

**SİLİNDİR ÜZERİNDEKİ LAMİNER VE TÜRBÜLANSLI AKIŞIN
KONTROLSÜZ VE KONTROLLÜ HAD ANALİZLERİ**

BÜRYAN APAÇOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

2010

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitüsü onayı



Prof. Dr. Ünver KAYNAK

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.



Prof. Dr. Ünver KAYNAK

Anabilim Dalı Başkanı

Büryan APAÇOĞLU tarafından hazırlanan SİLİNDİR ÜZERİNDEKİ LAMİNER VE TÜRBÜLANSLI AKIŞIN KONTROLSÜZ VE KONTROLLÜ HAD ANALİZLERİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.



Yrd. Doç. Dr. Selin ARADAĞ

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

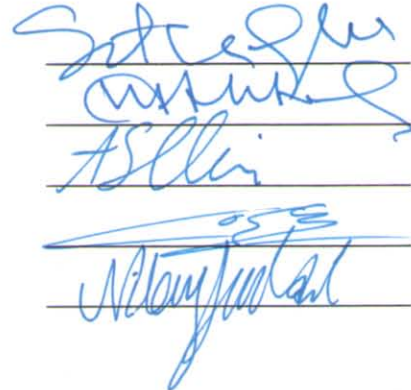
Başkan: Yrd. Doç. Dr. Sıtkı USLU

Üye: Yrd. Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ

Üye: Yrd. Doç. Dr. Selin ARADAĞ

Üye: Yrd. Doç. Dr. Coşku KASNAKOĞLU

Üye: Yrd. Doç. Dr. Nilay SEZER UZOL



TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Bürvan APAÇOĞLU

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Selin ARADAĞ
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – 2010

Büryan APAÇOĞLU

SİLİNDİR ÜZERİNDEKİ LAMİNER VE TÜRBÜLANSLI AKIŞIN KONTROLSÜZ VE KONTROLLÜ HAD ANALİZLERİ

ÖZET

Küt bir cisme etkiyen dış akış, cismin arkasında girdaplar oluşturarak karmaşık ve zamana göre değişen bir davranış sergiler. Silindir üzerindeki akıştaki düzensizlikler hem laminer, hem de türbülanslı akış rejimlerinde karşımıza çıkmaktadır. Bu salınımı sönmüleyebilmek veya akışın silindir üzerindeki etkilerini azaltabilmek için bir kontrol stratejisi geliştirmek mümkündür.

Akış kontrolünün temel amacı, akışın temas ettiği cisimlerde neden olduğu sürüklemenin ve zamana göre değişen kuvvetlerin azaltılmasını sağlamaktır. Bu çalışmada, iki-boyutlu dairesel bir silindir üzerindeki zamana bağlı laminer ve türbülanslı akış ve bu akışların silindir üzerindeki muhtelif deliklerden hava üfleme yöntemi ile kontrol edilmesi incelenmektedir.

Yapılan HAD analizlerinde laminer ve türbülanslı akış koşulları kullanılarak çözümler yapılmıştır. Türbülanslı akış analizlerinde Zamana-bağlı Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (URANS) denklemleri çözülmüş ve türbülans modeli olarak Spalart-Allmaras türbülans modeli kullanılmıştır. HAD analizlerinin sonuçları literatürde yer alan Strouhal sayısı, zaman-ortalama sürüklenme katsayısı ve basınç katsayısı dağılımı ile doğrulanmıştır.

Dört adet delikten akış hızının %50'si büyüklüğünde bir hızla hava üflenmesi, sürüklenme kuvvetinin kontrolsüz duruma göre laminer akışta %8.6, türbülanslı akışta ise %23.3 oranında azalmasını sağlamıştır. Ayrıca, iki-boyutlu akış simülasyonlarının doğruluğunu incelemek için silindir üzerindeki türbülanslı akışın kontrolsüz analizi üç-boyutlu olarak da gerçekleştirilmiş ve sonuçlar iki-boyutlu analiz ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: HAD, Silindir Arkasındaki Akış, Akış Kontrolü, von Kármán Girdap Yolu

University : TOBB University of Economics and Technology
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Mechanical Engineering
Supervisor : Ass. Prof. Selin ARADAG
Degree Award and Date : M.Sc. – 2010

Büryan APAÇOĞLU

**CFD ANALYSES OF UNCONTROLLED AND CONTROLLED LAMINAR
AND TURBULENT FLOWS OVER A CIRCULAR CYLINDER**

ABSTRACT

External flow over a bluff body causes time-dependent and periodic behavior behind of the body when the Reynolds number of the flow is greater than a certain value. For external flow over a circular cylinder, these oscillations are generated in both laminar and turbulent flow regimes. A control strategy can be developed to damp the oscillations or to reduce the effects of the oscillations on the cylinder.

The main idea of flow control is the improvement of aerodynamic characteristics of flow, such as, reducing drag and unsteadiness of loads compelled by the flow field onto structures exposed to the flow. This study analyzes the laminar and turbulent flows over a two-dimensional (2D) circular cylinder and its control by air blowing from several slots located on the cylinder.

CFD analyses were performed for both laminar and turbulent flows. In turbulent flow analyses, Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (URANS) equations are solved and Spalart-Allmaras turbulent model is used. CFD analyses were validated by using the experimental values for Strouhal number, time-averaged drag coefficient and pressure coefficient distribution given in literature.

Air blowing from four slots with a magnitude of 50% of the free-stream velocity yields a reduction in drag force by 8.6% and 23.3% compared to the uncontrolled case for laminar and turbulent flow, respectively.

Also, three-dimensional CFD analysis of uncontrolled turbulent flow over a cylinder was performed and the results were compared to the one obtained by 2D CFD analysis to investigate the accuracy of two-dimensional simulations for this type of flow.

Keywords: CFD, Flow Over a Circular Cylinder, Flow Control, von Kármán Vortex Street

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Yrd. Doç. Dr. Selin ARADAĞ'a, maddi destekleri için TÜBİTAK'a, değerli manevi desteğinden dolayı sevgili anneme, baőta Prof. Dr. Sadık KAKAÇ olmak üzere kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyeleri Yrd. Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ'a, Yrd. Doç. Dr. Sıtkı USLU'ya, Yrd. Doç. Dr. Nilay SEZER UZOL'a, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Coşku KASNAKOĞLU'na, çalıőmalarım sırasında benden yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Akın PAKSOY'a, Fatih AKTÜRK'e, Sefa YILMAZTÜRK'e, Levent SÖZEN'e ve Elif Hande BEKTAŐ'a çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
KISALTMALAR	xv
SEMBOL LİSTESİ	xvi
1. SİLİNDİR ÜZERİNDEKİ AKIŞ	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Araştırması	4
1.3. Amaç	12
2. ÇÖZÜM YÖNTEMİ	14
2.1. Matematiksel Modelleme	14
2.1.1. Navier-Stokes Denklemleri	14
2.1.2. Reynolds-Ortalama Navier-Stokes Denklemleri	16
2.1.2.1. Boussinesq Yaklaşımı	19
2.1.2.2. Spalart-Allmaras Türbülans Modeli	20
2.2. Sayısal Yöntemler	24
2.2.1. Basınç-Tabanlı Navier-Stokes Denklemleri	24
2.2.2. Çözüm Algoritmaları	25
2.2.3. Kontrol Hacim Yaklaşımı ve Denklemlerin Ayırıklaştırılması	26
2.2.3.1. Genel Transport Denklemi ve Ayırıklaştırılması	26
2.2.3.2. İkinci-Dereceden Upwind Yöntemi	28
2.2.3.3. Zamanda Ayırıklaştırma	28
2.2.3.4. Gradyanların ve Türevlerin Hesaplanması	29
2.2.3.5. Momentum Denkleminin Ayırıklaştırılması	30
2.2.3.6. Süreklilik Denkleminin Ayırıklaştırılması	31
2.2.4. Basınç-Hız Bağlaşımı	32
2.2.4.1. SIMPLE Algoritması	32
2.2.4.2. COUPLED (Bağlaşık) Algoritma	33
2.2.5. Sürekli Rejim Algoritması	35

2.2.6. Zamanda İlerleme Algoritması	35
2.3. Sınır Koşulları	36
2.4. Ard-İşleme	37
2.4.1. Hızlı Fourier Dönüşümü	38
2.4.2. Boyut İndirgeme İçin Gerekli Verilerin Oluşturulması	39
2.5. Hesaplama Kaynakları	40
3. SİLİNDİR ÜZERİNDEKİ LAMİNER AKIŞ HAD ANALİZLERİ	41
3.1. Ağ Çalışması ve HAD Analizi Özellikleri	42
3.1.1. Akış Özellikleri	42
3.1.2. Ağ Yapısı	42
3.1.3. Zaman Adımı Çalışması	45
3.1.4. Kontrollü Akış Analizleri için Oluşturulan Geometri ve Ağ Yapısı	46
3.2. Kontrolsüz Laminer Akış Simülasyonları	47
3.3. Kontrollü Laminer Akış Simülasyonları	52
3.3.1. Kontrolün Sürüklenme Katsayısına ve Silindir Üzerinde Oluşan Girdapların Oluşma Periyoduna Etkisi	53
3.3.2. Kontrolün Silindir Üzerindeki Basınç Katsayısı Dağılımına Etkisi	57
3.3.3. Kontrolün Silindir Arkasındaki Hız Profiline Etkisi	58
3.3.4. Kontrolün Silindir Arkasındaki Basınç Dağılımına Etkisi	59
3.3.5. Kontrolün Silindir Arkasındaki Akışın Zamana Bağlı Davranışına Etkisi	60
3.3.6. Üfleme Hızının Silindir Arkasındaki Akış Yapısına Etkisi	62
3.3.7. Kontrolün Laminer Akışa Etkisi Üzerine Yorumlar	63
4. SİLİNDİR ÜZERİNDEKİ TÜRBÜLANSLI AKIŞ HAD ANALİZLERİ	64
4.1. Ağ Yapısı ve HAD Analizi Özellikleri	65
4.1.1. Akış Özellikleri	65
4.1.2. Ağ Yapısı	65
4.1.3. Zaman Adımı Çalışması	68
4.1.4. Türbülans Modeli Seçimi	70
4.2. Kontrolsüz Türbülanslı Akış Simülasyonları	71
4.3. Kontrollü Türbülanslı Akış Simülasyonları	75

4.3.1.	Kontrolün Sürüklenme Katsayısına ve Silindir Üzerinde Oluşan Girdapların Oluşma Periyoduna Etkisi	76
4.3.2.	Kontrolün Silindir Üzerindeki Basınç Katsayısı Dağılımına Etkisi	80
4.3.3.	Kontrolün Silindir Arkasındaki Hız Profiline Etkisi	81
4.3.4.	Kontrolün Silindir Arkasındaki Basınç Dağılımına Etkisi	82
4.3.5.	Kontrolün Silindir Arkasındaki Akışın Zamana Bağlı Davranışına Etkisi	83
4.3.6.	Üfleme Hızının Silindir Arkasındaki Akış Yapısına Etkisi	85
4.3.7.	Kontrolün Türbülanslı Akışa Etkisi Üzerine Yorumlar	86
5.	TÜRBÜLANSLI AKIŞIN ÜÇ-BOYUTLU HAD ANALİZİ	87
5.1.	Ağ Yapısı	87
5.2.	İki-Boyutlu ve Üç-Boyutlu Çözümün Karşılaştırılması	89
5.2.1.	Sürüklenme Katsayısının Zamana Bağlı Değişim	89
5.2.2.	Kaldırma Katsayısının Zamana Bağlı Değişimi	90
5.2.3.	Akışın Zamana Bağlı Davranışı	90
5.2.4.	Silindir Yüzeyindeki Basınç Katsayısı Dağılımı	91
5.2.5.	Silindir Arkasındaki Hız Profili	92
5.3.	Silindir Arkasındaki Akışın Yapısı	93
5.4.	Silindir Üzerindeki Türbülanslı Akışın Üç-Boyutlu Analizi Üzerine Yorumlar	95
6.	TARTIŞMALAR	96
6.1.	İrdelemeler	96
6.2.	Gelecek Çalışmalar	98
	KAYNAKLAR	100
	EK 1	103
	ÖZGEÇMİŞ	104

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge		Sayfa
Çizelge 1.1.	Literatürde karşılaşılan deneysel sürüklenme katsayısı (C_D) ve Strouhal sayısı (St) değerleri	7
Çizelge 1.2.	Literatürde karşılaşılan sayısal sürüklenme katsayısı (C_D) ve Strouhal sayısı (St) değerleri	8
Çizelge 3.1.	Ağ yapısı-1L ve Ağ yapısı-2L ile ilgili bilgiler	43
Çizelge 3.2.	Kontrollü HAD analizleri sonucunda elde edilen sürüklenme katsayıları ve bu değerlerin kontrolsüz duruma göre yüzde değişimleri, $Re=100$	56
Çizelge 4.1.	Ağ yapısı-1T ile ilgili bilgiler	66
Çizelge 4.2.	Ağ yapısı-1T ile yapılan HAD analizleri ile elde edilen sonuçlar, $Re=20,000$	67
Çizelge 4.3.	Farklı zaman adımları ile yapılmış HAD analizleri sonucunda elde edilen C_D değerleri ve bu değerlerin deneysel değerler ile karşılaştırılması, $Re=20,000$	68
Çizelge 4.4.	Farklı zaman adımları ve türbülans modelleri ile yapılmış HAD analizleri sonucunda elde edilen C_D ve St değerleri ile bu değerlerin deneysel değerler ile olan farkları, $Re=20,000$	70
Çizelge 4.5.	Kontrollü HAD analizleri sonucunda elde edilen sürüklenme katsayıları ve bu değerlerin kontrolsüz duruma göre yüzde değişimleri, $Re=20,000$	77
Çizelge 4.6.	Kaldırma katsayısının zamanla değişimine farklı zaman aralıklarında uygulanan HFD sonucu elde edilen St sayıları, $Re=20,000$	79
Çizelge 5.1.	Üç-boyutlu ağ yapısı ile ilgili bilgiler	88

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 1.1.	DaVinci'nin katı cisimlerin üzerindeki akışı gösteren çizimi; <i>Old Man with Water Studies</i>	1
Şekil 1.2.	von Kármán girdap yolu, Rishiri Adası, Japonya	2
Şekil 1.3.	Silindir üzerindeki akışın Re sayısına göre gruplandırılması	5
Şekil 2.1.	Reynolds-ortalama yaklaşımına göre hız ve hızın bileşenlerinin grafiksel gösterimi	17
Şekil 2.2.	Basınç-Tabanlı Çözüm Algoritmaları	25
Şekil 2.3.	Genel transport denkleminin ayrıklaştırmasında kullanılan kontrol hacim	27
Şekil 2.4.	LSCB yöntemini açıklamak için belirlenmiş temsili hücreler	30
Şekil 2.5.	Çözüm Algoritması	36
Şekil 2.6.	Düşük boyutlu modelleme için oluşturulacak verilerin hesaplandığı noktalar	40
Şekil 3.1.	Ağ yapıları, a) Ağ yapısı-1L ve yakın planı, b) Ağ yapısı-2L ve yakın planı	44
Şekil 3.2.	Vortisite büyüklüğü konturları, a) Ağ yapısı-1L ile, b) Ağ yapısı-2L ile	45
Şekil 3.3.	Silindirin üzerinde yer alan deliklerin konumları ve isimleri	47
Şekil 3.4.	Sürüklenme katsayısının zamana göre değişimi, Re=100	47
Şekil 3.5.	Kaldırma katsayısının zamana göre değişimi, Re=100	48
Şekil 3.6.	C_L değişimine uygulanan HFD sonucunda elde edilen Strouhal sayısı grafiği, Re=100	49
Şekil 3.7.	Silindir üzerindeki sayısal ve deneysel basınç katsayısı dağılımı, Re=100	50

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 3.8.	Akışın bir periyodunu gösteren vortisite büyüklüğü konturları, $Re=100$	51
Şekil 3.9.	Silindir yüzeyindeki ortalama kayma gerilmesi, $Re=100$	52
Şekil 3.10.	Kontrollü ve kontrolsüz durumlarda sürüklenme katsayısının zamana göre değişimi, $Re=100$	54
Şekil 3.11.	Üfleme hızının $0.5 U$ olduğu durumda, farklı zaman aralıklarında HFD sonuçları, $Re=100$	55
Şekil 3.12.	Farklı kontrol durumları için silindir üzerindeki basınç katsayısı dağılımları, $Re=100$	57
Şekil 3.13.	Değişik kontrol durumlarında, silindirin arkasındaki farklı konumlarda, y-yönündeki ortalama hız dağılımları, a) $x=23$ m, b) $x=26$ m, c) $x=29$ m	58
Şekil 3.14.	Değişik kontrol durumlarında, silindirin arkasındaki farklı konumlarda, y-yönündeki ortalama statik basınç dağılımları, $Re=100$, a) $x=23$ m, b) $x=26$ m, c) $x=29$ m	59
Şekil 3.15.	Farklı x-konumlarındaki x-hızının zamana bağlı değişimine uygulanan HFD sonuçları, a) $x=21$ m, b) $x=22$ m, c) $x=23$ m, d) $x=24$ m, e) $x=25$ m, f) $x=26$ m	61
Şekil 3.16.	Kontrolsüz ve tüm deliklerin açık olduğu durumlardaki yakın plan vortisite büyüklüğü konturları, $Re=100$	62
Şekil 4.1.	Ağ yapısı-1T ve yakın planı	66
Şekil 4.2.	Silindir yüzeyindeki $y+$ dağılımı, $Re=20,000$	67
Şekil 4.3.	HAD analizleri sonucunda elde edilen C_p dağılımları ve literatürdeki deneysel C_p dağılımları ile karşılaştırılması, $Re=20,000$	69
Şekil 4.4.	Sürüklenme katsayısının zamana göre değişimi, $Re=20,000$	71
Şekil 4.5.	Kaldırma katsayısının zamana göre değişimi, $Re=20,000$	72

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 4.6.	C_L değişimine uygulanan HFD sonucunda elde edilen Strouhal sayısı grafiği, $Re=20,000$	72
Şekil 4.7.	Silindir üzerindeki basınç katsayısı dağılımları ve deneysel dağılımlar ile karşılaştırılması, $Re=20,000$	73
Şekil 4.8.	Silindirin merkezinden 3D uzaklıktaki ($x=23$ m) boyutsuz ortalama hız büyüklüğü dağılımı ve deneysel ve sayısal çalışmalar ile karşılaştırılması, $Re=20,000$	74
Şekil 4.9.	Akışın bir periyodunu gösteren vortisite konturları, $Re=20,000$	75
Şekil 4.10.	Kontrollü ve kontrolsüz durumlarda sürüklenme katsayısının zamana göre değişimi, $Re=20,000$	78
Şekil 4.11.	Farklı kontrol durumları için silindir üzerindeki basınç katsayısı dağılımları, $Re=20,000$	80
Şekil 4.12.	Değişik kontrol durumlarında, silindirin arkasındaki farklı konumlarda, y-yönündeki ortalama hız dağılımları, $Re=20,000$, a) $x=23$ m, b) $x=26$ m, c) $x=29$ m	81
Şekil 4.13.	Değişik kontrol durumlarında, silindirin arkasındaki farklı konumlarda, y-yönündeki ortalama statik basınç dağılımları, $Re=20,000$, a) $x=23$ m, b) $x=26$ m, c) $x=29$ m	82
Şekil 4.14.	Farklı x-konumlarındaki x-hızının zamana bağlı değişimine uygulanan HFD sonuçları, a) $x=21$ m, b) $x=22$ m, c) $x=23$ m, d) $x=24$ m, e) $x=25$ m, f) $x=26$ m	84
Şekil 4.15.	Kontrolsüz ve kontrol etkisinin en fazla olduğu durumlardaki yakın plan vortisite konturları, $t=10s$, $Re=20,000$	85
Şekil 5.1.	Üç-boyutlu ağ yapısının oluşturulması	87
Şekil 5.2.	Üç-boyutlu çözüm ile elde edilmiş silindir yüzeyindeki y+ dağılımı, $Re=20,000$	88
Şekil 5.3.	Sürüklenme katsayısının zamana göre değişimi, $Re=20,000$	89

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 5.4.	Kaldırma katsayısının zamana göre değişimi, $Re=20,000$	90
Şekil 5.5.	C_L değişimine uygulanan HFD sonucunda elde edilen Strouhal sayısı grafiği, $Re=20,000$	91
Şekil 5.6.	Silindir üzerindeki basınç katsayısı dağılımı, $Re=20,000$	92
Şekil 5.7.	Silindir üzerindeki boyutsuz ortalama hız büyüklüğü dağılımı, $Re=20,000$	93
Şekil 5.8.	Üç-boyutlu analiz ile elde edilen akışın 2. saniyesindeki vortisite konturları, $Re=20,000$, a) $z/D=0$, b) $z/D=1.5$, c) $z/D=3$	94

KISALTMALAR

Kısaltmalar Açıklama

AFD	Ayrık Fourier Dönüşümü
CFD	Computational Fluid Dynamics
DBM	Düşük Boyutlu Modelleme
DAY	Dikgen Ayrıştırma Yöntemi
DNS	Doğrudan Sayısal Simülasyon (Direct Numerical Simulation)
LES	Büyük Girdap Simülasyonu (Large Eddy Simulation)
HAD	Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
HFD	Hızlı Fourier Dönüşümü
RANS	Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)
RSM	Reynolds Gerilmeleri Modellemesi (Reynolds Stress Modeling)
S-A	Spalart-Allmaras
SST	Shear Stress Transport (Kesme Gerilmesi Taşınımı)
URANS	Zamana-bağlı Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes)
YSA	Yapay Sinir Ağları

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Alan
C_D	Sürükleme katsayısı
C_L	Kaldırma katsayısı
C_P	Basınç katsayısı
F	Kuvvet
I	Birim matris
k	Türbülans kinetik enerjisi
Re	Reynolds sayısı
\vec{r}	Yer değiştirme vektörü
S	Kaynak terimi
St	Strouhal sayısı
t	Zaman
t^*	Boyutsuz zaman
U	Akış hızı
u	Üfleme hızı
u	Hız bileşeni
u'	Hızdan sapma değeri
u_T	Duvara yakın bölgedeki kesme hızı
\vec{v}	Hız vektörü
Γ	Difüzyon katsayısı
Δt	Zaman adımı büyüklüğü
κ	Von Karman sabiti
μ	Dinamik viskozite
μ_t	Türbülans dinamik viskozitesi
$\tilde{\nu}$	Türbülans kinematik viskozitesi
ρ	Yoğunluk
$\bar{\tau}$	Gerilim tensörü
ϕ	Herhangi bir akış özelliği
ω	Türbülans yitimi hızı

1. SİLİNDİR ÜZERİNDEKİ AKIŞ

1.1. Giriş

Küt bir cisme etkiyen dış akış, cismin arkasında karmaşık ve zamana göre değişen bir davranış sergiler. Akışkan, temas ettiği cisme momentum aktarırken ayrıca cismin üzerinde, cismin şekline ve akış özelliklerine göre basınç farklılıkları yaratır. Bu durum kendisini cisim üzerinde titreşim, sürüklenme ve kaldırma gibi etkilerle gösterir.

Küt cisimlerin etrafındaki akış, şekli ve zamana göre değişen düzensiz yapısı ile yıllardır bilim insanlarının ilgi odağı olmuştur. Ünlü bilim adamı ve ressam Leonardo Da Vinci'nin de dikkatini çeken bu durum, Da Vinci'nin çizimlerinde görülmektedir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. DaVinci'nin katı cisimlerin üzerindeki akışı gösteren çizimi; *Old Man with Water Studies* [1]

Yapılan gözlemler ve deneyler sonucunda, belirli bir Reynolds sayısından (kritik Reynolds sayısından) sonra küt cisimlerin arkasında girdapların oluştuğu görülmektedir [2]. Bu girdaplar cismin arkasında periyodik olarak ilerleyerek bir yol

oluştururlar [3]. Bu salınımlar, dış etkiler kaynaklı olmayıp, tamamen kendiliğinden oluşan salınımlardır [3]. Literatürde *von Kármán* girdap yolu olarak adlandırılan bu yapı Şekil 1.2’de görülmektedir.



Şekil 1.2. von Kármán girdap yolu, Rishiri Adası, Japonya [4]

Akışın cismin üzerinde ve arkasında bıraktığı etkisinin ve düzensizliklerin kontrol edilmesini gerektiren mühendislik uygulamaları vardır. Örneğin, hava akışının uçak kanatları üzerindeki dağılımı flaplar, fletnerler ve karıştırıcılar gibi elemanlarla kontrol edilerek, uçağa etkiyen kaldırma, sürüklenme gibi kuvvetlerin büyüklüğü değiştirilir. Böylece uçağın kalkışı, güvenli uçuşu ve yere indirilmesi sağlanır.

Silindir etrafındaki akış ise günümüzde inşaat, havacılık, makine ve kimya gibi alanlarda karşımıza çıkmaktadır. Kimyasal karıştırıcılar, gürültü ve titreşim kontrolü, hava olaylarının kontrolü gibi mühendislik uygulamalarında silindir üzerindeki akışa benzer durumlar gözlemlenir.

Silindir üzerindeki akıştaki düzensizlikler hem laminar akış hem de türbülanslı akış rejimlerinde karşımıza çıkmaktadır. Bu salınımı sönümleyebilmek veya akışın silindir üzerindeki etkilerini azaltabilmek için bir kontrol stratejisi geliştirmek mümkündür.

Kapalı devre kontrolde eyleyici tarafından yapılan etki istenilen etkinin değeriyle karşılaştırılır ve eyleyicinin etkisi aradaki farka göre düzenlenir. Kapalı devre sistemde bir geri-dönüş mekanizması mevcuttur. Açık devre kontrolde ise amaç etkiyi düzeltmektir, herhangi bir geri-dönüş mekanizması yoktur ve etkinin büyüklüğü ne kadarsa sonuç da o kadar büyük olur. Kontrol yöntemleri ise literatürde aktif ve pasif kontrol yöntemleri olmak üzere iki ana başlık altında toplanır [5]. Pasif kontrol yöntemleri akış kontrolü için bir enerji kaynağına gereksinim duymazken, aktif kontrol yöntemleri enerjiye gereksinim duymaktadır [5]. Diğer yandan bu gereksinim, aktif kontrolde eyleyici ile yapılan etkinin istenilen zamanda ortadan kaldırılmasına veya değiştirilmesine olanak tanır. Diğer bir deyişle, aktif kontrol yöntemleri daha esnek bir kontrol stratejisi geliştirilmesine imkân sağlamaktadır.

Silindir üzerindeki akışın kontrolü için şimdiye kadar denenmiş aktif kontrol yöntemleri akustik uyarma, silindiri döndürme, silindiri yandan (lateral) titretilme, ayrışma noktalarında emme-üfleme, akışın içine titretilen tel yerleştirme, akışın içine kanatçık yerleştirme gibi tekniklerdir [3].

Bu çalışmada, silindir üzerindeki laminar ve türbülanslı akış Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (HAD) yardımıyla modellenecek ve akışın açık devre kontrolü silindir üzerindeki muhtelif deliklerden hava üfleme yöntemi ile sağlanacaktır. Silindir üzerindeki akışın yapısı, akışın silindire etkileri ve bu etkilerin zamana göre değişimi kontrolsüz ve kontrollü durumlarda incelenerek, akış kontrolünün yarattığı farklar irdelenecektir.

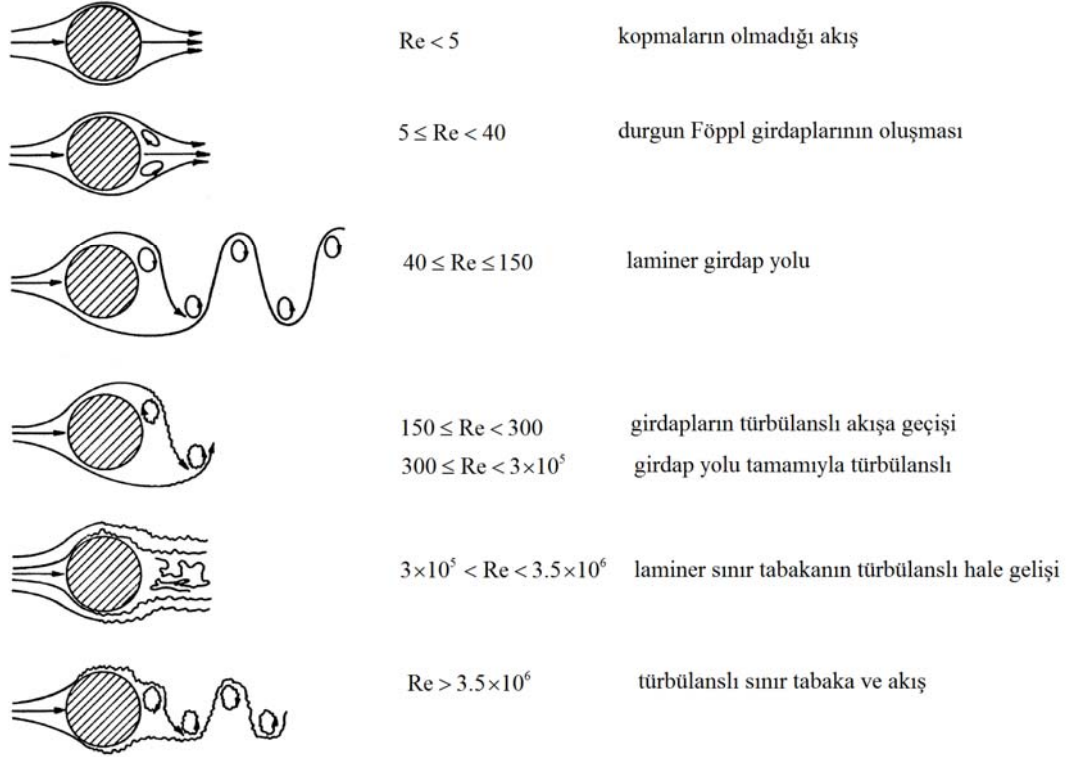
1.2. Literatür Araştırması

Akışkanın atalet kuvvetinin viskoz kuvvetine oranı Reynolds sayısı (Re) ile boyutsuz bir biçimde ifade edilir. Reynolds sayısı akışkanın atalet kuvvetinin viskoz kuvvete oranıdır. Re sayısı akışkanın yoğunluğuna (ρ), hızına (U), viskozitesine (μ) ve akışkanın temas ettiği cismin karakteristik uzunluğa bağlıdır. Silindir üzerindeki çapraz akış için cismin karakteristik uzunluğu silindirin çapıdır (D). Silindir üzerindeki akışın Reynolds sayısı aşağıdaki gibi hesaplanır [6]:

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} = \frac{\text{atalet kuvvetleri}}{\text{viskoz kuvvetler}}$$

Silindir etrafındaki akışta, akışın Reynolds sayısı 48'i geçtikten sonra silindirin arkasında von Kármán girdap yolu oluşmaya başlar [2, 7]. Bu girdaplar silindir üzerinde oluşan sınır tabakadan koparak oluşur. Silindirin yüzeyinden kopan girdaplar ve akışın silindir arkasındaki davranışı, silindir üzerindeki sınır tabaka ile yakından ilgilidir. Silindir üzerinde oluşan sınır tabaka, akışın Reynolds sayısına göre laminer veya türbülanslı olabilir. Sınır tabakanın Reynolds sayısına göre değişmesi nedeniyle, silindir üzerinden koparak oluşan girdapların yapısı da akışın Reynolds sayısına göre değişiklik gösterir. Bu nedenle, silindir üzerindeki akış literatürde Reynolds sayısına göre farklı rejimlere ayrılır. Lienhard, 1966 yılına kadar olan silindir üzerindeki akış çalışmalarını özetlediği yazısında bu rejimlerin Şekil 1.3'teki gibi gruplandığını belirtmektedir [8].

Şekil 1.3'te girdap yolunun oluşmaya başladığı Reynolds sayısı 40 olarak belirtilmiştir. Günümüzdeki deneysel ve sayısal çalışmaların sonucunda ise bu değer 48 olarak elde edilmektedir.



Şekil 1.3. Silindir üzerindeki akışın Re sayısına göre gruplandırılması [8]

Silindir üzerinden kopan ve silindirin arkasında ilerleyen girdaplar, akışın Reynolds sayısının küçük olmasına rağmen, silindir üzerinde ve silindirin arkasında kalan alanda zamana göre değişen kuvvetler yaratır. Hem laminar hem de türbülanslı akış rejiminde karşılaşılan bu kuvvetlerin zamana bağlı ve karmaşık yapısı, birçok bilim insanını konu üzerinde çalışmaya yöneltmiştir. Bu nedenle, silindir etrafındaki akış ile ilgili literatürde deneysel ve sayısal pek çok çalışma ile karşılaşılmaktadır.

Günümüzdeki çalışmalarda Reynolds sayısının 1000 ile 20,000 arasında olduğu durumda sınır tabakanın tamamıyla laminar olduğu söylenmekte ve bu aralıktaki akış rejimi ise *kritik altı* olarak tanımlanmaktadır [9]. Silindir üzerindeki sınır tabaka $Re=20,000$ 'e kadar laminardır ve laminardan türbülanslı akışa geçiş silindirin arkasındaki her hangi bir yerde gerçekleşmektedir [9]. $Re=20,000$ 'den sonra girdap

yolunun tamamıyla türbülanslı olmasına rağmen, girdapların silindir üzerinden laminer olarak ayrılması $Re=100,000$ 'e kadar devam etmektedir [10].

Silindir üzerinde oluşması beklenen sınır tabakanın kalınlığı (δ) literatürde yer alan bazı çalışmalardan yararlanılarak hesaplanabilir. Aşağıda; silindirin yüzeyinde, durgunluk noktasından saat yönüne doğru ölçülen 90 derecedeki noktada, laminer sınır tabaka kalınlığını akışın Reynolds sayısı ile ilişkilendiren bağıntı görülmektedir [11]:

$$\delta = \frac{D}{\sqrt{Re/2}} \quad (1.1)$$

Yukarıdaki bağıntı ile 1 metre çapına sahip silindir üzerindeki akışta, $Re=100$ için sınır tabaka kalınlığı yaklaşık 141 mm olarak hesaplanmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi, silindir üzerindeki akışın Reynolds sayısı 20,000 iken sınır tabakanın laminerdir ve yukarıdaki bağıntı ile sınır tabaka kalınlığı $Re=20,000$ için 10 mm olarak bulunmaktadır.

Silindire akış tarafından etkileyen sürüklenme kuvvetinin büyüklüğü (F_D), akışın temas ettiği cismin ön cephe alanı (A) ve akış özellikleri de göz önünde bulundurularak sürüklenme katsayısı (C_D) ile boyutsuz bir şekilde ifade edilir. Sürüklenme katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanır [6]:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (1.2)$$

Silindir üzerinden kopan ve silindirin arkasında periyodik bir şekilde ilerleyen girdapların kopma periyodu ise yine bir boyutsuz sayı olan Strouhal sayısı (St) ile ifade edilir [10]. Strouhal sayısı, akışın belirli bir noktasındaki hızın zamana bağlı

değişiminden dolayı oluşan kuvvetin, hızın akış alanındaki bir noktadan başka bir noktaya göre değişiminden dolayı oluşan kuvvete oranıdır [6]:

$$St = \frac{fD}{U} = \frac{\text{hızdaki yerel değişimden dolayı oluşan kuvvet}}{\text{taşınım nedeniyle oluşan kuvvet}} \quad (1.3)$$

Literatürde kritik altı Reynolds sayısına sahip laminer ve türbülanslı akışların deneysel ve sayısal olarak analiz edildiği birçok çalışma mevcuttur [12-18]. Bu çalışmaların sonucunda elde edilen C_D ve St değerleri aşağıdaki çizelgelerde verilmektedir. Çizelge 1.1 deneysel, Çizelge 1.2 ise sayısal çalışmaların sonuçlarını göstermektedir.

Akışın St sayısı, akışın Reynolds sayısı ile değişmektedir. Başka bir çalışmada Strouhal sayısının Reynolds'a bağlı fonksiyonu, $St(Re)$, seri açılımı kullanılarak, Denklem 1.4'teki gibi elde edilmiştir [21]:

$$St = 0.2665 - 1.018/\sqrt{Re} \quad (1.4)$$

Denklem 1.3 yardımıyla $Re=100$ için St sayısı 0.165, $Re=150$ için 0.183 olarak bulunur.

Çizelge 1.1. Literatürde karşılaşılan deneysel sürüklenme katsayısı (C_D) ve Strouhal sayısı (St) değerleri

Re	Nicelik	Çalışma	Değer
100	C_D	Oertel ¹² , Panton ¹³	1.26–1.40
	St	Williamson ¹⁴	0.167–0.168
150	C_D	Anderson ¹⁵	1.5
	St	Nichols ¹⁶	0.179–0.182
20,000	C_D	Anderson ¹⁵ , Lim and Lee ¹⁷	1.2, 1.16
	St	Aradag vd. ¹⁸ , Schlichting ¹¹	0.2, 0.21

Çizelge 1.2. Literatürde karşılaşılan sayısal sürüklenme katsayısı (C_D) ve Strouhal sayısı (St) değerleri

Re	Nicelik	Çalışma	Değer
100	C_D	Min & Choi ¹⁹	1.34–1.35
	St	Rahman ⁷	0.164
150	C_D	NASA ²⁰	1.679–1.804
	St	NASA ²⁰	0.150–0.183
20,000	C_D	Aradag vd. ¹⁸	1.2
	St	Aradag vd. ¹⁸	0.2

Silindir üzerindeki basınç dağılımı ise boyutsuz olarak basınç katsayısı (C_p) ile ifade edilir. Basınç katsayısının hesaplanması aşağıda verilmektedir [6]:

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (1.5)$$

Denklem 1.5'teki P yerel statik basıncı, P_∞ ise akışkanın girişteki basıncını göstermektedir.

Literatürde yer alan deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda elde edilmiş basınç katsayısı dağılımları karşılaştırma amaçlı kullanılacağından, HAD analizleri sonuçları ile birlikte verilmektedir.

Üç-boyutlu ve iki-boyutlu silindir arkasındaki laminar akış, Rajani vd. tarafından sayısal olarak modellenmiştir [22]. Bu çalışmada belirli bir Reynolds sayısından, $Re=48$ 'den sonra girdapların oluşmaya başladığı gösterilmiştir. Çalışmanın sonucunda, üç-boyutlu ve iki-boyutlu modelleme ile elde edilen St ve C_D değerleri arasında fark görülmemiştir.

Üç-boyutlu silindir arkasındaki zamanla değişen türbülanslı girdap yapısı, Aradag tarafından, Cobalt programı kullanılarak sayısal olarak modellenmiştir [23]. Bu

çalışmada, LES (Large Eddy Simulation) yöntemi ile çözüm yapılmıştır. Alt, üst, ön ve arka düzlemlerde periyodik sınır şartı kullanılmıştır. Kullanılan ağıın yapısı silindir üzerinde prizmatik, sınır tabaka dışında ise dört yüzlü elemanlar ile oluşturulmuştur. Modellemenin sonucunda von Kármán girdaplarının oluştuğu görülmüştür. Sonrasında Dikgen Ayırıştırma Yöntemi (DAY) kullanılarak dört mekansal kipin, toplam enerjinin %98'ini oluşturduğu saptanmıştır. Akışı modellemek için dört kipin yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

Ong vd., pürüzsüz dairesel bir silindirin etrafındaki akışı, yüksek Re sayılarında ($Re > 1 \times 10^6$) sayısal olarak modellemişlerdir [24]. Bu çalışma iki-boyutlu pürüzsüz silindir üzerindeki akış, Zamana-bağlı Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (URANS) denklemleri ve türbülans için k-epsilon modeli kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada, sürükleme katsayısının düğüm sayısı ile değişimi verilerek, oluşturulan ağdaki düğüm sayısının çözüm için önemli olduğu gösterilmiştir. Çözüm için yeterli olacak belirli bir minimum düğüm sayısının mevcut olduğu belirtilerek analiz edilen sistem için 5×10^4 düğüm sayısının yeterli olduğuna karar verilmiştir. Çalışmanın sonunda ise türbülans modelleme için kullanılan k-epsilon modelinin yüksek Reynolds sayılarında daha az doğrulukla sonuç vermesine rağmen, mühendislik uygulamaları için sonuçların yeterli doğrulukta olduğu söylenmektedir.

Chakraborty vd., düz bir kanal içerisindeki silindir üzerindeki akışı FLUENT (v6) programını kullanarak modellemişlerdir [25]. Girişte düzgün hız dağılımı kullanmışlardır. Re sayısını 0.1-200 arasında, kanal genişliğinin silindirin çapına oranını (λ) 1.54 ile 20 arasında almışlardır. Sabit λ 'da Reynolds sayısı arttıkça sürükleme katsayısının düştüğünü gözlemlemişlerdir.

NASA'da Wind-US programı kullanılarak silindir üzerindeki laminer akışın modellenmiş ve sonuçlar NASA'nın internet sitesindeki ilgili sayfada verilmiştir [20]. Bu modelleme iki-boyutlu olup modellemede Mach sayısı 0.2, $Re=150$, sıcaklık 278 K, basınç 3 Pa ve atak açısı 0 derece seçilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda Mach sayısı konturlarına bakılarak von Kármán girdap yolunun oluştuğu görülmüştür.

Silindirin arkasındaki belirli bir yerde, hızın akış zamanına bağlı değişiminin grafiği çizilmiş ve Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) kullanılarak Strouhal sayısı 0.1667 olarak hesaplanmıştır.

Silindir arkasındaki akışın tepkisi, zorlanmış salınımlı, lineer olmayan bir osilatörün karakteristiğine sahiptir [3]. Düşük boyutlu modelleme ile modellenmiş bir akıştaki girdaplar kontrol edilmek istendiğinde, girdapların tepkisi lineer olmayan bir davranış sergilemektedir [3]. Bu nedenle, akış kontrolü için lineer olmayan bir kontrol stratejisinin belirlenmesi en uygunudur [3].

Freeman, türbülansın aktif kontrolünde eyleyici olarak plazma kullanmıştır [26]. Bu çalışmanın amacı, plazma eyleyicilerinin türbülanslı yapıların kontrolündeki etkinliklerini saptamaktır. Çalışmadaki deneyler sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akışların modellenmesi için yapılmıştır. Türbülanslı sınır tabakası oluşturulup, akış değişik frekanslarda periyodik olarak plazma ile rahatsız edilmiştir. Türbülansın etkileriyle, lazer yayılımında sapmalar görülmüştür. Bu sapmanın değeri 5 kHz frekans değeri için %27.5, 1 kHz için %16.9 olarak belirlenmiştir. Böylece akışa periyodik olarak dışarıdan kuvvet uygulandığında akışın karıştığı ve yapısının değiştiği sonucuna varılmıştır.

Williamson çalışmasında plazma eyleyici ile akış kontrolünü deneysel olarak analiz etmiştir [27]. Bu çalışmadaki amaç kompresörün verimini rotor üzerindeki sınır tabakadaki momentumu değiştirerek daha yüksek verim elde etmektir. Çalışmanın sonucunda plazma ile kontrolün, gerekli kompresör gücünü %4.1 kadar azalttığı gösterilmiştir.

Akış kontrolü için emme-üfleme yöntemi Sarimurat tarafından incelenmiştir [28]. İntegral metodu kullanılarak yapılan teorik çalışmada, momentum sınır tabaka kalınlığını en fazla azaltan üfleme açısının yaklaşık 40 derece olduğu saptanmıştır. NACA-65-410 kanat profili, geliştirilen teorik modelle ve hesaplamalı akışkanlar

dinamiği ile modellenmiştir. Teorik model ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği sonuçlarının iyi derecede örtüştüğü görülmüştür.

Mathelin vd., gözenekli bir silindirin tüm yüzeyi boyunca akışkan üfleme yönteminin silindir üzerindeki akışa etkisini deneysel olarak incelemiştir [29]. Üflenilen maddenin yoğunluğu ve hızı değiştirilerek silindir arkası alandaki değişimler analiz edilmiştir. Reynolds sayısının 3,900 ile 31,000 arasında değiştiği bu çalışmanın sonucunda, üflemenin artırılmasıyla akışın St sayısının azaldığı gözlenmiştir.

Kim vd. laminer akış rejiminde, üç-boyutlu silindir boyunca sinüsel eğri şeklinde (lateral) emme-üfleme yöntemini denemişlerdir [30]. Hesaplamalı olarak yapılmış bu çalışmada silindirin alt yüzeyinden ve üst yüzeyinden aynı fazlarda ve farklı fazlarda emme-üfleme durumları denenmiştir. Yapılan analizlerin sonucunda, sürüklenme katsayısındaki en fazla azalma, alt ve üst yüzeylerden aynı fazda emme-üfleme ile elde edilmiştir.

Cisim üzerinden üfleme yöntemi sınır tabakaya etkiyerek kopma noktasını geciktirebilir [5]. Üfleme ile sınır tabakaya kopmayı engelleyebilecek büyüklükte bir kinetik enerji transfer edildiğinde kopmaların engellenmesi mümkündür [11]. Bu nedenle, akışa maruz kalan cisim üzerinden üfleme yöntemi yukarıda bahsedilen çalışmalarda da olduğu gibi akış kontrolü amaçlı kullanılmaktadır [5]. Bu çalışmada, silindir üzerindeki farklı yerlerden ve farklı akış hızlarında üfleminin akış üzerine etkileri sayısal olarak incelenmektedir.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) çözümlerinde kullanılacak birçok çözüm yöntemi mevcuttur. Doğrudan Sayısal Simülasyon (DNS) yöntemi ile herhangi bir türbülans modeline ihtiyaç duyulmadan çözüm yapılır. Fakat DNS ile en küçük türbülanslı yapıları çözmek gerekir ve bu nedenle sıkı bir ağ yapısına ihtiyaç duyulur. Günümüzdeki bilgisayar teknolojisinin sunduğu olanaklarla DNS ile çözüm yapmak oldukça fazla süre gerektirmektedir. Gevşek ağların çözümleyemediği türbülanslı yapılar, türbülans modelleri yardımıyla çözülen

denklemlerin içerisine eklenir. Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemleri türbülans modelleri kullanılarak çözülür ve mühendislik uygulamaları için tatmin edici sonuçlar elde edilir [24]. Zamana bağlı davranışın da çözüldüğü RANS denklemleri Zamana-bağı Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (URANS) denklemleri olarak adlandırılır.

Ayrıca iki-boyutlu yapıların baskın olduğu akışlarda iki-boyutlu HAD analizlerinin yapılması hesaplama zamanını oldukça azaltan başka bir yaklaşımdır. Von Kármán girdaplarının da etkin olarak iki-boyutlu bir yapıya sahip olduğu göz önünde bulundurulduğunda, silindir üzerindeki akış analizinin iki-boyutlu olarak ele alınması uygundur [31]. Başka bir çalışmada, akışın üçüncü boyuttaki etkilerinin silindirin uzunluğunun çapına oranı 3.8'den küçük olduğu durumda gözlemlendiği söylenmektedir [17]. Buna göre, silindirin uzunluğunun çapına oranı 3.8'den küçük olduğu durumda iki-boyutlu analiz yapılabilir.

1.3. Amaç

Bu çalışmanın amacı; silindir üzerindeki laminar ve türbülanslı akışı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yardımıyla modelleyerek silindir üzerindeki akış analizlerini kontrolsüz ve açık devre kontrollü olarak gerçekleştirmektir. Akış kontrolü, silindir üzerinde yer alan farklı deliklerden hava üfleme ile sağlanmaktadır.

Bu çalışmada yapılan analizler TÜBİTAK destekli “Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Düşük Boyutlu Modelleme ve Yapay Sinir Ağları Yardımıyla Akış Kontrolü” isimli proje kapsamında gerçekleştirilmektedir. Projenin amacı, HAD simülasyonları ile modellenen akışın boyutunun indirgenmesi ve elde edilen veriler kullanılarak Yapay Sinir Ağları yardımıyla gerçek zamanlı akış kontrolünde kullanılacak modellerin oluşturulmasıdır. Böylelikle gerçek zamanlı akış kontrolünde bu modellerin kullanılması ile uzun bir işlem süreci olan HAD simülasyonları basamağı bertaraf edilmiş olacaktır.

Bu tez kapsamında, TÜBİTAK projesinin temelini oluşturan kontrolsüz ve kontrollü HAD simülasyonları gerçekleştirilmektedir. TÜBİTAK projesi ve tez kapsamında şimdiye kadar yapılan yayın çalışmaları [40-44] kaynaklar bölümünde verilmektedir.

2. ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Silindir üzerindeki viskoz akış, akışkanlar dinamiğinin temel denklemleri olan momentum ve süreklilik denklemlerinin çözülmesi ile analiz edilebilir. Bu çalışma kapsamında, silindir üzerindeki akış sayısal bir çözüm ile analiz edilmektedir. Akışkanların hareketini temsil eden denklemler ve bu denklemlerin sayısal olarak çözümü aşağıdaki kısımlarda anlatılmaktadır. Matematiksel modelleme kısmında akışkanlar dinamiğinin temel denklemleri verilmekte, sayısal yöntemler kısmında ise bu denklemlerin ayrıklaştırılması ve kullanılan sayısal yöntemler açıklanmaktadır.

2.1. Matematiksel Modelleme

Bu bölümde, matematiksel modelleme ile ilgili açıklamalar iki temel başlık altında incelenmektedir. İlk kısımda akışkanın hareketi ile ilgili denklemler, ikinci kısımda ise türbülanslı akış analizi için bu denklem üzerinde yapılan değişiklikler anlatılmaktadır.

2.1.1. Navier-Stokes Denklemleri

Newton'un yasasına uyan viskoz bir akışkanın hareketi Navier-Stokes denklemleri ile diferansiyel olarak tanımlanır [6]. Navier-Stokes denklemleri, akışkanın kontrol hacimdeki momentumunun korunumunun diferansiyel olarak ifade edilmiş halidir. Kartezyen koordinatlarda Navier-Stokes denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilir [6]:

$$\text{x-yönünde: } \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g_x + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.1a)$$

$$\text{y-yönünde: } \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + g_y + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.1b)$$

$$\text{z-yönünde: } \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + g_z + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.1c)$$

Burada u , v , w sırasıyla x , y ve z yönündeki hızları, ρ yoğunluğu, P basıncı, g kontrol hacimdeki akışkana etkiyen dış kuvveti göstermektedir.

Diferansiyel süreklilik denklemi kontrol hacimdeki kütle korunumu prensibinden yola çıkılarak diferansiyel olarak Kartezyen koordinatlarda aşağıdaki gibi elde edilir [6]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

Sıkıştırılmaz akışlarda yoğunluğun sabit kabul edilmesi ile denklemlerdeki bilinmeyen terimler x , y ve z yönündeki hız bileşenleri ve basınç değeridir. Süreklilik denklemi ve üç adet momentum denklemi ile akışın hareketi toplamda dört denklem ile tanımlanmaktadır. Bu dört denklemin çözülmesi ile yukarıda bahsedilen dört adet bilinmeyen değer elde edilebilir. Diğer yandan, Navier-Stokes denklemleri şu ana kadar herhangi bir sadeleştirme yapmaksızın analitik olarak çözülememiştir. Bu nedenle Navier-Stokes ve süreklilik denklemleri ayrıştırılıp sayısal olarak çözülür. Akış problemi sınır ve ilk değer koşulları ile sayısal çözümün içerisinde tanımlanır ve ayrıştırmanın yapıldığı her nokta için sonuç elde edilir. Bölüm 1.2’de anlatıldığı gibi, laminar akış analizlerinde türbülanslı yapıların modellenmesine gerek olmadığından, doğru bir çözüm için çok fazla hücre içeren bir ağ yapısına gerek yoktur. Diğer yandan, türbülanslı akışlarda en küçük türbülanslı yapıların Denklem 2.1 ve 2.2 ile doğrudan çözümlenebilmesi için çok fazla hücre içeren bir ağ yapısı kullanılmalıdır. Doğrudan küçük türbülanslı yapıları çözümlmek yerine, bu yapıları modelleyen denklemler daha az hücre içeren bir ağ yapısı ile birlikte kullanılabilir. Fakat türbülanslı modelleyen denklemlerin Denklem 2.1’de verilen Navier-Stokes denklemleriyle birlikte kullanılabilmesi için, Navier-Stokes denklemlerinin uygun hale getirilmesi gerekir. Türbülans modelleri ile birlikte

kullanmak için elde edilmiş Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemleri bir sonraki bölümde anlatılmaktadır.

Ayrıklaştırılan Navier-Stokes denklemlerinin çözümü, hesaplama alanındaki nokta sayısı ile bağlantılı olarak, ancak bir bilgisayar programı yardımıyla mümkündür. Hesaplama için akış alanı program yardımıyla hücelere bölünür. Hesaplamalar hücre merkezleri veya hücre köşelerindeki noktalar temel alınarak yine program yardımıyla yapılır. Hesaplamalar sırasında faydalanan program kullanıcı tarafından kodlanabilir. Diğer yandan, piyasada bu amaç için geliştirilmiş ve test edilmiş ticari yazılımlar mevcuttur. Bu yazılımlar, karmaşık geometrilerdeki akış analizlerine olanak tanımakta ve çözüm için farklı seçenekler sunmaktadır.

Bu çalışmada silindir üzerindeki laminar ve türbülanslı akışın analizi için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı olan ANSYS Fluent (v12) programından yararlanılmaktadır [32]. Yapılan çalışmalar sırasında ANSYS Fluent programının kuramsal bilgi dokümanında yer alan bilgilerden yararlanılarak, kullanılan sayısal yöntemler modellenmek istenen akışın özelliklerine uygun olarak seçilmiştir [33].

ANSYS Fluent yazılımının içerisinde yer alan ve bu tez çalışması kapsamında yapılmış olan simülasyonlarda kullanılan sayısal yöntemler aşağıdaki bölümlerde anlatılmaktadır. Açıklanan yöntemler ANSYS Fluent yazılımının kuramsal bilgi kitapçığından alıntıdır [33]. Denklemlerde kullanılan terimler, sembol listesinde açıklanmaktadır.

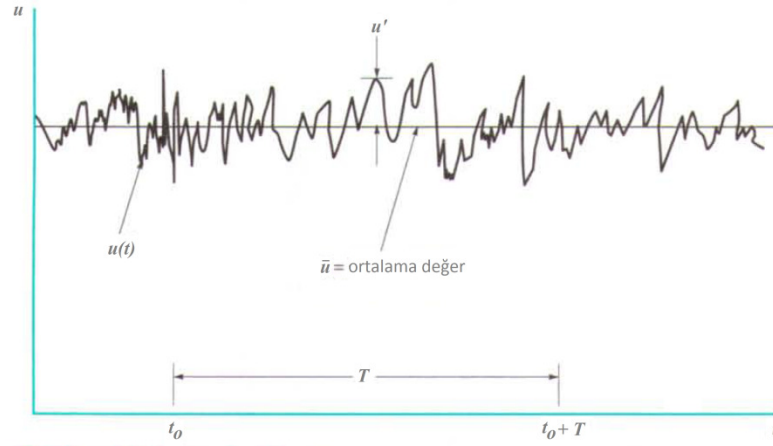
2.1.2. Reynolds-Ortalama Navier-Stokes Denklemleri

Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemleri türbülanslı akış analizlerinde, türbülans modelleri yardımıyla çözülen Navier-Stokes denklemleridir. Bu denklemlerde, akış özellikleri zaman-ortalama ve zamana bağlı değişen kısım

olmak üzere iki bileşene ayrılmıştır. Örneğin hız büyüklüklerin bileşenlere ayrılması aşağıdaki gibidir:

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (2.3)$$

Burada \bar{u}_i hızın zamana göre ortalamasını, u_i' ise zamana bağlı hız miktarının ortalama değer ile olan farkını temsil etmektedir. Şekil 2.1'de bu ifade grafik ile gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Reynolds-ortalama yaklaşımına göre hız ve hızın bileşenlerinin grafiksel gösterimi [6]

Basınç gibi diğer değerler de hız değerleri gibi bileşenlerine ayrılarak ifade edilir. Navier-Stokes denklemleri bu prensipten yararlanılarak düzenlenir ve Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemleri elde edilir. Zamana bağlı çözülen RANS denklemleri Zamana-bağlı Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (URANS) denklemleri olarak adlandırılır.

Süreklilik denklemi ve URANS denklemleri sırasıyla Denklem 2.4 ve Denklem 2.5'te verilmektedir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2.5)$$

Denklem 2.5'teki $(-\rho \overline{u'_i u'_j})$ terimi Reynolds gerilmesi olarak isimlendirilir. Burada u'_i ve u'_j , sırasıyla x-yönündeki ve y-yönündeki hızın bu yönleredeki ortalama hız değerlerinden anlık sapma miktarlarıdır. Türbülans olayının kaotik yapısından ötürü bu değerlerin hesaplandığı analitik bir yöntem mevcut değildir. Bu nedenle $(-\rho \overline{u'_i u'_j})$ terimi hesaplanırken ortalama hızdan sapma değerleri bazı yaklaşımlar kullanılarak hesaplanır. Türbülans modelleri bu değerlerin hesaplanabilmesi için geliştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, Spalart-Allmaras türbülans modeli kontrolsüz ve kontrollü türbülanslı akış analizlerinde kullanılmaktadır. Spalart-Allmaras türbülans modelinin çözdüğü denklemler aşağıdaki kısımlarda detaylı olarak anlatılmaktadır. Çözümler sırasında sınanan diğer türbülans modelleri ise SST k- ω türbülans modeli ve Reynolds Gerilimi Modellemesi'dir (RSM).

SST (Shear Stress Transport) k- ω türbülans modeli, k- ω türbülans modelinin üzerinde bazı değişiklikler yapılmasıyla elde edilmiş bir türbülans modelidir. Bu model, k- ω türbülans modeline göre dış akışlarda ve ters basınç gradyanı olan akışlarda iyi sonuçlar vermektedir. K ve ω terimleri sırasıyla türbülans kinetik enerjisini ve türbülans yitim hızını göstermektedir. Türbülansın modellenmesi için bu iki denklem çözülür.

Reynolds Gerilimi Modellemesi'nde (RSM) iki-boyutlu akışta süreklilik ve momentum denklemlerine ek olarak beş denklem çözülür. Bu modellemede her bir Reynolds gerilmesi için ayrı transport denklemi çözülmektedir. Hesaplama süresi

diğer türbülans modellerine göre uzundur fakat türbülansın izotropik olmaması göz önünde bulundurulmaktadır.

SST k- ω türbülans modeli ve Reynolds Gerilimi Modellemesi ile ilgili detaylı açıklamalar ANSYS Fluent'in teori kitapçığında bulunmaktadır [33].

2.1.2.1. Boussinesq Yaklaşımı

Reynolds-ortalama yaklaşımında Reynolds gerilmelerinin iyi bir biçimde modellenmesi gerekir. Boussinesq hipotezine göre Reynolds gerilmelerinin hız gradyanları ile ilişkisi aşağıdaki gibidir:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (2.6)$$

Bu hipotez Spalart-Allmaras, k- ϵ ve k- ω modellerinde kullanılır. Modellerde elde edilmesi gereken değer μ_t , türbülans viskozitesidir. Boussinesq hipotezi türbülans viskozitesinin yönden bağımsız ve skaler bir büyüklük olduğunu varsayar ama gerçekte bu tam olarak doğru değildir. Bu nedenle Boussinesq hipotezi bir yaklaşımdır.

RSM ile yapılan çözümde ise Boussinesq yaklaşımı kullanılmaz, her Reynolds gerilmesi terimi için farklı transport denklemleri çözülür. Bu nedenle RSM, Boussinesq yaklaşımına göre daha fazla hesaplama süresi gerektiren bir türbülans modellemesi yöntemidir.

KontROLSÜZ ve kontrollü akış analizinde kullanılan Spalart-Allmaras modeli Boussinesq yaklaşımını kullanmaktadır. Bu türbülans modeli, aşağıdaki kısımlarda anlatılmaktadır.

2.1.2.2. Spalart-Allmaras Türbülans Modeli

Spalart-Allmaras türbülans modeli diğer türbülans modellerine göre daha basit bir türbülans modelidir. Spalart-Allmaras modelinde türbülans viskozitesini modellemek için tek bir transport denklemi çözülür. Bu model özellikle duvarla sınırlandırılmış hava akışı simülasyonları için geliştirilmiştir [33]. Ters basınç gradyanlarının olduğu hava akışlarında iyi sonuçlar verdiği görülmektedir [33].

Spalart-Allmaras modelinde sınır tabaka dışındaki türbülans kinematik viskozitesini hesaplamak için Denklem 2.7 çözülür.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\tilde{v}u_i) = G_v + \frac{1}{\sigma_{\tilde{v}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho\tilde{v}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2}\rho \left(\frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_v + S_{\tilde{v}} \quad (2.7)$$

Denklem 2.7'de \tilde{v} türbülans kinematik viskozitesini, G_v türbülans üretimini, Y_v türbülans yıkımını, $\sigma_{\tilde{v}}$ ve C_{b2} ise sabitleri göstermektedir. $S_{\tilde{v}}$ ise kullanıcı tarafından tanımlanan türbülans kaynağı terimidir. Bu modelde Denklem 2.6'daki $\frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}$ terimi yoktur ve bu nedenle türbülans kinetik enerjisi hesaplanmaz.

Spalart-Allmaras modeline göre Denklem 2.7'deki bilinmeyen değerler olan μ_t , G_v , Y_v değerlerinin hesaplanış şekli sırasıyla aşağıdaki denklemlerde verilmektedir. Denklemlerdeki C_{b1} , C_{b2} , $\sigma_{\tilde{v}}$, C_{v1} , C_{w1} , C_{w2} , C_{w3} , κ terimleri sabit değerlerdir.

- Türbülans viskozitesinin (μ_t) modellenmesi:

Türbülans viskozitesi Spalart-Allmaras türbülans modelinde Denklem 2.8'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\mu_t = \rho \tilde{\nu} f_{v1} \quad (2.8)$$

Denklem 2.8'deki f_{v1} (türbülans viskozitesi sönümleme terimi) ve χ terimleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir. İlerleyen kısımlarda da yer alan bu terimlerin hesaplanmasında da aşağıdaki ifadelerden yararlanılmaktadır.

$$f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3} \quad (2.9)$$

$$\chi = \frac{\tilde{\nu}}{\nu} \quad (2.10)$$

- Türbülans üretiminin modellenmesi:

Denklem 2.7'de türbülans üretimini gösteren ifade, G_v , Denklem 2.11 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$G_v = C_{b1} \rho \tilde{S} \tilde{\nu} \quad (2.11)$$

Yukarıdaki denklemde yer alan \tilde{S} teriminin hesaplanış şekli aşağıdaki gibidir:

$$\tilde{S} = S + \frac{\tilde{\nu}}{\kappa^2 d^2} f_{v2} \quad (2.12)$$

$$f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}} \quad (2.13)$$

Denklemlerdeki d duvardan olan uzaklığı, S ise deformasyon tensörünün skaler büyüklüğünü göstermektedir.

Deformasyon tensörünün skaler büyüklüğü hesaplanırken rotasyon etkisinin de göz önünde bulundurulması, döngülerin fazla olduğu akışlarda doğruluğun artırılmasını sağlar. Bu nedenle, girdap şiddeti etkileri de hesaba katılarak S değeri Denklem 2.14 yardımıyla hesaplanır. Bu denklemi çözmek için bilinmesi/hesaplanması gereken değerler ise Denklem 2.20'yi takip eden denklemlerde verilmektedir.

$$S = |\Omega_{ij}| + C_{prod} \min(0, |S_{ij}| - |\Omega_{ij}|) \quad (2.14)$$

$$C_{prod} = 2.0, \quad |\Omega_{ij}| \equiv \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}, \quad |S_{ij}| = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

Ortalama gerinim hızı ise Denklem 2.15 ile hesaplanmaktadır.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2.15)$$

- Türbülans yıkımının modellenmesi:

Denklem 2.7'de türbülans yıkımını ifade eden terim, Y_v , aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$Y_v = C_{w1} \rho f_w \left(\frac{\tilde{v}}{d} \right)^2 \quad (2.16)$$

Denklem 2.16'daki f_w değeri aşağıdaki ifadeler yardımıyla hesaplanır.

$$f_w = g \left[\frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6} \right]^{1/6}, \quad g = r + C_{w2} (r^6 - r), \quad r \equiv \frac{\tilde{v}}{\tilde{S} \kappa^2 d^2}$$

- Sabitler:

Spalart-Allmaras türbülans modelinde kullanılan sabit değerler ise aşağıdaki gibidir:

$$C_{b1} = 0.1355, \quad C_{b2} = 0.622, \quad \sigma_{\bar{v}} = \frac{2}{3}, \quad C_{v1} = 7.1$$

$$C_{w1} = \frac{C_{b1}}{\kappa^2} + \frac{(1+C_{b2})}{\sigma_{\bar{v}}}, \quad C_{w2} = 0.3, \quad C_{w3} = 2.0, \quad \kappa = 0.4187$$

- Duvar sınır koşulu:

Spalart-Allmaras türbülans modelinde, değiştirilmiş türbülans kinematik viskozitesi değeri olan $\tilde{\nu}$ duvar yüzeyinde sıfıra eşitlenir ve çözüm bu şekilde elde edilir.

Ağ yapısı duvar yüzeyindeki viskoz tabakanın hesaplanması için yeterli derecede eleman içeriyorsa, duvar yüzeyindeki sınır tabakanın modellenmesi laminar gerilme-gerinim bağıntısı (Denklem 2.17) ile hesaplanır.

$$\frac{u}{u_T} = \frac{\rho u_T y}{\mu} \quad (2.17)$$

Eğer ağ yapısı sınır tabakayı çözümleyecek kadar sık değil ise sınır tabaka aşağıdaki ifade kullanılarak hesaplanır. Bu denklemde; u duvara paralel akış hızını, u_T kesme hızını, y duvardan olan uzaklığı göstermektedir.

$$\frac{u}{u_T} = \frac{1}{\kappa} \ln E \left(\frac{\rho u_T y}{\mu} \right) \quad (2.18)$$

Denklem 2.18'deki κ von Kármán sabitini göstermektedir ve bu sayının değeri 0.4187'ye eşittir. E değeri ise 9.793'tür [33].

2.2. Sayısal Yöntemler

ANSYS Fluent programında Navier-Stokes denklemleri basınç-tabanlı veya yoğunluk-tabanlı olarak çözülebilmektedir. Basınç-tabanlı Navier-Stokes denklemleri düşük hızdaki sıkıştırılamaz akışlar için, yoğunluk-tabanlı Navier-Stokes denklemleri ise yüksek hızdaki sıkıştırılabilir akışlar için geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında yapılan laminer ve türbülanslı akış HAD analizlerinde akışın Mach sayısı 0.1'den küçüktür. Bu nedenle akış sıkıştırılamaz olarak kabul edilip basınç-tabanlı denklemlerin çözülmesi uygun görülmüştür.

2.2.1. Basınç-Tabanlı Navier-Stokes Denklemleri

Kontrol hacim için türetilmiş, zamandan bağımsız basınç-tabanlı süreklilik ve momentum denklemleri sırasıyla Denklem 2.19 ve Denklem 2.20'de verilmektedir.

$$\oint \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2.19)$$

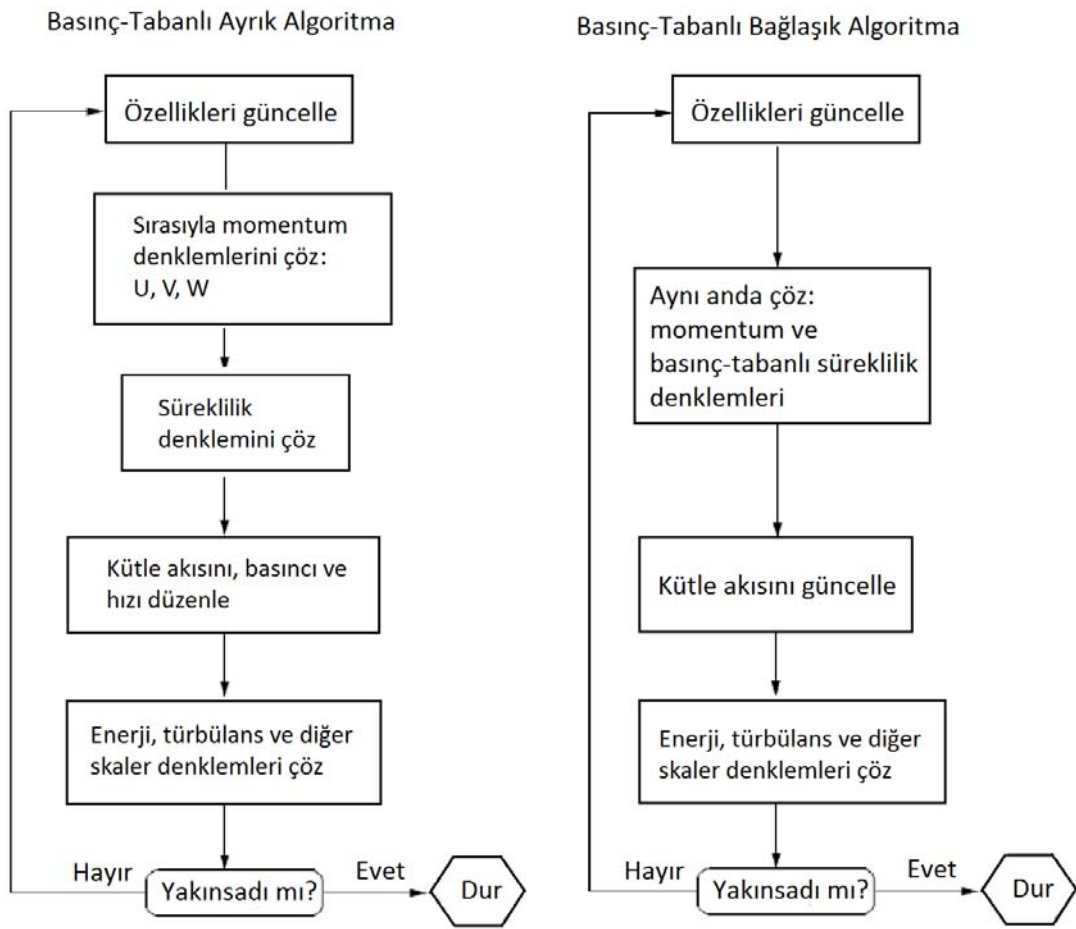
$$\oint \rho \vec{v} \vec{v} \cdot d\vec{A} = -\oint p I \cdot d\vec{A} + \oint \bar{\tau} \cdot d\vec{A} + \int_V \vec{F} dV \quad (2.20)$$

Burada ρ yoğunluğu, \vec{v} hız vektörünü, \vec{A} yüzey alanı vektörünü, I birim matrisi, $\bar{\tau}$ gerilme tensörünü, \vec{F} kuvvet vektörünü göstermektedir.

Denklem 2.19 ve 2.20 ayrıklaştırılarak çözüm yapılmaktadır. Bir zaman adımı içerisinde çözüm iteratif olarak yapıldıktan sonra, sonraki zaman adımındaki hesaplama geçilmektedir.

2.2.2. Çözüm Algoritmaları

ANSYS Fluent'in kullandığı iki değişik basınç-tabanlı çözüm algoritması vardır. Basınç-Tabanlı Ayrık (Pressure-Based Segregated) ve Basınç-Tabanlı Bağlaşik (Pressure-Based Coupled) olarak isimlendirilen bu algoritmaların akış şeması Şekil 2.2'de verilmektedir.



Şekil 2.2. Basınç-Tabanlı Çözüm Algoritmaları

Ayrık algoritmada süreklilik ve momentum denklemleri ayrı olarak çözülür ve bu nedenle ayrık algoritmanın hesaplama süresi bağlaşik algoritmaya göre oldukça kısadır. Diğer yandan bağlaşik algoritma, çözümün kısa sürede yakınsamasını sağlamaktadır.

Bu çalışmadaki HAD simülasyonlarında laminer akış analizleri için ayrık algoritma, türbülanslı akış analizleri için bağlaşıklık algoritma kullanılmaktadır. Zamana bağlı çözüm yapılırken ağ yapısının seyrek olduğu durumlarda bağlaşıklık çözüm tavsiye edilmektedir. Türbülanslı akış HAD analizlerinde çözümün doğruluğunu artırmak ve yakınsamanın kısa sürede olmasını sağlamak için bağlaşıklık algoritma kullanılmaktadır.

2.2.3. Kontrol Hacim Yaklaşımı ile Çözüm Basamakları

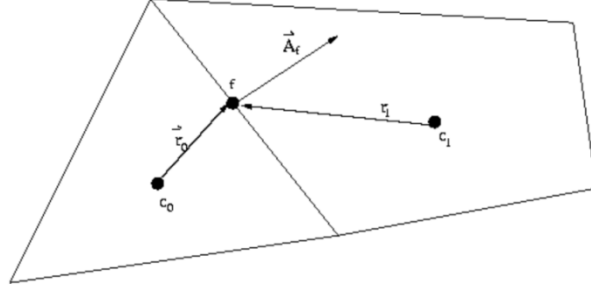
Çözüm algoritmasındaki ilk adım olan akış özelliklerinin belirlenmesi sırasında genel skaler transport denklemi ayrıklaştırılarak çözülür. Sonraki basamaklarda momentum ve süreklilik denklemleri çözülerek kütle akıları ve basınç değerleri hesaplanır. Bu işlem basamakları ve hesaplamada kullanılan yöntemler aşağıdaki kısımlarda işlem sırasına göre anlatılmaktadır.

2.2.3.1. Genel Skaler Transport Denklemi ve Ayrıklaştırılması

Akış alanında taşınan, kontrol hacim içerisindeki herhangi bir ϕ niceliğindeki değişim integral denklemi halinde aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\underbrace{\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV}_{\text{kontrol hacimdeki zamana göre değişim}} + \underbrace{\oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A}}_{\text{hücre yüzeylerinden taşınım ile giren ve çıkan miktar}} = \underbrace{\oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A}}_{\text{hücre yüzeylerinden difüzyon ile geçen miktar}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{kontrol hacimde üretilen miktar}} \quad (2.21)$$

Burada ρ yoğunluğu, \vec{v} hız vektörünü, \vec{A} yüzey alanı vektörünü, Γ_ϕ ϕ 'nin difüzyon katsayısını, S_ϕ ise birim hacimde üretilen ϕ miktarını göstermektedir.



Şekil 2.3. Genel transport denkleminin ayrıklaştırılmasında kullanılan kontrol hacim

Şekil 2.3'te görülen iki-boyutlu üçgen hücreler için Denklem 2.19'un ayrıklaştırılmış hali aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{\text{yüzey}}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{\text{yüzey}}} \Gamma_\phi \nabla \phi_f \cdot \vec{A}_f + S_\phi V \quad (2.22)$$

Denklem 2.22'de $N_{\text{yüzey}}$ hücreyi sınırlayan yüzey sayısını, ϕ_f yüzey boyunca taşınan ϕ miktarını, $\rho_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$ yüzeyden geçen kütle akısını, \vec{A}_f alan vektörünü, V hücrenin hacmini göstermektedir.

Denklem 2.22'deki terimler birbirlerine bağlıdır. Bu denklem doğrusal bir denklem olmadığı için aşağıdaki gibi doğrusallaştırılır:

$$a_p \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_b + b \quad (2.23)$$

Yukarıdaki denklemde nb alt indisi komşu hücreleri göstermektedir. a ise katsayılarıdır. Doğrusallaştırma sonucunda oluşan cebirsel katsayılar matrisi Gauss-Seidel yöntemi ile iteratif olarak çözülür.

ANSYS Fluent programı, elde edilen ϕ değerlerini hücre merkezlerinde saklar. Denklem 2.22'de kullanılan yüzey değerleri interpolasyon ile hesaplanır. Bu

hesaplama Upwind yöntemleri ile akışın yukarisından aşağısına doğru gerçekleştirilir.

2.2.3.2. İkinci-Dereceden Upwind Yöntemi

İkinci-dereceden Upwind yöntemi ile hücreyi çevreleyen yüzeylerdeki ϕ_f değerleri Denklem 2.24 yardımıyla bulunur.

$$\phi_f = \phi + \nabla \phi \cdot \vec{r} \quad (2.24)$$

Burada \vec{r} , komşu hücrelerin merkezleri arasındaki konum vektörüdür. $\nabla \phi$ 'nin ayrıklaştırılması ilerleyen kısımlarda anlatılmaktadır.

2.2.3.3. Zamanda Ayrıklaştırma

Bu alışmada, Denklem 2.22'de zaman bağlı değişimi gösteren terimin ayrıklaştırması kapalı (implicit) olarak yapılmaktadır. Kapalı ayrıklaştırma yöntemi her koşulda yakınsayan bir çözüm elde edilmesini sağlar. Laminer akış analizlerinde ikinci dereceden, türbölanslı akış analizlerinde birinci ve ikinci dereceden kapalı ayrıklaştırma yöntemi kullanılmaktadır.

ANSYS Fluent programı zamanda ayrıklaştırma için geri-farklar yöntemini kullanmaktadır. Aşağıda birinci ve ikinci dereden ayrıklaştırma yöntemi görölmektedir.

- Birinci dereceden ayrıklaştırma yöntemi:

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = f(\phi^{n+1}) \quad (2.25)$$

- İkinci dereceden ayrıklaştırma yöntemi:

$$\frac{3\phi^{n+1} - 4\phi^n + \phi^{n-1}}{2\Delta t} = f(\phi^{n+1}) \quad (2.26)$$

şeklinde gösterilmektedir.

Bir sonraki zaman adımındaki ϕ^{n+1} değeri Denklem 2.27’de görüldüğü gibi hesaplanır:

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \Delta t f(\phi^{n+1}) \quad (2.27)$$

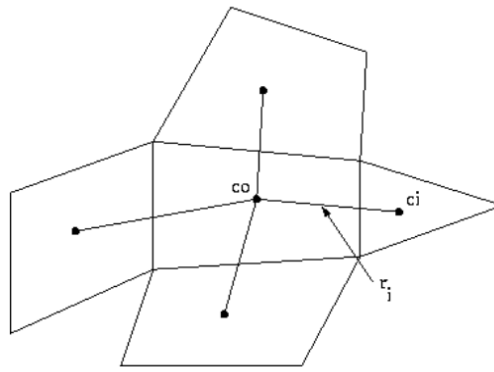
İkinci dereceden ayrıklaştırmadaki kesme hatasının, birinci dereceden ayrıklaştırmadaki kesme hatasından daha az olması beklenir. Diğer taraftan, zaman kısıtlamasının fazla olduğu durumlarda daha fazla hesaplama zamanı gerektiren ikinci dereceden çözümün yerine, göreceli olarak daha az zaman gerektiren birinci dereceden çözüm tercih edilebilir.

Laminer akış durumunda, hesaplama alanındaki hücre sayısının çok fazla olmamasından ve çözdürülen denklemlerin sayısının daha az olmasından ötürü hesaplama zamanının az olacağı öngörülmektedir. Bu nedenle, laminer akış HAD analizinde zamanda ayrıklaştırma için ikinci dereceden dâhili çözüm yöntemi kullanılmaktadır. Türbülanslı akış HAD analizlerinde ise ağ yapısının daha sık olmasından ve bu nedenle hesaplama zamanının fazla olmasından ötürü birinci dereceden ayrıklaştırma yöntemi tercih edilebilir.

2.2.3.4. Gradyanların ve Türevlerin Hesaplanması

Denklem 2.22’de, hücre yüzeylerinden gerçekleşen difüzyonu temsil eden terimde hesaplanmak istenen niceliğin gradyanı görülmektedir. Bu çalışmada gradyanların ve

türevlerin ayrıklaştırılmasında “Hücre–Tabanlı En Küçük Kareler (Least Squares Cell Based–LSCB)” yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, hücre merkezlerindeki çözümün doğrusal olarak değiştiği kabul edilir. Şekil 2.4’te bu yöntemi açıklamak için temsili hücreler gösterilmektedir. Ortadaki hücrenin merkezi “ c_0 ”, en sağdaki hücrenin merkezi “ c_i ” olarak adlandırılmıştır. İki merkez arasındaki konum vektörü ise “ \vec{r}_i ” ile gösterilmiştir.



Şekil 2.4. LSCB yöntemini açıklamak için belirlenmiş temsili hücreler

LSCB yöntemine göre merkezdeki değerler arasındaki değişim Denklem 2.28 ile ifade edilmektedir.

$$(\nabla \phi)_{c_0} \cdot \vec{r}_i = (\phi_{c_i} - \phi_{c_0}) \quad (2.28)$$

2.2.3.5. Momentum Denkleminin Ayrıklaştırılması

Momentum denkleminin ayrıklaştırılması genel skaler transport denkleminin ayrıklaştırılması ile aynıdır. Denklem 2.22’de ϕ yerine u yazıldığında aşağıdaki denklem elde edilir:

$$a_p u = \sum_{nb} a_{nb} u_b + \sum P_f A \cdot \hat{i} + S \quad (2.29)$$

Yüzeydeki basınç ve kütle akıları değerleri bilindiği takdirde Denklem 2.29 ile hız değeri hesaplanabilir. Basınç değerleri de hız değerleri gibi hücre merkezinde tanımlanır. Bu nedenle, yüzeydeki basınç değerleri interpolasyon ile hesaplanır:

$$P_f = \frac{\frac{P_0}{a_{P,c_0}} + \frac{P_1}{a_{P,c_1}}}{\frac{1}{a_{P,c_0}} + \frac{1}{a_{P,c_1}}} \quad (2.30)$$

2.2.3.6. Süreklilik Denkleminin Ayrıklaştırılması

Denklem 2.19, Şekil 2.3'te görülen kontrol hacim üzerinden ayrıklaştırılırsa aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\sum_f^{N_{\text{yüzey}}} J_f A_f = 0 \quad (2.31)$$

Burada J_f yüzeyden geçen kütle akısını temsil etmektedir ve ρv_n 'e eşittir.

$$\begin{aligned} J_f &= \rho_f \frac{a_{P,c_0} v_{n,c_0} + a_{P,c_1} v_{n,c_1}}{a_{P,c_0} + a_{P,c_1}} + d_f \left(\left(P_{c_0} + (\nabla P)_{c_0} \cdot \vec{r}_0 \right) - \left(P_{c_1} + (\nabla P)_{c_1} \cdot \vec{r}_1 \right) \right) \\ &= \hat{J}_f + d_f (P_{c_0} - P_{c_1}) \end{aligned} \quad (2.32)$$

Denklem 2.32'de d_f komşu olan iki hücreye ait momentum katsayılarının ortalamasına bağlı bir fonksiyondur. Yüzeydeki yoğunluk değeri ise aritmetik ortalama ile hesaplanmaktadır.

2.2.4. Basınç-Hız Bağlaşımı

Laminer akış analizlerinde basınç-hız bağlaşımı için SIMPLE algoritması, türbülanslı akış analizlerinde ise COUPLED (bağlaşık) algoritma kullanılmaktadır.

2.2.4.1. SIMPLE Algoritması

SIMPLE algoritması hız ve basınç düzeltmesi arasında bir bağlantı kurarak basınç değerlerinin hesaplanmasını kütle korunumunu sağlayarak gerçekleştirir. Basınç değeri tahmin edilerek momentum denklemleri çözüldüğü takdirde kütle akısı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$J_f^* = \hat{J}_f^* + d_f (P_{c_0} - P_{c_1}) \quad (2.33)$$

Fakat bu denklem süreklilik denklemini sağlamamaktadır. Bu nedenle J_f^* terimine bir düzeltme terimi olan J_f' terimi eklenir ve düzeltilmiş kütle akısı terimi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$J_f = J_f^* + J_f' \quad (2.34)$$

Yukarıdaki denklem süreklilik denklemini sağlamaktadır. J_f' ise aşağıdaki gibi yazılır:

$$J_f' = d_f (P'_{c_0} - P'_{c_1}) \quad (2.35)$$

Denklem 2.34 ve 2.35, Denklem 2.31 içerisine yazıldığında basınç düzeltme denklemleri elde edilir:

$$a_p P' = \sum_{nb} a_{nb} P'_{nb} + b \quad (2.36)$$

Buradaki b terimi hücreye giren net akıyı göstermektedir ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$b = \sum_f^{N_{yüzey}} J_f^* A_f \quad (2.37)$$

Cebirsel olarak hesaplanan basınç düzeltme denkleminde sonra hücre merkezindeki basınç değeri ve kütle akıları aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanır:

$$P = P^* + a_p P' \quad (2.38)$$

$$J_f = J_f^* + d_f (P'_{c_0} - P'_{c_1}) \quad (2.39)$$

Düzeltilmiş kütle akısı J_f süreklilik denklemini sağlamaktadır.

2.2.4.2. COUPLED (Bağlaşık) Algoritma

Bağlaşık algoritma ile momentum ve süreklilik denklemleri birlikte çözülür. Momentum denklemindeki basınç gradyanı terimi k bileşeni için yazıldığında Denklem 2.40 elde edilir:

$$\sum_f P_f A_k = - \sum_j a^{u_k P} P_j \quad (2.40)$$

Burada $a^{u_k P}$ Denklem 2.30'daki katsayılar kullanılarak türetilen bir katsayıdır. Herhangi bir i hücresindeki u_k hız bileşeni için momentum denklemini aşağıdaki gibidir:

$$\sum_j a_{ij}^{u_k u_k} u_{kj} + \sum_j a_{ij}^{u_k P} P_j = b_i^{u_k} \quad (2.41)$$

Süreklilik denklemindeki (Denklem 2.31) akı terimleri yerine Denklem 2.32'deki ifade yazıldığında aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\sum_k \sum_j a_{ij}^{u_k P} u_{kj} + \sum_j a_{ij}^{PP} P_j = b_i^P \quad (2.42)$$

Denklem 2.41 ve 2.42 bir matris formuna dönüştürülerek birlikte çözülebilir:

$$\sum_j [A]_{ij} \vec{X}_j = \vec{B}_i \quad (2.43)$$

Denklem 2.43'teki A matrisi aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$[A]_{ij} = \begin{bmatrix} a_{ij}^{PP} & a_{ij}^{Pu} & a_{ij}^{Pv} & a_{ij}^{Pw} \\ a_{ij}^{uP} & a_{ij}^{uu} & a_{ij}^{uv} & a_{ij}^{uw} \\ a_{ij}^{vP} & a_{ij}^{vu} & a_{ij}^{vv} & a_{ij}^{vw} \\ a_{ij}^{wP} & a_{ij}^{wu} & a_{ij}^{wv} & a_{ij}^{ww} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Sırasıyla bilinmeyen ve artık değer vektörleri olan \vec{X} ve \vec{B} vektörleri Denklem 2.45 ve 2.46'daki gibidir:

$$\vec{X}_j = \begin{bmatrix} P'_i \\ u'_i \\ v'_i \\ w'_i \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

$$\vec{B}_i = \begin{bmatrix} -r_i^p \\ -r_i^u \\ -r_i^v \\ -r_i^w \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

2.2.5. Sürekli Rejim Algoritması

Momentum ve süreklilik denklemleri tek bir zaman adımı için çözülürken iç iterasyonlar yapılır. Çözülen denklemlerin doğrusal olmamasından dolayı ϕ değerindeki değişimin kontrol edilmesi gerekir. Bir iterasyona başlarken kullanılan ϕ değeri, bir önceki iterasyonda hesaplanan ϕ_{old} değeri kullanılarak Denklem 2.47'deki gibi hesaplanır.

$$\phi = \phi_{old} + \alpha \Delta \phi \quad (2.47)$$

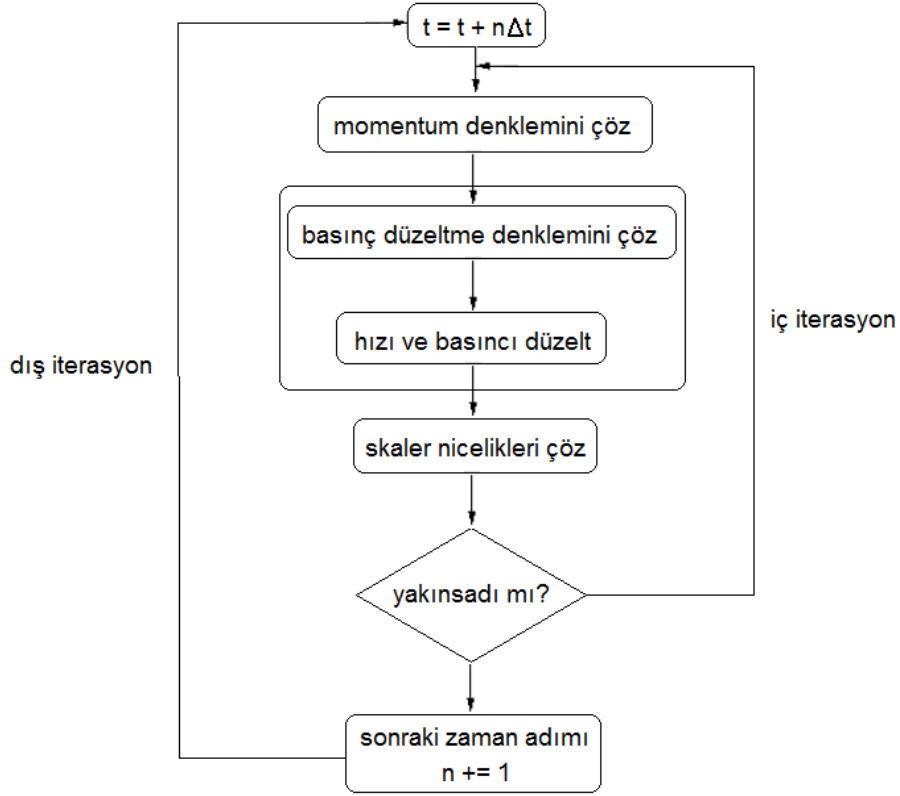
Bu denklemdeki α çarpanı ardışık gelen iterasyonlardaki çözüm farklılıklarını azaltarak kararlı bir çözüm elde etmek için kullanılmaktadır. Bu çarpanın, kararlılığı sağlayacak kadar küçük, iterasyonların yavaşlamasını sağlamayacak kadar büyük olması gerekir.

2.2.6. Zamanda İlerleme Algoritması

Genel skaler transport denklemi (Denklem 2.21), zamanda kapalı olarak ayrıklaştırıldığında aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint \rho^{n+1} \phi^{n+1} \vec{v}^{n+1} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi^{n+1} \nabla \phi^{n+1} \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi^{n+1} dV \quad (2.48)$$

Yukarıdaki denklem kullanılarak, hesaplama Şekil 2.5'te görülen algoritmaya göre devam eder.



Şekil 2.5. Çözüm algoritması

Çözüm sırasında iç iterasyonda yakınsama koşulu sağlandığında dış iterasyona, yani bir sonraki zaman adımına geçilir. Bu şekilde zamana bağlı akış probleminin çözümü elde edilmiş olur.

2.3. Sınır Koşulları

HAD simülasyonlarında kullanılan sınır koşulları hız-girişi (velocity-inlet), çıkış-açıklığı (outlet-vent), duvar ve simetri koşullarıdır.

Hız-girişi sınır koşulunda girişteki akış hızının yönü ve büyüklüğü tanımlanmaktadır. Türbülanslı akışlarda hıza ek olarak girişteki türbülans yoğunluğu ve uzunluk ölçeği (length scale) belirtilmelidir.

Çıkış-açıklığı sınır koşulu, geriye doğru akışların olduğu durumlarda doğru çözümler sağlamaktadır. Bu sınır koşulu ile çıkış yüzeyindeki statik basınç tanımlanmalıdır. Silindir üzerindeki akışta, von Kármán girdaplarından dolayı çıkış yüzeyinde geri akış gerçekleşmektedir. Bu nedenle çıkış yüzeyinde çıkış-açıklığı sınır koşulu tercih edilmiştir. Bu sınır koşulunda, çıkış yüzeyindeki türbülans yoğunluğunun ve uzunluk ölçeğinin belirtilmesi gerekir.

Üst ve alt yüzeyler ile üç-boyutlu analizlerdeki ön ve arka yüzeylerde simetri koşulu uygulanmıştır. Simetri koşulunda, simetri yüzeyinde tüm değişkenlerin akısı sıfır kabul edilir. Diğer bir deyişle, akışa ait tüm özelliklerin gradyanı simetri yüzeyinde sıfır kabul edilir.

Duvar sınır koşulunda ise silindir yüzeyinin pürüzlülüğü ve yüzeydeki kayma hızı tanımlanmaktadır. Bu çalışma kapsamında yapılan simülasyonlarda, silindir yüzeyinin pürüzsüz olduğu ve silindir yüzeyindeki akış hızının sıfır olduğu kabul edilmektedir.

2.4. Ard-İşleme

Ard-işleme için ANSYS Fluent ve Tecplot 360 programları kullanılmıştır. Grafik çiziminde ise SigmaPlot programından yararlanılmıştır.

Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) ANSYS Fluent programı yardımıyla yapılmıştır. Ortalama değerlerin hesaplanmasında da ANSYS Fluent programı kullanılmıştır.

Tecplot 360 programı TÜBİTAK projesi kapsamında gerçekleştirilecek olan Düşük Boyutlu Modelleme (DBM) çalışması için veri oluşturma sırasında kullanılmıştır. HAD analizi sonrasında elde edilen veriler Tecplot 360 programına aktarılmıştır. Bu programda silindirin arkasında belirli bir bölge oluşturulmuştur. Bu bölgeye eşit aralıklarla noktalar yerleştirilerek bu noktadaki veriler interpolasyon ile hesaplanmıştır.

2.4.1. Hızlı Fourier Dönüşümü

Ayrık Fourier Dönüşümü (AFD) bir deneysel veya sayısal çalışma ile elde edilen karmaşık sinyallerde hangi frekansta ne şiddette bir veri olduğunu ayırıştırarak bir işlemdir. ϕ_k verilerinin Ayrık Fourier Dönüşümü Denklem 2.49 ile bulunur.

$$\phi_k = \sum_{n=0}^{N-1} \hat{\phi}_n e^{2\pi i k n / N} \quad k = 0, 1, 2, \dots, (N-1) \quad (2.49)$$

Burada $\hat{\phi}_n$ ayrık Fourier katsayılarını göstermektedir. Bu katsayılar ise Denklem 2.50 yardımıyla bulunur.

$$\hat{\phi}_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \phi_k e^{-2\pi i k n / N} \quad n = 0, 1, 2, \dots, (N-1) \quad (2.50)$$

Denklem 2.49 ve Denklem 2.50 kullanılarak dönüşüm ve ters dönüşüm işlemleri gerçekleştirilebilir.

Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) ise Ayrık Fourier Dönüşümü yapan fakat daha hızlı bir algoritmaya sahip olan bir işlemdir. Her iki dönüşümün sonuçları aynıdır [34].

HFD, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizlerinde elde edilen veri topluluğunun içerisinde kendini tekrarlayan niceliklerin frekansını bulmada kullanılır. Böylece akış periyodik ise akışın periyodu, frekansı, Strouhal sayısı hesaplanabilir. Bu çalışmada, silindir üzerindeki kaldırma katsayısının zamana bağlı değişimine HFD uygulanmaktadır.

Yapılan Hızlı Fourier Dönüşümleri ANSYS Fluent programının içinde yer alan kod yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Kaldırma katsayısının zamana bağlı değişimine HFD uygulanmasıyla akışın Strouhal sayısına karşılık güç spektral yoğunluğu veya

büyüklik grafikleri elde edilmektedir. Buradaki güç spektral yoğunluğu sinyal gücünün frekans alanındaki dağılımıdır. Büyüklik değeri ise güç spektral yoğunluğunun kökü alındığında bulunan değerdir. Güç spektral yoğunluğunun birimi, HFD'nin uygulandığı sinyalin biriminin karesidir. Büyüklüğün birimi sinyalin birimi ile aynıdır. Kaldırma katsayısına uygulanan HFD sonucunda güç spektral yoğunluğu ve büyüklik değerleri birimsiz olarak elde edilmektedir.

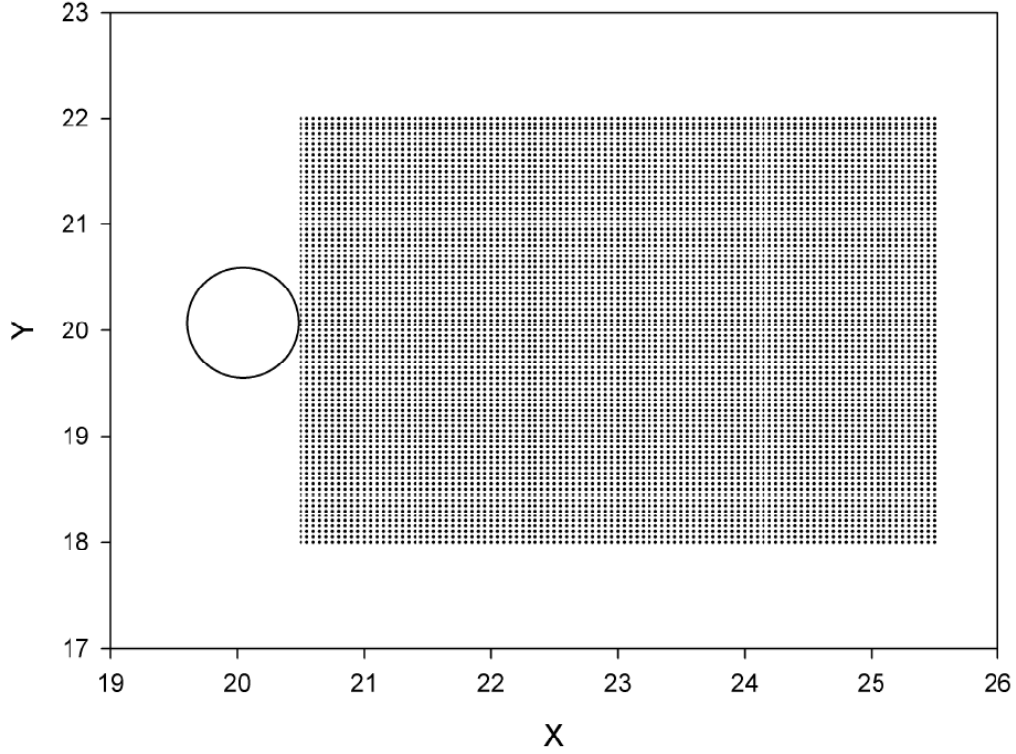
2.4.2. Boyut İndirgeme İçin Gerekli Verilerin Oluşturulması

Akışın boyutunun indirgenebilmesi için Dikgen Ayrıştırma Yöntemi'nden (DAY) faydalanılır. DAY için gerekli olan veri hızın x-yönündeki bileşenidir. HAD hesaplamaları sırasında her zaman adımındaki x-yönündeki hız değerleri, koordinatlarıyla beraber dosyaya yazdırılmıştır. Dosyaya yazdırma işlemi süresi, akış periyodunun on katı kadar seçilmiştir. Diğer bir deyişle, dosyaya kaydedilen veriler 10 periyotluk bir akış süresini temsil etmektedir.

DAY için x-yönündeki hız değerlerinin, silindirin arkasındaki belirli bir bölgede bilinmesi gerekmektedir. Bu bölgedeki değerler, eşit aralıklarla bölünmüş noktalarda elde edilmelidir. Silindir hemen arkasında, silindirin çapının x-yönünde 5 katı, y-yönünde 4 katı büyüklüğünde bir alan belirlenmiştir. Silindirin çapı 1 metredir merkezi (20, 20) noktasındadır. Belirlenen alan x-yönünde 20.5 metreden 25.5 metreye, y-yönünde 18 metreden 22 metreye kadar uzanmaktadır. Alan x-yönünde 101, y-yönünde 81 nokta olacak şekilde eşit aralıklara bölünmüştür. Böylece iki nokta arasındaki uzaklık x ve y-yönünde 0.05 metre olmaktadır. Bu bölge ve noktanın silindire olan konumları Şekil 2.6'da görülmektedir.

Belirtilen noktalardaki x-yönündeki değerleri interpolasyon ile hesaplanmıştır. Aynı hesabın her zaman adımı için tekrarlanması gerektiğinden dolayı Tecplot 360 programında bir makro kodlanarak, her zaman adımındaki sonuç dosyaları programa okutulmuş ve silindir arkasındaki alan belirtilip noktalara bölünerek x-yönündeki hız değerleri için interpolasyon yaptırılmıştır. İnterpolasyon sonucunda elde edilen

değerler her zaman adımı için ayrı dosyalara yine bu makro yardımıyla kaydedilmiştir. Kodlanan makronun kaynak kodu EK 1’de verilmektedir.



Şekil 2.6. Düşük boyutlu modelleme için oluşturulacak verilerin hesaplandığı noktalar

2.5. Hesaplama Kaynakları

HAD simülasyonları ve Tecplot 360 programında yapılan hesaplamalar için kullanılan bilgisayar dört adet AMD Phenom™ II işlemciye ve 1.60 GHz hızına sahiptir. Bilgisayarın önbelleği 4 GB’tır ve işletim sistemi 64 bittir.

HAD simülasyonları sırasında dört işlemci ile paralel hesaplama yapılmıştır. Tecplot 360 programı ise seri olarak çalıştırılmıştır. Laminer akış analizlerinde 40000 iterasyon yaklaşık olarak 2.5 saatte, türbülanslı akış analizlerinde 50000 iterasyon yaklaşık 7.5 saatte tamamlanmıştır.

3. SİLİNDİR ÜZERİNDEKİ LAMİNER AKIŞ HAD ANALİZLERİ

Silindir üzerindeki laminer akış Reynolds sayısı (Re) 48'den büyük olduğu durumlarda kararsız bir davranış sergileyerek von Kármán girdap yolunu oluşturur [2]. Reynolds sayısı 48'den büyük olan laminer akışların da incelenmesini gerektiren bu davranış, yapılan çalışma kapsamında HAD simülasyonları ile modellenmektedir.

Laminer Akış HAD simülasyonları, ANSYS Fluent programında Basınç-Tabanlı Navier-Stokes denklemleri çözülerek yapılmıştır [32, 33]. Bu yöntemde akış sıkıştırılamaz olarak kabul edilmektedir. Çözüm iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda kullanılan sayısal yöntemler ise aşağıdaki gibidir:

- Basınç-Tabanlı Ayrık Algoritma
- Basınç-hız bağlaşımı için SIMPLE Yöntemi
- Mekânda ayrıklaştırma için İkinci Dereceden Upwind Yöntemi
- Zamanda ayrıklaştırma için İkinci Dereceden Kapalı (Implicit) Ayrıklaştırma
- Gradyanların ve türevlerin hesaplanması için Hücre-Tabanlı En Küçük Kareler Yöntemi

Bu yöntemler ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 2'de yer almaktadır. Bu yöntemler ile birlikte farklı ağ yapıları ve zaman adımları kullanılarak akışı minimum hata ve en uygun zamanla çözümlene yolu aranmıştır. İlgili çalışmalar aşağıdaki kısımlarda açıklanmaktadır.

3.1. Ağ Çalışması ve HAD Analizi Özellikleri

3.1.1. Akış Özellikleri

Bu çalışmadaki HAD analizleri için iki farklı akış koşulu seçilmiştir. Her iki akış koşulunda da Re sayısı kritik Re sayısından ($Re=48$ 'den) büyük olacak şekilde, diğer bir deyişle çözümden von Kármán girdap yolu gözlemlenebilecek şekilde seçilmiştir.

Oluşturulan ağın denetlenmesi sırasında ANSYS Fluent çalışma örneklerinde [35] de çözümü bulunan genel, basit bir analizden yararlanılarak akış koşulları; $Re=150$, yoğunluk= 150 kg/m^3 , hız= 1 m/s , viskozite= $1 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$, basınç= 101 kPa olarak seçilmiştir.

Ağ yapısına karar verildikten sonra, kontrolsüz ve kontrollü HAD analizleri için mühendislik uygulamalarında karşılaşılabilecek akış şartları kullanılmıştır. Havanın akışının modellendiği bu analizlerde $Re=100$ olarak seçilmiştir. Bu koşullarda yoğunluk= $5.25 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$, hız= 34 m/s , viskozite= $1.78 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$, basınç= 4.337 Pa olacak şekilde sınır ve ilk değer koşulları belirlenmiştir.

Yapılan çözümlerde, hız değerleri hesaplama alanının giriş yüzeyinde tanımlanmıştır. Çıkış yüzeyinde çıkış-açıklığı sınır koşulu, üst ve alt yüzeylerde ise simetri koşulu kullanılmıştır. Silindir hareketsiz ve yüzeyi pürüzsüz olarak, akışın hızı ise silindirin yüzeyinde sıfır olacak şekilde tanımlanmıştır.

3.1.2. Ağ Yapısı

HAD analizlerine başlamadan önce, ilk yapılması gereken geometriyi ve ağ yapısını oluşturmaktır. Oluşturulan ağın, yeterli doğrulukta bir çözüm için, yeterli sayıda düğüm sayısı ve hücre içerip içermediğine bakılmalıdır. Bunun için, oluşturulan ağ ile HAD analizleri yapılarak elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

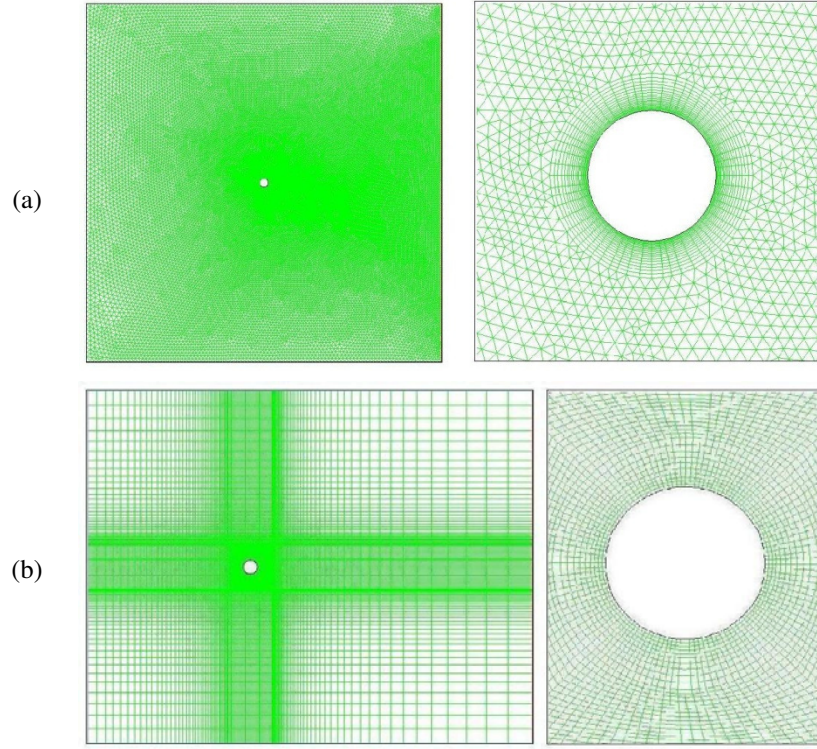
Ağ yapısını oluşturmak için ilk aşamada, silindir ve hesaplama alanını içeren geometri ANSYS ICEM CFD [36] programı kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan geometride silindir hesaplama alanının merkezinde yer almaktadır. Silindirin çapı (D) 1 metredir. Hesaplama alanı ise x-yönünde ve y-yönünde 40 D olacak şekilde, 40 m x 40 m boyutlarında oluşturulmuştur. Hesaplama alanı kısımlara ayrılıp isimlendirilerek, akışkanın hesaplama alanına giriş ve çıkış yerleri tanımlanmıştır.

Ağ yapısı silindir etrafında dörtgen, hesaplama alanının diğer kısımlarında ise üçgen elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur (Ağ yapısı-1L). Silindirin üzerinde yer alan ilk hücrenin yüksekliği 5 mm, büyüme oranı 1.1, katman sayısı 20 olarak seçilmiştir. Bu parametreler ile sınır tabaka ($\delta=141$ mm) 13 hücre ile çözümlenmektedir. Silindir arkası alandaki düzensizlikleri daha iyi gözlemleyebilmek ve bu bölgedeki sayısal hata yayılımının daha az olmasını sağlamak amacıyla ağ yapısı, silindir arkası alanda sıklaştırılmıştır (Şekil 3.1a). Girişte 80, alt ve üst yüzeylerde 100, çıkış yüzeyinde ise 200 düğüm noktası olacak şekilde ağ yapısı oluşturulmuştur.

ANSYS Fluent'in çalışma örneklerinden birinde [35], silindir etrafındaki akışın HAD analizi ve sonuçları verilmektedir. Bu çalışmada kullanılan ağ (Ağ yapısı-2L) Ağ yapısı-1L'ye göre daha az hücre içermektedir. Ağ yapısı-2L'de de silindirin çapı 1 metredir. Hesaplama alanının boyutları ise 31.5 metre x 25 metredir. Silindirin merkezi $x=11.5$ m, $y=12.5$ m noktasında olacak şekilde silindir konumlandırılmıştır. Bu ağ yapısı ise Şekil 3.1b'de görülmektedir. Ağ yapıları hakkında detaylı bilgi Çizelge 3.1'de verilmektedir.

Çizelge 3.1. Ağ yapısı-1L ve Ağ yapısı-2L ile ilgili bilgiler

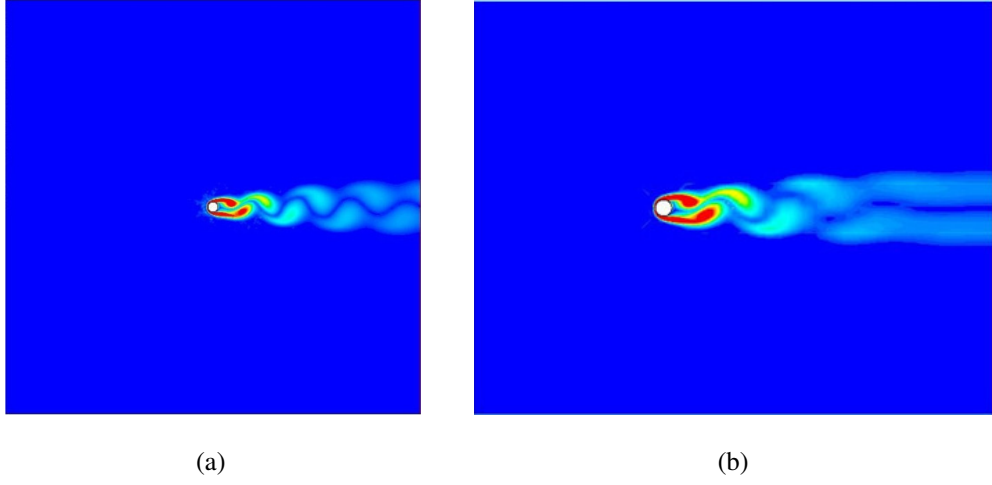
Ağ Yapısı	Hücre Sayısı	Yüzey Sayısı	Düğüm Sayısı
1L	66788	101050	34267
2L	15380	30924	15659



Şekil 3.1. Ağ yapıları, a) Ağ yapısı-1L ve yakın planı, b) Ağ yapısı-2L ve yakın planı

Her iki ağ yapısı için, özellikleri önceden tanımlanmış olan $Re=150$ akış koşulu ve aynı nümerik yöntemler ile $\Delta t=0.2$ s seçilerek çözüm yapılmıştır. Yapılan çözümün sonuçlarında vortisite büyüklüğü konturlarına bakılmıştır. Her iki çözümde de von Kármán girdap yolunun oluştuğu görülmüştür. Bu analizler sonucunda elde edilen vortisite büyüklüğü kontur grafikleri Şekil 3.2’de görülmektedir.

Şekil 3.2’ye bakıldığında, Ağ yapısı-2L ile yapılan çözümde, akışın ilerleyen kısımlarında girdapların kaybolmaya başladığı görülmektedir. Bu görüntü, silindir arkası alanda nümerik hata yayılımının Ağ yapısı-2L için daha fazla olduğu anlamına gelir. Nümerik hata yayılımının fazla olmasının nedeni, silindir arkasındaki ağ yapısının yeterli sıklıkta olmadığı belirlenmiştir. Bu nedenle, Ağ yapısı-1L’nin kullanılmasına karar verilmiştir. Böylelikle boyut indirgeme yöntemi için silindir arkasındaki bölgede elde edilen verilerin de daha doğru olması sağlanmaktadır.



3.2. Vortisite büyüklüğü konturları, a) Ağ yapısı–1L ile, b) Ağ yapısı–2L ile

Bu analizler sonucunda Ağ yapısı–1L ile ortalama sürüklenme katsayısı (C_D) değeri 1.14, Ağ yapısı–2L ile 1.19 olarak elde edilmiştir. Bu iki değer birbirine yakın olup Çizelge 1.1 ve Çizelge 1.2’de yer alan literatürdeki değerlerden farklıdır. Bu nedenle, zaman adımının küçültülüp Ağ yapısı–1L ile çözümün yeniden yapılmasına karar verilmiştir.

3.1.3. Zaman Adımı Çalışması

St sayısı Çizelge 1.1 ve Çizelge 1.2’de görüldüğü gibi silindir üzerindeki laminer akış için 0.17 civarındadır. Buradan $Re=150$ için belirtilen akış koşulları ile akışın frekansı (f) ve periyodu (T) aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$St = \frac{f D}{U} = f \frac{1m}{1m/s} \approx 0.17 \quad \rightarrow \quad f \approx 0.17s^{-1}, \quad T = \frac{1}{f} \approx 5.88s$$

Zaman adımının büyüklüğü (Δt) 0.2 saniye seçilerek akışın bir periyodu yaklaşık olarak 30 zaman adımına bölünmüştür. Ağ yapısına karar verilirken yapılan HAD analizlerinde bu zaman adımı büyüklüğü kullanılmıştır.

Zaman adımı çalışması için seçilen diğer zaman adımı büyüklüğü, $\Delta t=0.001$ saniye olarak belirlenmiştir. Bu zaman adımı büyüklüğü ile bir periyot 5880 zaman adımı ile çözümlenmektedir.

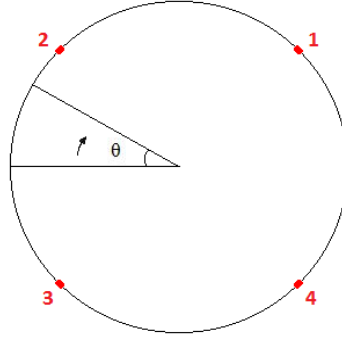
Aynı sayısal yöntemler ve aynı ağ yapısı (Ağ yapısı-1L) ile yapılan HAD analizleri sonucunda $\Delta t=0.2$ s ve $\Delta t=0.001$ s için sürüklenme katsayıları sırasıyla $C_D=1.14$ ve $C_D=1.32$ olarak bulunmuştur. Yeterli doğrulukta sonuçlara ulaşılamadığı için $\Delta t=0.001$ s ile, alıştırma yer alan $Re=150$ akış koşulları yerine, kontrolsüz ve kontrollü laminar akış analizlerinde kullanılacak olan akış koşulları ($Re=100$) ile analizin tekrarlanmasına karar verilmiştir. Bu akış koşulları ile akışın frekansı ve periyodu aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$St = \frac{f D}{U} = f \frac{1m}{34m/s} \approx 0.17 \quad \rightarrow \quad f \approx 5.78 s^{-1}, \quad T = \frac{1}{f} \approx 0.173 s$$

Bu akış koşulları ve $\Delta t=0.001$ saniye zaman adımı büyüklüğü ile, akışın bir periyodu yaklaşık 173 zaman adımıyla çözümlenmektedir.

3.1.4. Kontrollü Akış Analizleri için Oluşturulan Geometri ve Ağ Yapısı

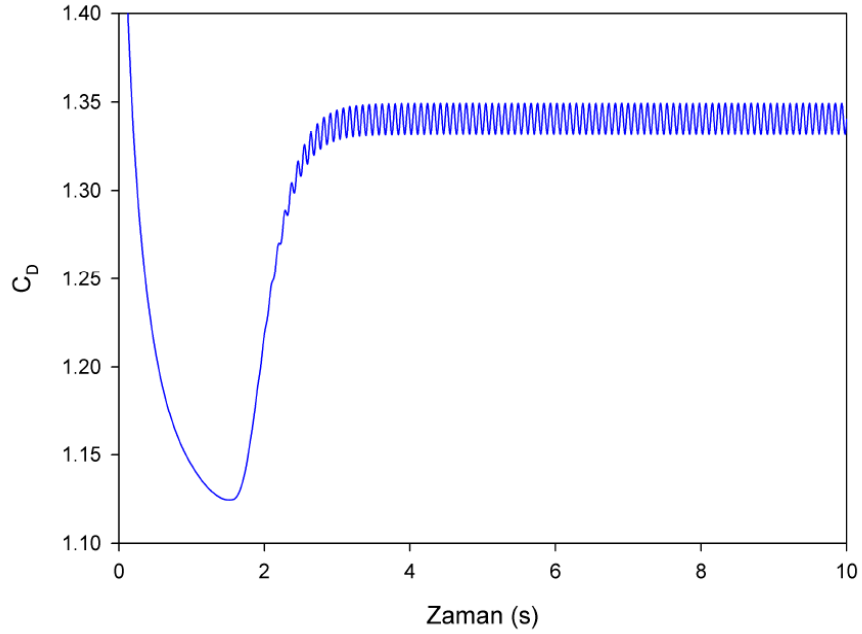
Nihai HAD analizlerinde, kontrolsüz ve kontrollü akışlarda karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla her iki durumda da aynı geometri ve ağ yapısı kullanılmıştır. Kontrollü analizlerde silindir üzerindeki değişik noktalardan hava üfleneceği için silindir üzerine 4 adet delik yerleştirilmiştir. Kontrolsüz akış simülasyonları, bu delikler kapalı tutularak gerçekleştirilmiştir. 0.01 m uzunluğunda olan bu dört deliğin merkezi, silindir üzerindeki 45, 135, 225 ve 315 derecelik açılarının denk geldiği noktalardır. Şekil 3.3'te deliklerin silindir üzerindeki konumları ve numaraları görülmektedir.



Şekil 3.3. Silindirin üzerinde yer alan deliklerin konumları ve isimleri

3.2. Kontrolsüz Laminer Akış Simülasyonları

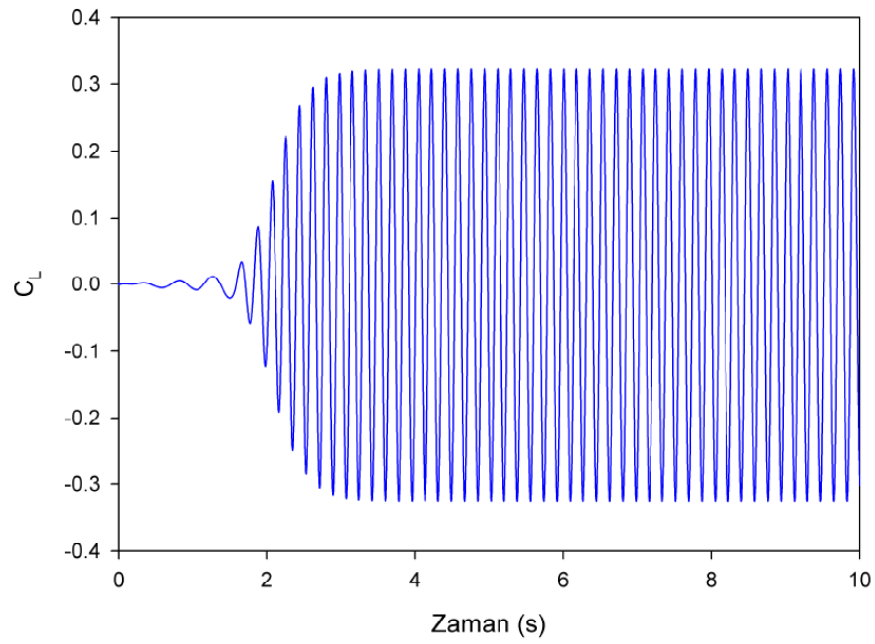
Kontrolsüz akış simülasyonları, yukarıda bahsedilen geometri ve ağ yapısı kullanılarak $Re=100$ akış şartları ile gerçekleştirilmiştir. Silindir üzerinde bulunan delikler kapalı tutularak kontrolsüz HAD analizleri yapılmıştır. Kontrolsüz akış simülasyonları sonucunda elde edilen zamana bağlı C_D grafiği Şekil 3.4'te görülmektedir.



Şekil 3.4. Sürüklenme katsayısının zamana göre değişimi, $Re=100$

HAD analizi sonucunda elde edilen ortalama C_D değeri Şekil 3.4'te de görüldüğü gibi 1.34'tür ve bu değer literatürde yer alan deneysel ($C_D=1.26-1.4$) ve sayısal ($C_D=1.34-1.35$) değerler ile örtüşmektedir.

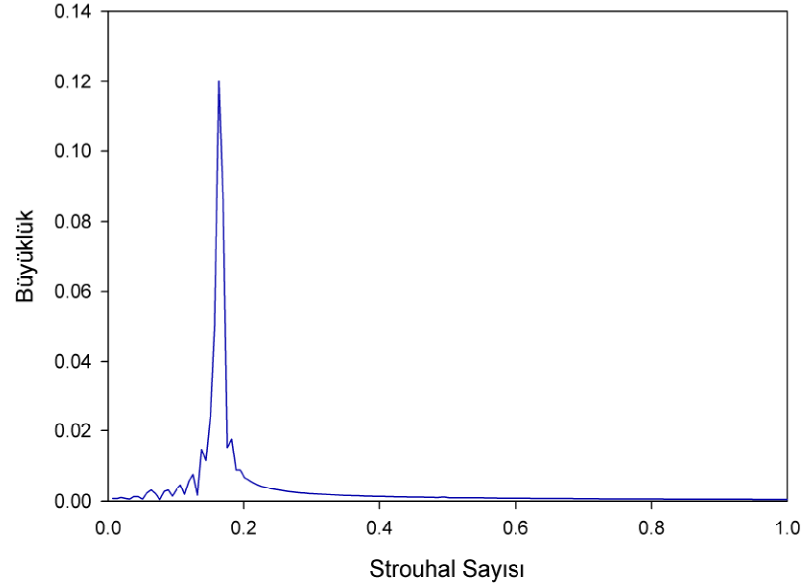
KontROLSÜZ akış simülasyonları sonucunda elde edilen zamana bağlı kaldırma katsayısı (C_L) grafiği ise Şekil 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3.5. Kaldırma katsayısının zamana göre değişimi, $Re=100$

Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te akışın periyodik olduğu açıkça görülmektedir. C_L değerinin 0 ile 10 saniye arasındaki değişimine HFD uygulanarak akışın Strouhal sayısı (St) hesaplanmıştır. HFD sonucunda elde edilen grafik Şekil 3.6'da görülmektedir.

$Re=100$ için akışın St sayısı HFD sonucunda 0.163 olarak bulunmuştur. Bu değerin literatürdeki deneysel St sayısı ($St=0.167$) ile arasındaki farkı % 2.4, sayısal çalışmalar ($St=0.164$) ile olan farkı ise % 0.6'dır.



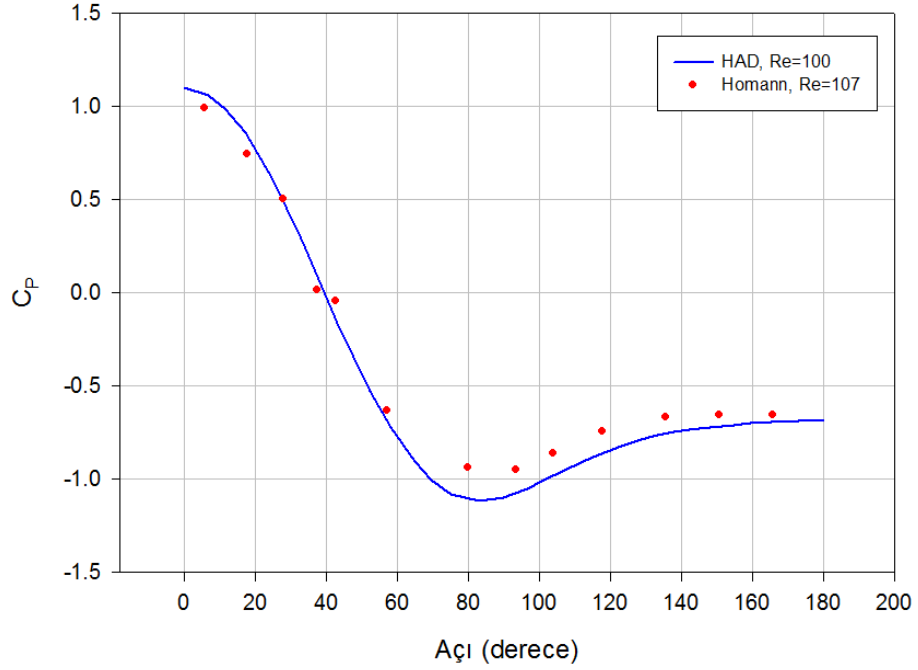
Şekil 3.6. C_L değişimine uygulanan HFD sonucunda elde edilen Strouhal sayısı grafiği, $Re=100$

Akışın periyodu St sayısı kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$St = \frac{fD}{U} = \frac{D}{TU} \quad , \quad 0.163 = \frac{1m}{T \times 34m/s} \quad \Rightarrow \quad T = 0.180s$$

Akış kendini 0.180 saniyede tekrar etmektedir.

Yapılan HAD analizi sonucunda elde edilen silindir yüzeyindeki basınç katsayısı (C_P) dağılımı ve deneysel C_P dağılımı [37] Şekil 3.7'de verilmektedir. C_P dağılımı, akışın 5.4 ve 9.0 saniyeleri arasında, yani akışın 30. ve 50. periyotları arasında olmak üzere toplam 20 periyotluk zaman dilimi içerisinde ortalama alınarak hesaplanmıştır.

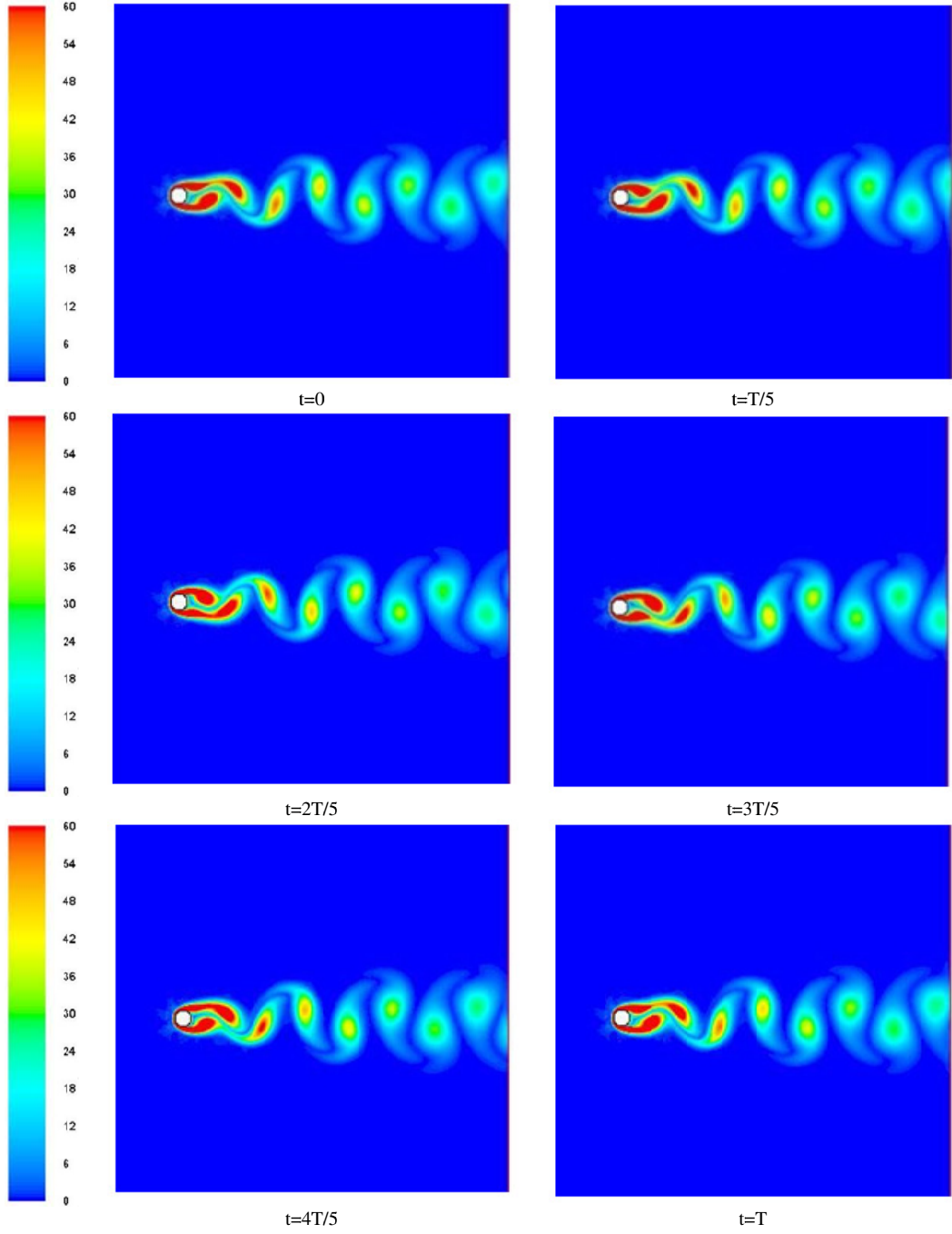


Şekil 3.7. Silindir üzerindeki sayısal ve deneysel [37] basınç katsayısı dağılımı, Re=100

Silindir yüzeyindeki basınç katsayısı dağılımı grafiğine bakıldığında, sayısal olarak elde edilen dağılım ile literatürde yer alan deneysel dağılım arasındaki farkın oldukça az olduğu görülmektedir.

Şekil 3.8'de bir periyot içerisindeki vortisite büyüklüğü konturlarının zamana göre değişimi verilmektedir. Her bir anlık görüntü arasındaki süre $T/5=0.036$ saniyedir. Altı adet anlık durum görüntüsü, akışın 9.000 s ve 9.180 s arasındaki periyotta kaydedilmiştir.

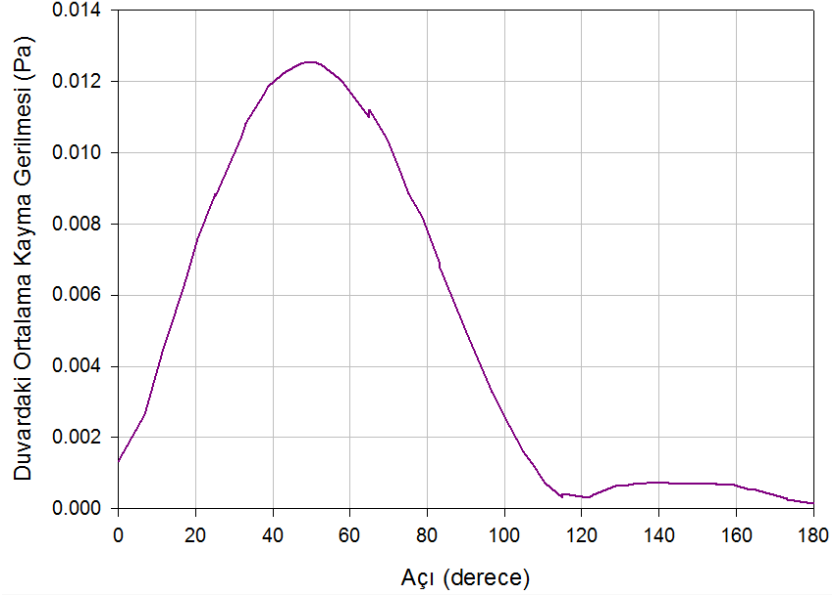
Şekil 3.8'deki anlık görüntülere 9.000 s ($t=0$) ve 9.180 s ($t=T$) anlarına ait grafiklerin aynı olduğu görülmektedir. Bu sonuç, HFD ile elde edilen sonucu desteklemektedir. Ayrıca kontur grafiklerinde, von Kármán girdaplarının iyi bir biçimde modellendiği ve bu girdapların akışın ilerleyen noktalarında sönmelenmediği de görülmektedir.



Şekil 3.8. Akışın bir periyodunu gösteren vortisite büyüklüğü konturları, $Re=100$

Oluşan girdapların silindir üzerinden kopma açısı, silindir yüzeyindeki ortalama kayma gerilmesinin en az olduğu noktaya bakılarak 115° olarak tespit edilmiştir (Şekil 3.9). Literatürde yer alan deneysel bir çalışmada Reynolds sayısının 100 olduğu durumda kopma açısı 114.15° olarak belirtilmektedir [38]. Yapılan HAD

analizi sonucunda elde edilen kopma açısı deneysel kopma açısı ile oldukça uyumludur.



Şekil 3.9. Silindir yüzeyindeki ortalama kayma gerilmesi, Re=100

Ayrıca, HAD analizi sonucunda elde edilen hız alanına bakıldığında silindir yüzeyinde 90 derecedeki sınır tabaka kalınlığının yaklaşık 150 mm olduğu görülmüştür. Bu yüksekliğe karşılık gelen hücre sayısı 15'tir. Elde edilen sınır tabaka kalınlığı değeri, literatürdeki değer ($\delta = 141$ mm) ile uyumludur.

3.3. Kontrollü Laminer Akış Simülasyonları

Kontrollü akış simülasyonlarında kontrol, silindir üzerindeki dört adet delikten değişik kombinasyonlarda açılarak hava üflenmesiyle ve üfleme hızının değiştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu deliklerin konumları Şekil 3.3'te görüldüğü gibidir. Kullanılan ağ yapısı kontrolsüz durum analizlerinde kullanılan ağ yapısı ile aynıdır (Ağ yapısı-1L). Üflenen havanın özellikleri, silindir üzerinden akan havanın özellikleri ile özdeştir. Kontrollü analizlerde üflenen havanın yalnızca hızı

değiştirilmektedir. Üfleme yerleri ve üfleme hızı (u) değiştirilerek toplam altı farklı kontrol durumu incelenmiştir. Bu durumlar şu şekildedir:

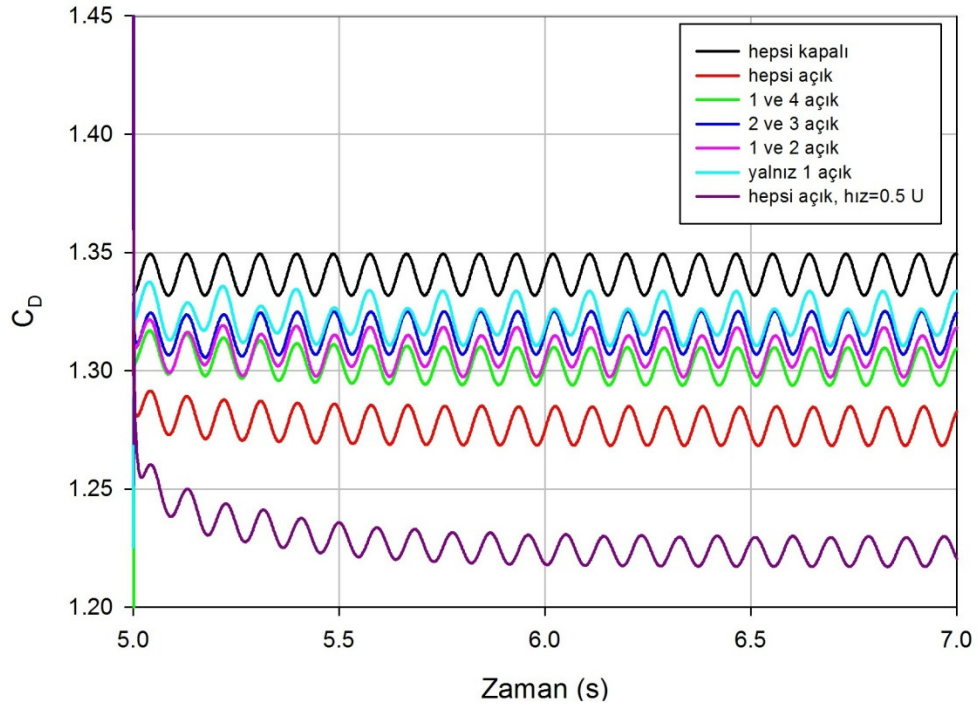
- Deliklerin hepsinden hava üfleme, üfleme hızı=%10 akış hızı
- 1. ve 4. deliklerden hava üfleme (arka delikler), üfleme hızı=%10 akış hızı
- 1. ve 2. deliklerden hava üfleme (üst delikler), üfleme hızı=%10 akış hızı
- 2. ve 3. deliklerden hava üfleme (ön delikler), üfleme hızı=%10 akış hızı
- Yalnızca 1. delikten hava üfleme (arka üst delik), üfleme hızı=%10 akış hızı
- Deliklerin hepsinden hava üfleme, üfleme hızı=%50 akış hızı

Yapılan kontrollü HAD analizleri ile, üflemenin silindir önündeki - silindir arkasındaki deliklerden yapılması, simetrik - asimetrik üfleme, üfleme hızının farklı olması durumları incelenmiştir.

Kontrollü HAD analizlerinde, akışın 0 ile 5. saniyeleri arasında tüm delikler kapalı olarak (kontROLSÜZ) analiz yapılmış, kontrollü analizlere 5. saniyeden sonra deliklerden hava üflenerek başlanmıştır. Akış periyodik hale geldikten sonra kontrol uygulanmasına başlanmıştır. Kontrol akışa 5 saniye etkiyecek şekilde, toplam 10 saniyelik akış modelleri yapılmıştır. Üflemenin gerçekleştiği 5 saniye boyunca ilgili deliklerden sürekli olarak hava üflenmiştir.

3.3.1. Kontrolün Sürüklenme Katsayısına ve Silindir Üzerinde Oluşan Girdapların Oluşma Periyoduna Etkisi

Yapılan kontrollü HAD analizleri sonucunda elde edilen C_D -zaman grafikleri Şekil 3.9'da verilmektedir. Deliklerin kapalı olduğu durum kontROLSÜZ durumdur. “hepsi açık”, “1 ve 4 açık”, “2 ve 3 açık”, “1 ve 2 açık”, “yalnız 1 açık” olarak ifade edilen durumlarda üfleme hızı akış hızının %10'u büyüklüğünde yani 3.4 m/s'dir. Son durumda ise üfleme hızı akış hızının %50'si olduğu durumdur.

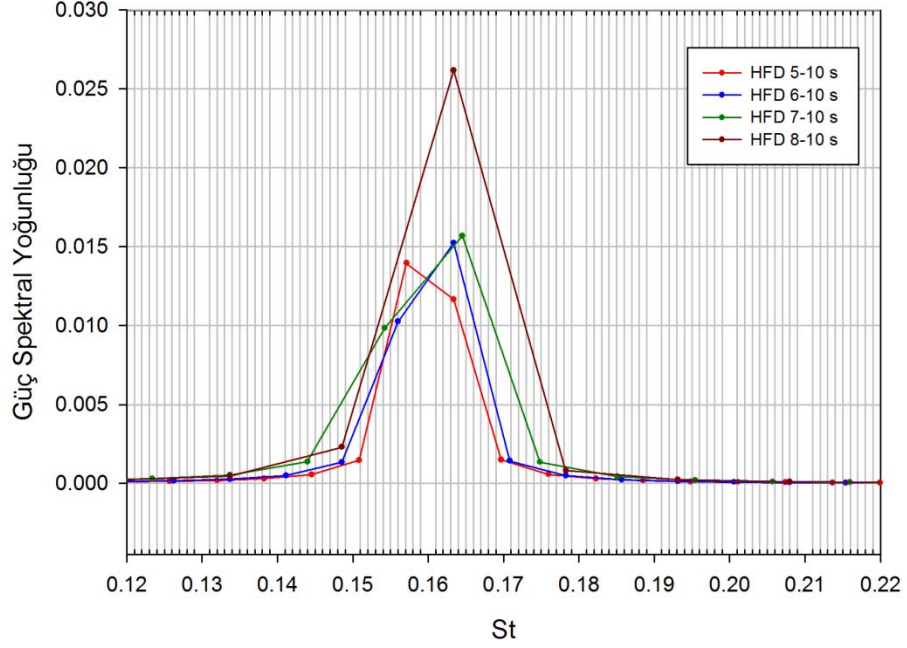


Şekil 3.10. Kontrollü ve kontrolsüz durumlarda sürüklenme katsayısının zamana göre değişimi, $Re=100$

Şekil 3.10'a bakıldığında, kontrollü akışta üfleme hızı akış hızının %10'u büyüklüğünde iken girdap oluşma periyodunun değişmediği görülmektedir. Bu durumlarda kaldırma katsayısının zamanla değişimine HFD uygulandığında da St sayısının 0.163 olarak bulunmuştur. Fakat üfleme hızı %50 akış hızında olduğu durumda akışın periyodunun değiştiği gözlemlenmektedir. Bu durum için, kaldırma katsayısındaki değişime farklı zaman aralıklarında HFD uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.11'de verilmektedir.

Akışın 5. ve 10. saniyeleri arasındaki kaldırma katsayısı değişimine HFD uygulandığında 0.157 ve 0.163 olmak üzere iki farklı St sayısı elde edilmektedir. İlerleyen zamanlarda ise akışın St sayısı 0.163'e yaklaşmakta, 8-10 s arasında 0.163 olmaktadır. Üflemenin başlamasıyla akışın periyodu değişme eğilimi gösterirken, ilerleyen zamanlarda yine kontrolsüz durumda olan periyoduna ulaşılmaktadır.

Üfleminin başladığı ilk zamanlarda periyotta gözlenen değişim, akışın sonlarında kendini faz farkı olarak göstermektedir.



Şekil 3.11. Üfleme hızının 0.5 U olduğu durumda, farklı zaman aralıklarında HFD sonuçları, Re=100

Şekil 3.11'de, kontrollü akışın çözüme 6. saniyede ulaştığı görülmektedir. Bu nedenle, ortalama değerler hesaplanırken 6. saniyeden sonraki bir periyodu başlangıç olarak seçmek en uygundur. Bu yüzden ortalama değerler akışın 6.3 ve 9.9 saniyeleri arasında hesaplanmıştır. Bu zaman aralığı 20 periyotluk bir süreçtir ve akışın 35. ve 55. periyotları arasında yer almaktadır.

KontROLSÜZ ve kontrollü durumdaki ortalama C_D değerleri ve kontrollü HAD analizleri sonucunda elde edilen ortalama C_D değerlerinin, kontROLSÜZ durumdaki ortalama C_D değerine göre yüzde değişimleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Sürüklenme katsayısı üzerinde en fazla değişim % 4.71 ile tüm delikler açıldığında görülmektedir. Silindirin arkasındaki delikler açılıp diğerleri kapatıldığında % 2.84'lük bir değişim gözlenmektedir. Sadece silindir önündeki deliklerden

üflendiğinde ise bu değişim % 1.83 olmaktadır. Bu durumda, deliklerin hepsinin açık olduğu durumda asıl farkı yaratan üfleme yerlerinin silindir arkasındaki delikler olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.2. Kontrollü HAD analizleri sonucunda elde edilen sürüklenme katsayıları ve bu değerlerin kontrolsüz duruma göre yüzde değişimleri, $Re=100$

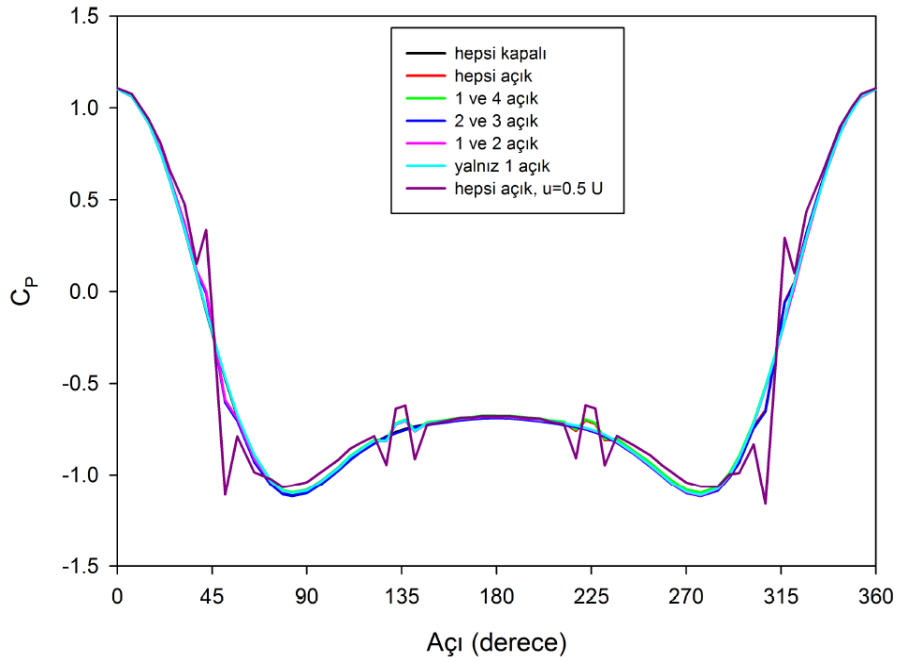
Hız	Delikler	C_D	% azalma
u=0.1 U	Kapalı	1.3406	-
	Hepsi açık	1.2774	4.71
	1 ve 4 (arka delikler)	1.3025	2.84
	1 ve 2 (üst delikler)	1.3081	2.42
	2 ve 3 (ön delikler)	1.3160	1.83
	1 (arka, üst delik)	1.3216	1.42
u=0.5 U	Hepsi açık	1.2253	8.6

Silindirin üst yüzeyindeki deliklerden üfleme yapıldığında ise değişim % 2.42 olmaktadır. Asimetrik üfleme olan bu durumda da asıl farkın silindir arkasındaki delikten kaynaklandığı düşünülerek, sonrasında sadece 1 numaralı delik ile üfleme yapılmıştır. Bu durumda oluşan fark ise % 1.42 olmaktadır ve beklenildiği gibi farkın büyük bir kısmının 1 numaralı delikten kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Ayrıca arka deliklerin ve üst deliklerin açık olduğu durumlar karşılaştırıldığında, asimetrik üflemenin simetrik üflemeden daha az etkili olduğu görülmektedir.

En büyük etkinin gözlemlendiği durum tüm deliklerin açık olduğu durumdur. Bu nedenle, üfleme hızının akışa etkisi tüm delikler açılarak incelenmiştir. Üfleme hızının 17 m/s olduğu durumda, sürüklenme katsayısındaki değişim % 8.6 olmaktadır.

3.3.2. Kontrolün Silindir Üzerindeki Basınç Katsayısı Dağılımına Etkisi

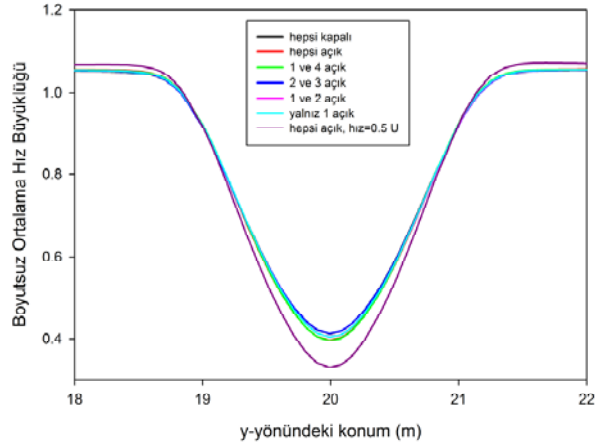
Silindir üzerindeki C_p dağılımları farklı kontrol durumları için Şekil 3.12’de görülmektedir. Ortalama değerler akışın 35. ve 55. periyotları arasında hesaplanmıştır.



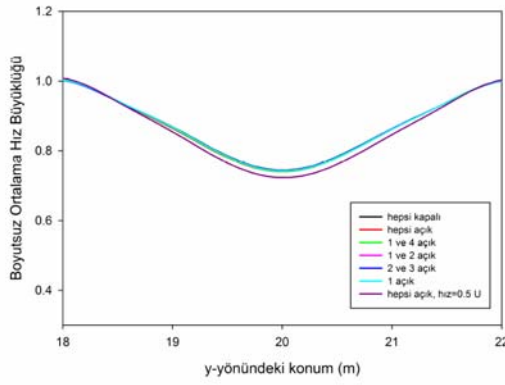
Şekil 3.12. Farklı kontrol durumları için silindir üzerindeki basınç katsayısı dağılımları, $Re=100$

Şekil 3.12’ye bakıldığında silindir üzerindeki basınç katsayısı dağılımlarının üfleme hızı akış hızının %10’u olduğu durumlar için hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Sadece üflemenin aktif olduğu üfleme noktalarında, C_p dağılımında az miktarda değişiklik görülmektedir. Diğer yandan, üfleme hızı akış hızının %50’si olduğu durumda, silindir üzerindeki basınç katsayısı üfleme noktalarında ani değişimler göstermektedir.

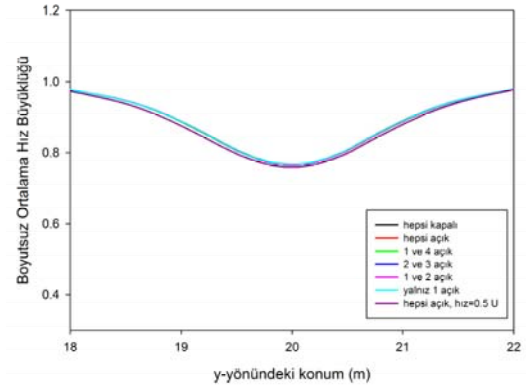
3.3.3. Kontrolün Silindir Arkasındaki Hız Profiline Etkisi



(a)



(b)



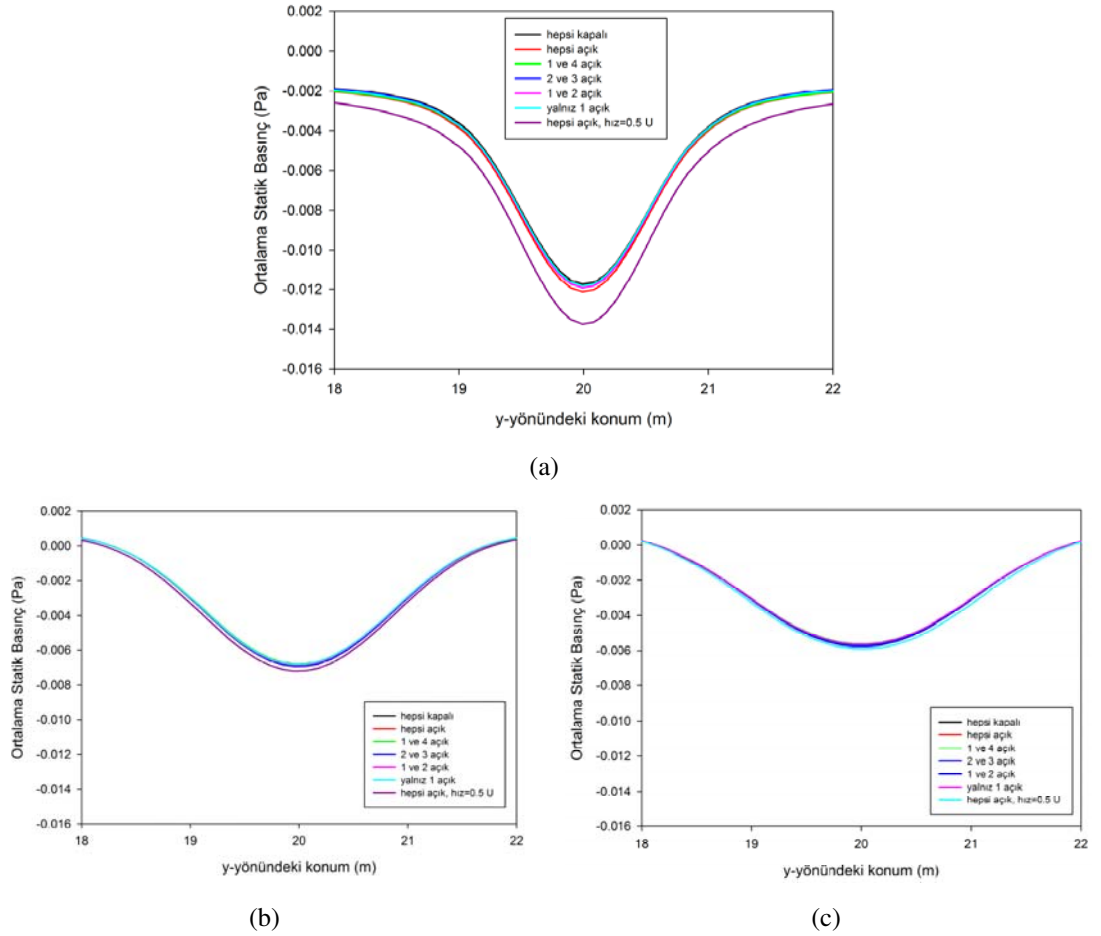
(c)

Şekil 3.13. Değişik kontrol durumlarında, silindirin arkasındaki farklı konumlarda, y-yönündeki ortalama hız dağılımları, a) $x=23$ m, b) $x=26$ m, c) $x=29$ m

Şekil 3.13'te ise değişik kontrol durumları için, silindirin arkasında yer alan değişik konumlarda (silindirin merkezinden 3D, 6D ve 9D uzaklıktaki) y-yönündeki ortalama hız profilleri görülmektedir. Ortalama değerler akışın 35. ve 55. periyotları arasında hesaplanmıştır.

Üfleme hızının farklı olması $x=23$ m uzaklıkta hız profilinde değişikliğe neden olmaktadır. Akışın ilerleyen bölgelerinde, $x=26$ m uzaklıkta üfleme hızın etkisi azalmakta, $x=29$ m uzaklıkta ise bu etki ortadan kalkmaktadır.

3.3.4. Kontrolün Silindir Arkasındaki Basınç Dağılımına Etkisi



Şekil 3.14. Değişik kontrol durumlarında, silindirin arkasındaki farklı konumlarda, y-yönündeki ortalama statik basınç dağılımları, $Re=100$, a) $x=23$ m, b) $x=26$ m, c) $x=29$ m

Şekil 3.13'te değişik kontrol durumlarında, silindirin arkasında yer alan değişik konumlarda y-yönündeki ortalama statik basınç dağılımları görülmektedir. Ortalamalar akışın 35. ve 55. periyotları arasında hesaplanmıştır.

$x=23$ m uzaklıktaki ortalama statik basınç dağılımlarında, üfleme hızının değişik olduğu durumlarda farklılık görülmektedir. Bu fark akışın ilerleyen kısımlarında ortadan kalkmaktadır.

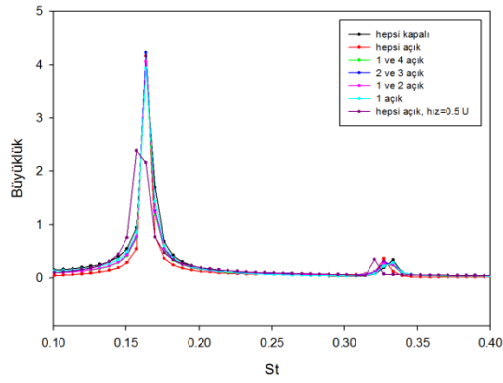
3.3.5. Kontrolün Silindir Arkasındaki Akışın Zamana Bağlı Davranışına Etkisi

Silindir arkasındaki girdapların merkezlerine denk gelen farklı noktalarda x -yönündeki hız değerleri 5. ve 10. saniyeler arasında kaydedilerek, bu değişime HFD uygulanmıştır. Bu noktalar $y=20.5$ m çizgisi üzerindeki farklı x -konumlarında seçilmiştir. İlgili grafikler Şekil 3.14'te verilmektedir.

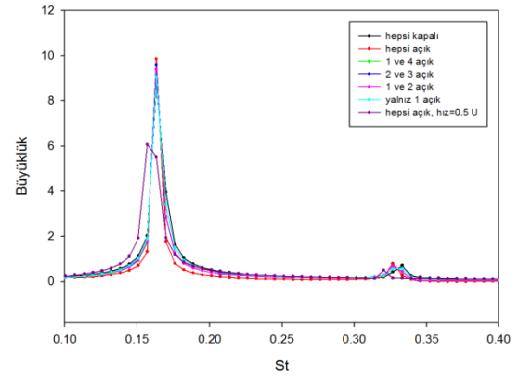
Şekil 3.15'teki grafiklerde, HFD sonucunda elde edilen St sayısı için iki adet tepe değeri olduğu görülmektedir. Birinci tepe değerine karşılık gelen St sayısı tüm kontrol yöntemlerinde 0.163 olarak bulunmaktadır. İkinci tepe değerine karşılık gelen St sayısı ise akışın kontrolü ile değişmektedir.

Zamana bağlı davranışı temsil eden birinci ve ikinci tepe değerlerine bakıldığında, 1 numaralı deliğin açılmasıyla akışın zamana bağlı davranışının değişmediği görülmektedir. Diğer kontrol yöntemlerinin zamana bağlı genel davranışı (birinci tepe değerlerini) değiştirmedeği, fakat küçük ve düzenli salınımları temsil eden ikinci tepe değerinde değişikliğe yol açtığı görülmektedir.

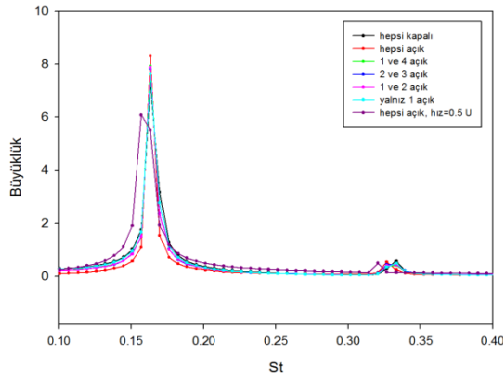
Kontrol yöntemlerinin, silindir arkası yerlerde akışın zamana bağlı davranışını etkilediği açıktır. Üfleme hızının artmasıyla St sayısı azalmakta dolayısıyla akışın periyodu artmaktadır. Bu da, akışın zamana bağlı davranışının üfleme ile değiştirilebileceğinin göstergesidir. Birinci tepe değerine karşılık gelen St sayısında değişim olmamasının nedeni, üfleme gücünün sınır tabakayı yeterince etkileyememesidir.



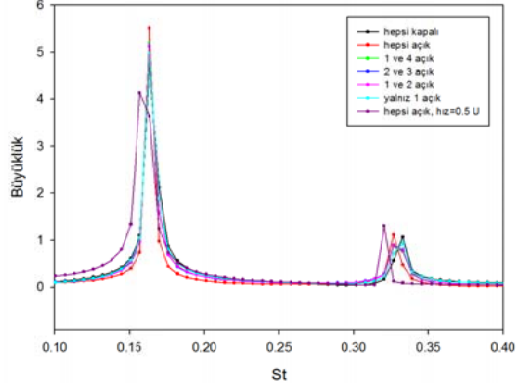
(a)



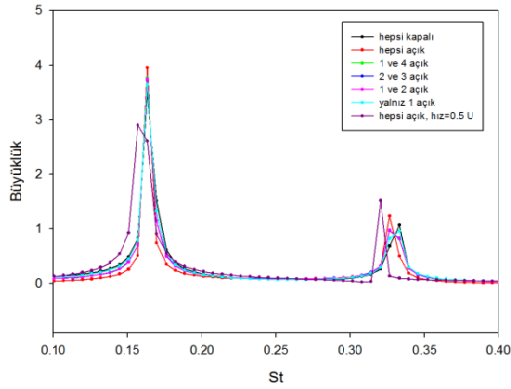
(b)



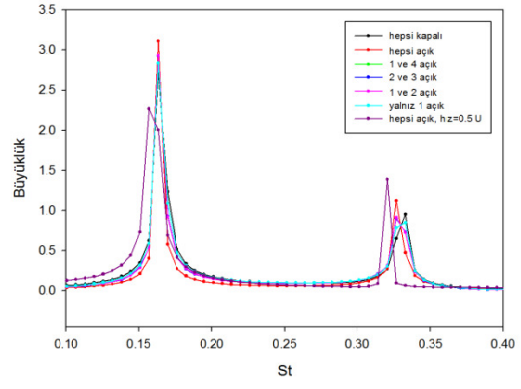
(c)



(d)



(e)

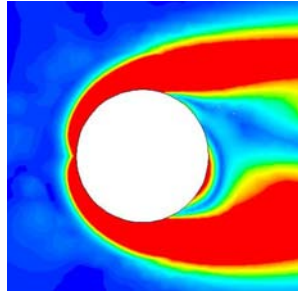


(f)

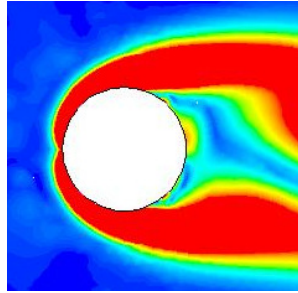
Şekil 3.15. Farklı x-konumlarındaki x-hızının zamana bağlı değişimine uygulanan HFD sonuçları, a) $x=21$ m, b) $x=22$ m, c) $x=23$ m, d) $x=24$ m, e) $x=25$ m, f) $x=26$ m

3.3.6. Üfleme Hızının Silindir Arkasındaki Akış Yapısına Etkisi

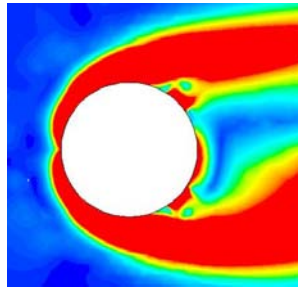
Şekil 3.16'da ise deliklerin tümünün açık ve tümünün kapalı olduğu durumlarda, akışın 10. Saniyesinde silindir yakınındaki vortisite konturları görülmektedir. Silindir üzerinden üfleme yönteminin silindir arkasındaki girdap yapısını değiştirdiği açıkça görülmektedir. Üfleme hızı akış hızının %10'u olduğu durumda tüm delikler kapalıyken deliğin yakınında oluşan döngülerin kaybolduğu, buna karşılık silindir arkasında başka girdapların oluştuğu görülmektedir. Hız %50 akış hızı kadar olduğunda ise üfleme noktalarındaki düzensizlikler ve silindir arkasında yarattığı girdaplar açıkça görülmektedir. Hızın 17 m/s olduğu durumda, C_p dağılımındaki hızlı değişimler vortisite konturlarından da anlaşılmaktadır.



a) Tüm delikler kapalı



b) Tüm delikler açık, üfleme hızı=0.1 U



c) Tüm delikler açık, üfleme hızı=0.5 U

Şekil 3.16. Kontrolsüz ve tüm deliklerin açık olduğu durumlardaki yakın plan vortisite büyüklüğü konturları, $Re=100$

3.3.7. Kontrolün Laminer Akışa Etkisi Üzerine Yorumlar

Yapılan irdelemelerin sonucunda, silindir üzerinden hava üfleme yönteminin silindir üzerinde yer alan tüm deliklerin açık olduğu durumda daha etkili olduğu görölmektedir. Silindir üzerinden hava üfleme ile akışın silindire uyguladığı sürüklenme etkisi azaltılmaktadır. Silindir üzerinden hava üfleme yöntemi, silindir üzerindeki sınır tabakayı etkilemekte ve akışkandan silindire olan momentum transferini azaltmaktadır. Bu konu ile ilgili ayrıntılı yorumlar Bölüm 6'da verilmiştir.

4. SİLİNDİR ÜZERİNDEKİ TÜRBÜLANSLI AKIŞ HAD ANALİZLERİ

Silindir üzerindeki akışta, $Re=20,000$ 'den sonra girdap yolu bütünüyle türbülanslıdır [10]. $Re=20,000$ için literatürde karşılaştırma amaçlı kullanılacak deneysel ve sayısal çalışmalar mevcuttur. Bu çalışma kapsamında, silindir üzerindeki türbülanslı akış HAD simülasyonları ile modelleneyecektir.

HAD simülasyonları, ANSYS Fluent (v12) programında Basınç-Tabanlı Navier-Stokes denklemleri çözülerek yapılmıştır. Bu yöntemde akış sıkıştırılmaz olarak kabul edilmektedir. Çözüm, hesaplama zamanı kısıtlamasından dolayı iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda kullanılan sayısal yöntemler ise aşağıdaki gibidir:

- Basınç-Tabanlı Bağlaşık Algoritma
- Basınç-hız bağlaşımı için COUPLED
- Mekânda ayrıklaştırma için Birinci ve İkinci Dereceden Upwind Yöntemi
- Zamanda ayrıklaştırma için Birinci Dereceden Kapalı (Implicit) Ayrıklaştırma
- Gradyanların ve türevlerin hesaplanması için Hücre-Tabanlı En Küçük Kareler Yöntemi

Bu yöntemler ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 2'de yer almaktadır. Bu yöntemler ile birlikte farklı ağ yapıları, zaman adımları ve türbülans modelleri kullanılarak akışı minimum hata ve en uygun zamanla çözümlene yolu aranmıştır. İlgili çalışmalar aşağıdaki kısımlarda açıklanmaktadır.

4.1. Ağ Yapısı ve HAD Analizi Özellikleri

4.1.1. Akış Özellikleri

Türbülanslı akış analizleri için $Re=20,000$ akış koşulu kullanılmıştır. Akışkanın özellikleri ve ortam koşulları; yoğunluk= 0.01056 kg/m^3 , hız= 34 m/s , viskozite= $1.795 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$, basınç= 872.36 Pa olarak tanımlanmıştır.

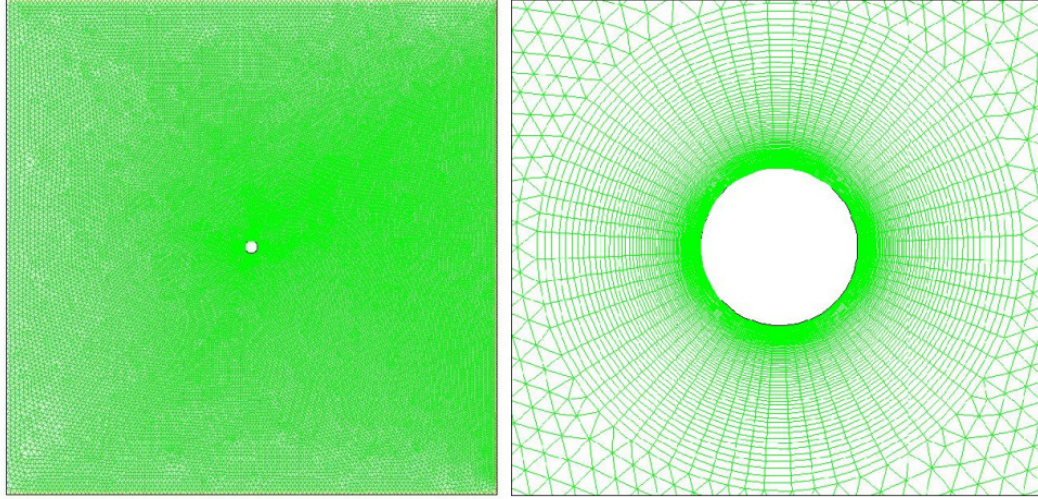
Yapılan çözümlerde, hız değerleri hesaplama alanının giriş yüzeyinde tanımlanmıştır. Girişteki türbülans yoğunluğu %10, uzunluk ölçeği ise 0.07 m olarak tanımlanmıştır. Çıkış yüzeyinde çıkış-açıklığı sınır koşulu, üst ve alt yüzeylerde ise simetri koşulu kullanılmıştır. Silindir hareketsiz ve yüzeyi pürüzsüz olarak, akışın hızı ise silindirin yüzeyinde sıfır olarak tanımlanmıştır.

4.1.2. Ağ Yapısı

NASA'nın sitesinde [39] yer alan otomatik bir hesaplayıcıya akışın Reynolds sayısı, karakteristik uzunluk ve istenilen y^+ (boyutsuz ilk hücre yüksekliği) değeri girilerek ilk hücrenin yüksekliği (ds) hesaplatılmıştır. Buna göre $Re=20,000$, $D=1 \text{ m}$ ve $y^+=0.2$ için $ds=0.1545 \text{ mm}$ olarak hesaplanmaktadır. Bu bilgilerden yararlanılarak, oluşturulan ağ yapısının ilk hücre yüksekliği $ds=0.15 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir. Ağ yapısı oluşturulurken, silindir etrafına 1.05 büyüme oranı ile 120 katman hücre yerleştirilmiştir. $Re=20,000$ için sınır tabaka kalınlığı yaklaşık 10 mm 'dir. Bu parametreler ile sınır tabaka 29 hücreyle modellenmektedir.

Ağ yapısı silindir etrafında dörtgen, hesaplama alanının diğer kısımlarında ise üçgen elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Silindir arkası alandaki düzensizlikleri daha net gözlemleyebilmek ve bu bölgedeki nümerik hata yayılımının daha az olmasını sağlamak amacıyla silindir arkası alandaki ağ yapısı sıklaştırılmıştır (Şekil 4.1). Girişte 100 , alt ve üst yüzeylerde 120 , çıkış yüzeyinde ise 200 düğüm noktası kullanılmıştır. Hesaplama alanının boyutları ise $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ olup, silindir hesaplama

alanının merkezindedir. Ayrıca kontrollü türbülanslı akış simülasyonlarında silindir üzerinden hava üfleme için kullanılmak üzere, kontrollü laminar akış simülasyonlarında da kullanılmış olan aynı özelliklerdeki dört adet delik silindir üzerine konumlandırılmıştır. Oluşturulan ağ yapısı Şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 4.1. Ağ yapısı-1T ve yakın planı

Ağ yapıları ile ilgili detaylı bilgiler Çizelge 4.1’de verilmektedir.

Çizelge 4.1. Ağ yapısı-1T ile ilgili bilgiler

Ağ Yapısı	Hücre Sayısı	Yüzey Sayısı	Düğüm Sayısı
1T	72178	112649	40471

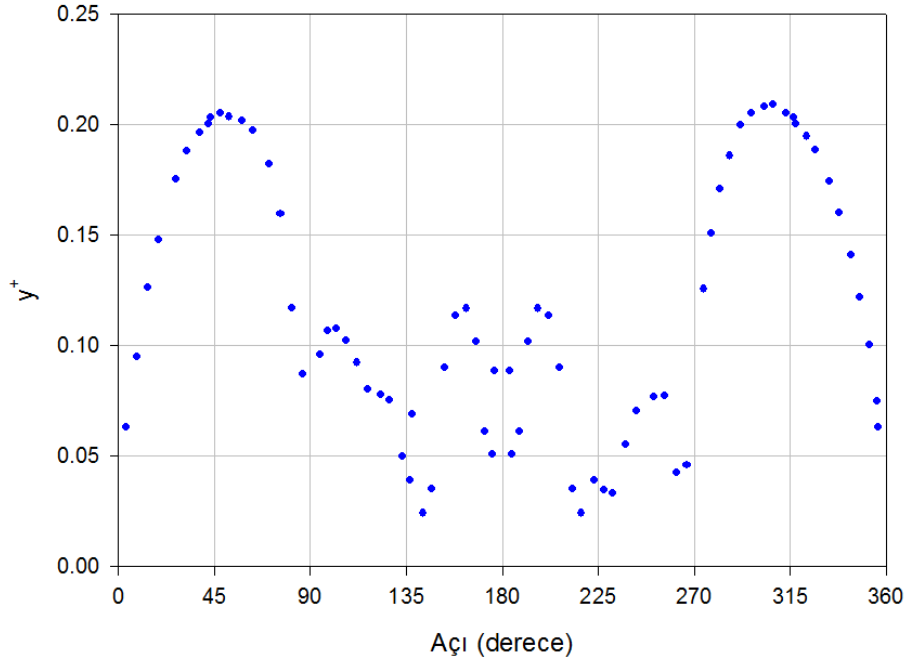
Bu ağ yapısı ile $Re=20,000$ akış koşulu için silindir üzerindeki delikler kapatılarak HAD analizleri yapılmıştır. HAD analizlerinde zaman adımı $\Delta t=1 \times 10^{-3}$ s seçilmiştir. Analizlerde en basit türbülans modeli olan Spalart-Allmaras modeli kullanılmıştır. Akışın 5 saniyesinin modellenmesi sonucunda elde edilen sürüklenme katsayısı (C_D) ve Strouhal sayısı (St) değerleri Çizelge 4.2’de verilmektedir.

Çizelge 4.2. Ağ yapısı–1T ile yapılan HAD analizleri ile elde edilen sonuçlar, $Re=20,000$

Ağ Yapısı	Türbülans Modeli	C_D	St
1T	Spalart-Allmaras (Low-Re damping)	1.17	0.22

Çizelge 1.1 ve Çizelge 1.2’de de görüldüğü gibi $Re=20,000$ için literatürde karşılaşılan deneysel C_D değeri 1.2, deneysel St değeri ise 0.21’dir. Oluşturulan ağ yapısı ile elde edilen sonuçlar deneysel değerler ile yakın çıkmıştır. Sürüklenme katsayısına bakıldığında, deneysel veri ile olan fark %2.5’tir. Literatürde karşılaşılan St sayısı ile olan fark ise %4.7’dir. Elde edilen değerlerin deneysel değerlere yakın olması nedeniyle, çözüme Ağ yapısı–1T ile devam edilmesine karar verilmiştir.

Ayrıca yapılan çözüm sonucunda elde edilen y^+ değerinin silindir üzerindeki dağılımı grafiği Şekil 4.2’de verilmektedir.



Şekil 4.2. Silindir yüzeyindeki y^+ dağılımı, $Re=20,000$

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi silindir yüzeyindeki en büyük y^+ değeri 0.2 civarındadır. Bu değer silindir yüzeyindeki sınır tabakanın modellenenbilmesi için yeterlidir.

4.1.3. Zaman Adımı Çalışması

HAD analizlerinde $\Delta t=1 \times 10^{-3}$ s ve $\Delta t=0.5 \times 10^{-3}$ s zaman adımları kullanılarak çözümün zaman adımı büyüklüğünden bağımsız olup olmadığına bakılmıştır. Akışın St sayısının 0.2 civarında olduğu ve akış hızının 34 m/s olduğu göz önünde bulundurulduğunda akışın periyodu yaklaşık 0.147 saniye bulunmaktadır. $\Delta t=1 \times 10^{-3}$ s seçilmesiyle akışın bir periyodu 147 zaman adımıyla, 0.5×10^{-3} s ile 294 zaman adımıyla modellenmektedir. Boyutsuz zaman adımı $\Delta t=1 \times 10^{-3}$ s için $t^*=\Delta t.U/D=0.034$, $\Delta t=0.5 \times 10^{-3}$ s için $t^*=0.017$ olmaktadır.

Spalart-Allmaras türbülans modeli, ağ çalışması sırasında deneysel yakın sonuçlar verdiği için, zaman adımı çalışmasında da tercih edilmiştir. Farklı zaman adımlarıyla yapılan HAD analizleri sonucunda elde edilen sayısal değerler ve bu değerlerin literatürdeki deneysel değerler ($C_D=1.2$, $St=0.21$) ile olan farkı Çizelge 4.3’te verilmektedir.

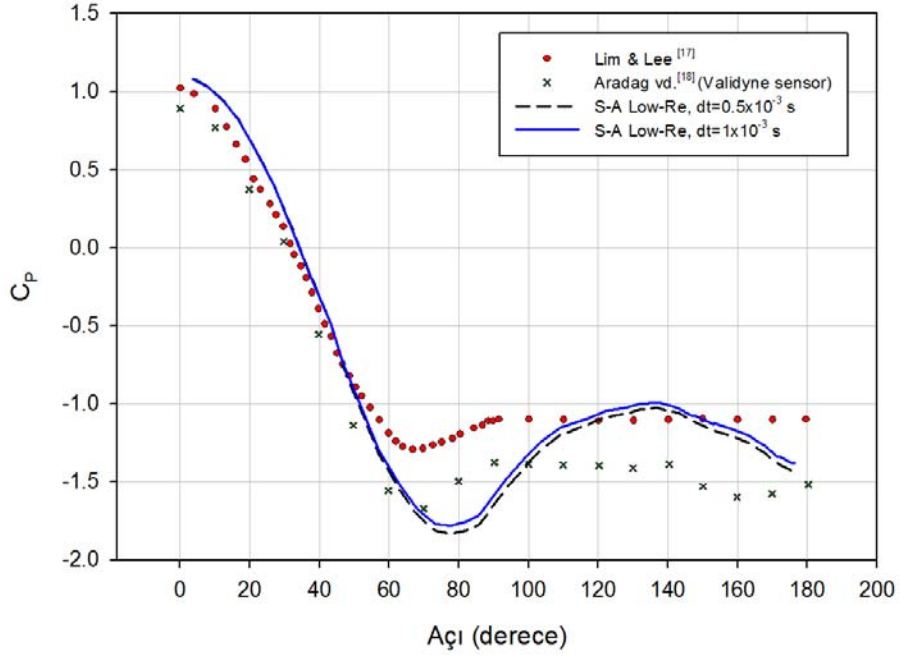
Çizelge 4.3. Farklı zaman adımları ile yapılmış HAD analizleri sonucunda elde edilen C_D değerleri ve bu değerlerin deneysel değerler ile karşılaştırılması, $Re=20,000$

Δt (s)	Türbülans Modeli	C_D	C_D % fark	St	St % fark
1×10^{-3}	S-A (Low-Re damping)	1.17	2.5	0.22	4.7
0.5×10^{-3}	S-A (Low-Re damping)	1.20	0	0.23	9.5

S-A: Spalart-Allmaras

Zaman adımı çalışması sonucunda Spalart-Allmaras modelinin $\Delta t=0.5 \times 10^{-3}$ s ile literatürdeki deneysel C_D değeri için aynı sonucu verdiği görülmüştür. Diğer yandan, St sayısı için hatanın arttığı görülmektedir. Her iki zaman adımı ile yapılan çözümlerin sonucunda elde edilen silindir etrafındaki basınç katsayısı (C_P)

dağılımları ve literatürdeki deneysel dağılımlar ile karşılaştırılması Şekil 4.3'te görülmektedir. Ortalama basınç katsayısı dağılımları akışın 35. ve 55. Periyotları arasında ortalama alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.3. HAD analizleri sonucunda elde edilen C_p dağılımları ve literatürdeki deneysel C_p dağılımları ile karşılaştırılması, $Re=20,000$

Şekil 4.3'e bakıldığında, iki boyutlu HAD analizleri sonucunda elde edilen C_p dağılımlarının birbiri ile oldukça yakın olduğu görülmektedir. Diğer yandan bu dağılımlar, literatürdeki deneysel dağılımlar ile farklılık göstermektedir. Bu nedenle, türbülanslı akış HAD simülasyonlarında başka türbülans modellerinin de denenmesine karar verilmiştir.

4.1.4. Türbülans Modeli Seçimi

Türbülans modelinin akışın simülasyon sonuçları üzerindeki etkisini gözlemlemek üzere farklı türbülans modelleri ile HAD analizleri yapılmıştır. Denenen yöntemler ve sonuçları Çizelge 4.4'te görülmektedir.

Çizelge 4.4. Farklı zaman adımları ve türbülans modelleri ile yapılmış HAD analizleri sonucunda elde edilen C_D ve St değerleri ile bu değerlerin deneysel değerler ile olan farkları, $Re=20,000$

No	Δt $\times 10^{-3}$ (s)	Zamanda Ayrıklaştı rma	Türbülans Modeli	C_D	C_D % fark	St	St % fark
1	1	1. derece	S-A (Low-Re damping)	1.17	2.5	0.22	4.7
2	1	1. derece	S-A	1.04	13.3	0.22	4.7
3	1	1. derece	SST k- ω	1.27	5.8	0.22	4.7
4	1	1. derece	SST k- ω (Low-Re correction)	1.30	7.7	0.22	4.7
5	1	1. derece	RSM	1.20	0	0.23	9.5
6	1	2. derece	S-A (Low-Re damping)	1.24	3.3	0.23	9.5
7	1	2. derece	SST k- ω	1.33	10.8	0.23	9.5
8	1	2. derece	RSM	1.25	4.2	0.25	19.0
9	0.5	1. derece	S-A (Low-Re damping)	1.20	0	0.23	9.5
10	0.5	1. derece	RSM	1.21	0.8	0.24	14.2
11	0.5	2. derece	S-A (Low-Re damping)	1.23	2.5	0.23	9.5

S-A: Spalart-Allmaras, SST k- ω : Shear Stress Transport k- ω , RSM: Reynolds Stress Modeling

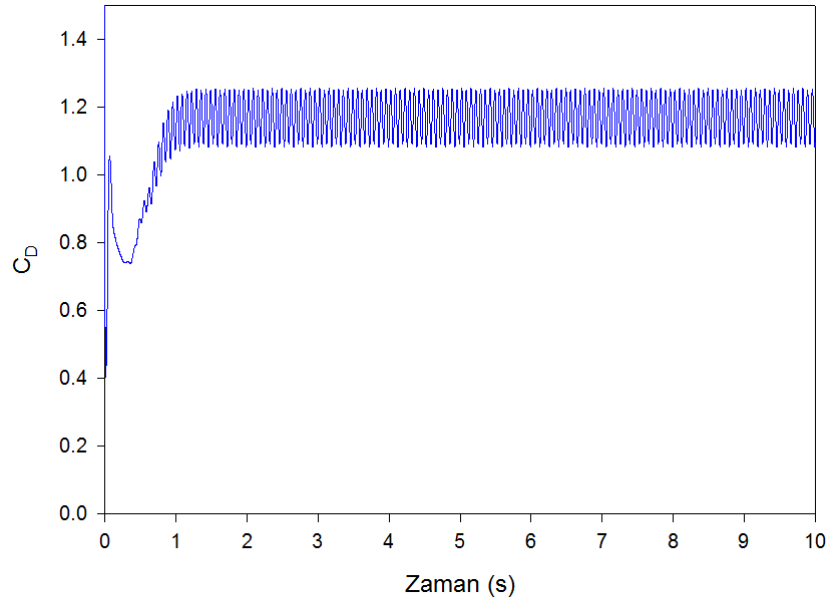
Yapılan HAD analizleri sonucunda 5 ve 9 numaralı yöntemlerin sürüklenme katsayısında deneysel çalışmalar ile aynı sonucu verdiği görülmektedir. Fakat bu yöntemler ile elde edilen St sayısının deneysel değer ile farkı %9.5'tir. Diğer yandan 1 numaralı yöntem C_D ve St değerleri için sırasıyla %2.5 ve %4.7 fark ile deneysel değerlere yakın sonuçlar vermektedir. Şekil 4.2'de görülen C_p dağılımlarına bakıldığında ise 1 ve 9 numaralı yöntemlerin arasında çok büyük benzerlik olduğu, 1 numaralı yöntemin az bir farkla deneysel dağılıma daha yakın olduğu görülmektedir. Diğer yöntemlere göre çok daha az hesaplama zamanı gerektiren 1 numaralı yöntemin sonuçları, akış kontrolü için yeterli doğruluktadır. Hem deneysel değerlere

yakın sonuçlar vermesinden, hem de hesaplama süresinin çok daha az olmasından ötürü, kontrolsüz ve kontrollü akış simülasyonlarında 1 numaralı yöntem kullanılmıştır.

4.2. Kontrolsüz Türbülanslı Akış Simülasyonları

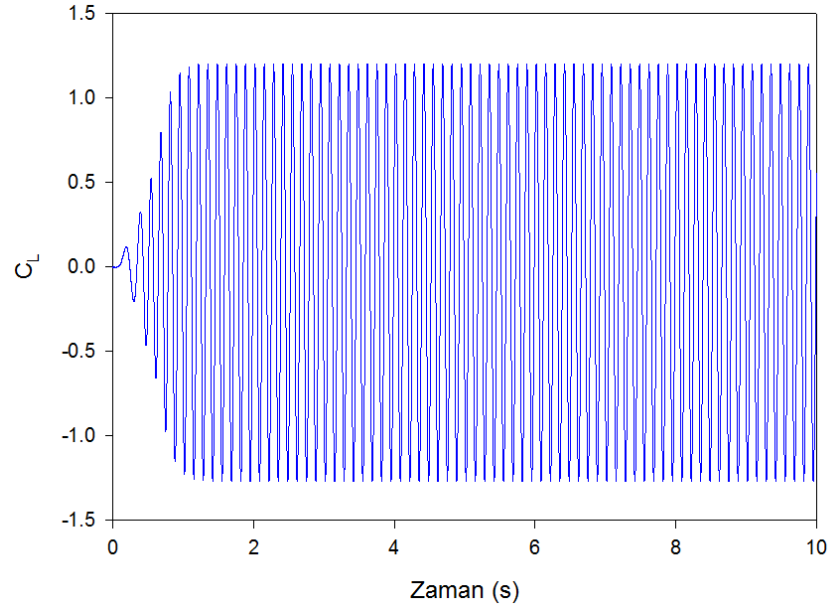
Kontrolsüz akış simülasyonları silindir üzerinde yer alan delikler kapalı tutularak Ağ yapısı-1T, Spalart-Allmaras türbülans modeli, zaman adımı 0.001 s ve $Re=20,000$ akış koşulları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Kontrolsüz akış simülasyonları sonucunda elde edilen zamana bağlı C_D grafiği Şekil 4.4'te görülmektedir.



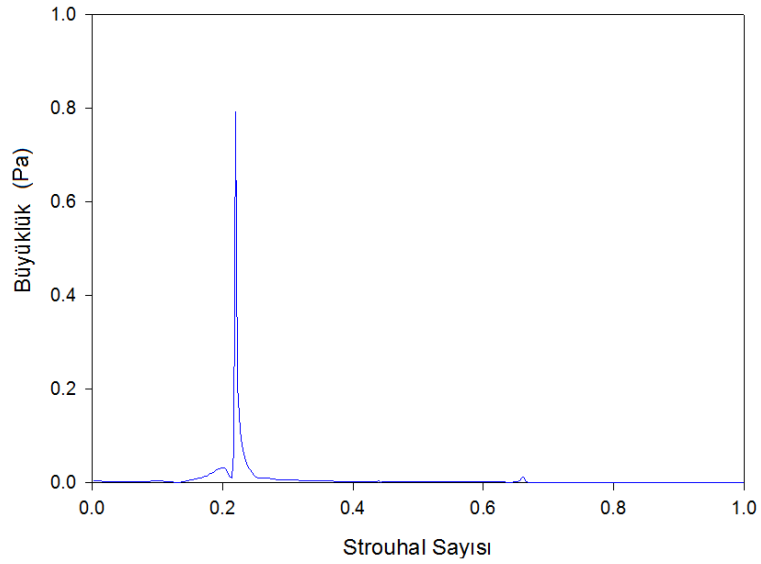
Şekil 4.4. Sürüklenme katsayısının zamana göre değişimi, $Re=20,000$

Kontrolsüz akış simülasyonları sonucunda elde edilen zamana bağlı kaldırma katsayısı (C_L) grafiği ise Şekil 4.5'te görülmektedir.



Şekil 4.5. Kaldırma katsayısının zamana göre değişimi, $Re=20,000$

Akışın 0 ile 10. saniyeleri arasındaki C_L değişimine Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) uygulandığında, Şekil 4.6'da görülen Büyüklük-Strouhal sayısı grafiği elde edilmiştir.



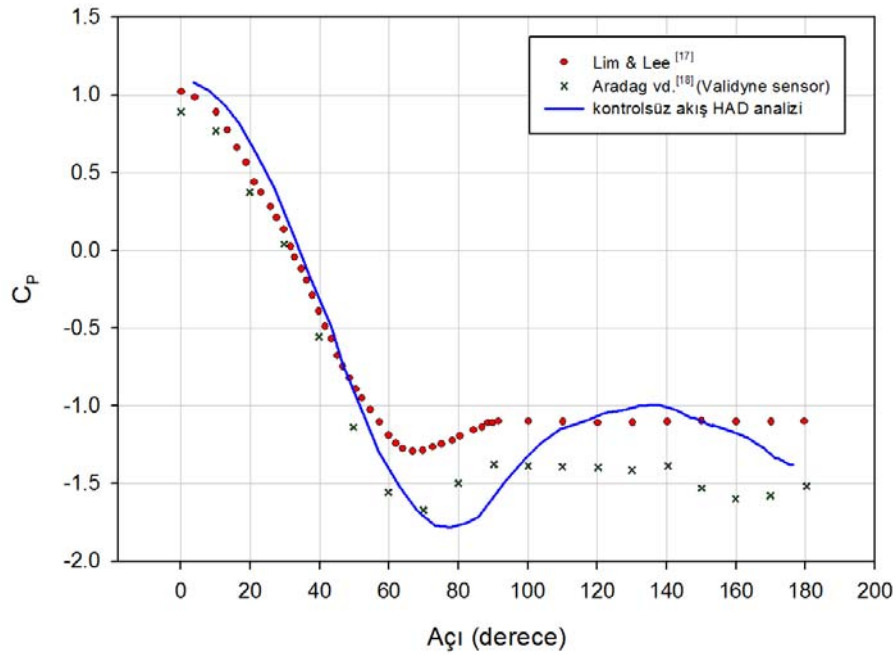
Şekil 4.6. C_L değişimine uygulanan HFD sonucunda elde edilen Strouhal sayısı grafiği, $Re=20,000$

Akışın St sayısının 0.22 olduğu Şekil 4.6'da görülmektedir. Akışın periyodu ise $St=0.22$ değerinden yararlanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$St = \frac{fD}{U} = \frac{D}{TU} \quad , \quad 0.22 = \frac{1m}{T \times 34m/s} \quad \Rightarrow \quad T \cong 0.134s$$

Türbülanslı akış kendini 0.134 saniyede tekrar etmektedir.

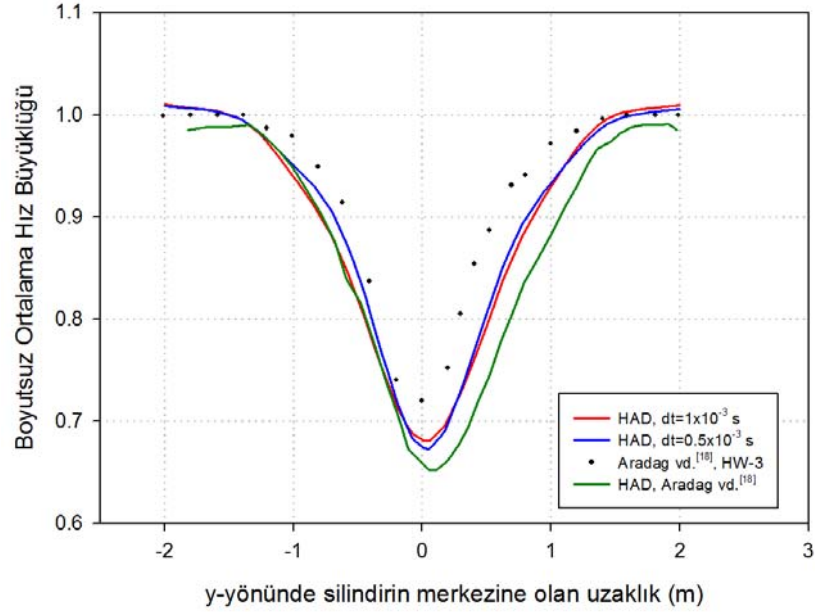
Silindir üzerindeki basınç katsayısı dağılımı ve deneysel dağılım ile karşılaştırılması Şekil 4.7'de verilmektedir.



Şekil 4.7. Silindir üzerindeki basınç katsayısı dağılımları ve deneysel dağılımlar ile karşılaştırılması, $Re=20,000$

Türbülanslı akışın üç boyutlu hareketlere sahip olduğu ve simülasyonlardaki çözümün iki-boyutlu olduğu göz önünde bulundurulduğunda elde edilen basınç katsayısı dağılımının deneysel verilere yakın olduğu gözlemlenmektedir.

Şekil 4.8’de ise silindir arkasındaki boyutsuz ortalama hız dağılımının deneysel ve diğer sayısal çalışmalar ile karşılaştırması yapılmaktadır. Boyutsuz ortalama hız değerleri, ortalama hız büyüklüğü değerlerinin akış hızı büyüklüğüne (34 m/s) bölünmesiyle elde edilmiştir.

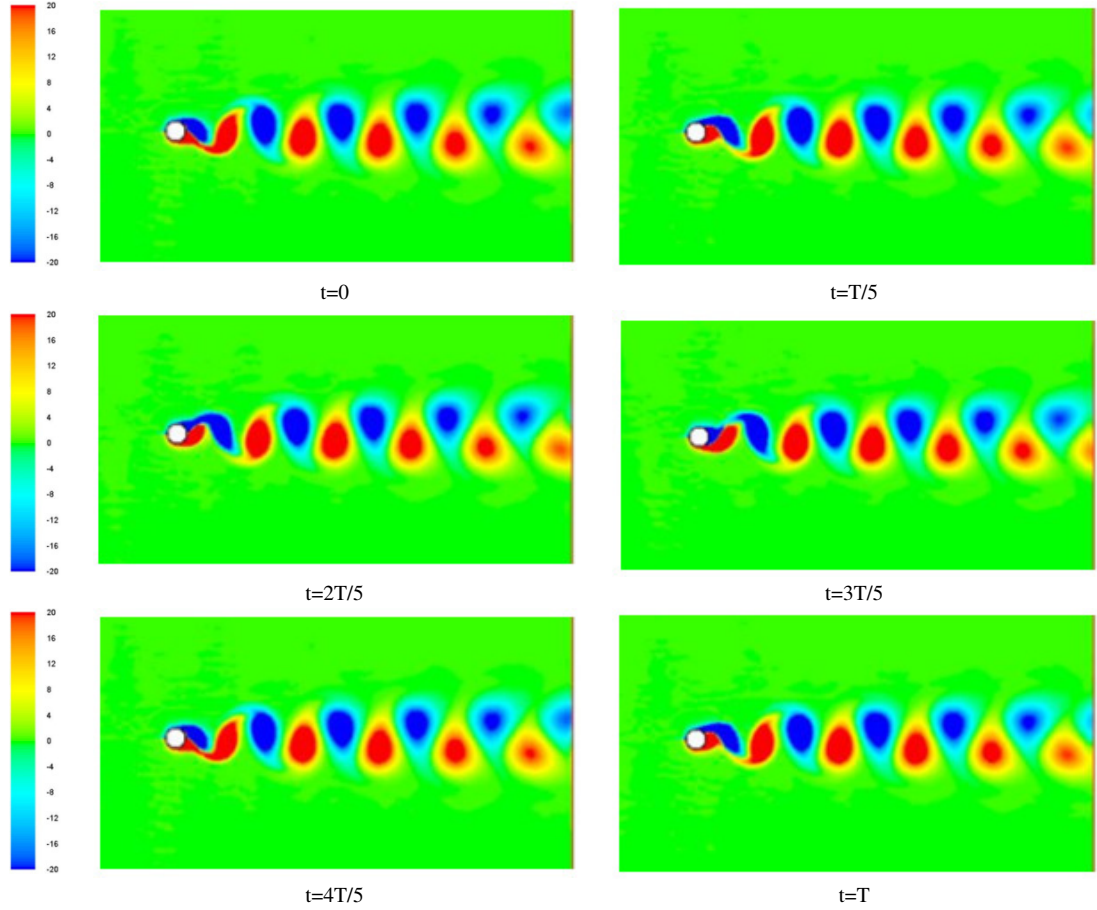


Şekil 4.8. Silindirin merkezinden 3D uzaklıktaki ($x=23$ m) boyutsuz ortalama hız büyüklüğü dağılımı ve deneysel ve sayısal çalışmalar ile karşılaştırılması, $Re=20,000$

Silindir arkasındaki boyutsuz ortalama hız büyüklüğü dağılımı, literatürdeki deneysel ve sayısal çalışmalarda yer alan boyutsuz ortalama hız dağılımlarına oldukça yakındır. Silindir arkasında elde edilecek olan verilerin DAY için uygunluğu da bu şekilde kanıtlanmış olmaktadır.

Şekil 4.9’da bir periyot içerisindeki vortisite konturlarının, akışın 9.000 ve 9.134 saniyeleri arasındaki değişimi görülmektedir. Bu konturlara bakıldığında, 9.000 ve 9.134 saniyelerdeki anlık durum görüntülerinin aynı olduğu görülmektedir. Bu sonuç, HFD ile elde edilen sonucu desteklemekte ve akışın periyodunun 0.134 saniye olduğunu göstermektedir. Bu grafiklerde, türbülanslı akışa ait vortisite konturları

negatif ve pozitif değerler almaktadır. Bunun sebebi, çizilen konturların vortisite büyüklüğü konturları değil vortisite konturları olmasıdır.



Şekil 4.9. Akışın bir periyodunu gösteren vortisite konturları, $Re=20,000$

4.3. Kontrollü Türbülanslı Akış Simülasyonları

Kontrollü türbülanslı akış simülasyonlarında da kontrollü laminar akış simülasyonlarında kullanılan kontrol yöntemleri tercih edilmiştir. Bunun sebebi, laminar akış kontrolünde kullanılan kontrol yöntemlerinin türbülanslı akışı da aynı Şekilde etkileyip etkilemeyeceğini gözlemlemektir. Ayrıca, fleme hızı akış hızının %50'si olduğu durumda yalnızca arka delikler açılmıŐ ve böylece farklı bir kontrol yöntemi de incelenmiştir.

Konumları Şekil 3.3'te gösterilmiş olan dört adet delik değişik kombinasyonlarda açılıp kapatılarak ve tüm deliklerin açık olduğu durumda üfleme hızı değiştirilerek kontrollü türbülanslı HAD analizleri yapılmıştır. Denenen kontrol yöntemleri şu şekildedir:

- Deliklerin hepsinden hava üfleme, üfleme hızı=%10 akış hızı
- 1. ve 4. deliklerden hava üfleme (arka delikler), üfleme hızı=%10 akış hızı
- 1. ve 2. deliklerden hava üfleme (üst delikler), üfleme hızı=%10 akış hızı
- 2. ve 3. deliklerden hava üfleme (ön delikler), üfleme hızı=%10 akış hızı
- Yalnızca 1. delikten hava üfleme (arka üst delik), üfleme hızı=%10 akış hızı
- Deliklerin hepsinden hava üfleme, üfleme hızı=%50 akış hızı
- 1. ve 4. deliklerden hava üfleme (arka delikler), üfleme hızı=%50 akış hızı

Laminer akış kontrolünde olduğu gibi silindirin önünden-arkasından üfleme, simetrik-asimetrik üfleme, üfleme hızının farklı olması durumları incelenmiştir.

Akış kontrolü, HAD analizlerinin başlangıcında oluşan sayısal hesaplama hatalarından kurtulmak amacıyla 5 saniyelik kontrolsüz HAD analizleri sonrasında devreye alınmıştır. 5 saniye süresince kontrol yöntemi akışa etkimiş ve toplam 10 saniyelik akış simülasyonları yapılmıştır.

4.3.1. Kontrolün Sürüklenme Katsayısına ve Silindir Üzerinde Oluşan Girdapların Oluşma Periyoduna Etkisi

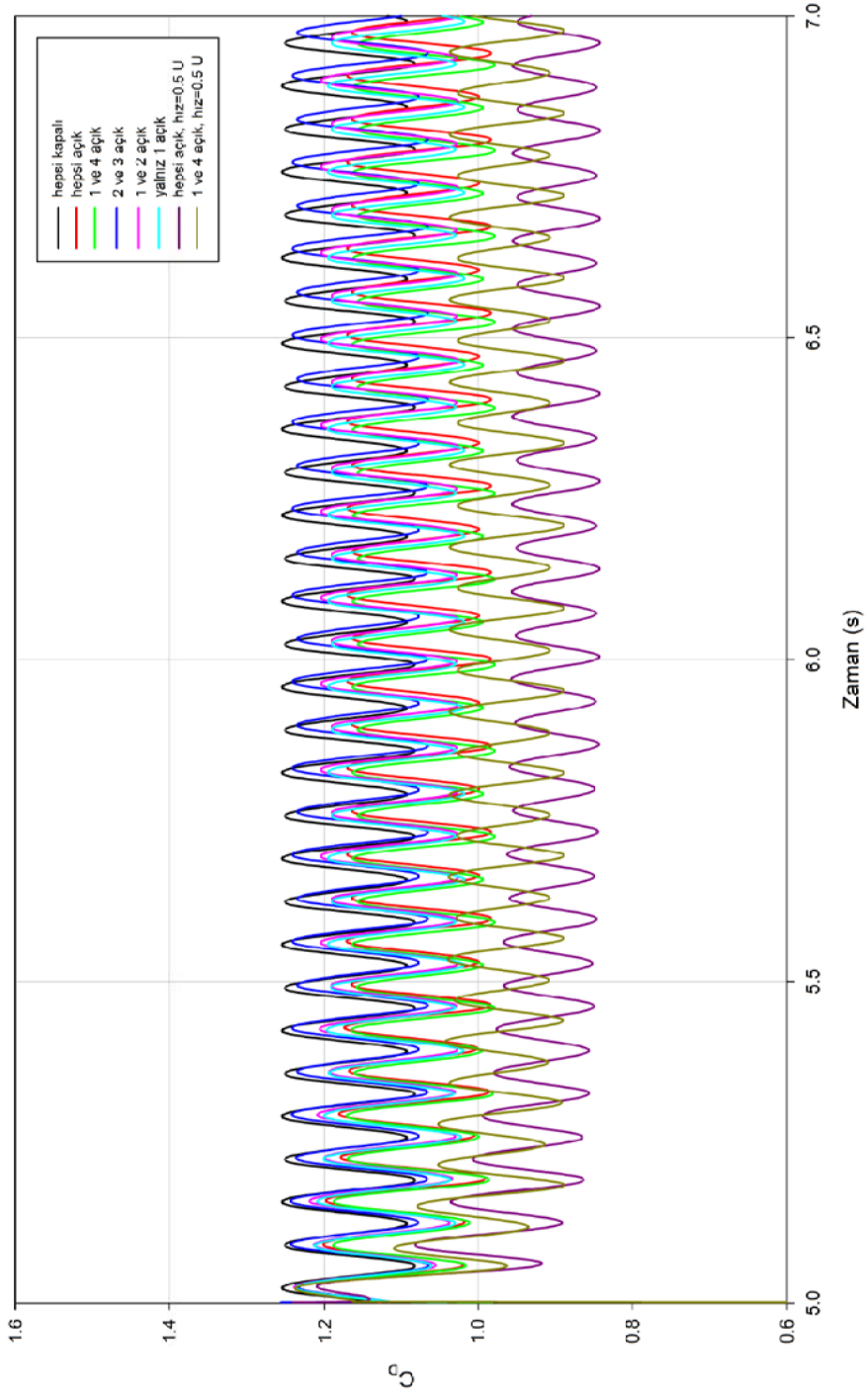
Yapılan kontrollü HAD analizleri sonucunda elde edilen ortalama C_D değerleri Çizelge 4.5'te verilmektedir. Ortalama C_D değerleri akışın 6. ve 10. saniyeleri arasında hesaplanmıştır. Bunun sebebi, kontrol uygulamasından sonra çözüme akışın 6. saniyesinde ulaşılmasıdır.

Çizelge 4.5. Kontrollü HAD analizleri sonucunda elde edilen sürüklenme katsayıları ve bu değerlerin kontrolsüz duruma göre yüzde değişimleri, $Re=20,000$

Hız	Delikler	C_D	% azalma
u=0.1 U	Kapalı	1.1725	-
	Hepsi açık	1.0806	7.8
	1 ve 4 (arka delikler)	1.0742	8.4
	2 ve 3 (ön delikler)	1.1563	1.4
	1 ve 2 (üst delikler)	1.1147	4.9
	1 (arka, üst delik)	1.1103	5.3
u=0.5 U	Hepsi açık	0.8992	23.3
	1 ve 4 (arka delikler)	0.9656	17.6

Çizelge 4.5'e bakıldığında, üfleme hızı akış hızının %10'u yapıldığı durumda en etkin kontrol yönteminin arkadaki deliklerden hava üfleme olduğu görülmektedir. Bu nedenle kontrollü laminer akış analizlerinden farklı olarak, akış kontrolü için üfleme hızı akış hızının %50'si olduğu durumda arka deliklerden hava üfleme yöntemi de denenmiştir. Üfleme hızı akış hızının %50'si olduğu durumda tüm deliklerden hava üfleme yöntemi de incelenmiş ve %23.3 gibi yüksek bir oranla sürüklenme katsayısındaki en fazla değişime bu yöntem ile ulaşılmıştır.

C_D değerlerinin zamana göre değişimi tüm kontrol durumları için Şekil 4.10'da verilmektedir.



Şekil 4.10. Kontrollü ve kontrolsüz durumlarda sürüklenme katsayısının zamana göre değişimi, $Re=20,000$

Şekil 4.10'da sürükleme katsayısının zamana bağlı davranışının hava üfleme ile değiştiği görülmektedir. Kontrollü türbülanslı akışların St sayısını hesaplamak için kaldırma katsayısının zamanla değişimine farklı zamana aralıklarında HFD uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.6'da görülmektedir.

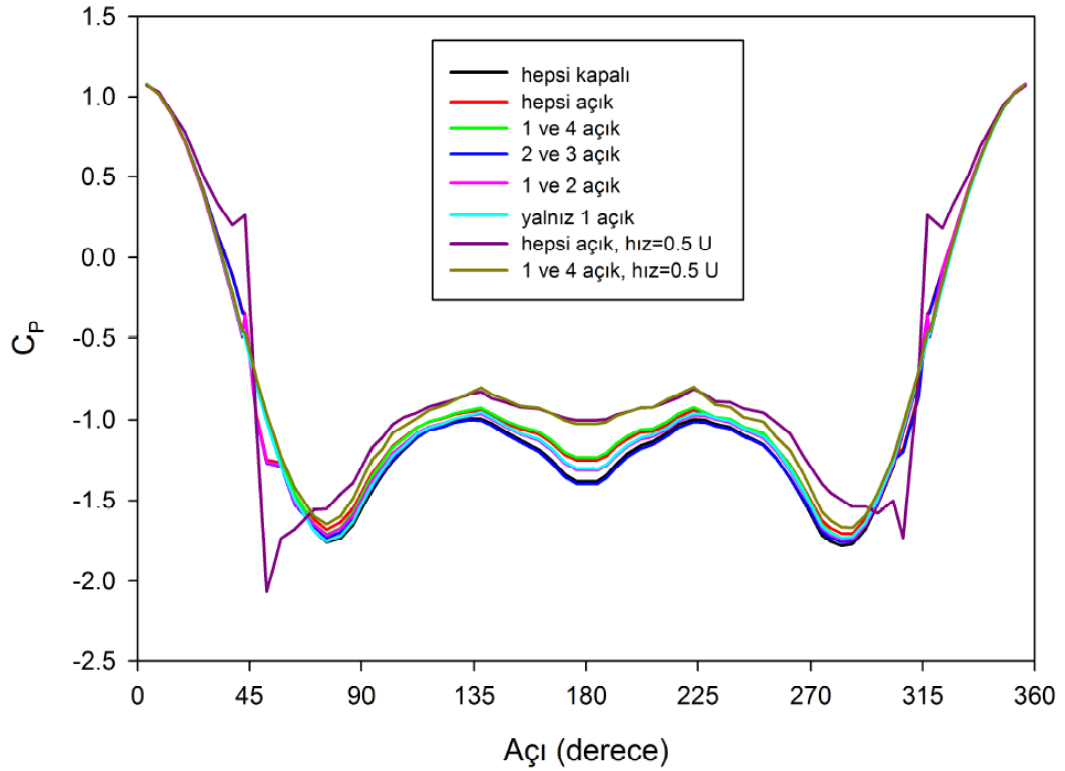
Çizelge 4.6. Kaldırma katsayısının zamanla değişimine farklı zaman aralıklarında uygulanan HFD sonucu elde edilen St sayıları, $Re=20,000$

Üfleme Hızı	Delikler	St			
		HFD 5-10 s	HFD 6-10 s	HFD 7-10 s	HFD 8-10 s
u=0.1 U	Kapalı	0.220	0.220	0.220	0.220
	Hepsi açık	0.220	0.216	0.216	0.223
	1 ve 4 (arka delikler)	0.220	0.223	0.216	0.223
	2 ve 3 (ön delikler)	0.220	0.216	0.216	0.223
	1 ve 2 (üst delikler)	0.220	0.223	0.216	0.223
	1 (arka, üst delik)	0.220	0.220	0.216	0.223
u=0.5 U	Hepsi açık	0.214	0.215	0.216	0.223
	1 ve 4 (arka delikler)	0.233	0.230	0.226	0.223

Çizelge 4.6 verilen St sayısı değerlerine göre, akışın 5 ile 8. saniyeleri arasında akışın zamana bağlı davranışında değişimler görülmektedir. Diğer yandan bu fark, akışın 8. saniyesinden sonra ortadan kalkmaktadır. Akışın St sayısı, tüm kontrol yöntemleri sonucunda 0.223 olarak elde edilmiştir. Bu St sayısı ile akışın periyodu kontrol durumunda 0.132 s olmaktadır. Kontrolsüz durumdaki periyoda göre %1.4 farklı olan bu sayı akışın periyodunun küçültüldüğünü göstermektedir.

4.3.2. Kontrolün Silindir Üzerindeki Basınç Katsayısı Dağılımına Etkisi

Silindir üzerindeki C_p dağılımları farklı kontrol durumları için Şekil 4.11’de görülmektedir. Ortalama C_p dağılımı akışın 50. ve 70. periyotları arasında hesaplanmıştır.

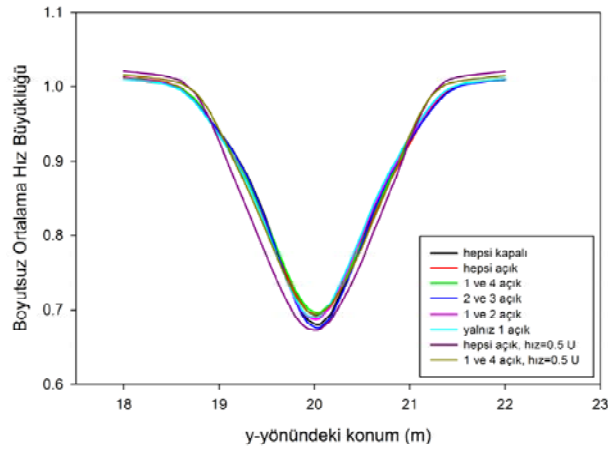


Şekil 4.11. Farklı kontrol durumları için silindir üzerindeki basınç katsayısı dağılımları, $Re=20,000$

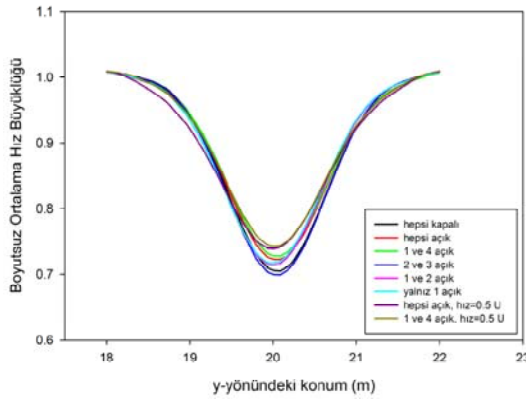
Silindir üzerindeki basınç katsayısı dağılımlarına bakıldığında, akış hızının %50’si büyüklüğündeki bir hızla tüm deliklerden hava üflendiğinde özellikle 2 ve 3 numaralı deliklerin etrafında basınç katsayısında ani değişimler görülmektedir. Üfleme hızı akış hızının %50’si olduğu durumda sadece 1 ve 4 numaralı delikler açıldığında ise böyle bir düzensizliğe rastlanmamaktadır. Üfleme hızı akış hızının %10’u büyüklüğünde olduğu kontrol durumlarında ise basınç katsayısı dağılımları kontrolsüz durumdaki dağılım ile oldukça yakındır.

4.3.3. Kontrolün Silindir Arkasındaki Hız Profiline Etkisi

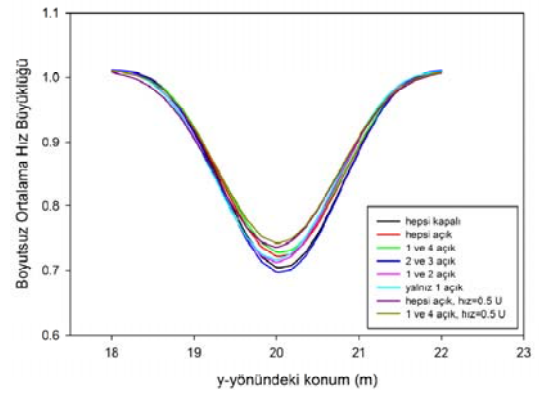
Şekil 4.12’de ise değişik kontrol durumları için, silindirin arkasında yer alan farklı konumlarda (silindirin merkezinden 3D, 6D ve 9D uzaklıktaki) y-yönündeki ortalama hız profilleri görülmektedir. Ortalama değerler akışın 50. ve 70. periyotları arasında hesaplanmıştır.



(a)



(b)



(c)

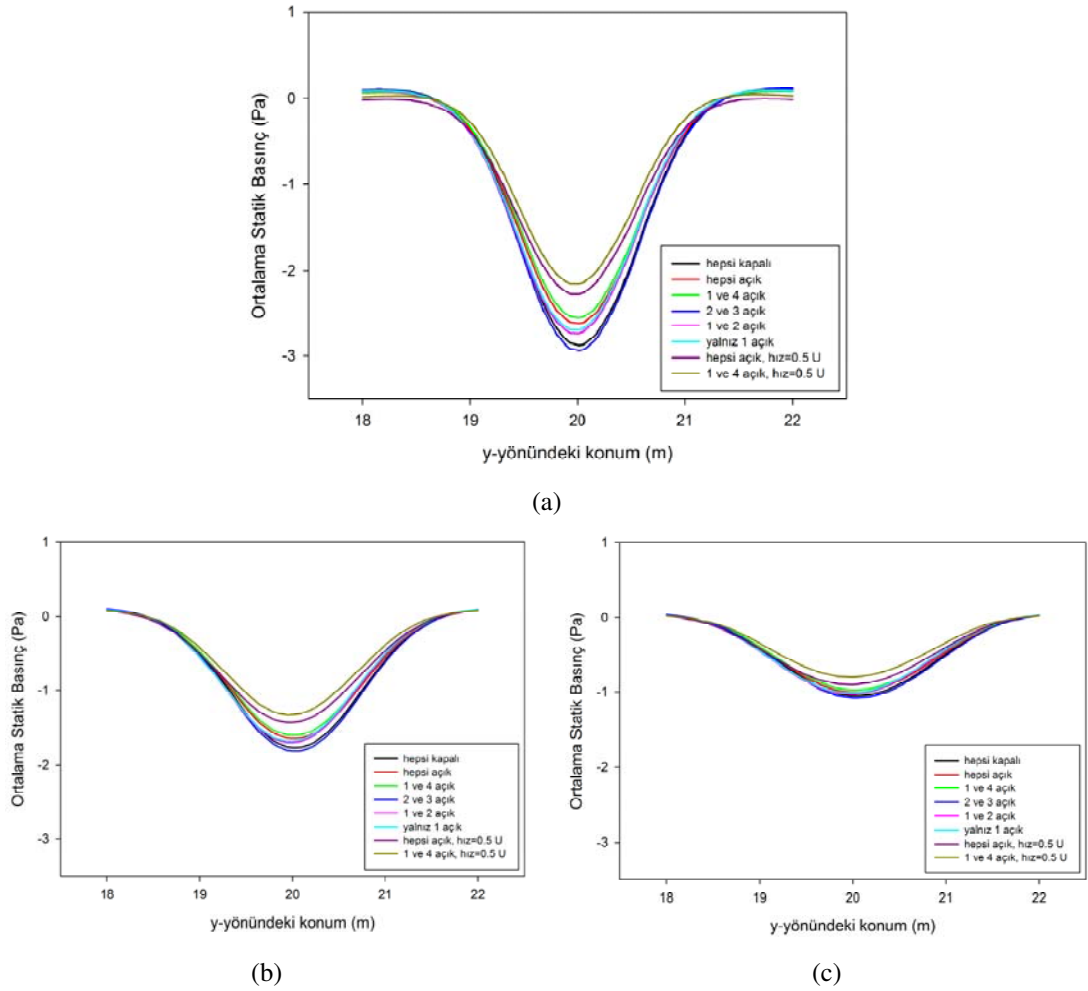
Şekil 4.12. Değişik kontrol durumlarında, silindirin arkasındaki farklı konumlarda, y-yönündeki ortalama hız dağılımları, $Re=20,000$, a) $x=23$ m, b) $x=26$ m, c) $x=29$ m

Şekil 4.12’de, silindirden 3D uzaklıktaki çizgide ($x=23$ m’de) bütün kontrol durumları için hız profili çok benzer şekilde elde edilmiştir. Diğer yandan, akışın ilerleyen kısımlarında, farklı kontrol yöntemleri ile elde edilmiş hız profilleri

arasındaki fark artmaktadır. Arka deliklerden akış hızının %50'si büyüklüğünde bir hızla hava üflenmesi durumunda silindirin arkasında kalan iz bölgesindeki hız büyüklüğü azalmaktadır.

4.3.4. Kontrolün Silindir Arkasındaki Basınç Dağılımına Etkisi

Şekil 4.13'te değişik kontrol durumlarında, silindirin arkasında yer alan değişik konumlarda y-yönündeki ortalama statik basınç dağılımları görülmektedir. Ortalamalar akışın 50. ve 70. periyotları arasında hesaplanmıştır.



Şekil 4.13. Değişik kontrol durumlarında, silindirin arkasındaki farklı konumlarda, y-yönündeki ortalama statik basınç dağılımları, $Re=20,000$, a) $x=23$ m, b) $x=26$ m, c) $x=29$ m

Şekil 4.13'te, ön deliklerden hava üfleme dışındaki tüm kontrol yöntemleri ile ortalama statik basınç dağılımlarında kontrolsüz durumdaki dağılıma göre fark yaratıldığı görülmektedir. %50 hız ile 1 ve 4 numaralı (arka) deliklerden hava üflendiği takdirde statik basınç dağılımı gözle görülür derecede değişmektedir. Bu fark akışın ilerleyen kısımlarında azalmaktadır.

4.3.5. Kontrolün Silindir Arkasındaki Akışın Zamana Bağlı Davranışına Etkisi

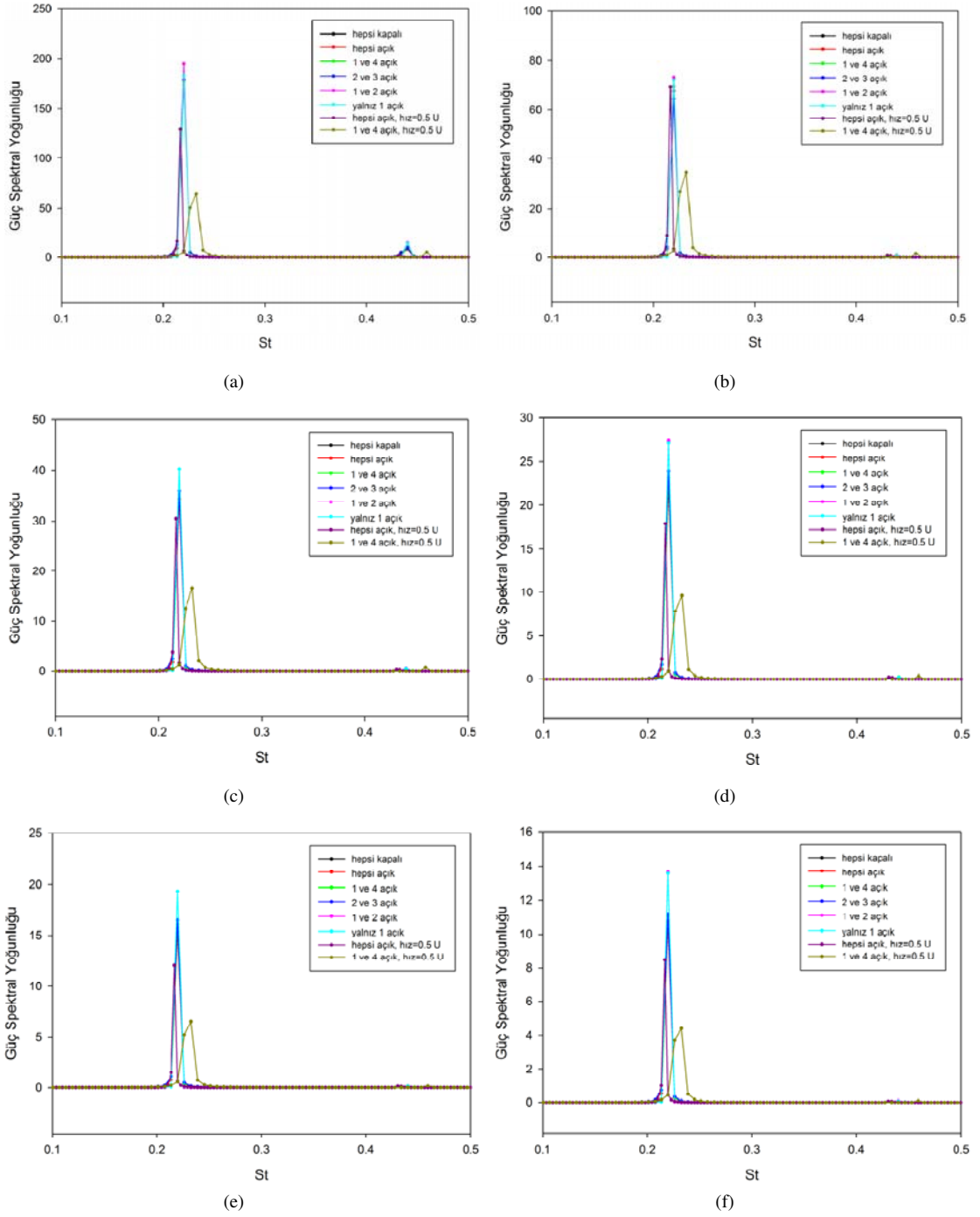
Silindir arkasındaki girdapların merkezlerine denk gelen farklı noktalarda x-yönündeki hız değerleri 5. ve 10. saniyeler arasında kaydedilerek, bu değişime HFD uygulanmıştır. Bu noktalar $y=20.5$ m çizgisi üzerindeki farklı x-konumlarında seçilmiştir. İlgili grafikler Şekil 4.14'te verilmektedir.

Şekil 4.14'teki grafiklerde, HFD sonucunda elde edilen St sayısı için iki adet tepe değeri görülmektedir. İkinci tepe değerleri, birinci tepe değerlerine göre önemsenmeyecek büyüklüktedir. Ayrıca, tüm kontrol yöntemleri için tepe değerlerinin büyüklükleri akışın ilerleyen kısımlarına doğru azalmaktadır.

Birinci tepe değerine karşılık gelen St sayısı tüm kontrol yöntemleri için yaklaşık 0.22 olarak bulunmaktadır. Yalnızca arka deliklerden akış hızının %50'si hızla hava üflenmesi durumunda St sayısı artmaktadır.

1 ve 4 numaralı (arka) deliklerden akış hızının %50'si büyüklüğündeki bir hızla hava üflenmesi durumunda silindir üzerindeki türbülanslı akışın zamana bağlı davranışı değişerek, St sayısı yaklaşık 0.23 olmaktadır. Bu da akışın frekansını artırmaktadır.

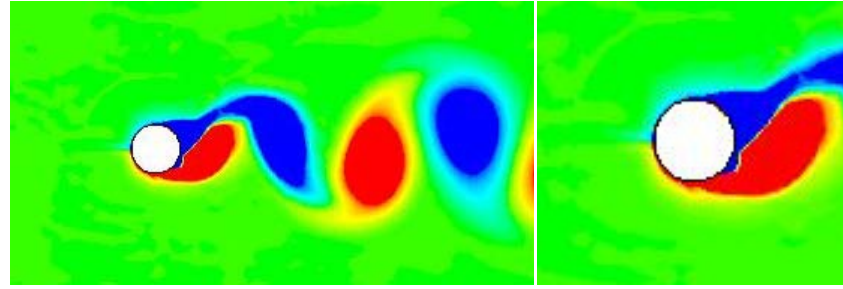
İkinci tepe değerine karşılık gelen St sayısı ise bütün kontrol yöntemleri ile değişmektedir. Fakat bu değer, diğer tepe değerine göre önemsenmeyecek büyüklüktedir. Akış tek bir periyottan oluşmaktadır ve bu periyot von Kármán girdaplarına aittir.



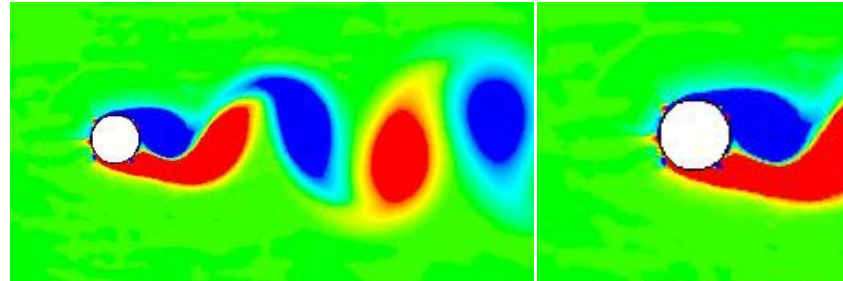
Şekil 4.14. Farklı x-konumlarındaki x-hızının zamana bağlı değişimine uygulanan HFD sonuçları, a) $x=21$ m, b) $x=22$ m, c) $x=23$ m, d) $x=24$ m, e) $x=25$ m, f) $x=26$ m

4.3.6. Üfleme Hızının Silindir Arkasındaki Akış Yapısına Etkisi

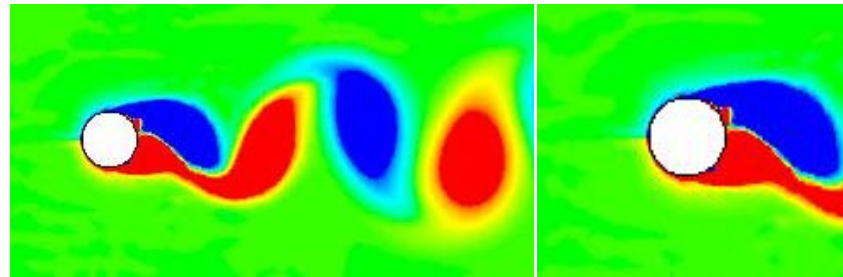
Şekil 4.15 kontrolsüz ve en etkili iki kontrol durumunda silindir üzerinde ve arkasındaki yakın bölgede akışın 10. saniyesindeki vortisite konturlarını göstermektedir. Kontrolü durumlar üfleme hızı akış hızının %50'si büyüklüğündeyken tüm deliklerden ve yalnızca arka deliklerden hava üflendiği durumlardır. Bu grafiklerde, silindir üzerinden üfleme yapılan deliklerin etkisi görülmektedir. Diğer yandan, laminer akışın yapısını çok daha fazla değiştiren kontrol yöntemleri, türbülanslı akış yapısını laminer akıştaki kadar etkilememektedir.



(a) Tüm delikler kapalı



(b) Tüm delikler açık, üfleme hızı=0.5 U



(c) 1 ve 4 numaralı delikler açık, üfleme hızı=0.5 U

Şekil 4.15. Kontrolsüz ve kontrol etkisinin en fazla olduğu durumlardaki yakın plan vortisite konturları, $t=10s$, $Re=20,000$

4.3.7. Kontrolün Türbülanslı Akışa Etkisi Üzerine Yorumlar

Yapılan kontrollü türbülanslı akış HAD analizleri sonucunda, üfleme hızı akış hızının %10'u büyüklüğünde olduğunda en etkili yöntemin arka deliklerden hava üfleme yöntemi olduğu görülmektedir. Bu yöntem ile C_D değerinde %8.4'lük azalma elde edilmiştir.

Üfleme hızı akış hızının %50'si yapıldığı durumda ise en etkili yöntemin C_D değerinde %23.3 azalma ile tüm deliklerden hava üfleme yöntemi olduğu görülmüştür. Arka deliklerden hava üfleme ile C_D değerinde %17.6 oranında bir azalma olmaktadır.

Akışın zamana bağlı davranışı, kontrol yöntemlerinin uygulanmaya başladığı anda değişmekte fakat ilerleyen zaman içerisinde tüm yöntemler aynı frekansa ulaşmaktadır. Kontrol yöntemlerinin tümü akışın St sayısında %1.4 artmaya ve akışın periyodunda %1.4'lük azalmaya yol açmaktadır. Bu değişim, silindir üzerinde oluşabilecek titreşim sıklığının artmasına neden olabilir.

Silindir üzerindeki basınç katsayısı dağılımlarına bakıldığında ise, tüm deliklerden $0.5 U=17$ m/s hızla hava üflenmesi dışındaki yöntemlerle düzgün bir dağılım elde edildiği görülmektedir. Tüm delikler 17 m/s hava üflendiği durumda ise 2 ve 3 numaralı deliklerin civarında C_P değerinde ani değişimler olmaktadır. Bu da, 2 ve 3 numaralı deliklerde yorulma, deformasyon gibi etkilere yol açabilir.

Akışın ilerleyen kısımlarında ise girdapların periyodunun arka deliklerden 17 m/s hızla hava üflenmesi dışındaki tüm kontrol yöntemleri için aynı olduğu görülmektedir. Arka deliklerden 17 m/s hava üfleme durumunda ise frekans artmakta, periyot azalmaktadır.

Silindirin arkasındaki akış yapısının ise en etkili kontrol durumunda bile değişmediği gözlemlenmektedir.

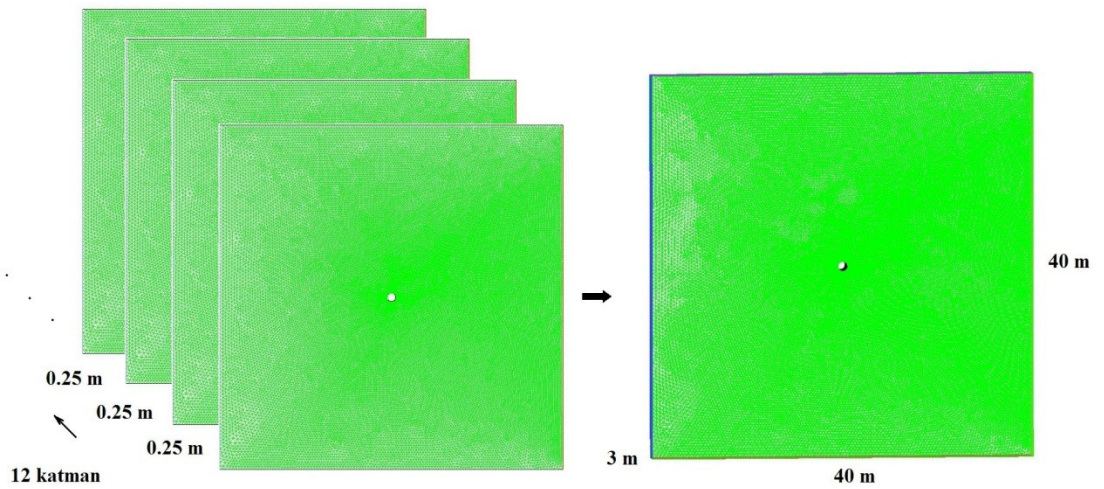
5. TÜRBÜLANSLI AKIŞIN ÜÇ-BOYUTLU HAD ANALİZİ

Silindir üzerindeki türbülanslı akış, Bölüm 4'te yer alan silindir üzerindeki iki-boyutlu türbülanslı akış HAD analizinde kullanılan yöntemler ile yine URANS denklemleri çözülerek üç-boyutlu olarak modellenmiştir. İki-boyutlu çözüm ile üç-boyutlu çözüm arasında sonuç farklılıkları olup olmayacağını irdelemek amacıyla yapılmış olan bu çalışmada sadece kontrolsüz akış analizlerine yer verilmektedir.

Giriş, çıkış, üst, alt ve silindir üzerindeki sınır koşulları iki-boyutlu analizdeki sınır koşulları ile aynıdır. Ön ve arka yüzeylerde simetri koşulu uygulanmıştır.

5.1. Ağ Yapısı

Bölüm 4'te yer alan Ağ yapısı-1T, ANSYS ICEM CFD programı kullanılarak üç-boyutlu olacak şekilde yeniden yapılandırılmıştır. 0.25 m kalınlığındaki toplam 12 adet katman ardı sıra dizilerek üç-boyutlu ağ yapısı oluşturulmuştur. İki boyutlu elemanlar birleştirilerek prizma şeklindeki hacimsel elemanlar oluşturulmuştur. Üç-boyutlu ağ yapısının oluşturulması ve üç-boyutlu ağ yapısı Şekil 5.1'de gösterilmektedir.



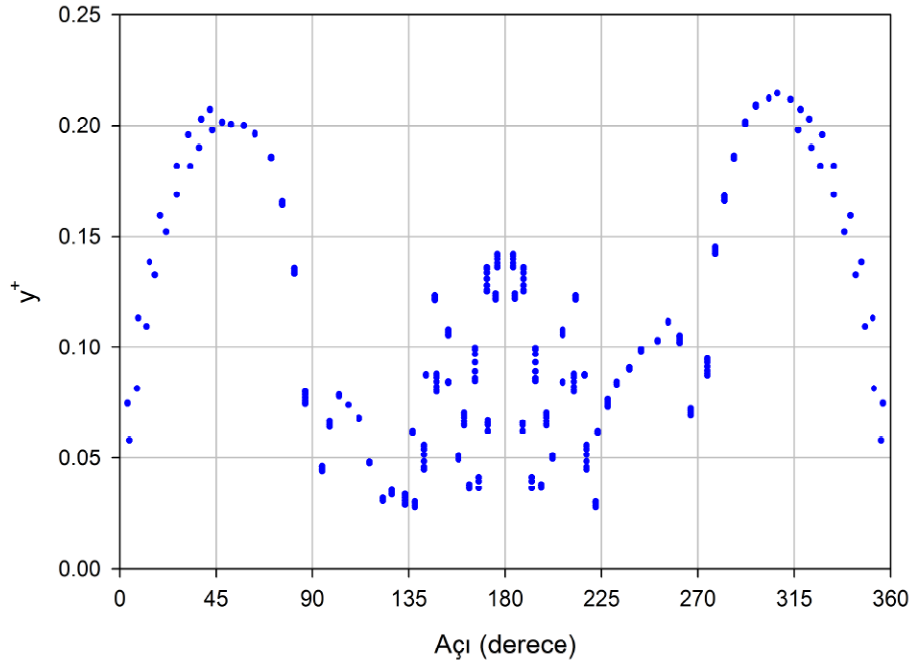
Şekil 5.1. Üç-boyutlu ağ yapısının oluşturulması

Üç-boyutlu ağ yapısı ile ilgili bilgiler Çizelge 5.1’de verilmektedir.

Çizelge 5.1. Üç-boyutlu ağ yapısı ile ilgili bilgiler

Hücre sayısı	Yüzey sayısı	Düğüm sayısı
866136	2290102	526124

HAD analizi sonrasında, sınır tabakanın doğru bir şekilde modellenip modellenmediğini anlayabilmek için silindir yüzeyindeki y^+ değerlerine bakılmıştır. Silindir yüzeyindeki y^+ dağılımı Şekil 5.2’de görülmektedir.



Şekil 5.2. Üç-boyutlu çözüm ile elde edilmiş silindir yüzeyindeki y^+ dağılımı, $Re=20,000$

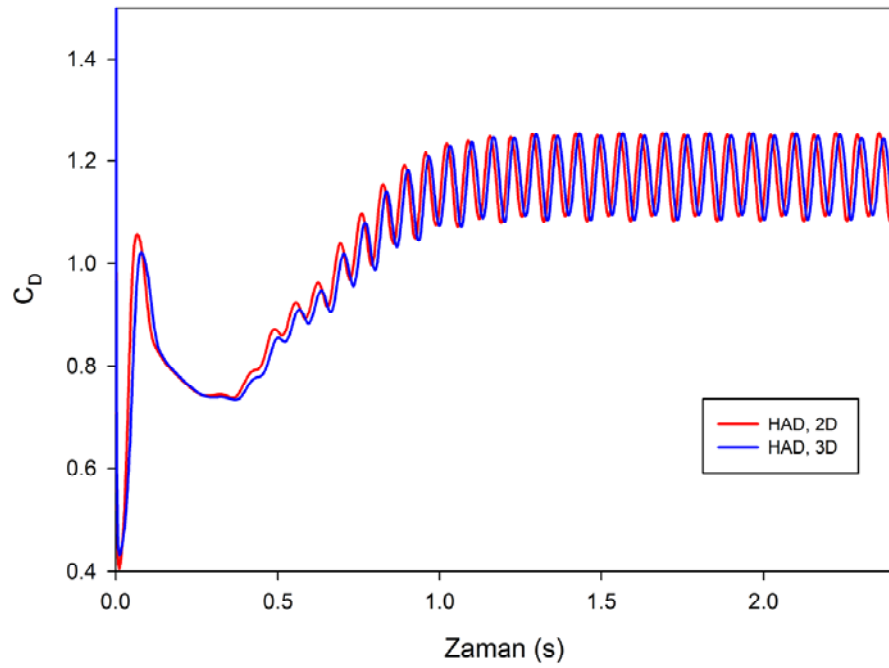
Silindir yüzeyindeki en büyük y^+ değeri yaklaşık olarak 0.21 olmaktadır. Bu değer silindir yüzeyindeki sınır tabakanın analiz yapılan Reynolds sayısında doğru bir biçimde modellenebilmesi için yeterlidir.

5.2. İki-Boyutlu ve Üç-Boyutlu Çözümün Karşılaştırılması

İki-boyutlu (2D) ve üç-boyutlu (3D) çözüm sonucunda elde edilen silindire akış tarafından etkilenen kuvvetler, akışın zamana bağlı davranışı ve silindir arkasındaki akışın yapısı karşılaştırılmıştır. İlgili sonuçlar takip eden kısımlarda anlatılmaktadır.

5.2.1. Sürüklenme Katsayısının Zamana Bağlı Değişimi

Sürüklenme katsayısının zamana bağlı değişimi 2D ve 3D çözüm ile Şekil 5.3'teki gibi elde edilmiştir.

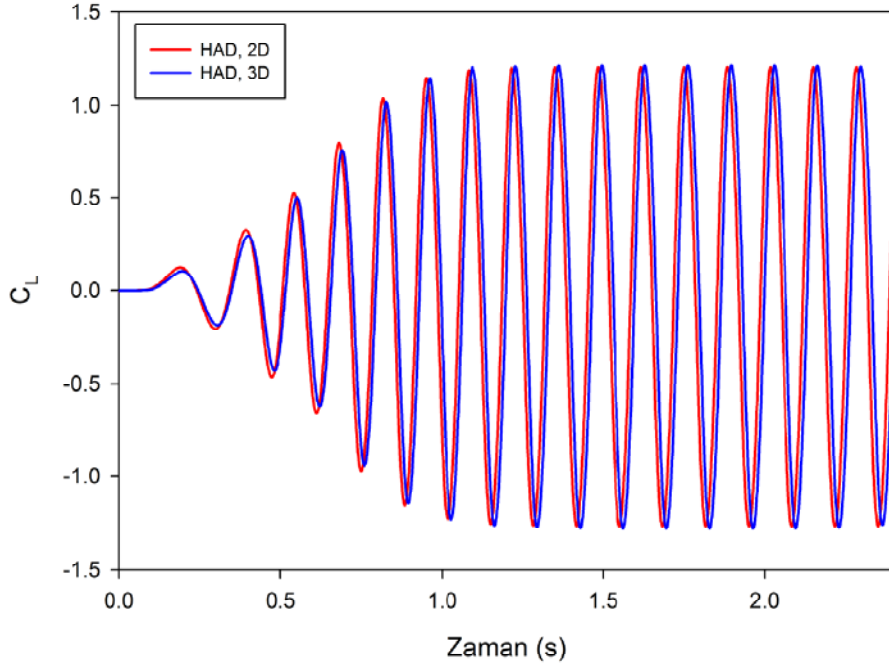


Şekil 5.3. Sürüklenme katsayısının zamana göre değişimi, Re=20,000

Sürüklenme katsayısının zamana göre değişimi grafiğinde, 2D ve 3D çözümün aynı şekilde yakınsadığı görülmektedir. Ortalama C_D değeri üç-boyutlu çözüm ile de 1.17 değerini vermektedir.

5.2.2. Kaldırma Katsayısının Zamana Bağlı Değişimi

Kaldırma katsayısının zamana bağlı değişimi 2D ve 3D çözüm ile Şekil 5.4'te verilmektedir.



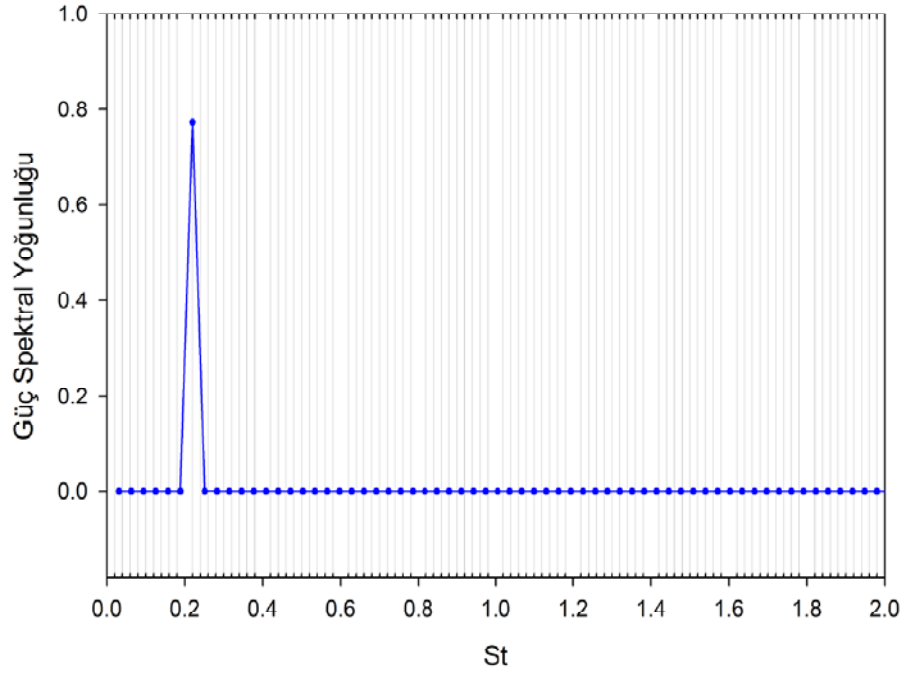
Şekil 5.4. Kaldırma katsayısının zamana göre değişimi, Re=20,000

Şekil 5.4'e bakıldığında, kaldırma katsayısının zamana bağlı değişimi 2D ve 3D çözüm ile bire bir aynı olarak elde edilmiştir. Ayrıca, bu değişimin periyodunun da her iki çözüm ile aynı şekilde elde edilmiş olması, akışın zamana bağlı davranışının da her iki çözüm ile aynı olarak bulunduğunu göstermektedir.

5.2.3. Akışın Zamana Bağlı Davranışı

Akışın zamana bağlı davranışı için 2D ve 3D çözümler arasındaki fark HFD sonucu elde edilen St sayıları karşılaştırılarak belirlenebilir. Bu amaçla, üç-boyutlu çözüm ile elde edilmiş kaldırma katsayısının zaman bağlı değişimine HFD uygulanmıştır.

HFD sonucunda elde edilen Güç Spektral Yoğunluğu-St grafiği Şekil 5.4'te verilmektedir.



Şekil 5.5. C_L değişimine uygulanan HFD sonucunda elde edilen Strouhal sayısı grafiği, $Re=20,000$

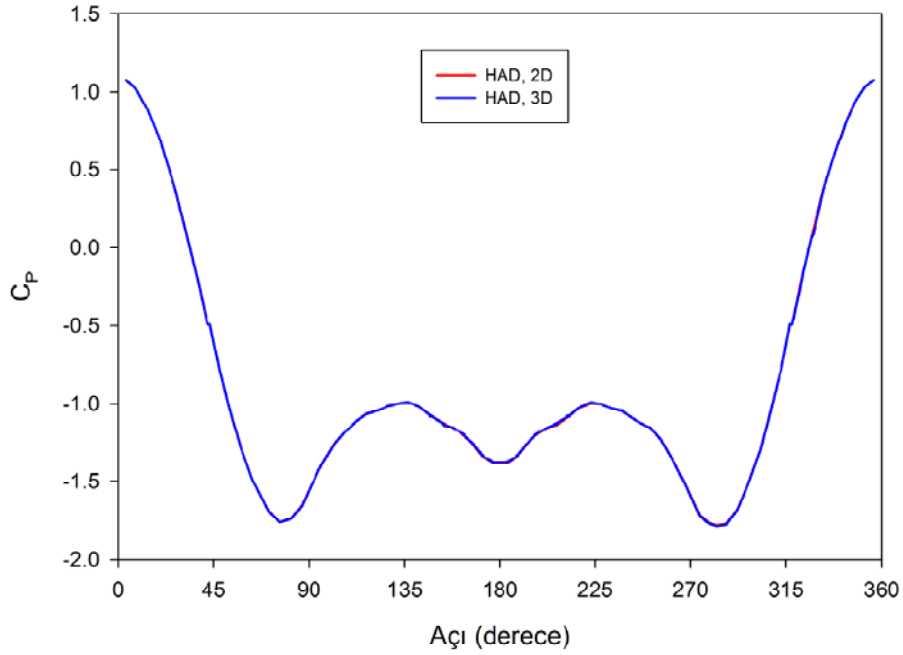
Güç Spektral Yoğunluğu-St sayısı grafiğindeki tepe değerine denk gelen St sayısı 0.22 olarak bulunmaktadır. Bu sonuç C_D ve C_L değerlerinin zamana bağlı değişimi grafiklerinden de anlaşıldığı gibi, iki boyutlu ve üç-boyutlu çözümün zamana bağlı davranış için de aynı sonucu doğrduğunu nicel olarak göstermektedir.

Üç-boyutlu çözüme göre de akışın periyodu 0.134 s olmaktadır.

5.2.4. Silindir Yüzeyindeki Basınç Katsayısı Dağılımı

Silindir yüzeyindeki basınç katsayısı dağılımlarının karşılaştırması ise Şekil 5.6'da görülmektedir. Ortalama değerler akışın 9. ve 17. periyotları arasında hesaplanmıştır. Bu grafiğe bakıldığında, iki-boyutlu üç-boyutlu çözümün basınç katsayısı dağılımı için de aynı sonucu verdiği anlaşılmaktadır. Grafikte görülen C_P değerleri z-

yönündeki tüm değerleri içermektedir. Bant yerine çizgi grafik elde ediliyor olması silindir üzerindeki basınç katsayısı dağılımı z-yönünde değişmediğini göstermektedir.



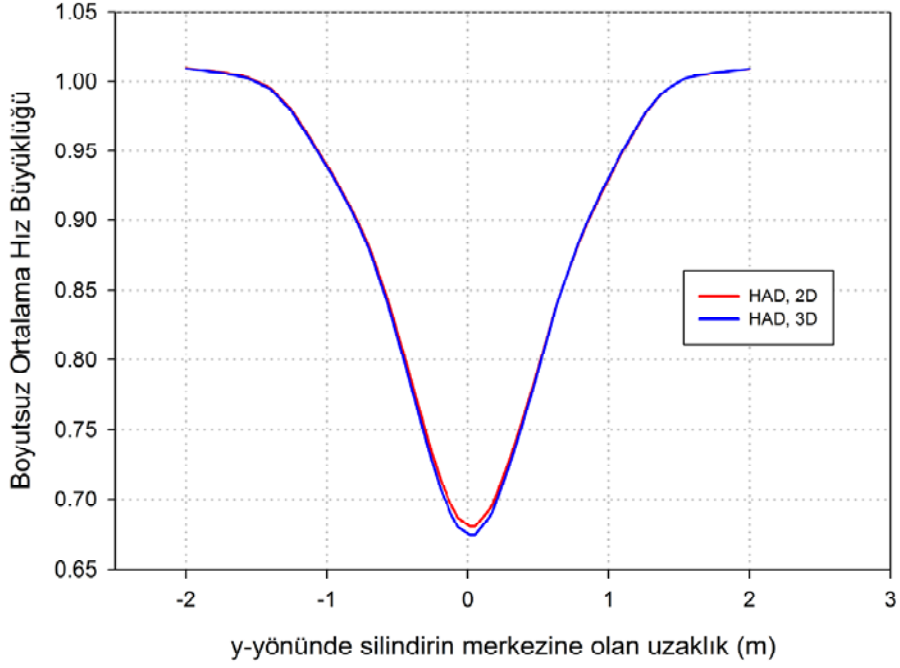
Şekil 5.6. Silindir üzerindeki basınç katsayısı dağılımı, Re=20,000

5.2.5. Silindir Arkasındaki Hız Profili

Silindir arkasındaki çözümleri kıyaslamak için silindirin arkasındaki ortalama hız dağılımına bakılmıştır. Silindirin merkezinden x-yönünde 3 m uzaklıktaki ($x=23$ m çizgisi üzerindeki) boyutsuz ortalama hız büyüklüğü dağılımı orta düzlemde ($z=1.5$ m'de) y-yönündeki dağılımı göstermektedir. Bu dağılım Şekil 5.7'de görülmektedir. Hız büyüklüğünün ortalaması akışın 9. ve 17. periyotları arasında hesaplanmış ve bu değer akış hızı olan 34 m/s'ye bölünerek boyutsuz ortalama hız büyüklüğü elde edilmiştir.

Şekil 5.7'de, 2D ve 3D çözüm ile elde edilen silindir arkasındaki boyutsuz ortalama hız büyüklüğü dağılımlarının birbiri ile oldukça benzer olduğu görülmektedir.

Önemsenmeyecek kadar küçük olan fark, silindirin merkezinden $y/D=0$ uzaklıkta yani silindirin merkezinin hizasında gözlemlenmektedir.

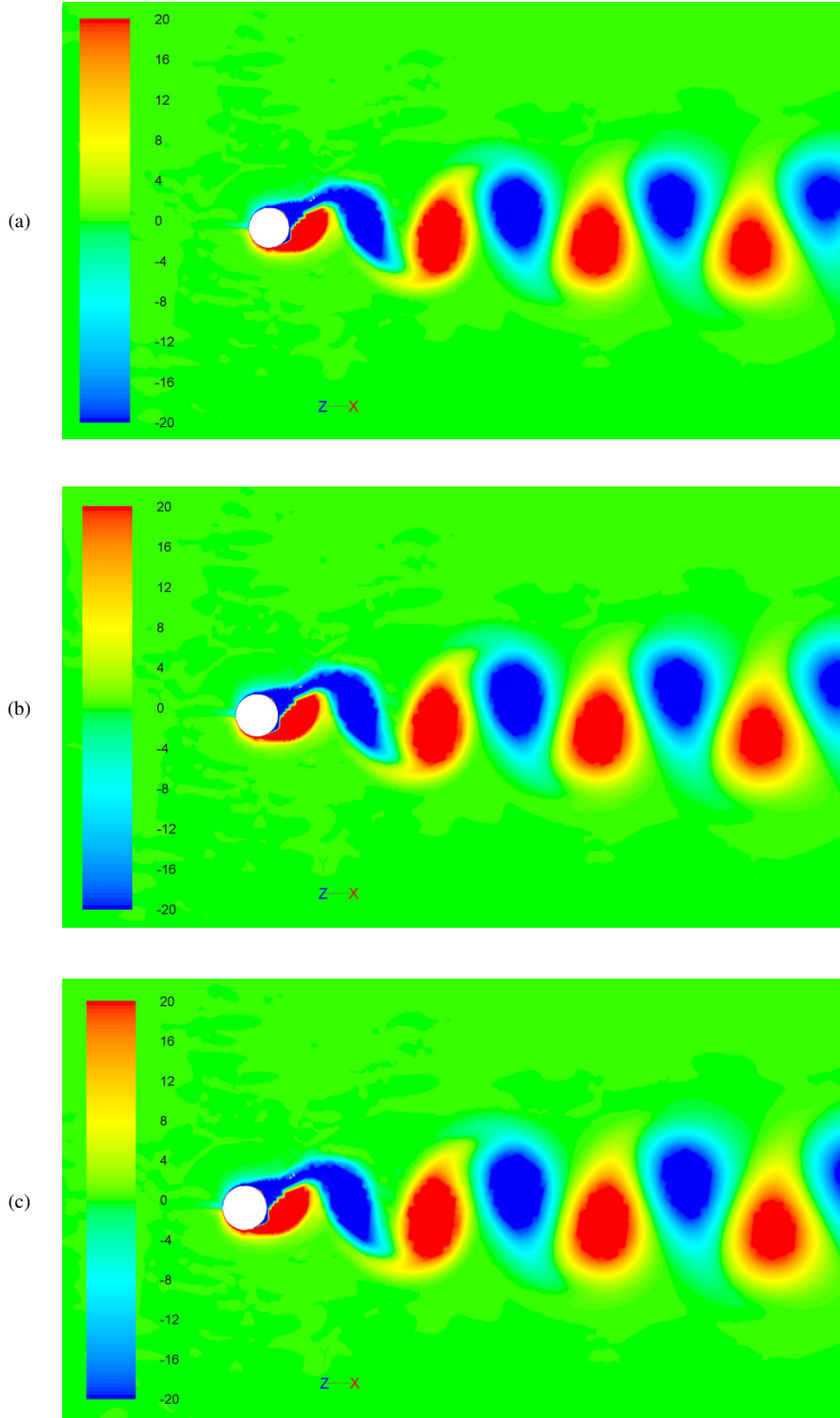


Şekil 5.7. Silindir üzerindeki boyutsuz ortalama hız büyüklüğü dağılımı, $Re=20,000$

5.3. Silindir Arkasındaki Akışın Yapısı

Akışın üç-boyutlu olmasından ötürü üçüncü boyuttaki değişik düzlemlerdeki dağılımlar arasındaki fark olması beklenmektedir. Silindir arkasındaki akışın yapısı z-yönündeki ön ($z=3$ m), orta ($z=1.5$ m) ve arka ($z=0$ m) düzlemlerdeki vortisite konturları ile incelenmiştir. Düzlemlerdeki 2D ve 3D vortisite konturları arasında fark olup olmadığına bakılmıştır. Bu kontur grafikleri Şekil 5.8’de verilmektedir.

Şekil 5.8’deki vortisite konturları arasında herhangi bir fark görülmemektedir.



Şekil 5.8. Üç-boyutlu analiz ile elde edilen akışın 2. saniyesindeki vortisite konturları, $Re=20,000$, a) $z/D=0$, b) $z/D=1.5$, c) $z/D=3$

5.4. Silindir Üzerindeki Türbülanslı Akışın Üç-Boyutlu Analizi Üzerine Yorumlar

Yapılan iki-boyutlu ve üç-boyutlu türbülanslı akış analizleri sonucunda C_D , C_L , St , ve C_p değerleri arasında fark görülmemiştir. Ayrıca z-yönündeki farklı düzlemlerdeki vortisite konturlarına bakıldığında da bu görüntülerin bir biri ile aynı olduğu, akış analizinin z-yönünde farklı bir sonuç kaydetmediği görülmektedir.

Üç-boyutlu analiz ile elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, kontrolsüz ve kontrollü laminar ve türbülanslı akış analizlerinin zaman kısıtlamasından dolayı iki-boyutlu URANS denklemleri çözülerek yapılmış olmasının çözümün doğruluğunu kayda değer büyüklükte etkilemediği sonucuna varılmaktadır. URANS denklemleri ile yapılan iki-boyutlu ve üç-boyutlu akış analizleri sonucunda, iki-boyutlu akış düzlemindeki ve üç-boyutlu akışın orta düzlemindeki ($z=1.5$ m) sonuçlar arasında fark görülmemiştir.

6. TARTIŞMALAR

6.1. İrdemeler

Bu çalışmada, iki-boyutlu silindir üzerindeki akışın kontrolsüz ve kontrollü HAD analizleri yapılmıştır. Akış kontrolü, silindir yüzeyinde yer alan dört adet delikten hava üflenerek sağlanmıştır. Aktif olan delik sayısı, deliklerin yeri ve üfleme hızı değiştirilerek farklı kontrol durumları denenmiş ve karşılaştırılmıştır. Silindir üzerinde yer alan deliklerin konumları Şekil 3.3'te görülmektedir. Ayrıca üç-boyutlu silindir üzerindeki kontrolsüz türbülanslı akış için iki-boyutlu analizlerde kullanılan sayısal yöntemler kullanılarak üç-boyutlu HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen iki-boyutlu ve üç-boyutlu analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

İki-boyutlu kontrolsüz akış analizleri, literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Laminer akış için hesaplanan sürüklenme katsayısı, literatürdeki deneysel ve sayısal sürüklenme katsayılarının bulunduğu değerlerin aralığına düşmektedir. St sayısının ise literatürdeki deneysel çalışmalar ile olan farkı %2.4, sayısal çalışmalar ile olan farkı ise %0.6 olarak bulunmuştur. Türbülanslı akış analizlerinde elde edilen sürüklenme katsayısı ve St sayısının deneysel verilen ile olan farkı ise sırasıyla %2.5 ve %10'dur. Bu farklar yapılan HAD analizlerinin deneysel çalışmalar ile oldukça yakın olduğunu göstermektedir.

Yapılan kontrollü HAD analizleri sonucunda sürüklenme katsayısında en fazla azalmaya neden olan kontrol yönteminin tüm deliklerden akış hızının %50'si büyüklüğündeki bir hızla hava üflenmesi olduğu görülmüştür. Hem laminer hem de türbülanslı akış kontrolünde en fazla değişimi bu yöntem sağlamaktadır. Kontrol ile sürüklenme katsayısındaki azalma laminer akış için %8.6, türbülanslı akış için ise %23.3 olmaktadır. Silindir üzerinden üfleme ile yaratılan bu etkinin sebebi, üflenen havadan silindir üzerindeki sınır tabakaya momentum transferi yapılmış olmasıdır. Böylelikle sınır tabakadaki akış profili bozulmakta, viskoziteye bağlı olan kayma gerilmeleri ve akışkandan silindire olan momentum transferi azaltılmaktadır.

Akışın zamana bağlı davranışı ise denenen kontrol durumları ile fazla değiştirilememiştir. Von Kármán girdap yolunun, denenen her durum ile oluşmaya devam ettiği gözlemlenmiştir.

Akış hızının %50'si büyüklüğündeki bir hızla hava üflenmesi durumunda, 2 ve 3 numaralı delik civarında silindir üzerindeki basınç katsayısı dağılımında ani değişimler olduğu görülmüştür. Bu değişimler, aynı üfleme hızı ile sadece 1 ve 4 numaralı deliklerden hava üflenmesiyle kaybolmuştur. Aynı koşullar altında (aynı çözüm yöntemleri, geometri, ağ yapısı, akış hızı ve üfleme hızı ile) denenen iki farklı kontrol durumunun basınç katsayısı dağılımında farklı sonuçlar yaratması, bu değişimin sayısal hatalardan değil kontrol yönteminden kaynaklandığı anlamına gelmektedir.

Diğer yandan, pratikte, uygulama alanına da bağlı olarak, akış hızının %50'si büyüklüğündeki bir hızla silindir üzerinden hava üflenmesi beklenmeyen sorunlara (titreşim, delik kapaklarında ve bağlantı noktalarında yorulma ve deformasyon vs.) yol açabilir. Bu nedenlerle, kullanılacak olan kontrol yöntemi elde edilen verilerden yararlanılarak uygulama alanına göre seçilmelidir.

Ön deliklerden hava üflenmesi ile arka deliklerden hava üflenmesi durumları karşılaştırıldığında arka deliklerden hava üflemenin daha etkili olduğu görülmektedir. Bu durum ayrışma noktalarına yakın üfleme yapılmasının daha etkin bir kontrol yöntemi olduğunu göstermektedir. Sınır tabakaya ayrışma noktasına daha yakın bir noktadan momentum transfer edildiğinde daha etkili bir sonuç elde edilmektedir. Simetrik üflemenin ise asimetric üfleme göre daha fazla etki yarattığı görülmektedir.

İki-boyutlu ve üç-boyutlu HAD analizi karşılaştırmasında ise iki çözümün sonuçları arasında kayda değer bir farka rastlanmamıştır. Üçüncü boyuttaki (z-yönündeki) sınırların simetrik olarak tanımlanmış olması, buna bir etken olabilir. Bunun dışında,

gerçekte üç boyutlu olan türbülanslı yapıların gözlemlenememiş olmasının sebebi üçüncü boyuttaki ağ yapısının fazla sıkı olmaması olabilir.

Türbülanslı akış HAD analizlerinde, türbülans modelleriyle mühendislik uygulamaları için yeterli doğrulukta sonuç elde edilebileceğinden ve zaman kısıtlamasından dolayı doğrudan bir çözüm yapılmamıştır. Bu nedenle, silindir arkasında oluşması beklenen küçük boyuttaki türbülanslı yapılar gözlemlenememiştir. Diğer yandan, URANS denklemleri ile yapılan çözüm deneysel verilere yakın sonuçlar vermiştir. Akışkanın zamana bağlı baskın hareketleri ve girdaplar iyi derecede yakalanmıştır. Elde edilen doğruluk akış kontrolü için yeterlidir. Zira HAD analizi sonrasında, TÜBİTAK projesi kapsamında yapılan çalışmanın bir sonraki adımında, HAD analizi ile elde edilmiş veriler Düşük Boyutlu Modelleme çalışması için işleme tabii tutulacak ve yapılan interpolasyon işlemleri sonucunda da çözümün doğruluğu ve yakalanan küçük türbülanslı yapılar bir miktar kaybolacaktır. Daha detaylı yapılmış bir HAD analizi sonucunda da elde edilen veriler yine aynı işlemlerden geçeceğinden ve doğruluğu bir miktar kaybolacağından ötürü, URANS denklemleri ile çözüm yapılması ileride geliştirilecek olan akış kontrolü stratejisi için yeterli bulunmuştur. Elde edilen HAD verileri TÜBİTAK projesi kapsamında Paksoy vd. tarafından kullanılarak akış düşük boyutlu olarak modellenmiştir ve ileride Yapay Sinir Ağları yardımıyla akış modellemesi çalışmalarında kullanılacaktır [41].

Sonuç olarak, üzerinde çalışılan akış koşullarında ve geometride akış kontrolü uygulaması için yapılmış olan kontrollü ve kontrolsüz HAD analizlerinde 3D yerine 2D benzetimlerin yapılması, URANS denklemlerinin çözülmesi ve Spalart-Allmaras türbülans modelinin kullanılmasıyla hem zaman hem de doğruluk açısından uygun sonuçlar elde edilmiştir. Akış kontrolü uygulaması için yapılan HAD analizleri, bu yöntemlerle yeterli ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

6.2. Gelecek Çalışmalar

Yapılan çalışmalar gelecekte farklı incelemelerin önünü açmaktadır. Örneğin; hava üflenen deliklerin büyüklüğünün değiştirilmesi, üflenen havanın kütleli debisinin değiştirilmesi, delik yerlerinin değiştirilmesi, daha farklı akış hızlarının denenmesi gibi durumlar gelecekte incelenmesi tavsiye edilen konulardır.

TÜBİTAK projesi kapsamındaki çalışmalar doğrultusunda yapılmış olan silindir üzerindeki laminer ve türbülanslı akışın kontrollü ve kontrolsüz HAD analizleri sonucunda elde edilen veriler, projenin bir sonraki basamağındaki Düşük Boyutlu Modelleme ve Yapay Sinir Ağları çalışmalarında kullanılacaktır. Yapay Sinir Ağları çalışması sonucunda elde edilecek modeller gerçek zamanlı akış kontrolünde kullanılarak akış kontrolü stratejisinde uzun bir işlem süreci olan HAD simülasyonları basamağı ortadan kaldırılmış olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] “Old Man with Water Studies” erişim adresi: <http://www.drawingsofleonardo.org/>, erişim tarihi: 8 Temmuz 2010.
- [2] Norberg, C., Effects of Reynolds Number and a Low-Intensity Free Stream Turbulence on the Flow around a Circular Cylinder, Chalmers University of Technology, ISSN 02809265, 1987.
- [3] Gillies, E. A, Low Dimensional Control of the Circular Cylinder Wake, Journal of Fluid Mechanics, 371, 157-178, 1998.
- [4] “Von Karman Vortices off Rishiri Island, Japan” erişim adresi: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Von_Karman_vortices_off_Rishiri_Island,_Japan.jpg, erişim tarihi: 8 Temmuz 2010.
- [5] Gad-el-Hak, M., Flow Control; Passive, Active and Reactive Flow Management, *Cambridge University Press*, Cambridge, U.K., 2000.
- [6] Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T.H., Fundamentals of Fluid Mechanics, 5th Edition, *John Wiley & Sons Inc.*, U.S.A. 2006.
- [7] Rahman, M., Karim, M., ve Halim, A., Numerical Investigation of Unsteady Flow Past a Circular Cylinder Using 2D Finite Volume Method, Journal of Naval Architecture and Marine Engineering, 4, 27-42, 2007.
- [8] Lienhard, J. H., Synopsis of Lift, Drag and Vortex Frequency Data for Rigid Circular Cylinders, Washington State University College of Engineering Research Division Bulletin 300, 3, 1966.
- [9] Wissink, J. G., and Rodi, W., Numerical Study of the Near Wake of a Circular Cylinder, International Journal of Heat and Fluid Flow, 29, 1060-1070, 2008.
- [10] Travin, A., Shur, M., Strelets, M., and Spalart, P., Detached-Eddy Simulations Past a Circular Cylinder Flow, Turbulence and Combustion, 63, 293-313, 1999.
- [11] Schlichting, H., Gersten, K., Boundary Layer Theory, 8th Revised and Enlarged Edition, *Springer*, New York, U.S.A, 2003.
- [12] Oertel Jr., H., Wakes Behind Blunt Bodies, Annual Review of Fluid Mechanics, 22, 539-564, 1990.
- [13] Panton, R. L., Incompressible Flow, 2nd Edition, *John Wiley & Sons*, New York, U.S.A, 1996.
- [14] Williamson, C. H. K., Vortex Dynamics in the Cylinder Wake, Annual Review of Fluid Mechanics, 8, 477-539, 1996.
- [15] Anderson, J. D., Fundamentals of Aerodynamics, 2nd Edition, *McGraw-Hill*, New York, 1991.
- [16] Nichols, R. H., and Heikkinen, B. D., Validation of Implicit Algorithms for Unsteady Flows Including Moving and Deforming Grids, AIAA Journal 2005-0683, 2005.

- [17] Lim, H., and Lee, S., Flow Control of Circular Cylinders with Longitudinal Grooved Surfaces, *AIAA Journal*, 40, 10, 2027-2036, 2002.
- [18] Aradag, S., Cohen, K., Seaver, C., McLaughlin, T., Integrating CFD and Experiments for Undergraduate Research, *Computer Applications in Engineering Education*, DOI:10.1002/cae.20278, 2009.
- [19] Min, C., Choi, H., Suboptimal Feedback Control of Vortex shedding at Low Reynolds Numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, 401, 123-156, 1999.
- [20] “Laminar Flow over a Circular Cylinder” erişim adresi: http://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/lamcyl/Study1_files/Study1.html, erişim tarihi: Ağustos 2009.
- [21] Williamson, C. H. K., Brown, G.L., , A Series in $1/\sqrt{Re}$ to Represent the Strouhal-Reynolds Number Relationship of the Cylinder Wake, *Journal of Fluids and Structures*, 12, 1073-1085, 1998.
- [22] Rajani, B.N., Kandasamy, A., Majumdar, S., Numerical Simulation Of Laminar Flow Past A Circular Cylinder, *Applied Mathematical Modeling*, 33, 1228-1247, 2009.
- [23] Aradag, S., Unsteady Turbulent Vortex Structure Downstream Of A Three Dimensional Cylinder, *Türkiye Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 29, 1, 91-98, 2009.
- [24] Ong, M.C., Utnes T., Holmedal L.E., Myrhaug D., Numerical Simulation of Flow Around a Smooth Circular Cylinder at Very High Reynolds Numbers, *Marine Structures; Design, Construction and Safety*, 1-12, 2008.
- [25] Chakraborty, J., Verma, N., Chhabra, R. P., Wall Effects In Flow Past A Circular Cylinder In A Plane Channel: A Numerical Study, *Chemical Engineering And Processing*, 43, 1529-1537, 2004.
- [26] Freeman, A. P., 2009, Advances in Active Control and Optimization in Turbulence, *Doktora Tezi*, University of California, California, U.S.A.
- [27] Williamson, C. A., 2008, Compressor Blade Flow Control in an Axial Compressor with Plasma Actuators, *Yüksek Lisans Tezi*, Graduate College of Oklahoma State University, U.S.A.
- [28] Sarimurat, M. N., 2008, Analytical Models for Flow Control in Subsonic and Supersonic Diffusing Flow Paths Using Steady Blowing and Suction, *Doktora Tezi*, Syracuse University, U.S.A.
- [29] Mathelin, L., Bataille, F., Lallemand, A., Near Wake of a Circular Cylinder Submitted to Blowing – II Impact on the Dynamics, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 3709-3719, 2001.
- [30] Kim, J., Choi, H., Distrbuted Forcing of Flow Over a Circular Cylinder, *Physics of Fluids*, 17, 033103, 2005.
- [31] Roy, C. J., DeChant, L. J., Payne, J. L., Blottner, F. G., Bluff-Body Flow Simulations using Hybrid RANS/LES, *AIAA Journal*, 2003-3889, 2003.

- [32] ANSYS FLUENT v12.0, User's Guide, Ocak 2009.
- [33] ANSYS FLUENT v12.0, Theory Guide, Ocak 2009.
- [34] "Fast Fourier Transform" erişim adresi: http://en.wikipedia.org/wiki/Fast_Fourier_transform, erişim tarihi: 4 Temmuz 2010.
- [35] "StudentFLUENT - Tutorial Library - Cylinder" erişim adresi: http://www.fluent.com/software/sf_mesh_and_tutorials/tutorial_cylinder.htm, erişim tarihi: Eylül 2009.
- [36] ANSYS ICEM CFD v12.0, User Manual, Ocak 2009.
- [37] Homann, F., Influence of Higher Viscosity on Flow Around Cylinder, Forsch. Gebiete Ingenieur, 17, 1-10, 1936.
- [38] Wu, M.G., Wen C., Yen, R., Weng, M., Wang, A, Experimental and Numerical Study of the Separation Angle for Flow Around a Circular Cylinder at Low Reynolds Numbers, Journal of Fluid Mechanics, 515, 233-260, 2004.
- [39] "Viscous Grid Spacing Calculator" erişim adresi: <http://geolab.larc.nasa.gov/APPS/YPlus/>, erişim tarihi: Şubat 2010.
- [40] Apaçoğlu, B., Paksoy, A., Aradağ, S., Silindir Üzerindeki Kontrolsüz ve Kontrollü Laminer Akışın HAD Analizi ve Düşük Boyutlu Modellenmesi, 3. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı UHUK 2010, 126, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, Eylül 2010.
- [41] Paksoy, A., Apacoglu, B. Aradag, S., Analysis of Flow over a Circular Cylinder by CFD and Reduced Order Modeling", ASME 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis ESDA 2010, 24302, İstanbul, Türkiye, Temmuz 2010.
- [42] Apacoglu B., Paksoy, A., Aradag, S., CFD Analysis and Reduced Order Modeling of Uncontrolled and Controlled Laminar Flow Over a Circular Cylinder, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics (*gönderildi, inceleme aşamasında*).
- [43] Paksoy, A., Apacoglu, B., Aradag, S., Filtered-POD Based Reduced Order Modeling of a Turbulent Two-Dimensional Cylinder Wake, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics (*gönderildi, inceleme aşamasında*)
- [44] Paksoy, A., Apacoglu, B., Aradag, S., Reduced Order Modeling of a Turbulent Two Dimensional Cylinder Wake with Filtered POD and Artificial Neural Networks, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Florida, U.S.A., Ocak 2011, (*gönderildi, inceleme aşamasında*).

Ek 1 : Tecplot 360 makro kodu

```

#!MC 1200
# Created by Tecplot 360 build 12.1.0.6712
$!VarSet |MFBD| =
'C:\Users\BURYAN\Desktop\CYLINDER
run\01_06 turbulent'
$!Varset |FileNum| = 1340
$!Varset |Index| = 5360
$!LOOP |FileNum|
$!VarSet |Index| += 1
$!READDATASET ""|MFBD|\turbulent-
|Index|_tec.dat" '
  READDATAOPTION = NEW
  RESETSTYLE = YES
  INCLUDETEXT = NO
  INCLUDEGEOM = NO
  INCLUDECUSTOMLABELS = NO
  VARLOADMODE = BYNAME
  ASSIGNSTRANDIDS = YES
  INITIALPLOTTYPE = CARTESIAN2D
  VARNAMELIST = "X" "Y" "x-velocity"
$!CREATERECTANGULARZONE
  IMAX = 101
  JMAX = 41
  KMAX = 1
  X1 = 20.50001
  Y1 = 19
  Z1 = 0
  X2 = 25.50001
  Y2 = 21
  Z2 = 0
  XVAR = 1
  YVAR = 2
  $!INVERSEDISTINTERPOLATE
  SOURCEZONES = [1]
  DESTINATIONZONE = 2
  VARLIST = [3]
  INVDISTEXPONENT = 3.5
  INVDISTMINRADIUS = 0
  INTERPPTSELECTION =
OCTANTNPOINTS
  INTERPNPOINTS = 100
  $!PICK SETMOUSEMODE
  MOUSEMODE = SELECT
  $!WRITEDATASET
  "C:\Users\BURYAN\Desktop\Re=20000 output
files\|Index|.dat"
  INCLUDETEXT = NO
  INCLUDEGEOM = NO
  INCLUDECUSTOMLABELS = NO
  INCLUDEAUTOGENFACENEIGHBORS =
YES
  ASSOCIATELAYOUTWITHDATAFILE =
NO
  ZONELIST = [2]
  BINARY = NO
  USEPOINTFORMAT = YES
  PRECISION = 9
  TECPLOTVERSIONTOWRITE =
TECPLOTCURRENT
$!ENDLOOP |Index|
$!RemoveVar |MFBD|
$!Quit

```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : APAÇOĞLU, Büryan
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 06.05.1986 Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (532) 345 87 14
e-mail : bapacoglu@etu.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü	2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2008-2010	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- I. Apaçoğlu, B., Paksoy, A., Aradağ, S., Silindir Üzerindeki Kontrolsüz ve Kontrollü Laminer Akışın HAD Analizi ve Düşük Boyutlu Modellenmesi, 3. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı UHUK 2010, 126, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, Eylül 2010.
- II. Apacoglu, B, Ergun, S, A Practical Tool For Quick Light Water Reactor Core Design Calculations, 7th International Conference on Heat Transfer, Fluid

- Mechanics and Thermodynamics HEFAT 2010, 1594-1597, Antalya, Türkiye, Temmuz 2010.
- III. Apacoglu, B., Aradag, S., Contalı Plakalı Isı Değişirgeci Tasarımı, 17. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi ULIBTK'09, ISI-047, 516-520, Sivas, Türkiye, Haziran 2009.
 - IV. Paksoy, A., Apacoglu, B. and Aradag, S., Analysis of Flow over a Circular Cylinder by CFD and Reduced Order Modeling”, ASME 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis ESDA 2010, 24302, İstanbul, Türkiye, Temmuz 2010.
 - V. Apacoglu B., Paksoy, A., Aradag, S., CFD Analysis and Reduced Order Modeling of Uncontrolled and Controlled Laminar Flow Over a Circular Cylinder, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics (*gönderildi, inceleme aşamasında*).
 - VI. Paksoy, A., Apacoglu, B., Aradag, S., Filtered-POD Based Reduced Order Modeling of a Turbulent Two-Dimensional Cylinder Wake, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics (*gönderildi, inceleme aşamasında*)
 - VII. Paksoy, A., Apacoglu, B., Aradag, S., Reduced Order Modeling of a Turbulent Two Dimensional Cylinder Wake with Filtered POD and Artificial Neural Networks, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Florida, U.S.A., Ocak 2011, (*gönderildi, inceleme aşamasında*).