiştir. Şekil 3.9'da görüldüğü gibi, silindirin yüzeylerinden uygulanan üfleme, silindirin merkez çizgisi üzerindeki sıcaklık dağılımını özellikle yüksek  $\Gamma$  değerlerinde etkilerken, beklendiği gibi emme işleminin iz bölgesindeki sıcaklık dağılımı üzerinde belirgin bir etkisi yoktur.



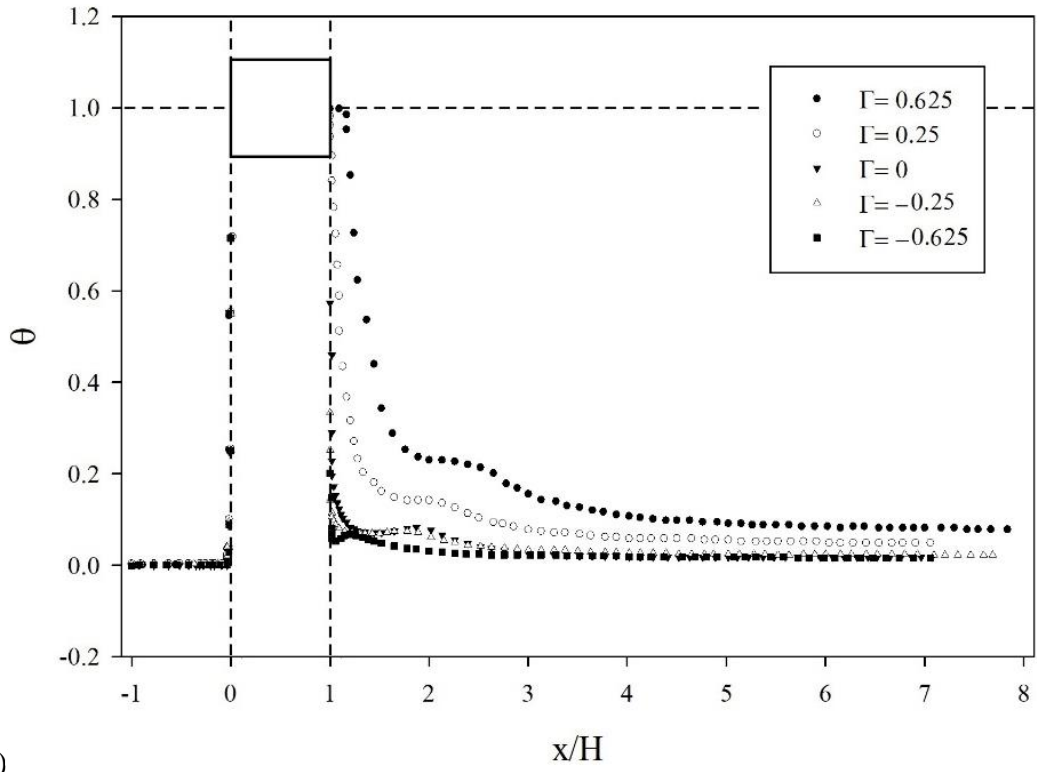
(a)



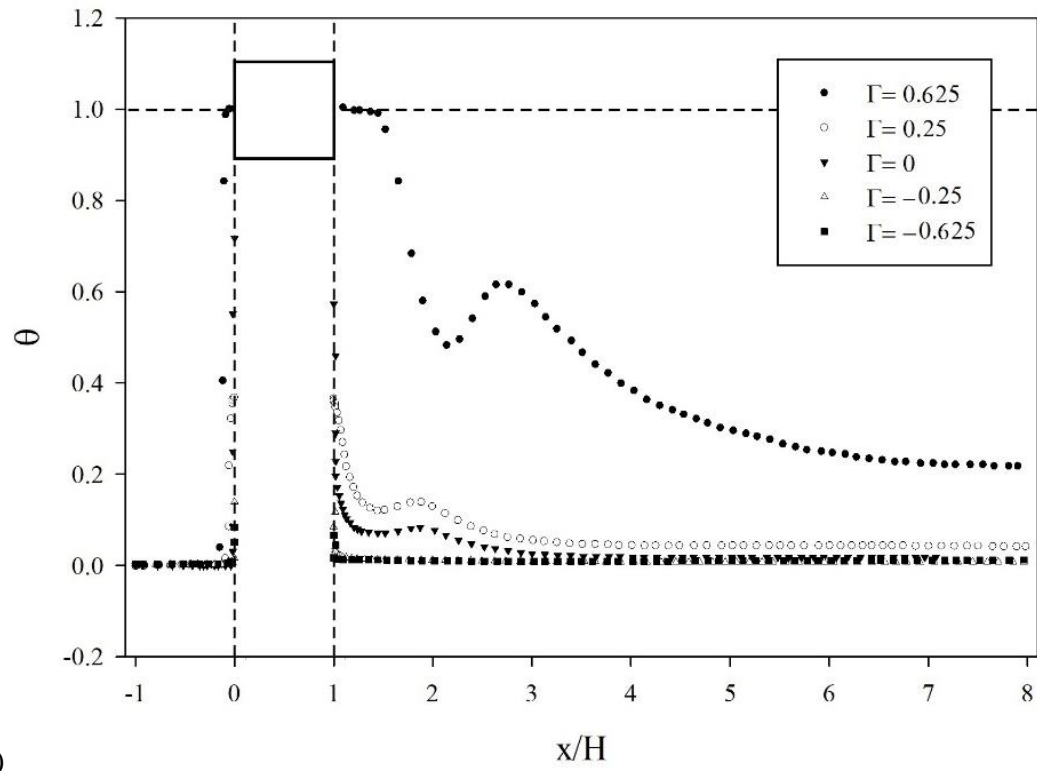
(b)

Şekil 3.9. Silindirin merkez çizgisi üzerindeki çeşitli üfleme-emme değerleri için boyutsuz ortalama sıcaklık dağılımı; a) Ön yüzey, b) Üst-alt yüzeyler, c) Arka yüzey, d) Tüm yüzeyler ( $Re \cong 22000$ )

Şekil 3.9'in devamı

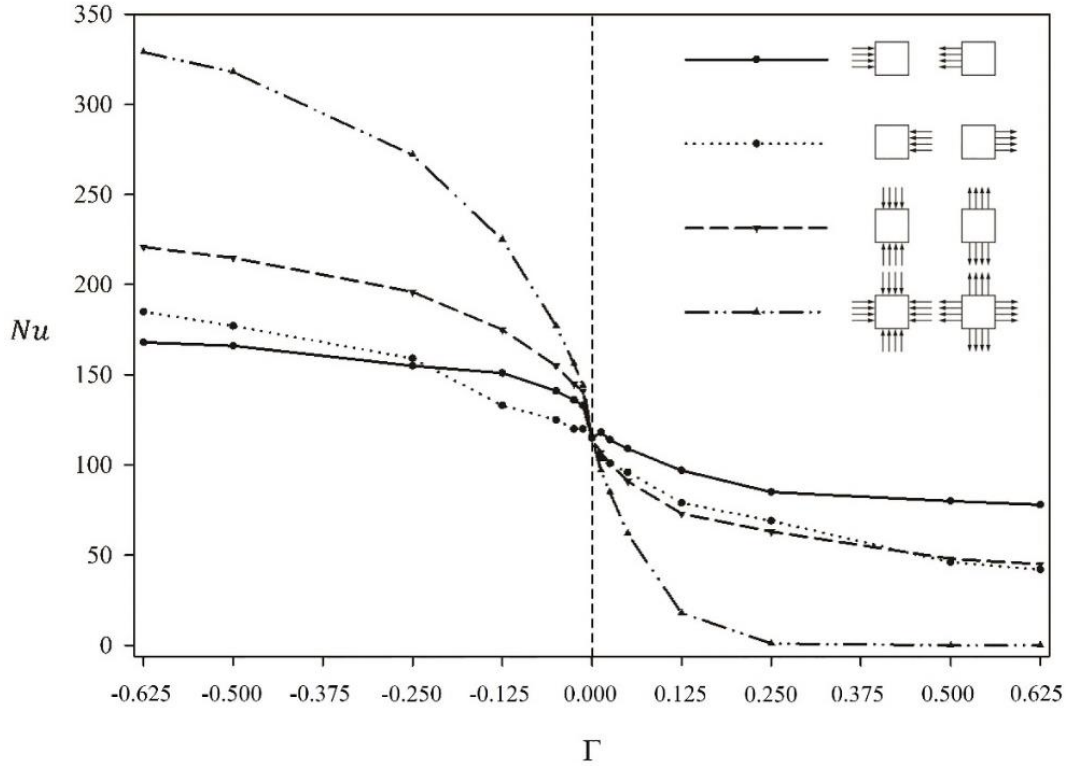


(c)



(d)

Tüm üfleme ve emme değerleri için zaman ortalamalı  $Nu$  sayısının değişimi Şekil 3.10'da görülmektedir. Her durumda emme katsayısının ( $\Gamma$ ) artışı ile birlikte  $Nu$  sayısı da artmakta ve ısı transferi iyileşirken, üfleme katsayısının artışı  $Nu$  sayısının düşmesine neden olmaktadır. Üflemesiz duruma ait  $Nu$  sayısı diğer tüm üfleme-emme durumlarına ait  $Nu$  sayısı değişimleri ile kıyaslandığında görülmektedir ki; en yüksek artış ve azalma  $|\Gamma| = 0.625$  değerinde ortaya çıkmaktadır. Bu artış ve azalma değerleri oransal olarak sırasıyla ön yüzeyden üfleme-emme durumunda %46 ve %32, arka yüzeyden üfleme emme durumunda %61 ve %63, üst-alt yüzeylerden üfleme-emme durumunda % 92 ve %60, tüm yüzeylerden üfleme-emme durumunda ise %180 ve %115 olarak elde edilmiştir. Genel olarak bakıldığında silindirin tüm yüzeylerinden uygulanan emmenin, silindirden akışa olan ısı transferini iyileştirmekte olduğu, üflemenin ise ısı transferini azaltarak ısı koruma sağladığı görülmüştür.



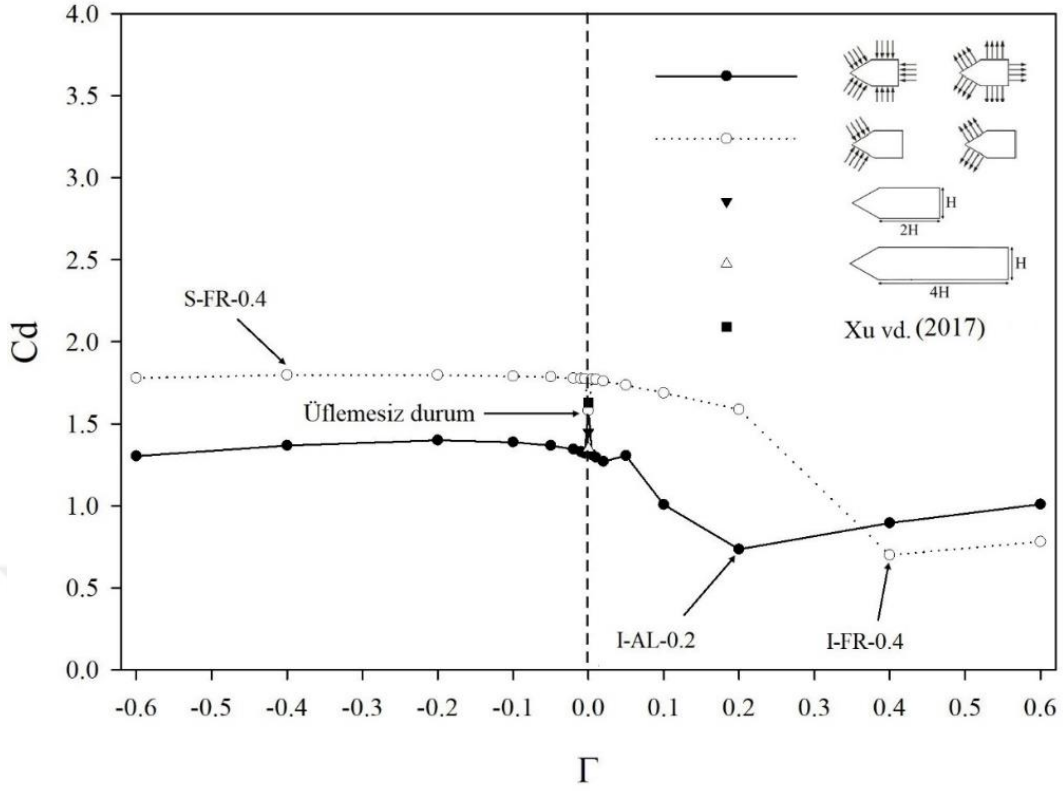
Şekil 3.10. Çeşitli üfleme-emme durumları için zaman ortalamalı  $Nu$  sayısının  $\Gamma$  ile değişimi ( $Re \cong 22000$ )

### 3.2. Beşgen Kesitli Silindir Etrafındaki Akış

Pratik uygulamalarda yaygın olarak yer almayan, uzay ve hava taşıtları füze, gemi ve torpido gibi taşıtların geometrisini modellemek üzere çalışma kapsamında düzgün olmayan beşgen kesitli silindir için de inceleme yapılmıştır. Bu amaçla modeli oluşturulan beşgen kesitli silindirin ön ve tüm yüzeylerinden yapılan üfleme ve emmenin hidrodinamik ve ısı özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

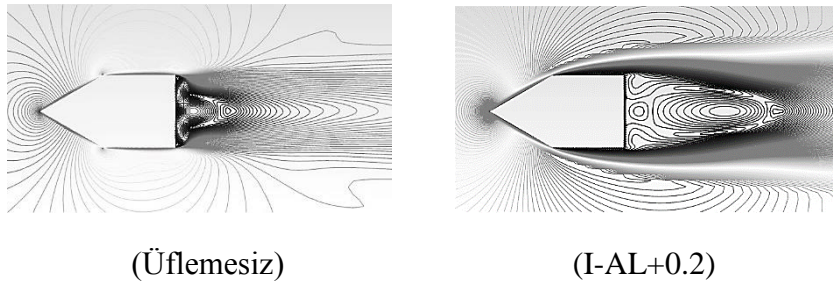
#### 3.2.1. Üfleme ve Emmenin Direnç Katsayısı Üzerindeki Etkisi

Çalışmada göz önüne alınan beşgen kesitli konfigürasyonlara ait üfleme-emme uygulamasının direnç katsayısı üzerindeki etkisi Şekil 3.11’de görülmektedir. Üflemesiz duruma ait sonuçların doğruluğunun test edilmesi amacıyla literatürde Xu vd. (2017) tarafından yapılmış olan deneysel çalışma ile kıyaslama yapılmış ve şekilde de görüldüğü gibi oldukça iyi bir uyum elde edilmiştir. Akış alanı içerisinde yer alan beşgen kesitli silindirin tüm delikli yüzeylerinden uygulanan üfleme ve emme ile birlikte üflemesiz duruma göre her durumda  $C_d$  direnç katsayısı daha düşük değerler almaktadır. Tüm yüzeylerden yapılan emmede direnç katsayısı  $\Gamma$  emme katsayısı ile birlikte fazla bir değişim göstermezken, üfleme katsayısının artması ile birlikte direnç katsayısında önemli değişimler ortaya çıkmaktadır. Bu davranış tüm yüzeyler üzerindeki basınç değişiminin üflemede daha belirgin olmasından kaynaklanmaktadır. Tüm yüzeylerden yapılan üflemede maksimum azalma üflemesiz duruma göre yaklaşık %53 olarak  $\Gamma = 0.20$  değerinde ortaya çıkmıştır. Silindirin ön yüzeylerinden uygulanan üfleme ve emme durumunda direnç katsayısı  $\Gamma \leq 0.20$  değeri aralığında hep üflemsiz duruma ait direnç katsayısının üzerinde değer almaktadır.  $\Gamma = 0.4$  değerinde direnç katsayısında yaklaşık %56 düzeyinde en yüksek düşmenin olduğu görülmektedir. Ayrıca silindirin boyunun uzaması durumlarında  $AR = 1$ ’e kıyasla direnç katsayısının  $AR = 0.5$  için %8 ve  $AR = 0.25$  değerleri için yaklaşık %14 azalmakta olduğu görülmektedir. Değişimlere genel olarak bakıldığında düzgün olmayan beşgen kesitli silindirlerde direnç düşümünün sağlanmasında boydaki değişimden ziyade tüm yüzeylerden yapılan üfleme ve ön yüzeylerden  $\Gamma \geq 0.4$  değerlerinde yapılan üfleminin etkili olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.11. Akış alanı içerisinde yer alan beşgen silindir için, direnç katsayısının  $\Gamma$  ile değişimi ( $Re \cong 22000$ )

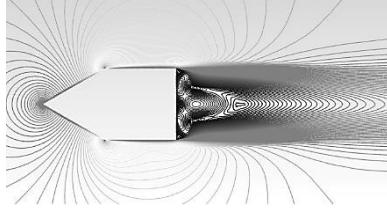
Şekil 3.11’de görülen bazı kritik direnç katsayısı değerlerine ait akışlar için zaman ortalamalı akım çizgileri, eş hız dağılımları ve ortalama hız vektörleri Şekil 3.12-14’te yer almaktadır. Akım çizgilerine ait görüntülerden anlaşıldığına göre düşük direnç katsayılı akış durumlarında silindirin ön-üst ve ön-alt köşelerinden olan ayrılma yapısı benzerlik göstermektedir.



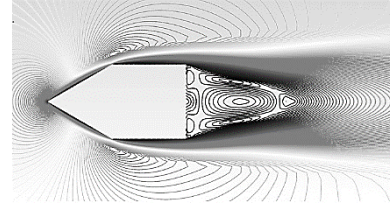
Şekil 3.12. Bazı kritik üfleme-emme durumları için zaman ortalamalı akım çizgileri ( $Re \cong 22000$ )



Şekil 3.12'in devamı

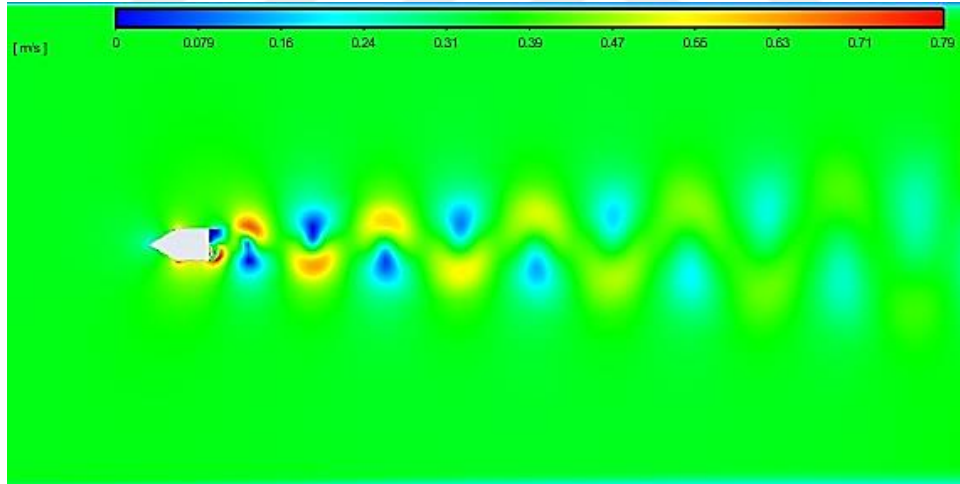


(S-FR-0.4)



(I-FR+0.4)

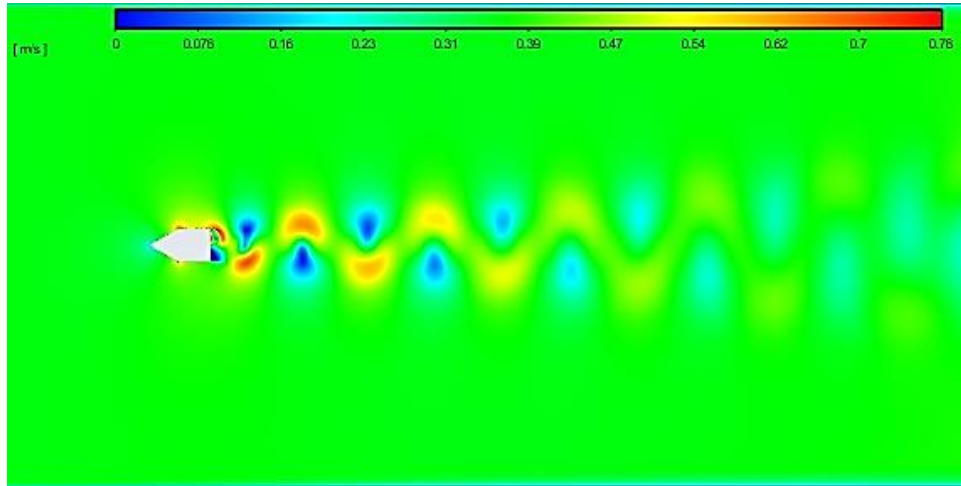
Şekil 3.13'te yer alan görsellerde tüm yüzeylerden yapılan üfleme-emme uygulamasına ait çeşitli durumlar için eş hız dağılımları yer almaktadır. Genel olarak bir değerlendirme yapıldığında; tüm yüzeylerden aynı düzeydeki üfleme ve emme katsayılı akışlarda üfleminin girdap bölgesinde yüksek enerjili (hızlı) bir akışa neden olduğu, emmenin ise düşük enerjili (hızlı) bir akış ortaya çıkardığı görülmektedir.



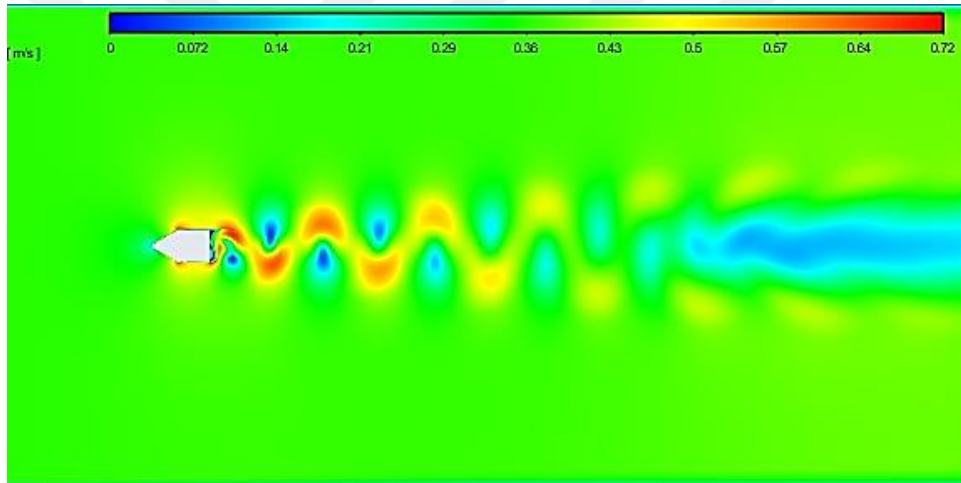
$$\Gamma = -0.6$$

Şekil 3.13. Tüm yüzeylerden uygulanan üfleme-emmede bazı  $\Gamma$  değerleri için eş hız dağılımları ( $Re \cong 22000$ )

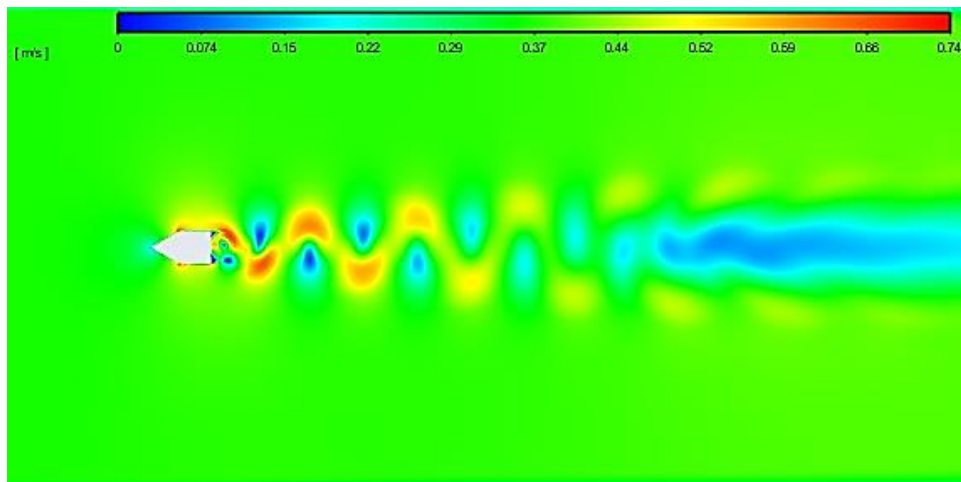
Şekil 3.13'in devamı



$$\Gamma = -0.4$$

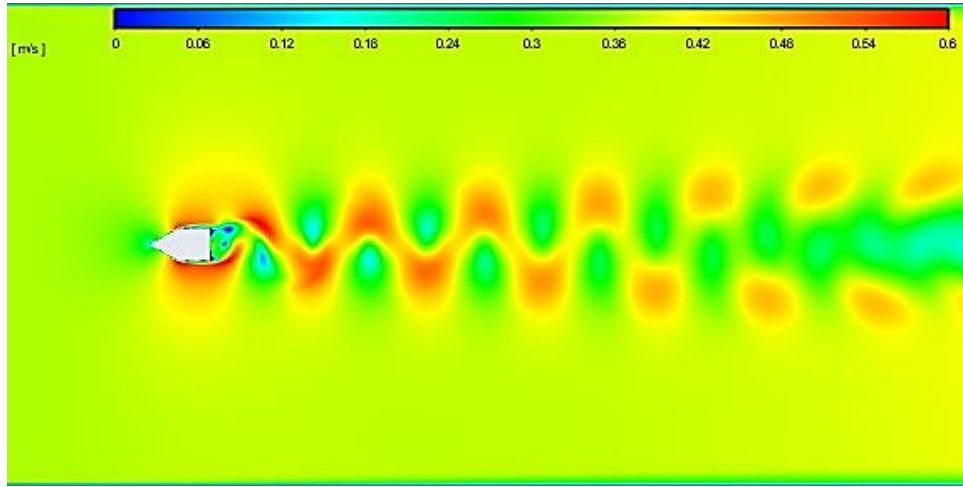


$$\Gamma = -0.1$$

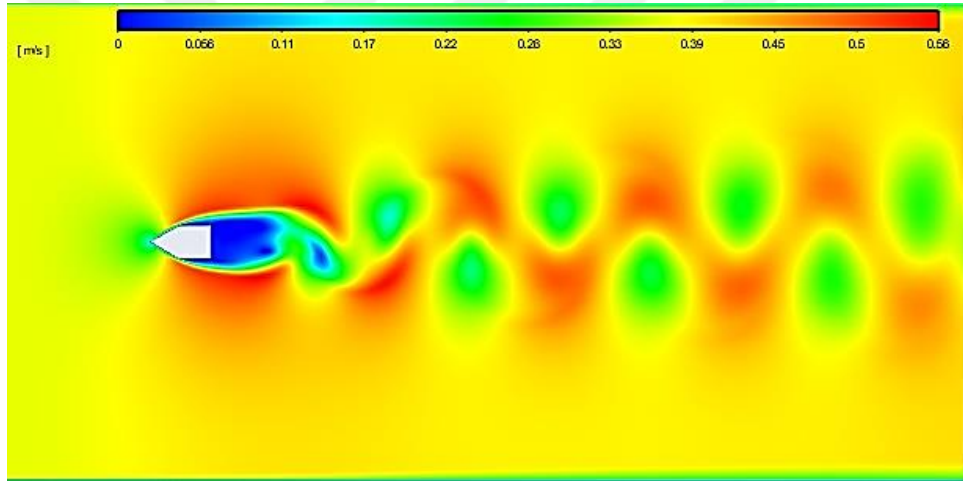


$$\Gamma = 0$$

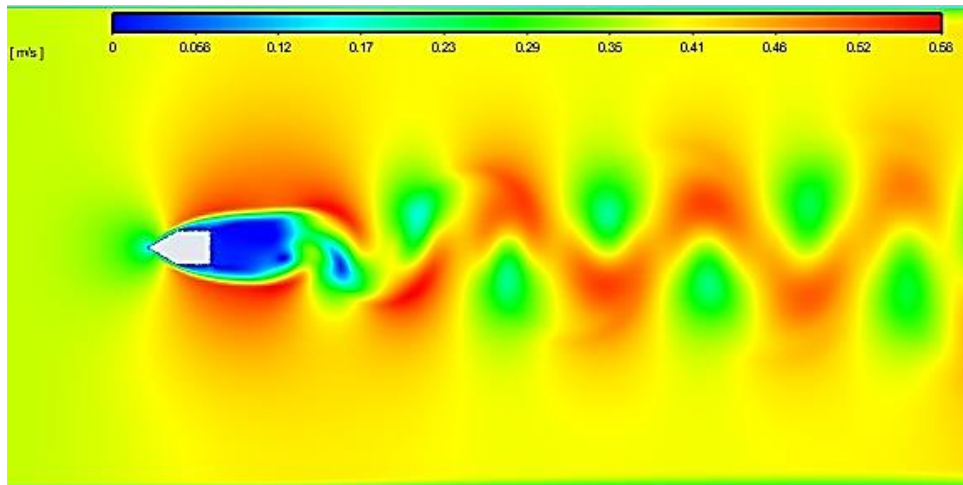
Şekil 3.13'in devamı



$\Gamma = 0.1$

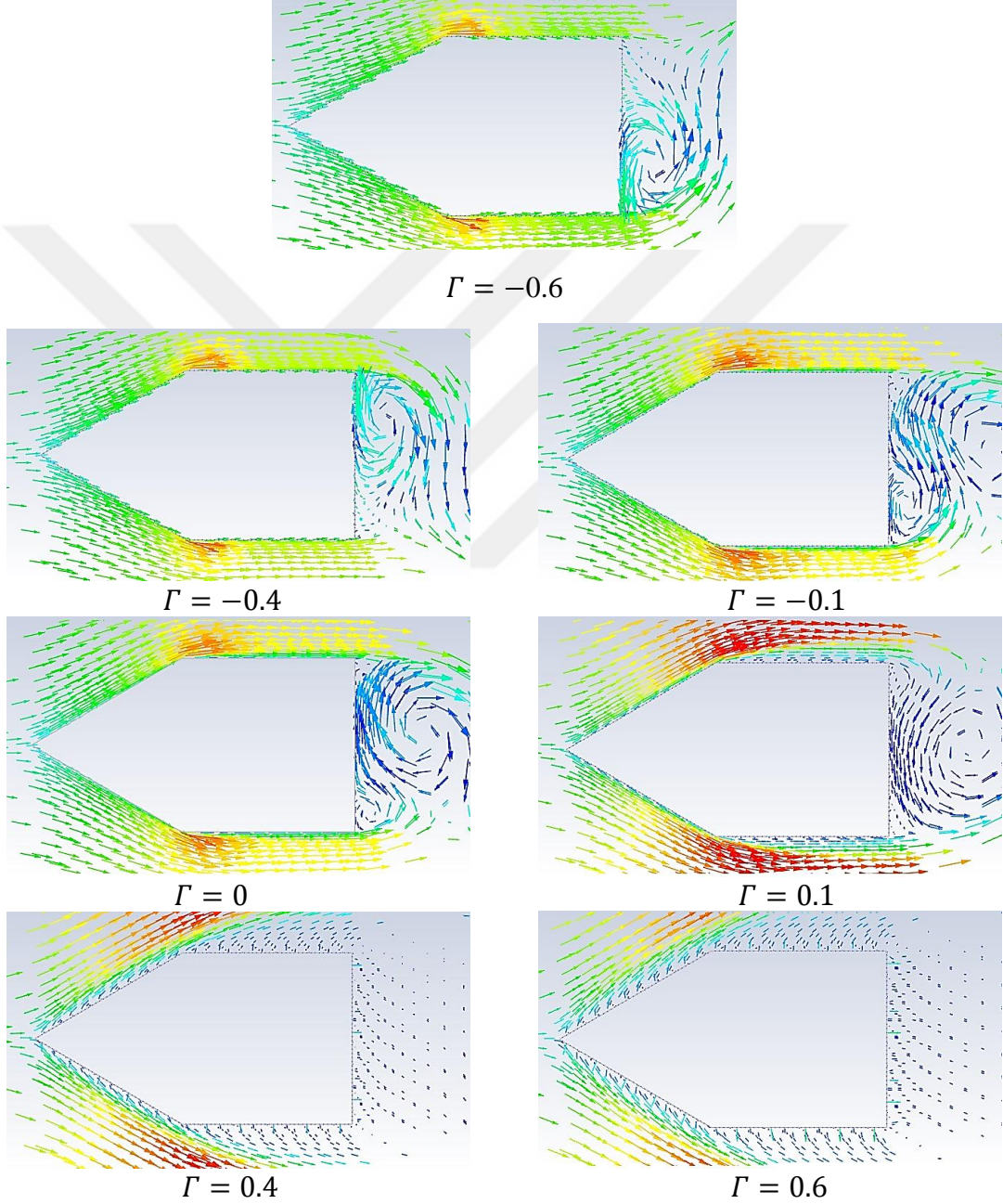


$\Gamma = 0.4$



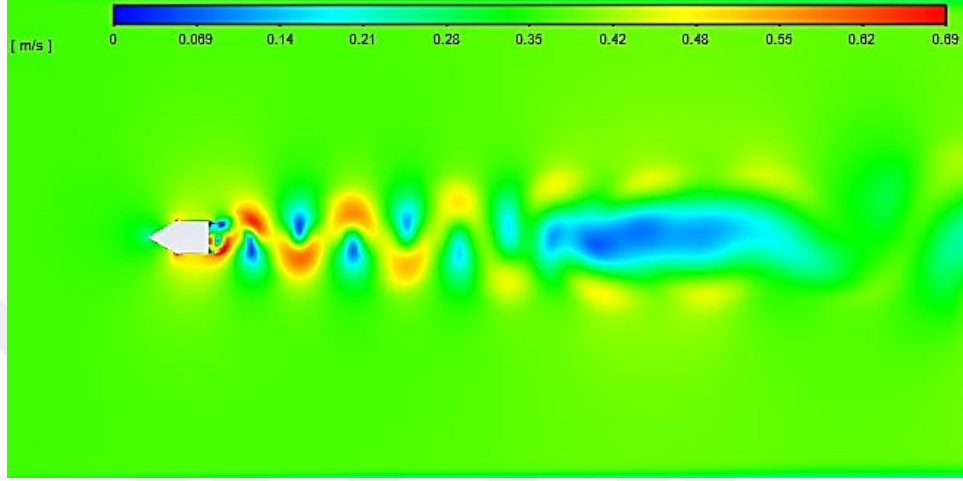
$\Gamma = 0.6$

Şekil 3.14'te yer alan ve silindir yakın civarındaki ortalama hız vektörlerini gösteren şekillerden de görülebileceği gibi; artan üfleme katsayısı ile birlikte cismin arkasındaki girdap şiddeti zayıflarken, emme durumunda her durumda üflemez duruma göre belirgin bir değişiklik ortaya çıkmamaktadır.

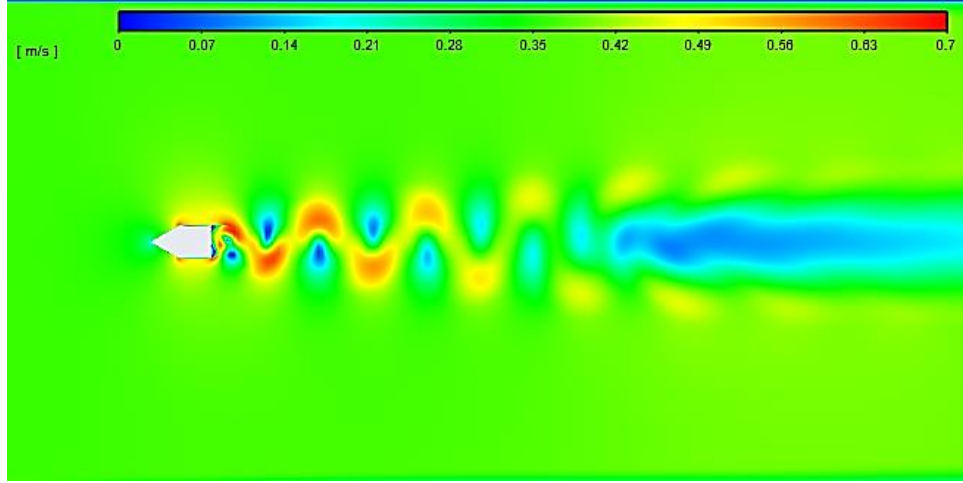


Şekil 3.14. Tüm yüzeylerden uygulanan üfleme-emmede bazı  $\Gamma$  değerleri için cisim yakın civarında ortalama hız vektörleri ( $Re \cong 22000$ )

Beşgen kesitli silindirin sadece ön yüzeylerinden yapılan üfleme-emme durumlarına ait akış alanı etkileri Şekil 3.15 ve 3.16'da görülmektedir. Tüm yüzeylerden yapılan üfleme-emme uygulamasındaki etkilerin aynısı bu durumlarda da ortaya çıkmaktadır.



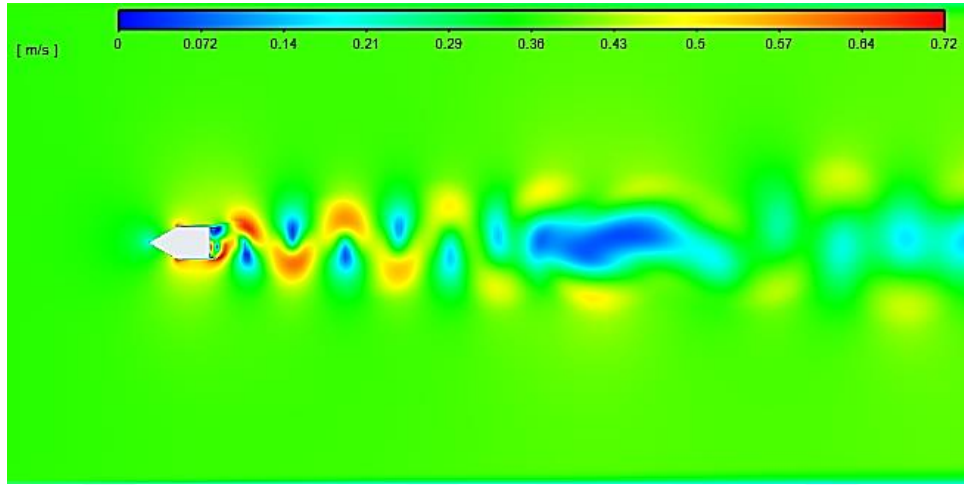
$$\Gamma = -0.6$$



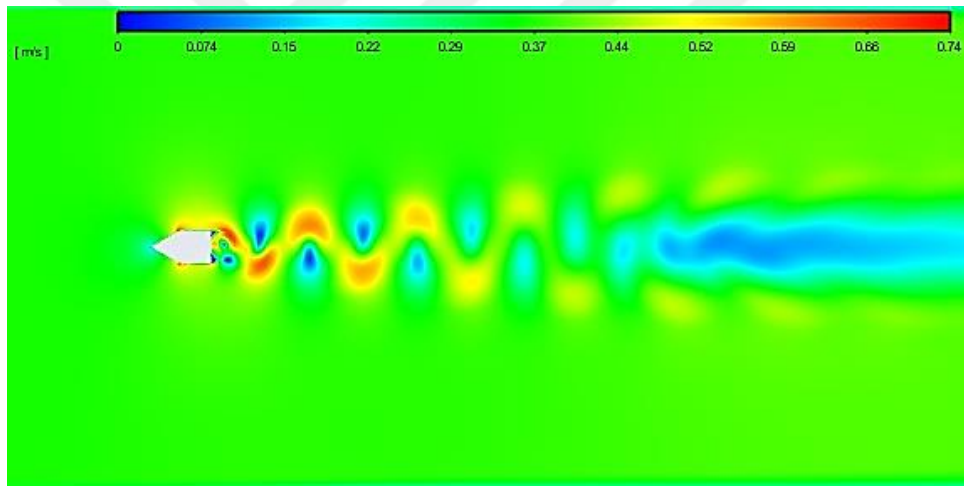
$$\Gamma = -0.4$$

Şekil 3.15. Ön yüzeylerden uygulanan üfleme-emmede bazı  $\Gamma$  değerleri için eş hız dağılımları ( $Re \cong 22000$ )

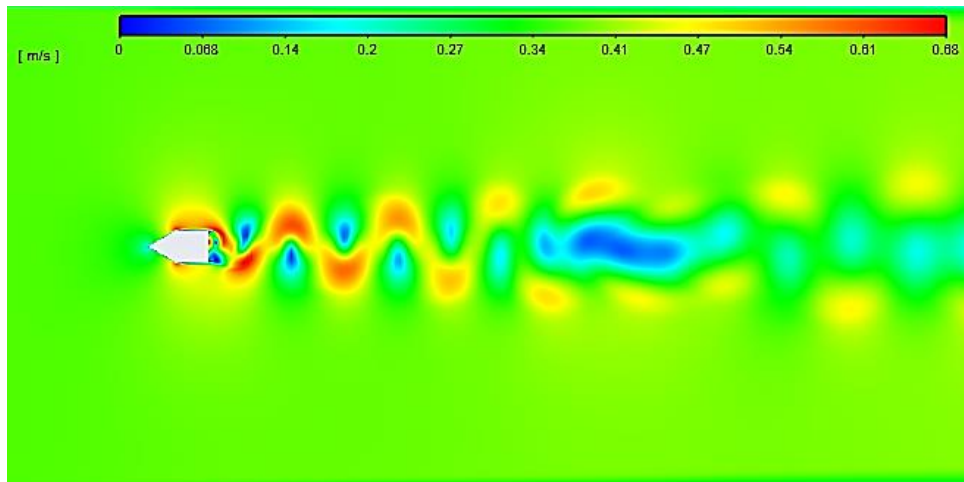
Şekil 3.15'in devamı



$$\Gamma = -0.1$$

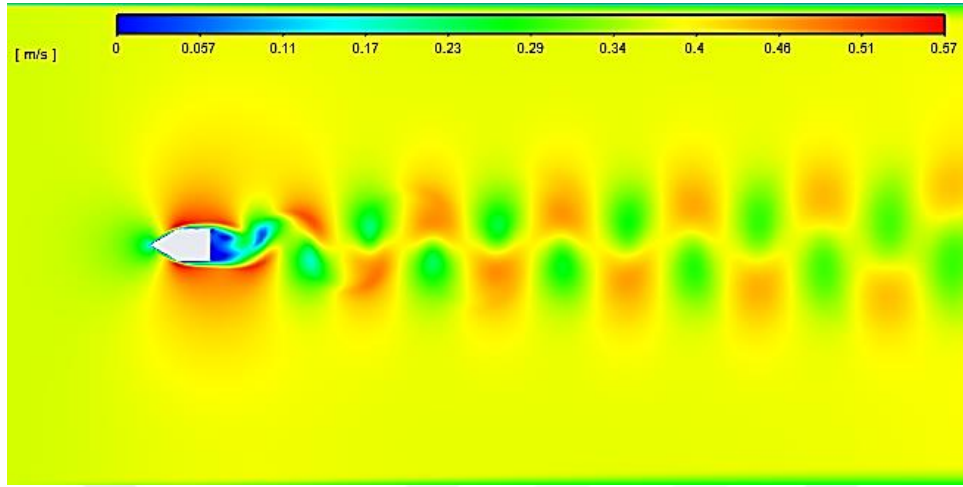


$$\Gamma = 0$$

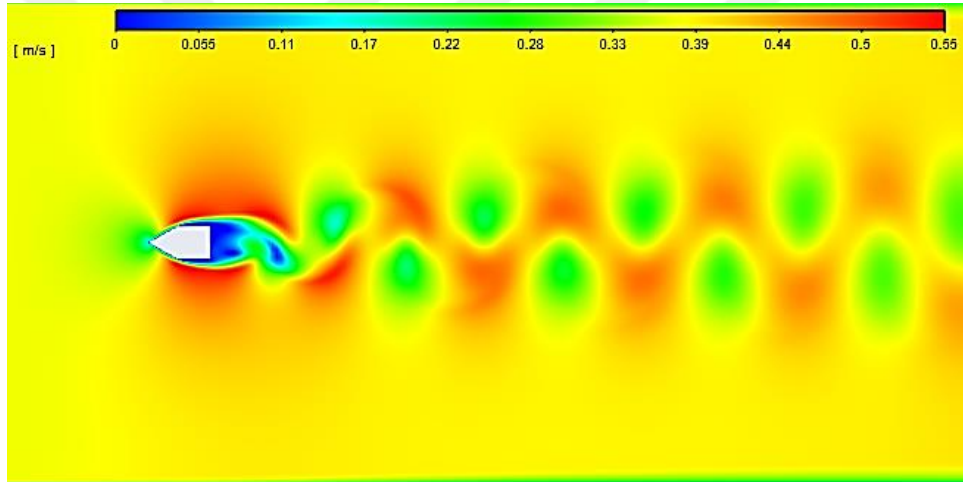


$$\Gamma = 0.1$$

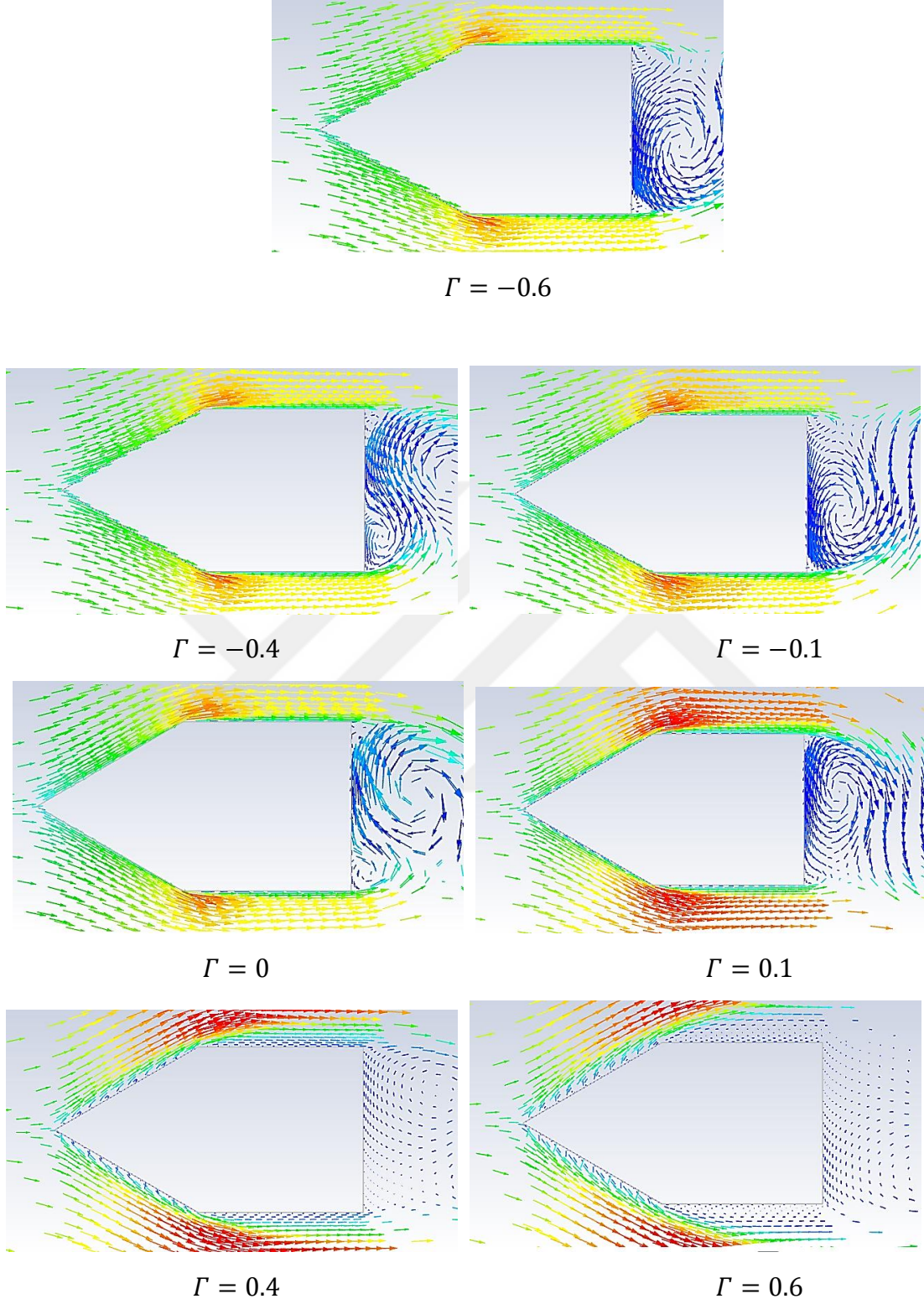
Şekil 3.15'in devamı



$\Gamma = 0.4$



$\Gamma = 0.6$

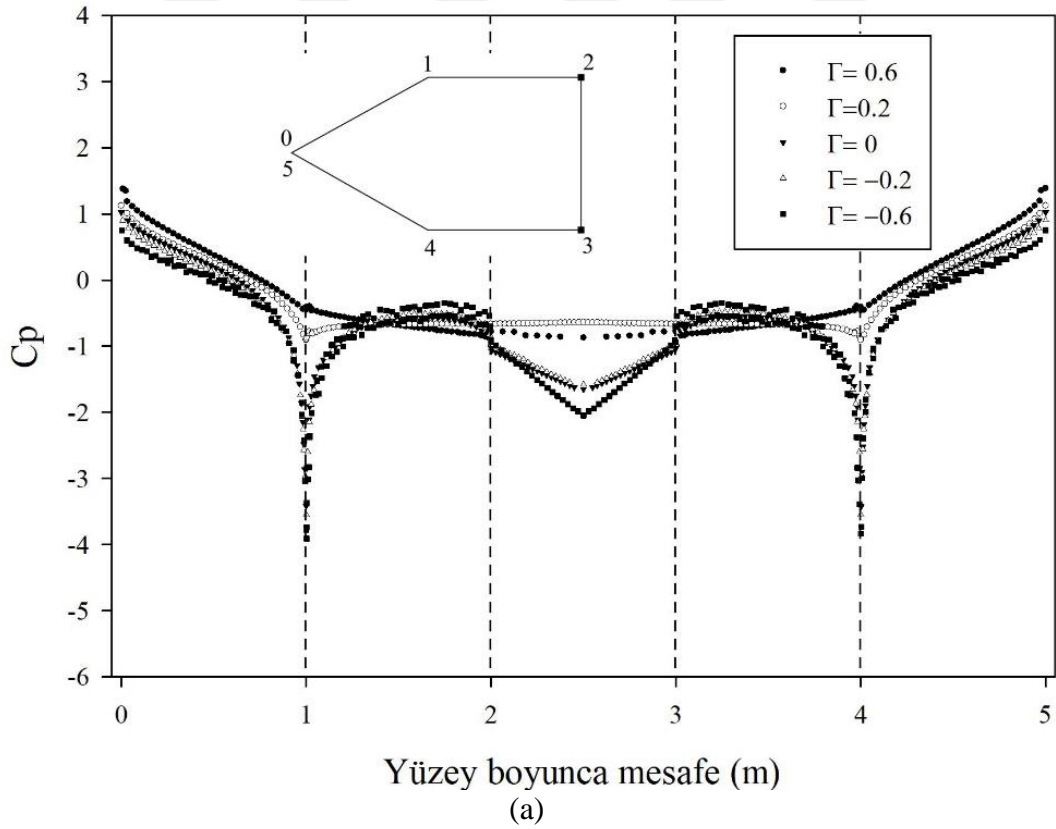


Şekil 3.16. Ön yüzeylerden uygulanan üfleme-emmede bazı  $\Gamma$  değerleri için cisim yakın civarında ortalama hız vektörleri ( $Re \cong 22000$ )



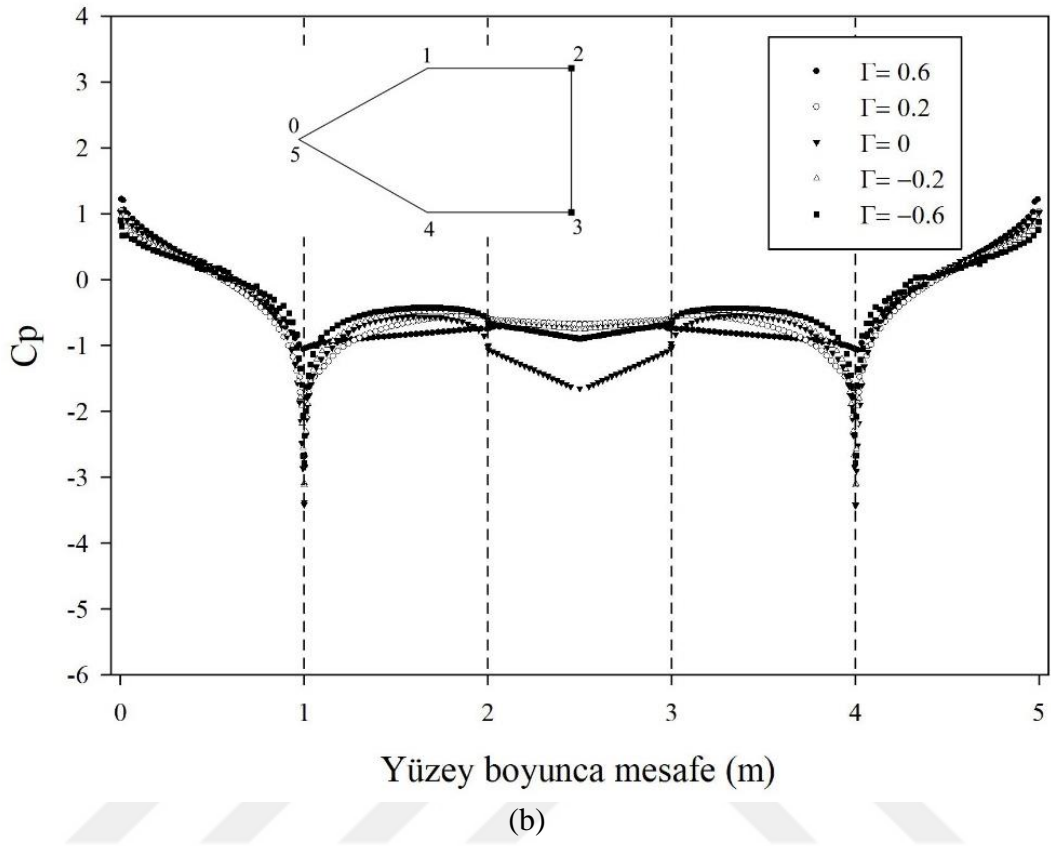
### 3.2.2. Üfleme ve Emmenin Basınç Dağılımı Üzerindeki Etkisi

Beşgen silindir yüzeylerindeki ortalama basınç katsayısının ( $C_p$ ) çevresel dağılımı Şekil 3.17'de görülmektedir. Tüm yüzeylerden ve sadece ön yüzeylerden yapılan üfleme-emme uygulaması için ayrı ayrı çizilmiş olan değişimlerde beşgen kesitli silindirin simetrik yapısına uygun değişimlerin olduğu görülmektedir. Şekil 3.17a'da görülen tüm yüzeylerden yapılan emmede arka yüzey dışında üflemeziz durum ile oldukça benzer bir değişimin olduğu, sadece arka yüzeyde artan emme katsayısı ile basınç katsayısının biraz daha düşmekte olduğu görülmektedir. Tüm yüzeylerden yapılan üflemede ise arka ve üst-alt yüzeylerdeki basınç katsayılarının yaklaşık olarak aynı kaldığı ve yüzeyler arasındaki toplam basınç farkının oldukça azaldığı görülmektedir. Bu uygulamada direnç katsayısında görülen düşme de bu değişimden kaynaklanmaktadır. Ön yüzeylerden yapılan üfleme-emmede (Şekil 3.17b); her durumda silindir yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimleri arasında belirgin bir fark ortaya çıkmamaktadır.



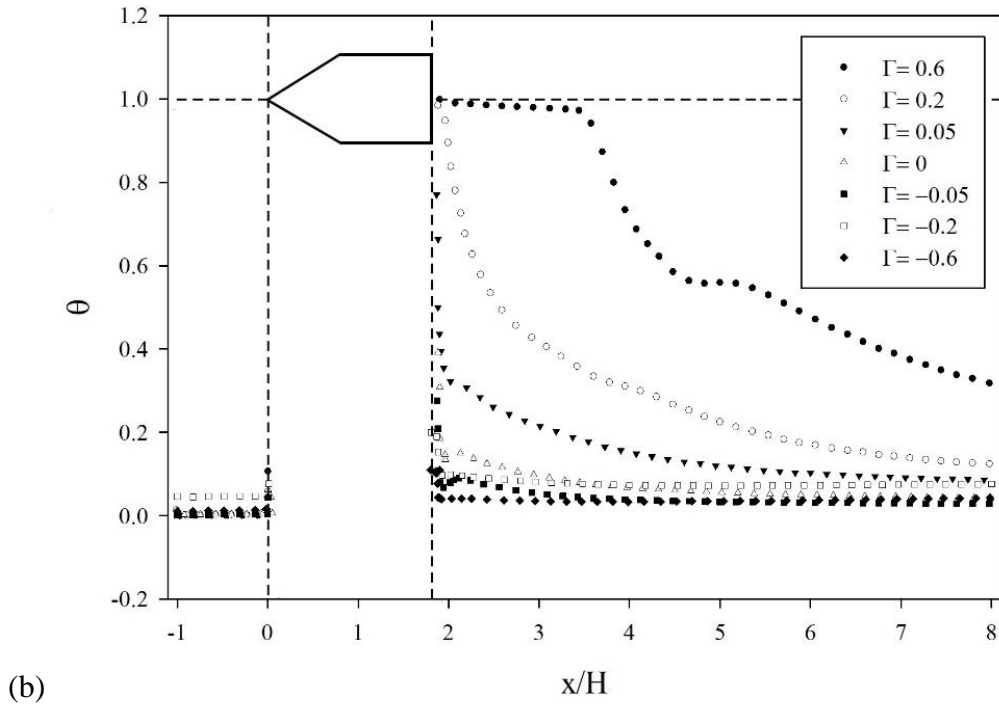
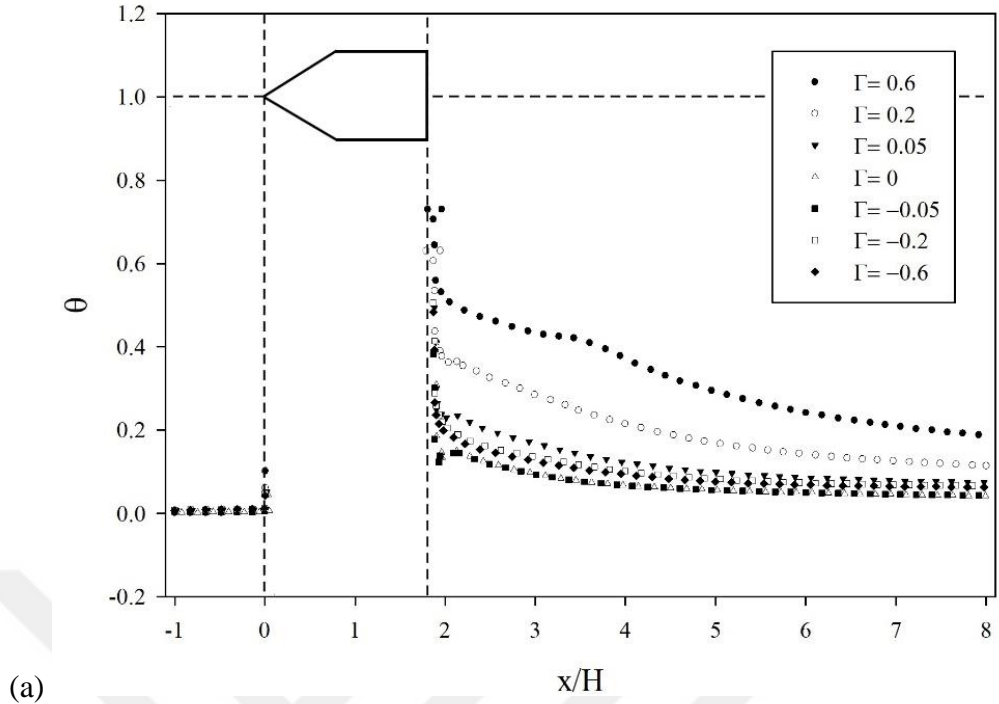
Şekil 3.17. Beşgen kesitli silindir yüzeylerindeki ortalama basınç katsayısının değişimi; a) Tüm yüzeylerden uygulanan üfleme-emme, b) Ön yüzeylerden uygulanan üfleme-emme ( $Re \cong 22000$ )

Şekil 3.17'in devamı



### 3.2.3. Üfleme ve Emmenin Sıcaklık Dağılımı ve Nusselt Sayısı Üzerindeki Etkisi

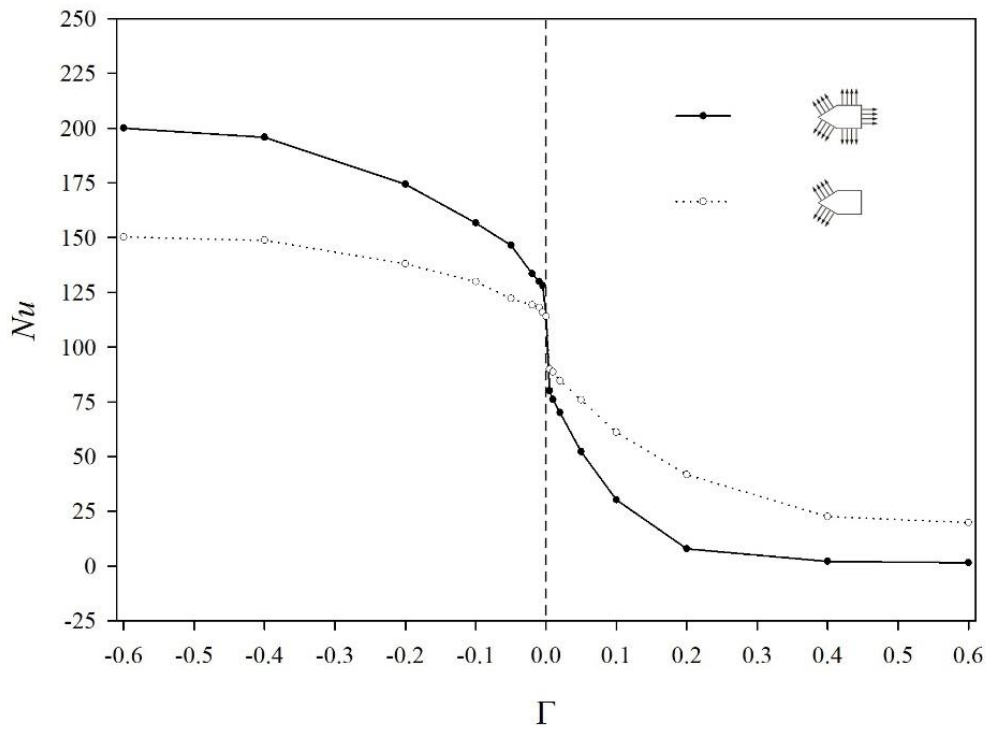
Beşgen silindirin yüzeylerinden uygulanan üfleme-emmenin silindirin merkez çizgisindeki sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi Şekil3.18'de gösterilmiştir. Uygulanan emme iz bölgesindeki sıcaklık dağılımı üzerinde çok az etki yaratırken, üfleme özellikle yüksek  $\Gamma$  değerlerinde sıcaklık dağılımını etkilemektedir.



Şekil 3.18. Beşgen kesitli silindirin merkez çizgisi üzerindeki çeşitli üfleme-emme değerleri için boyutsuz ortalama sıcaklık dağılımı; a) Ön yüzey, b) Tüm yüzeyler ( $Re \cong 22000$ )

Şekil 3.19; tüm üfleme ve emme durumları için zaman ortalamalı  $Nu$  sayısının  $\Gamma$  ile değişimini göstermektedir. Her iki durum için yüzeyden uygulanan emmenin artışıyla

beraber zaman ortalamalı  $Nu$  sayısı artarken, tüm üfleme durumlarında ters davranış görülmektedir. Üflemesiz durum için  $Nu$  sayısı diğer tüm üfleme-emme durumları ile karşılaştırıldığında, maksimum artış ve azalmanın ( $|\Gamma|$ ) = 0.60 değerinde ortaya çıktığı görülmektedir. Yaklaşık %32, %82, %75 ve %98 olarak artış ve azalmalar sırasıyla ön yüzey ve tüm yüzeyler için elde edilmiştir. genel olarak bakıldığında beşgen kesitli silindirin tüm yüzeylerinden uygulanan emme, silindirden akış alanına daha yüksek bir ısı transferi sağlarken, üflemenin ters etki yarattığı (termal koruma) görülmektedir.



Şekil 3.19. Beşgen kesitli silindir için çeşitli üfleme-emme durumlarında zaman ortalamalı  $Nu$  sayısının  $\Gamma$  ile değişimi ( $Re \cong 22000$ )

### 3.3. Dairesel Kesitli Silindir Etrafındaki Akış

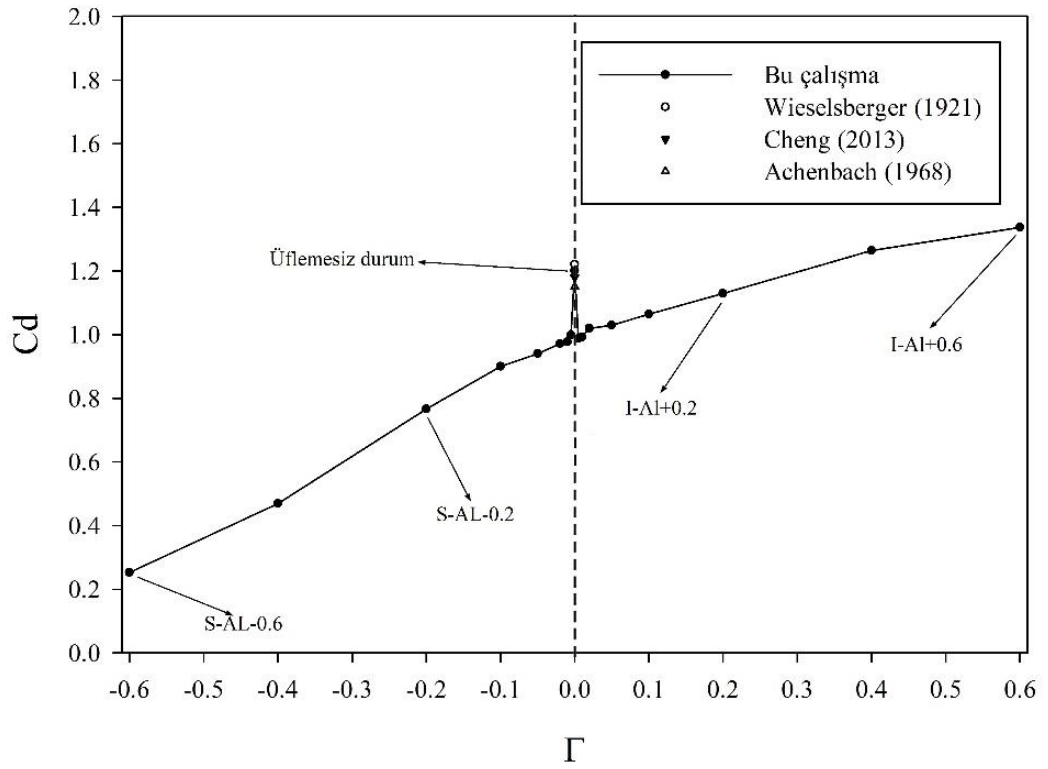
Dairesel kesitli silindir etrafındaki akış için literatürde yer alan çeşitli deneysel çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda çeşitli hidrodinamik etkiler ve özellikle direnç katsayısı üzerine inceleme yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan yöntem ve sayısal kod ile elde edilen bulguların doğruluğunu ve geçerliliğini test edebilmek amacıyla Kondjoyan ve Daudin (1995); Wieselsberger (1921); Achenbach (1968); Žukauskas (1972); Yokuda

(1990); Norberg (2003) ve Cheng (2013) tarafından yapılan çalışmalara ait sonuçlar ile kıyaslama yapılmıştır.

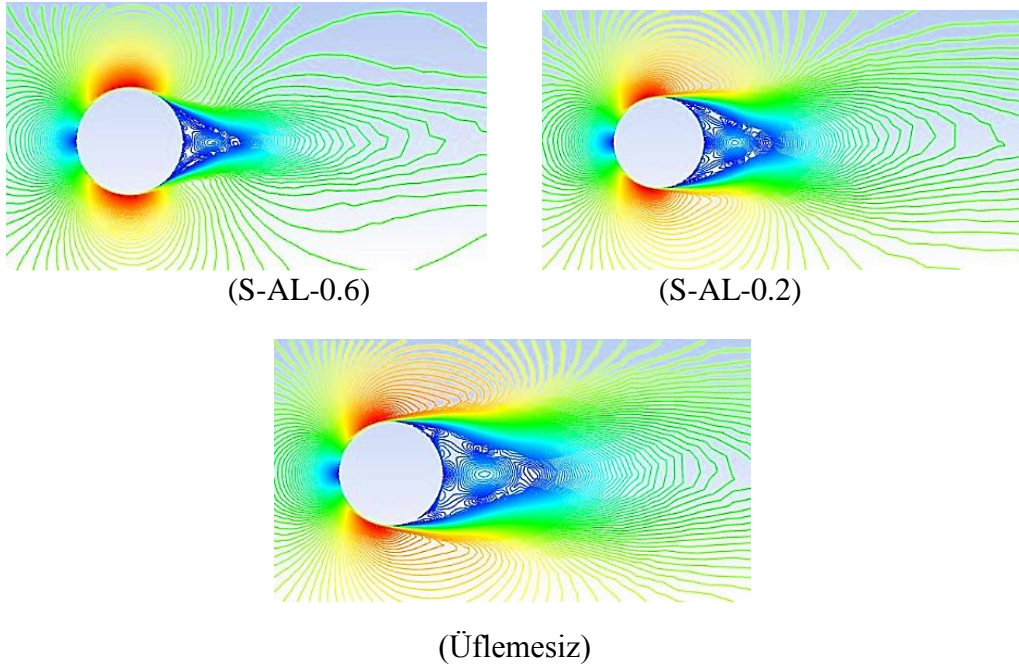
### 3.3.1. Üfleme ve Emmenin Direnç Katsayısı Üzerindeki Etkisi

Dairesel kesitli silindir etrafındaki akışta yüzeyden yapılan üfleme-emmenin  $C_d$  direnç katsayısı üzerindeki etkisi Şekil 3.20’de görülmektedir. Üflemesiz duruma ait deneysel bulgular ile bu çalışmada elde edilen bulgular arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi diğer geometrilerdeki duruma benzer şekilde yüzeyden üfleme veya emme uygulamasının başlaması ile birlikte direnç katsayısı sınırlı bir aralıkta diğer geometrilerde olduğu gibi ani bir düşme göstermekte (külah görünümlü) ve daha sonra artış ya da düşme davranışı göstermeye başlamaktadır. Düşük değerdeki üfleme/emmenin sanal bir yüzey pürüzlülüğüne neden olduğu bu geometride belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bilindiği gibi dairesel kesitli silindirler etrafındaki akışta yüzey pürüzlüğü, yüzeyden olan ayrılmayı geciktirmekte ve ön/arka yüzeyler arasındaki basınç farkını azaltarak direnç katsayısında ani bir düşmeye yol açmaktadır (Schlichting, 1979). Buradaki uygulamada da yüzeyden düşük hızlardan uygulanan hem üfleme hem de emme benzer etkiye yol açarak direnç katsayısında ani bir düşmeye neden olmaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi artan emme katsayısı ile birlikte direnç katsayısı monoton olarak azalmakta, artan üfleme katsayısı ile birlikte direnç katsayısı monoton olarak artmaktadır.  $\Gamma = 0.6$  değerinde direnç katsayısında üflemesiz duruma göre yaklaşık %11 düzeyinde bir artış ortaya çıkarken  $\Gamma = -0.6$  değerinde üflemesiz duruma göre % 79 düzeyinde bir düşme ortaya çıkmaktadır. Bu bulgu dairesel kesitli silindir etrafındaki akışta yüzeyden uygulanan emmenin etkili bir şekilde direnç düşümü sağlamakta olduğunu ve direnç kontrolünde önemli bir yarar sağladığını göstermektedir.

Şekil 3.20 işaret edilen bazı  $C_d$  değerlerini veren akışlar için zaman ortalamalı akım çizgileri, eş hız dağılımları ve ortalama hız vektörleri Şekil 3.21-3.23’te görülmektedir. Şekil 3.21’de de görüldüğü gibi üflemesiz duruma göre artan emme katsayısı ile birlikte silindir arkasındaki girdap ortalamalı girdap bölgesi küçülmekte, artan üfleme katsayısı ile belirgin bir değişim ortaya çıkmamaktadır.

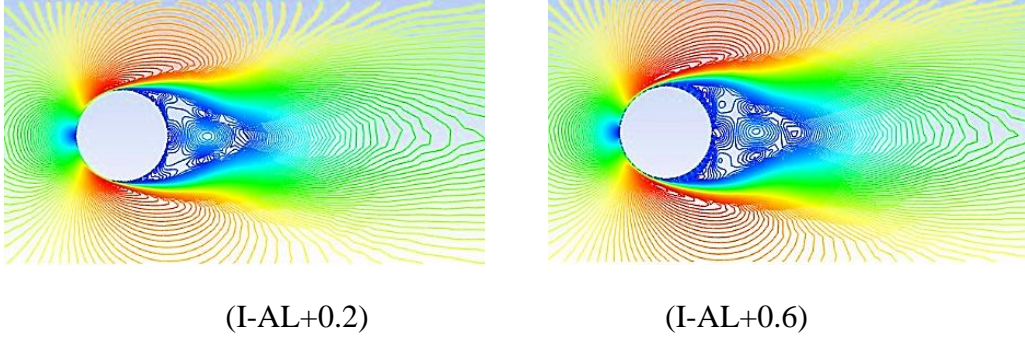


Şekil 3.20. Akış alanı içerisinde yer alan dairesel kesitli silindir için direnç katsayısının  $\Gamma$  ile değişimi ( $Re \cong 22000$ )

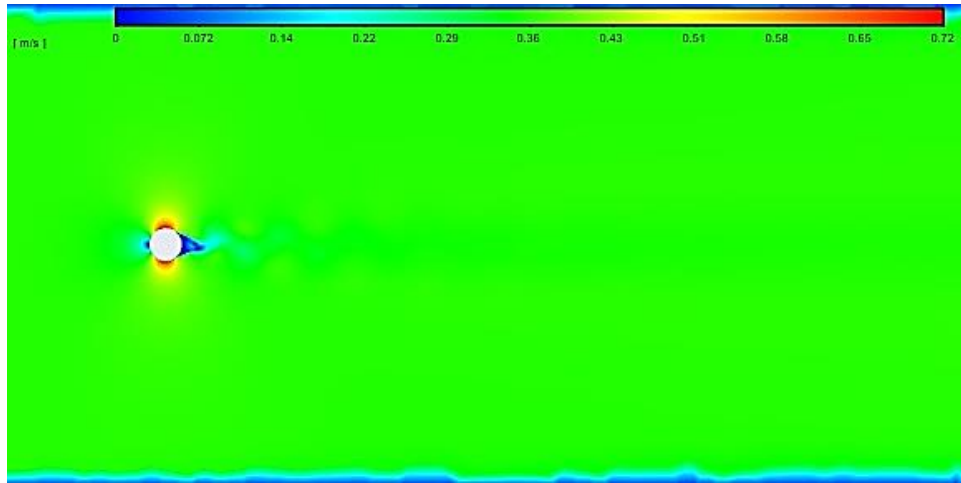


Şekil 3.21. Bazı üfleme-emme durumlarında ortalama akım çizgileri ( $Re \cong 22000$ )

Şekil 3.21'in devamı



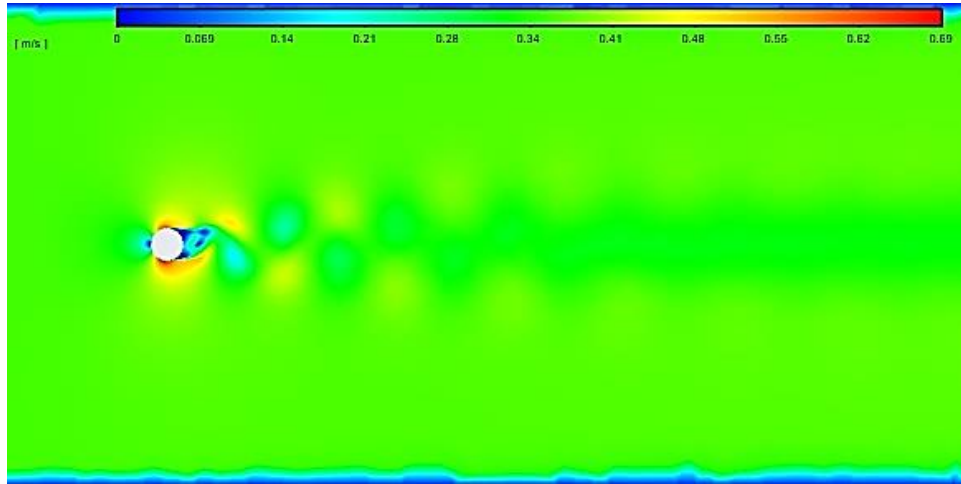
Şekil 3.22'de yer alan ortalamalı eş hız dağılımları silindir arkasındaki periyodik karman caddesinin üfleme-emme katsayısı ile olan etkileşimi hakkında fikir vermektedir. Görsellerden de görüldüğü gibi en yüksek emme katsayısı değerinde ( $\Gamma = -0.6$ ) silindir arkasındaki akış yapısı tamamen daimi karaktere bürünmekte ve periyodik hareket ortadan kalkmaktadır.  $\Gamma = -0.2$  düşük emme katsayılı akışta üflemez duruma göre biraz daha zayıf bir periyodik hareketin ortaya çıktığı görülmektedir. Düşük üfleme katsayılı akışta ( $\Gamma = 0.2$ ) üflemez duruma göre belirgin bir değişim ortaya çıkmazken, yüksek üfleme katsayılı akış periyodik hareketi güçlendirmektedir.



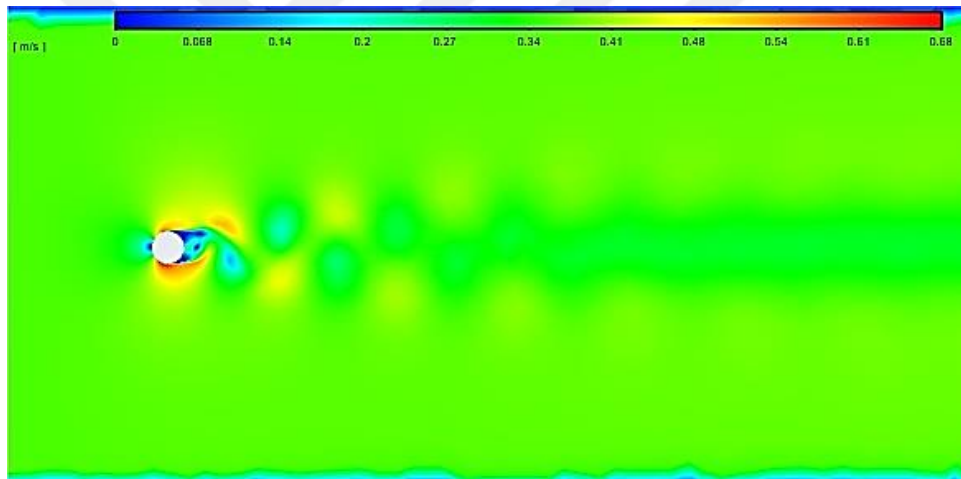
$$\Gamma = -0.6$$

Şekil 3.22. Bazı üfleme-emme durumları için eş hız dağılımları ( $Re \cong 22000$ )

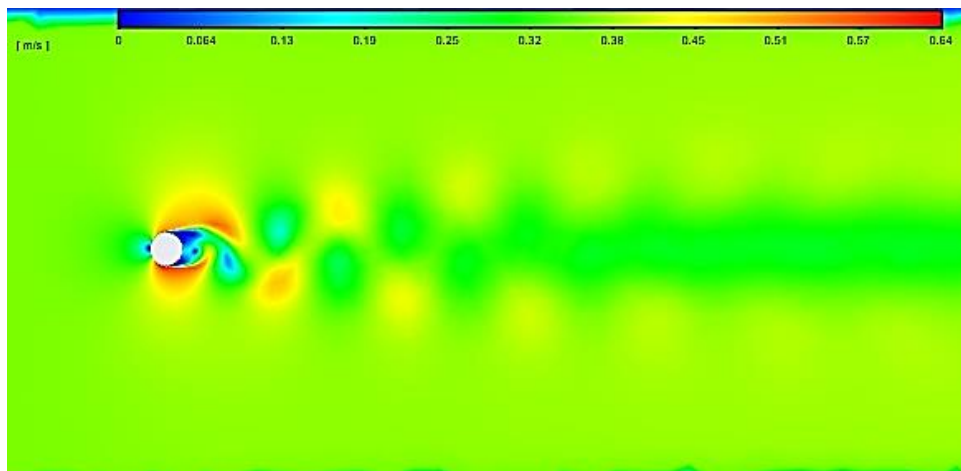
Şekil 3.22'in devamı



$$\Gamma = -0.2$$



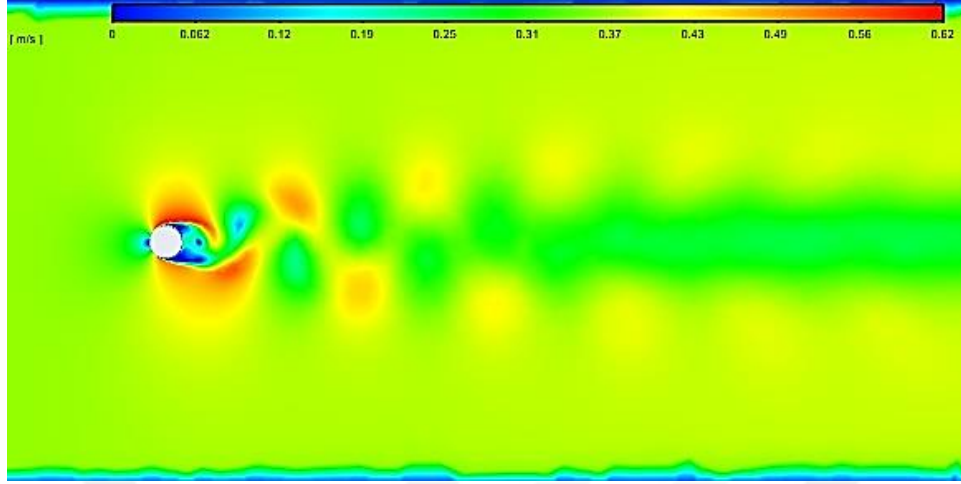
$$\Gamma = 0$$



$$\Gamma = 0.2$$

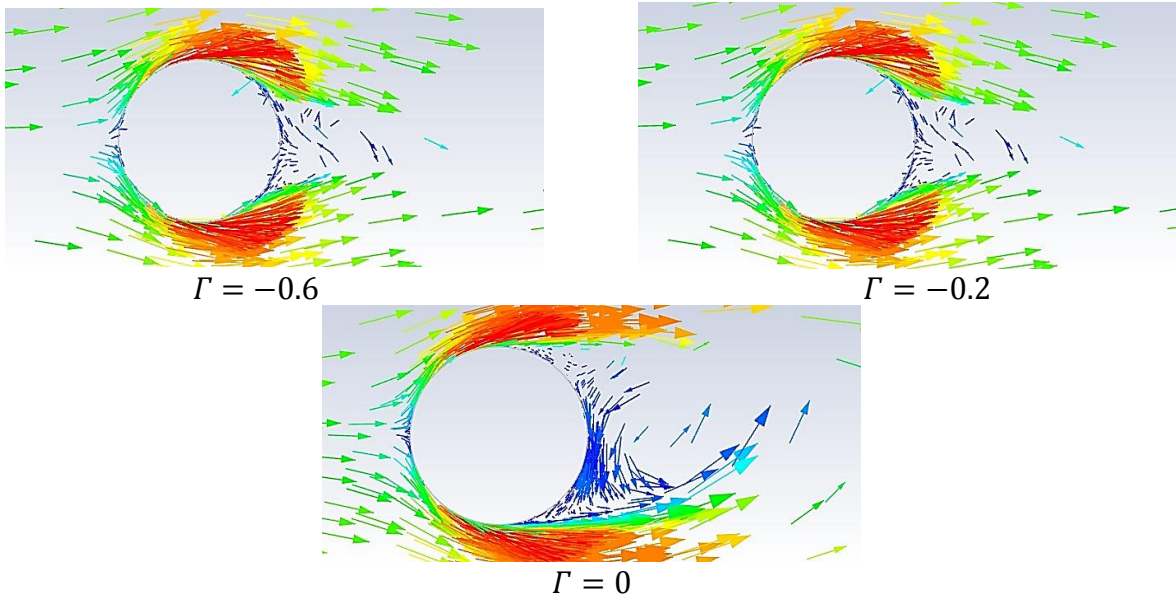


Şekil 3.22'in devamı



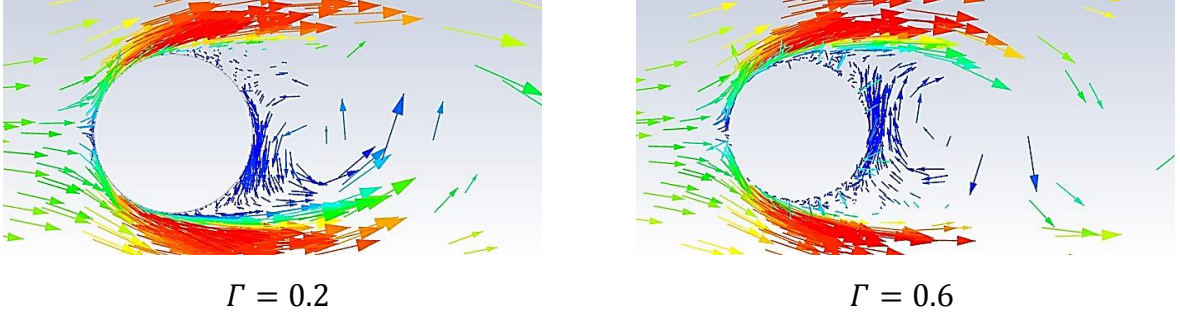
$$\Gamma = 0.6$$

Dairesel kesitli silindirin yakın civarındaki hız vektörlerini gösteren Şekil 3.23'te de görüldüğü gibi yüksek emme katsayısında silindir arkasındaki ayrılma oldukça gecikmekte ve dolayısıyla direnç de düşmektedir. Artan üfleme katsayısı ile birlikte silindir yüzeyinden olan ayrılma noktaları silindir ön yüzeyine doğru gerilemekte ve buna bağlı olarak direnç de artmaktadır.



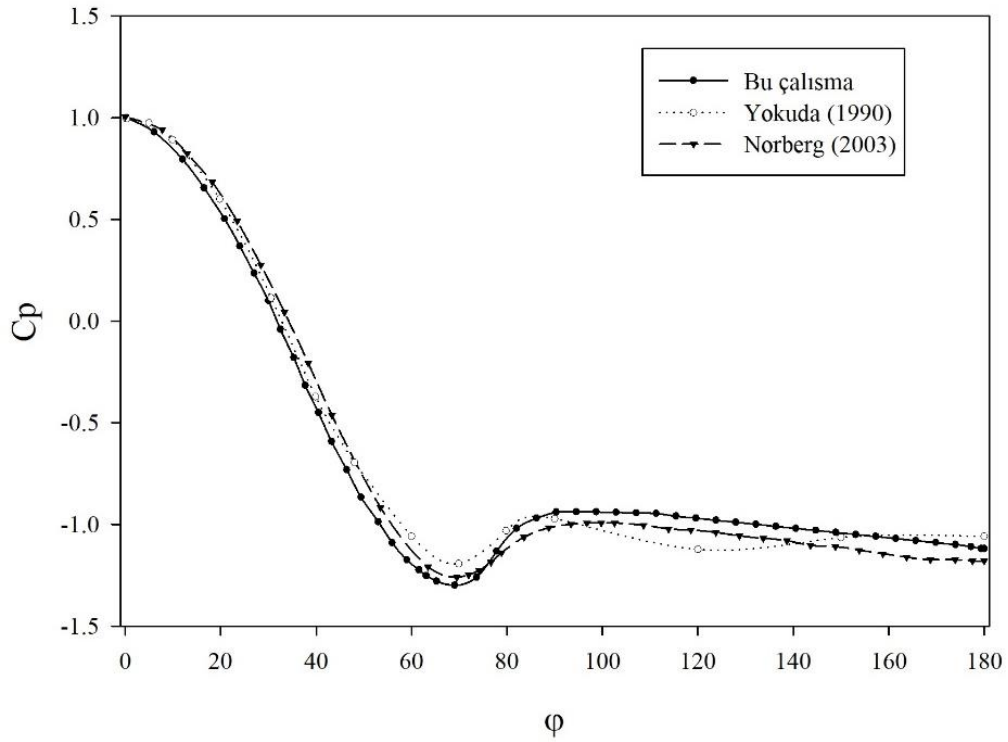
Şekil 3.23. Bazı üfleme-emme durumları için cisim yakın civarındaki ortalama hız vektörleri ( $Re \cong 22000$ )

Şekil 3.23'in devamı

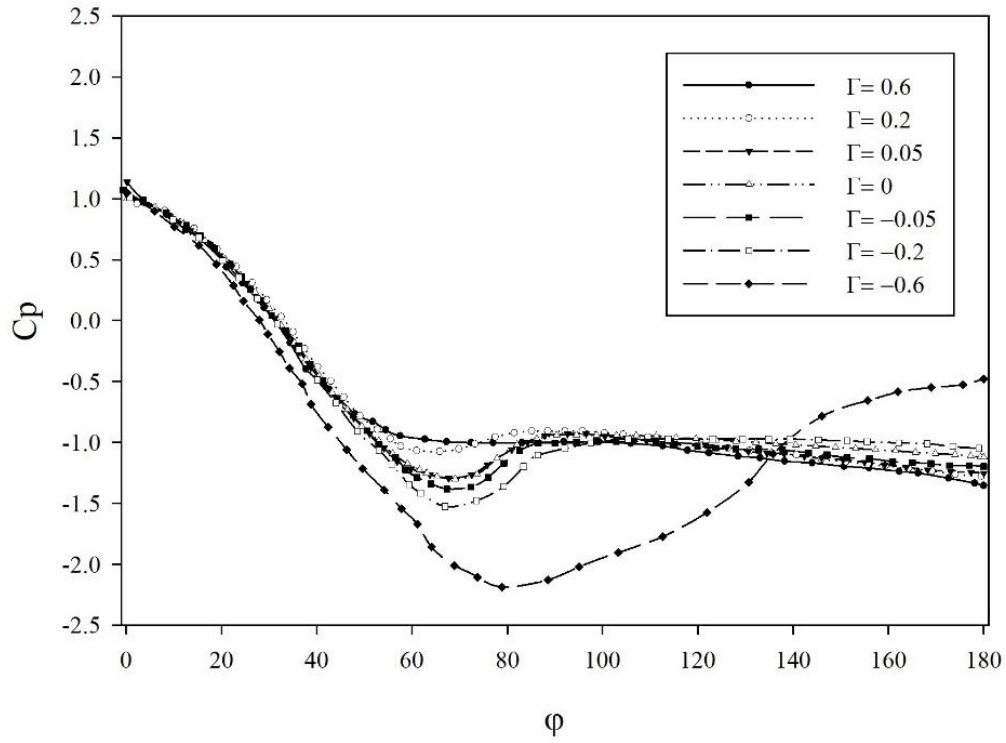


### 3.3.2. Üfleme ve Emmenin Basınç Dağılımı Üzerindeki Etkisi

Silindir yüzeylerinden herhangi bir üfleme ya da emmenin yapılmadığı duruma ait yüzey basınç katsayısı değişimi ( $C_p$ ) deneysel verilerle kıyaslamalı olarak Şekil 3.24'te verilmiştir. Çalışmadan elde edilen bulguların Yokuda (1990) ve Norberg (2003) tarafından yapılan deneysel çalışmalarla oldukça iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Çalışma kapsamında göz önüne alınmış olan çeşitli üfleme-emme katsayıları için yüzeydeki basınç katsayısı değişimleri Şekil 3.25'de yer almaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi  $\Gamma = -0.6$  emme katsayısı için basınç katsayısı yaklaşık  $\varphi = 80^\circ$  deki en düşük değerini almakta ve silindirin arka orta noktasında diğer durumlara göre en yüksek değere çıkmaktadır. Genel olarak bakıldığında diğer uygulamalarda benzer değişimler olduğu görülmektedir.



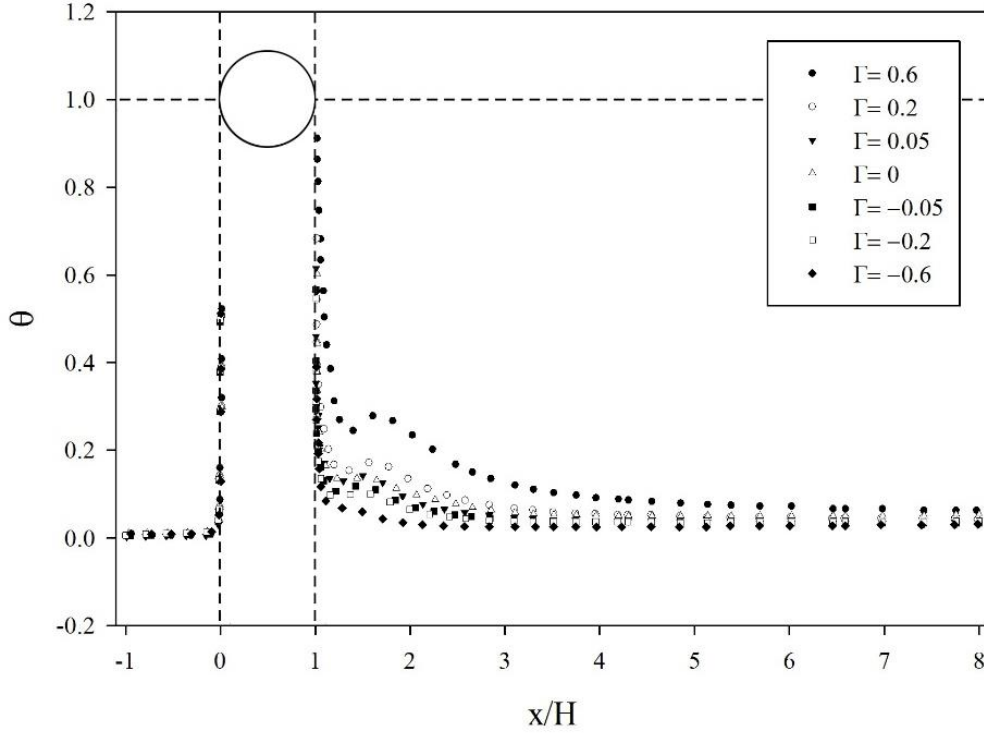
Şekil 3.24. Dairesel kesitli silindir yüzeyinde ortalama basınç katsayısının değişimi ( $Re \cong 22000$ )



Şekil 3.25. Dairesel kesitli silindirin yüzeyinde ortalama basınç katsayısının çeşitli  $\Gamma$  değerlerindeki değişimi ( $Re \cong 22000$ )

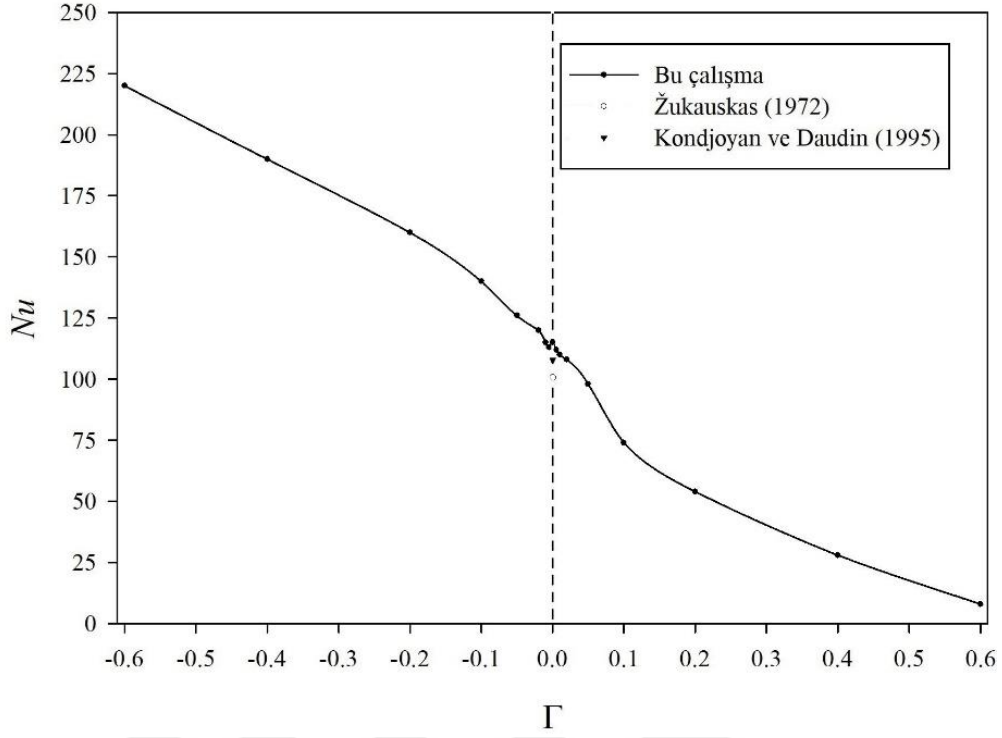
### 3.3.3. Üfleme ve Emmenin Sıcaklık Dağılımı ve Nusselt Sayısı Üzerindeki Etkisi

Dairesel kesitli silindirin yüzeyinden uygulanan üfleme-emmenin silindirin merkez çizgisindeki sıcaklık dağılımının üzerindeki etkisi Şekil 3.26'da görülmektedir. Silindir yüzeyinden uygulanan üfleme-emme  $\Gamma = 0.6$  değeri hariç iz bölgesindeki sıcaklık dağılımını çok fazla etkilememektedir.



Şekil 3.26. Dairesel kesitli silindirin merkez çizgisi üzerinde çeşitli  $\Gamma$  değerleri için boyutsuz ortalama sıcaklığın değişimi ( $Re \cong 22000$ )

Tüm üfleme ve emme değerleri için zaman ortalamalı  $Nu$  sayısının değişimi Şekil 3.27'de görülmektedir. Genel olarak emme katsayısının ( $\Gamma$ ) artışı,  $Nu$  sayısının artmasını ve üfleme katsayısının artışı  $Nu$  sayısının azalmasını sağlamaktadır. Üflemesiz duruma ait  $Nu$  sayısı diğer tüm üfleme-emme durumları ile karşılaştırıldığında; maksimum artış ve azalmanın ( $|\Gamma| = 0.6$  değerinde ortaya çıktığı görülmektedir. Bu artış ve azalmalar yaklaşık %50 ve %92 olarak elde edilmiştir. Böylece silindirin yüzeyinden uygulanan emme ile silindirden akış alanına daha yüksek bir ısı transferi sağlarken üflemenin ters etkiye neden olduğu (termal koruma) anlaşılmaktadır.



Şekil 3.27. Akış alanı içerisinde yer alan dairesel kesitli silindir için zaman ortalamalı  $Nu$  sayısının  $\Gamma$  ile değişimi ( $Re \cong 22000$ )

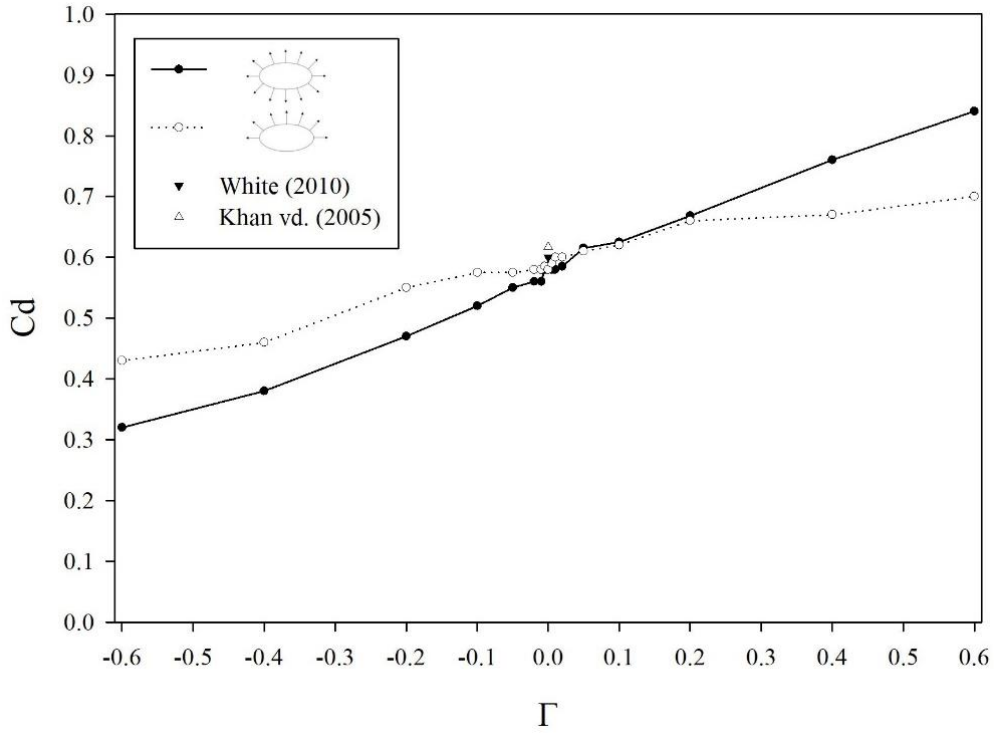
### 3.4. Eliptik Kesitli Silindir Etrafındaki Akış

Eliptik kesitli silindirler düşük direnç katsayıları nedeniyle aerodinamik uygulamalarda yeri olan geometrilerdir. Çalışma kapsamında da eliptik kesitli ve en/boy oranları ( $AR$ ) 0.5, 0.25 ve 0.125 olan silindirler etrafındaki akışlarda tüm yüzeyden ve sadece yarı üst yüzeyden yapılan üfleme-emmenin etkileri incelenmiştir. Üflemesiz duruma ait olarak elde edilmiş hidrodinamik bulgular White (2010) ve Khan vd. (2005) tarafından elde edilmiş olan sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Üflemesiz duruma ait olan ısıl bulgular ise Ota vd. (1983); Žukauskas ve Žiugzda (1985); Kondjoyan ve Daudin (1995) tarafından yapılmış olan çalışmalar ile kıyaslanmış ve oldukça iyi bir uyum elde edilmiştir.

#### 3.4.1. Üfleme ve Emmenin Direnç Katsayısı Üzerindeki Etkisi

En/boy oranı  $AR = 0.5$  olan eliptik kesitli silindir için direnç katsayısının üfleme-emme katsayısı  $\Gamma$  ile olan değişimi Şekil 3.28'de görülmektedir.  $AR = 0.5$  en/boy oranına sahip eliptik kesitli silindirin tüm ve yarı üst yüzeylerinden uygulanan üflemenin artması

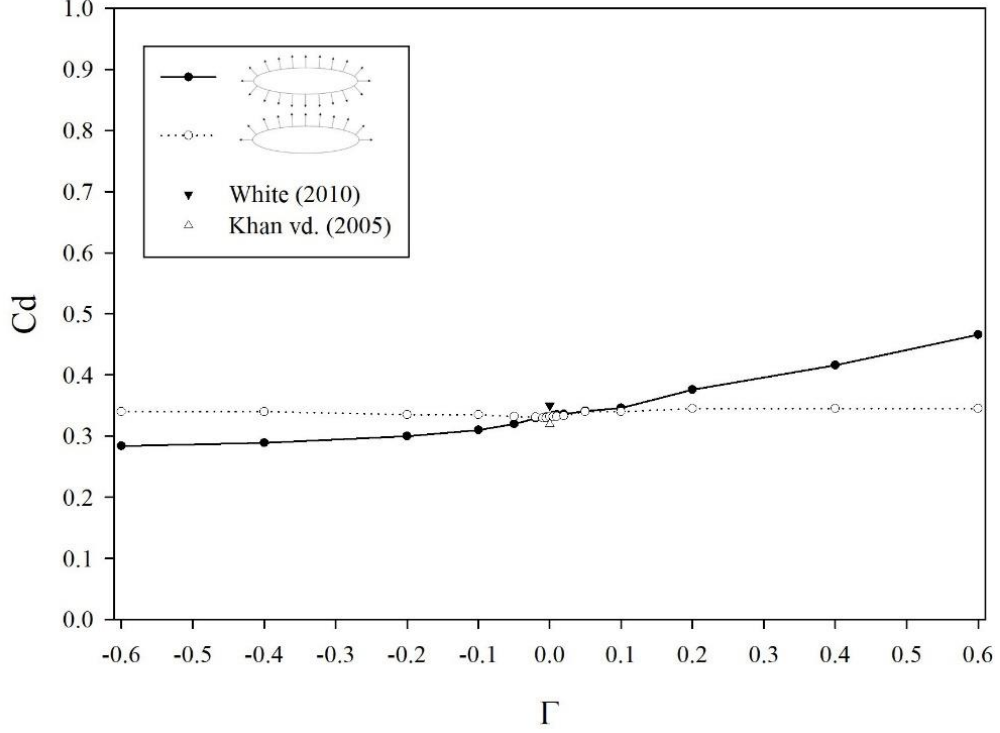
üfleme duruma göre direnç katsayısını artırırken, artan emme katsayısı ile birlikte direnç katsayısı da azalmaktadır (Şekil 3.28). Tüm ve yarı üst yüzeylerden uygulanan üfleme-emme durumları için direnç katsayısındaki maksimum artış ve azalma sırasıyla yaklaşık %45 ve %44; 21 ve %26 olarak, çalışmada göz önüne alınmış olan sınır değerleri olan  $\Gamma = 0.6$  ve  $\Gamma = -0.6$  değerlerinde ortaya çıkmaktadır. Ayrıca tüm yüzeylerden yapılan üfleme ve emmenin yarı yüzeyden uygulanan üfleme ve emmeye göre daha etkili olduğu da görülmektedir.



Şekil 3.28.  $AR = 0.5$  değerine sahip eliptik kesitli silindir için direnç katsayısının  $\Gamma$  ile değişimi ( $Re \cong 22000$ )

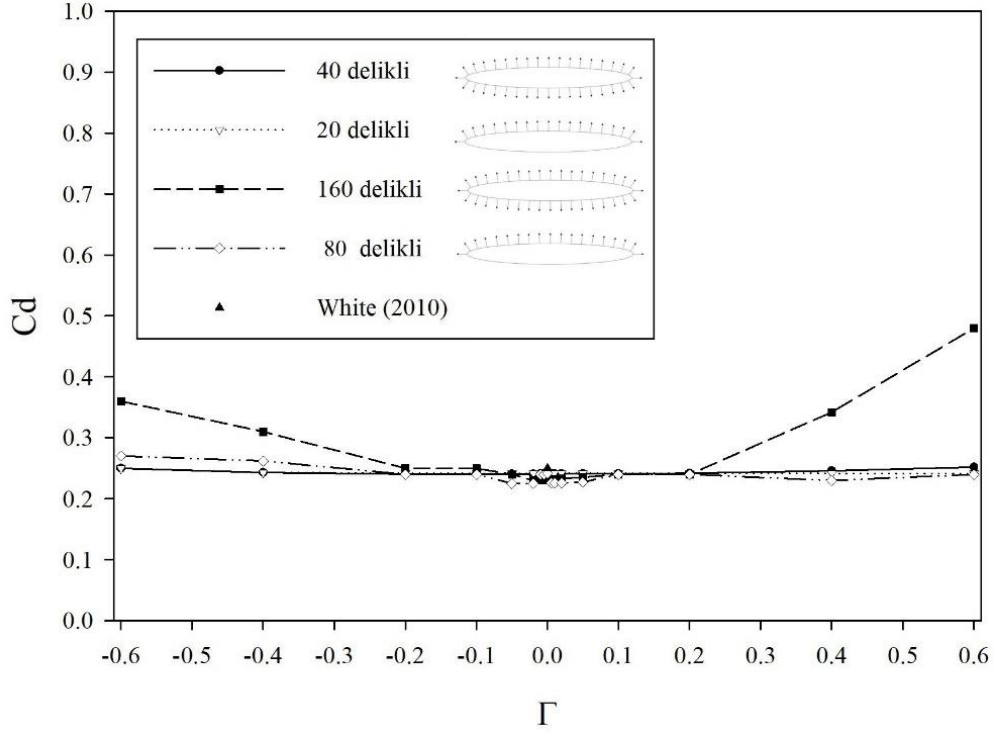
Şekil 3.29'da  $AR = 0.25$  en/boy oranına sahip eliptik kesitli silindire ait direnç katsayısı değişimleri görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi tüm yüzeylerden yapılan üflemede üfleme etkisi ile dirençteki artış ve emme etkisi ile birlikte dirençteki düşme karakteristiği bu en/boy oranında da gözlenmektedir.  $AR = 0.5$  oranına sahip eliptik kesitli silindire göre üfleme-emmenin direnç katsayısı üzerindeki etkisi biraz daha azalmaktadır. Şekil 3.29'da görülen artış ve azalma oranları; sırasıyla yaklaşık %40 ve % 14 olarak  $\Gamma = 0.6$  ve  $\Gamma = -0.6$  değerlerinde ortaya çıkmaktadır. Silindirin yarı üst yüzeyinden uygulanan

üfleme-emme durumunda direnç katsayısında belirgin bir değişikliğin olmadığı görülmektedir.



Şekil 3.29.  $AR = 0.25$  değerine sahip eliptik kesitli silindir için direnç katsayısının  $\Gamma$  ile değişimi ( $Re \cong 22000$ )

Çalışmada göz önüne alınmış olan en düşük en/boy oranı olan  $AR = 0.125$  için eliptik kesitli silindir yüzeylerinden 40 ve 160 delikten yapılan üfleme-emmenin direnç katsayısı üzerindeki etkisi Şekil 3.30'da görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi 40 delikten tüm yüzeylerden yapılan üfleme ve emmede direnç katsayısı üflemesiz duruma göre değişmezken, 160 delikten yapılan üfleme ve emmede belirli  $\Gamma$  değerlerinden sonra artış ortaya çıkmaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi; üfleme-emme katsayısının  $-0.2 \leq \Gamma \leq 0.2$  aralığında direnç katsayısında belirgin bir değişim ortaya çıkmazken  $|\Gamma| > 0.2$  değerlerinde emme bölgesinde hafif bir artış; üfleme bölgesinde biraz daha etkili bir artış olduğu görülmektedir. Şekilde görülen sınır  $\Gamma$  değerlerindeki oransal artışlar sırasıyla yaklaşık %98 ve %49 olarak  $\Gamma = 0.6$  ve  $\Gamma = -0.6$  değerlerinde ortaya çıkmaktadır.

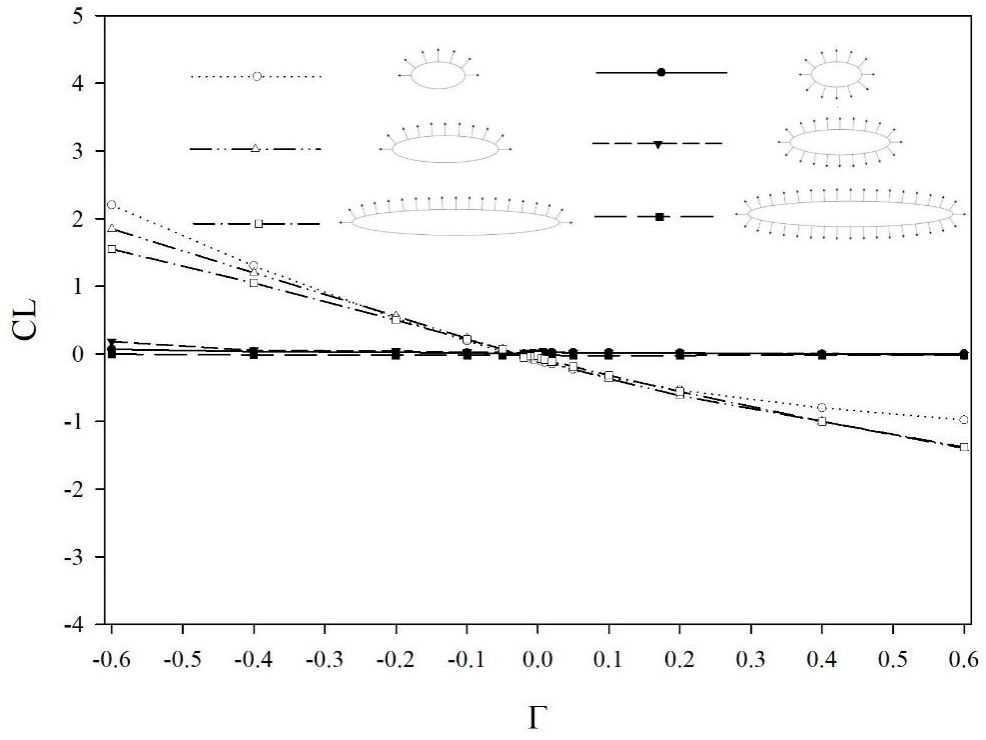


Şekil 3.30.  $AR = 0.125$  değerine sahip eliptik kesitli silindir için direnç katsayısının  $\Gamma$  ile değişimi ( $Re \approx 22000$ )

### 3.4.2. Üfleme ve Emmenin Kaldırma Katsayısı Üzerindeki Etkisi

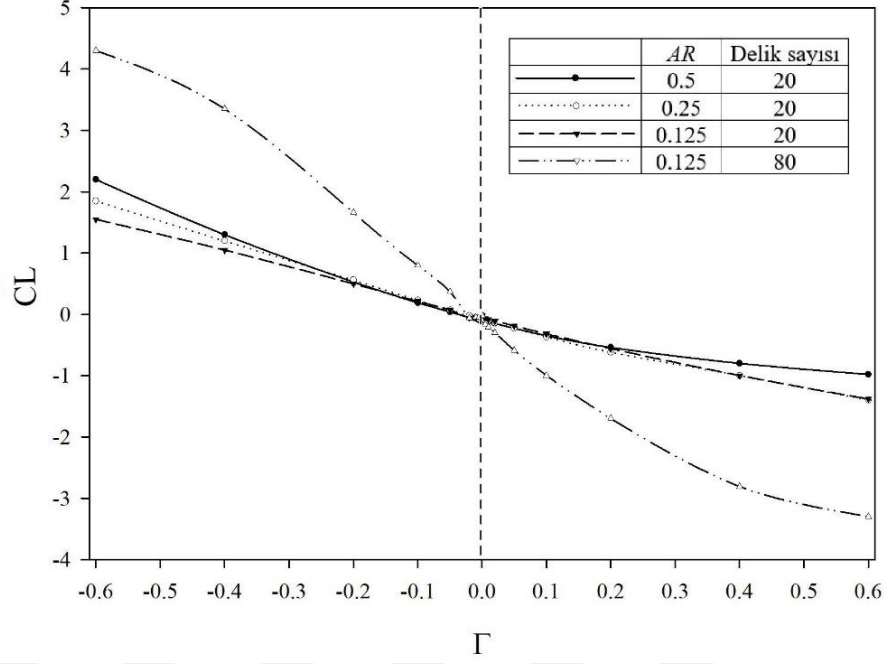
Eliptik kesitli silindirin geometrisi; kaldırma etkisi açısından önemli olduğundan kaldırma katsayısının üfleme-emmeden nasıl etkilendiği de incelenmiştir. Tüm yüzeylerden yapılan üfleme-emmenin geometrinin simetrik olması nedeniyle kaldırma katsayısı üzerinde etkisinin olmadığı görüldüğünden sadece yarı üst yüzeyden yapılan üfleme-emmenin etkisi göz önüne alınmıştır. Yarı üst yüzeydeki 20 delikten yapılan üfleme-emmenin en/boy oranına bağlı olarak kaldırma katsayısı üzerindeki etkisine ait değişimler Şekil 3.31'de görülmektedir. Yarı üst yüzeyden uygulanan üflemenin artması beklentiye uygun olarak kaldırma katsayısını düşürürken, emme etkisi kaldırma katsayısının artmasını sağlamaktadır. Artan emme katsayısı ve en/boy oranı ile birlikte kaldırma katsayısı da artmaktadır. Çalışmada göz önüne alınan  $\Gamma = -0.6$  ve  $\Gamma = 0.6$  sınır değerlerinde en/boy oranları  $AR = 0.5, 0.25$  ve  $0.125$  olan eliptik kesitli silindirlerin 40 delikli yarı üst yüzeylerinden yapılan üfleme-emme durumlarında üflemesiz duruma göre kaldırma katsayısındaki maksimum artış ve azalmanın sırasıyla  $AR = 0.5$  için yaklaşık %220 ve %98;  $AR = 0.25$  için %185 ve %140;  $AR = 0.125$  için %155 ve %138 olduğu hesaplanmıştır.





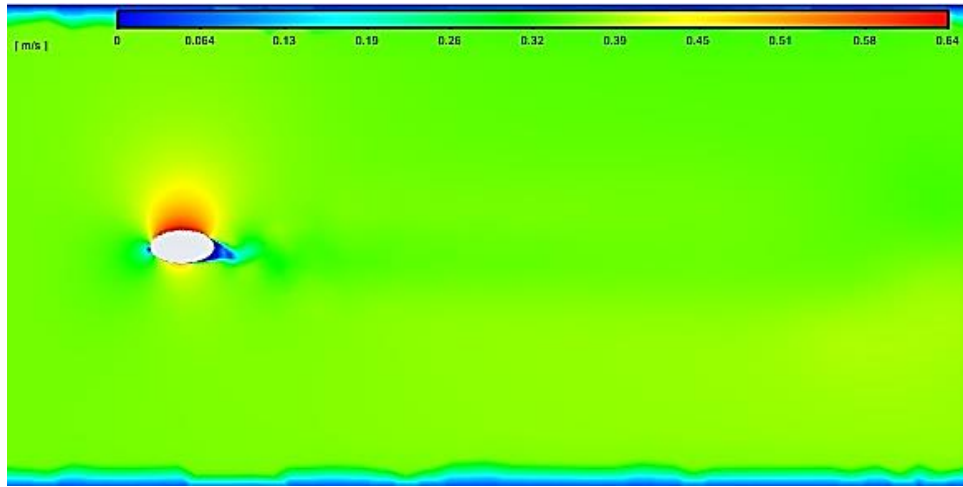
Şekil 3.31. Çeşitli en/boy oranlarındaki eliptik kesitli silindir için 20 üst yarı yüz ve 40 toplam yüzey delikten yapılan üfleme-emmede kaldırma katsayısının  $\Gamma$  ile değişimi ( $Re \cong 22000$ )

$AR = 0.125$  oranına sahip eliptik kesitli silindirlerin yarı üst yüzeylerinden yapılan üfleme ve emmede, delik sayısının kaldırma katsayısı üzerindeki etkisi Şekil 3.32’de diğer en/boy oranlı silindirlere göre kıyaslamalı olarak görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi  $AR = 0.125$  oranlı eliptik kesitli silindirde yüzeydeki delik sayısının artmasıyla birlikte kaldırma katsayısının değişim hızı da artmaktadır.



Şekil 3.32. Akış alanı içerisinde yer alan eliptik kesitli silindirin yarı üst yüzeyinden uygulanan üfleme-emmede kaldırma katsayısının delik sayısına bağlı olarak  $\Gamma$  ile değişimi ( $Re \cong 22000$ )

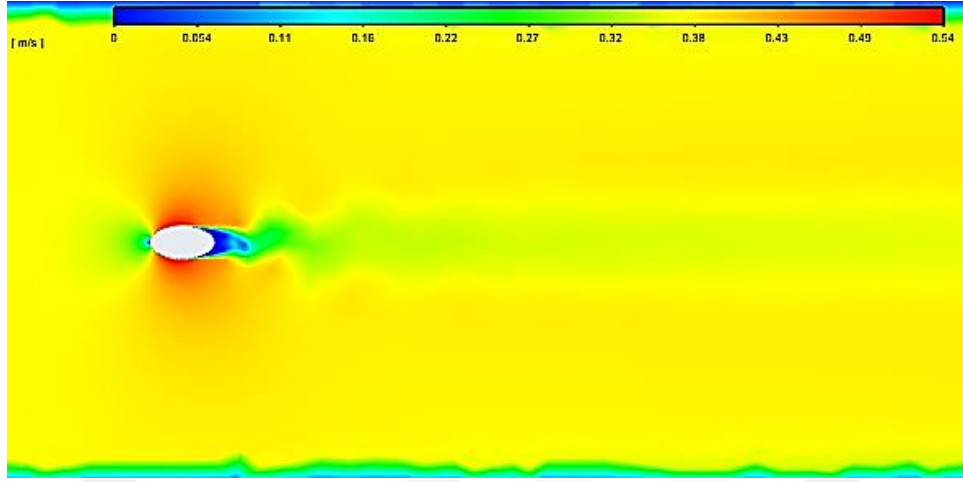
Çalışmada göz önüne alınan en/boy oranlarındaki eliptik kesitli silindirin yarı üst yüzeyinden yapılan üfleme-emmede akış alanındaki eş hız dağılımları ve ortalama hız vektörleri Şekil 3.33-3.38'de yer almaktadır.



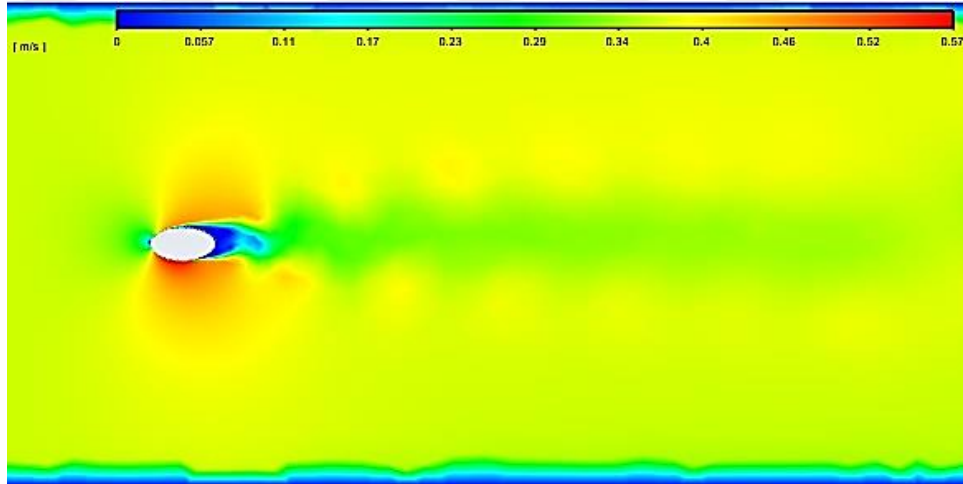
$$\Gamma = -0.6$$

Şekil 3.33.  $AR = 0.5$  oranındaki eliptik kesitli silindirin yarı üst yüzeyinden yapılan üfleme-emmede eş hız dağılımları ( $Re \cong 22000$ )

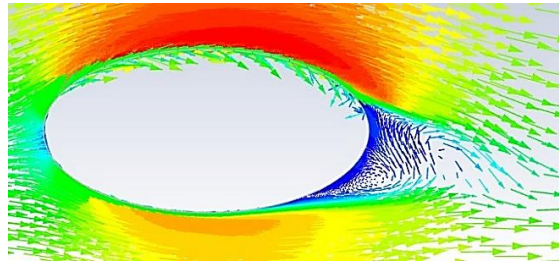
Şekil 3.33'in devamı



$$\Gamma = 0$$



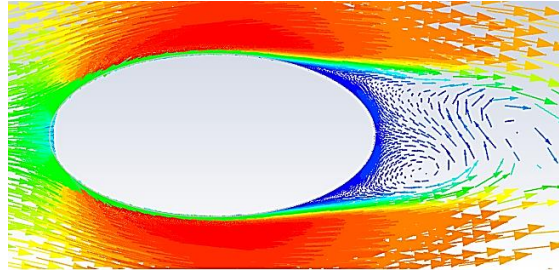
$$\Gamma = 0.6$$



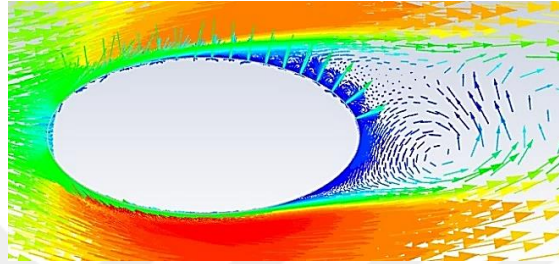
$$\Gamma = -0.6$$

Şekil 3.34.  $AR = 0.5$  oranındaki eliptik kesitli silindirin yarı üst yüzeyinden yapılan üfleme-emmede ortalama hız vektörleri ( $Re \cong 22000$ )

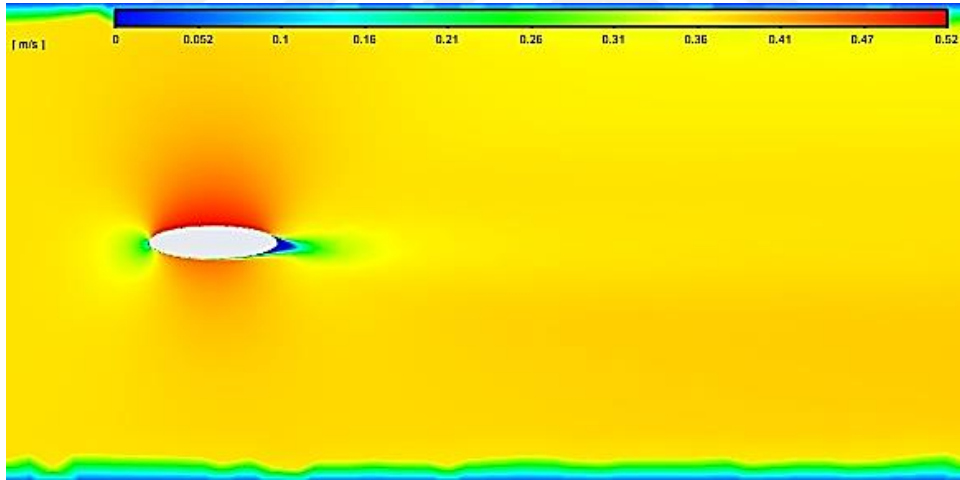
Şekil 3.34'in devamı



$$\Gamma = 0$$



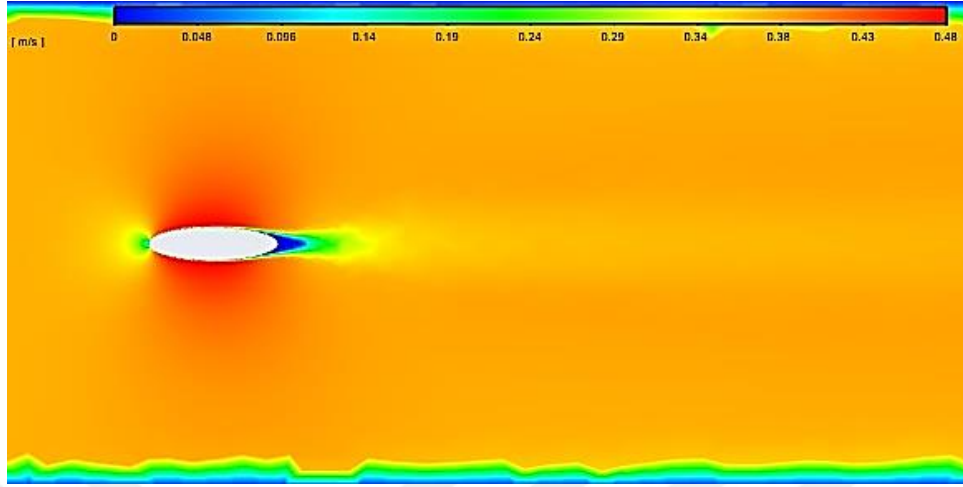
$$\Gamma = 0.6$$



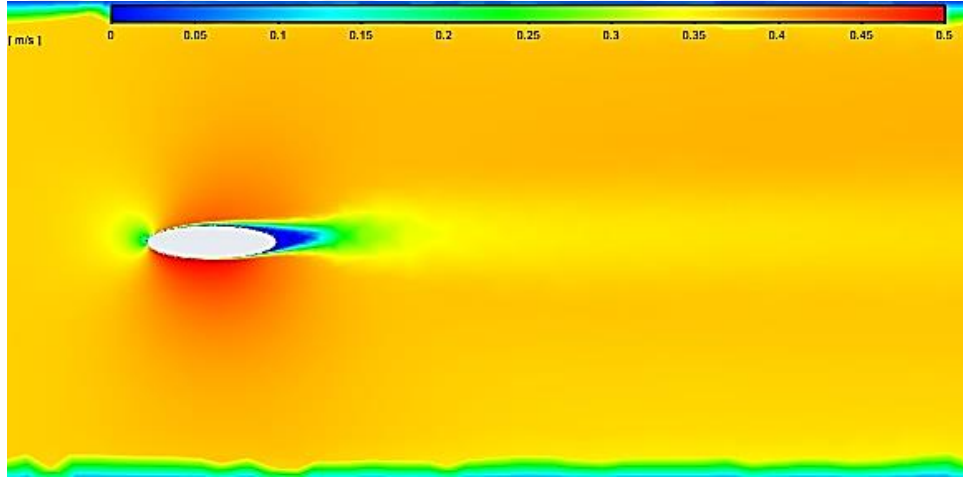
$$\Gamma = -0.6$$

Şekil 3.35.  $AR = 0.25$  oranındaki eliptik kesitli silindirin yarı üst yüzeyinden yapılan üfleme-emmede eş hız dağılımları ( $Re \cong 22000$ )

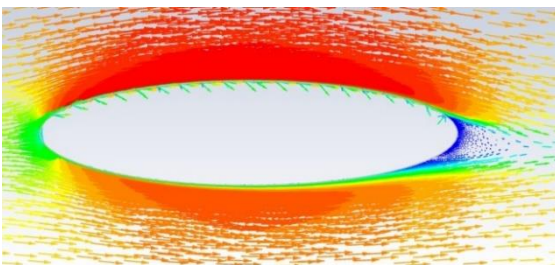
Şekil 3.35'in devamı



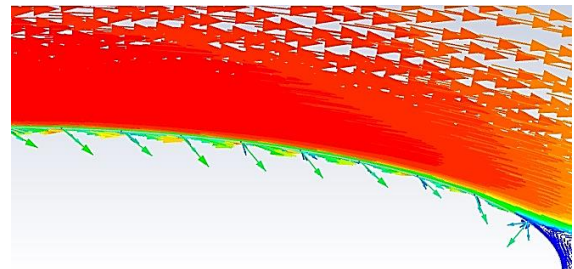
$$\Gamma = 0$$



$$\Gamma = 0.6$$

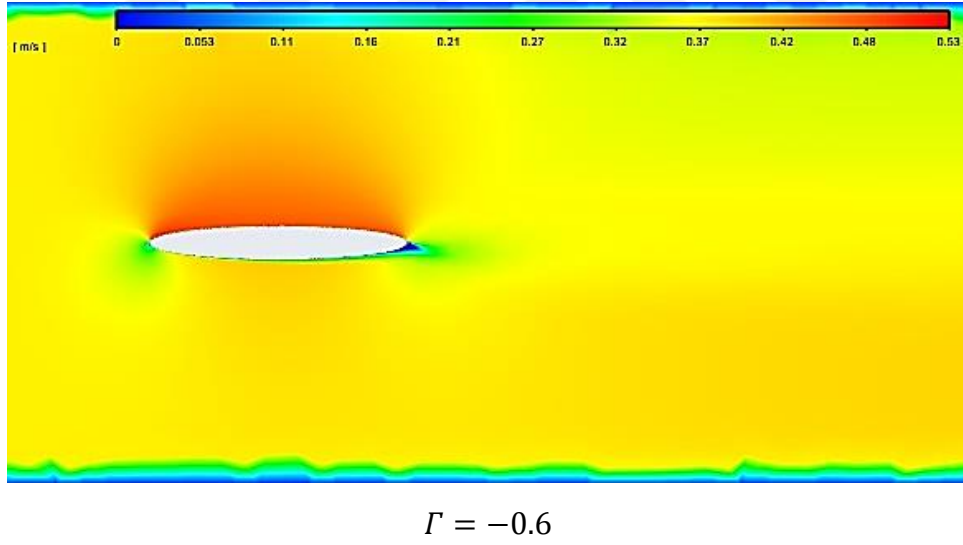
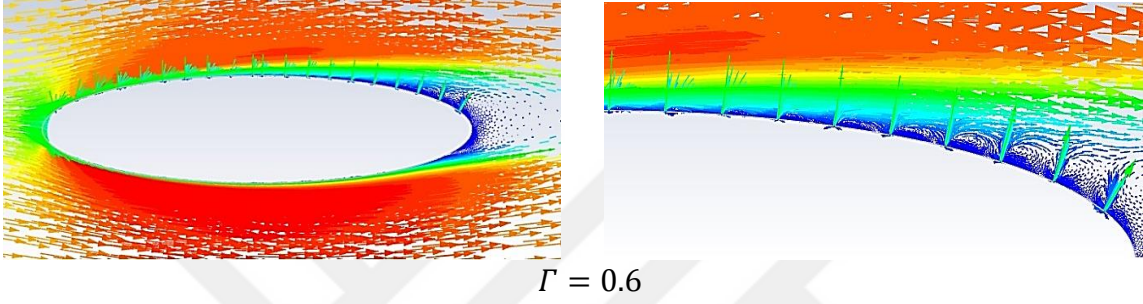
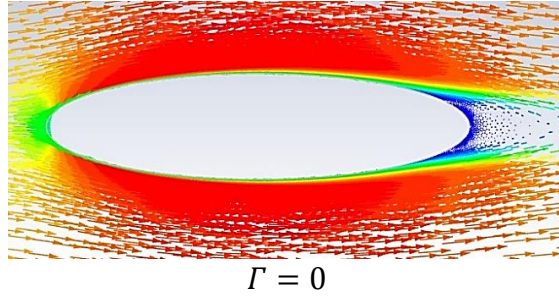


$$\Gamma = -0.6$$



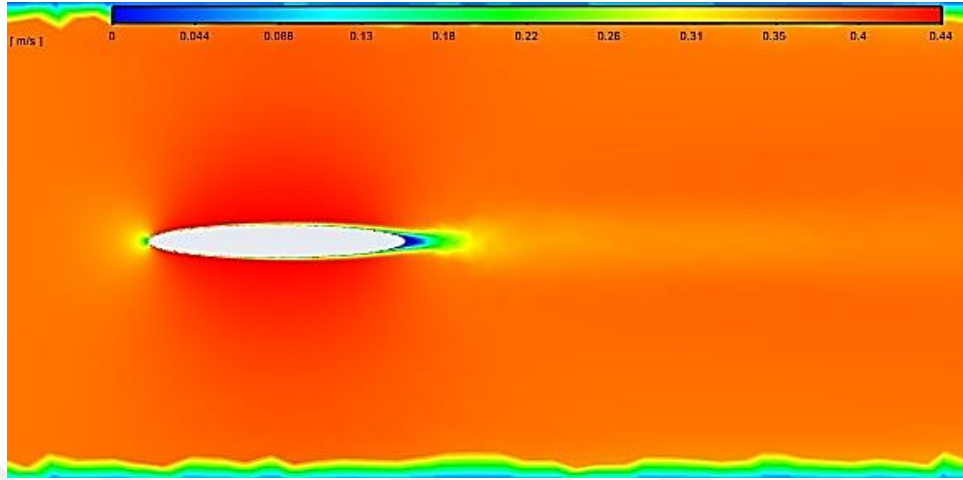
Şekil 3.36.  $AR = 0.25$  oranındaki eliptik kesitli silindirin yarı üst yüzeyinden yapılan üfleme-emmede ortalama hız vektörleri ( $Re \cong 22000$ )

Şekil 3.36'in devamı

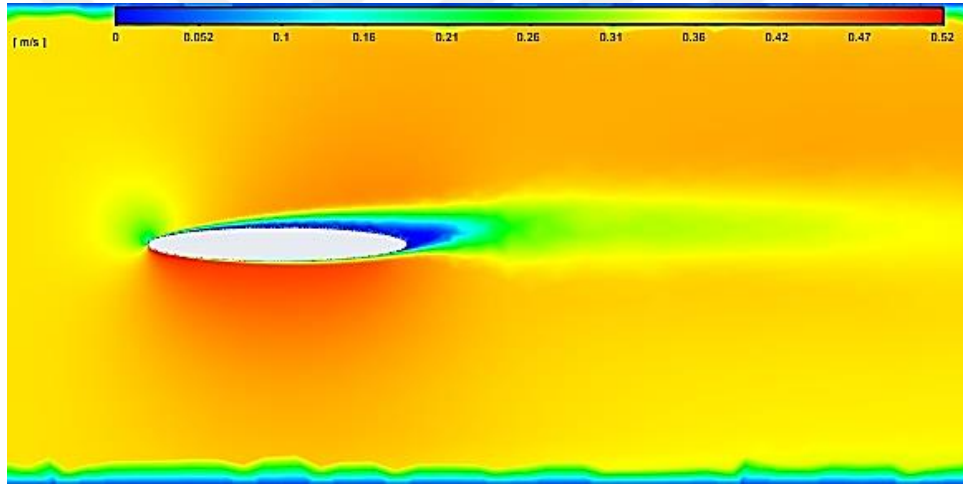


Şekil 3.37.  $AR = 0.125$  oranındaki eliptik kesitli silindirin 160 deliğe sahip yarı üst yüzeyinden yapılan üfleme-emmede eş hız dağılımları ( $Re \cong 22000$ )

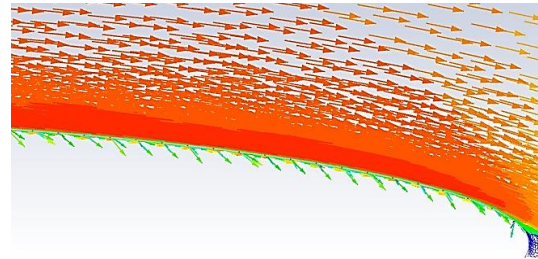
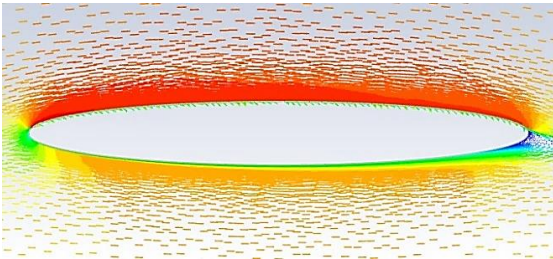
Şekil 3.37'in devamı



$$\Gamma = 0$$



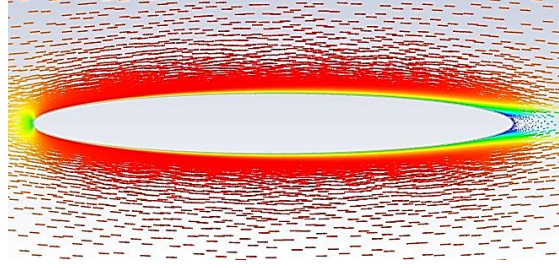
$$\Gamma = 0.6$$



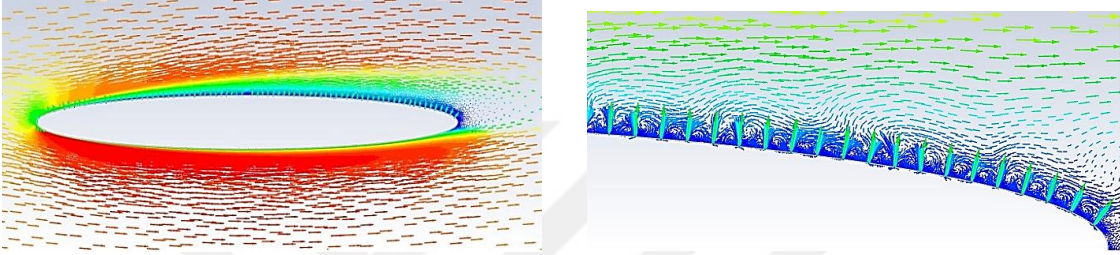
$$\Gamma = -0.6$$

Şekil 3.38.  $AR = 0.125$  oranındaki eliptik kesitli silindirin 160 deliğe sahip yarı üst yüzeyinden yapılan üfleme-emmede ortalama hız vektörleri ( $Re \cong 22000$ )

Şekil 3.38'in devamı



$$\Gamma = 0$$

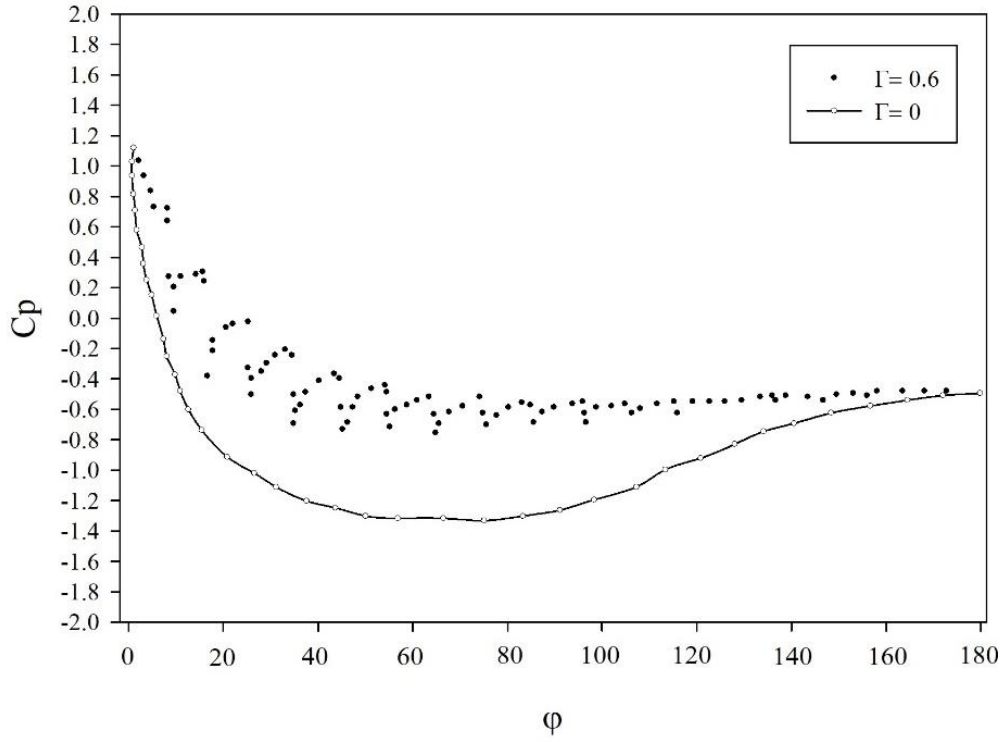


$$\Gamma = 0.6$$

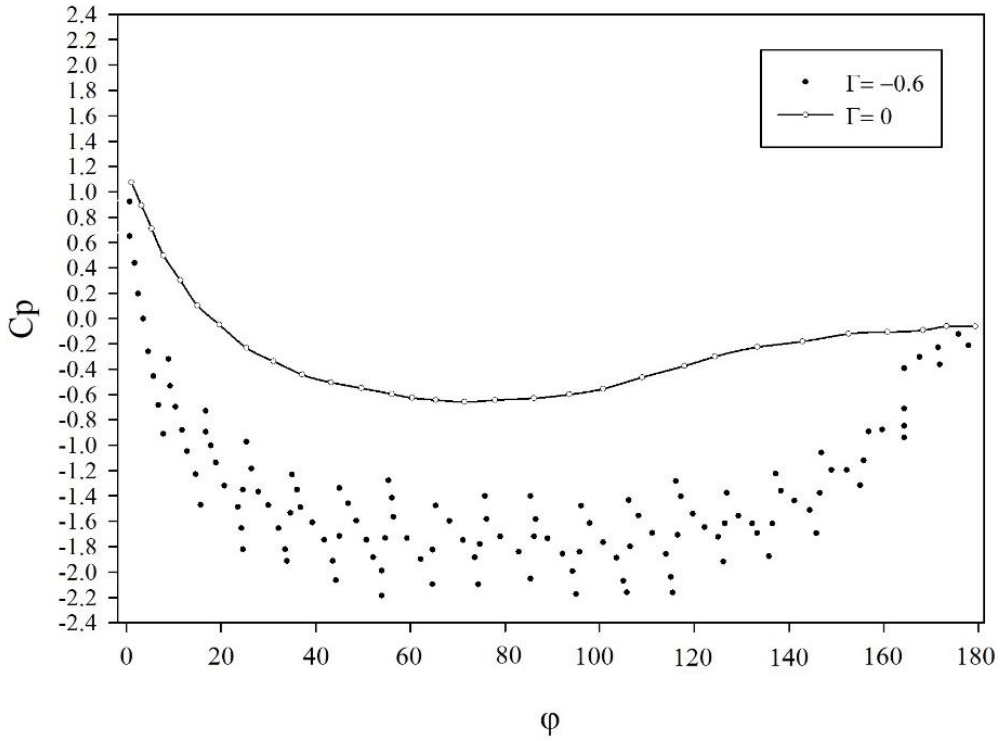
### 3.4.3. Üfleme ve Emmenin Basınç Dağılımı Üzerindeki Etkisi

$AR = 0.5$  eliptik silindirin yarı üst yüzeyinden uygulanan üfleme-emmede sınır  $\Gamma$  değerleri için ortalama basınç katsayısının üflemsiz duruma göre çevresel değişimi Şekil 3.39 ve Şekil 3.40'da gösterilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi yüzeyden uygulanan üfleme basınç değerini arttırırken emme düşürmektedir. Diğer bir deyişle;  $|\Gamma|$  parametresinin artmasıyla beraber basınç değeri önemli ölçüde etkilenmektedir. Ayrıca silindirin üflemsiz yarı alt ( $\Gamma = 0$ ) yüzeyindeki basınç da yarı üst yüzeydeki üfleme-emmeden etkilenmekte ve çeşitli  $\Gamma$  değerleri için farklılık göstermektedir (Şekil 3.41).

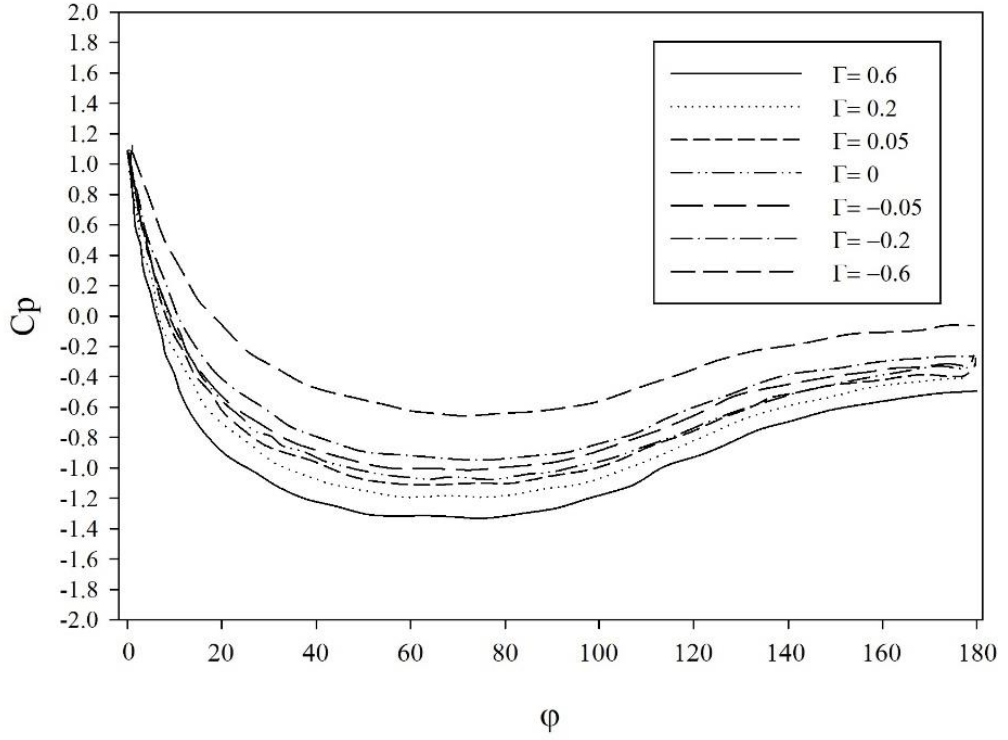




Şekil 3.39.  $AR = 0.5$  oranına sahip eliptik kesitli silindirin üst yüzeyinden uygulanan üflemede basınç katsayısının değişimi ( $Re \cong 22000$ )

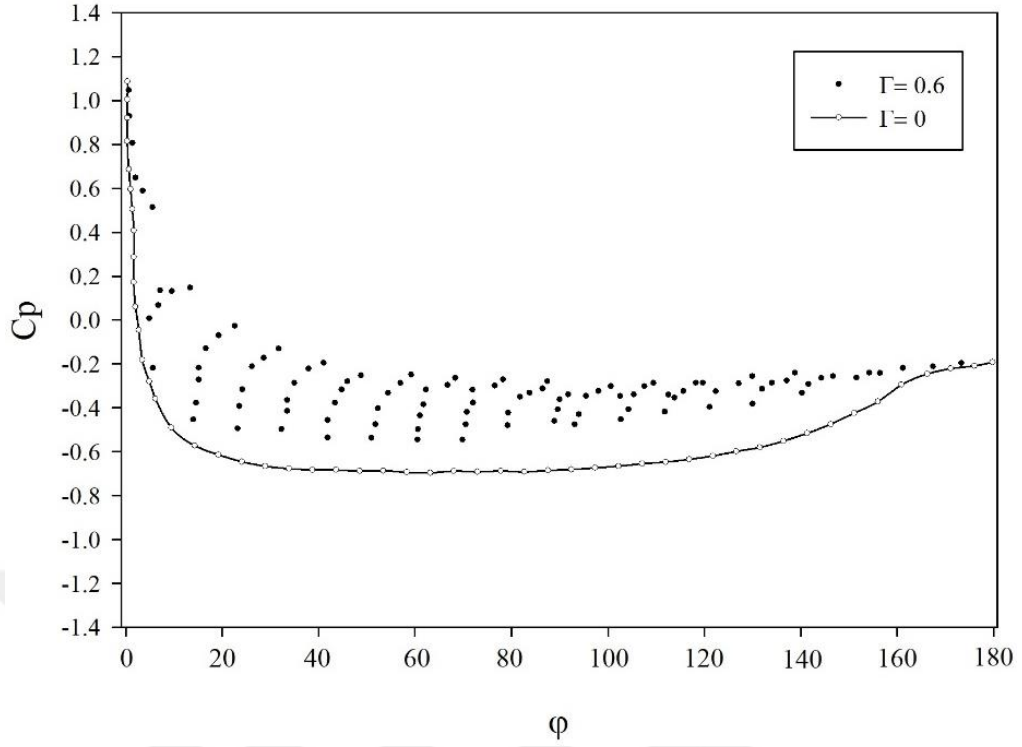


Şekil 3.40.  $AR = 0.5$  oranına sahip eliptik kesitli silindirin üst yüzeyinden uygulanan emmede basınç katsayısının değişimi ( $Re \cong 22000$ )

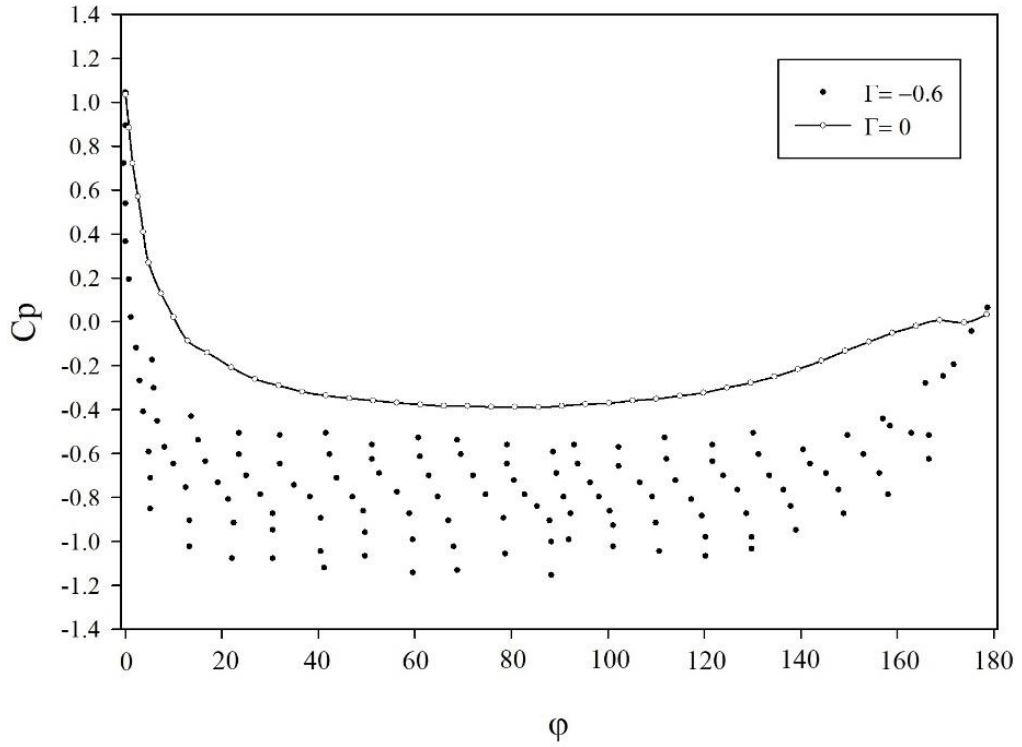


Şekil 3.41.  $AR = 0.5$  oranına sahip eliptik kesitli silindirin yarı üst yüzeylerinden uygulanan üfleme ve emmede üflemesiz yarı alt yüzeylerde basınç katsayısının değişimi ( $Re \cong 22000$ )

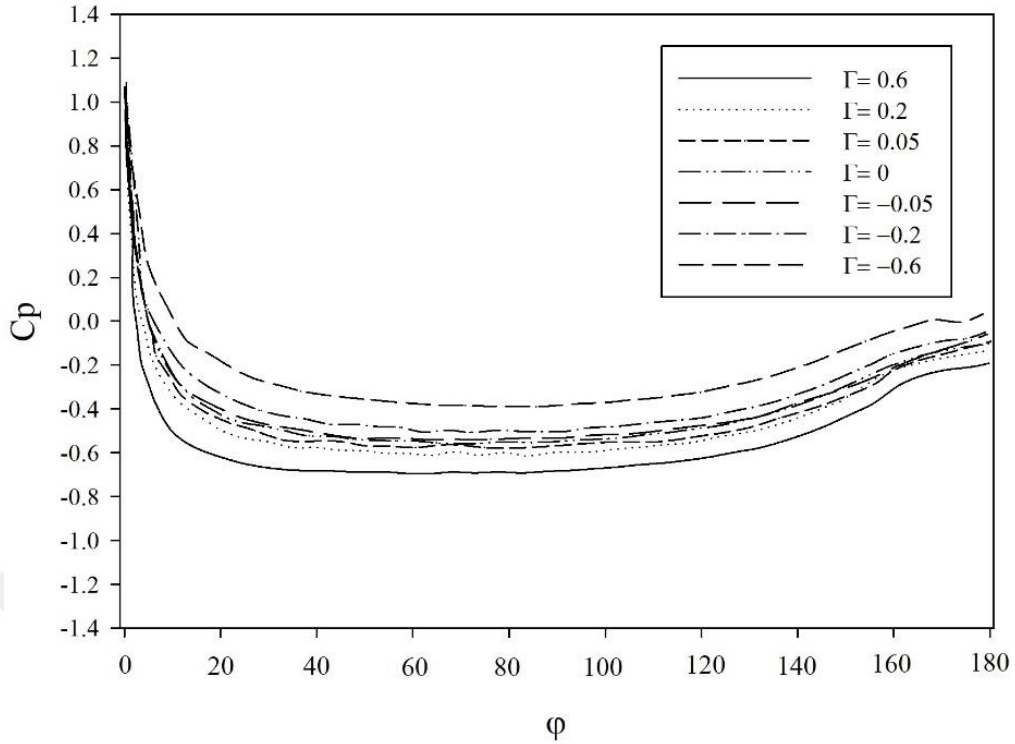
$AR = 0.25$  oranına sahip eliptik kesitli silindirin yarı üst yüzeyinden uygulanan üfleme-emmede bazı  $\Gamma$  değerlerinde, basınç katsayısının üflemesiz duruma göre çevresel değişimi Şekil 3.42 ve Şekil 3.43'te gösterilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi  $AR = 0.5$  oranına sahip silindirdeki davranışa benzer şekilde yüzeyden uygulanan üfleme basınç değerini arttırırken, emme düşürmektedir. Ayrıca modelin yarı üst yüzeyden uygulanan üfleme ve emme, üflemesiz yarı alt yüzeyindeki ( $\Gamma = 0$ ) basıncı etkilemektedir (Şekil 3.44).



Şekil 3.42.  $AR = 0.25$  oranına sahip eliptik kesitli silindirin üst yüzeyinden uygulanan üflemede basınç katsayısının değişimi ( $Re \cong 22000$ )

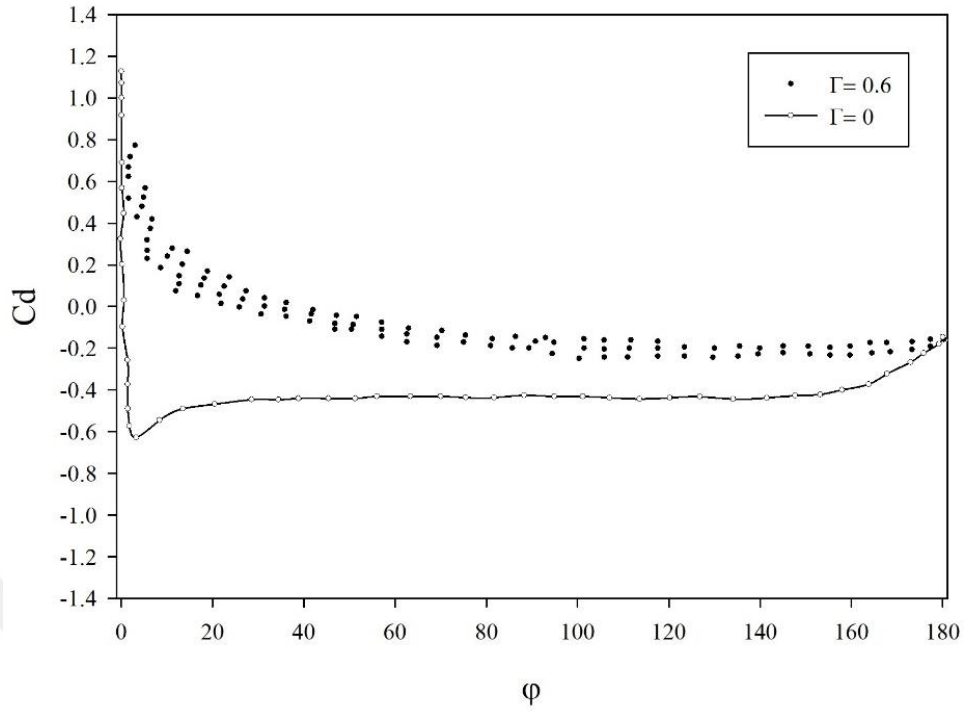


Şekil 3.43.  $AR = 0.25$  oranına sahip eliptik kesitli silindirin üst yüzeyinden uygulanan emmede basınç katsayısının değişimi ( $Re \cong 22000$ )

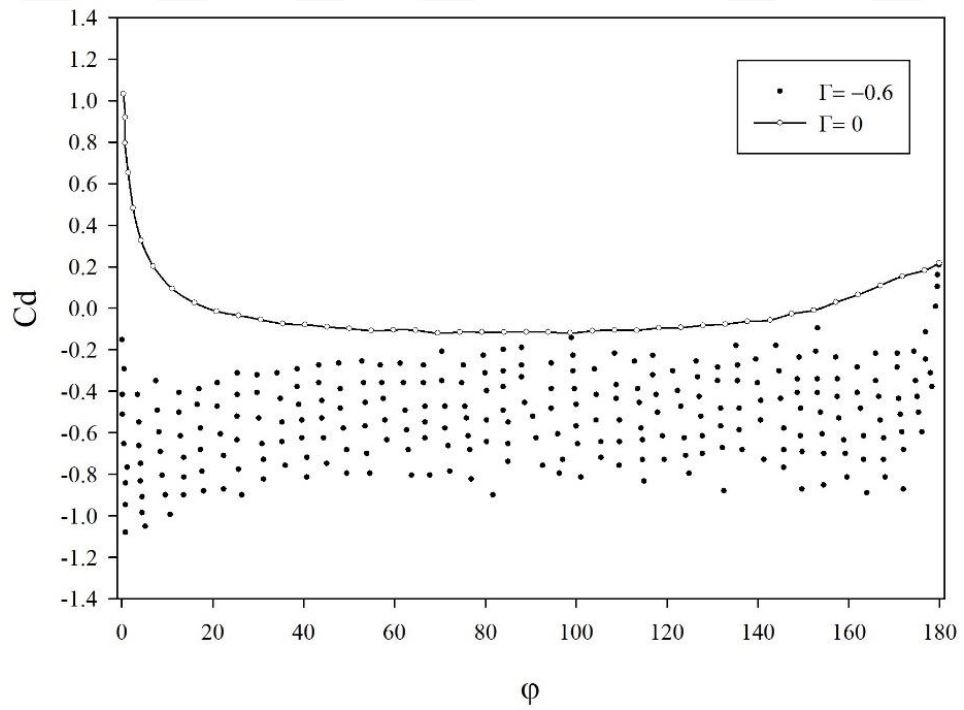


Şekil 3.44.  $AR = 0.25$  oranına sahip eliptik kesitli silindirin yarı üst yüzeylerinden uygulanan üfleme ve emmede üflemez yarı alt yüzeylerde basınç katsayısının değişimi ( $Re \cong 22000$ )

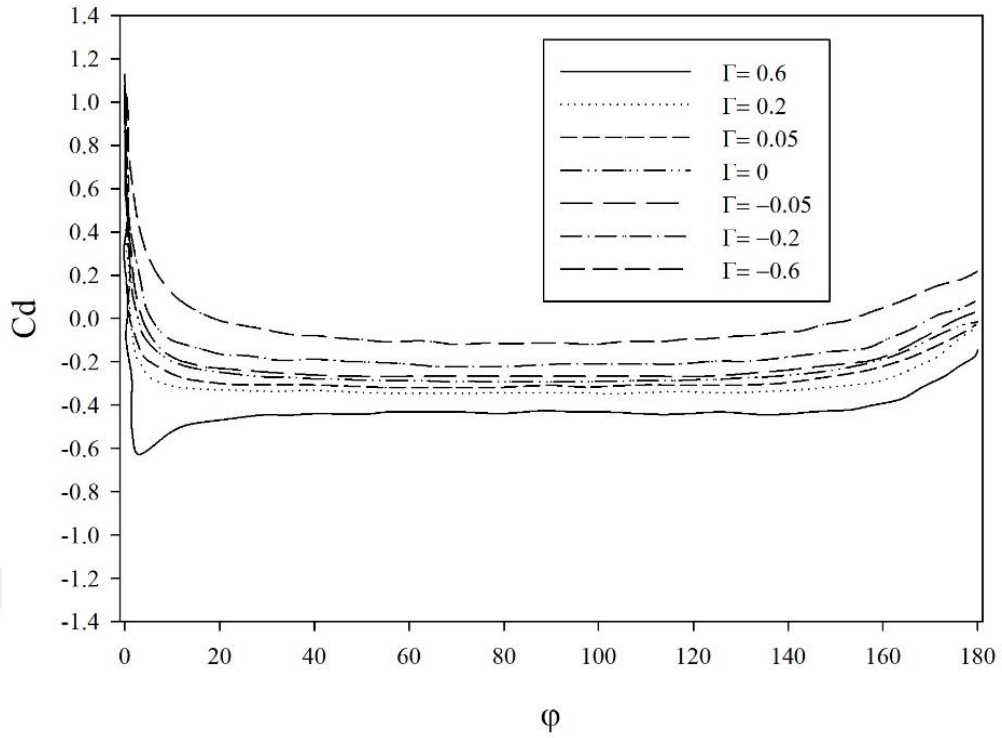
$AR = 0.125$  eliptik silindirin 160 delikli modelinde yarı üst yüzeyinden uygulanan üfleme-emme durumu için bazı  $\Gamma$  değerlerinde, ortalama basınç katsayısının üflemez duruma göre çevresel değişimi Şekil 3.45 ve Şekil 3.46'da gösterilmiştir. Diğer en/boy oranlı silindirlerde de olduğu gibi yüzeyden uygulanan üfleme basınç değerini artırırken, emme düşürmektedir. Ayrıca modelin yarı üst yüzeyden uygulanan üfleme ve emme, üflemez yarı alt yüzeyindeki ( $\Gamma = 0$ ) basıncı etkilemektedir (Şekil 3.47).



Şekil 3.45.  $AR = 0.125$  oranına sahip 160 delikli eliptik kesitli silindirin üst yüzeyinden uygulanan üflemede basınç katsayısının değişimi ( $Re \cong 22000$ )



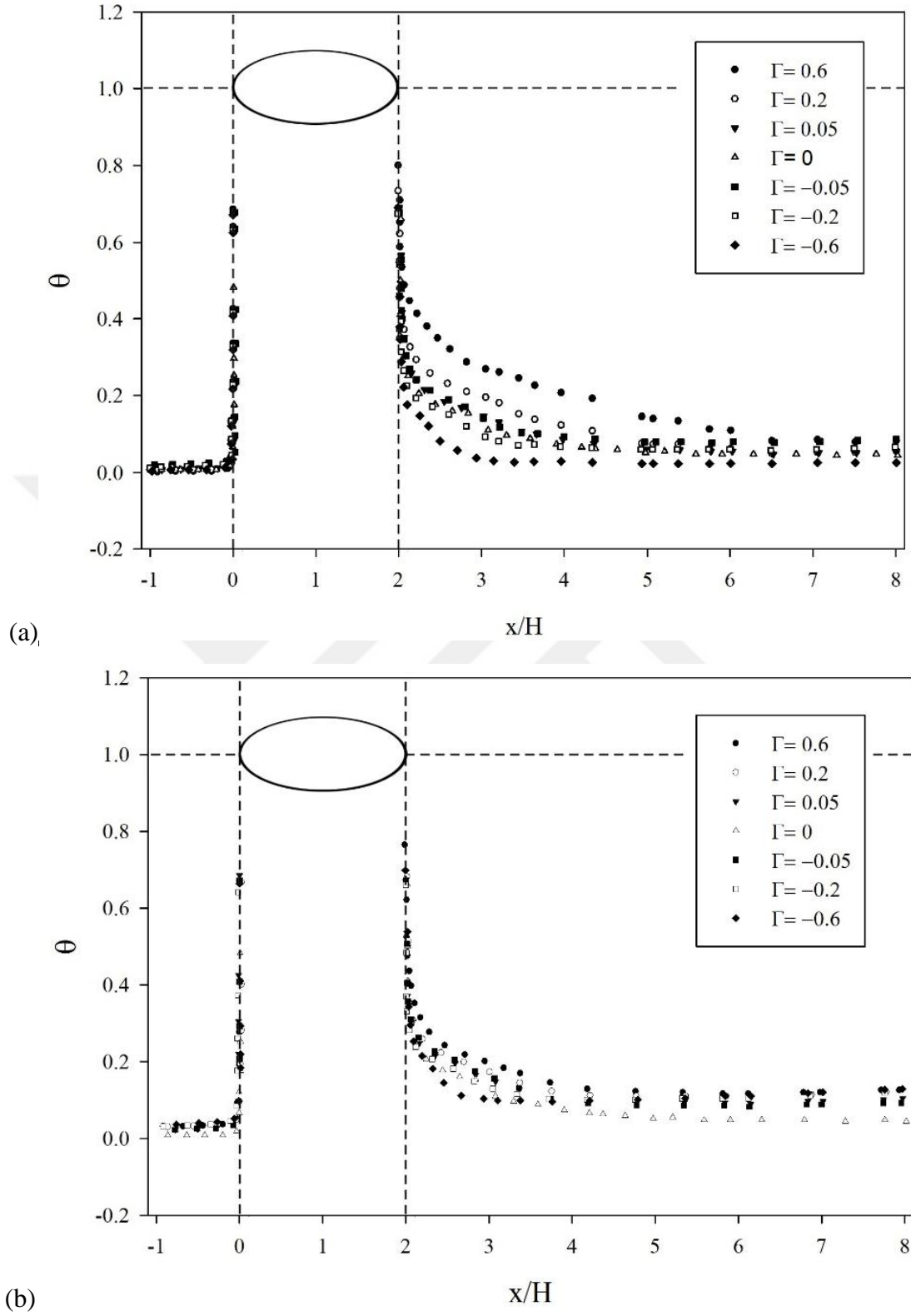
Şekil 3.46.  $AR = 0.125$  oranına sahip 160 delikli eliptik kesitli silindirin üst yüzeyinden uygulanan emmede basınç katsayısının değişimi ( $Re \cong 22000$ )



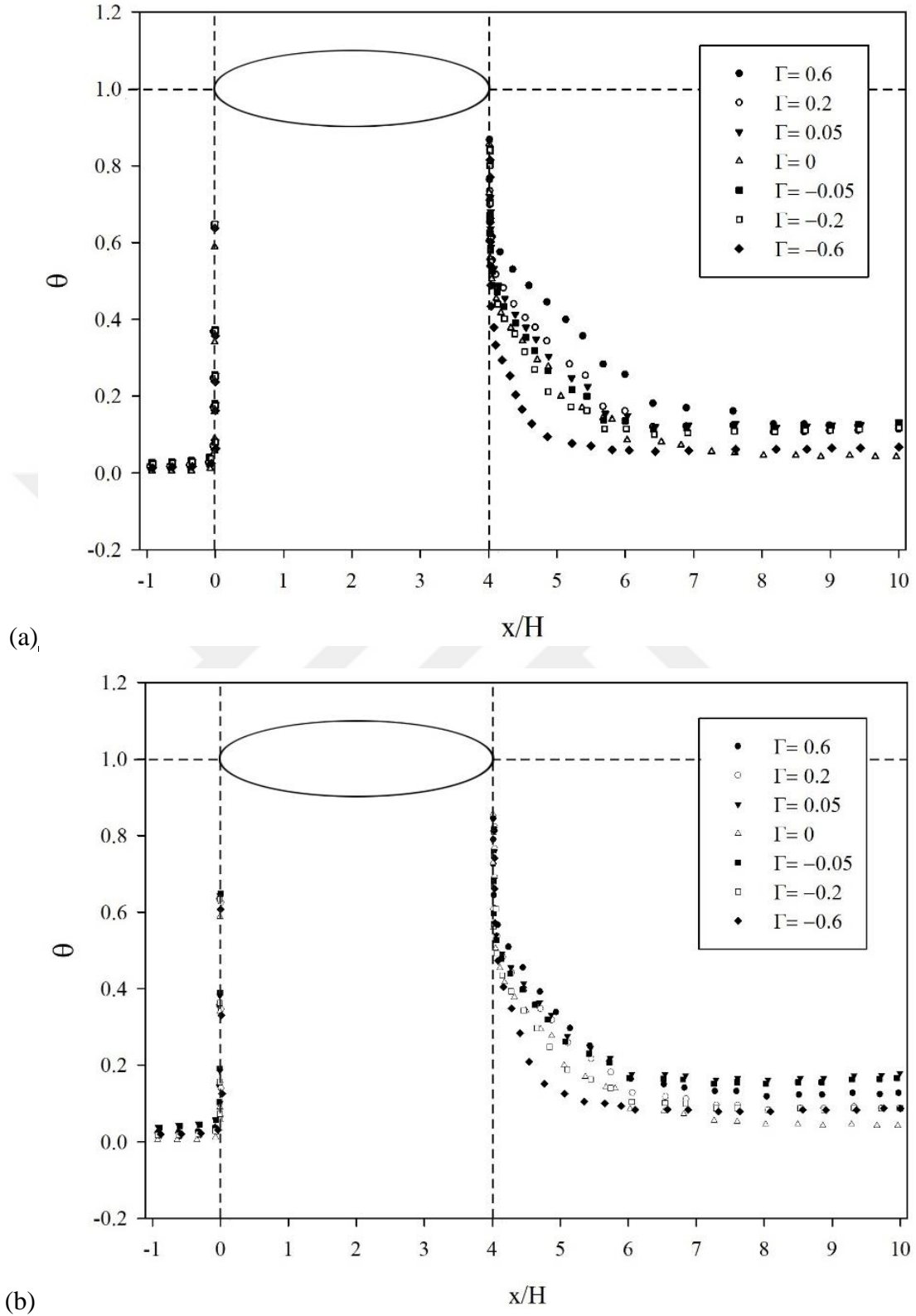
Şekil 3.47.  $AR = 0.125$  oranına sahip 160 delikli eliptik kesitli silindirin yarı üst yüzeylerinden uygulanan üfleme ve emmede üflemesiz yarı alt yüzeylerde basınç katsayısının değişimi ( $Re \cong 22000$ )

#### 3.4.4. Üfleme ve Emmenin Sıcaklık Dağılımı ve Nusselt Sayısı Üzerindeki Etkisi

Farklı en/boy oranlarına ( $AR$ ) sahip eliptik kesitli silindirlerin tüm ve yarı üst yüzeyinden uygulanan üfleme-emmenin silindirin merkez çizgisindeki boyutsuz sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi Şekil 3.48-3.50'de gösterilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi; üfleme katsayısı ile birlikte iz bölgesindeki sıcaklık dağılımı da değişmektedir. Beklentiye uygun olarak tüm yüzeylerden uygulanan üfleme ve emmenin, yarı üst yüzeyden uygulanan üfleme-emmeye göre iz bölgesindeki boyutsuz sıcaklık dağılımı üzerinde daha etkili olduğu görülmektedir. Değişimlerden de görüldüğü gibi üfleme sıcaklığına en yakın sıcaklık dağılımı  $AR = 0.125$  oranındaki eliptik kesitli silindirin tüm yüzeylerindeki 160 delikten  $\Gamma = 6$  üfleme katsayısı ile yapılan üflemede ortaya çıkmaktadır (Şekil 3.50.c)

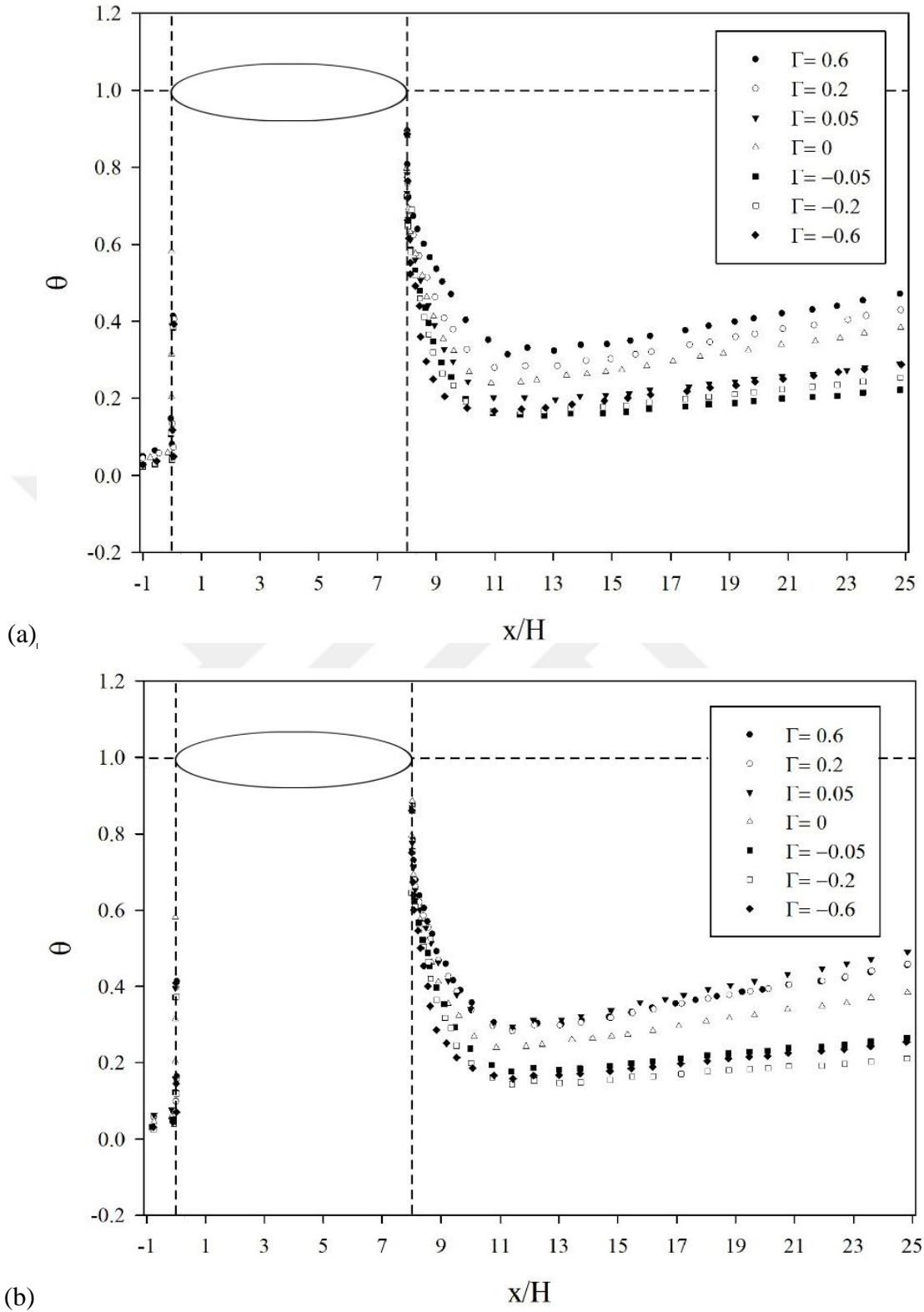


Şekil 3.48.  $AR = 0.5$  oranına sahip eliptik kesitli silindirin merkez çizgisi üzerinde boyutsuz sıcaklık değişimi a) Tüm yüzeylerden üfleme-emme, b) Yarı üst yüzeyden üfleme-emme ( $Re \cong 22000$ )



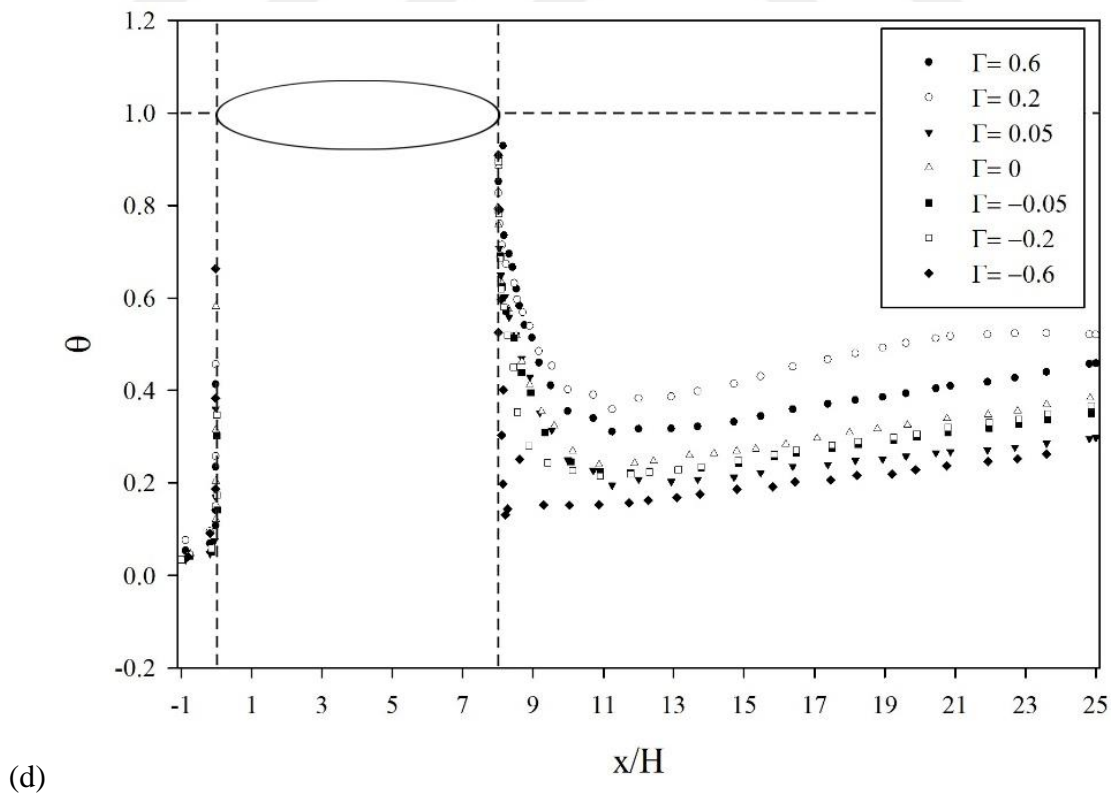
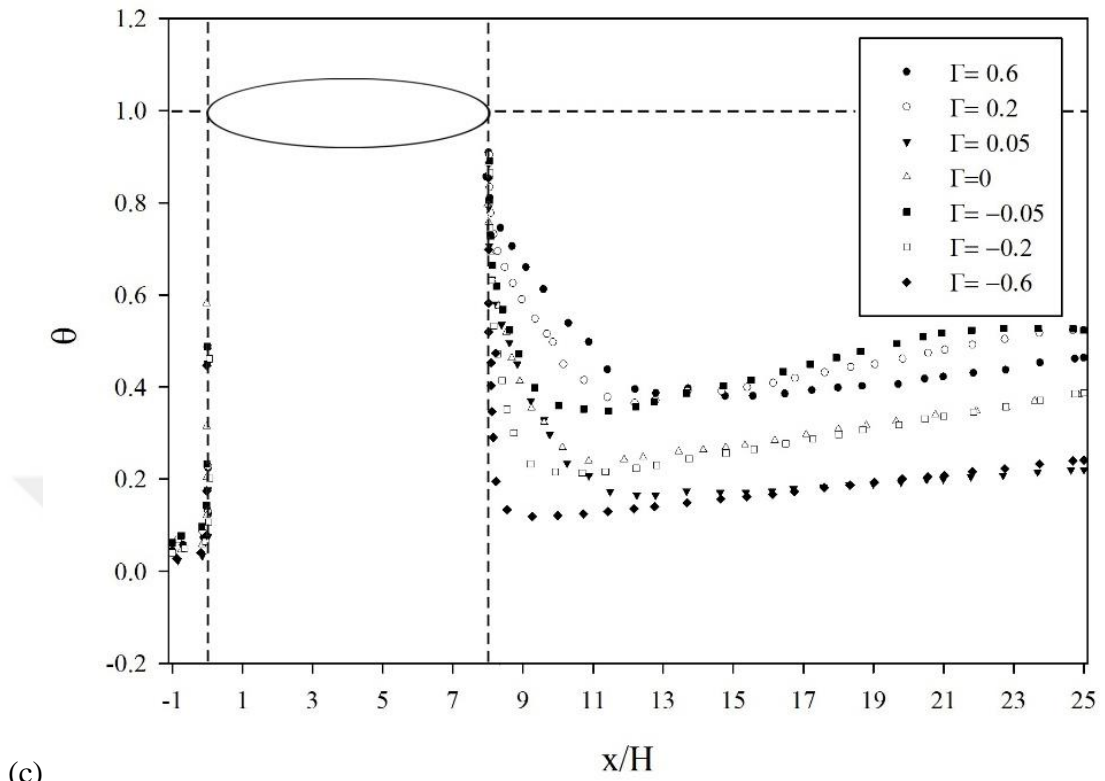
Şekil 3.49.  $AR = 0.25$  oranına sahip eliptik kesitli silindirin merkez çizgisi üzerinde boyutsuz sıcaklık değişimi a) Tüm yüzeylerden üfleme-emme, b) Yarı üst yüzeyden üfleme-emme ( $Re \cong 22000$ )



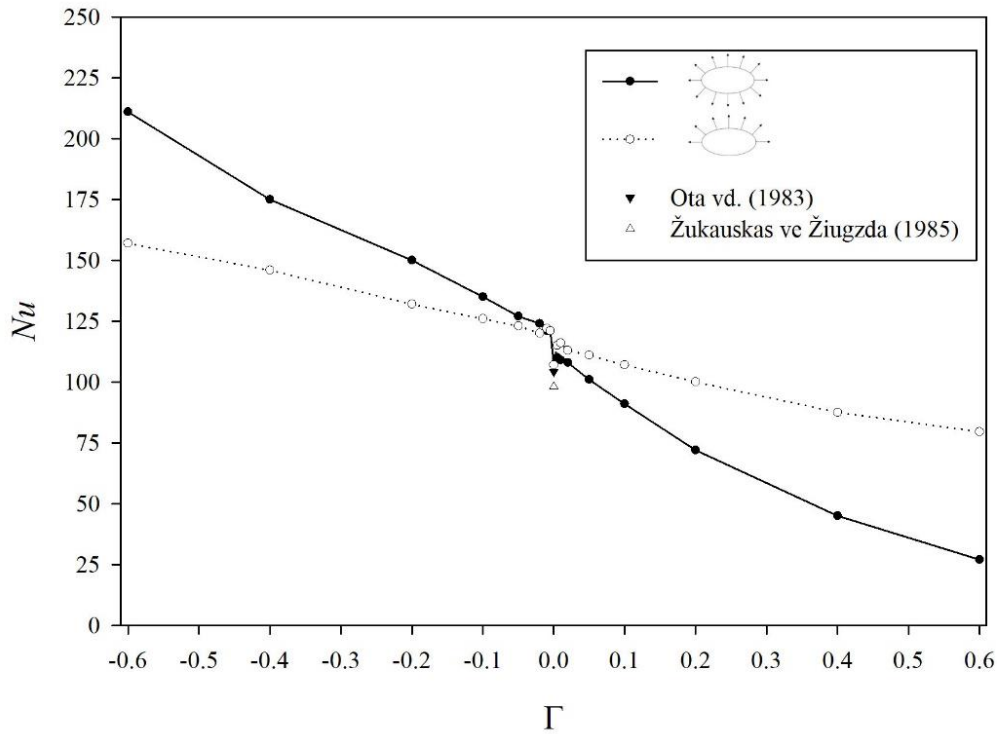


Şekil 3.50.  $AR = 0.125$  oranına sahip eliptik kesitli silindirin merkez çizgisi üzerinde boyutsuz sıcaklık değişimi a) Tüm yüzeylerden 40 delikten üfleme-emme, b) Yarı üst yüzeyden 40 delikten üfleme-emme, c) Tüm yüzeylerden 160 delikten üfleme-emme, d) Yarı üst yüzeyden 160 delikten üfleme-emme ( $Re \cong 22000$ )

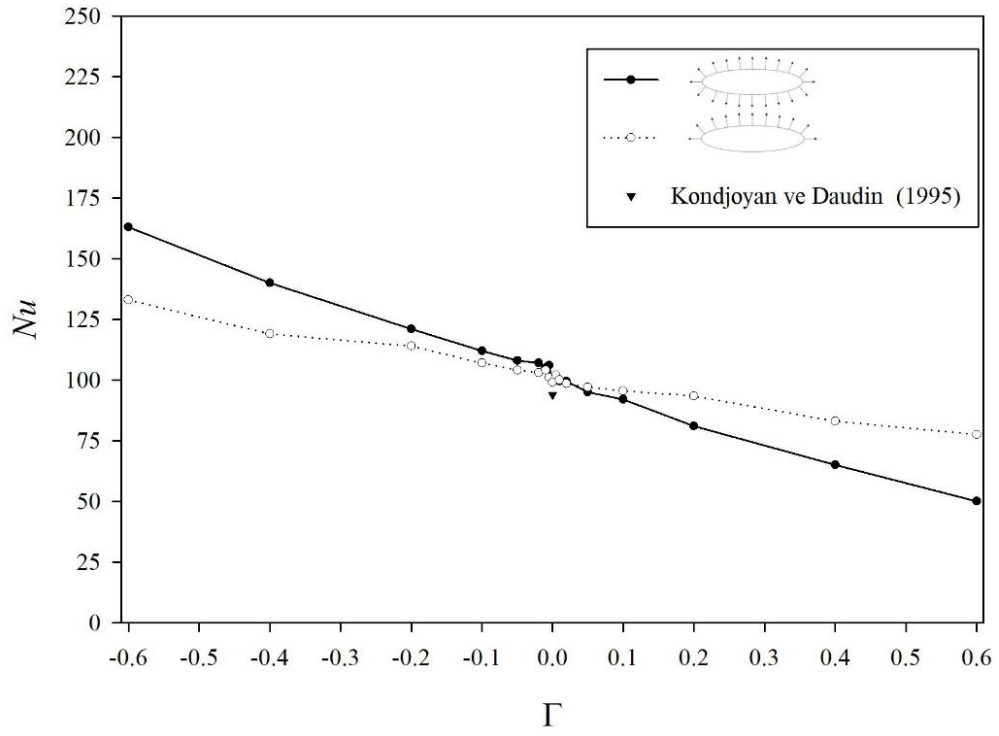
Şekil 3.50'in devamı



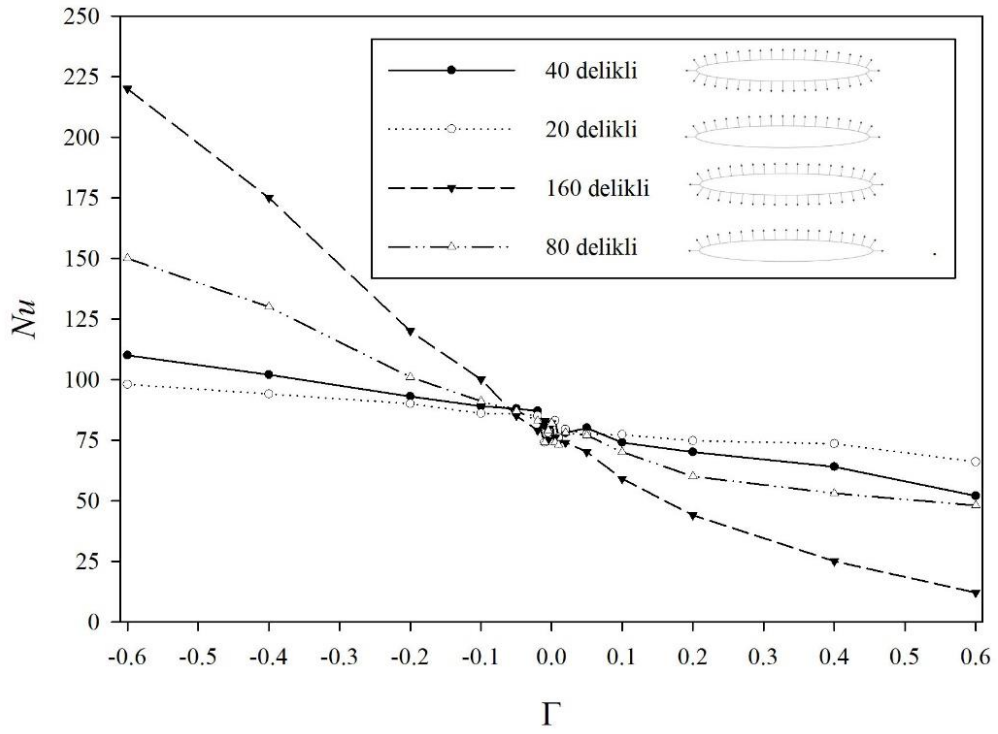
Eliptik kesitli silindirlerin yüzeylerinden yapılan üfleme-emmenin  $Nu$  sayısı üzerindeki etkileri Şekil 3.51-3.53'te görülmektedir. Üflemesiz durumlara ait deneysel değerlerin de yer aldığı değişimlerden de görüldüğü gibi; her durumda yüzeyden uygulanan emmenin artışı zaman ortalamalı  $Nu$  sayısını artırırken, üflemenin artışı tersine davranış göstermektedir. Şekillerde de görüldüğü gibi; tüm yüzeylerden uygulanan üfleme-emme, yarı üst yüzeyden uygulanan üfleme-emme durumuna göre  $Nu$  sayısı üzerinde daha etkili olmaktadır. Üflemesiz duruma göre  $Nu$  sayısındaki en yüksek artış ve düşüş;  $AR = 0.125$  oranına sahip eliptik kesitli silindirin 160 delikli tüm yüzeyinden uygulanan üfleme-emme durumunda  $\Gamma = \pm 0.6$  değerlerinde yaklaşık %168 ve %85 olarak ortaya çıkmaktadır. Görüldüğü gibi silindirin tüm yüzeylerinden uygulanan emme ısıl sınır tabaka kalınlığını azaltarak silindirden akış alanına ısı transferini artırmakta, üfleme ise ısıl sınır tabaka kalınlığını artırdığından ısı transferi azalmaktadır.



Şekil 3.51.  $AR = 0.5$  oranına sahip eliptik kesitli silindir için zaman ortalamalı  $Nu$  sayısının  $\Gamma$  ile değişimi ( $Re \cong 22000$ )



Şekil 3.52.  $AR = 0.25$  oranına sahip eliptik kesitli silindir için zaman ortalamalı  $Nu$  sayısının  $\Gamma$  ile değişimi ( $Re \cong 22000$ )



Şekil 3.53.  $AR = 0.125$  oranına sahip eliptik kesitli silindir için zaman ortalamalı  $Nu$  sayısının  $\Gamma$  ile değişimi ( $Re \cong 22000$ )

#### 4. SONUÇLAR

Tez çalışmasında türbülanslı bir akış içerisinde durmakta olan kare, beşgen, dairesel ve eliptik kesitli geometrilerine sahip silindirlerin aktif akış kontrol yöntemi olan yüzeylerden yapılan üfleme-emme uygulamasının, akış alanı ve ısı transferi üzerindeki etkileri Reynolds sayısının  $Re \cong 22000$  değerinde iki boyutlu olarak incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgular üfleme-emme yapılan çeşitli yüzey konfigürasyonları için üfleme-emme katsayısının  $-0.625 \leq \Gamma \leq 0.625$  aralığındaki değerleri için elde edilmiştir. Ayrıca kare kesitli silindir için elde edilen bulguların diğer çalışmalarla kıyaslanmasında uyum sağlanabilmesi için düzeltilmiş üfleme-emme katsayısı  $\Gamma_{corr}$  da göz önüne alınmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanmıştır:

- 1- Her bir konfigürasyonda yüzeyden yapılan üfleme-emmenin etkisi yüzeydeki delik sayısı ve üfleme-emme yoğunluğu ile ilişkilidir. Diğer bir deyişle yüzeyden yapılan üflemenin aerodinamik ve ısıl özellikler üzerindeki etkisi sadece  $\Gamma$  üfleme-emme katsayısına bağlı olmayıp, yüzeydeki delik sayısına ve üfleme yapılan toplam delik alanının toplam yüzey alanına olan oranına da bağlıdır.
- 2- Kare kesitli silindir için üflemesiz duruma göre direnç katsayısındaki en fazla düşüş, ön ve arka yüzeyler arasındaki en düşük toplam basınç farkını sağlayan tüm yüzeylerden  $\Gamma = -0.25$  katsayısında yapılan emmede ortaya çıkmaktadır. Direnç katsayısındaki en fazla artış ise ön ve arka yüzeyler arasındaki en yüksek basınç farkına neden olan arka yüzeyden  $\Gamma = -0.625$  katsayısında yapılan emmede görülmüştür. Ayrıca üst-alt yüzeylerden  $\Gamma = 0.625$  katsayısında yapılan üflemede direnç katsayısı, akışın yapısı ve enerjisine bağlı olarak önemli ölçüde artmaktadır.
- 3- Kare kesitli silindir için kritik  $C_d$  değerlerinde ön yüzeydeki basınç dağılımları tüm konfigürasyonlar için yaklaşık olarak aynı kalmakta iken, diğer yüzeylerdeki (alt, arka ve üst) basınç katsayısı,  $\Gamma$ 'ya bağlı olarak değişmektedir. Üst ve alt yüzeylerdeki basınç katsayısı dağılımları her durumda simetri nedeniyle aynı kalmaktadır. Ayrıca kare silindirin arka yüzeyindeki en düşük ve en yüksek basınç dağılımı değerleri, sırasıyla tüm yüzeylerden ve arka yüzeyden yapılan emmede ortaya çıkmaktadır.
- 4- Kare kesitli silindirin çeşitli yüzeylerinden uygulanan üfleme, silindirin merkez çizgisi üzerindeki sıcaklık dağılımını özellikle yüksek  $\Gamma$  değerlerinde etkilerken, emme işleminin iz bölgesindeki sıcaklık dağılımı üzerinde belirgin bir etkisi yoktur. Bunun yanında, tüm üfleme-emme konfigürasyonları için; emme katsayısının artışı ile

- birlikte ısı sınır tabaka kalınlığı azalmakta,  $Nu$  sayısı artmakta ve dolayısıyla silindir ile akış arasındaki ısı transferi iyileşmektedir. Üfleme katsayısının artışı ise ısı sınır tabaka kalınlığı artırmakta,  $Nu$  sayısını düşürmekte ve dolayısıyla ısı transferini azaltarak ısı koruma sağlamaktadır.  $Nu$  sayısının en yüksek artış ve düşüşü, silindirin tüm yüzeylerinden  $|\Gamma| = 0.625$  ile yapılan emme-üflemede sırasıyla %180 ve %115 olarak hesaplanmıştır.
- 5- Beşgen kesitli silindir için üflemez duruma göre direnç katsayısındaki en fazla düşme, yüzeyler arasındaki en düşük toplam basınç farkını sağlayan tüm yüzeylerden  $\Gamma = 0.2$  katsayısında ve ön yüzeylerden  $\Gamma = 0.4$  katsayısında yapılan üflemede ortaya çıkmaktadır. Bu durumda silindirin ön-üst ve ön-alt köşelerinden olan ayrılma yapısı her iki durum için benzerlik göstermiştir. Direnç katsayısındaki en fazla artış ise, yüzeyler arasındaki en yüksek basınç farkına neden olan ön yüzeylerden  $|\Gamma| \geq 0.4$  ile yapılan emmede görülmüştür.
  - 6- Beşgen kesitli silindir için tüm üfleme-emme konfigürasyonlarında yüzeylerden aynı düzeydeki üfleme ve emme katsayılı akışlarda üflemenin girdap bölgesinde yüksek enerjili (hızlı) periyodik bir akışa neden olduğu, emmenin ise düşük enerjili (hızlı) bir akış ortaya çıkardığı görülmüştür. Ayrıca artan üfleme katsayısı ile birlikte cismin arkasındaki girdap şiddeti zayıflarken, her emme durumunda üflemez duruma göre belirgin bir değişiklik ortaya çıkmamaktadır.
  - 7- Beşgen kesitli silindirin boyunun uzaması durumlarında  $AR = 1$ 'e kıyasla direnç katsayısının  $AR = 0.5$  için %8 ve  $AR = 0.25$  değerleri için yaklaşık %14 azalmakta olduğu görülmüştür. Değişimlere genel olarak bakıldığında düzgün olmayan beşgen kesitli silindirlerde direnç düşümünün sağlanmasında boydaki değişimden ziyade tüm yüzeylerden yapılan üfleme ve ön yüzeylerden  $\Gamma \geq 0.4$  değerlerinde yapılan üflemenin etkili olduğu anlaşılmıştır.
  - 8- Beşgen kesitli silindir için basınç dağılımları silindirin simetrik yapısına uygun değişimler göstermiştir. Bunun yanında ön yüzeylerden yapılan üfleme-emmede her durumda silindir yüzeylerindeki basınç katsayısı değişimleri arasında belirgin bir fark ortaya çıkmamıştır. Tüm yüzeylerden yapılan üfleme-emme durumunda arka yüzeydeki basınç dağılımı değerleri, artan emme ile düşmekte olup yüzeyler arasındaki toplam basınç farkı artmaktadır.
  - 9- Beşgen kesitli silindir yüzeylerinden yapılan emme iz bölgesindeki sıcaklık dağılımı üzerinde çok az etki yaratırken, üfleme özellikle yüksek  $\Gamma$  değerlerinde sıcaklık

dağılımını etkilemektedir. Her iki durum için yüzeyden uygulanan emmenin artışıyla beraber zaman ortalamalı  $Nu$  sayısı, ısıl sınır tabaka kalınlığının azalması sonucunda artarken, tüm üfleme durumlarında tersine davranış görülmüştür. Silindirden akış alanına en yüksek ısı transferinin sağlandığı ve  $Nu$  sayısında en yüksek artışın görüldüğü durum silindirin tüm yüzeylerinden  $\Gamma = -0.6$  ile uygulanan emmede ortaya çıkmıştır. Bunun yanında, en iyi ısıl koruma ve  $Nu$  sayısının en fazla düştüğü durum silindirin tüm yüzeylerinden  $\Gamma = 0.6$  katsayısı ile uygulanan üflemede ortaya çıkmıştır.

- 10- Dairesel kesitli silindir etrafındaki akışta yüzeyden uygulanan emmenin etkili bir şekilde direnç düşümünü sağlamakta olduğu ve direnç kontrolünde önemli bir yarar sağladığını göstermektedir. Üflemesiz duruma göre direnç katsayısındaki en fazla düşüş; ön ( $\varphi = 0^\circ$ ) ve arka ( $\varphi = 180^\circ$ ) yüzeyler arasındaki en düşük toplam basınç farkını sağlayan  $\Gamma = -0.6$  emme katsayısında yapılan emmede ortaya çıkmaktadır.
- 11- Dairesel kesitli silindir etrafındaki akışta artan emme katsayısı ile birlikte yüzeyden olan ayrılmanın oldukça gecikmesine bağlı olarak silindir arkasındaki ortalamalı girdap bölgesi küçülmekte, silindir arkasındaki akış yapısı tamamen daimi karaktere bürünmekte ve periyodik hareket ortadan kalkmaktadır.
- 12- Dairesel kesitli silindir için  $\Gamma = 0.6$  ile yapılan üflemede yüzeyden akış ayrılması  $\varphi \cong 62^\circ$  de ortaya çıkarken,  $\Gamma = -0.6$  ile yapılan emmede yüzeyden akış ayrılması  $\varphi \cong 80^\circ$  de ortaya çıkmaktadır. Buna göre artan emme etkisi ile birlikte yüzeyden akış ayrılması da gecikmekte ve ayrılma noktası ileriye doğru taşınmaktadır.
- 13- Dairesel kesitli silindir yüzeyinden uygulanan üfleme-emme en yüksek  $\Gamma$  değeri hariç iz bölgesindeki sıcaklık dağılımını çok fazla etkilememektedir. Bunun yanında, emme etkisindeki artış,  $Nu$  sayısının artmasını ve üflemenin artışı  $Nu$  sayısının azalmasını sağlamaktadır.  $Nu$  sayısındaki maksimum artış ve azalma  $|\Gamma| = 0.6$  değerinde yaklaşık %50 ve %92 olarak elde edilmiştir.
- 14- En/boy oranı  $AR = 0.5$  olan eliptik kesitli silindir için direnç katsayısı tüm yüzeylerden ve yarı üst yüzeyden yapılan üflemede artış gösterirken emme etkisinin artmasıyla birlikte düşmektedir.  $AR = 0.25$  oranına sahip eliptik kesitli silindir için ise yarı üst yüzeyden yapılan üfleme-emmenin direnç katsayısı üzerinde etkisi yoktur. Tüm yüzeylerden yapılan emme direnç katsayısını hafifçe düşürürken, üfleme ile birlikte direnç katsayısı az da olsa artma davranışı göstermektedir. En/boy oranı  $AR = 0.125$  olan eliptik kesitli silindir durumunda 40 delikten tüm

yüzeylerden yapılan üflemede direnç katsayısı üflemezken, 160 delikten yapılan üfleme ve emmede belirli  $\Gamma$  değerlerinden sonra artış ortaya çıkmaktadır. Buna göre,  $|\Gamma| > 0.2$  değerlerinde emme bölgesinde hafif bir artış; üfleme bölgesinde biraz daha etkili bir artış olduğu görülmektedir. Genel olarak bakıldığında direnç katsayısındaki değişim sadece  $\Gamma$  üfleme-emme katsayısına bağlı olmayıp, en/boy oranının artması ile beraber akış ayrılmasını önlemek ve girdap bölgesini küçültmek için yüzeydeki delik sayısının ve üfleme yapılan deliklerin yüzeydeki oranının da artması gerekmektedir.

- 15- Eliptik kesitli silindir etrafındaki akışta tüm yüzeylerden yapılan üfleme-emmenin geometrinin simetrik olması nedeniyle kaldırma katsayısı üzerinde etkisinin olmadığı görülmüştür. Tüm en/boy oranlarındaki silindirlerde yarı üst yüzeyden yapılan üfleme durumu için, üflemenin artması kaldırma katsayısını düşürürken, emme etkisi kaldırma katsayısının artmasını sağlamaktadır. Bunun yanında, farklı en/boy oranlarına sahip silindirlerin yüzeyindeki delik sayısı sabit kaldığında  $AR$  oranı azaldıkça kaldırma katsayısı da azalmaktadır.  $AR = 0.125$  oranındaki eliptik kesitli silindirde yüzeydeki delik sayısının artmasıyla birlikte kaldırma katsayısının değişim hızı da artmaktadır. Bu durumda yüzeydeki delik sayısının 4 kat artmasıyla beraber kaldırma katsayısındaki maksimum artış ve azalma sırasıyla % 186 ve % 139 olarak  $|\Gamma| = 0.6$  değerinde elde edilmiştir.
- 16- Tüm en/boy oranlarındaki eliptik kesitli silindirlerin yarı üst yüzeylerinden uygulanan üfleme basınç değerini arttırırken emme düşürmektedir. Diğer bir deyişle;  $|\Gamma|$  parametresinin artmasıyla beraber basınç değeri önemli ölçüde etkilenmektedir. Ayrıca silindirin üflemezken yarı alt ( $\Gamma = 0$ ) yüzeyindeki basınç da yarı üst yüzeydeki üfleme-emmeden etkilenmekte olup, yüzeyde değişen sınır tabaka hız dağılımına bağlı olarak çeşitli  $\Gamma$  değerleri için farklılık göstermektedir.
- 17- Farklı en/boy oranlarına ( $AR$ ) sahip eliptik kesitli silindirlerin tüm ve yarı üst yüzeyinden uygulanan üfleme-emmenin silindirin merkez çizgisindeki boyutsuz sıcaklık dağılımı artan üfleme katsayısı ile birlikte artarken, emme işlemi sıcaklık dağılımını düşürmektedir. Bunun yanında, tüm yüzeylerden uygulanan üfleme ve emmenin, yarı üst yüzeyden uygulanan üfleme-emmeye göre iz bölgesindeki boyutsuz sıcaklık dağılımı üzerinde daha etkili olduğu görülmüştür.  $AR = 0.125$  oranına sahip silindirin yüzeyindeki delik sayısının artması merkez çizgisindeki boyutsuz sıcaklık dağılımını da etkilemektedir. Bu durumda artan delik sayısı ile



birlikte üfleme sıcaklığına en yakın sıcaklık dağılımı  $AR = 0.125$  oranındaki eliptik kesitli silindirin tüm yüzeylerindeki 160 delikten  $\Gamma = 6$  üfleme katsayısı ile yapılan üflemede ortaya çıkmaktadır.

- 18- Farklı en/boy oranları ve her iki üfleme-emme konfigürasyonlarındaki eliptik kesitli silindirlerin yüzeylerinden uygulanan emmenin artışı ısı sınır tabaka kalınlığını azaltarak silindirden akış alanına ısı transferini ve zaman ortalamalı  $Nu$  sayısını artırırken, üflemenin artışı ısı sınır tabaka kalınlığını artırdığından ısı transferini ve zaman ortalamalı  $Nu$  sayısını azaltmaktadır. Ayrıca, tüm yüzeylerden uygulanan üfleme-emme, yarı üst yüzeyden uygulanan üfleme-emme durumuna göre  $Nu$  sayısı üzerinde daha etkili olmaktadır. Üflemesiz duruma göre  $Nu$  sayısındaki en yüksek artış ve düşüş;  $AR = 0.125$  oranına sahip eliptik kesitli silindirin 160 delikli tüm yüzeyinden uygulanan üfleme-emme durumunda  $\Gamma = \pm 0.6$  değerlerinde yaklaşık %168 ve %85 olarak elde edilmiştir.

## 5. KAYNAKLAR

- Achenbach, E., 1968. Distribution of Local Pressure and Skin Friction around a Circular Cylinder in Cross-Flow up to  $Re = 5 \times 10^6$ , J. Fluid Mech., 34,4, 625-639.
- Akansu, Y.E., Bayindirli, C. ve Seyhan, M., 2016. The Improvement of Drag Force on a Truck Trailer Vehicle by Passive Flow Control Methods, Isi Bilim Ve Tek. Dergisi-Journal Therm. Sci. Technol., 36,1, 133-141.
- Bao, Y. ve Tao, J., 2013. The Passive Control of Wake Flow behind a Circular Cylinder by Parallel Dual Plates, J. Fluids Struct., 37, 201-219.
- Bao, Y. ve Tao, J., 2013. Active Control of a Cylinder Wake Flow by Using a Streamwise Oscillating Foil, Phys. Fluids, 25,5, 053601.
- Bazovkin, A.V., Kovenya, V.M., Kornilov, V.I., Lebedev, A.S. ve Popkov, A.N., 2012. Effect of Micro-Blowing of a Gas from the Surface of a Flat Plate on its Drag, J. Appl. Mech. Tech. Phys., 53, 490-499.
- Bearman, P.W. ve Obasaju, E.D., 1982. An Experimental Study of Pressure Fluctuations on Fixed and Oscillating Square-Section Cylinders, J. Fluid Mech., 119, 297-321.
- Bellettre, J., Bataille, F. ve Lallemand, A., 1999. A New Approach for the Study of Turbulent Boundary Layers with Blowing, Int. J. Heat Mass Transf., 42,15, 2905-2920.
- Borgeson, D.M., 2002. Boundary Layer Control Using Micro-Electromechanical Systems (MEMS), Masters Thesis, Airforce Institute of Technology, Ohio.
- Bosch, G. ve Rodi, W., 1998. Simulation of Vortex Shedding Past a Square Cylinder with Different Turbulence Models, Int. J. Numer. Methods Fluids, 28, 601-616.
- Bovand, M., Rashidi, S., Dehghan, M., Esfahani, J.A. ve Valipour, M.S., 2015. Control of Wake and Vortex Shedding behind a Porous Circular Obstacle by Exerting an External Magnetic Field, J. Magn. Magn. Mater., 385, 198-206.
- Burgers, P., 2017. Dimensionally and Physically Proper Lift, Drag, and Thrust-Related Numbers as Figures of Merit: Normalized Lift, Drag, and Thrust,  $\eta_L$ ,  $\eta_D$ , and  $\eta_T$ , Journal of Aerospace Engineering, 10,3, 04016091.
- Cattafesta III, L.N. ve Sheplak, M., 2011. Actuators for Active Flow Control, Annual Review of Fluid Mechanics, 43, 247-272.
- Chen, Z. ve Aubry, N., 2005. Active Control of Cylinder Wake, Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul., 10,2, 205-516.

- Cheng, N.S., 2013. Calculation of Drag Coefficient for Arrays of Emergent Circular Cylinders with Pseudofluid Model, J. Hydraul. Eng., 139,6, 602-611.
- Chou, P., 1945. On Velocity Correlations and the Solutions of the Equations of Turbulent Fluctuation, Quarterly of Applied Mathematics, 3,1, 38-54.
- Çengel, Y.A. ve Cimbala, J.M., 2017. Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications, Fourth Edition, The McGraw-Hill Companies, USA.
- Çuhadaroğlu, B., Akansu, Y.E. ve Turhal, A.O., 2007. An Experimental Study on the Effects of Uniform Injection Through one Perforated Surface of a Square Cylinder on Some Aerodynamic Parameters, Exp. Therm. Fluid Sci., 31,8, 909-915.
- Çuhadaroğlu, B. ve Turan, O., 2009. Numerical Simulation of Turbulent Flow around a Square Cylinder with Uniform Injection or Suction and Heat Transfer, Numer. Heat. Transf. Part A Appl., 55,2, 163-184.
- Çuhadaroğlu, B., 2009. A Numerical Study on Turbulent Flow around a Square Cylinder with Uniform Injection or Suction, Int. J. Numer. Methods Heat Fluid Flow, 0961-5539, 708-727.
- Çuhadarolu, B. ve Turan, O., 2012. Numerical Study on Heat Transfer between Turbulent Flow and Porous Rectangular Cylinders with Uniform Injection or Suction, Heat Transf. Eng., 33,15, 1232-1245.
- D. Liseikin, V., 2017. Grid Generation Methods, Third Edition, Springer, International Publishing.
- Daly, B.J. ve Harlow, F. H., 1970. Transport Equations in Turbulence, Phys. Fluids, 13, 2634-2649.
- Darekar, R.M. ve Sherwin, S.J., 2001. Flow Past a Bluff Body with a Wavy Stagnation Face, Journal of Fluids and Structures, 15,3-4, 587-596.
- Deardorff, J.W., 1970. A Numerical Study of Three-Dimensional Turbulent Channel Flow at Large Reynolds Numbers, J. Fluid Mech., 41, 453.
- Dong, S., Triantafyllou, G.S. ve Karniadakis, G.E., 2008. Elimination of Vortex Streets in Bluff-Body Flows, Phys. Rev. Lett., 100, 204501.
- Durão, D.F.G., Heitor, M.V. ve Pereira, J.C.F., 1988. Measurements of Turbulent and Periodic Flows around a Square Cross-Section Cylinder, Exp. Fluids, 6,5, 298-304.
- Fırat, E., Akansu, Y.E. ve Akilli, H., 2015. Flow past a Square Prism with an Upstream Control Rod at Incidence to Uniform Stream, Ocean Eng., 108, 504-518.
- Fransson, J.H.M., Konieczny, P. ve Alfredsson, P.H., 2004. Flow Around a Porous Cylinder Subject to Continuous Suction or Blowing, J. Fluids Struct., 19,8, 1031-1048.

- Fu, S., Launder, B.E. ve Leschziner, M.A., 1987. Modeling Strongly Swirling Recirculating Jet Flow with Reynolds-Stress Transport Closures, *Sixth Symposium on Turbulent Shear Flows*, Toulouse.
- Fujisawa, N., Asano, Y., Arakawa, C. ve Hashimoto, T., 2005. Computational and Experimental Study on Flow around a Rotationally Oscillating Circular Cylinder in a Uniform Flow, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 93,2, 137-153.
- Gad-el-Hak, M., 2006. MEMS: Introduction and Fundamentals, Second Edition, Taylor & Francis, USA.
- Gad-el-Hak, M., 2000. Flow Control: Passive, Active and Reactive Flow Managemet, Cambridge University Press, USA.
- Gibson, M.M. ve Launder, B.E., 1978. Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer, *J. Fluid Mech.*, 86, 491-511.
- Hannemann, K. ve Oertel, H., 1989. Numerical Simulation of the Absolutely and Convectively Unstable Wake, *J. Fluid Mech.*, 199, 55-88.
- Hangan, H. ve Kim, J., 2003. Aerodynamic Slot-Control for 2D Square Prisms, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 91,12-15, 1847-1857.
- Henkes, R.A.W.M., van der Flugt, F.F. ve Hoogendoorn, C.J., 1991. Natural Convection Flow in a Square Cavity Calculated with Low-Reynolds-Number Turbulence Models. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 34, 1543-1557.
- Hirsch, C., 2007. Numerical Computation of Internal and External Flows, Volume 1: Fundamentals of Computational Fluid Dynamics, Second Edition, Elsevier Science & Technology, United Kingdom.
- Homsy, G.M., Aref, H., Breuer, K.S., Hochgreb, S., Koseff, J.R., Munson, B.R., Powell, K.G., Robertson, C.R. ve Thoroddsen, S.T., 2000. Multi-Media Fluid Mechanics, Cambridge Univ. Press.
- Huang, Y., Zhou, B. ve Tang, Z., 2017. Instability of Cylinder Wake under Open-Loop Active Control, *App. Math. and Mech.*, 38,3, 439-452.
- Hwang, C.B. ve Lin, C.A., 2000. Low-Reynolds Number Modelling of Flows with Transpiration, *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 32,5, 495-514.
- Hwang, J.Y. ve Yang, K.S., 2007. Drag Reduction On a Circular Cylinder Using Dual Detached Splitter Plates, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 95, 551-564.
- 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.

- Khan, W.A., Culham, J.R. ve Yovanovich, M.M., 2005. Fluid Flow around and Heat Transfer from an Infinite Circular Cylinder, J. Heat Transfer, 127,7, 785-790.
- Kondjoyan, A. ve Daudin, J.D., 1995. Effects of Free Stream Turbulence Intensity on Heat and Mass Transfers at the Surface of a Circular Cylinder and an Elliptical Cylinder, Axis Ratio 4, International Journal of Heat and Mass Transfer, 38,10, 1735–1749.
- Kornilov, V.I., Boiko, A.V. ve Kavun, I.N., 2015. Turbulent Boundary Layer on a Finely Perforated Surface under Conditions of Air Injection at the Expense of External Flow Resources, J. Eng. Phys. Thermophys, 88,6, 1500-1512.
- Kudriavtsev, V., Braun, M.J. ve Hendricks, R.C., 2001. Virtual Experiments on Drag Reduction, 48th Annual Conference of Canadian Aeronautics and Space Institute (CASI), 8th Aerodyn. Section. Symp., Toronto.
- Launder, B.E. ve Spalding, D.B., 1972. Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, London-Newyork.
- Launder, B.E., Reece, G.J. ve Rodi, W., 1975. Progress in the Development of a Reynolds Stress Turbulence Closure, J. Fluid Mech., 68, 537-566.
- Launder, B.E., 1989. Second-Moment Closure and Its Use in Modeling Turbulent Industrial Flows, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 9, 963-985.
- Launder, B.E., 1989. Second-Moment Closure: Present... and Future?, Inter. J. Heat Fluid Flow, 10,4, 282-300.
- Lee, B.E., 1975. The Effect of Turbulence on the Surface Pressure Field of a Square Prism, J. Fluid Mech., 69,2, 263-282.
- Lien, F.S. ve Leschziner, M.A., 1994. Assessment of Turbulent Transport Models Including Non-Linear RNG Eddy-Viscosity Formulation and Second-Moment Closure, Computers and Fluids, 23,8, 983-1004.
- Ling, G.P. ve Fang, J.W., 2002. Numerical Study on the Flow around a Circular Cylinder with Surface Suction or Blowing Using Vorticity-Velocity Method, Appl. Math. Mech., 23, 1089-1096.
- Ling, L.M., Ramaswamy, B., Cohen, R.D. ve Jue, T.C., 1993. Numerical Analysis on Strouhal Frequencies in Vortex Shedding over Square Cylinders with Surface Suction and Blowing, Int. J. Numer. Methods Heat Fluid Flow, 3, 357-375.
- 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.
- Malekzadeh, S. ve Sohankar, A., 2012. Reduction of Fluid Forces and Heat Transfer on a Square Cylinder in a laminar Flow Regime Using a Control Plate, Int. J. Heat Fluid Flow, 34, 15-27.

- Malekzadeh, S., Mirzaee, I., Pourmahmoud, N. ve Shirvani, H., 2017. The Passive Control of Three-Dimensional Flow over a Square Cylinder by a Vertical Plate at a Moderate Reynolds Number, Fluid Dyn. Res., 49, 025515.
- Mathelin, L., Bataille, F. ve Lallemand, A., 2002. Flow around a Circular Cylinder with Non-Isothermal Blowing, Exp. Therm. Fluid Sci., 26,2-4, 173-179.
- Meinert, J., Huhn, J., Serbest, E. ve Haidn, O., 2001. Turbulent Boundary Layers with Foreign Gas Transpiration, J. Spacecraft Rockets, 38,2, 191-198.
- Moukalled, F., Mangani, L. ve Darwish, M., 2016. The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics, Springer, Switzerland.
- Norberg, C., 2003. Fluctuating Lift on a Circular Cylinder: Review and New Measurements, Journal of Fluids and Structures, 17, 57-96.
- Orszag, S.A. ve Patterson, G.S., 1972. Numerical Simulation of Turbulence: Statistical Models and Turbulence, Lecture Notes in Physics, Springer-Verlag, Berlin, 12, 127-147.
- Ota, T., Aiba, S., Tsuruta, T. ve Kaga, M., 1983. Forced Convection Heat Transfer from an Elliptic Cylinder, Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers, 26,212, 262-267.
- Patel, M.H., 1989. Dynamics of Offshore Structures, Butterworth & Co., UK.
- Rotta, J., 1951. Statistische Theorie Nichthomogener Turbulenz, Zeitschrift für Physik A, 129,6, 547-572.
- Sarioglu, M., Akansu, Y.E. ve Yavuz, T., 2005. Control of Flow around Square Cylinders at Incidence by Using a Rod, AIAA J., 43,7, 1419-1426.
- Sarkar, S. ve Balakrishnan, L., 1990. Application of a Reynolds-Stress Turbulence Model to the Compressible Shear Layer, ICASE Report 90-18, NASA CR 182002.
- Schetz, J.A. ve Nerney, B., 1977. Turbulent Boundary Layer with Injection and Surface Roughness, AIAA J., 15, 9.
- Schlichting, H., 1979. Boundary Layer Theory Seventh Edition, McGraw-Hill, New York.
- Schlichting, H. (Deceased) ve Gersten, K., 2017. Boundary-Layer Theory, Ninth Edition, Springer, Verlag Berlin Heidelberg.
- Schumm, M., Berger, E. ve Monkewitz, P.A., 1994. Self-Excited Oscillations in the Wake of Two-Dimensional Bluff Bodies and Their Control, J. Fluid Mech., 271, 17-53.

- Sevilla, A. ve Martínez-Bazán, C., 2004. Vortex Shedding in High Reynolds Number Axisymmetric Bluff-Body Wakes: Local Linear Instability and Global Bleed Control, Phys. Fluids, 16,9, 3460.
- Simpson, R.L., 1970. Characteristics of Turbulent Boundary Layers at Low Reynolds Numbers with and without Transpiration, J. Fluid Mech., 42,4, 769-802.
- Shukla, S., Govardhan, R.N. ve Arakeri, J.H., 2009. Flow Over a Cylinder With a Hinged-Splitter Plate, J. Fluids Struct., 25,4, 713-720.
- Sohankar, A., Khodadadi, M. ve Rangraz, E., 2015. Control of Fluid Flow and Heat Transfer around a Square Cylinder by Uniform Suction and Blowing at Low Reynolds Numbers, Comput. Fluids, 109, 155-167.
- Teimourian, A., Hacısevki, H. ve Bahrami, A., 2017. Experimental Study on Suppression of Vortex Street behind Perforated Square Cylinder, J. Theor. Appl. Mech., 55,4, 1397-1408.
- Turhal, A.O. ve Çuhadaroğlu, B., 2010. The Effects of Surface Injection through a Perforated Square Cylinder on Some Aerodynamic Parameters, Exp. Therm. Fluid Sci., 34,6, 725-735.
- Wieselsberger, C., 1921. Neuere Feststellungen über die Gesetze des Flüssigkeits- und Luftwiderstands, Physikalische Zeitschrift, 22, 321-328.
- Wang, J. ve Feng, L., 2019. Flow Control Techniques and Applications, Cambridge University Press, Great Britain.
- White, F.M., 2010. Fluid Mechanics, Seventh Edition, The McGraw-Hill Companies, USA.
- Xu, S.J., Zhang, W.G., Gan, L., Li, M.G., Zhou, Y., 2017. Experimental study of flow around polygonal cylinders. J. Fluid Mech., 812, 251–278.
- 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. Trans. ASME., 116,1, 29-35.
- Yokuda, S., Ramaprian, B.R., 1990. The Dynamics of Flow around a Cylinder at Subcritical Reynolds Number, Physics of Fluids, A: Fluid dynamics, 2,5, 10.1063/1.857732.
- Zhu, H. ve Yao, J., 2015. Numerical Evaluation of Passive Control of VIV by Small Control Rods, Appl. Ocean Res., 51, 93-116.
- Žukauskas, A., 1972. Advances in Heat Transfer, Academic Press, New York, 93-160.
- Žukauskas, A. ve Žiugzda, J., 1985. Heat Transfer of a Cylinder in Crossflow, Hemisphere, New York, Chap. 6.
- Bakker, A., Applied Computational Fluid Dynamics, Lecture 7-Meshing. <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/07-mesh.pdf> 1 Ocak 2002.

Feszty, D. ve Jakubik, T., Computational Fluid Dynamics, Grid Generation, Audi Department of Vehicle Engineering, Széchenyi University. [https://www.feszty.com/uploads/3/6/7/8/3678219/alkalmazottAramlástan\\_week9\\_eng.pdf\\_2012](https://www.feszty.com/uploads/3/6/7/8/3678219/alkalmazottAramlástan_week9_eng.pdf_2012).

URL-1, <http://www.aerospaceweb.org/question/aerodynamics/q0215.shtml> 11 Nisan 2007.

URL-2, <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node77.htm> 1 Ocak 2009.

URL-3, <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node375.htm> 23 Ocak 2009.

URL-4, <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node367.htm#sec-time-theory> 23 Ocak 2009.



## ÖZGEÇMİŞ

Mir Elyad Vakhshouri 1981 yılında İranın Tebriz şehrinde dünyaya geldi. Lise öğrenimini 1998 yılında Tebriz Harezmi lisesinde tamamladı. 1999 yılında Tebriz Sema merkezinde Matematik bilimleri üniversite önhazırlık bölümünü tamamladı. 2000 yılında Tebriz Azad Üniversitesi Makina Mühendisliği Isı ve Akışkanlar bölümünde Lisans eğitimine başladı. 2006 yılında bu bölümden mezun olarak Makine Mühendisi Ünvanı aldı. 2012 yılında KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında başladığı Yüksek Lisans programını Mayıs 2015'te tamamladı ve aynı yıl Doktora eğitimine başladı. Mir Elyad Vakhshouri İngilizce, Farsça, Türkçe, Azerice ve Almanca Bilmektedir.

