

**YAPAY SİNİR AĞLARI İLE AKIŞ KONTROLÜ İÇİN SAYISAL
YÖNTEMLERİN GELİŞTİRİLMESİ**

AKIN PAKSOY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

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

2011

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

Akın PAKSOY tarafından hazırlanan YAPAY SİNİR AĞLARI İLE AKIŞ KONTROLÜ İÇİN SAYISAL YÖNTEMLERİN GELİŞTİRİLMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Selin ARADAĞ

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Coşku KASNAKOĞLU

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan: Yrd. Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ

Üye: Yrd. Doç. Dr. Selin ARADAĞ

Üye: Yrd. Doç. Dr. Murat ÖZBAYOĞLU

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.

Akın PAKSOY

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği
Tez Danışmanları : Yrd. Doç. Dr. Selin ARADAĞ
Doç. Dr. Coşku KASNAKOĞLU
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Haziran 2011

Akın PAKSOY

YAPAY SİNİR AĞLARI İLE AKIŞ KONTROLÜ İÇİN SAYISAL YÖNTEMLERİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Zamana bağlı iki boyutlu dairesel silindir üzerinde laminer ($Re=100$) ve türbülanslı ($Re=20000$) rejimlerdeki akışlar ile zamana bağlı iki boyutlu sürülmüş kavite akışı uygulamalarının temel alındığı bu çalışma ile Dikgen Ayrıştırma Yöntemi (DAY) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) yardımıyla gerçek zamanlı bir akış kontrolü stratejisi oluşturmak için zaman gerektiren ve uygulama maliyetlerinin yüksek olduğu Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) simülasyonlarına gerek duyulmadan, akış alanının düşük mertebeli modellerinden yola çıkılarak, akışın durumunun yeterli düzeyde tahmin edilebileceği sayısal yöntemlerin geliştirilmesi hedeflenmiştir.

DAY uygulaması ile bir dizi anlık görüntü sayısından oluşan ve fiziksel akış karakteristiklerini içeren veri topluluğunun zamana ve mekana bağımlı olan yapıları ayrıştırılarak, çözüme en yüksek enerji düzeyinde (frekansta) katkısı olan ve iz bölgesinde devamlı olarak görünüp kaybolan girdaplar incelenerek, veri topluluğunun temel bileşenleri olanak adlandırılan kipler ve bu kiplerin bağıl genlikleri belirlenmiştir.

Akış kontrolü için girdap oluşumu ile ilişkilendirilen yapıların zamana bağlı davranışlarının tayini önem taşımaktadır. YSA uygulamasında, silindir yüzeyine yerleştirilen ve en yüksek aktifliğe sahip olan birkaç ayrı noktanın statik basınç değerleri toplayan sensör verileri ile ağ eğitimi için belirlenen spesifik test durumlarının kip genlikleri kullanılarak diğer test durumları için yeni kip genlikleri (girdap oluşumunun temel bileşenlerinin zamana bağlı davranışları) tahmin edilmiştir.

Zamana bağlı iki boyutlu sürülmüş kavite akışı uygulamasında, Reynolds sayısının 100, 500, 1000, 5000 ve 10000 olduğu farklı durumlar için iki boyutlu Navier-Stokes denklemlerinin vortisite-akım fonksiyonu yaklaşımı kullanılarak sayısal çözümleri yapılmıştır. Elde edilen verilere iki boyutlu dairesel silindir uygulamasında kullanılan DAY ve YSA yöntemlerinin uygulanmasıyla kavite akış alanındaki girdap oluşunun temel bileşenlerinin zamana bağlı davranışları tahmin edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akış Kontrolü, Dikgen Ayrıştırma Yöntemi, Hızlı Fourier Dönüşümü, Sensör Yerleştirme, Yapay Sinir Ağları, Sürülmüş Kavite Akışı

University : **TOBB University of Economics and Technology**
Institute : **Institute of Natural and Applied Sciences**
Science Programme : **Mechanical Engineering**
Supervisors : **Assistant Professor Dr. Selin ARADAG**
: **Associate Professor Dr. Cosku KASNAKOGLU**
Degree Award and Date : **M.Sc. – June 2011**

Akin PAKSOY

**DEVELOPMENT OF NUMERICAL METHODS FOR FLOW CONTROL
WITH THE AID OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS**

ABSTRACT

In this research, in order to develop a real-time flow control strategy by preventing application of expensive and time-consuming Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations, Proper Orthogonal Decomposition (POD) and Artificial Neural Networks (ANN's) are utilized. Time-dependent two-dimensional laminar ($Re=100$) and turbulent ($Re=20000$) fluid flows over a circular cylinder and time-dependent two-dimensional driven cavity flow applications are addressed to develop numerical techniques by observing low-dimensional modeling of the flow fields and to estimate the state of the flow effectively.

Proper Orthogonal Decomposition (POD) is a reduced-order modeling technique that enables observation of the chaotic, time-dependent and periodically moving vortices and control of these structures in the flow field. By employing POD, a data ensemble consisting physical flow characteristics within a set of snapshots is separated into its principal components named as modes and relative mode amplitudes according to their energy contents (frequencies).

In order to develop a real-time flow control strategy, predictions of mode amplitudes carrying the temporal characteristics of the flow field are essential. The constituted ANN structure predicts mode amplitudes for other test cases where it takes data coming from surface sensors placed on a few discrete points that show the highest activity in terms of static pressure and previously known mode amplitudes of specific test cases.

In the application based on time-dependent two-dimensional driven cavity flow, test cases at Reynolds numbers 100, 500, 1000, 5000 and 10000 are investigated numerically by solving two-dimensional Navier-Stokes equations with the vorticity-

stream function approach. POD and ANN techniques are also employed for this application to predict temporal characteristics of the flow.

Keywords: Flow Control, Proper Orthogonal Decomposition, Fast Fourier Transform, Sensor Placement, Artificial Neural Networks, Driven Cavity Flow

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleştirilmesinde, çalışmalarımın her anında yardımları ve katkılarıyla bana yol gösteren ve karşılaştığım problemlerin çözümünde tecrübeleriyle beni aydınlatan değerli hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Selin ARADAĞ'a; ayrıca çalışmalarım esnasında bilgi birikimini benimle paylaşan ve karşılaştığım problemlere farklı açılardan yaklaşabilmemi sağlayan Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü değerli öğretim üyesi sayın Yrd. Doç. Dr. Coşku KASNAKOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Kıymetli bilgi birikimlerinden ve tecrübelerinden faydalandığım Makine Mühendisliği Bölümü değerli öğretim üyesi sayın Yrd. Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ'a, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü değerli öğretim üyesi sayın Yrd. Doç. Dr. Murat ÖZBAYOĞLU'na ve aramızda mesafeler olmasına rağmen elektronik posta ile bana destek olmaya çalışan ve yol gösteren Amerika Birleşik Devletleri Cincinnati Üniversitesi Havacılık Mühendisliği Bölümü değerli öğretim üyesi sayın Doç. Dr. Kelly COHEN'a, teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, tez projemi destekleyerek bana maddi olanak sağlayan TÜBİTAK'a ve TÜBA Üstün Başarılı Genç Bilim İnsanlarını Ödüllendirme Programı'na (GEBİP), manevi desteklerinden ve gösterdikleri ilgiden dolayı TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü değerli öğretim üyeleri sayın Prof. Dr. Sadık KAKAÇ'a ve sayın Yrd. Doç. Dr. Yiğit TAŞÇIOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, analiz verilerini benimle paylaşan arkadaşım Büryan APAÇOĞLU'na, fikirleri ile bana destek olan arkadaşlarım Sefa YILMAZTÜRK'e, Fatih AKTÜRK'e, Deniz BEKAR'a, diğer tüm hocalarıma ve arkadaşlarıma ve sonsuz sevgi ve ilgisini benden esirgemeyen her konuda beni destekleyen sevgili aileme çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
KISALTMALAR	xix
SEMBOL LİSTESİ	xx
1. GİRİŞ	1
1.1. Motivasyon	1
1.2. Literatür Araştırması	3
1.2.1. Silindir Üzerindeki Akış Uygulaması Kapsamında Dikgen Ayrıştırma Yönteminin Uygulanması Üzerine Yapılan Literatür Araştırması	3
1.2.2. Sürülmüş Kavite Akışı Uygulaması Kapsamında Dikgen Ayrıştırma Yönteminin Uygulanması Üzerine Yapılan Literatür Araştırması	7
1.2.3. Yapay Sinir Ağı Uygulaması Kapsamında Yapılan Literatür Araştırması	9
1.3. Amaç	12
2. YÖNTEM	14
2.1. Dikgen Ayrıştırma Yöntemi	14
2.1.1. Genel Bakış	14
2.1.2. Teorik Bilgi	15

2.2. Yapay Sinir Ağları	20
2.2.1. Genel Bakış	20
2.2.2. Biyolojik Esinlenme	21
2.2.3. Yapay Sinir Ağı Teorisi	23
3. SİLİNDİR ÜZERİNDEKİ AKIŞ UYGULAMALARI	31
3.1. Laminer Akış için Dikgen Ayırıştırma Yöntemi (DAY) Uygulaması	32
3.2. Türbülanslı Akış için Dikgen Ayırıştırma Yöntemi (DAY) Uygulaması	43
3.2.1. Alışlagelmiş DAY Yaklaşımının Türbülanslı Akışların İncelenmesinde Yol Açtığı Dezavantajlar	44
3.2.2. Filtreleme Yöntemleri	47
3.2.3. Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) Filtreleme Tekniği	47
3.2.4. Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) Filtreleme Tekniği ile Birleştirilen Dikgen Ayırıştırma Yönteminin Türbülanslı Akışlara Uygulanması	49
3.3. Sensör Yerleştirme Çalışmaları	60
3.4. Kontrolsüz ve Kontrollü Laminer ve Türbülanslı Akış Test Durumları için Yapay Sinir Ağı Uygulaması Sonuçları	65
4. SÜRÜLMÜŞ KAVİTE AKIŞI UYGULAMASI	81
4.1. Akış Alanının Sayısal Çözümlemesi	81
4.2. Akış Alanının Sayısal Çözümlemesi için Sonuçlar	86
4.3. Dikgen Ayırıştırma Yöntemi (DAY) Uygulama Sonuçları	93
4.4. Yapay Sinir Ağı (YSA) Uygulama Sonuçları	104
5. SONUÇLAR VE YAPILMASI ÖNERİLEN ÇALIŞMALAR	114
KAYNAKLAR	121
EKLER	127
ÖZGEÇMİŞ	149

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge		Sayfa
Çizelge 3.1.	Silindir üzerindeki kontrollü ve kontrolsüz laminer akış DAY analizleri sonucunda, en yüksek enerjili dört DAY kipinin enerji içerikleri dağılımları	34
Çizelge 3.2.	Re=100 kontrolsüz laminer akış DAY analizleri ve Cohen vd. [13] tarafından Re=108 deneysel vortisite verilerine DAY uygulaması sonucunda elde edilmiş en yüksek enerjili dört DAY kipinin enerji içerikleri dağılımları	35
Çizelge 3.3.	HFD ile filtreleme öncesi ve sonrası DAY uygulanmış tüm deliklerin kapalı olduğu kontrolsüz türbülanslı akış durumu için enerji içeriklerinin en yüksek enerjili dört kipe dağılımı	50
Çizelge 3.4.	Tüm kontrollü türbülanslı akış analizleri için HFD ile filtreleme yapıldıktan sonra uygulanan alışlagelmiş DAY analizi sonuçlarına göre en yüksek enerjili dört kipin enerji içerikleri dağılımı	51
Çizelge 3.5.	Kontrolsüz ve kontrollü laminer akış durumları için basınç karakteristiklerinin görüntülediği en yüksek enerjili dört kipin enerji içerikleri	61
Çizelge 3.6.	Kontrolsüz ve kontrollü türbülanslı akış durumları için basınç karakteristiklerinin görüntülediği en yüksek enerjili dört kipin enerji içerikleri	62
Çizelge 3.7.	Kontrolsüz ve kontrollü laminer akış durumları için silindir üzerindeki kiplerin minimum (Θ_1) ve maksimum (Θ_2) değerlerine karşılık gelen sensör noktaları	62
Çizelge 3.8.	Kontrolsüz ve kontrollü türbülanslı akış durumları için silindir üzerindeki kiplerin minimum (Θ_1) ve maksimum (Θ_2) değerlerine karşılık gelen sensör noktaları	63
Çizelge 4.1.	Tüm inceleme durumları için Denklem 4.11'de kullanılan plaka tarafı hız parametreleri ve gözlemlenen minimum ve maksimum hızlar	85
Çizelge 4.2.	Reynolds sayısı (Re) 10000 için 3000 iterasyon kullanılarak test edilen çözüm ağlarında gözlemlenen maksimum akım fonksiyonu değerleri	85

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge		Sayfa
Çizelge 4.3.	Tüm test durumları için akım fonksiyonu veri topluluğunun DAY analizleri sonucunda gözlemlenen en yüksek enerjiye sahip dört kipin enerji içerikleri	93
Çizelge 4.4.	Tüm test durumları için x-düzlemi hız verilerininin DAY analizleri sonucunda gözlemlenen en yüksek enerjiye sahip dört kipin enerji içerikleri	94

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 1.1.	İki boyutlu dairesel silindirin arkasında kalan iz bölgesinde von Kármán girdap yolu oluşumunun gösterimi	3
Şekil 2.1.	Biyolojik bir nöron hücresinin şematik gösterimi	23
Şekil 2.2.	Tek bir nörondan oluşan ağ yapısı sisteminin şematik gösterimi	24
Şekil 2.3.	Çok katmanlı bir ağ yapısının şematik gösterimi	26
Şekil 3.1.	İki boyutlu dairesel silindir ve uygulamalarda incelenen akış alanı	31
Şekil 3.2.	Silindir üzerinde yer alan deliklerin konumları ve isimleri	32
Şekil 3.3.	En yüksek enerjili dört DAY kipinin tüm deliklerin kapalı olduğu kontrolsüz akış durumu için gösterimi	36
Şekil 3.4.	En yüksek enerjili dört DAY kipinin 1 numaralı deliğin açık olduğu kontrollü akış durumu için gösterimi	36
Şekil 3.5.	En yüksek enerjili dört DAY kipinin 1+2 numaralı deliklerin açık olduğu kontrollü akış durumu için gösterimi	37
Şekil 3.6.	En yüksek enerjili dört DAY kipinin 1+4 numaralı deliklerin açık olduğu kontrollü akış durumu için gösterimi	37
Şekil 3.7.	En yüksek enerjili dört DAY kipinin 2+3 numaralı deliklerin açık olduğu kontrollü akış durumu için gösterimi	38
Şekil 3.8.	En yüksek enerjili dört DAY kipinin tüm deliklerin açık olduğu ve 0.1U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü akış durumu için gösterimi	38
Şekil 3.9.	En yüksek enerjili dört DAY kipinin tüm deliklerin açık olduğu ve 0.5U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü akış durumu için gösterimi	39
Şekil 3.10.	Tüm deliklerin kapalı olduğu kontrolsüz ve $u=0.1U$ ve $u=0.5U$ hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü akış durumları için kip genlikleri	40

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 3.11.	Deliklerin değişik kombinasyonlarda açıldığı ve $u=0.1U$ hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü akış durumları için kip genlikleri	41
Şekil 3.12.	KontROLSÜZ ve tüm deliklerin açık olduğu $0.5U$ hızı ile hava üflemesinin yapıldığı test durumlarında 1800 numaralı anlık görüntü sayısı için a) esas veri topluluğu ve b) en yüksek enerjiye sahip dört DAY kipinin ve ilgili kip genliklerinin dikkate alınmasıyla elde edilen yeniden yapılandırma sonuçları	43
Şekil 3.13.	Tüm deliklerin kapalı olduğu kontROLSÜZ a) laminer ve b) türbülanslı akış durumu için alışıl gelmiş anlık durum görüntüsü esasına dayanan DAY uygulamasının sonucunda elde edilen en yüksek enerji düzeyine sahip dört kipi gösterimi	46
Şekil 3.14.	HFD ile filtreleme öncesi ve sonrası gözlemlenen anlık x-düzlemi hız değerleri a) x koordinatı sabit tutulurken artan y koordinatlarında ve b) y koordinatı sabit tutulurken artan x koordinatlarında gözlemlenen tipik bir HFD analiz spektrumu	49
Şekil 3.15.	Tüm deliklerin kapalı olduğu kontROLSÜZ akış durumunda en yüksek enerjili dört DAY kipi için a) HFD ile filtreleme yapılmadan önce ve b) sonraki gösterimleri	52
Şekil 3.16.	HFD ile filtreleme sonrasındaki en yüksek enerjili dört DAY kipi için a) tüm deliklerin açık olup $u=0.1U$ hızı ile hava üflemesinin yapıldığı ve b) 1 numaralı deliğin açık olduğu kontrollü akış durumları için gösterimleri	53
Şekil 3.17.	HFD ile filtreleme sonrasındaki en yüksek enerjili dört DAY kipi için a) 1+2 numaralı deliklerin ve b) 2+3 numaralı deliklerin açık oldukları kontrollü akış durumları için gösterimleri	54
Şekil 3.18.	HFD ile filtreleme sonrasındaki en yüksek enerjili dört DAY kipi için 1+4 numaralı deliklerin açık olduğu a) $u=0.1U$ ve b) $u=0.5U$ hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü akış durumları için gösterimleri	55
Şekil 3.19.	HFD ile filtreleme sonrasındaki en yüksek enerjili dört DAY kipi için tüm deliklerin açık olduğu ve $u=0.5U$ hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü akış durumları için gösterimleri	56

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 3.20.	Tüm deliklerin kapalı olduğu kontrolsüz türbülanslı akış durumu için a) HFD ile filtreleme öncesi ve b) sonrası en yüksek enerjili ilk dört kipin bağıl kip genlikleri	57
Şekil 3.21.	Tüm deliklerin açık olduğu a) $u=0.1U$ ve b) $u=0.5U$ hızı ile hava üflemesinin yapıldı kontrollü türbülanslı akış durumları HFD ile filtreleme sonrası DAY uygulamasında en yüksek enerjili ilk dört kipin bağıl kip genlikleri	58
Şekil 3.22.	Silindir yüzeyindeki deliklerin değişik kombinasyonlarda açıldığı kontrollü türbülanslı akış durumları için HFD ile filtreleme sonrası DAY uygulamasında gözlemlenen en yüksek enerjili ilk dört kipin bağıl kip genlikleri	58
Şekil 3.23.	Silindir yüzeyindeki deliklerin değişik kombinasyonlarda açıldığı kontrollü türbülanslı akış durumları için HFD ile filtreleme sonrası DAY uygulamasında gözlemlenen en yüksek enerjili ilk dört kipin bağıl kip genlikleri	59
Şekil 3.24.	Kontrolsüz akış durumu 1337 numaralı anlık görüntü sayısı için a) esas veri topluluğu ve b) en yüksek enerjiye sahip dört DAY kipinin ve ilgili kip genliklerinin dikkate alınmasıyla elde edilen yeniden yapılandırma sonuçları	59
Şekil 3.25.	Laminer akış durumları için iki boyutlu silindirin yüzeyine yerleştirilmesine karar verilen optimum sensör konumları	64
Şekil 3.26.	Türbülanslı akış durumları için iki boyutlu silindirin yüzeyine yerleştirilmesine karar verilen optimum sensör konumları	65
Şekil 3.27.	Kontrolsüz laminer akış test durumunun hataların karekökünün ortalaması (RMSE) ve ortalama mutlak hatanın (MAE) kıyaslanmasının temel alındığı ağ performansı analizi	68
Şekil 3.28.	Kontrolsüz türbülanslı akış test durumunun hataların karekökünün ortalaması (RMSE) ve ortalama mutlak hatanın (MAE) kıyaslanmasının temel alındığı ağ performansı analizi	69
Şekil 3.29.	Kontrolsüz laminer akış test durumunun zaman gecikmesi değeri 6 ve gizli katman nöron sayısının 25 olarak alındığı ağ yapısı ile analizi sonucunda en yüksek enerjiye sahip a) birinci ve b) ikinci kiplerinin bağıl genliklerinin karşılaştırması	72

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 3.30.	Kontrolsüz türbülanslı akış test durumunun zaman gecikmesi değeri 8 ve gizli katman nöron sayısının 25 olarak alındığı ağ yapısı ile analizi sonucunda en yüksek enerjiye sahip a) birinci ve b) ikinci kiplerinin bağıl genliklerinin karşılaştırması	72
Şekil 3.31.	Tüm deliklerin açık olduğu ve 0.5U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü laminer akış test durumunun zaman gecikmesi değeri 6 ve gizli katman nöron sayısının 25 olarak alındığı ağ yapısı ile analizi sonucunda en yüksek enerjiye sahip a) birinci ve b) ikinci kiplerinin bağıl genliklerinin karşılaştırması	73
Şekil 3.32.	Tüm deliklerin açık olduğu ve 0.5U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü türbülanslı akış test durumunun zaman gecikmesi değeri 8 ve gizli katman nöron sayısının 25 olarak alındığı ağ yapısı ile analizi sonucunda en yüksek enerjiye sahip a) birinci ve b) ikinci kiplerinin bağıl genliklerinin karşılaştırması	73
Şekil 3.33.	Laminer ve türbülanslı akış test durumlarının YSA tahminlerinin elde edilmesinde kullanılan ağ yapısının şematik gösterimi	74
Şekil 3.34.	Laminer ve türbülanslı akış test durumlarının YSA tahminlerinin elde edilmesinde baştan sona kadar geçen süreçte yapılan uygulamalar	75
Şekil 3.35.	Tüm deliklerin açık olduğu ve 0.1U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü laminer akış test durumunun en yüksek enerjiye sahip a) birinci ve b) ikinci kiplerinin bağıl genliklerinin karşılaştırması	76
Şekil 3.36.	2+3 numaralı deliklerin açık olduğu kontrollü laminer akış test durumunun en yüksek enerjili a) birinci ve b) ikinci kiplerinin bağıl genliklerinin karşılaştırması	76
Şekil 3.37.	Silindir yüzeyindeki deliklerin değişik kombinasyonlarda açık olduğu kontrollü laminer akış test durumunun en yüksek enerjiye sahip a) birinci ve b) ikinci kiplerinin bağıl genliklerinin karşılaştırması	77

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 3.38.	1+4 numaralı deliklerin açık olup a) 0.1U hızı ve b) 0.5U hızı ile hava üfleme sinin yapıldığı kontrollü türbülanslı akış test durumlarının en yüksek enerjili birinci ve ikinci kiplerinin bağıl genliklerinin karşılaştırması	78
Şekil 3.39.	Silindir yüzeyindeki deliklerin de ğişik kombinasyonlarda açık oldu ğu kontrollü türbülanslı akış test durumunun en yüksek enerj iye sahip a) birinci ve b) ikinci kiplerinin bağıl genliklerinin karşılaştırması	79
Şekil 3.40.	Tüm deliklerin açık oldu ğu ve 0.1U hızı ile hava üfleme sinin yapıldığı kontrollü türbülanslı akış test durumunun en yüksek enerj iye sahip a) birinci ve b) ikinci kiplerinin bağıl genliklerinin karşılaştırması	80
Şekil 4.1.	İki boyutlu sürülmüş kavite akışı probleminin şematik gösterimi	81
Şekil 4.2.	Zamana ba ğlı iki boyutlu kavite akış alanının 101x101 boyutlarındaki çözüm a ğının kullanıldığı Re=100 test durumu için de ğişik anlık görüntü sayılarında a) akım fonksiyonu ve b) x-düzlemi hız verilerinin kullanılarak incelenmesi	87
Şekil 4.3.	Zamana ba ğlı iki boyutlu kavite akış alanının 101x101 boyutlarındaki çözüm a ğının kullanıldığı Re=500 test durumu için de ğişik anlık görüntü sayılarında a) akım fonksiyonu ve b) x-düzlemi hız verilerinin kullanılarak incelenmesi	88
Şekil 4.4.	Zamana ba ğlı iki boyutlu kavite akış alanının 101x101 boyutlarındaki çözüm a ğının kullanıldığı Re=1000 test durumu için de ğişik anlık görüntü sayılarında a) akım fonksiyonu ve b) x-düzlemi hız verilerinin kullanılarak incelenmesi	89
Şekil 4.5.	Zamana ba ğlı iki boyutlu kavite akış alanının 101x101 boyutlarındaki çözüm a ğının kullanıldığı Re=5000 test durumu için de ğişik anlık görüntü sayılarında a) akım fonksiyonu ve b) x-düzlemi hız verilerinin kullanılarak incelenmesi	90
Şekil 4.6.	Zamana ba ğlı iki boyutlu kavite akış alanının 101x101 boyutlarındaki çözüm a ğının kullanıldığı Re=10000 test durumu için de ğişik anlık görüntü sayılarında a) akım fonksiyonu ve b) x-düzlemi hız verilerinin kullanılarak incelenmesi	91

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 4.7.	Kavite akış alanında $x=0.005$ m ve $y=0.005$ m noktasının hızının zamana bağlı değişimi a) $Re=100$, b) $Re=500$, c) $Re=1000$, d) $Re=5000$ ve e) $Re=10000$	92
Şekil 4.8.	$Re=100$ test durumu için en yüksek enerjili dört DAY kipinin (mode) betimlemeleri a) akım fonksiyonu ve b) x-düzlemi hızı	95
Şekil 4.9.	$Re=500$ test durumu için en yüksek enerjili dört DAY kipinin (mode) betimlemeleri a) akım fonksiyonu ve b) x-düzlemi hızı	96
Şekil 4.10.	$Re=1000$ test durumu için en yüksek enerjili dört DAY kipinin (mode) betimlemeleri a) akım fonksiyonu ve b) x-düzlemi hızı	97
Şekil 4.11.	$Re=5000$ test durumu için en yüksek enerjili dört DAY kipinin (mode) betimlemeleri a) akım fonksiyonu ve b) x-düzlemi hızı	98
Şekil 4.12.	$Re=10000$ test durumu için en yüksek enerjili dört DAY kipinin (mode) betimlemeleri a) akım fonksiyonu ve b) x-düzlemi hızı	99
Şekil 4.13.	$Re=100$, $Re=500$ ve $Re=1000$ için anlık görüntü sayısına karşılık a) akım fonksiyonu ve b) x-düzlemi hız verilerinin DAY analizleri neticesinde elde edilen kip genlikleri (mode amplitudes)	101
Şekil 4.14.	$Re=5000$ ve $Re=10000$ için anlık görüntü sayısına karşılık a) akım fonksiyonu ve b) x-düzlemi hız verilerinin DAY analizleri neticesinde elde edilen kip genlikleri (mode amplitudes)	102
Şekil 4.15.	$Re=100$, $Re=1000$ ve $Re=10000$ test durumlarında, 1400 numaralı anlık görüntü sayısı için, akım fonksiyonu esas alınarak gözlemlenen a) HAD analizleri sonucunda elde edilen esas veri topluluğu ve b) en yüksek enerjiye sahip dört DAY kipinin ve ilgili kip genliklerinin dikkate alınmasıyla elde edilen yeniden yapılandırma sonuçları	103
Şekil 4.16.	$Re=100$ test durumunda uygulanan ağ performans analizi, zaman gecikmesi (time delay) ve gizli katman nöron sayısının (hidden layer neuron number) tayini için hataların karekökünün ortalaması (RMSE) ve ortalama mutlak hatanın (MAE) kıyaslanması	106

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 4.17.	Re=100 test durumu için a) akım fonksiyonu ve b) x-düzlemi hız verilerinin DAY analizleri sonucunda elde edilen esas kip genlikleri ile YSA uygulaması sonucunda tahmin edilen kip genliklerinin karşılaştırması	108
Şekil 4.18.	Re=10000 test durumu için a) akım fonksiyonu ve b) x-düzlemi hız verilerinin DAY analizleri sonucunda elde edilen esas kip genlikleri ile YSA uygulaması tahmin edilen ve ölçeklendirme yapılmış kip genliklerinin karşılaştırması	110
Şekil 4.19.	Re=500 test durumu için a) akım fonksiyonu ve b) x-düzlemi hız verilerinin DAY analizleri sonucunda elde edilen esas kip genlikleri ile YSA uygulaması tahmin edilen ve ölçeklendirme yapılmış kip genliklerinin karşılaştırması	111
Şekil 4.20.	Re=1000 test durumu için a) akım fonksiyonu ve b) x-düzlemi hız verilerinin DAY analizleri sonucunda elde edilen esas kip genlikleri ile YSA uygulaması tahmin edilen ve ölçeklendirme yapılmış kip genliklerinin karşılaştırması	112
Şekil 4.21.	Re=5000 test durumu için a) akım fonksiyonu ve b) x-düzlemi hız verilerinin DAY analizleri sonucunda elde edilen esas kip genlikleri ile YSA uygulaması tahmin edilen ve ölçeklendirme yapılmış kip genliklerinin karşılaştırması	113

KISALTMALAR

Kısaltma	Açıklama
ADI	Alternating Direction Implicit Çözüm Metodu
ARX	Özbağımlı Dış Girdi (Auto Regressive eXternal Input) Yöntemi
DAY	Dikgen Ayırıştırma Yöntemi
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği
HFD	Hızlı Fourier Dönüşümü
MAE	Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error)
MLP	Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi Layer Perceptron) Sinir Ağı Yapısı
RMSE	Hataların Karekökünün Ortalaması (Root Mean Square Error)
PSOR	Point-Successive Over Relaxation Çözüm Metodu
YSA	Yapay Sinir Ağı

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
α_{ik}	DAY kip genlikleri
b^k	Eşik değeri
C	Kovaryans matrisi
$C(\bar{x}, \bar{x}')$	Korelasyon tensörü
d_m	Hataların birinci türevlerinin toplamı
Δt	Sayısal zaman adımı
Δx	Mekansal x koordinat düzlemi değişimi
Δy	Mekansal y koordinat düzlemi değişimi
Δw_m	Tek bir ağırlık değerinin m döngüsünde ağırlık değerinin değişimi
e^λ	Koşullandırma parametresi
$E(w_m)$	Hata değeri (m döngüsündeki her ağırlık değeri için)
E_{\min}	Ağırlık değeri için minimum hata değeri (tolerans)
H_m	Her ağırlık değerine karşılık tüm ikinci türevlerin Hessian matrisi
$\varphi(\cdot)$	Aktivasyon fonksiyonu
$\phi(\bar{x})$	Temel (öz) fonksiyonlar
I	Birim matrisi
$K_i(\bar{x})$	Ortalama değerden sapmaların bulunduğu veri topluluğu
λ	Öz değerler (enerji içerikleri)
M	Toplam anlık görüntü sayısı
p	Basınç
Ω	İncelenen veri topluluğunun etkinlik alanı
ψ	Akım fonksiyonu
R	Tekil Değer Ayrıştırması sonucunda elde edilen dikgen matris
Re	Reynolds number
S	Toplam DAY kipi sayısı
$S_m(t)$	Zaman gecikmesi değerlerinin analizlere toplam etkisi
Σ	Öz değer matrisi
t	Zaman (gerçek)
T	Simülasyonun bir periyodunda yer alan toplam zaman adımı

Simgeler	Açıklama
u	Kavite akış alanı x-düzlemi hız bileşeni
U_p	Kavite plaka hız fonksiyonu
$U_i(\vec{x})$	Fiziksel davranışın sayısal ifadelerinin bulunduğu esas veri topluluğu
\bar{U}	Esas veri topluluğunun ortalaması
v	Kavite akış alanı y-düzlemi hız bileşeni
\vec{V}	Kavite akış alanı
w_i^k	YSA sistemi ağ yapısında kullanılan ağırlıklar
x_i	YSA sistemi girdisi
ζ	Vortisite

1. GİRİŞ

1.1. Motivasyon

Akış kontrolünün arkasında yatan temel düşünce, yapıların görev performansını artırmak için aerodinamik karakteristiklerin geliştirilmesidir. Akış alanına yerleştirilen bir cismin üzerine etkiyen sürüklenmenin ve akış alanı tarafından uygulanan değişken yüklerin azaltılması aerodinamik karakteristiklere örnek olarak verilebilir. Akış kontrolünü meydana getiren önemli araştırma alanlarından birisi, yapıların arkasında, akış alanının hareketine bağımlı olarak gözlenen ve akışkan içerisinde meydana gelen girdap oluşumu davranışının incelenmesidir [1].

Akış alanına yerleştirilen yapıların arkasında harekete bağımlı olarak uyarılan akışkan bölgesi, büyük ve küçük ölçekteki girdaplarla kaplı olan dar ve uzun bir alandır. Pratikte, su üzerinde ileriye doğru hareket eden bir geminin arkasında bıraktığı izler bu tür alanlara örnek olarak verilebilir. Harekete maruz bırakılmış akış alanı, akıştaki düzensizliklerden kaynaklanan salınımlar gerçekleştirir [2].

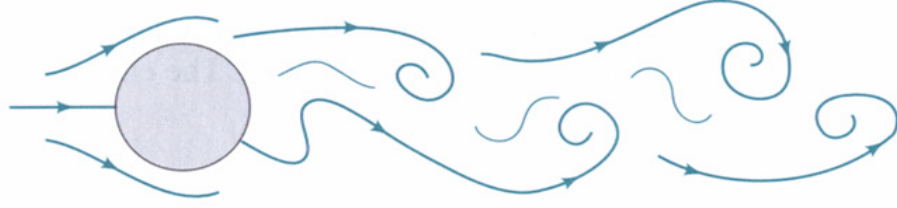
Akış sistemleri gibi dinamik olarak değişen fiziksel sistemlerin kontrolünde matematiksel ve istatistiksel yaklaşımların kullanımı büyük önem taşımaktadır. Dinamik olarak değişen fiziksel sistemlerde, genel olarak, sistem tanımlaması ve kontrolü amacıyla kullanılacak değişken sayısı ve bu değişkenlerin çözümüne olanak tanıyan kısıtlar fazla sayıda ve karmaşık hallerde bulunurlar. Bu tür sistemlerin matematiksel ve istatistiksel yaklaşımlar kullanılarak yapılan çözümleri bilgisayar destekli dahi olsa zorlayıcı ve vakit alıcı olabilir [3].

Örneğin, özellikle türbülans içeren bir akışkan akışının kontrolü, Navier-Stokes eşitliklerinin doğrusal olmayan karakteristiklerine bağlı olduğundan yoğun hesaplamaların yer aldığı yaklaşımlar gerektirir. Bu tür yaklaşımlar, elde edilen büyük boyutlardaki veri setlerinin eş zamanlı ve tekrarlanan bir şekilde çözümünü zorunlu kılar. Böyle bir çözüm yaklaşımı ise bir akış kontrolü stratejisinde istenmeyen karmaşıklık ve zaman kaybını da beraberinde getirir [4].

Dinamik olarak değişen fiziksel karakteristikleri algılayabilecek bir akış kontrol sistemi oluşturabilmek için gerçek zamanlı durum çözümleri gereklidir. Özellikle doğrusal olmayan veya karmaşık durum çözümlerinin bulunduğu akış sistemleri için, akış kontrolü stratejisinin hayata geçirilebilmesi amacıyla, akış yapılarının baskın karakteristiklerinin ve eğilimlerinin temsil edildiği yaklaşımların kullanımı gereklidir. Bu amaçla, büyük mertebelerde karmaşık veri toplulukları ile ifade edilen fiziksel akış sistemlerinde, akış yapılarının oluşumunu temsil eden ve etkin verilerin barındırıldığı düşük mertebelerdeki modellerin kullanımı geliştirilmiştir. Günümüzde, akışkanlar mekaniğinde yer alan karmaşık sistemlerin modellenmesinde en çok kullanılan düşük mertebeli modelleme yaklaşımı Dikgen Ayrıştırma Yöntemi'dir (DAY) [5].

Yapay Sinir Ağları (YSA) kavramı beynin çalışma ilkelerinin sayısal olarak bilgisayarlar üzerinde taklit edilmesi fikri ile ortaya çıkmıştır. İlk çalışmalar beyni oluşturan biyolojik sinir hücrelerinin, ya da diğer ismiyle nöronların matematiksel ve istatistiksel olarak modellenmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. YSA sistemleri öğrenme, ilişkilendirme, sınıflandırma, genelleme, tahmin, özellik belirleme ve optimizasyon gibi işlemleri gerçekleştirebilme yeteneklerine sahiptir. Bu yetenekler akış sistemleri gibi karmaşık ve dinamik özellikteki fiziksel problemlerin çözümünde YSA sistemlerinin kullanımını çekici kılmaktadır. Ayrıca, YSA sistemlerinin üstünlükleri olan doğrusal olmama, paralellik ve buna bağlı olarak hız, analiz ve tasarım kolaylığı, özellikle gerçek zamanlı sistemler için akış kontrolü stratejisi oluşturmada büyük avantaj sağlamaktadır [6].

Bu çalışma kapsamında, zamana bağlı iki boyutlu dairesel silindir üzerindeki Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) verileri daha önceden elde edilmiş laminar ve türbülanslı akış uygulamaları için DAY yaklaşımı kullanılarak, silindirin arkasında kalan iz bölgesinde von Kármán girdap yolu ile ilişkilendirilen (Şekil 1.1), baskın mekansal ve zamansal karakteristiklerin incelendiği düşük mertebeli yaklaşımlar oluşturulmuş ve YSA yaklaşımı kullanılarak değişik akış durumları için zamansal karakteristikler tahmin edilmiştir.



Şekil 1.1. İki boyutlu dairesel silindirin arkasında kalan iz bölgesinde von Kármán girdap yolu oluşumunun gösterimi

Ayrıca, bu çalışmada, zamana bağlı iki boyutlu sürülmüş kavite akışı uygulaması için Reynolds sayısının (Re) 100, 500, 1000, 5000 ve 10000 olarak alındığı akış alanının sayısal çözümü yapılmış, akım fonksiyonu ve x-yönü hız değerleri dikkate alınarak akış alanında oluşan yapılar incelenmiştir. Daha sonra, zamana bağlı iki boyutlu dairesel silindir üzerindeki laminer ve türbülanslı akışların incelemesinde kullanılan DAY ve YSA yaklaşımları iki boyutlu sürülmüş kavite akışı için de uygulanarak, değişik Reynolds sayılarındaki (Re) akış durumları için zamansal karakteristikler tahmin edilmiştir.

Gerçek zamanlı dinamik akış sistemlerine örnek olan her iki uygulamada da tahmin edilen zamansal karakteristikler akış kontrolü stratejilerinin oluşturulmasında büyük önem taşımaktadır.

1.2. Literatür Araştırması

1.2.1. Silindir Üzerindeki Akış Uygulaması Kapsamında Dikgen Ayrıştırma Yönteminin Kullanılması Üzerine Yapılan Literatür Araştırması

Dikgen Ayrıştırma Yöntemi (DAY) deneysel veya sayısal çalışmalar sonucunda elde edilen yüksek mertebeli veri topluluklarının serbestlik derecelerinin indirgenerek düşük mertebeli yaklaşık tanımlamalarının elde edilmesinde kullanılan bir tür veri analiz yöntemidir [7].

Gerçek zamanlı bir sistemin, mekanda ve zamanda değişen detaylarını ve karakteristik davranışlarını inceleyebilmek için sistemi oluşturan veri grubunun mekana ve zamana bağlı yapılarını ayırabilecek pratik bir yaklaşım gereklidir [3]. DAY uygulaması ile deneysel veya sayısal olarak elde edilen veri topluluğu analiz edilerek, en yüksek enerjiye sahip bir dizi anlık görüntü sayısına karşılık gelen baskın özellikler ve karakteristikler sistemi tanımlayıcı kiplerle ve kip genlikleriyle ifade edilir [8].

DAY uygulaması ilk olarak Karhunen ve Loève tarafından literatüre kazandırılmış olup farklı disiplinler için farklı adlarla anılmaktadır, örneğin Karhunen-Loève Ayırıştırması (Karhunen-Loève Decomposition), Temel Bileşen Analizi (Principal Component Analysis) veya Tekil Sistemler Analizi (Singular Systems Analysis) literatürde sıklıkla kullanılan özdeş isimlerden birkaçıdır [9]. DAY uygulamasının temel mantığı, karmaşık ve olasılıksal özellikte olan bir sistem için, tanımlanmış veri topluluğunun analiz edilmesiyle bir alt uzay oluşturmak ve bu alt uzayda dikgen fonksiyonların doğrusal birleşimleri olacak şekilde sistemi asıl veri topluluğunun en etkin üyelerini kullanarak temsil etmektir [10].

DAY'nin geliştirilmesi şekil ve kalıp tanıma alanında yapılan çalışmalarla başlamıştır. Yöntem halen insan yüzü tanıma, türbülanslı akış analizleri, yapısal titreşimler, hasar tespiti, görüntü işleme, sinyal analizi, veri sıkıştırma, süreç tanımlama ve mühendislik uygulamalarında kontrol yaklaşımlarının oluşturulması gibi birçok farklı alanda karmaşık veri topluluklarının analiz edilmesinde, bu tür sistemler için düşük mertebeli yaklaşık tanımlamaların elde edilmesinde ve modellenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır [11]. Bilimsel uygulamalar haricinde, DAY yaklaşımının süpersonik jet modellemesi, binaların üzerine etkiyen dinamik rüzgar basınçlarının araştırılması, hava şartlarının tahmini ve uygulamalı okyanus bilimi gibi birçok doğal ve endüstriyel alanda da kullanımı mevcuttur [7].

Lumley [8] ve Aubry vd. [12] DAY uygulamasını akışkanlar mekaniği alanında kullanan, akış alanında mekana ve zamana bağlı gözlemlenen yapıları ve karakteristiklerini inceleyerek düşük boyutlu model yaklaşımları öneren öncüler

olmuşlardır. Literatürde akışkanlar mekaniği uygulamaları için DAY'nin düşük boyutlu modelleme aracı olarak kullanıldığı ve karmaşık akış sistemlerindeki davranışlar için çözümlerinin incelendiği çeşitli çalışmalar bulunmaktadır.

Örneğin, O'Donnell ve Helenbrook [13] tarafından yapılan çalışmada, bir kanal yapısı içinde küresel parçacıklar içeren akışın parametrik değişimi ve parçacık akışının temel fiziği, kısmi diferansiyel denklem sistemlerinin serbestlik derecelerinin DAY kullanılarak indirgenmesiyle sayısal olarak incelenmiştir. Yazarlar kanal içine yerleştirilen küresel parçacıklar etrafında sıkıştırılmaz, simetrik eksenli ve sürekli akış rejiminin olduğunu varsayarak, DAY uygulaması ile küresel tanecikler üzerine değişik koşullar altında etki eden sürüklenmeyi tahmin etmek için alternatif korelasyon yaklaşımları geliştirmişlerdir.

Sen vd. [14] tarafından yapılan çalışmada ise, DAY uygulaması bir kanal içerisinde türbülanslı sınır tabakasının oluşumunda duvar yüzey pürüzlülüğü etkisinin doğasını net olarak anlamak için kullanılmıştır. Yazarlar, kanal boyunca Doğrudan Sayısal Simülasyon (Direct Numerical Simulation) ile elde ettikleri hız veri tabanını DAY kullanarak incelemişler ve pürüzlülük etkisi için hız veri tabanındaki baskın özellikler ile karakteristikleri kullanarak düşük mertebeli model yaklaşımı geliştirmişlerdir.

Bir başka çalışmada, Connell ve Kulasiri [15] nehirlerdeki su baskınları için Navier-Stokes eşitliklerini kullanarak, akışta oluşan türbülans yapılarının ve karakteristiklerinin analiz edilmesinde DAY yaklaşımını uygulamışlardır. Yazarlar bu çalışmada Parçacık Hızı Görüntüleme (Particle Image Velocimetry) ölçümlerinden elde edilen veri topluluğunda gözlemlenen hız vektörlerini mekanda ve zamanda ayırarak kipleri ve kip genliklerini elde etmişlerdir. Daha sonra, en baskın düzeydeki türbülanslı yapıların barındırıldığı bu kiplerden ve kip genliklerinden faydalanarak, nehirlerdeki türbülanslı salınımlar ve dalgalar için bir model geliştirmişlerdir.

Lieu vd. [16] yaptıkları bir çalışmada, DAY uygulamasının endüstriyel ölçekte kullanımına ilişkin fikir oluşturması ve bu alandaki potansiyelini gösterebilmesi adına, F-16 savaş uçağının tam yapılandırmasında DAY uygulaması ile düşük mertebeli aeroelastik modellemesinin yapılabileceğini, bu sayede tamamen simülasyona dayalı gerçek zamanlı analizleri gerçekleştirmenin gelecekte mümkün olabileceğini belirtmişlerdir.

Bu çalışma kapsamında incelenen uygulama problemlerinden ilki olan silindir üzerindeki akış literatürde birçok deneysel ve sayısal çalışmada prototip olarak kullanılmıştır. Örneğin, Gillies [2] tarafından yapılan bir çalışmada, akış alanı içine yerleştirilen iki boyutlu bir silindirin iz bölgesinde oluşan periyodik girdap yapısı (vortex shedding) gözlemlenmiş ve DAY kullanılarak akış alanı sonlu sayıda mekana bağlı akış yapılarının ve karakteristiklerinin barındırıldığı kipler ile ifade edilmiştir. Yazarın bu çalışmadaki asıl amacı silindirin iz bölgesinde çalışacak verimli bir kapalı devre kontrol algoritması ve stratejisi oluşturmaktır. Gillies'in [2] araştırmasına göre Navier-Stokes denklemlerinin silindir akış problemi için tam çözümü karmaşıklığın düzeyini artırdığından verimli bir kontrol stratejisinin oluşturulmasını engellemektedir. Bu nedenle, yazar, çalışmasında DAY uygulamasının akış kontrolü sistemlerinde akışın tanımlanması ve nitelendirilmesindeki önemine ve gerekliliğine dikkat çekmiştir.

DAY'nin silindir üzerindeki akışta kullanıldığı, Cohen vd. [17,18], Seidel vd. [19] ve Siegel vd. [20,21] tarafından yürütülen çalışmalarda, DAY uygulaması silindir üzerindeki akış problemi için geri beslemeli akış kontrolü stratejisi oluşturmada, akış dinamiğinin simülasyonu için dinamik matematiksel modellerin oluşturulmasında, veri toplamak için gerekli sensör noktalarının belirlenmesinde ve kontrol mekanizmasında denetleyici sistem için uygun ölçekte veri gruplarının elde edilmesinde kullanılmıştır. Ayrıca, Ma ve Karniadakis [22] tarafından yapılan bir çalışmada ise üç boyutlu silindir üzerinde akışın dinamiği ve sistem kararlılığı analizleri DAY kullanılarak irdelenmiştir.

1.2.2. Sürülmüş Kavite Akışı Uygulaması Kapsamında Dikgen Ayrıştırma Yönteminin Uygulanması Üzerine Yapılan Literatür Araştırması

Sürülmüş kavite akışı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile akışkan akışlarının incelendiği en popüler çalışma problemlerinden birisidir. Basit bir geometriye ve sınır şartlarına sahiptir, aynı zamanda akış problemlerinde gözlemlenen temel fiziksel davranışları (örneğin sınır tabakaları, değişik boyut ve karakteristiklerdeki girdapları ve çeşitli kararsızlıkları) yapısında barındırmaktadır [23]. Bu sebeple, sürülmüş kavite akışı problemi, hem bilimsel hem de mühendislik uygulamalarında, daha karmaşık düzeydeki akış problemleri için yeni simülasyon ve çözüm tekniklerinin geliştirilmesinde test durumu olma niteliği taşımaktadır.

Literatürde değişik sayısal yaklaşımların uygulanarak sürülmüş kavite akışı problemlerinin incelendiği çok çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin, Erturk vd. [24] iki boyutlu, sıkıştırılmaz ve sürekli rejimdeki bir sürülmüş kavite akışı problemini, Reynolds sayısının (Re) aralığı $Re \leq 21000$ olacak şekilde, 601x601 boyutlarında oldukça sıkı örülü bir çözüm ağı kullanarak incelemiştirlerdir. Yazarlar bu çalışmada, değişik boyutlarda çözüm ağları kullanarak, tanımlanan Reynolds sayısı (Re) aralığında akış yapılarının en iyi şekilde gözlemlendiği analizlerin sonuçlarını irdelenmiştirlerdir.

Perumal ve Dass [25] tarafından yürütülen bir çalışmada ise kavite içinde oluşan girdap şekilleri 100 ile 2000 arasında değişen Reynolds sayısı (Re) aralığında incelenmiştir. Yazarlar inceledikleri kavite geometrisinde, sürülmüş plaka olarak hem alt hem de üst yatay sınırları önce aynı yönde sonra da ters yönde paralel hareket ettirerek, akış alanı içinde oluşan girdap yapılarının oluşumlarını irdelenmiştirlerdir. Benzer bir çalışma Peng vd. [26] tarafından Doğrudan Sayısal Simülasyon (Direct Numerical Simulation) ile incelenmiştir. Ancak, yazarlar bu çalışmada, sadece üst yatay sınırı (plaka) tek yönde hareket ettirerek laminer akış rejiminden türbülanslı akış rejimine geçiş aralığında kavite içindeki girdap oluşumları ve etkilerini irdelenmiştirlerdir.

Sürüklenmiş kavite akışı probleminin kullanıldığı, Koblitz vd. [27] tarafından yapılan değişik bir çalışmada ise yazarlar tarafından geliştirilen HAD kodu ile iki boyutlu kavite akışı probleminin çözümünde atmosferik sınır tabakasında ısı kararlılığın etkileri gözlemlenmiştir. Yazarların bu çalışmadaki asıl amacı, iki boyutlu sürülmüş kavite akışı problemini jeofiziksel taşınım olaylarının tahmin edilmesinde kullanmaktır.

Literatürde, sürülmüş kavite akışı problemi ile DAY uygulamasının ilişkilendirildiği kavite içinde oluşan akış yapılarının ve karakteristiklerinin incelendiği ve sürülmüş kavite akışı problemleri için düşük boyutlu modellerin yapılandırıldığı değişik çalışmalar bulunmaktadır.

Örneğin, Gracia [28] tarafından yapılan bir çalışmada, iki boyutlu sürülmüş kavite akışı problemi için değişik miktarlarda anlık görüntü sayıları ile yapılandırılmış veri topluluklarına DAY uygulanmıştır. Yazar bu çalışmada anlık görüntü sayısının DAY uygulamasındaki yaklaştırmaya olan etkilerini hataların mertebelerini dikkate alarak irdelemiştir. Gracia [28] elde ettiği sonuçlarda, daha büyük miktarlardaki anlık görüntü sayılarının analiz edildiği durumlarda, esas veri topluluğunun düşük boyutlu modeli için gerekli olan kip sayısında belirgin bir değişiklik gözlemlenmediğini rapor etmiştir. Buna karşılık, anlık görüntü sayısının yeterli olmadığı veya az miktarda kullanıldığı durumlarda, tek bir DAY kipi kullanarak yapılan yaklaşımların akış alanına ilişkin büyük orandaki bilgiyi taşıyamadığını ve sonuç olarak yaklaştırma neticesinde esas inceleme durumuna göre büyük miktarda bilginin kaybedildiğini belirtmiştir.

İki boyutlu sürülmüş kavite akışı probleminin DAY uygulaması kullanılarak incelendiği bir başka çalışmada, Ahlman vd. [29] Reynolds sayısının (Re) aralığı 10 ile 2500 arasında değişecek şekilde zamana bağlı akış simülasyonlarını incelemişlerdir. Yazarlar bu çalışmada esas olarak DAY uygulama tekniğinin verimli olduğu etkinlik düzeyini dikkate almışlardır. Yazarlar, zamana bağlı akış simülasyonları sonucunda elde edilen veri topluluklarında, x ve y düzlemlerindeki hız verilerine DAY uygulamışlar ve sadece en yüksek enerjili ilk üç kipi dikkate

alınmasıyla esas akış alanına %99 yakınlıkta sonuçlar elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Ayrıca, DAY'nin en az verimli olduğu alanların ise kavite içinde ani hız değişimlerinin ve daha yüksek hız büyüklüklerinin gözlemlendiği bölgeler olduğunu dile getirmişler, bu bölgelerde yaklaştırma sonuçlarının esas sonuçlara göre farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir.

DAY kullanılarak iki boyutlu sürülmüş kavite akışının incelendiği bir başka çalışma ise Cazemier vd. [30] tarafından gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, Reynolds sayısının (Re) aralığı $Re \leq 22000$ olacak şekilde Doğrudan Sayısal Simülasyon ile elde ettikleri veri gruplarına DAY uygulayarak değişik sayıda kpin dikkate alınmasıyla Navier-Stokes eşitliklerinin düşük boyutlu modellerinin verimliliklerini incelemişlerdir.

1.2.3. Yapay Sinir Ağı Uygulaması Kapsamında Yapılan Literatür Araştırması

Yapay Sinir Ağları (YSA) temelleri nörobiyolojiye dayanan, biyolojik sinir sistemlerini ve insan beynini temel alan bilgi işleme benzerliğinden faydalanarak, bilgisayar sistemlerinin karmaşık problemlere çözüm oluşturması amacıyla hayata geçirilmesidir. Bir YSA sistemi, çalıştığı arka planda, bir dizi matematiksel ve istatistiksel yaklaşımlar ile tanımlandığı sistem için kullanıcı tarafından verilen girdileri kullanarak çıktıları tahmin eder [31].

İlk YSA sistemi 1943 yılında McCulloch ve Pitts [32] tarafından biyolojik nöronların basitleştirilmiş matematiksel ve istatistiksel tanımlamalarının yapılmasıyla ortaya çıkmıştır. Nöronlar biyolojik sistemlerin temel sinyal işleme ve iletim üniteleridir. Bulunduğu biyolojik sistemde her nöron ayrı birer hücre olmakla beraber, sinir sisteminde bir araya gelen nöronlar biyolojik sistemlerde hayatın devamı için gerekli olan birçok karmaşık ve değişik işlemi yerine getirirler. YSA sistemlerinde bulunan nöronlar ise biyolojik eşlerinin birer taklidi niteliğindedir [33].

YSA sistemleri, geleneksel yaklaşımların uygulanması sonucunda analitik çözümü elde edilemeyen karmaşık, belirli bir fiziğe göre tanımlanamayan problemlerin

çözümüne olanak tanımaktadır. Yüksek işlem hızı, bir dizi örnekten yola çıkarak bir problemin çözümünü öğrenme, kesin olmayan, gürültülü ve yüksek derecede karmaşık, doğrusal olmayan veri grupları ile çalışabilme ve paralel işlem yeteneği YSA sistemlerinin dikkate değer özelliklerindedir [34].

Sağladıkları bu özellikler sayesinde, YSA sistemleri birçok değişik alanda problemleri çözmeye başarıyla uygulanmıştır. YSA uygulamalarının çeşitlilik gösterdiği ve uygulandığı bu alanlara,

- Bitki ekosistemlerinin büyümesi, sağlığı ve çevreyle olan iletişimi [35],
- Genetik çalışmalar için veri analizi ve protein yapısının tahmini [36],
- Biyolojik malzemelerin davranışlarının ve özelliklerinin tahmini [37],
- Çevredeki kimyasalları ve bu kimyasalların bölgesel ve küresel sonuçlarının tahmini [38],
- Göllere ve nehirlere su girişi tahminleri [39],
- Atık oluşumuna sebep olan faktörlerin anlaşılması ve uzun süreçte atık üretimi tahmini [40],
- Şebeke elektriğindeki yüklenmelerin tahmin edilmesi [41],
- Ekonomik tahminler [42]

örnek verilebilir.

Belirtilen alanların haricinde, YSA sistemleri akışkan etkileşimlerinin bulunduğu sistemlerde akış yapılarının ve karakteristiklerinin tahmin edilmesinde de kullanılmaktadır. Örneğin, Xie vd. [43] tarafından yapılan bir çalışmada, YSA sistemi, kabuk boru tipi ısı değiştiricilerde Reynolds sayısının (Re) değişim aralığı 100 ile 10000 olacak şekilde, laminar ve türbülanslı rejimlerde deneysel ölçümler sonunda elde edilen Nusselt sayıları ile sayısal olarak hesaplanmış sürtünme katsayılarını ilişkilendirmek için kullanılmıştır. Yazarlar bu çalışmada, geometrik parametrelerden oluşan (boru sayısı, boruların dizilim düzeni, borulardaki kanatçıkların yapısı, vb.) 12 farklı girdi setini, Nusselt sayısı ve sürtünme katsayısı ile ilişkilendirmişlerdir. Belirli bir veri topluluğu kullanarak eğittikleri ileri-beslemeli ve geri-yayımlı YSA modelini, benzer geometrilerdeki sonuçları tahmin etmek için kullanmışlardır. Değişik nöron sayıları ve katmanların denendiği çalışma sonucunda,

yazarlar esas veriler ile YSA sisteminin öne sürdüğü tahminler arasında %4'ten daha az düzeyde bir fark saptayarak, YSA sisteminin pratik kullanımının başarısını, sağladığı kolaylığı ve önemi vurgulamışlardır.

Shayya vd. [44] tarafından yürütülen benzer bir çalışmada, YSA sistemi boru boyunca Newton tipi olan akışkanların kullanıldığı sistemlerde sürtünme katsayılarının ve neticede basınç kayıplarının tahmin edilebilmesi için kullanılmıştır. Reynolds sayısı (Re) ve bağıl pürüzlülük YSA modelinin girdileri olarak kullanılmış ve sürtünme katsayısı modelin çıktısı olarak alınmıştır. Yazarların elde ettikleri sonuçlara göre, oluşturulan YSA modelinin, Reynolds sayısı (Re) $2 \times 10^3 - 1 \times 10^8$ ve bağıl pürüzlülük $1 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-2}$ aralığındayken, sürtünme katsayısının hatalı nokta metodu kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlarla uyumlu olduğunu saptamışlardır. Ayrıca yazarlar, YSA sisteminin kullanımının aynı parametrelerin değişik koşullar altında belirlenmesinde, karmaşık ve yinelenen hesaplamalar gerektiren akış problemlerinde hızlı ve tutarlı sonuçlar vererek zaman kaybını büyük ölçüde azalttığını belirtmişlerdir.

Zhang vd.'nin [45] yaptığı bir çalışmada ise, ileri-beslemeli YSA sistemi akış dinamiği bilgilerinden faydalanarak akış tahmininde kullanılmıştır. Yazarlar, statik bir prizma etrafında uzatılmış bir dikdörtgen kesit alanı dahilinde iki boyutlu von Kármán girdap yapılarını gözlemlemişlerdir. YSA sisteminde öğrenme işlemini sağlamak amacıyla Reynolds sayısının (Re) 250 ile 800 arasında değiştiği ve farklı girdap oluşturma fazlarında daha önceden hesaplanmış akış çözümlerinden faydalanmışlardır. Oluşturulan YSA sistemi sayesinde yeni Reynolds sayıları ve akış durumlarında girdap oluşturma fazları tahmin edilmiştir. Böylelikle karmaşık ve oldukça zaman alan HAD analizleri kullanılmasına gerek kalmadan statik bir prizma etrafında akış yapıları belirlenmiştir.

Literatürde, silindir üzerindeki akış uygulaması ile YSA sistemlerinin akış kontrolü stratejisi oluşturmak amacıyla kullanıldığı değişik çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin, Cohen vd. [1] tarafından yapılan çalışmada, YSA sistemi silindirin

arkasında kalan iz bölgesindeki akış dinamiğinin tahmini için kullanılmıştır. Reynolds sayısının (Re) 100 olarak temel alındığı iki boyutlu silindirin üzerindeki akış incelemelerinin sonucunda, geri beslemeli akış kontrolünde kullanılmak üzere, baskın zamansal karakteristikler elde edilmiş ve kontrol sisteminin oluşturulmasında kullanılmıştır. YSA sisteminin benzer bir amaçla kullanımı ise Siegel vd. [46] tarafından yapılan çalışmada “D” şeklinde bir silindir geometrisinde akış alanında zamana bağlı karakteristik değişimlerin tahmini için sayısal bir modelin oluşturulmasında kullanılmıştır.

Bu çalışma kapsamında incelenen bir diğer uygulama durumu olan zamana bağlı iki boyutlu sürülmüş kavite akışı için literatürde YSA yaklaşımının uygulandığı herhangi bir çalışma bulunamamıştır.

1.3. Amaç

Bu çalışmanın amaçlarından birisi, zamana bağlı iki boyutlu dairesel silindir üzerindeki Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) verileri daha önceden elde edilmiş laminer ve türbülanslı akış uygulamaları için Dikgen Ayırıştırma Yöntemi (DAY) kullanarak baskın mekansal ve zamansal karakteristiklerin incelendiği düşük mertebeli yaklaşımlar oluşturmak ve Yapay Sinir Ağı (YSA) uygulaması ile değişik akış durumları için zamansal karakteristikleri tahmin etmektedir.

Ayrıca, bu çalışmanın diğer amaçları, zamana bağlı iki boyutlu sürülmüş kavite akışı uygulaması için Reynolds sayısının (Re) 100, 500, 1000, 5000 ve 10000 olarak alındığı akış alanının vortisite-akım fonksiyonu yaklaşımı kullanarak sayısal çözümlemesinin yapılması, akım fonksiyonu ve x-yönü hız verileri dikkate alınarak akış alanında oluşan yapıları incelemektir. Daha sonra, iki boyutlu sürülmüş kavite akışı için elde edilen sayısal verilere DAY ve YSA yaklaşımlarının uygulanarak, değişik Reynolds sayılarındaki (Re) akış durumları için zamansal karakteristiklerin tahmin edilmesidir.

Bu çalışmada yapılan analizler TÜBİTAK destekli 108M549 numaralı ‘‘Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Düşük Boyutlu Modelleme ve Yapay Sinir Ağları Yardımıyla Akış Kontrolü’’ isimli proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Projenin amacı, HAD simülasyonları ile modellenen, karmaşık yapıya sahip verilerin mertebesinin indirgenmesi ve elde edilen düşük mertebeli verilerin kullanılarak YSA yardımıyla gerçek zamanlı akış kontrolünde kullanılabilecek modellerin oluşturulmasıdır. Böylelikle, gerçek zamanlı akış kontrolünde bu modellerin kullanılması ile uzun bir işlem süreci olan HAD simülasyonları basamağı bertaraf edilmiştir.

2. YÖNTEM

2.1. Dikgen Ayrıştırma Yöntemi (DAY)

2.1.1. Genel Bakış

Dikgen Ayrıştırma Yöntemi (DAY) istatistiksel bir tür veri analiz aracı olup, incelenen veri grubu içinde genel anlamda mekana ve zamana bağlı kalıplardan oluşan tutarlı yapıların (coherent structures) baskın özelliklerinin ve eğilimlerinin seçilip ortaya çıkarılmasını amaçlamaktadır. DAY ile sayısal veya deneysel metotlarla elde edilmiş karmaşık veri toplulukları için basit yaklaşımlar oluşturmak mümkündür [9].

Bu çalışma kapsamında DAY, iki boyutlu silindir etrafında laminer ve türbülanslı rejimlerdeki akışlar ile iki boyutlu sürülmüş kavite akışı için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanılarak elde edilmiş veri topluluklarının analiz edilmesinde bir ard işleme aracı olarak kullanılmıştır.

DAY'nin teorisi Karhunen–Loève Açılım teoremine dayanmaktadır. Bu teoreme göre olasılıklı bir süreç ya da sistem, bir fonksiyonun sınırlı aralıklarda Fourier serileri ile ifade edilmesine benzer şekilde, dik fonksiyonların sonsuz doğrusal birleşimi olarak ifade edilir [9].

Olasılıklı süreçlerde, mümkün olan tek bir gerçeğe ilgilenmek yerine, zaman içinde sürecin nasıl gelişim gösterebileceği üzerinde durulur. Bu tür süreçlerde, ilk değer ya da başlangıç noktası bilinse dahi, sürecin ilerleyebileceği birçok olasılık bulunmaktadır; ancak, bu olasılıklardan bazıları gerçekleşmeye daha yakındır, bazıları ise daha uzaktır [47].

Fourier serilerinden farklı olarak, Karhunen – Loève Açılım teoreminde, katsayılar ne gerçek sayılardır ne de seri açılımı fonksiyonlardan oluşmaktadır, buna karşılık teoremdeki katsayılar rastgele değişkenlerden meydana gelir ve seri açılımı sürecin

kendisine bağlıdır. Karhunen–Loève Ayrıştırma teoremi ile parametreleri dinamik olarak dağıtılmış bir sistemi, olasılıklı bir süreç şeklinde modellemek mümkündür [10].

DAY'nin veri toplulukları üzerine uygulanması ile bu veri topluluklarının ifade ettikleri fiziksel davranışların mekanda gözlemlenen baskın değişim karakteristikleri bir dizi temel fonksiyon ile ifade edilir. Zamanda gözlemlenen baskın değişim karakteristikleri ise temel fonksiyonlara karşılık gelen zaman katsayılarının geçmişi ile ifade edilir [7].

DAY uygulaması ile oluşturulan her temel fonksiyon vektörü bir kip olarak adlandırılırken, kiplerin zamana bağlı değişimini gösteren zaman katsayılarının geçmişi kip genlikleri olarak adlandırılmaktadır [10]. Elde edilen kipler, kip genlikleri ve bu çalışma kapsamında incelenen fiziksel sistemlerin ifadesinde kullanılan Navier-Stokes denklemlerinin projeksiyonu ile büyük veri toplulukları kullanılarak ifade edilmiş fiziksel davranışı düşük boyutlu alt uzay modeli olarak taklit etmek mümkündür [9].

2.1.2. Teorik Bilgi

DAY uygulamalarında, iki boyutlu akış alanını oluşturan $\vec{x} = (x, y)$ pozisyonlarında M sayıdaki gözlem anı için elde edilen ve belirli bir fiziksel davranışa karşılık gelen (x-yönü hızı, akım fonksiyonu, vs.) veriler $U_i(\vec{x})$ ile gösterilen bir matris içine toplanır. Burada her gözlem anı bir anlık görüntü sayısına karşılık gelirken, her anlık görüntü sayısı ise akış simülasyonlarında bir zaman adımına karşılık gelmektedir. Sonuç olarak, $U_i(\vec{x})$ matrisi HAD analizleriyle akışın gözlemlendiği tüm zaman anlarında, akış alanını meydana getiren her noktada, gözlemlenen fiziksel davranışın sayısal ifadelerini taşır.

$$U_i(\vec{x}) = U_1(x, y), U_2(x, y), \dots, U_M(x, y) \quad (2.1)$$

DAY uygulaması için gerekli veri topluluğu tanımlaması yapıldıktan sonra, iki farklı yaklaşım ile hesaplamalara devam etmek mümkündür. İlk yaklaşımda tanımlanmış veri topluluğunun ortalaması alınarak orijinal veri topluluğundan çıkarılır. Diğer yaklaşımda ise bu tür bir uygulama yapılmadan hesaplamalara devam edilir. Bu konuya açıklık getirmek adına, Newman [10], Deane vd. [48] ve Lall vd. [49] tanımlanmış veri topluluğunun ortalamasının esas veri topluluğundan çıkarılması sayesinde hesaplamaların ilerleyen basamaklarında ölçekleme gereksinimlerinin önüne geçildiğini çalışmalarında belirtmişlerdir. Buna karşılık, Zhang vd. [50], bu tür bir yaklaşımın birden fazla veri seti için farklı parametre değerlerinin birleştirilerek tek ve toplu haldeki bir düşük boyutlu modelin oluşturulmasında fark edilebilir düzeyde kolaylık sağlamadığını belirtmişlerdir.

Bu çalışma kapsamında incelenen her iki örnek uygulamada da DAY için tanımlanan veri toplulukları tekil parametreler, örneğin x-yönü hız verilerini veya akım fonksiyonu verilerini, içerdiğinden ölçekleme açısından avantaj sağlayan veri topluluğunun ortalamasının esas veri topluluğundan, $U_i(\bar{x})$, çıkarılması yaklaşımı takip edilmiştir. Bu şekilde DAY uygulamasında sadece M sayıda anlık görüntü sayısı içeren bir veri topluluğu için ortalama değerden sapmalar göz önüne alınmıştır (Denklem 2.2).

$$K_i(\bar{x}) = U_i(\bar{x}) - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M U_i(\bar{x}) \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2.2)$$

DAY uygulaması ile elde edilmesi hedeflenen temel fonksiyonlar, yani kipler ve bağıl kip genlikleri, Denklem 2.2 ile gösterilen veri topluluğunun serbestlik derecesi düşürülmüş olarak en iyi şekilde temsil edilebilmesi için önem taşımaktadır. Temel fonksiyonlar incelenen veri topluluğunun yaklaşık olarak ifade edilen özgün üyeleridir ve Denklem 2.3 ile gösterildiği şekilde ifade edilirler.

$$\phi(\bar{x}) = \sum_{i=1}^M \alpha_{ik} K_i(\bar{x}) \quad k = 1, 2, \dots, S \text{ (kip sayısı)} \quad (2.3)$$

Denklem 2.3'te α_{ik} kip genliklerini, $K_i(\bar{x})$ asıl anlık görüntü sayısı verilerini içeren topluluktan ortalama değerin çıkarıldığı veri topluluğunu ve $\phi(\bar{x})$ ise temel fonksiyonları ifade etmektedir. Bu denklemde α_{ik} için uygun değerler bulunduğunda $\phi(\bar{x})$ ile ifade edilen temel fonksiyonlar $\{K_i(\bar{x})\}_{i=1}^M$ ile gösterilen veri topluluğuna en çok benzeyen değerlere sahip olmaktadır [29]. Bu durumda, incelenen veri topluluğunu en iyi şekilde ifade etmek adına, $\phi(\bar{x})$ fonksiyonu, değerlerini mümkün olacak en büyük dereceye çıkarabilecek bir ifadeye sahip olmalıdır. Bu amaçla alışlagelmiş L^2 iç çarpım ve normundan faydalanarak, en büyük dereceye çıkarılmak istenen fonksiyon ve $\phi(\bar{x})$ parametresine bağlı kısıtı 2.4a ve 2.4b ile ifade edilmektedir [51].

$$F = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |(K_i, \phi)| \quad (2.4a)$$

$$\|\phi\|^2 = (\phi, \phi) = \int_{\Omega} |\phi|^2 dA = 1 \quad (2.4b)$$

Bu denklemlerde (\cdot, \cdot) iç çarpımı $\|\cdot\|$ ise normu göstermektedir. Denklemler 2.4a ve 2.4b integrali alınabilir fonksiyonlar olup Ω incelenen veri topluluğunun etkinlik alanını, ϕ ise temel fonksiyonların vektör ifadesini göstermektedir.

Newman [10], Ly ve Tran [51], Sanghi ve Hasan [52], ve Smith vd. [53] tarafından yapılan çalışmalarda temel fonksiyonların elde edilmesine ilişkin bu problemin varyasyonel hesap uygulamasıyla Denklem 2.5 ile gösterilen Euler-Lagrange integral eşitliğinin çözümü şeklinde ifade edilebildiği belirtilmiştir.

$$\int C(\bar{x}, \bar{x}') \phi(\bar{x}') d\bar{x}' = \lambda \phi(\bar{x}) \quad (2.5)$$

Burada λ ve $\phi(\bar{x})$ sırasıyla öz değerlere ve öz fonksiyonlara (temel fonksiyonlara) karşılık gelmektedir. $C(\bar{x}, \bar{x}')$ ise korelasyon tensörünü ifade etmektedir.

Korelasyon tensörü, uzayda ya da zamanda, iki farklı noktadaki rastgele değişkenlerin birbirleriyle olan bağıntılarının, noktaların arasındaki uzaklığın mekansal ya da zamansal fonksiyonu olarak ifadesidir [53].

Denklem 2.5 ile gösterilen öz değer probleminin çözümü için literatürde değişik ayrıklaştırma yaklaşımları bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında, Sirovich [54] tarafından önerilen Anlık Görüntü Sayıları Metodu (The Method of Snapshots) kullanılmıştır. Bu metot temel fonksiyonların bulunması için gerekli hesaplamalarda kayda değer ölçüde sadeleştirme sağlamaktadır. Sirovich [54] tarafından önerilen bu metodun kullanılmasıyla, akış yapılarını ve karakteristiklerini yakalayan ve depolayan kiplerin (temel fonksiyonların) oluşturulması için birkaç anlık görüntü sayısının analize alınması yeterli olmaktadır [52].

Anlık Görüntü Sayıları Metodu'na göre Denklem 2.3 ile gösterilen anlık görüntülerin doğrusal kombinasyonları olarak ifade edilen temel fonksiyonlar Denklem 2.5'in çözümü için kullanılmaktadır. Bu metoda göre, Denklem 2.3 ile gösterilen ifade Denklem 2.5'te yerine koyulduğunda, karmaşık yapıdaki problem, $M \times M$ boyutlarında kovaryans matrisinin (C) öz değerlerinin ve öz fonksiyonlarının cebirsel çözümü olacak şekilde sadeleştirilmiş olmaktadır [51-53].

$$C\alpha_n = \lambda_n\alpha_n \quad n = 1, 2, \dots, M \quad (2.6a)$$

$$(C)_{ij} = \frac{1}{M} \int_{\Omega} K_i(\bar{x})K_j(\bar{x})dx \quad i, j = 1, 2, \dots, M \quad (2.6b)$$

Negatif olmayan ve simetrik kovaryans matrisinin çözümü cebirsel öz değer problem çözümü haline dönüştürüldükten sonra, Tekil Değer Ayrıştırma (Singular Value Decomposition) metodu Denklem 2.7 ile gösterildiği gibi kovaryans matrisi verilerine uygulanır, bu sayede ilgili öz değerler ve öz fonksiyonlar hesaplanır [11].

$$C = R\Sigma P^T \quad (2.7)$$

Burada, R dikgen bir matris olup temel fonksiyonlar veya kipler olarak adlandırılan öz fonksiyonları içerir, P matrisi Tekil Değer Ayırıştırma uygulaması sonucunda elde edilen başka bir dikgen matris olup DAY sonuçlarına herhangi bir etkisi yoktur, Σ ise esas köşegeni öz değerleri taşıyan matris olup gerçek ve negatif olmayan sayılardan oluşur. Elde edilen öz değerler büyükten küçüğe doğru sıralandığında, $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_M \geq 0$, ortalamadan sapan akış yapılarının ve karakteristiklerinin tutulduğu veri topluluğunun, $K_i(\bar{x})$, yeterince iyi temsil edilmesi için gerekli olan kipler elde edilir.

Tekil Değer Ayırıştırma uygulaması ile elde edilen öz değerler, bağlı oldukları öz fonksiyonların (kiplerin) esas veri topluluğunda gözlemlenen baskın karakteristiklerin ve eğilimlerin ilgili öz fonksiyonun yapısında saklanma miktarının, yani enerji içeriğinin, bir ölçüsüdür. Çalışma kapsamında incelenen akış uygulamalarında, her kipin sahip olduğu enerji içeriği, o kipin akış alanındaki baskın girdap yapılarını ve karakteristiklerini görüntüleyebilme ve ilgili verileri yapısında barındırabilme yeteneğinin bir ifadesidir. Buna göre, akış sistemleri gibi, büyük mertebeli ve karmaşık veri gruplarının düşük mertebeli yaklaşımlarında kullanılan kiplerin toplam enerji içerikleri ne kadar yüksek olursa yaklaştırma hatası da o kadar düşük olur.

DAY uygulaması neticesinde, toplam enerji içeriğini yeterli düzeyi sağlayan sayıdaki kipin ve bağlı kip genliklerinin yeniden yapılandırması ile esas veri topluluğunun alt uzay ifadesi olarak nitelendirilen (Denklem 2.8) düşük mertebeli yaklaştırmasının elde edilmesi mümkündür [18].

$$U = \bar{U} + \sum_{k=1}^S \alpha_k \phi_k \quad (2.9)$$

Burada, U DAY uygulamasının en başında tanımlanan esas veri topluluğunu, \bar{U} tanımlanmış esas veri topluluğunun ortalamasını ϕ_k ve α_k DAY uygulaması

neticesinde elde edilmiş kipleri ve bağıl kip genliklerini ve S ise toplam enerji içeriği yeterli düzeyi sağlayan kip sayısını ifade etmektedir.

DAY uygulamasının teorisi ile ilgili daha kapsamlı bilgi Newman [3,9], Holmes [9], Ly ve Tran [51], Sanghi ve Hasan [52], ve Smith vd. [53] tarafından yapılan çalışmalarda bulunabilir.

Bu çalışma kapsamında, zamana bağlı iki boyutlu silindir üzerindeki laminar ve türbülanslı akışlar ile zamana bağlı iki boyutlu sürülmüş kavite akışının DAY uygulamaları için gereken tüm algoritmalar Matlab yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. İlgili çalışmalar için örnek kodlar EK 1’de verilmiştir.

2.2. Yapay Sinir Ağları (YSA)

2.2.1. Genel Bakış

Yapay Sinir Ağları (YSA) uygulamaları biyolojik sinir sistemlerini temel alan bilgi işleme benzerliğinden faydalanarak, bu düşüncenin bilgisayar sistemlerinin kullanılarak taklit edilmesi ve hayata geçirilmesidir. Bir sinir ağı (nöron) matematiksel bir fonksiyon olarak çalışmaktadır ve sistem girdilerini belirli bir modeli esas alarak bir seri çıktı halinde sunmaktadır [55].

YSA sistemlerinin yapıtaşları olan nöronlar, bir ağ yapısı içerisinde bölgesel veri işleme işlevini yürüten hesaplama üniteleridir. Nöronlar bir araya gelerek çok büyük ölçekte paralel ağ yapılarını meydana getirirler. Ağ yapılarının işlevlerine göre, örneğin nöronların nasıl organize edildiklerine veya nasıl birbirlerine bağlandıklarına göre, ağ yapısı sisteminin birer parçaları olan ve nöronları birbirlerine bağlayan bağlantı şiddetleri ve nöronlardaki işlemler gerçekleştirilir. Sinaptik ağırlık olarak da nitelendirilen bu bağlar öğrenilen bilginin depolanması işlevini ve yeni veri gruplarına ya da durumlara uygulanmasında rol oynar [56].

Nöronlar arasında oluşturulan bağlantılara ilk başta küçük rastlantısal değerler verilir. Ardından ağıın verdiği sonuçlar düzeltilerek farklı ağırlıklandırma değerleri denir. YSA analizlerinde ağırlıklar matematiksel ve istatistiksel yaklaşımlarla kontrol edilerek, istenilen doğrulukta sonuçlara ulaşılan kadar değerler tüm nöron yapıları içinde değiştirilir ve analiz sonunda belirli değerlerde sabitlenir. Gerçekleştirilen bu analiz süreci öğrenme veya eğitim süreci olarak adlandırılır. Sabitleme işlemi gerçekleştikten sonra söz konusu ağı sistemi kullanılarak yeni veriler daha önceki öğrenme işleminde üretilen parametrelerden faydalanılarak çözümlenir [57].

Literatürde iki tip öğrenme metodundan bahsedilmektedir. Bunlar öğreticili öğrenme ve öğreticisiz öğrenme olarak isimlendirilmektedir. İki yaklaşım arasındaki temel farklılık istenilen hedef sistem çıktılarının öğrenme aşamasında sistemde kullanılıp kullanılmamasıyla ilişkilidir. Eğer bir eğitici, sistem çıktılarının istenen hedef değerlerini ağı yapısı analizlerinde kullanıyorsa bu tip öğrenme öğreticili öğrenme olarak adlandırılır. Eğer tasarlanan ağı yapısı ve atanan koşullar istenen hedef değerlerinin elde edilmesine olanak vermiyorsa bu tip öğrenme öğreticisiz öğrenme olarak adlandırılır [58].

2.2.2. Biyolojik Esinlenme

YSA sistemleri McCulloch ve Pitts'in [32] 1943 yılında nöronların basitleştirilmiş tanımlamasından sonra ortaya çıkmıştır. YSA sistemlerinde bulunan nöronlar biyolojik eşlerinin birer taklidi niteliğindedir. Nöronlar insan sinir sisteminin temel sinyal işleme ve iletim üniteleridir; ayrıca, sistem bir bütün olmakla beraber her nöron ayrı birer hücredir ve hücre gövdesinde değişik işlemleri yerine getirmektedir.

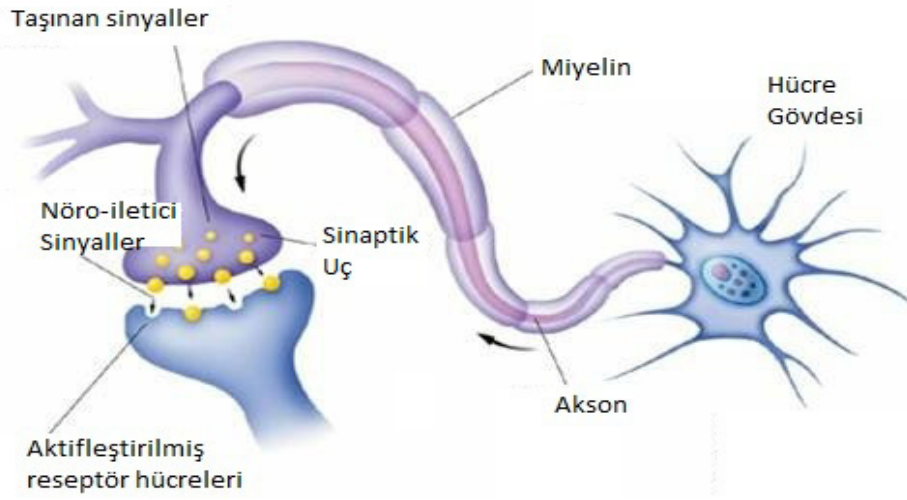
İnsan beyni vücudumuzun bilgi işlem birimi olarak da değerlendirilebilir. Beynimiz dış dünyadan duyularımız yoluyla aldığı bilgiyi işler ve dışsal bilgilerden faydalanarak içsel modellerin yaratılmasında görev alır. İnsan beyni özellikle bu modelleri ayarlayabilme yeteneğine sahiptir, yanı sıra interpolasyon ve

ekstrapolasyon yapabilme yetenekleriyle de bu modellere çeviklik kazandırarak, modellerin yeni durumlar karşısında gidişatın düzenini anlayarak, tahminler ve öngörüler yaparak, hatta sadece kısmi bilgilerin olduğu, rastgele veya gürültülü veri gruplarından dahi güvenilir sonuçlar elde edilebilmesini mümkün kılmaktadır [59].

Elde edilen bilgilerin beyinde bölgesel işlenmeleri nöronlar aracılığıyla gerçekleşir. Nöronlar beyin korteksinde birbirlerine bağlanarak büyük ölçekte paralel ağ yapıları meydana getirirler. Beyin korteksi, beynin dış kısmında yer almakta ve 100 – 500 milyar mertebesinde nöron yapısı içermektedir. Nöronlar yaklaşık olarak 1000 ana kümeye ayrılmışlardır ve her kümede yaklaşık olarak 500 ağ yapısı bulunmaktadır. Sadece tek bir ağ yapısı 10000 mertebesinde nöron içermektedir ve bazı ağ yapılarının ise hiyerarşik formda organizasyona yani tabakalı yapıya sahip olduğu bilinmektedir [60].

İnsan beyinde değişik sayıda değişik amaçlar için özelleşmiş nöronlar bulunmaktadır ve tipine, işlevine bağlı olarak her nöron herhangi bir yerde bulunan 100 ile 1000 farklı nörona sinyal gönderebilmektedir. Nöronların tekrarlanan uyarma sonucunda yeni bağlantılar oluşturduğu ve bunların gelişimini desteklediği bilinmektedir. Böylelikle büyük ölçekte birbirine bağlantılı olan nöron ağı, elde edilen bilginin sinir hücrelerini birbirine bağlayan sinaptik bağlantılar aracılığıyla saklanmasında ve hafızanın oluşturulmasında görev alır [56]. Biyolojik bir nöronun Şekil 2.1’de gösterildiği gibi üç ana bölgesi bulunmaktadır.

Şekil 2.1’de gösterilen hücre gövdesi, nöronun kalbidir ve hücre çekirdeği bu bölgede bulunur. Hücre gövdesi kendisine iletilen sinyalleri toplayıp işlemenin yanı sıra protein sentezi görevini de yerine getirmektedir. Dendritler dallı bir yapıya sahiptir ve girdi sinyallerini hücre gövdesine sinaptik bağlantıları kullanarak kanalize eder. Akson hücre gövdesinde üretilen elektriksel sinyalleri yani hareket potansiyellerini diğer nöronlara iletir. Akson kısa ya da uzun olabilir. Nöronlar arası hızlı iletişimin istenildiği yerlerde akson etrafında miyelin kılıf bulunmaktadır [62].



Şekil 2.1. Biyolojik bir nöron hücresinin şematik gösterimi [61]

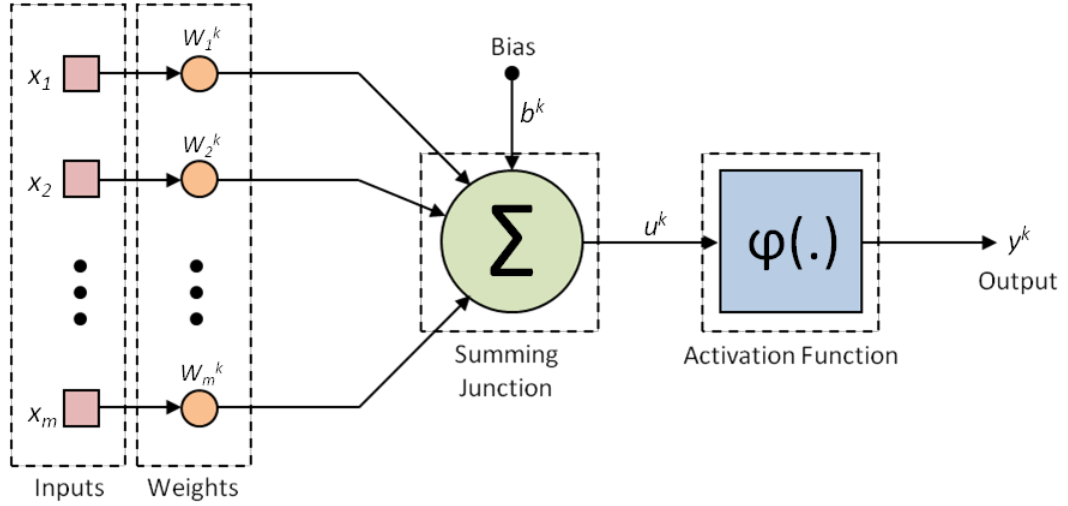
Bir nöron yapısında bölgesel olarak işlenen bilgi bir diğer nörona aktarıldıktan sonra, eğer gönderilen nöron bilginin harekete dönüştürüleceği ya da ulaşması gereken son nokta değilse, aktarım işlemi nöronlar boyunca tekrarlanır [62].

İletişim halinde olan biyolojik nöronlar direkt olarak birbirleriyle temas halinde değildirler. Sinyal ileten bir nöronun akson ucu ile bu nörona dendritleriyle bağlı olan diğer nöron veya nöronların sinaptik uçları arasında boşluk bulunmaktadır. Bu boşluk sinaps olarak adlandırılır. Hücre gövdesinden akson boyunca iletilen elektriksel sinyaller sinaps boşluğuna geldiğinde burada sodyum (Na^+) ve potasyum (K^+) iyonlarının konsantrasyonlarında oluşan değişimler ile diğer nöronun dendritlerine kimyasal sinyaller gönderilir. Alınan kimyasal sinyaller daha sonra tekrar elektriksel sinyallere dönüştürülür. Nöronlar arası iletişim sinir sistemi boyunca bu şekilde devam eder [56].

2.2.3. Yapay Sinir Ağı Teorisi

Bir YSA sistemi çok sayıda birbirine bağlı nörondan oluşmaktadır. Böyle bir sistemde sinir ağlarını oluşturan nöronlar, tek başına ele alındıklarında çok basit işleve sahip işlemcilerdir. Bir YSA sistemindeki nöron yapısı içinde de biyolojik

eşinde olduğu gibi üç ana bölüm bulunur. Bunlar sırasıyla ağırlıklar, toplayıcı ve aktivasyon fonksiyonudur [6]. Şekil 2.2’de tek bir nörondan oluşan ağ yapısı sisteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.2. Tek bir nörondan oluşan ağ yapısı sisteminin şematik gösterimi

Her bir girdideki değişim, nöron çıkışında belirli bir değişime neden olmakta ve bu değişimin genliği, girdinin etki derecesini belirleyen bağlantı kazançlarına, toplayıcının eşik değerine (bias) ve nöron aktivasyon fonksiyonunun tipine bağlı olmaktadır. Şekil 2.2’de $w_1^k, w_2^k, \dots, w_m^k$ ile gösterilen parametreler, girişler ile ifade edilen, nöron sistemine x_1 ’den x_m ’ye kadar olan girdilerin ağırlıkları, b^k eşik değeri ve φ fonksiyonu ise nöron aktivasyonu olarak isimlendirilmektedir [63]. Şekil 2.2 ile gösterilen tek nöronlu ağ yapısı için kullanılan matematiksel ifadeler Denklemler 2.10 ve 2.11 ile gösterilmektedir.

$$u^k = \sum_{i=1}^m w_i^k x_i \quad (2.10)$$

$$y^k = \varphi(u^k + b^k) = \varphi\left(\sum_{i=1}^m w_i^k x_i + b^k\right) = \varphi\left(\sum_{i=0}^m w_i^k x_i\right) \quad (2.11)$$

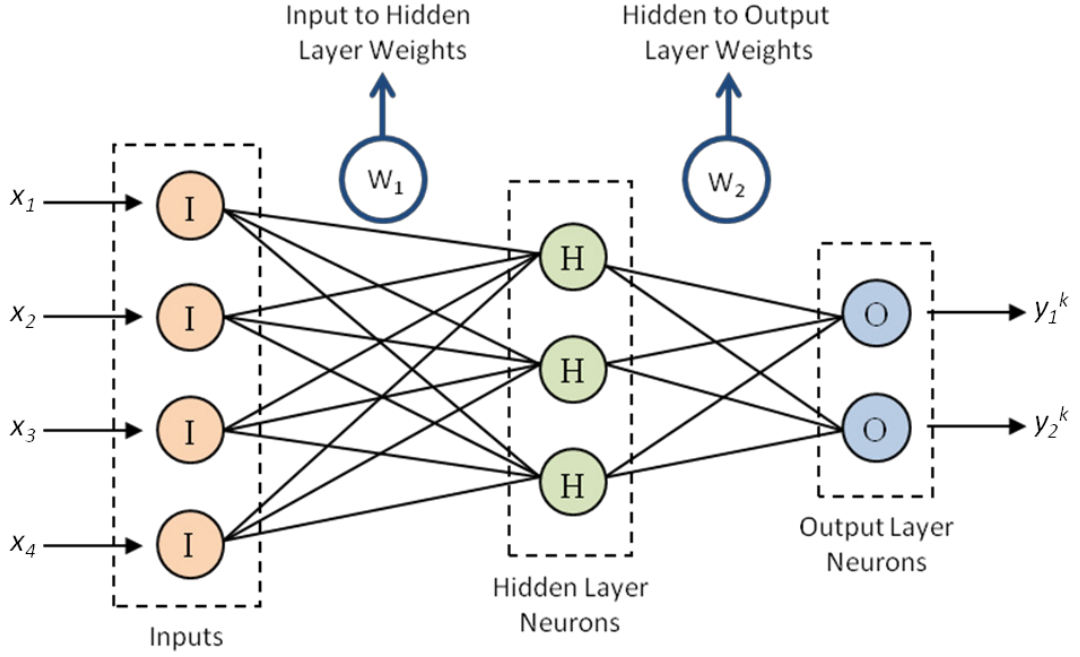
YSA sistemleri tahmin, fonksiyon yakınsama, sınıflandırma, gruplama ve öngörü gerektiren problemlere uygulanabilmektedir. Bu işlevleri gerçekleştirebilecek çeşitli özelliklerle donatılmış değişik ağ sistemleri bulunmaktadır. Bunlar:

- Tek katmanlı algılayıcı
- Doğrusal nöron
- Çok katmanlı algılayıcı
- Rekabetçi ağlar
- Kendi kendini organize edebilen özellikteki yapılar (self-organizing feature map)
- Tekrarlayan ağlar

olarak adlandırılmaktadır [42].

Yukarıda listelenen ağ sistemlerinden, tek katmanlı algılayıcılar ve doğrusal nöron ağ sistemleri doğrusal sınıflandırma, örneğin istatistikte fonksiyon analizi problemlerinde ve doğrusal tahmin gerektiren durumlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Çok katmanlı algılayıcı model sistemler doğrusal olmayan tahmin ve sınıflandırma konularında en çok bilinen ağ sistemlerinden birisidir. Rekabetçi ağ sistemleri ve kendi kendini organize edebilen özellikli harita yapıları veri grubunda belirli bir özelliğe sahip daha küçük boyut veya boyutlardaki veri kümelerini bulmaya yarayan ve veri grubu ile grubun içinde bulunan kümelerin topolojik yapılarını (mekansal ilişkilerini) gösteren, öğreticisiz ağ sistemlerine birer örnek olarak verilebilirler. Tekrarlayan ağlar ise nöronlar arasında zamansal etkilerin yakalandığı geri besleme özelliğinden faydalanarak bir problemde zaman serilerinin öngörüsünde kullanılırlar [42].

Bu çalışmada, çok katmanlı algılayıcı YSA sistemi temel alınmıştır. Genel olarak, birden fazla girdi setinin olduğu ve buna karşılık olarak birden fazla çıktının tahmin edilmesi gereken sistemlerde çok katmanlı (çok sayıda nöronun bir araya gelerek oluşturduğu sistem altyapısı) sistem yapıları kullanılır. Bu tür YSA sistemlerinde, girdi setinin haricinde, gizli katman ve çıkış katmanı olmak üzere iki farklı sistem altyapısı bulunmaktadır [56]. Şekil 2.3 çok katmanlı bir ağ yapısının şematik halini göstermektedir.



Şekil 2.3. Çok katmanlı bir ağ yapısının şematik gösterimi

Şekil 2.3'te gösterilen çok katmanlı ağ yapısı bir girdi katmanı, bir gizli katman ve bir çıktı katmanından oluşmaktadır. İhtiyaca göre gizli ve çıktı katmanların sayıları değişiklik gösterebilir. Şekilde gösterilen sistemde girdi katmanında (I) 4, gizli katmanda (H) 3 ve çıktı katmanında (O) ise 2 nöron bulunmaktadır, ancak nöronların sayıları da ihtiyaca veya elde edilmek istenilen doğruluk miktarına göre değişiklik gösterebilmektedir.

Şekil 2.3 ile gösterilen ağ sisteminde her üç katman da birbirine sinaptik ağırlıklarla ifade edilen bağlantılar ile bağlanmıştır. Sinaptik ağırlıklar esnek öğrenme yeteneğine sahip ve bu özellikleriyle veri grubunun gidişatını izleyebilen serbest parametrelerdir. Buna bağlı olarak YSA sistemleri karmaşık problemleri herhangi bir fiziksel sistem tabanına oturtmaya gerek kalmadan parametrik olarak çözebilme olanağını sunar [63].

Şekil 2.2'de gösterilen tek bir nörondan oluşan ağ sisteminden farklı olarak, çok katmanlı YSA sistemleri iki farklı çeşitte sinaptik ağırlık içerir. Bunlar Şekil 2.3'te

W_1 ve W_2 olarak gösterilen girdi-gizli katman ağırlıkları ve gizli-çıktı katman ağırlıklarıdır. Bir YSA sisteminde sinaptik ağırlıkların sayısı ağırlık serbestlik derecesi ile doğru orantılıdır [63].

Çalışma kapsamında kullanılan çok katmanlı YSA yapısı, özellikle türbülanslı akış sistemlerinde olduğu gibi girdileri ve hedef çıktıları arasında doğrusal olmayan ilişkilerin bulunduğu dinamik sistemlerin ayrık zamanlı modellenmesinde büyük bir uyum sergilemektedir. Ancak bazı durumlarda, bu tür doğrusal olmayan ilişkilerin tespiti ve zaman serilerinin tahmini cevapları, sistemin kendi olağan yapısında seyreden bir veya daha fazla zamansal davranışlardan etkilenebilir. Özellikle dinamik ve doğrusal olmayan ilişkilere sahip olan sistemlerde bu türden bir problemin önüne geçmek ve tutarlı tahminler elde etmek adına çok katmanlı YSA yapısına hafıza dinamiği yaklaşımı uygulanmaktadır. Ağ yapısına dahil edilen tasarım parametreleri sayesinde YSA sistemine hafıza özelliği kazandırılarak, etkileşime geçen zamansal davranışların tahminlerde kullanılması sağlanmaktadır [56].

Normalde, çok katmanlı algılayıcı YSA yapısında, ağ girdilerini teslim alan nöronlar, tahmin analizlerinde sadece kendilerine dışarıdan verilen bu verileri kullanırlar. Buna karşılık, hafıza dinamiği yaklaşımı kullanılan çok katmanlı algılayıcılarda, girdi seti verilerini kullanan nöronlara, bu dış veriler haricinde, değişik mertebelerde (veya uzunluklarda) zamanda geciktirilen girdiler de verilir. Zaman gecikmesi girdileri olarak anılan bu veriler, ağ yapısı tarafından tahmin edilmesi istenilen ve önceki örnekleme anı değişkenleri olarak ağ yapısının girdi bölümüne beslenen verilerdir [56].

Çok katmanlı algılayıcı yapısında hafıza dinamiği kullanımını karakterize etmek adına, N ile adlandırılan tek bir nörona, zaman gecikmesi verilerinin w_{NJ} ile gösterilen ağırlık değerleri kullanılarak bağlandığı varsayılmaktadır. Zaman gecikmesi mertebesinin (veya uzunluğunun) n olarak alındığı girdi değerlerinin analizlere toplam etkisi N nöronu için Denklem 2.12 ile gösterilen ifadede verildiği gibi $S_m(t)$ ile gösterilmektedir [56].

$$S_m(t) = \sum_{J=1}^n \sum_{l=1}^p w_{NJ}(l) z_{t-l} \quad (2.12)$$

Burada, w_{NJ} parametresi J numaralı girdinin l zaman gecikmesi ile N nöronuna aktarıldığı bağlantının ağırlığını, z_{t-l} parametresi l gecikmesine karşılık gelen ve değeri 1 ile p arasında değişen girdi verisini ve p ise hafıza dinamiğini oluşturan zaman gecikmesi mertebesinin (veya uzunluğunun) değerini belirtmektedir. Bu yapılandırma sonrasında ağ yapısına bir kere öğrenme süreci uygulandıktan sonra, N nöronu doğrusal olmayan ve etkileşime geçen zaman serilerinin dinamik zamansal karakteristiklerini ağırlık değerlerine yansıtacaktır.

Hafıza dinamiği yaklaşımının çok katmanlı algılayıcı YSA yapısı ile birleştirildiği bu tip ağlara, Mekansal-Zamansal Zamanda-Gecikmeli Çok Katmanlı Algılayıcı (Spatio-Temporal Time-Lagged Multi Layer Perceptron – MLP) adı verilir [56].

Bu çalışmada, Nørgaard vd. [63] tarafından doğrusal olmayan sistemlerin tanımlanması için önerilen, standart bir çok katmanlı algılayıcı YSA sisteminin Özbağlanımlı Dış Girdi (Auto Regressive eXternal Input – ARX) uygulaması ile birleşimi olarak da adlandırılan, Mekansal-Zamansal Zamanda-Gecikmeli Çok Katmanlı Algılayıcı YSA yapı algoritması kullanılmıştır. Bu yapı modeli Levenberg-Marquardt geri yayılım metodunu temel alan doğrusal olmayan optimizasyon teknikleri içermektedir.

Levenberg-Marquardt metodu En Dik Düşüş (Steepest Descent) ve Gauss-Newton metotlarının avantajlarını bünyesinde toplayan, diğer metotlardan daha verimli olan bir tür karma algoritmadır. Ayrıca, Levenberg-Marquardt metodu, nöronlar arasındaki bağlantıların ağırlıklarını, sistem çıktıları olan tahminler ile esas değerler arasındaki farklılığı en aza indirecek şekilde çalışmaktadır [63].

Levenberg-Marquardt metodunda, öğrenme veya eğitim aşamasında öğrenme hızı spesifik bir değere atanmak yerine, birim değer olarak alınıp e^λ gibi yeni bir parametreyi ağırlık değerlerinin analizinde kullanılan hesaplamalara dahil edilir.

Örneğin tek bir ağırlık değerinin, w , bulunduğu bir sistemde her m döngüsü için ağırlık değerinin değişimi (Δw_m) Denklem 2.13 ile ifade edilmektedir [56].

$$\Delta w_m = -\frac{d_m}{(H_m + e^\lambda I)} \quad (2.13)$$

Burada, d_m hataların birinci türevlerinin toplamı, H_m ile gösterilen ifade m döngüsü için her ağırlık değerine karşılık tüm ikinci türevlerini barındıran Hessian matrisi, e^λ her adımda hesaplanan hatanın bir öncekinden daha yüksek olmasını engelleyen koşullandırma parametresi ve I birim matrisidir. Burada, e^λ koşullandırma parametresinde yer alan λ değişkeninin değeri, hatanın hep azalmasını sağlayacak şekilde otomatik olarak atanmakta ve her döngüde değiştirilmektedir. Hesaplamalar Denklem 2.14'te gösterildiği gibi ağırlık değerindeki değişim kabul edilebilir bir düzeye, E_{\min} , ulaşıncaya devam etmektedir [56].

$$\frac{E(w_m) - E(w_{m+1})}{E(w_m)} \leq E_{\min} \quad (2.14)$$

Oluşturulan YSA yapısında ağırlık değerindeki değişimin tolerans düzeyi 10^{-3} mertebesi olarak alınmıştır.

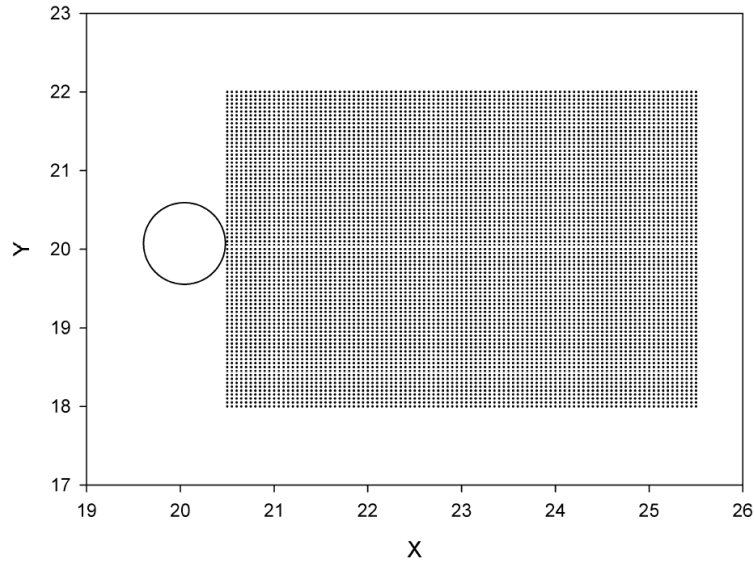
Mekansal-Zamansal Zamanda-Gecikmeli Çok Katmanlı Algılayıcı kullanılarak oluşturulan, doğrusal olmayan dinamik sistemlerin ayrık zamanlı modellenmesine olanak tanıyan ve nöronların arasındaki bağlantıların ağırlık değerlerinin Levenberg-Marquardt metodu kullanılarak tayin edildiği YSA yapısı, kararlılık düzeyi yüksek olan bir ağ modelidir. Navier-Stokes eşitlikleri gibi, doğrusal olmayan sistemlerin kısmi diferansiyel eşitliklerinin dikkate alındığı sistemlerde YSA yapısının kararlı olması büyük önem taşımaktadır [46].

YSA yapılarının temelleri, teorisi, ağ türleri ve uygulama alanları ile ilgili daha kapsamlı bilgi Haykin [6], Mehrotra vd. [55], Samarasinghe [56], Nørgaard vd. [63] ve Gurney [64] tarafından yapılan çalışmalarda bulunabilir.

Bu çalışma kapsamında, zamana bağlı iki boyutlu silindir üzerindeki laminar ve türbülanslı akışlar ile zamana bağlı iki boyutlu sürülmüş kavite akışının YSA uygulamaları için gereken tüm algoritmalar Nørgaard [65] tarafından Matlab yazılımı kullanılarak hazırlanmış YSA araç kutusu ile oluşturulmuştur. İlgili çalışmalar için örnek kodlar EK 2’de verilmiştir.

3. SİLİNDİR ÜZERİNDEKİ AKIŞ UYGULAMALARI

İki boyutlu dairesel silindir üzerindeki akış uygulamaları laminar ve türbülanslı rejimlerde olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Bu çalışma kapsamında, iki boyutlu dairesel silindirin arkasında kalan ve akış alanını oluşturan iz bölgesindeki von Kármán girdap yolu, Dikgen Ayırıştırma Yöntemi (DAY) ve Yapay Sinir Ağı (YSA) uygulamaları kullanılarak incelenmiştir. Bu uygulamalarda, her iki akış rejimi için Apaçoğlu [66] tarafından Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanılarak elde edilmiş x-yönü hız verileri kullanılmıştır. Şekil 3.1’de verilerin hesaplandığı noktalar ve iz bölgesi görülmektedir. Reynolds sayısı (Re) laminar akış analizlerinde 100, türbülanslı akış analizlerinde ise 20000 olarak alınmıştır.

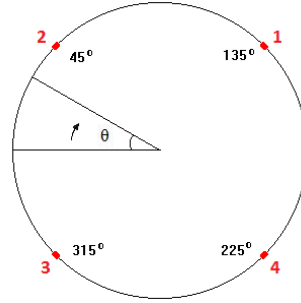


Şekil 3.1. İki boyutlu dairesel silindir ve uygulamalarda incelenen akış alanı

İki boyutlu dairesel silindir geometrisi, yüzeyinde dört adet delik ihtiva edecek şekilde tasarlanmıştır. Silindirin etrafında akış alanındaki havanın akış hızı $U=34$ m/s olarak alınmıştır. Her iki akış rejiminde de tüm delikler kapatılarak kontrolsüz veya delikler değişik kombinasyonlarda açılarak kontrollü HAD simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Kontrolsüz akış analizlerinde, iki boyutlu dairesel silindir etrafındaki hava akışında herhangi bir zorlama veya etki bulunmamaktadır. Buna

karşılık, deliklerin değişik kombinasyonlarda açık olduğu durumlarda, silindir üzerinden akan havanın özellikleri ile özdeş fakat değişik hızlarda hava üflenmesi suretiyle iki boyutlu dairesel silindir etrafındaki hava akışına etkide bulunulmuştur. İki boyutlu dairesel silindir yüzeyindeki deliklerin konumları Şekil 3.2’de görüldüğü gibidir. Bu deliklerin açılış kombinasyonları ve üflenen hava hızları ise şu şekildedir:

- Tüm deliklerden hava üfleme, üfleme hızı (u) = 0.1U
- Yalnızca 1. delikten hava üfleme, üfleme hızı (u) = 0.1U
- 1. ve 2. deliklerden hava üfleme, üfleme hızı (u) = 0.1U
- 1. ve 4. deliklerden hava üfleme, üfleme hızı (u) = 0.1U
- 2. ve 3. deliklerden hava üfleme, üfleme hızı (u) = 0.1U
- Tüm deliklerden hava üfleme, üfleme hızı (u) = 0.5U
- 1. ve 4. deliklerden hava üfleme, üfleme hızı (u) = 0.5U (türbülanslı rejimde)



Şekil 3.2. Silindir üzerinde yer alan deliklerin konumları ve isimleri

Laminer ve türbülanslı akışta, deliklerin kapalı (kontrolsüz akış) ve değişik kombinasyonlarda açık oldukları (kontrollü akış) test durumlarının HAD analizleri ve değerlendirmeleri ile ilgili bilgiler Apaçoğlu [66] tarafından hazırlanan bu çalışmanın da desteklendiği 108M549 kodlu aynı TÜBİTAK projesi kapsamında yapılan tez çalışmasında detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.

3.1. Laminer Akış için Dikgen Ayrıştırma Yöntemi (DAY) Uygulaması

HAD simülasyonları sonucunda elde edilen veri topluluklarına DAY uygulaması ile silindirin arkasında kalan iz bölgesinde gözlemlenen akış yapıları ve karakteristikleri

incelenmiştir. Akış alanında mekana ve zamana bağlı olarak gözlemlenen baskın yapılar ve eğilimler frekans içeriklerine, bir başka deyişle enerji içeriklerine göre ayrıştırılmaktadır [67].

Laminer akış için yapılan DAY analizlerinde, her biri 1800 anlık görüntü sayısına karşılık gelen, kontrolsüz ve kontrollü laminer HAD akış simülasyonları ile elde edilmiş, akış alanının x-y koordinat düzleminin her noktasında hesaplanan x yönündeki hız verileri kullanılmıştır.

Kontrollü ve kontrolsüz laminer akış DAY analizlerinde incelenen her test durumu, akışın her periyodunun 180 zaman adımından oluştuğu, toplamda 10 periyotluk zaman anına (anlık görüntü sayısına) karşılık gelmektedir. Analizlerde kullanılan söz konusu anlık görüntü sayıları birbirlerinden 0.001 saniye olacak şekilde eşit uzaklıklardadır ve her biri akışın incelendiği bir zaman anına karşılık gelmektedir.

DAY uygulamasında, akış alanının x-y koordinat düzleminde bulunan ve 8181 noktadan gelen x-y yönü hız verileri, her bir anlık görüntü sayısının 101x81 boyutlarındaki matrislerde toplanmıştır. Buna göre, akışın 10 periyotluk anına karşılık gelen HAD analizi sonuçları, 101x81 boyutlarında 1800 adet matrisin bir araya gelmesi ile ifade edilmektedir. Şekil 3.1’de de gösterildiği gibi, DAY analizine konu olan iz bölgesinin mekansal boyutları x yönünde 20.5 m ile 25.5 m arasında, y yönünde ise 18 m ile 22 m arasında değişmektedir. Her iki düzlemde de adım aralıkları $\Delta x = \Delta y = 0.05$ m olarak alınmıştır.

DAY analizi sonuçlarında elde edilen kipler ve bağlı kip genlikleri akışın baskın özelliklerinin ve eğilimlerinin ifade edildiği karakteristik kısımları içermektedir. Silindir üzerinde akışın incelendiği bu uygulamada, iz bölgesindeki girdap oluşum karakteristiği dikkate alınmaktadır. Analiz sonucunda elde edilen bir DAY kipinin enerji içeriği (frekans içeriği) ne kadar yüksekse, iz bölgesindeki ana girdapların oluşum karakteristiklerinin betimlendiği verileri taşıma ihtimali de o kadar yüksektir. Silindir üzerindeki kontrolsüz ve kontrollü laminer akış DAY analizleri sonucunda, en yüksek enerjili dört DAY kipinin enerji içerikleri dağılımları Çizelge 3.1’de

gösterilmektedir. Tüm test durumları için toplam enerji içeriğinin %99'u sadece bu dört kipi dikkate alınmasıyla ifade edilmektedir.

Çizelge 3.1. Silindir üzerindeki kontrollü ve kontrolsüz laminer akış DAY analizleri sonucunda, en yüksek enerjili dört DAY kipinin enerji içerikleri dağılımları

Kip Numarası	Enerji İçerikleri (%)						
	Kontrolsüz Akış Tüm Delikler Kapalı	Kontrollü Akış					
		Delik 1 Açık $u=0.1U$	Delikler 1+2 Açık $u=0.1U$	Delikler 1+4 Açık $u=0.1U$	Delikler 2+3 Açık $u=0.1U$	Tüm Delikler Açık $u=0.1U$	Tüm Delikler Açık $u=0.5U$
1	47.41	47.22	47.10	47.08	47.21	47.23	50.12
2	46.40	46.63	46.75	46.82	46.60	46.67	44.13
3	2.78	2.77	2.77	2.76	2.78	2.74	2.62
4	2.58	2.56	2.56	2.54	2.57	2.55	2.40
Toplam (4 Kip)	99.17	99.18	99.19	99.20	99.16	99.19	99.27

Çizelge 3.1'de gösterildiği üzere, tüm deliklerin açık olduğu ve $0.5U$ hızı ile hava üfleminin yapıldığı kontrollü akış test durumu haricinde, geriye kalan tüm test durumlarının hem toplam enerji içerikleri hem de enerji içeriklerinin bireysel olarak kiplere dağılımında belirgin bir farklılık görülmemektedir. Buna karşılık, tüm deliklerin açık olduğu ve $0.5U$ hızı ile hava üfleminin yapıldığı kontrollü akış test durumunda hem toplam enerji içeriği diğer test durumlarına göre daha yüksektir hem de 1 numaralı kipe aktarılan enerji içeriği yüzdesi %50 seviyesine artmıştır.

Karmaşık akış problemleri için, akış kontrolü stratejisi oluşturmada daha yüksek enerjili az sayıda kipi ve buna bağlı olarak az sayıda kipte taşınan daha fazla baskın karakteristiğinin dikkate alınması önem taşımaktadır.

İki boyutlu dairesel silindirin arkasında kalan akış alanının doğrulaması için, Reynolds sayısının (Re) 100 olduğu kontrolsüz (silindir yüzeyindeki tüm üfleme deliklerinin kapalı olduğu) laminer akış test durumunun DAY analizi sonucunda elde edilen en yüksek enerjiye sahip dört kipi enerji içerikleri kullanılmıştır. Bu

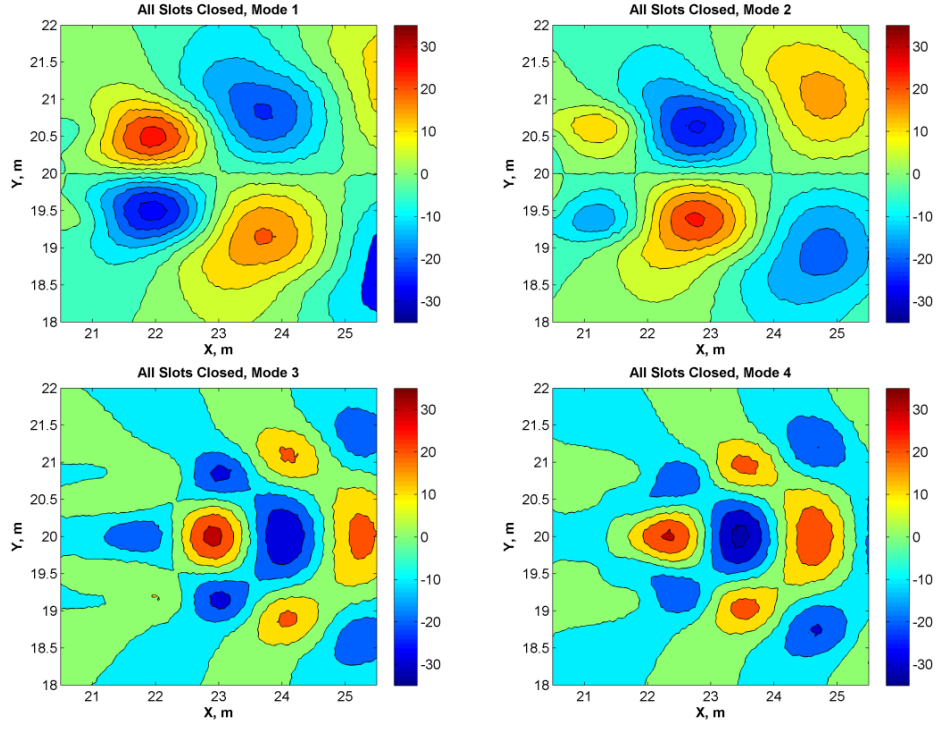
sonuçlar, Çizelge 3.2’de Cohen vd. [13] tarafından $Re=108$ için toplanan deneysel vortisite verilerine DAY uygulaması sonucunda elde edilen kiplerin enerji içerikleri ile kıyaslanmıştır.

Çizelge 3.2. $Re=100$ kontrolsüz laminer akış DAY analizleri ve Cohen vd. [13] tarafından $Re=108$ deneysel vortisite verilerine DAY uygulaması sonucunda elde edilmiş en yüksek enerjili dört DAY kipinin enerji içerikleri dağılımları

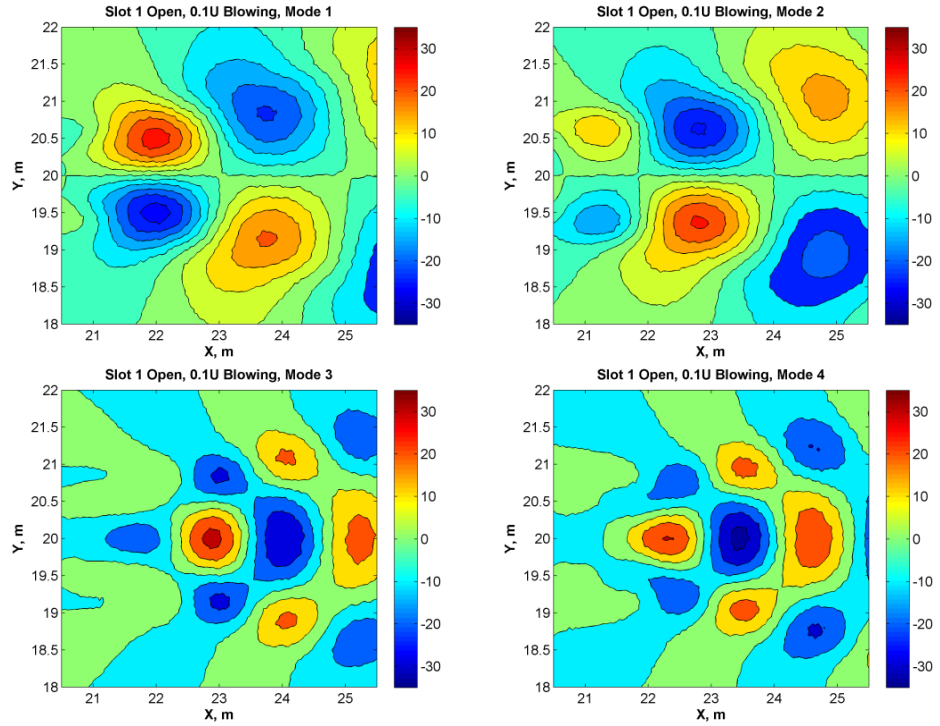
Re	Enerji İçerikleri (%)			
	Kip 1	Kip 2	Kip 3	Kip 4
100 HAD	47.41	46.40	2.78	2.58
108 Deneysel	43.40	41.98	3.03	2.73

Çizelge 3.2’ye göre, bu çalışma kapsamında $Re=100$ için elde edilen x-yönü verilerinin DAY analizi neticesinde elde edilen kiplerin enerji içerikleriyle, Cohen vd. [13] tarafından $Re=108$ için yapılan deneysel çalışmadaki vortisite verilerinin DAY analizi neticesinde elde edilen sonuçlar benzerlik göstermektedir. Örneğin, hem HAD hem de deneysel verilere ait kiplerin enerji içerikleri birinci kipten dördüncü kipe gidildikçe azalmakta ve toplam enerji içeriğinin büyük çoğunluğu ilk iki kipte toplanmaktadır. Çizelge 3.2’de incelenen parametreler x-yönü hızları ve vortisite olmasına rağmen, akış alanının düşük boyutlu ifadeleri olarak dikkate alınacak kiplerin enerji içeriklerinin benzer eğilimler göstermesi akış alanının doğrulaması olarak yeterli bulunmuştur.

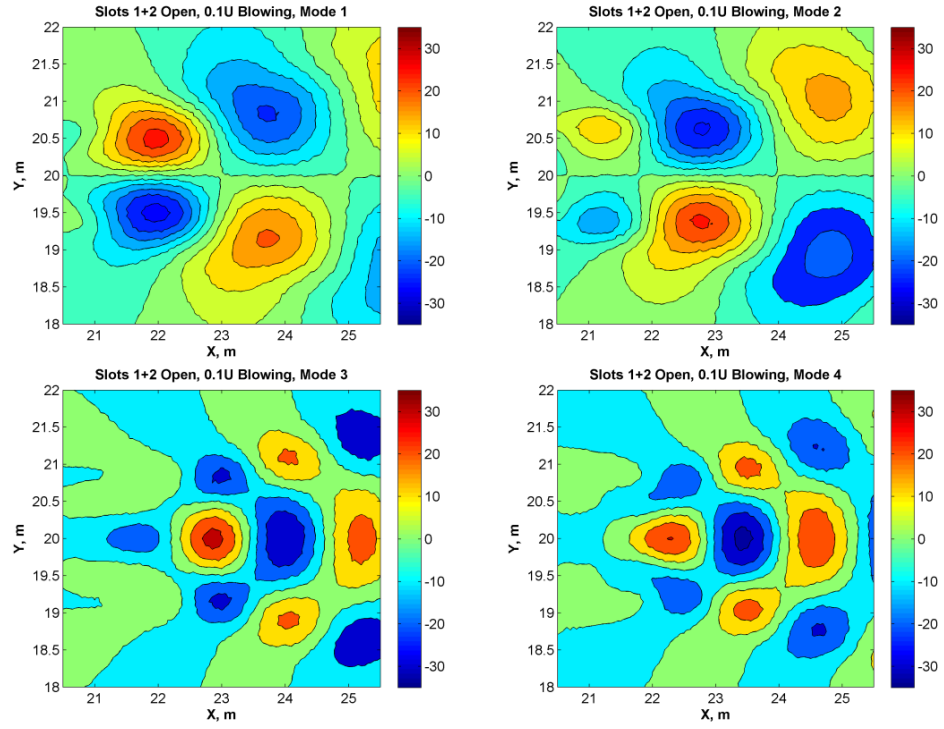
Çizelge 3.1’de gösterilen en yüksek enerjiye sahip kiplerin, tüm deliklerin kapalı olduğu kontrolsüz akış durumu için betimlemeleri Şekil 3.3’te, 1 ve 1+2 numaralı deliklerin açık olduğu kontrollü akış durumları için betimlemeleri Şekiller 3.4 ve 3.5’te, 1+4 ve 2+3 numaralı deliklerin açık olduğu kontrollü akış durumları için betimlemeleri Şekiller 3.6 ve 3.7’de, son olarak, tüm deliklerin açık olup $0.1U$ ve $0.5U$ hızları ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü akış durumları için betimlemeleri Şekiller 3.8 ve 3.9’da gösterilmektedir.



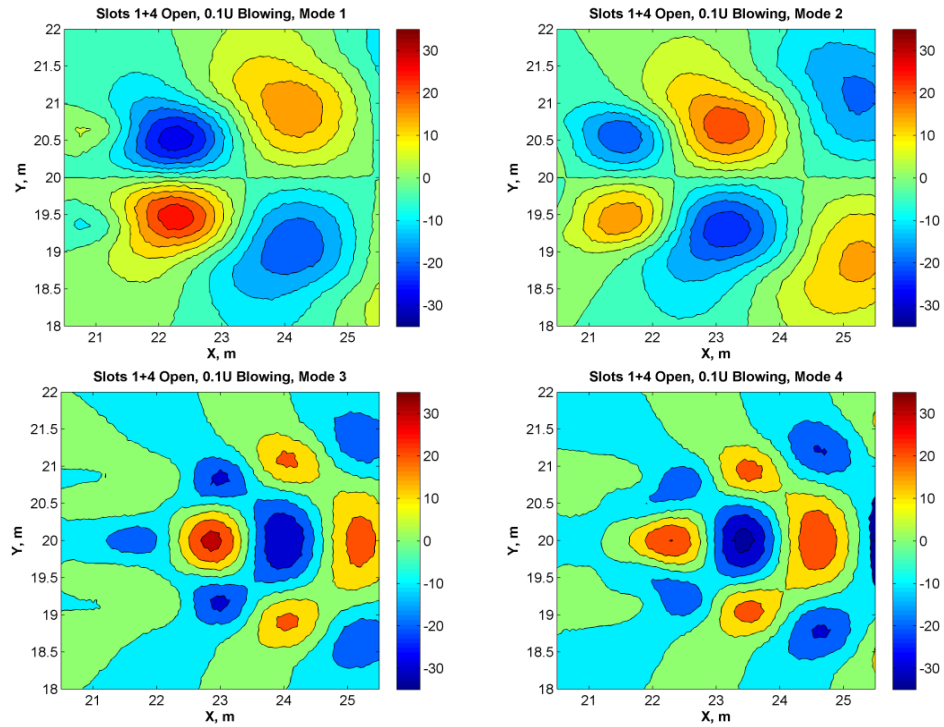
Şekil 3.3. En yüksek enerjili dört DAY kipinin tüm deliklerin kapalı olduğu kontrolsüz akış durumu için gösterimi



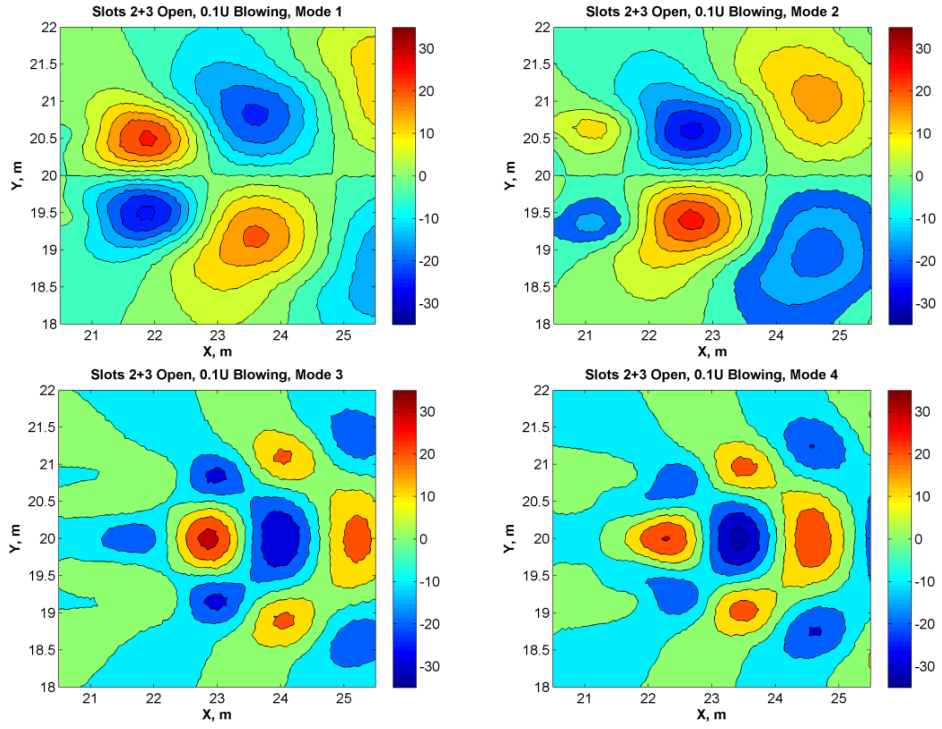
Şekil 3.4. En yüksek enerjili dört DAY kipinin 1 numaralı deliğin açık olduğu kontrollü akış durumu için gösterimi



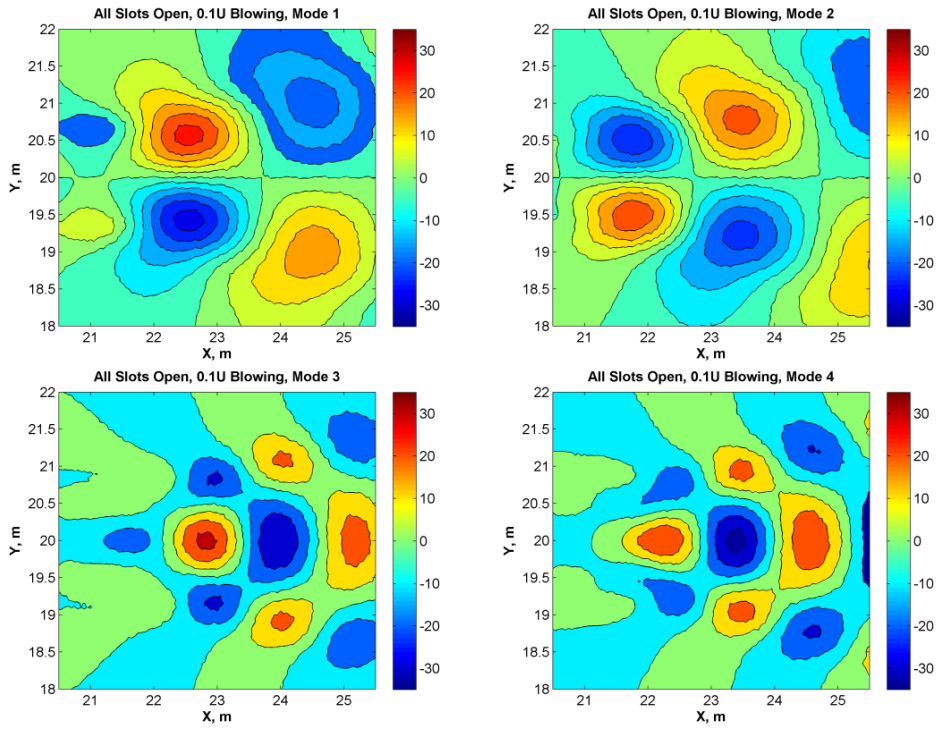
Şekil 3.5. En yüksek enerjili dört DAY kipinin 1+2 numaralı deliklerin açık olduğu kontrollü akış durumu için gösterimi



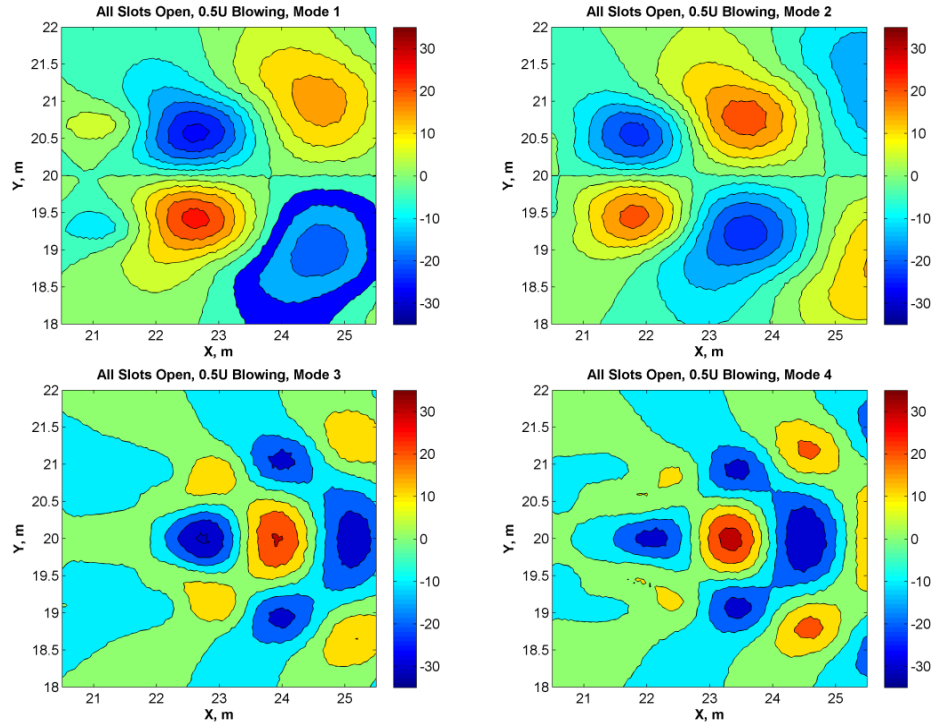
Şekil 3.6. En yüksek enerjili dört DAY kipinin 1+4 numaralı deliklerin açık olduğu kontrollü akış durumu için gösterimi



Şekil 3.7. En yüksek enerjili dört DAY kipinin 2+3 numaralı deliklerin açık olduğu kontrollü akış durumu için gösterimi



Şekil 3.8. En yüksek enerjili dört DAY kipinin tüm deliklerin açık olduğu ve 0.1U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü akış durumu için gösterimi



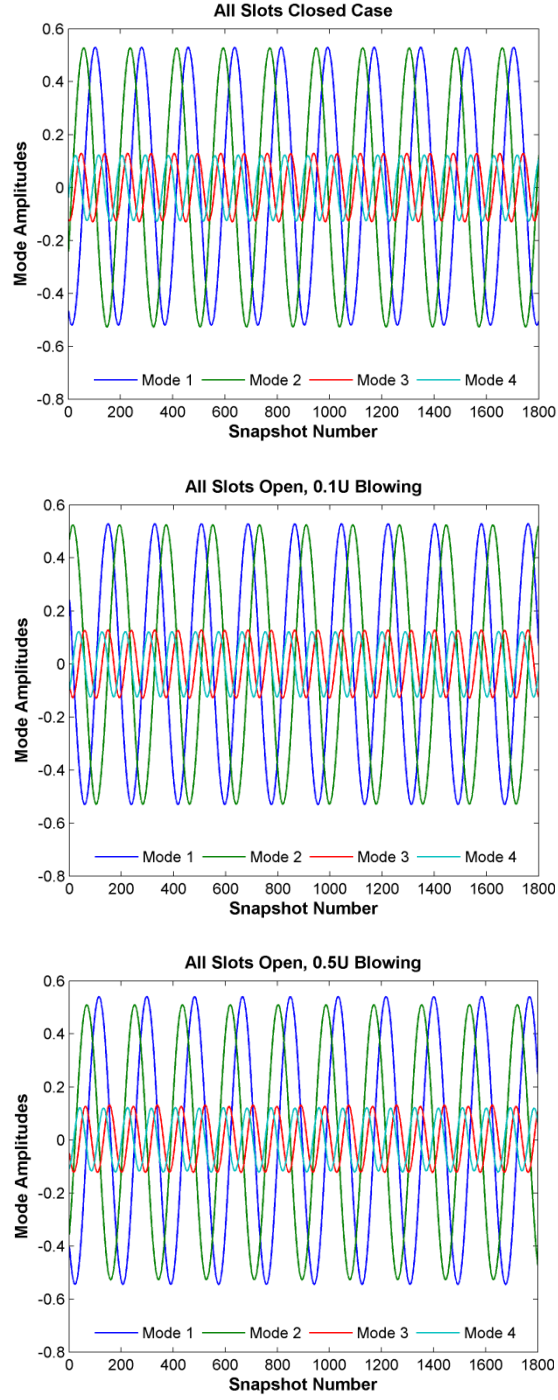
Şekil 3.9. En yüksek enerjili dört DAY kipinin tüm deliklerin açık olduğu ve 0.5U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü akış durumu için gösterimi

Şekiller 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 ve 3.9 irdelendiğinde, Çizelge 3.1’de sayısal olarak da verildiği üzere, toplam enerji içeriğinin büyük bölümünün ilk iki DAY kipinde toplandığı, iz bölgesinde oluşup zamanla hareket eden girdapların varlığı ve von Kármán girdap yolu oluşumu için mekansal karakteristikler açık olarak gözlemlenmektedir. Kiplerin enerji içeriklerindeki azalma birinci kipten dördüncü kipe gidildikçe arttığandan, beklenildiği üzere, kiplerde barındırılan karakteristik girdapların boyutları da küçülmektedir.

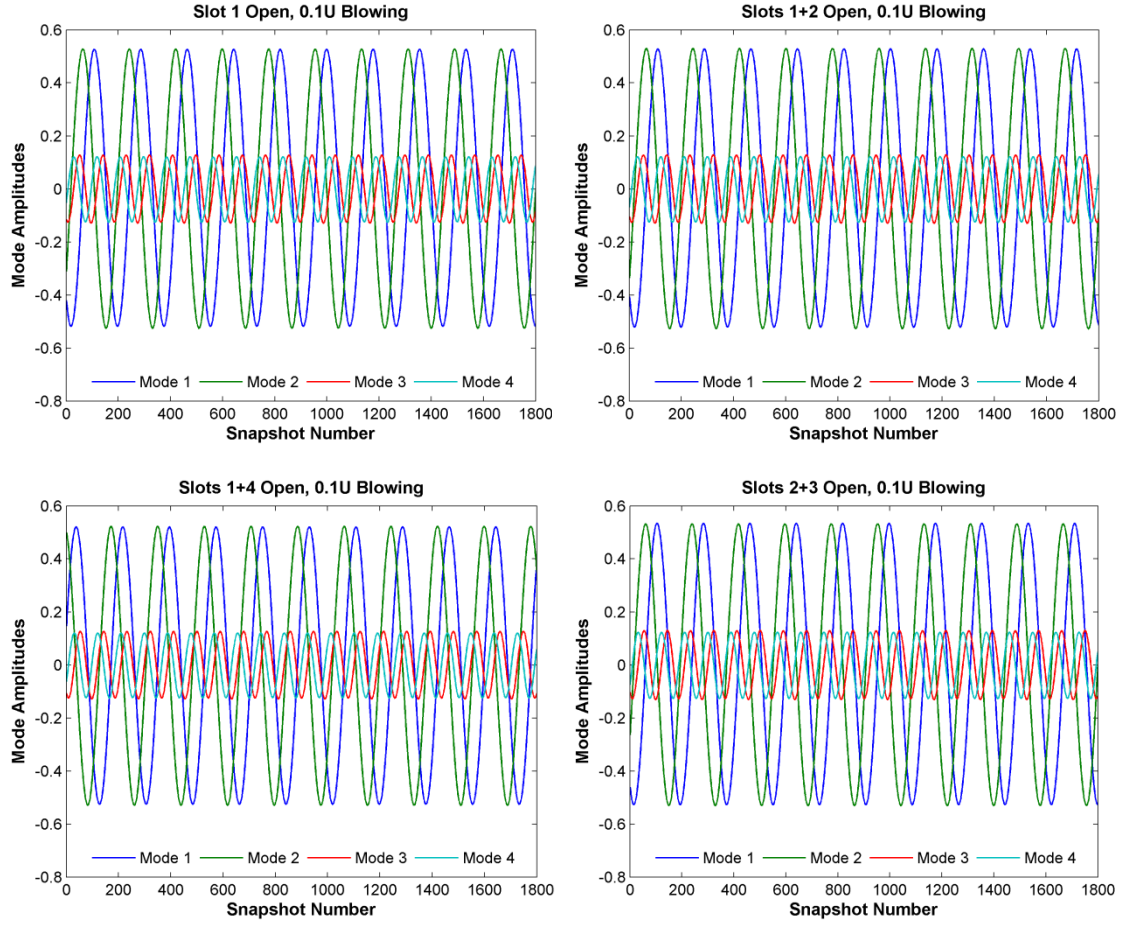
Şekiller 3.10 ve 3.11, en yüksek enerjili dört DAY kipi için zaman katsayılarının geçmişini, yani bağıl kip genliklerini göstermektedir.

Şekiller 3.10 ve 3.11’de gösterildiği üzere, kontrolsüz ve kontrollü laminar akışlar için uygulanan tüm test durumlarında elde edilen kiplerin genlikleri sinüsel salınım eğrileri şeklindedir. Zamanda periyodik olarak hareket eden bu eğriler, iki boyutlu silindirin arkasında kalan iz bölgesinde von Kármán girdap yolunu temsil eden

girdapların var olduğunun ve bu girdapların akış yönünde akış alanında hareket ettiğinin ifadesidir.



Şekil 3.10. Tüm deliklerin kapalı olduğu kontrolsüz ve $u=0.1U$ ve $u=0.5U$ hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü akış durumları için kip genlikleri



Şekil 3.11. Deliklerin değişik kombinasyonlarda açıldığı ve $u=0.1U$ hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü akış durumları için kip genlikleri

Enerji içerikleri birbirine oldukça yakın olan, tüm test durumlarında en yüksek enerji içeriklerini taşıyan ve birincil girdap yapılarının oluşum karakteristikleri hakkında bilgi veren 1 ve 2 numaralı kiplerin bağıl genlikleri de daha büyüktür. Daha az enerji içeriklerine ve dolaylı olarak daha küçük kip genliklerine sahip olan 3 ve 4 numaralı kiplerin bağıl genlikleri ise akış alanında gözlemlenen ikincil girdap yapılarının karakteristikleri hakkında bilgi vermektedir.

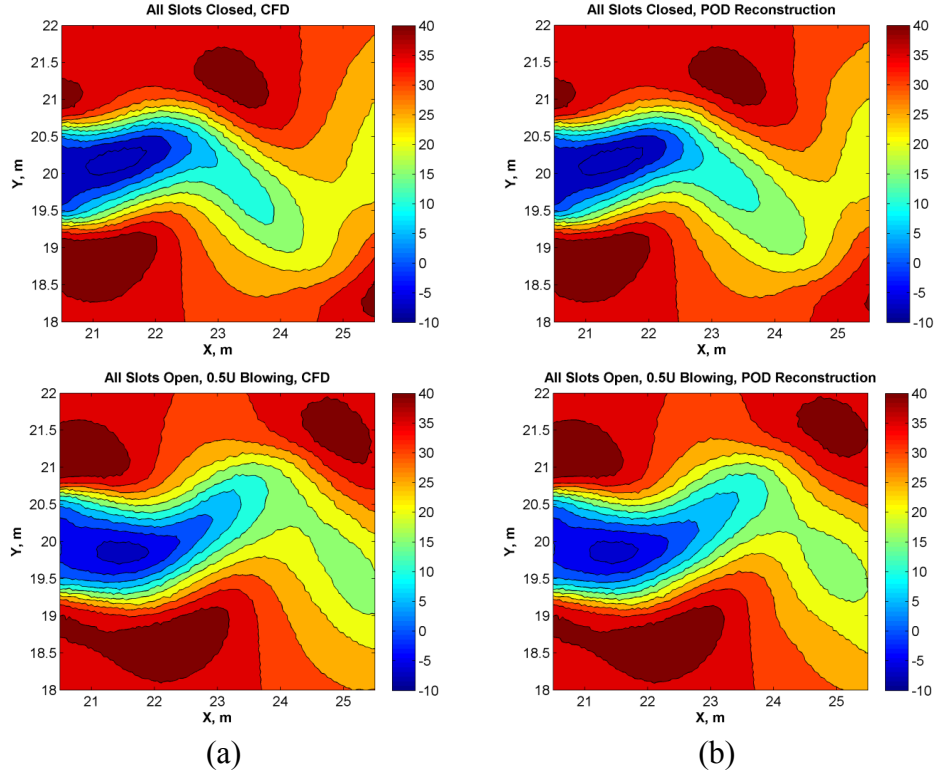
Apaçoğlu [66] tarafından yapılan kontrolsüz ve kontrollü laminer akış HAD analizlerinde, bütün test durumları arasında, tüm deliklerin açık olduğu ve $0.5U$ hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü akış için silindir üzerine etkiyen zamana göre ortalaması alınmış sürüklenme ve kaldırma katsayıları gibi parametrelerin en olumlu

sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, tüm deliklerin açık olduğu ve 0.5U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü akış durumunda, akış alanında gözlemlenen girdapların oluşumunun geciktirildiği sonucuna varılmıştır. Şekiller 3.10 ve 3.11 bu kapsamda irdelendiğinde, sinüs eğrilerinin başlangıç ve bitiş noktalarının kaydığı, buna bağlı olarak, akış alanında gözlemlenen birincil ve ikincil düzeydeki girdap yapılarının oluşumunu ifade eden sinüsel salınım frekanslarının kaydığı ve sonuç olarak girdap saçıntısının geciktirildiği bilgisi desteklenmektedir. Bu bilgiye ek olarak, tüm deliklerin açık olduğu ve 0.5U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü akış test durumunun kullanılması halinde oluşturulacak bir kontrol stratejisinin verimliliğinin daha iyi olacağı beklentisini bildiren ifade de desteklenmiştir.

DAY uygulaması sonuçlarının doğruluğunu desteklemek adına, elde edilen kiplerin ve bağlı kip genliklerinin kullanılmasıyla iki boyutlu dairesel silindir arkasında kalan, iz bölgesini gösteren akış alanı yeniden yapılandırılmıştır. Şekil 3.12’de HAD analizleri sonucunda elde edilen esas veri toplulukları ile en yüksek enerjiye sahip dört DAY kipinin ve ilgili kip genliklerinin dikkate alınmasıyla gerçekleştirilen 1800 numaralı anlık görüntü sayısı için yeniden yapılandırma sonuçları gösterilmektedir.

Kontrolsüz ve en etkili kontrol durumu olarak tanımlanan tüm deliklerin açık olduğu 0.5U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı sonuçların betimlendiği Şekil 3.12’de küçük farklılıklar haricinde gösterimler büyük ölçüde uyumaktadır.

Yeniden yapılandırma ile esas sonuçların karşılaştırıldığı Şekil 3.12’de gözlemlenen küçük farklılıklar, yeniden yapılandırma esnasındaki kesme hatalarından kaynaklanmaktadır. Daha fazla sayıda kip kullanarak yeniden yapılandırma sonucunda eşleşme düzeyini artırmak mümkündür.



Şekil 3.12. Kontrolsüz ve tüm deliklerin açık olduğu 0.5U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı test durumlarında 1800 numaralı anlık görüntü sayısı için a) esas veri topluluğu ve b) en yüksek enerjiye sahip dört DAY kipinin ve ilgili kip genliklerinin dikkate alınmasıyla elde edilen yeniden yapılandırma sonuçları

3.2. Türbülanslı Akış için Dikgen Ayırıştırma Yöntemi (DAY) Uygulaması

Türbülanslı akışın incelendiği DAY analizlerinde, tüm deliklerin kapalı olduğu kontrolsüz akış durumu haricinde, diğer tüm kontrollü akış durumları için 1320 anlık görüntü sayısına karşılık gelen, Spalart-Allmaras türbülans modelinin kullanıldığı türbülanslı HAD akış simülasyonları ile elde edilmiş, akış alanının x-y koordinat düzleminin her noktasında hesaplanan x-yönü hız verileri kullanılmıştır. Sadece kontrolsüz akış durumu analizi için 1337 anlık görüntü sayısı DAY uygulaması ile incelenmiştir. Reynolds sayısının (Re) 20000 olarak alındığı, kontrolsüz ve kontrollü türbülanslı akış HAD simülasyonları hakkında detaylı bilgi Apaçoğlu [66] tarafından yapılan çalışmada sunulmaktadır.

İki boyutlu laminer akışlar için kullanılan DAY yaklaşımı, akış alanı içindeki bağımsız yapıları tanımada ve akış alanının gerçek zamanlı durum tahmininde başarılı sonuçlar verirken, türbülanslı akışların olduğu durumlarda alışlagelmiş DAY yaklaşımının kullanılması problemlere yol açmaktadır [68].

3.2.1. Alışlagelmiş DAY Yaklaşımının Türbülanslı Akışların İncelenmesinde Yol Açtığı Dezavantajlar

Laminer akışlarda DAY uygulaması sonucunda elde edilen kiplerde, kiplerin çözüme olan katkısını ve akış alanındaki baskın yapıların ifade edildiği karakteristiklerin veri topluluğunun analizi sonucunda görüntülenme başarısını ifade eden enerji değeri daha hızlı bir düşüş göstermektedir. Ayrıca, akışın bir bölgesinin modellenmesi için daha az sayıda kipi kullanımı yeterli olmaktadır. Buna karşılık, türbülansın bulunduğu akışlarda, akış enerjisi daha hızlı bir şekilde küçük boyutlara aktarıldığından, akış enerjik ve rastgele olmaktadır. Laminer akışlar için kullanılan DAY yaklaşımının, türbülanslı akışlarda kullanımı sonucunda, elde edilen kiplerin enerji düşüşleri daha yavaş olmakta ve her kip değişik boyutlarda türbülans yapıları taşımaktadır. Dolayısıyla, akışın bir bölgesinin ifade edildiği model yapısı içinde daha çok sayıda kipi tutulması gerekmektedir. Bu yaklaşım kontrol yapısı girdilerinde istenmeyen bir durumdur [68].

Türbülanslı akışın olduğu durumda, ayrılma bölgesini takiben cismin arkasında kalan iz bölgesinde önce büyük ölçekli türbülans yapıları, örneğin von Kármán girdap yolu oluşmakta ve akış yönünde bu yapıların bölünmesiyle giderek küçülen, küçük ölçekli türbülans yapıları meydana gelmektedir. Bu tür bir akış alanına uygulanacak tipik bir kontrol stratejisinde, akış içindeki küçük ölçekli türbülans yapılarından etkilenmeden, hızlı ve büyük ölçekte oluşan türbülans yapılarını kendisine hedef alabilecek bir modelin oluşturulması esastır [68].

Ancak, matematiksel bir prosedür olan DAY, yapıları büyüklüklerine göre ayıramamakta, buna karşılık kipleri azalan enerji içeriklerine göre gruplandırmaktadır. Bu durum fiziksel olarak farklı yapıların kontrolünü ve

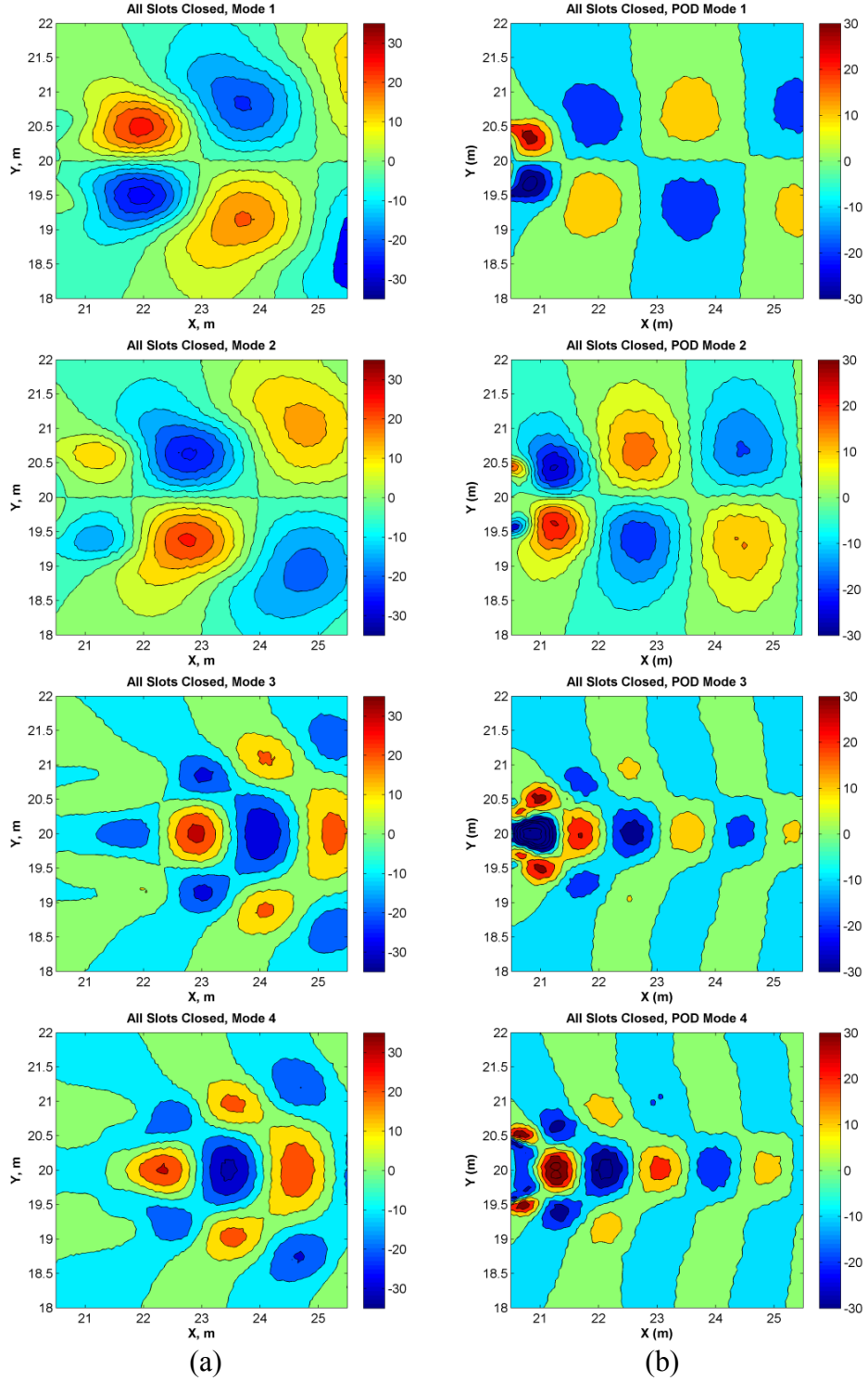
ayrılmasını amaç edinen, kontrol parametrelerinin frekansa ve sonuç olarak yapıların boyutlarına dayanan geri beslemeli akış kontrolünde istenmeyen bir durumdur. Buna rağmen, kontrol yapısının ve bu yapıda bulunan değerlendirici sistemin geliştirilmesi amacıyla, kip genliklerinin elde edilebilmesi için DAY uygulamasının kullanılması kaçınılmazdır [68].

Şekil 3.13, iki boyutlu dairesel silindir etrafındaki akış için, silindir yüzeyindeki tüm deliklerin kapalı olduğu kontrolsüz laminer ve türbülanslı akış koşullarında, alışlagelmiş anlık durum görüntüsü esasına dayanan DAY uygulaması sonucunda her iki akış rejimi için elde edilen en yüksek enerji düzeyine sahip dört DAY kipinin betimlemelerini göstermektedir.

Şekil 3.13'den görülebileceği gibi, alışlagelmiş anlık durum görüntüsü esasına dayanan DAY yaklaşımı, laminer akışta düzgün yapılar elde edilmesine olanak tanırken, aynı yaklaşım türbülanslı akışta kullanıldığında, küçük ölçekli türbülans yapılarının çözümü etkilemesinden dolayı yapıları büyüklüklerine göre ayıramamaktadır.

Ayrıca, Şekil 3.13'de gösterildiği gibi, küçük ölçekli türbülans yapılarının çözümü etkilemesinden ve DAY kodlarının yapıları büyüklüklerine göre ayıramamasından dolayı, türbülanslı akış durumu için gösterilen kiplerde küçük, girintili çıkıntılı, düzgün olmayan, yapıların oluşmasına sebep olmaktadır. Kontrol mekanizması için küçük boyutlu türbülans yapılarının etkileri, dolayısıyla, türbülanslı akış durumu için gösterilen kiplerdeki düzgün olmayan yapılar istenmemektedir.

Burada akış kontrolündeki ana hedef, Kolmogorof hipotezine göre büyük türbülanslı yapılardan oluşan küçük yapıların, büyüklerin hedeflenip kontrol edilebilmesiyle kendiliğinden kontrol edilecek olması, sadece büyük türbülanslı yapıların kontrolünün akışı kontrol etmekte yeterli olacağı varsayımdır.



Şekil 3.13. Tüm deliklerin kapalı olduğu kontrolsüz a) laminar ve b) türbülanslı akış durumu için alışlagelmiş anlık durum görüntüsü esasına dayanan DAY uygulamasının sonucunda elde edilen en yüksek enerji düzeyine sahip dört kipin gösterimi

3.2.2. Filtreleme Yöntemleri

Potansiyel bir akış kontrolü stratejisi için sadece büyük ölçekli türbülans yapılarının dikkate alınarak DAY yaklaşımının uygulanabilmesi için, deneysel ya da bilgisayar simülasyonu verilerine filtreleme yapılarak küçük boyutlu türbülans hareketlerinin etkilerinden kurtulmak gerekmektedir.

Literatürde değişik filtreleme metotlarından bahsedilmektedir. Örneğin, dalgacık (wavelet) tabanlı uygulamalar ve özellikle düşük geçişli filtreler olarak bilinen dalga boyu filtreleri resimlerin verilerinin filtrelenmesinde kullanılmaktadır [69]. Bunun dışında, Galerkin modellerinin Fourier ve DAY genişlemeleriyle beraber olasılıklı etkilerin simetri uygulanarak ayrılması da literatürde belirtilen bir filtreleme türüdür. Aubry vd. [70], Smith vd. [71], Johansson vd. [72] ve Gamard vd.'nin [73] çalışmalarında bu filtreleme türleri için örnekler bulunmaktadır.

Ayrıca, Dowell ve Hall [74] akışkan-yapı etkileşimleri için düşük mertebeli modeller kullanarak ve çalışmalarında zamansal ön filtreleme tekniği uygulayarak, çözümde periyodikliği elde etmenin yanı sıra, dolaylı olarak küçük ve olasılıklı mekansal yapıları da filtrelemişlerdir. Attar vd. [75], Gamard vd. [76] ve Tadmor vd.'nin [77] çalışmalarında küçük yapıların ayrılmasında zamansal ön filtreleme tekniğinden faydalanmışlardır.

3.2.3. Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) Filtreleme Tekniği

Türbülanslı akışın DAY incelemesinin yapıldığı bu çalışma kapsamında, DAY kodlarının uygulanmasından önce, HAD simülasyonları sonucunda elde edilen veri grubuna Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) dönüşümü uygulanarak filtreleme gerçekleştirilmiştir. Farklı filtreleme metotları arasından HFD metodunun seçilmesinin sebebi, Aradag vd. [68,78] tarafından silindir üzerindeki türbülanslı akışın incelendiği benzer çalışmalarda, akış alanındaki büyük ölçekli yapıların tanımlanması ve ayrılmasında, yani mekansal filtreleme işlemlerinde HFD metodu ile oldukça verimli sonuçlar elde edildiğinin belirtilmesidir.

HFD titreşim analizlerinde, ayrık Fourier dönüşümlerinin ve terslerinin hesaplanmasında kullanılan matematiksel bir işlemdir. HFD, zaman alanında elde edilen veri topluluğunu frekans alanına geçirip, karışık sinyaller içeren veri topluluğunu ayrıştırarak, hangi frekansta ne şiddette bir titreşim olduğunu gösterir [79].

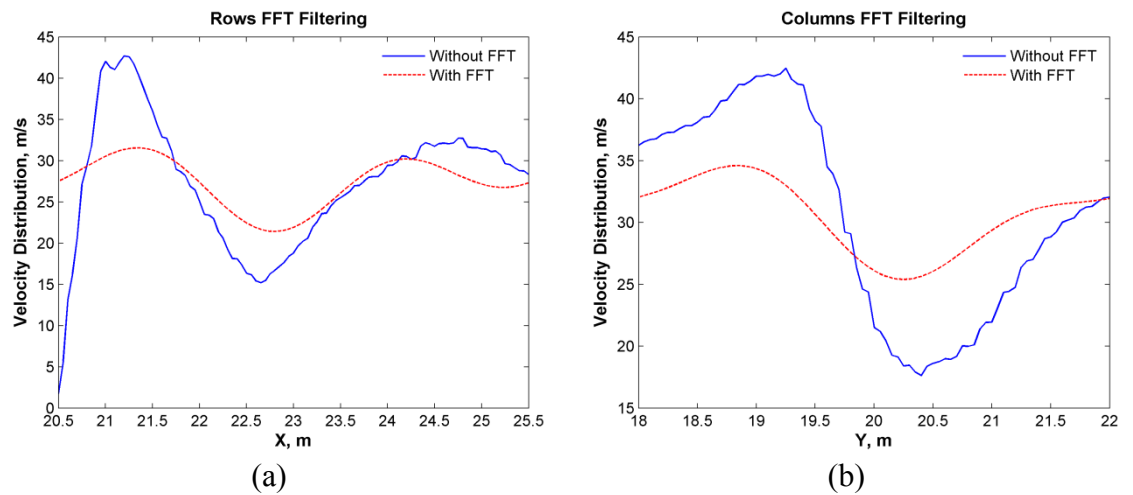
Türbülanslı akışın DAY incelemesi kapsamında, HFD analizi mekansal alanda elde edilen HAD verilerine uygulanarak, veri topluluğunun dalga boyu alanına dönüştürülmesinde kullanılmıştır. HFD kullanılarak yapılan filtreleme prosedürü şu şekildedir:

- a. x ve y düzlemleri doğrultularındaki iki boyutlu akış alanı için 0.05 m eşit aralıklarla, x-yönü yönünde 20.5 m ile 25.5 m arasında, y-düzlemi yönünde ise 18 m ile 22 m arasında olacak şekilde bir çözüm ağı yapısı oluşturulmuştur.
- b. Türbülanslı akış HAD simülasyonları sonucunda elde edilen verilerden x-yönü hız değerlerini içeren veriler çözüm ağına uygun olacak şekilde 101x81 boyutlarındaki yeni bir matriste toplanmıştır. Bu matrisin her bir satırı mekansal x koordinatı sabit tutulurken artan y koordinatlarına, her bir kolonu ise mekansal y koordinatı sabit tutulurken artan x koordinatlarında taşınan verilere karşılık gelmektedir.
- c. HFD metodu öncelikle yeni oluşturulan matrisin mekansal x koordinatı sabit tutulurken artan y koordinatlarındaki hız verilerine uygulanmıştır. Uygulama sonrasında, x koordinatındaki noktaların dalga boyuna karşılık enerji spektrumu çizildiğinde, her kolon boyunca büyük dalga boylarında bulunan ve akış kontrolü için gerekli olan büyük ölçekli türbülans yapılarını taşıyan, yüksek enerjili ilk üç değer seçilmiştir.
- d. Oluşturulan yeni veri kümesine ters HFD uygulanarak akış alanı yeniden yapılandırılmıştır.
- e. Filtreleme işlemine tabi tutulan veri seti, a – d adımları izlenerek mekansal y koordinatı sabit tutulurken artan x koordinatlarında taşınan hız verileri için de filtreleme işlemine tabi tutulmuştur. Böylece, akış alanındaki x-yönü hız verilerinin HFD ile filtrelendiği yeni bir veri seti elde edilmiştir.

Yeni veri topluluğu, HFD ile filtreleme işleminden sonra sadece büyük ölçekteki türbülans yapılarından kaynaklanan etkileri taşıdığından, alışlagelmiş DAY metodunun iki boyutlu türbülanslı akış alanına uygulanmasında bir sakınca kalmamıştır. Türbülanslı akış için oluşturulan HFD ile filtreleme kodları EK 3'te verilmiştir.

3.2.4. Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) Filtreleme Tekniği ile Birleştirilen Dikgen Ayrıştırma Yönteminin Türbülanslı Akışlara Uygulanması

HFD filtreleme tekniğinde dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan birisi, simülasyon sonuçlarına HFD uygulandıktan sonra tekrar yapılandırma için ters HFD alınması sırasında hangi dalga boyu değerlerinin dikkate alınması gerektiğidir. Von Kármán girdapları gibi büyük boyutlu türbülans yapılarının etkileri HFD spektrumunda büyük dalga boyuna karşılık gelmektedir [68]. Şekil 3.14, HAD simülasyonu sonucunda elde edilen anlık hız değerlerinin HFD uygulanmamış hali ile HFD uygulanarak filtrelendikten sonraki görüntülerini vermektedir. Şekil 3.14'te görüldüğü gibi, türbülans yapılarının etkileri HFD ile filtreleme yapıldıktan sonra oluşturulan yeni veri grubunda gözlenmemektedir.



Şekil 3.14. HFD ile filtreleme öncesi ve sonrası gözlemlenen anlık x-yönü hız değerleri a) x koordinatı sabit tutulurken artan y koordinatlarında ve b) y koordinatı sabit tutulurken artan x koordinatlarında gözlemlenen tipik bir HFD analiz spektrumu

Çizelge 3.3, kip sayısına karşılık HFD ile filtreleme öncesinde ve sonrasında alışılagelmiş DAY uygulamasında tüm deliklerin kapalı olduğu kontrolsüz türbülanslı akış durumu için enerji içeriklerinin değişimini göstermektedir.

Çizelge 3.3. HFD ile filtreleme öncesi ve sonrası DAY uygulanmış tüm deliklerin kapalı olduğu kontrolsüz türbülanslı akış durumu için enerji içeriklerinin en yüksek enerjili dört kipe dağılımı

Kip Numarası	Enerji İçerikleri (%)	
	HFD ile Filtreleme Öncesi	HFD ile Filtreleme Sonrası
1	49.95	54.68
2	44.08	43.96
3	2.78	0.77
4	2.28	0.58
Toplam (4 Kip)	99.09	99.99

Çizelge 3.3'e göre, HAD simülasyonu sonucunda elde edilen veri grubuna HFD kullanılarak filtreleme yapıldıktan sonra DAY uygulanması durumunda, hem istenmeyen küçük ölçekli türbülans etkileri giderilmektedir, hem de DAY sonunda yeniden yapılandırma için kullanılması gereken kip sayısı filtreleme yapılmayan duruma göre daha azdır. Örneğin, HFD metodu ile filtrelenmiş türbülanslı akış veri grubunda sadece en yüksek enerjili ilk iki kipi dikkate alınmasıyla toplam enerji içeriğinin %98'den fazlası temsil edilmektedir.

Çizelge 3.4, HFD ile filtreleme yapıldıktan sonra, tüm kontrollü türbülanslı akış analizleri için alışılagelmiş DAY uygulaması sonucunda, en yüksek enerjili dört kipi enerji içeriklerindeki dağılımları göstermektedir.

Çizelge 3.4'e göre, kontrollü laminer akış DAY analizlerinde de olduğu gibi, türbülanslı akışta kontrol amacıyla deliklerden yapılan üfleminin etkisi, ilk kipe aktarılan enerji miktarındaki artış şeklinde gözlemlenmektedir. Apaçoğlu [66] tarafından yapılan HAD analizleri sonuçlarında, en verimli kontrol durumunun tüm deliklerin açık olup 0.5U hızı ile hava üflenmesi olduğu belirtilmiştir. Bu ifade HFD-

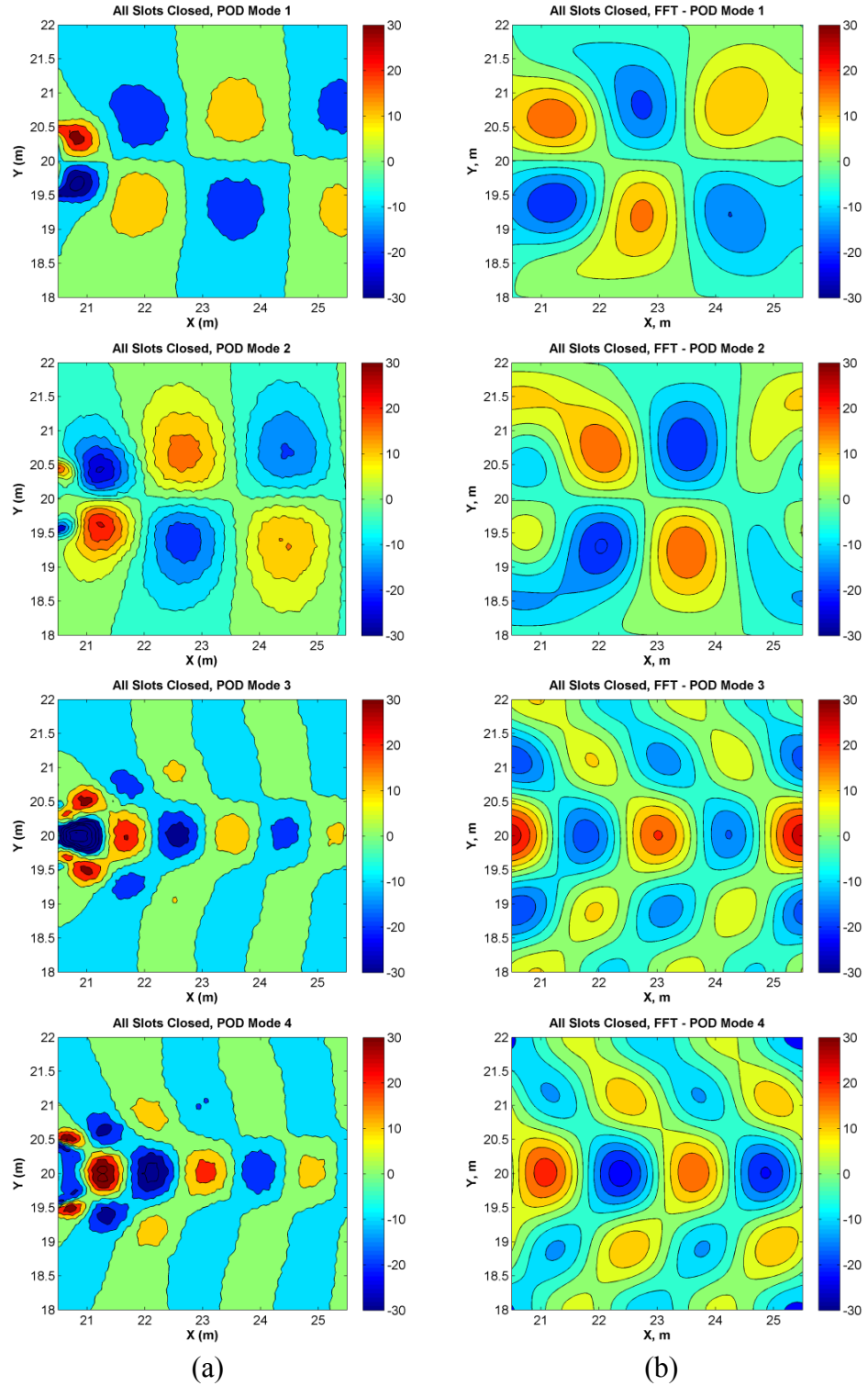
DAY uygulaması sonuçları ile doğrulanmaktadır. Ayrıca, tüm kontrollü türbülanslı akış durumları için toplam enerji içeriğinin %98'den fazlası en yüksek enerjiye sahip ilk iki kipi dikkate alınmasıyla karşılanmaktadır. Buna göre, gerçek zamanlı bir akış sistemi için oluşturulmak istenen akış kontrolü stratejisinde, HFD-DAY analizleri neticesinde açığa çıkan bu iki kipi bağıl genliklerinin tahmini önem taşımaktadır.

Çizelge 3.4. Tüm kontrollü türbülanslı akış analizleri için HFD ile filtreleme yapıldıktan sonra uygulanan alışlagelmiş DAY analizi sonuçlarına göre en yüksek enerjili dört kipi enerji içerikleri dağılımı

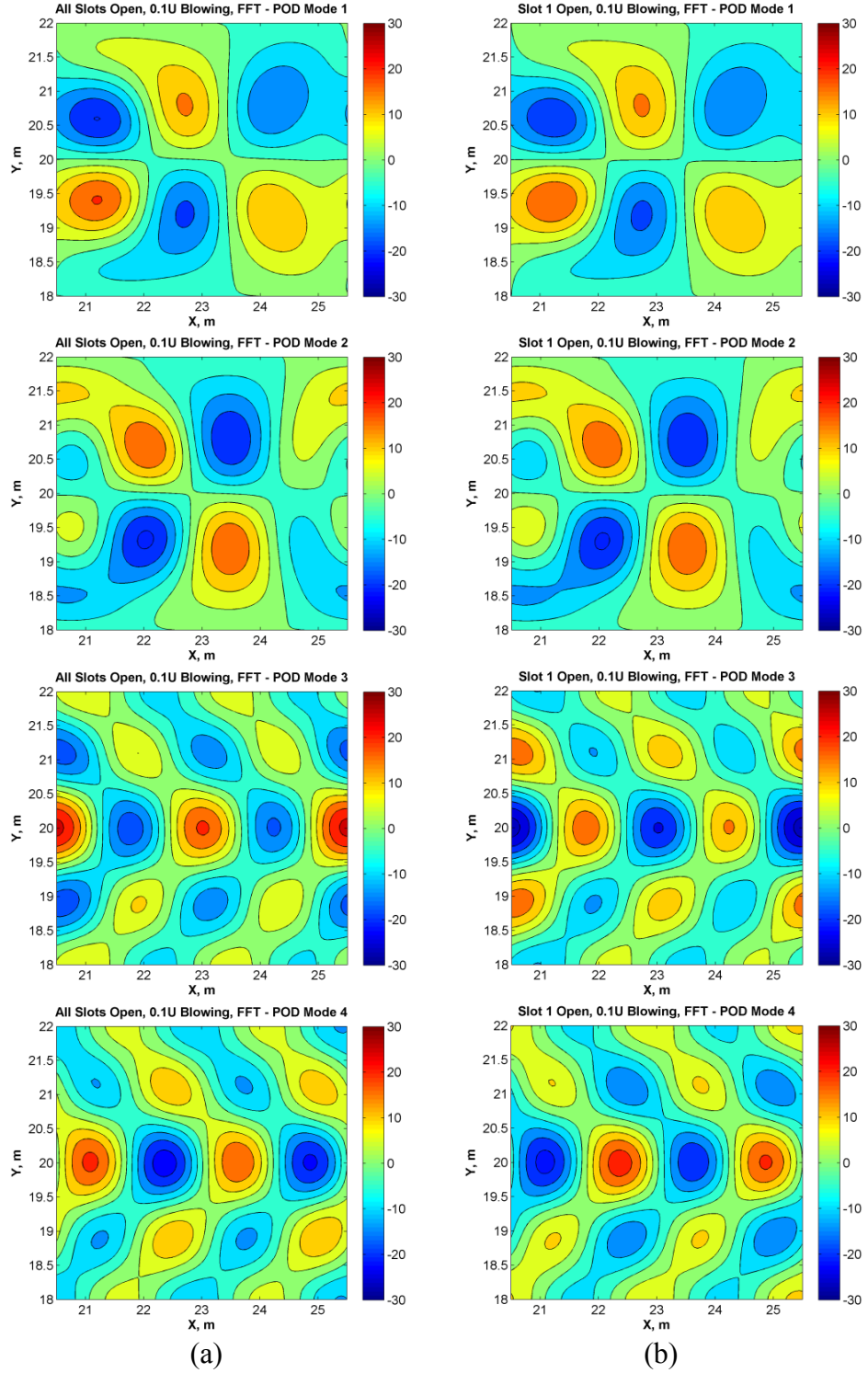
Kip Numarası	Enerji İçerikleri (%)						
	Delik 1 Açık u=0.1U	Delikler 1+2 Açık u=0.1U	Delikler 1+4 Açık u=0.1U	Delikler 1+4 Açık u=0.5U	Delikler 2+3 Açık u=0.1U	Tüm Delikler Açık u=0.1U	Tüm Delikler Açık u=0.5U
1	55.20	55.99	55.31	55.20	55.21	56.17	56.96
2	43.39	42.55	43.27	43.77	43.33	42.30	41.37
3	0.79	0.83	0.79	0.57	0.82	0.85	0.93
4	0.61	0.62	0.62	0.45	0.63	0.67	0.73
Toplam (4 Kip)	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99

Şekil 3.15, iki boyutlu dairesel silindir etrafındaki akış için, silindir yüzeyindeki tüm deliklerin kapalı olduğu kontrolsüz türbülanslı akış durumu için, HFD ile filtreleme öncesi ve sonrası alışlagelmiş DAY uygulaması neticesinde ortaya çıkan en yüksek enerji düzeyine sahip dört DAY kipi için betimlemelerini göstermektedir.

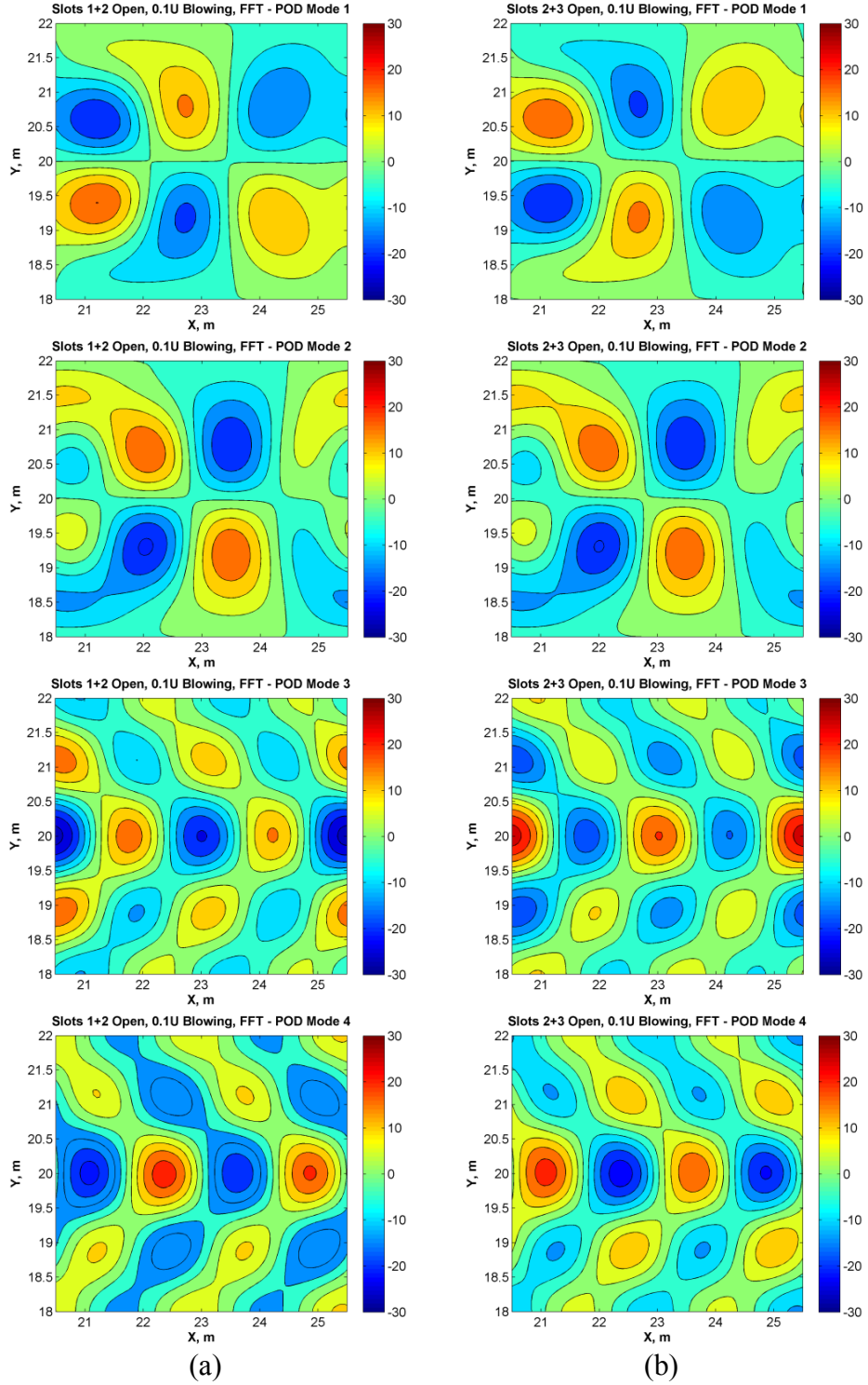
Çizelge 3.1'de gösterilen en yüksek enerjili kipi için, tüm deliklerin açık olduğu ve 0.1U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı ve sadece 1 numaralı deliğin açık olduğu kontrollü akış durumu için betimlemeleri Şekil 3.16'da, 1+2 ve 2+3 numaralı deliklerin açık olduğu kontrollü akış durumları için betimlemeleri Şekil 3.17'de, 1+4 numaralı deliklerin açık olduğu kontrollü akış durumları için betimlemeleri Şekil 3.18'de, son olarak, tüm deliklerin açık olduğu ve 0.5U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü akış durumu için betimlemeleri Şekil 3.19'da gösterilmektedir.



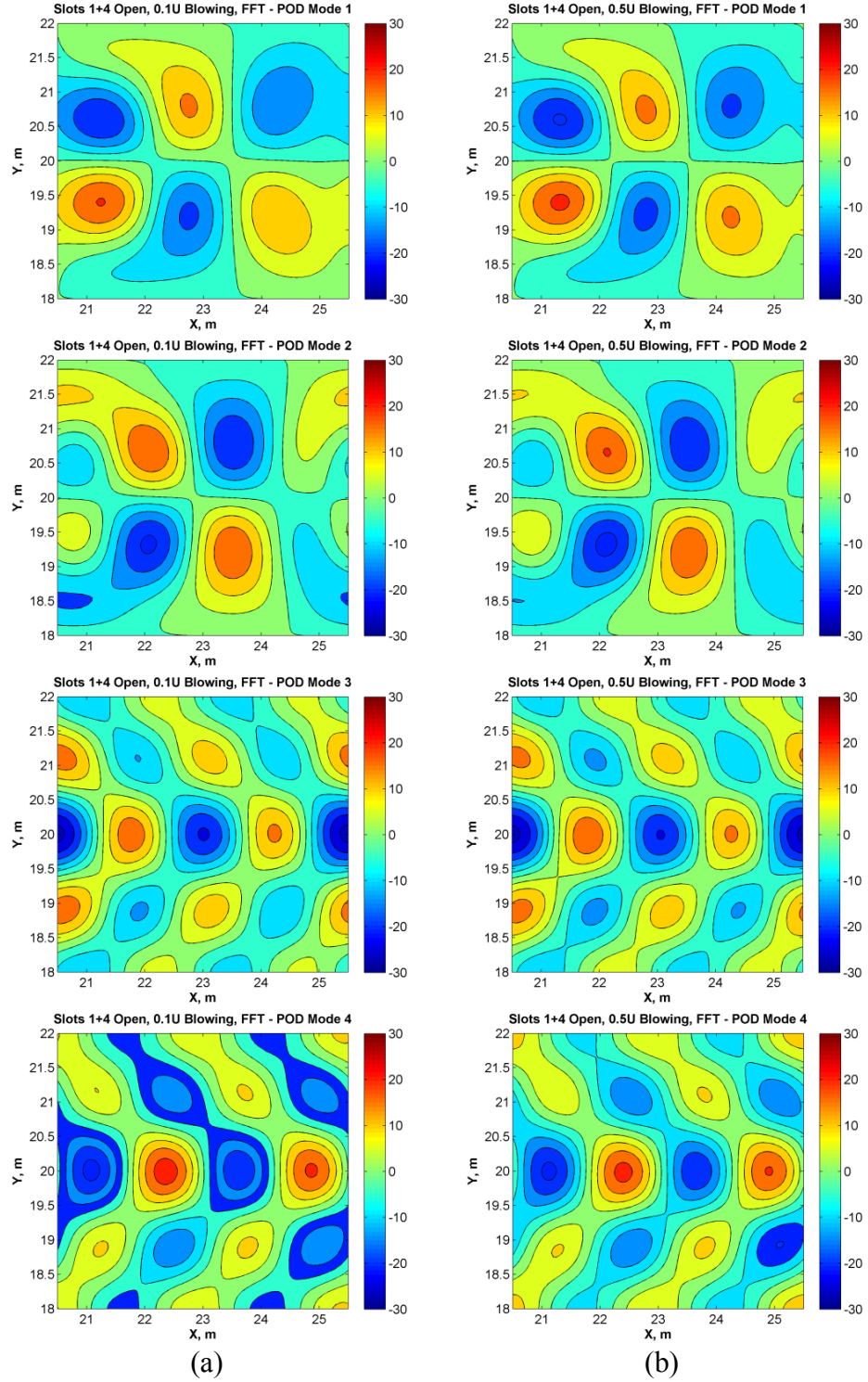
Şekil 3.15. Tüm deliklerin kapalı olduğu kontrolsüz akış durumunda en yüksek enerjili dört DAY kipinin a) HFD ile filtreleme yapılmadan önce ve b) sonraki gösterimleri



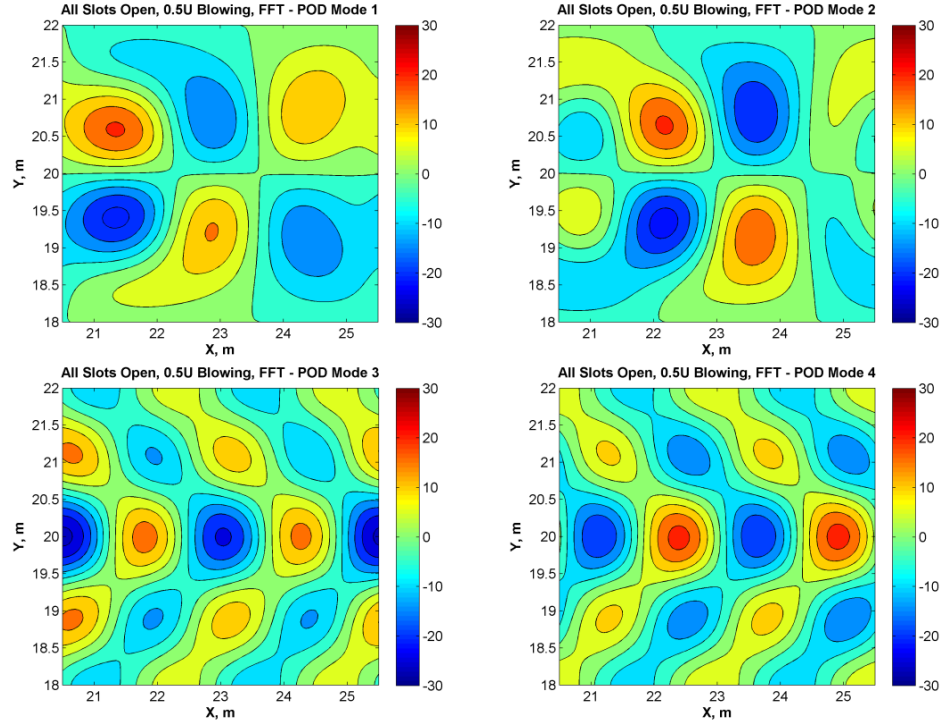
Şekil 3.16. HFD ile filtreleme sonrasındaki en yüksek enerjili dört DAY kipinin
a) tüm deliklerin açık olup $u=0.1U$ hızı ile hava üflemesinin yapıldığı ve
b) 1 numaralı deliğin açık olduğu kontrollü akış durumları için gösterimleri



Şekil 3.17. HFD ile filtreleme sonrasındaki en yüksek enerjili dört DAY kipinin a) 1+2 numaralı deliklerin ve b) 2+3 numaralı deliklerin açık oldukları kontrollü akış durumları için gösterimleri



Şekil 3.18. HFD ile filtreleme sonrasındaki en yüksek enerjili dört DAY kipinin 1+4 numaralı deliklerin açık olduğu a) $u=0.1U$ ve b) $u=0.5U$ hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü akış durumları için gösterimleri



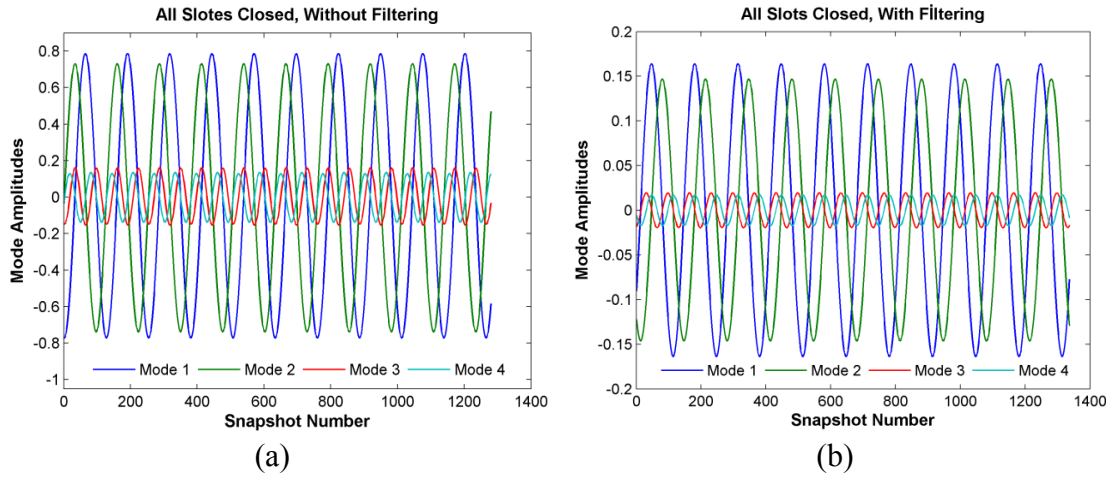
Şekil 3.19. HFD ile filtreleme sonrasındaki en yüksek enerjili dört DAY kipinin tüm deliklerin açık olduğu ve $u=0.5U$ hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü akış durumları için gösterimleri

Şekiller 3.15, 3.16, 3.17, 3.18 ve 3.19’da gösterildiği üzere, filtreleme sonrasında akış alanında bulunan küçük ölçekli türbülans yapılarının etkileri ayrıldığından, elde edilen kiplerdeki yapılar oldukça düzgün olmaktadır. Ayrıca, HFD-DAY uygulaması ile silindir arkasında oluşan baskın özellikteki von Kármán girdapları ile enerjik yapıdaki türbülanslı akış rejimi için akış alanındaki hız değişimi verimli bir şekilde görüntülenebilmektedir.

Tüm deliklerin kapalı olduğu kontrolsüz türbülanslı akış durumu için HFD ile filtreleme öncesi ve sonrası en yüksek enerjiye sahip ilk dört kiplin bağlı kip genlikleri, yani zamana bağlı katsayılarının anlık görüntü sayısı ile değişim geçmişi Şekil 3.20 ile gösterilmektedir.

Şekil 3.20’den görüldüğü gibi, HFD ile filtreleme sonrasında elde edilen durumda kiplerin genlikleri, filtreleme öncesi durum için elde edilenden daha küçüktür. Bunun sebebi, HFD ile filtreleme sonucunda akış alanında sadece büyük ölçekteki

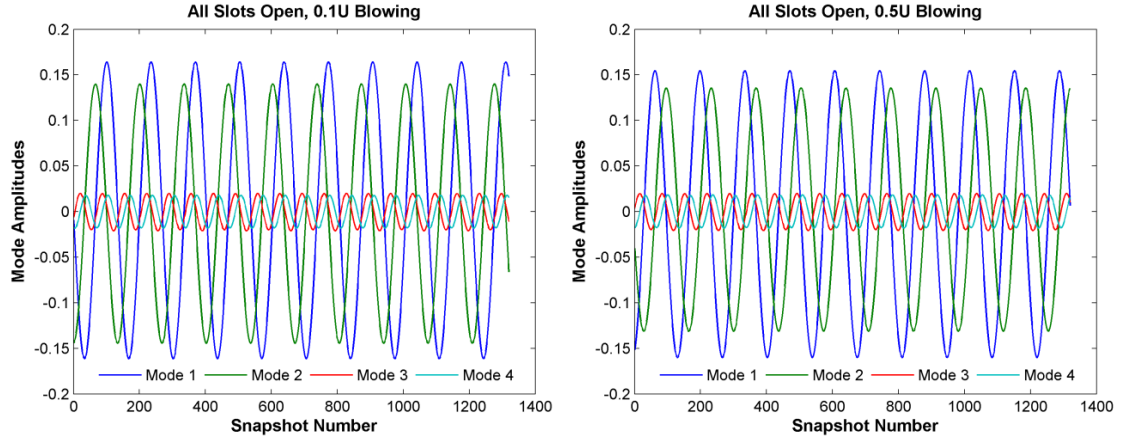
türbülanslı yapıların etkilerinin kalmasıdır. Ayrıca, birinci ve ikinci kipler için gösterilen zaman katsayılarının büyük genliklerde sinüs salınımları yapmaları, silindir arkasında kalan iz bölgesindeki dalgalanmalara sebep olan von Kármán girdaplarının varlığını göstermektedir. Girdaplar, iz bölgesinde periyodik olarak hareket etmektedirler.



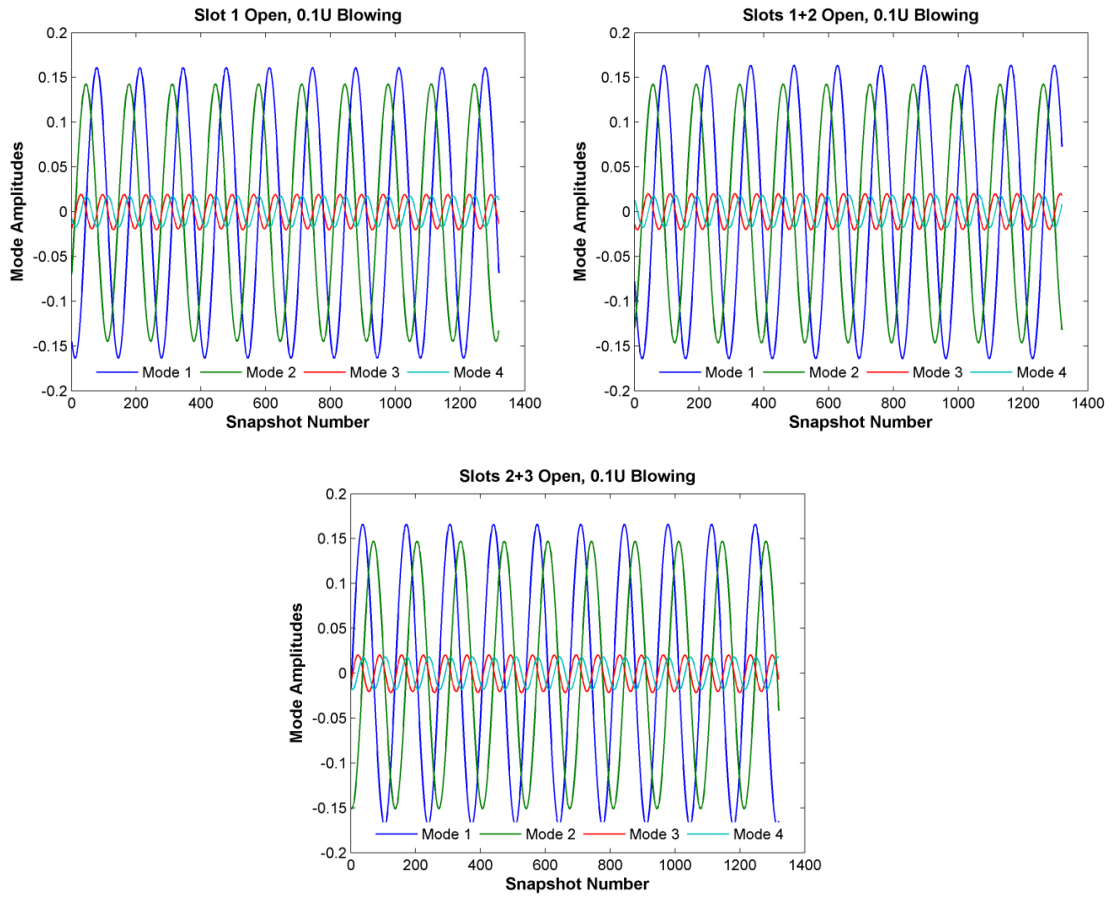
Şekil 3.20. Tüm deliklerin kapalı olduğu kontrolsüz türbülanslı akış durumu için a) HFD ile filtreleme öncesi ve b) sonrası en yüksek enerjili ilk dört kipi bağlı kip genlikleri

Şekil 3.21, tüm deliklerin açık olup sırasıyla 0.1U ve 0.5U hızları ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü akış durumları için HFD filtreleme sonrası DAY uygulamasında elde edilen kip genliklerini, Şekiller 3.22 ve 3.23 ise deliklerin değişik kombinasyonlarda açıldığı diğer tüm kontrollü akış durumlarının kip genliklerini göstermektedir.

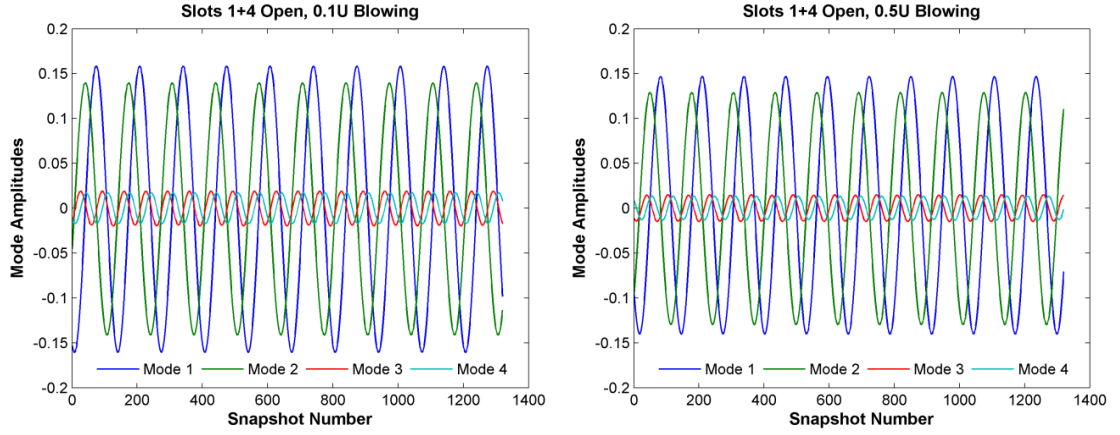
Laminer akış DAY analizleri sonucunda da belirtildiği gibi, türbülanslı akış durumlarının incelendiği Şekiller 3.20, 3.21, 3.22 ve 3.23 irdelendiğinde, deliklerin değişik kombinasyonlarda açılıp değişik üfleme hızlarının kullanıldığı kontrollü akış durumlarında da akış alanında gözlemlenen birincil ve ikincil düzeydeki girdap yapılarının oluşumunu ifade eden sinüsel salınım frekanslarının kaydı ve sonuç olarak girdap saçıntısının geciktirildiği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.21. Tüm deliklerin açık olduğu sırasıyla $u=0.1U$ ve $u=0.5U$ hızı ile hava üfleminin yapıldı kontrollü türbülanslı akış durumları HFD ile filtreleme sonrası DAY uygulamasında en yüksek enerjili ilk dört kipin bağıl kip genlikleri

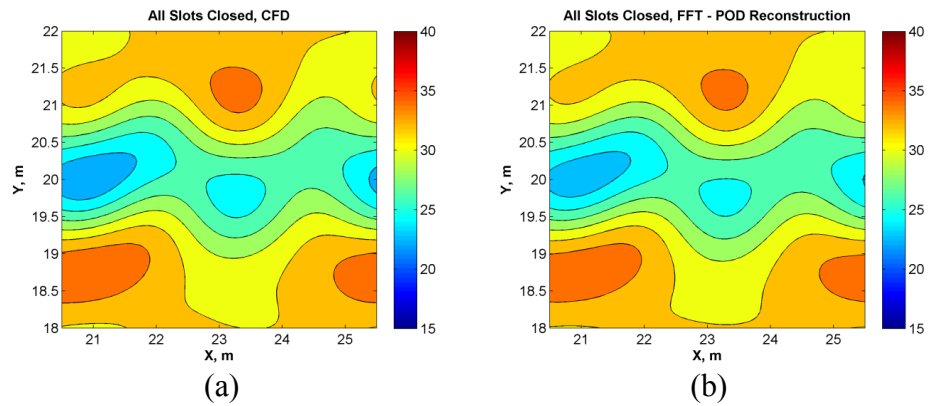


Şekil 3.22. Silindir yüzeyindeki deliklerin değişik kombinasyonlarda açıldığı kontrollü türbülanslı akış durumları için HFD ile filtreleme sonrası DAY uygulamasında gözlemlenen en yüksek enerjili ilk dört kipin bağıl kip genlikleri



Şekil 3.23. Silindir yüzeyindeki deliklerin değişik kombinasyonlarda açıldığı kontrollü türbülanslı akış durumları için HFD ile filtreleme sonrası DAY uygulamasında gözlemlenen en yüksek enerjili ilk dört kipin bağıl kip genlikleri

HFD filtreleme metodunun kullanıldığı DAY uygulaması neticesinde elde edilen sonuçların doğruluğu yeniden yapılandırma ile test edilmiştir. Bu amaçla, tüm deliklerin kapalı olduğu kontrolsüz akış durumunda örnek bir anlık görüntü sayısı (1337 numaralı anlık görüntü) için HAD analizlerinden elde edilen ve ilk iki kip ile bağıl genliklerin yeniden yapılandırılmasıyla oluşturulan iz bölgesi akış alanı Şekil 3.24'te gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi az sayıda kip kullanılarak oluşturulan akış alanı HAD analizleri verilerinin kullanımı ile betimlenen hız alanı ile oldukça uyumludur.



Şekil 3.24. Kontrolsüz akış durumu 1337 numaralı anlık görüntü sayısı için a) esas veri topluluğu ve b) en yüksek enerjiye sahip dört DAY kipinin ve ilgili kip genliklerinin dikkate alınmasıyla elde edilen yeniden yapılandırma sonuçları

3.3. Sensör Yerleştirme Çalışmaları

Çalışma kapsamında, Dikgen Ayırıştırma Yöntemi (DAY) uygulaması sonucunda elde edilen kiplerin zaman katsayıları ve silindir yüzeyindeki belirli noktalardan (sensörlerden) elde edilen basınç verileri YSA sisteminin girdileri olarak öğrenme sürecinde kullanılmıştır.

İki boyutlu dairesel silindir üzerinde, laminar ve türbülanslı akışlar için belirli konumlara yerleştirilecek sensörler ile en yüksek aktifliğe sahip olan bölgelerdeki statik basınç değerleri okunmaktadır. Teorik olarak iz bölgesine sensör yerleştirilerek bu bölgeden hız değerlerini okuyup, YSA sistemi ile tahmin sürecinde kullanmak ilk bakışta uygulanabilir bir çözüm olarak gözükse de, mühendislik açısından bakıldığında bu fikrin pratiğe dönüştürülmesi güçtür. İki boyutlu dairesel silindirin yüzeyinde en yüksek etkinliğe sahip noktalarındaki statik basınç verilerini toplayacak yeterli sayıda sensör konumlandırılması fikri hem pratikte uygulanabilirliği olan hem de ucuz bir çözümdür [80].

De Noyer [80] yaptığı çalışmada, kontrol amacıyla yeterli sayıda etkin verileri toplayabilecek sensörlerin frekansı en yüksek olan bölgelerde konumlandırılması gerektiğinden bahsetmiştir. Örneğin, esnek bir plaka üzerine yerleştirilen toz zerrecikleri, plakanın herhangi bir frekansta uyarılarak salınması sonucunda, plakanın hareket etmeyen bölgelerinde toplanacaktır. Buna karşılık, plakanın büyük oranlarda hareket sergileyen bölgeleri toz zerreciklerinden arındırılmış olacaktır. Sadece toz zerreciklerinin konumlarına bakarak, titreşim enerjisinin en yüksek olduğu (toz zerreciklerinin olmadığı) bölgelere yerleştirilecek sensörler sayesinde plakanın salınım frekansını doğru ölçebilmek mümkündür.

DAY uygulamasının bir özelliği de en yüksek enerjiye (frekansa) sahip olan bölgeleri tespit edebilmektir. Buna bağlı olarak, silindir yüzeyinden basınç elde etmek için gerekli olan etkin sensör konumları, silindir yüzeyindeki statik basınç dağılımını veren HAD analizi sonuçlarına tek boyutta alışılabilir DAY uygulaması sonucunda elde edilmiştir.

Laminer ve türbülanslı akış durumları için, silindir üzerindeki statik basıncın incelendiği HAD analizi sonuçları, silindir yüzeyinde 360 noktada birer derece aralıklarla alınmıştır. Sensör yerleştirme çalışmaları kapsamında, her iki akış rejiminde, tüm deliklerin kapalı olduğu kontrolsüz ve tüm deliklerin açık olup 0.5U akış hızı ile üfleminin yapıldığı en etkili kontrollü akış durumları dikkate alınmıştır.

Laminer akış test durumlarının DAY uygulamalarında 1800 farklı anlık görüntü sayısında, her anlık görüntü sayısının silindir yüzeyinde 360 dereceye karşılık gelen statik basınç verileri analize tabi tutulmuştur. Türbülanslı akış test durumları için DAY uygulamalarında ise, 360 dereceye karşılık gelen statik basınç verileri kontrolsüz akışta 1337 ve 0.5U hızı ile hava üflenen kontrollü akış durumunda ise 1320 anlık görüntü sayısı ile analize tabi tutulmuştur.

Çizelge 3.5'te laminer akış durumları için ve Çizelge 3.6'da türbülanslı akış durumları için, veri topluluğundaki baskın eğilimlere sahip basınç karakteristiklerinin görüntülendiği en yüksek enerjiye sahip laminer akış durumlarında dört ve türbülanslı akış durumlarında altı kipin enerji içeriği dağılımları verilmiştir. Her iki çizelgeye göre, dikkate alınan sayıdaki kipler için toplam enerji içeriği %99'dan daha fazladır.

Çizelge 3.5. Kontrolsüz ve kontrollü laminer akış durumları için basınç karakteristiklerinin görüntülendiği en yüksek enerjili dört kipin enerji içerikleri

Kip Numarası	Enerji İçerikleri (%)		Kip Numarası	Enerji İçerikleri (%)	
	Kontrolsüz Akış	Kontrollü Akış		Kontrolsüz Akış	Kontrollü Akış
1	96.62	96.54	3	0.25	0.24
2	3.10	3.20	4	0.02	0.01
Toplam (2 Kip)	99.72	99.74	Toplam (4 Kip)	99.99	99.99

Çizelge 3.6. Kontrolsüz ve kontrollü türbülanslı akış durumları için basınç karakteristiklerinin görüntülediği en yüksek enerjili dört kipin enerji içerikleri

Kip Numarası	Enerji İçerikleri (%)		Kip Numarası	Enerji İçerikleri (%)	
	Kontrolsüz Akış	Kontrollü Akış		Kontrolsüz Akış	Kontrollü Akış
1	92.14	91.50	4	0.46	0.09
2	4.50	5.43	5	0.29	0.02
3	2.53	0.23	6	0.05	0.01
Toplam (3 Kip)	99.17	97.16	Toplam (6 Kip)	99.97	97.28

Sensör yerleştirmede, uygun sensör sayısının ve bu sensörlerin silindir yüzeyindeki yerlerinin doğru tespiti büyük önem taşımaktadır. Optimum sensör yerlerinin tespiti için, sensör verilerine tek-boyutlu DAY yapıldıktan sonra elde edilen, Çizelgeler 3.5 ve 3.6'da gösterildiği gibi yüksek enerji taşıyan kiplerin, silindir yüzey basıncı verisinin karakteristiklerini içinde barındıran enerji aktivitelerinin, yani elde edilen kiplerin minimum ve maksimum noktalarının incelenmesi gerekmektedir [12,81].

Kontrolsüz ve kontrollü laminar ve türbülanslı akış durumları için elde edilen yüksek enerjili kiplerin minimum (Θ_1) ve maksimum (Θ_2) noktalarına karşılık gelen sensör konumları sırasıyla Çizelgeler 3.7 ve 3.8'de verilmiştir. Her iki çizelgede gösterilen konumlar silindirin çevresel açısı cinsinden ifade edilmektedir ve çevresel açının ölçümü, silindirin üzerindeki durağanlık noktasından başlayarak saat yönünde artan şekilde alınmıştır.

Çizelge 3.7. Kontrolsüz ve kontrollü laminar akış durumları için silindir üzerindeki kiplerin minimum (Θ_1) ve maksimum (Θ_2) değerlerine karşılık gelen sensör noktaları

Kip Numarası	Sensör Konumları (derece cinsinden)			
	Kontrolsüz Akış		Kontrollü Akış	
	Θ_1	Θ_2	Θ_1	Θ_2
1	97	263	97	263
2	227	132	308	51
3	227	180	180	128
4	155	180	15	201

Çizelge 3.8. Kontrolsüz ve kontrollü türbülanslı akış durumları için silindir üzerindeki kiplerin minimum (Θ_1) ve maksimum (Θ_2) değerlerine karşılık gelen sensör noktaları

Kip Numarası	Sensör Konumları (derece cinsinden)			
	Kontrolsüz Akış		Kontrollü Akış	
	Θ_1	Θ_2	Θ_1	Θ_2
1	274	87	274	87
2	224	134	52	307
3	213	184	184	134
4	161	197	177	202
5	161	184	196	161
6	188	202	171	188

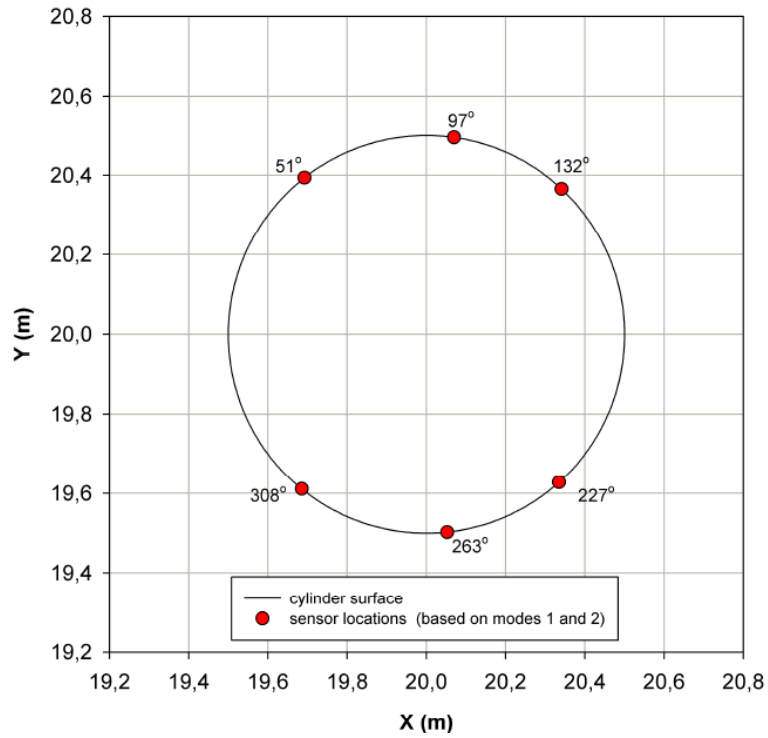
Kontrolsüz ve kontrollü laminer akış durumları için sensör analizlerinin sonuçlarına göre, her iki akış durumunda da ilk iki kipi toplam enerji içeriğine olan katkısı diğer kiplerden daha fazladır (Çizelge 3.5). Buna karşılık, türbülanslı akış durumları analizlerinde, her iki durum analizinde de ilk üç kipi toplam enerji içeriğine olan katkıları diğer kiplerden daha fazladır (Çizelge 3.6). Gerçek zamanlı tahmin sistemlerinde pratikliğin sağlanması adına kullanılan sensör sayısının olabildiğince az olması istenilmektedir [81]. Bu sebepten dolayı optimum sensör sayısının ve haliyle optimum sensör konumlarının tayininde, laminer akışta sadece ilk iki kipe, türbülanslı akışta ise ilk üç kipe karşılık gelen açı değerlerinin dikkate alınmasının yeterli olacağına karar verilmiştir.

Laminer akış test durumlarında ilk iki kipe karşılık gelen sensör konumları ve türbülanslı akış test durumlarında ilk üç kipe karşılık gelen sensör noktaları periyodik davranış sergileyen von Kármán yayılım frekanslarıyla ilişkilendirilirken, enerjisi düşük olan diğer kiplere karşılık gelen sensör noktaları ise periyodik olmayan frekanslarla ilişkilendirilmektedir [81].

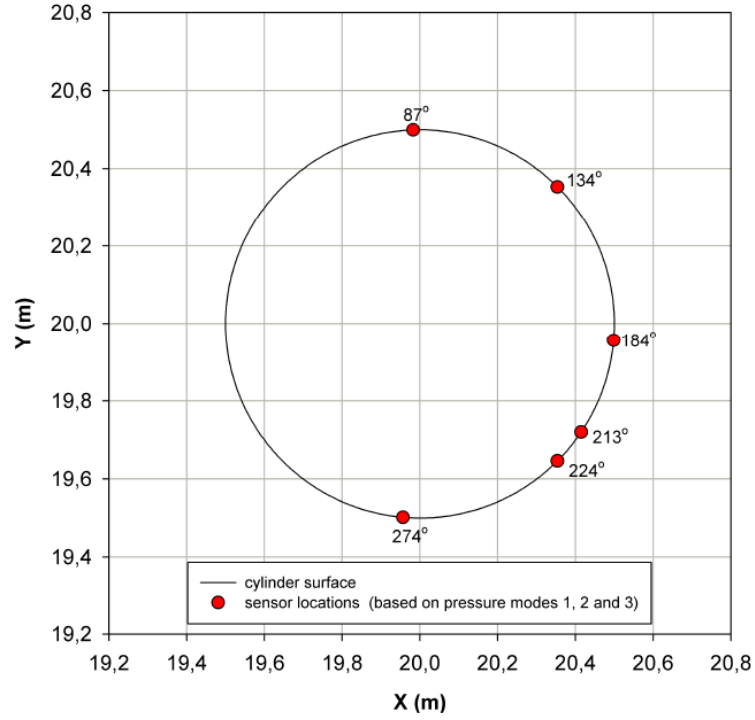
Çizelgeler 3.7 ve 3.8 daha derinlemesine incelendiğinde elde edilebilecek sonuçlardan birisi de, laminer ve türbülanslı akışta her durumun ilk kipiye karşılık gelen sensör konumlarının kontrol amacıyla yapılan hava üflemeinden veya

üflenilen havanın hızından etkilenmediğidir. Her iki akış rejimi için yapılan sensör yerleştirme çalışmasında, eğer sadece ilk kip dikkate alınırsa, laminer akış için silindirin üzerinde 97° ve 263° konumlarına, türbülanslı akış içinse 87° ve 274° konumlarına yerleştirilmiş ikişer sensör basınç verisinin toplanması için yeterli olacaktır.

Sensör yerleştirme çalışmaları kapsamında, laminer akış ve türbülanslı akış durumları ayrı olarak incelendiğinden, iki boyutlu dairesel silindir üzerine yerleştirilmesine karar verilen optimum sensör konumlarının değişiklik gösterdiği unutulmamalıdır. Laminer akış analizleri sonucunda yerleştirilen sensörler sadece laminer akış Yapay Sinir Ağı (YSA) tahmin analizlerinde, türbülanslı akış analizleri sonucunda yerleştirilen sensörler ise sadece türbülanslı akış YSA tahmin analizlerinde kullanılmaktadır. Şekiller 3.25 ve 3.26 sırasıyla laminer ve türbülanslı akışlar için iki boyutlu dairesel silindir yüzeyine yerleştirilmesine karar verilen optimum sensör konumlarını göstermektedir.



Şekil 3.25. Laminer akış durumları için iki boyutlu silindirin yüzeyine yerleştirilmesine karar verilen optimum sensör konumları



Şekil 3.26. Türbülanslı akış durumları için iki boyutlu silindirin yüzeyine yerleştirilmesine karar verilen optimum sensör konumları

3.4. Kontrolsüz ve Kontrollü Laminer ve Türbülanslı Akış Test Durumları için Yapay Sinir Ağı Uygulaması Sonuçları

Kontrolsüz ve kontrollü laminer ve türbülanslı akış test durumları için Yapay Sinir Ağı (YSA) uygulamalarında, çok sayıda girdinin ve çok sayıda çıktının arasındaki doğrusal olmayan ilişkilerin verimli olarak gözlemlenmesine olanak tanıyan Mekansal-Zamansal Zamanda-Gecikmeli Çok Katmanlı Algılayıcı (Spatio-Temporal Time-Lagged Multi Layer Perceptron – MLP) tabanlı ağ yapısı kullanılmıştır.

Mekansal-Zamansal Zamanda-Gecikmeli Çok Katmanlı Algılayıcı YSA yapısının kullanıldığı tahmin analizlerinde, hem laminer hem türbülanslı rejimde, silindir yüzeyine yerleştirilen 6 farklı sensörden gelen statik basınç verisi, ayrıca, her akış rejimi için seçilen spesifik bir durumun DAY analizleri neticesinde elde edilen kip genliklerinin geçmişi girdi setleri olarak kullanılmıştır. YSA uygulaması ile

kullanılan spesifik durum haricindeki diğer akış durumlarına ait kip genlikleri tahmin edilmiştir.

İki boyutlu dairesel silindir arkasında kalan iz bölgesindeki akış alanında, girdap yapılarının ve karakteristiklerinin görüntülediği DAY ve Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) ile birleştirilmiş DAY analizlerinde, toplam enerji içeriklerinin büyük çoğunluğunun en yüksek enerjili iki kipi ve bağıl genliklerinin dikkate alınmasıyla temsil edildiği görülmektedir. İki kipi dikkate alındığı laminer akış test durumları için toplam enerji içeriği %94, türbülanslı akış test durumları için ise %98 seviyelerinde olmaktadır.

Çalışma kapsamında incelenen zamana bağlı iki boyutlu dairesel silindir üzerindeki kontrolsüz ve kontrollü laminer ve türbülanslı akışlar gerçek zamanlı akış sistemi uygulamasının birer örnekleridir. Gerçek zamanlı akış sistemlerinde, belirli bir akış kontrolü stratejisi oluşturmak için, sistemdeki zamana bağlı ana akış davranışlarının teşkil edildiği kip genliklerinin tahmini gereklidir. Bu ifadeye bağlı olarak, çalışma kapsamında oluşturulan YSA yapısında laminer ve türbülanslı akışların tüm test durumları için akış alanında baskın özelliklerin ve eğilimlerin görüntülediği en yüksek enerjiye sahip ilk iki kipi bağıl kip genlikleri ve tahminleri dikkate alınmıştır.

Kontrolsüz ve kontrollü laminer ve türbülanslı akış durumlarının analizinde kullanılan Mekansal-Zamansal Zamanda-Gecikmeli Çok Katmanlı Algılayıcı YSA yapısının temel tasarım parametreleri aynıdır. Örneğin, ağ yapısının eğitim sürecinde, yeterli miktarda veri topluluğunun kullanılması neticesinde öğreticili öğrenme yaklaşımı kullanılmıştır. Ayrıca, çok katmanlı bir yapıya sahip olan ağda, sistem girdilerinin verildiği girdi setleri bölümü haricinde, tek bir gizli katman ve tek bir çıktı katmanı bulunmaktadır. Ağ yapısının tasarımında birer katmanın kullanılması fikri evrensel yaklaşımlar için temel düzeyde karmaşıklık sağlamaktadır [82]. Aynı zamanda, çalışma kapsamında kullanılan Mekansal-Zamansal Zamanda-Gecikmeli Çok Katmanlı Algılayıcı YSA yapısının birer katman içerecek şekilde düzenlendiği hallerde dahi sistem tanımlama problemlerinde

oldukça verimli olduğu Nørgaard vd. [63] tarafından yapılan çalışmalarda belirtilmiştir.

Yukarıda belirtilen ve ortak olarak kullanılan temel tasarım parametrelerinin haricinde, aktivasyon fonksiyonu olarak gizli katman nöronlarına doğrusal olmayan *tanh* fonksiyonu, çıktı katmanını nöronlarına ise doğrusal aktivasyon fonksiyonu atanmıştır. Kontrolsüz ve kontrollü laminer ve türbülanslı akışların analizlerinde kullanılan Mekansal-Zamansal Zamanda-Gecikmeli Çok Katmanlı Algılayıcı ağ sisteminde, incelenen her akış rejimi için değişen tasarım parametreleri zaman gecikmesi ve gizli katman nöron sayısıdır.

Oluşturulan ağ yapısının karmaşıklığı ve boyutu zaman gecikmesi ve gizli katman nöron sayısı parametrelerinin değiştirilmesiyle ayarlanabilir. Zaman gecikmesi değeri, bir başka deyişle gecikme uzunluğunun mertebesi, tahmin edilmesi gereken ve ağ girdileri bölümüne dışarıdan sağlanan verilerin (zaman bağlı plaka hızları) haricinde önceki örnekleme anı verileri olarak gönderilen kip genliklerinin sayısını nitelendirmektedir. Bir diğer önemli tasarım parametresi olan gizli katman nöron sayısı kip genliklerinin tahmin doğruluğunu etkilemektedir.

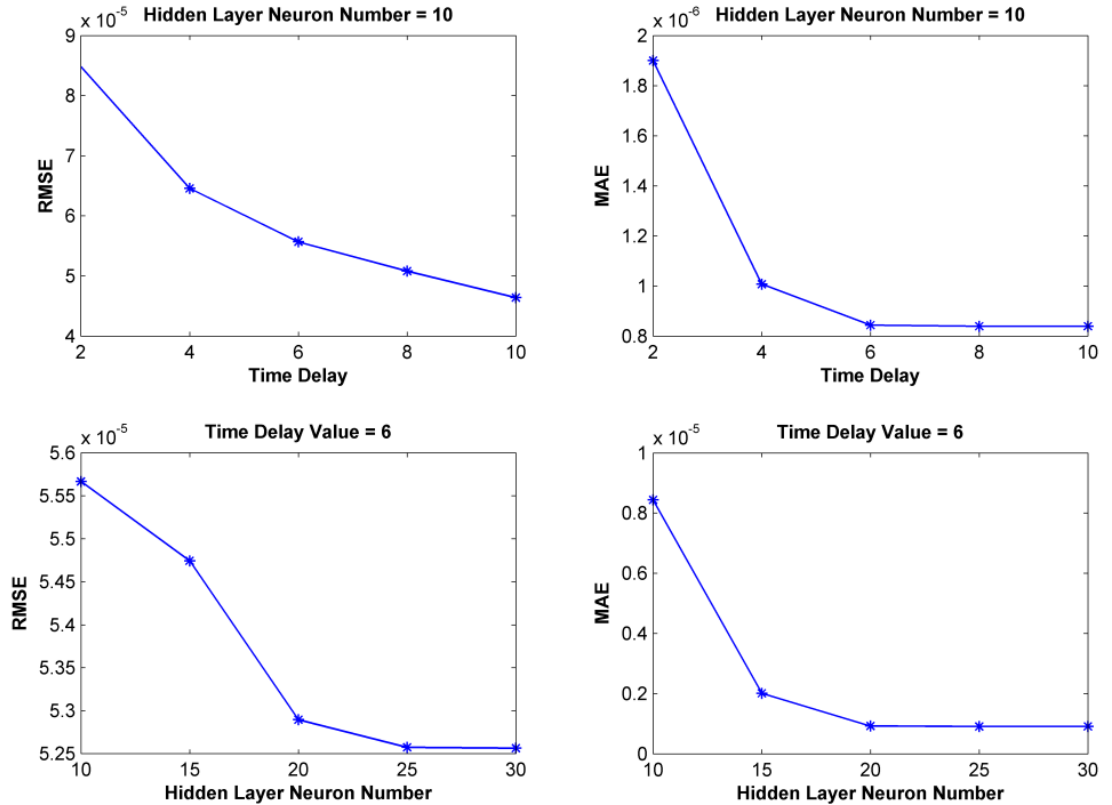
Mekansal-Zamansal Zamanda-Gecikmeli Çok Katmanlı Algılayıcı, standart bir çok katmanlı algılayıcı YSA sisteminin Özbağlanımlı Dış Girdi (Auto Regressive eXternal Input – ARX) uygulaması ile birleşimi olarak da adlandırılmaktadır [63]. YSA–ARX tabanlı ağ yapısı, dinamik gerçek zamanlı sistemlerde önceki örnekleme anı verilerinin kullanılmasına olanak tanımakta ve tahminler sonucunda oluşan hata sinyallerinin mertebesini azaltmaktadır [63].

Ağ tasarım parametrelerinin (zaman gecikmesi ve gizli katman nöron sayısı) belirlenmesi ve doğrulanması sürecinde gerçekleştirilen analizlerde, her iki akış rejiminde yer alan kontrolsüz akış durumları için elde edilmiş kip genlikleri ve sensör basınçları kullanılmıştır. 10 periyotluk gözlemlerin ilk yarısına karşılık gelen anlık görüntü sayıları ağı eğitmek (öğrenme süreci) için kullanılmıştır. Kontrolsüz akış test durumu için laminer akışta 1800, türbülanslı akışta 1337 anlık görüntü

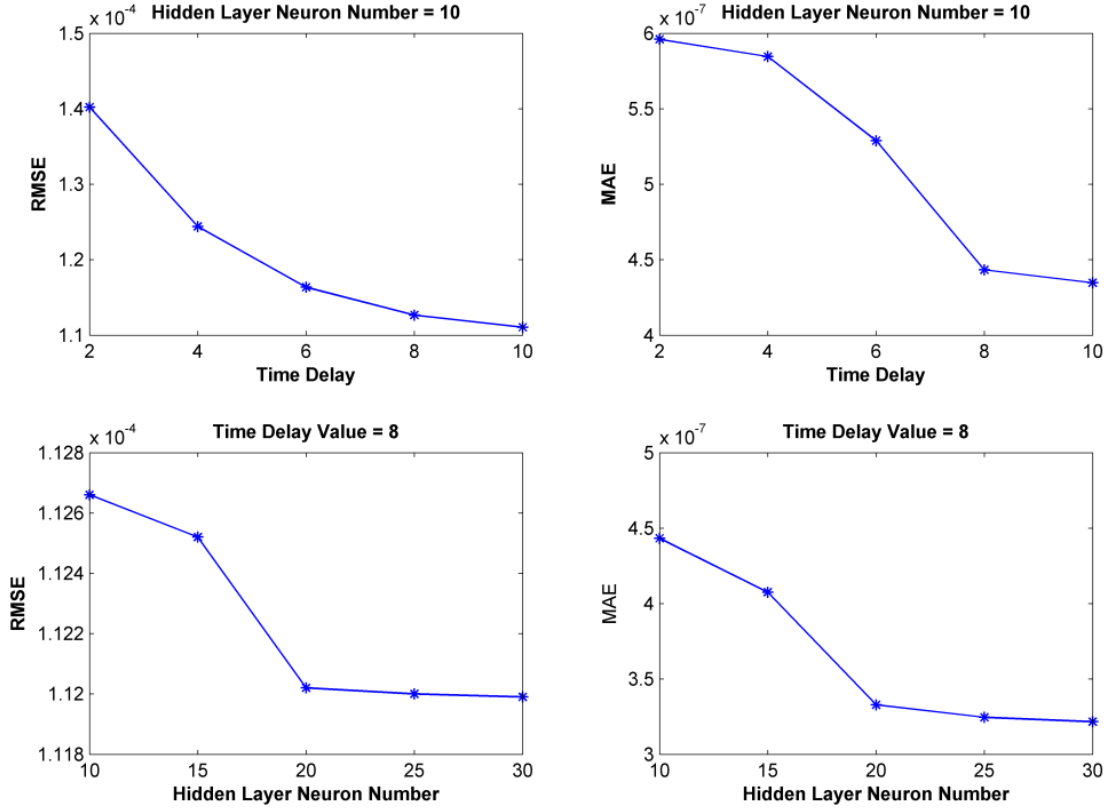
sayısının, 5'inci periyottan sonrası ağ tahminlerinin üretilmesinde ve doğrulamasında kullanılmıştır.

Her iki parametre için de uygun değerlerin seçilebilmesi amacıyla ağ performansları denetlenmiştir. Bu amaçla, zaman gecikmesi ve gizli katman nöron sayısı parametreleri değişik değerlere atanarak, hataların karekökünün ortalaması ve ortalama mutlak hatanın kıyaslanması ile uygun değerlerin seçimi gerçekleştirilmiştir.

Kontrolsüz laminer akış test durumunun temel alındığı ağ performansı analizi Şekil 3.27'de, kontrolsüz türbülanslı akış test durumunun temel alındığı ağ performansı analizi ise Şekil 3.28'de verilmektedir.



Şekil 3.27. Kontrolsüz laminer akış test durumunun hataların karekökünün ortalaması (RMSE) ve ortalama mutlak hatanın (MAE) kıyaslanmasının temel alındığı ağ performansı analizi



Şekil 3.28. Kontrolsüz türbülanslı akış test durumunun hataların karekökünün ortalaması (RMSE) ve ortalama mutlak hatanın (MAE) kıyaslanmasının temel alındığı ağ performansı analizi

Şekiller 3.27 ve 3.28’de gösterildiği gibi, her iki akış rejimi için oluşturulacak iki farklı ağ yapısının performans analizleri farklılık göstermektedir. Her iki ağ yapısı için zaman gecikmesi parametresinin uygun değerini belirlemek adına, ilk olarak gizli katman sayısı 10 alınarak, zaman gecikmesi parametresi 2 ile 10 arasında ikinin katları alınarak ağ yapısı performansı denetlenmiştir. Bu denetleme esnasında kullanılan gizli katman nöron sayısı (10), karmaşıklık düzeyini artırmadan zaman gecikmesi parametresinin değerindeki değişimin gözlemlenmesi adına düşük bir değerde alınmıştır.

Şekiller 3.27 ve 3.28’e göre, zaman gecikmesi parametresinin değerindeki artış, sonuçların doğruluğunu olumlu olarak etkilemektedir ve buna bağlı olarak oluşan hata sinyallerinin mertebesi azalmaktadır. Daha büyük zaman gecikmesi değerleri için, ağ yapıları daha fazla sayıda bilinen veriyi önceki örnekleme anı verileri olarak

kullanarak kendini eğitmektedir. Sonuç olarak, girdi seti verileri ile katmanlardaki nöronlar arasında daha fazla sayıda ara bağlantı oluşturulduğundan tahminler iyileşmekte, hata sinyallerinin mertebesi azalmaktadır. Buna karşılık, ağ yapısının karmaşıklık düzeyi artmakta ve tahmin süreci uzamaktadır.

Şekil 3.27'ye göre, hataların karekökünün ortalaması zaman gecikme parametresinin değerindeki artış ile kademeli olarak azalmaktadır. Aynı şekilde, zaman gecikme parametresinin değerindeki artış ile ortalama mutlak hata belirli bir düzeye kadar düşmekte, zaman gecikmesinin 6 ve daha büyük değerleri için ise belirgin bir farklılık göstermemektedir. Bu sonuca göre, laminer akış test durumlarında kullanılacak ağın zaman gecikmesi parametresi değerinin 6 olarak alınmasına karar verilmiştir.

Türbülanslı akış ağ performansının incelendiği Şekil 3.28'e göre, hataların karekökünün ortalaması zaman gecikme parametresinin değerindeki artış ile yine kademeli olarak azalmakta, ancak, zaman gecikmesi parametresinin belirlenmesi için fark edilebilir düzeyde bir değişim eğilimi göstermemektedir. Buna karşılık, ortalama mutlak hatanın kıyaslanmasında, zaman gecikmesi değerinin 8 ve 10 olduğu durumlar arasında %2'den daha az bir farklılık gözlemlenmiştir. Bu yaklaşıma göre, ağ tasarımında zaman gecikmesi parametresi değerinin 8 olarak alınmasına karar verilmiştir.

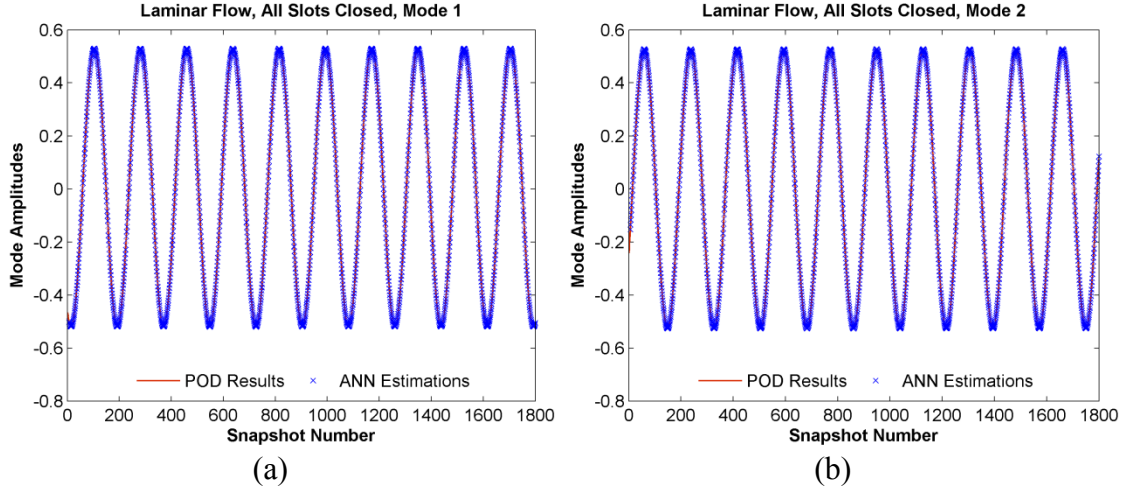
Zaman gecikmesi parametresinin laminer ve türbülanslı akış ağ yapılarında sırasıyla 6 ve 8 olarak tayininden sonra, gizli katman nöron sayısının değerine karar vermek için 10 ile 30 arasında beşin katları alınarak ağ yapısı performansı denetlenmiştir. Şekil 3.27'de laminer akış test durumları için kullanılacak ağ yapısında, hem hataların karekökünün ortalaması hem de ortalama mutlak hata, gizli katman nöron sayısının 25 ve 30 olarak alındığı denemelerde belirgin bir değişim göstermemiştir. Şekil 3.28'de türbülanslı akış test durumları için kullanılacak ağ yapısında ise, gizli katman nöron sayısının 20, 25 ve 30 olarak alındığı denemelerde hatalarda belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir. Sonuç olarak, hesaplamaların yapılması için gereken çabanın, zamanın ve ağ yapısı karmaşıklığının makul bir düzeyde olması

amaçlandığından, her iki akış rejiminin test durumlarının analiz edileceği ağlarda gizli katman nöron sayısının 25 olarak alınmasının yeterli olduğuna karar verilmiştir.

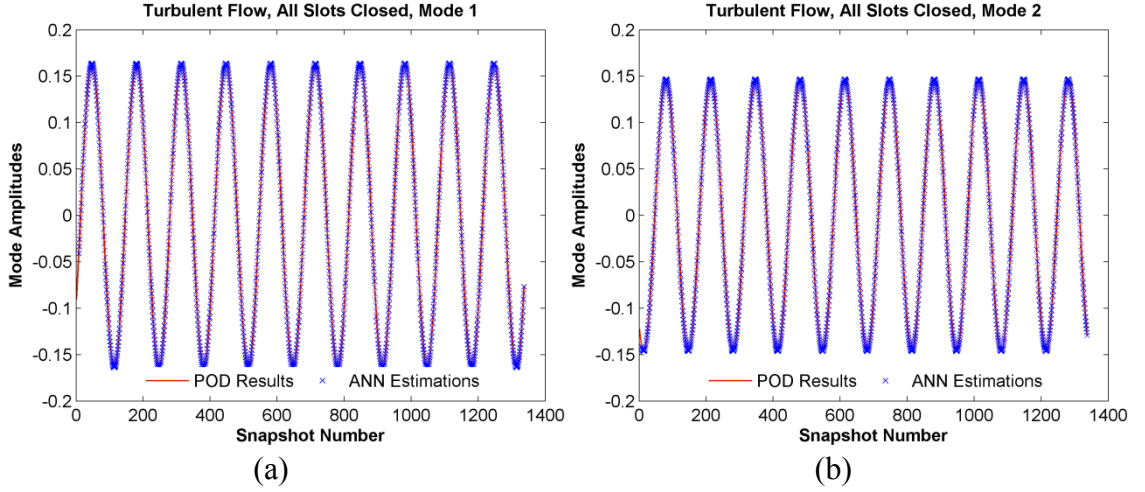
Kontrolsüz laminer ve türbülanslı akış test durumlarının kullanılarak ilgili ağların zaman gecikmesi ve gizli katman nöron sayısı tasarım parametreleri belirlenmiş ve doğrulanmıştır. Bu durumlar için YSA analiziyle tahmin edilen kip genlikleri ve DAY sonucunda gözlemlenen esas kip genliklerinin karşılaştırmaları Şekiller 3.29 ve 3.30 ile gösterilmektedir. Bu şekillerde, her iki akış rejiminde en yüksek enerjiye sahip birinci ve ikinci kipi bağli genliklerinin YSA tahminleri ile DAY sonucunda gözlemlenen esas değerleri büyük ölçüde tutarlılık göstermektedir.

Ağ yapılarının doğrulamasından sonra, akış durumlarının tahminlerinde kip genliklerinin geçmişinin girdi seti olarak kullanılacağı spesifik durumların tayini gerçekleştirilmiştir. Silindir üzerine yerleştirilen deliklerin hepsinin açık olduğu ve 0.5U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü laminer ve türbülanslı akış durumları, diğer akış durumlarına ait kip genliklerinin tahmininde spesifik durumlar olarak kullanılmıştır. Başka bir deyişle, bu spesifik durumlar, diğer akış durumlarının tahmininde ağ eğitmek için kullanılmışlardır. Şekiller 3.31 ve 3.32 bu spesifik durumların ilgili ağlar kullanılarak elde edilen doğrulamalarını göstermektedir.

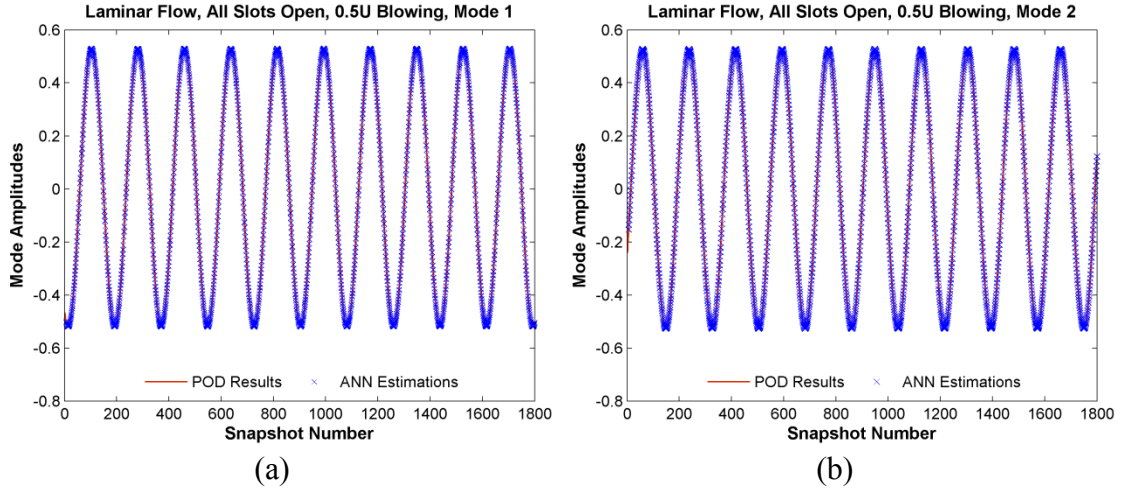
Laminer ve türbülanslı akışlar için oluşturulan ağ yapısında eğitim aşamasında tüm deliklerin açık olduğu ve 0.5U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü akış durumunda gözlemlenen kip genlikleri ve yine bu akış durumuna ait 6 yüzey sensöründen gelen statik basınç verileri kullanılmıştır. İncelenen diğer kontrollü laminer ve türbülanslı akış durumlarındaki kip genliklerinin tahminleri için, ilgili her durumun silindir yüzeyi basınç analizinden elde edilmiş ve 6 sensör tarafından belirlenen statik basınç verileri sistem girdisi olarak kullanılmıştır. Bu şekilde gerçekleştirilen analizler sonucunda, oluşturulan YSA yapısı (Şekil 3.33) sayesinde HAD simülasyonlarına gerek duyulmadan akış alanındaki zamansal karakteristiklerin, yani kip genliklerinin, davranışları tahmin edilmiştir. Şekil 3.34 laminer ve türbülanslı akış test durumlarının YSA tahminlerinin elde edilmesinde baştan sona kadar geçen süreçte yapılan uygulamaları göstermektedir.



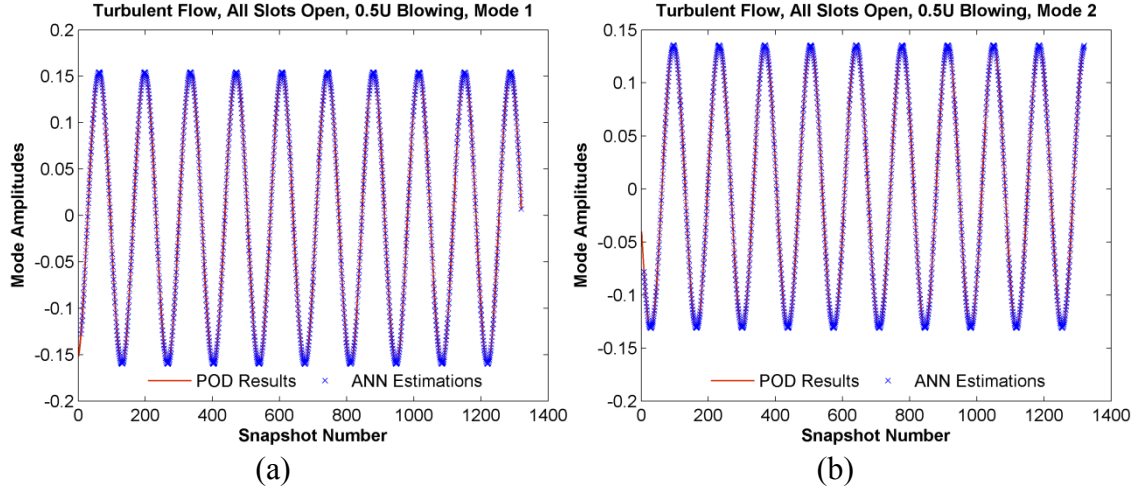
Şekil 3.29. Kontrolsüz laminar akış test durumunun zaman gecikmesi değeri 6 ve gizli katman nöron sayısının 25 olarak alındığı ağ yapısı ile analizi sonucunda en yüksek enerjiye sahip a) birinci ve b) ikinci kiplerinin bağlı genliklerinin karşılaştırması



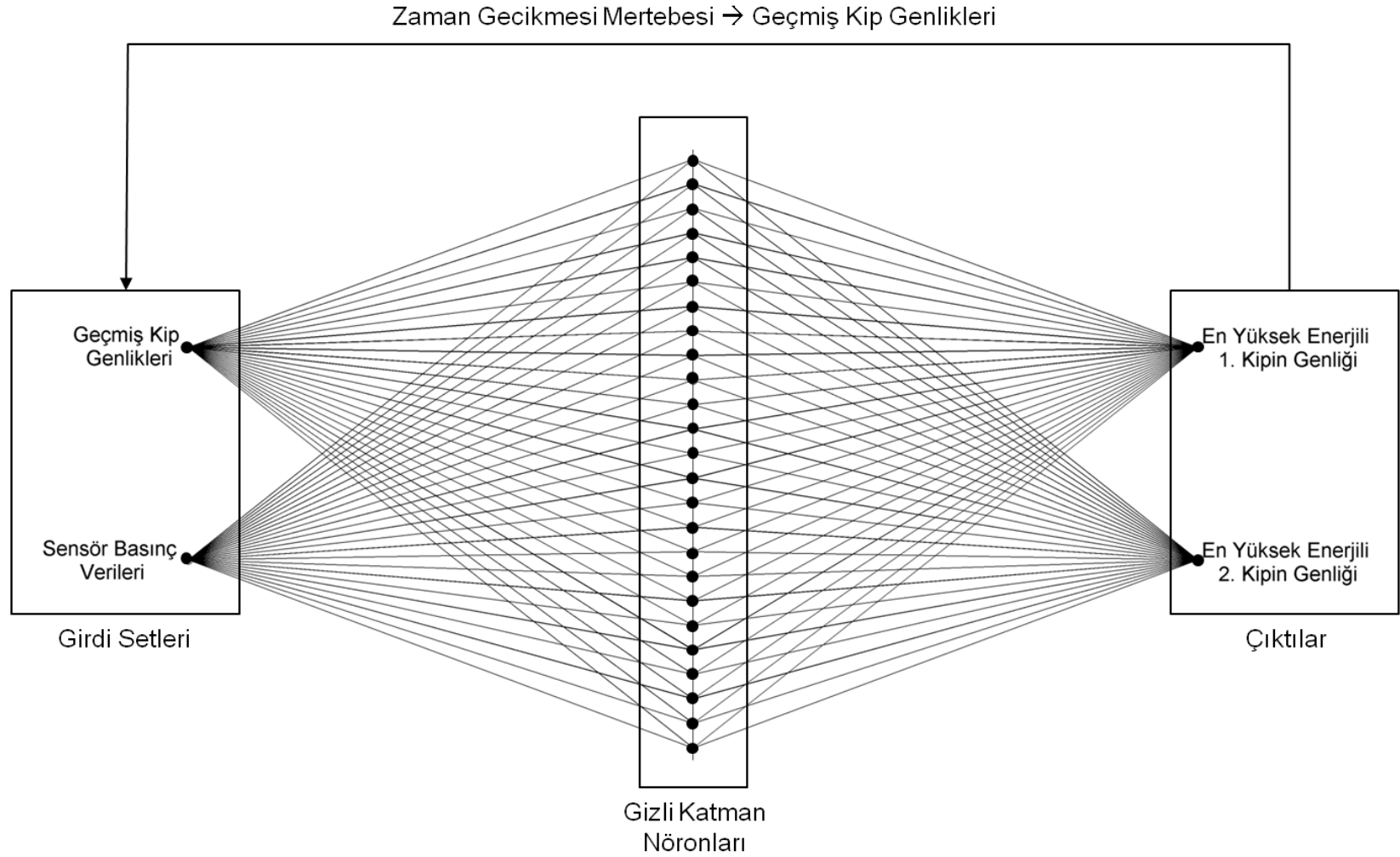
Şekil 3.30. Kontrolsüz türbülanslı akış test durumunun zaman gecikmesi değeri 8 ve gizli katman nöron sayısının 25 olarak alındığı ağ yapısı ile analizi sonucunda en yüksek enerjiye sahip a) birinci ve b) ikinci kiplerinin bağlı genliklerinin karşılaştırması



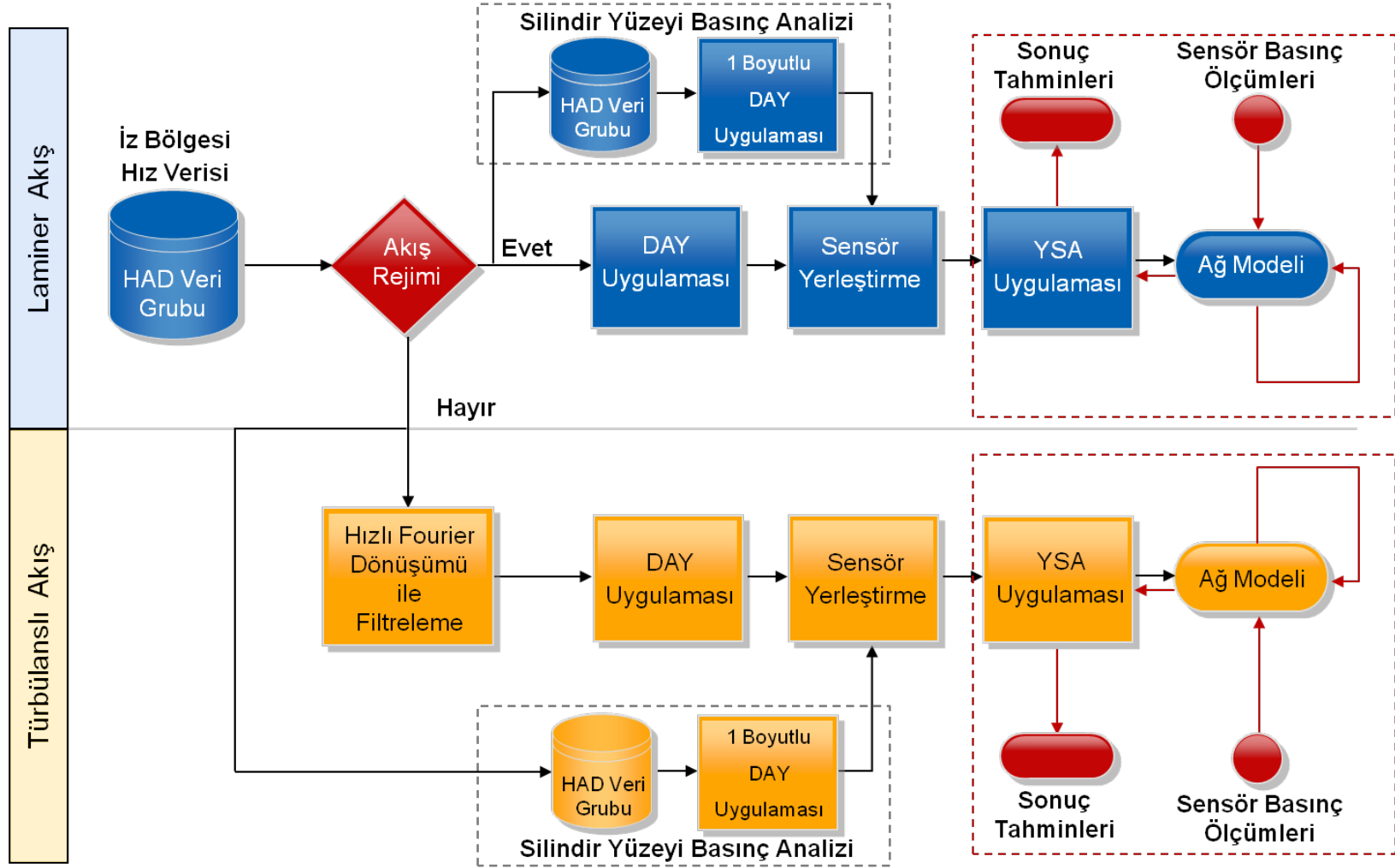
Şekil 3.31. Tüm deliklerin açık olduğu ve 0.5U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü laminar akış test durumunun zaman gecikmesi değeri 6 ve gizli katman nöron sayısının 25 olarak alındığı ağ yapısı ile analizi sonucunda en yüksek enerjiye sahip a) birinci ve b) ikinci kiplerinin bağlı genliklerinin karşılaştırması



Şekil 3.32. Tüm deliklerin açık olduğu ve 0.5U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü türbülanslı akış test durumunun zaman gecikmesi değeri 8 ve gizli katman nöron sayısının 25 olarak alındığı ağ yapısı ile analizi sonucunda en yüksek enerjiye sahip a) birinci ve b) ikinci kiplerinin bağlı genliklerinin karşılaştırması

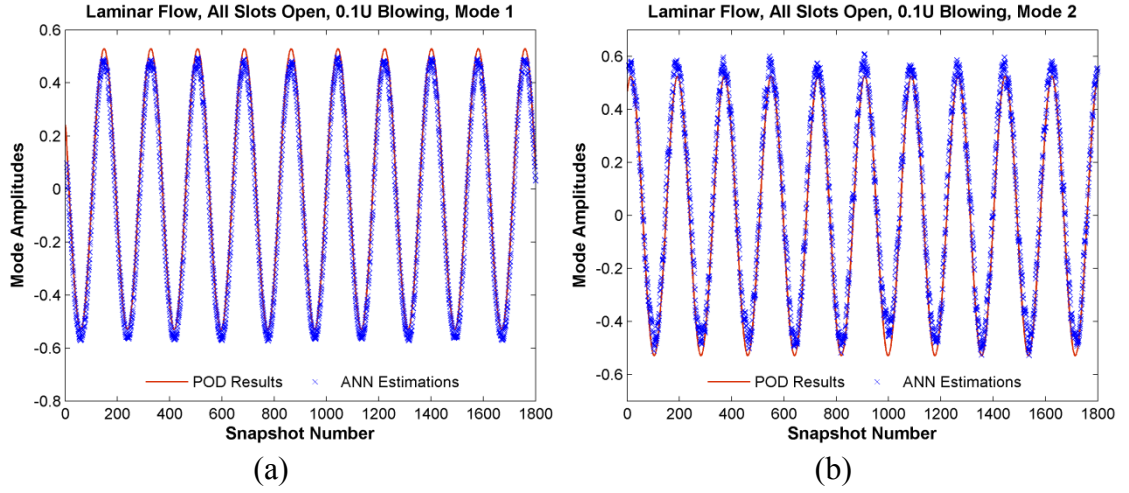


Şekil 3.33 Laminer ve türbülanslı akış test durumlarının YSA tahminlerinin elde edilmesinde kullanılan ağ yapısının şematik gösterimi

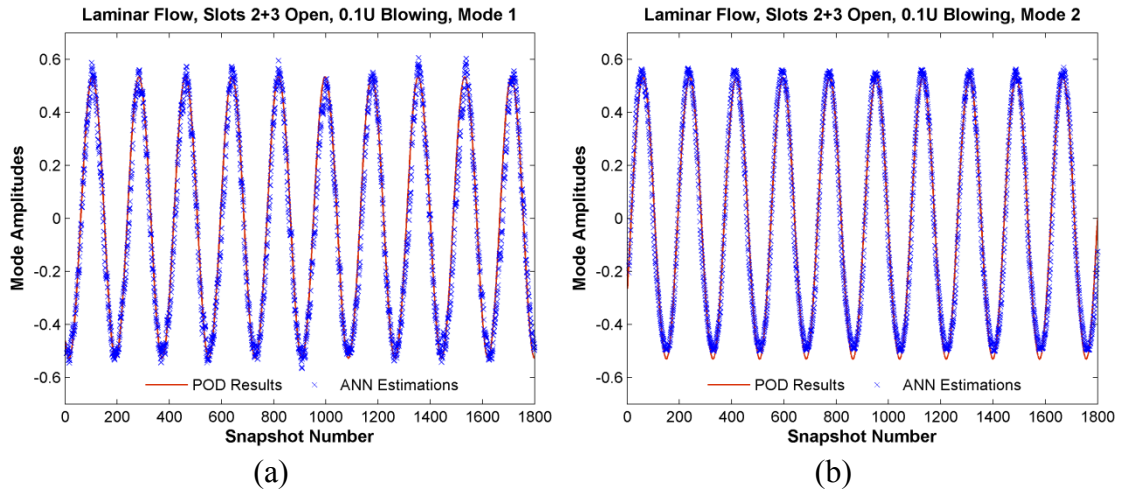


Şekil 3.34 Laminer ve türbülanslı akış test durumlarının YSA tahminlerinin elde edilmesinde baştan sona kadar geçen süreçte yapılan uygulamalar

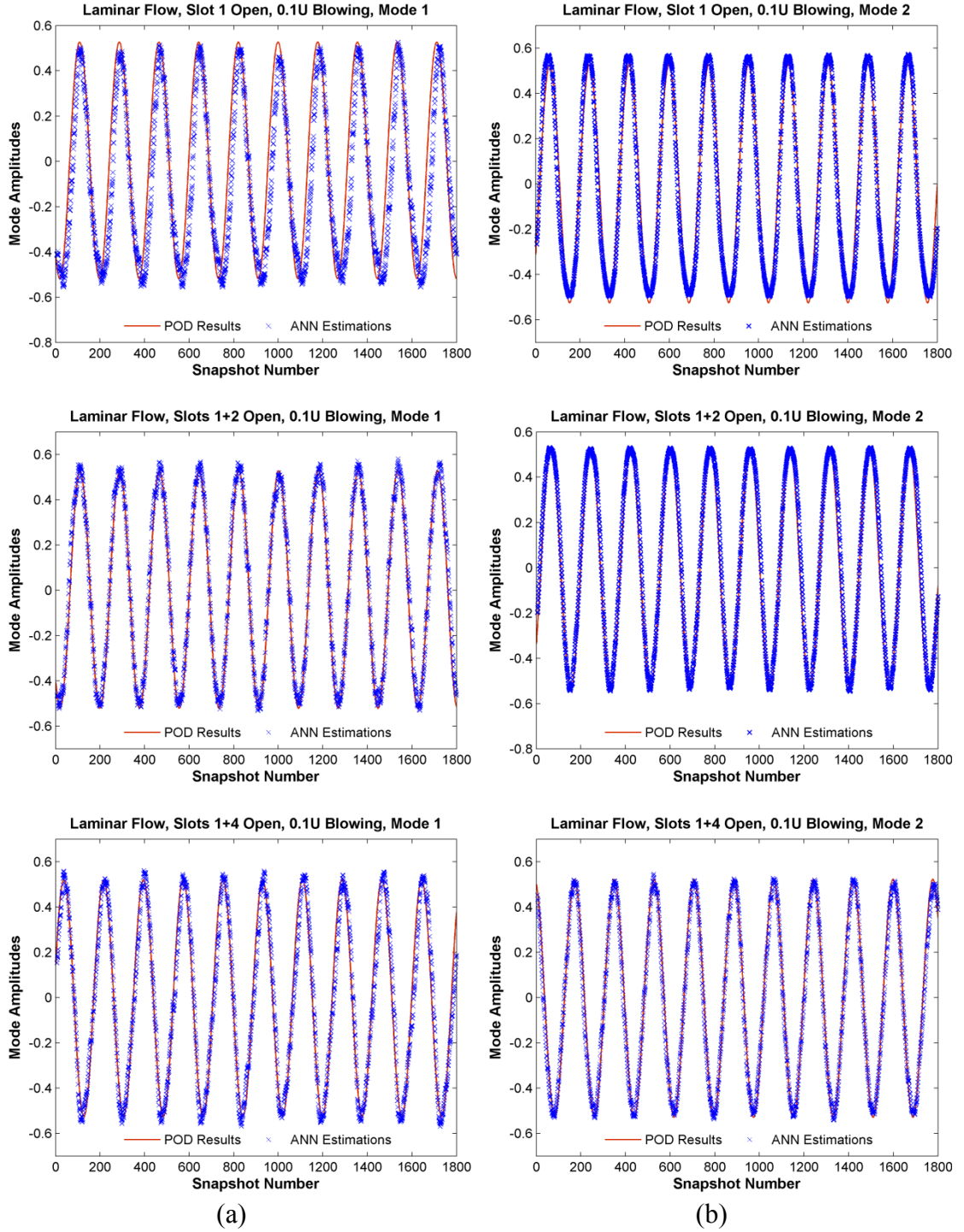
Şekil 3.35 tüm deliklerin açık olduğu ve 0.1U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü laminar akış durumunda, Şekiller 3.36 ve 3.37 ise silindir yüzeyindeki deliklerin değişik kombinasyonlarda açık olduğu kontrollü laminar akış durumlarında YSA uygulaması sonucunda tahmin edilen kip genlikleri ve DAY ile hesaplanmış esas kip genliklerinin karşılaştırmalarını göstermektedir.



Şekil 3.35. Tüm deliklerin açık olduğu ve 0.1U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü laminar akış test durumunun en yüksek enerjiye sahip a) birinci ve b) ikinci kiplerinin bağlı genliklerinin karşılaştırması

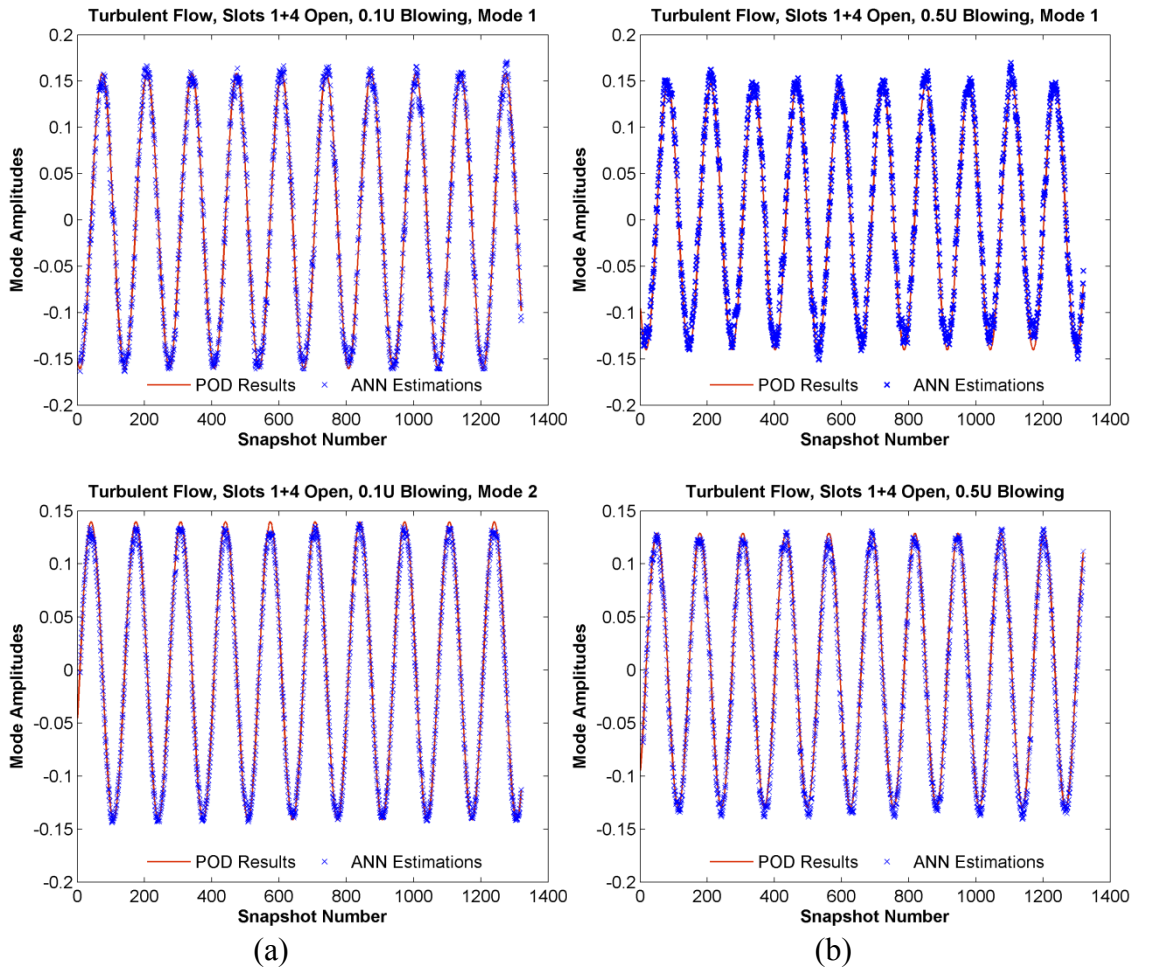


Şekil 3.36. 2+3 numaralı deliklerin açık olduğu kontrollü laminar akış test durumunun en yüksek enerjili a) birinci ve b) ikinci kiplerinin bağlı genliklerinin karşılaştırması

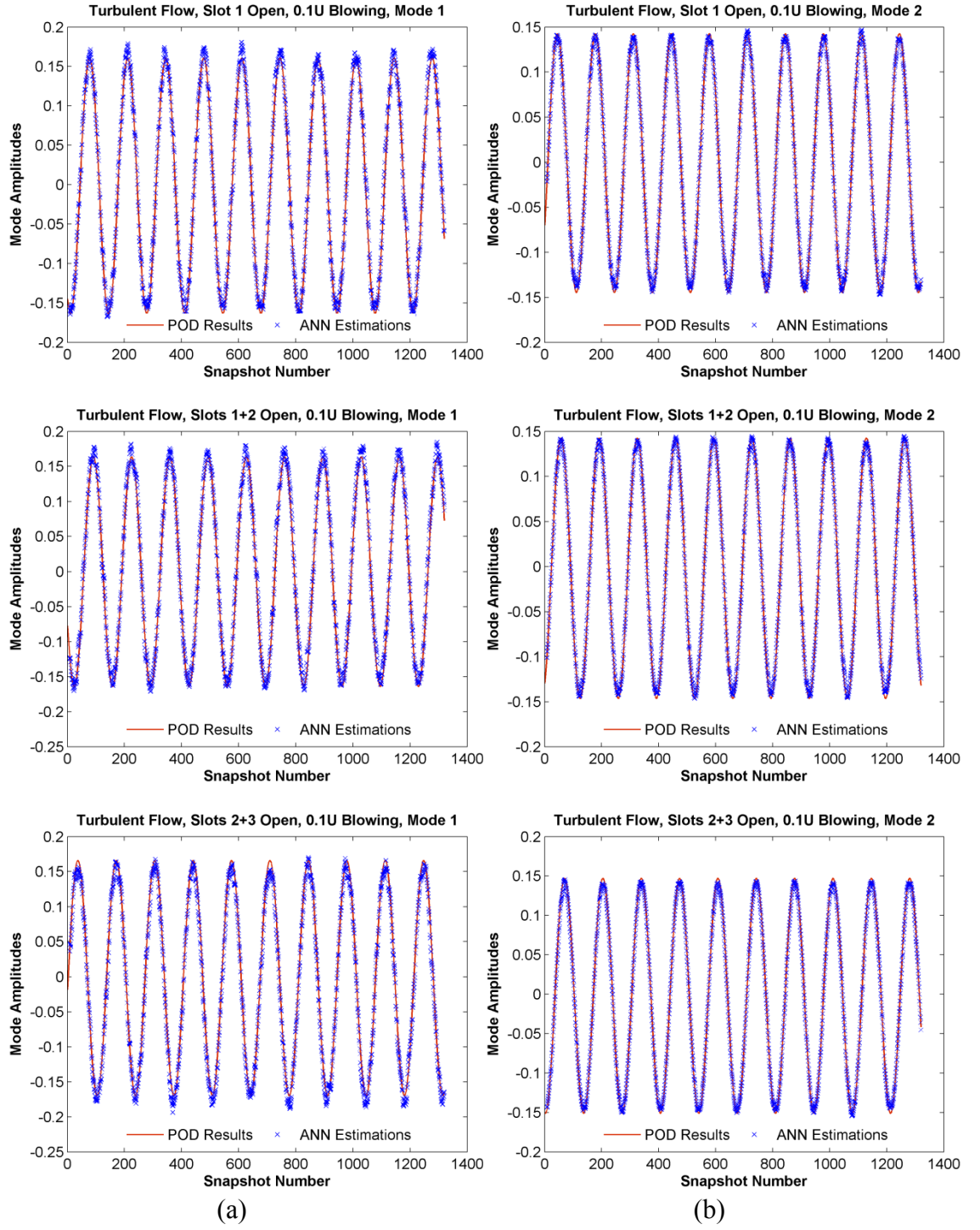


Şekil 3.37. Silindir yüzeyindeki deliklerin değişik kombinasyonlarda açık olduğu kontrollü laminar akış test durumunun en yüksek enerjiye sahip a) birinci ve b) ikinci kiplerinin bağlı genliklerinin karşılaştırması

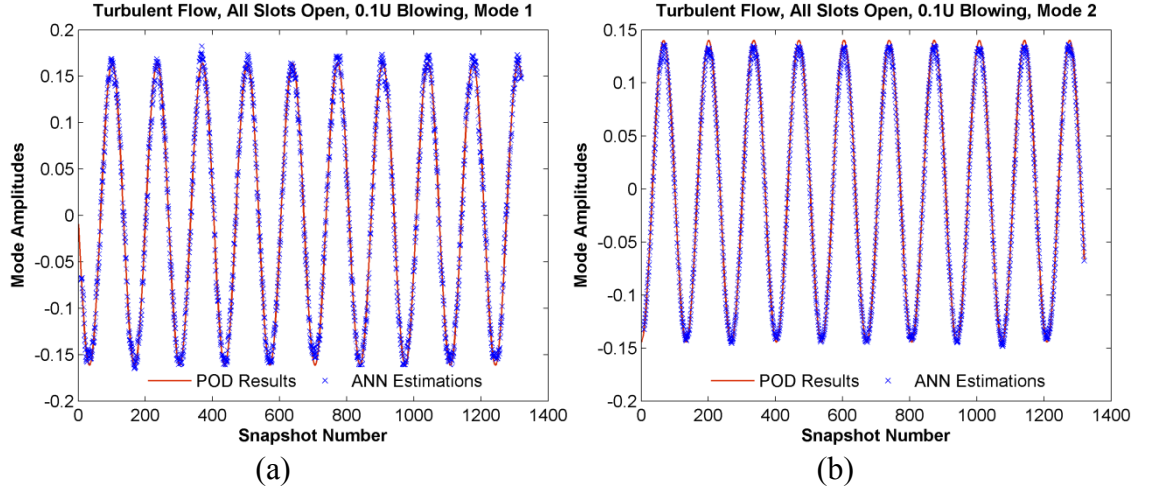
Şekil 3.38 1+4 numaralı deliklerin açık olduğu sırasıyla 0.1U ve 0.5U hızları ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü türbülanslı akış durumunda, Şekiller 3.39 ve 3.40 sırasıyla ise silindirik yüzeyindeki deliklerin değişik kombinasyonlarda açık olduğu ve tüm deliklerin açık olup 0.1U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü türbülanslı akış durumlarında YSA uygulaması sonucunda tahmin edilen kip genlikleri ve DAY ile hesaplanmış esas kip genliklerinin karşılaştırmalarını göstermektedir.



Şekil 3.38. 1+4 numaralı deliklerin açık olup a) 0.1U hızı ve b) 0.5U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü türbülanslı akış test durumlarının en yüksek enerjili birinci ve ikinci kiplerinin bağıl genliklerinin karşılaştırması



Şekil 3.39. Silindir yüzeyindeki deliklerin değişik kombinasyonlarda açık olduğu kontrollü türbülanslı akış test durumunun en yüksek enerjiye sahip a) birinci ve b) ikinci kiplerinin bağıl genliklerinin karşılaştırması



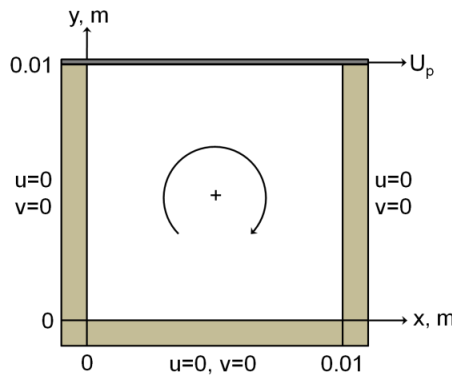
Şekil 3.40. Tüm deliklerin açık olduğu ve 0.1U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü türbülanslı akış test durumunun en yüksek enerjiye sahip a) birinci ve b) ikinci kiplerinin bağıl genliklerinin karşılaştırması

4. SÜRÜLMÜŞ KAVİTE AKIŞI UYGULAMASI

Zamana bağlı iki boyutlu sürülmüş kavite akışı uygulaması kapsamında, Reynolds sayısının (Re) değişimi 100, 500, 1000, 5000 ve 10000 olacak şekilde, toplamda beş farklı sayısal simülasyon durumu için sıkıştırılmaz akışın olduğu ve kare geometriye sahip bir kavitedeki akış dinamiği incelenmiştir. İncelenen problemin sayısal çözümü için x-y düzleminde iki boyutlu Navier-Stokes denklemleri vortisite-akım fonksiyonu yaklaşımı ile Matlab yazılımı kullanılarak oluşturulan ve EK 4'te verilen kodlar ile çözülmüştür.

4.1. Akış Alanının Sayısal Çözümlemesi

İncelenen problemin sayısal çözümünde iki boyutlu akış alanı $[0,0.01\text{m}] \times [0,0.01\text{m}]$ boyutları ile sınırlandırılmıştır, akış alanında $\vec{V} = (u, v)$ hız alanı olarak tanımlanmıştır ve akışkanın kinematik viskozitesi $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak alınmıştır. Sürülmüş kavite akışı uygulamasında, kare geometriye sahip kavitenin alt yatay ve dikey kenarlarına sınır şartı olarak kayma olmayan durum şartı (no-slip) atanmıştır. Buna karşılık, hareketli olan üst yatay kenara ise sınır şartı olarak zamana bağlı değişim gösteren ve sinüsel salınım yapan bir hız fonksiyonu (U_p) atanmıştır. Hareketli üst yatay kenar (plaka) sonsuz uzunlukta kabul edilmiştir. Şekil 4.1 uygulama kapsamında incelenen sürülmüş kavite akışı problemini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 4.1. İki boyutlu sürülmüş kavite akışı probleminin şematik gösterimi

Denklemler 4.1 ve 4.2 iki boyutlu kavite akış alanı için sıkıştırılmaz Navier-Stokes ve süreklilik denklemlerini göstermektedir.

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p + \frac{\Delta \vec{V}}{\text{Re}} \quad (4.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (4.2)$$

Burada, \vec{V} akış alanını, p basıncı ve Re ise Reynolds sayısını ifade etmektedir. Denklem 4.1 diferansiyel formda yazıldığında, iki boyutlu kavite akışı problemi için her iki boyuttaki hız bileşeni Denklemler 4.3a ve 4.3b ile gösterildiği şekilde elde edilir.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial u^2}{\partial x} - \frac{\partial uv}{\partial y} - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (4.3a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial v^2}{\partial y} - \frac{\partial uv}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (4.3b)$$

Süreklilik denklemi ise aşağıda gösterildiği gibidir:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4.4)$$

Vortisite-akım fonksiyonu yaklaşımında kullanılan vortisite ve akım fonksiyonları [83] sırasıyla Denklemler 4.5 ve 4.6 ile gösterilmiştir.

$$\zeta = |\zeta| = |\nabla \times \vec{V}| = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = u \quad \text{ve} \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = -v \quad (4.6)$$

Denklemler 4.5 ve 4.6, vortisite ve akım fonksiyonu tanımlamaları, x-y düzlemindeki hız bileşenlerini ifade eden Denklemler 4.3a ve 4.3b ile birleştirildiğinde, momentum denklemlerinden basınç parametresi elimine edilir [83]. Bu işlem sonucunda, Denklem 4.7 ile gösterilen şekilde basınçtan bağımsız, yatışkın olmayan durumlarda kullanılmak üzere için taşınım denklemi ve akım fonksiyonu için Denklem 4.8 ile gösterilen Poisson denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right) \quad (4.7)$$

$$\nabla^2 \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\zeta \quad (4.8)$$

Vortisite-akım fonksiyonu yaklaşımında, duvar sınırları için vortisitenin türevleri olarak birinci dereceden adi diferansiyel denklem tanımlaması kullanılmıştır. Akım fonksiyonu ile ilişkilendirilen ψ parametresinin değeri tüm sınır şartlarında “0” (sıfır) olarak alınmıştır. Kayma olmayan sınır şartının (no-slip) atandığı bölgeler için Denklem 4.9 ile gösterilen ifade; buna karşılık hareket eden sınır için, zamana bağlı olarak U_p plaka hızının değişim gösterdiği yer, Denklem 4.10 ile gösterilen ifade kullanılmıştır.

$$\zeta_{i,1} = \frac{2(\psi_{i,1} - \psi_{i,2})}{(\Delta y)^2} \quad (4.9)$$

$$\zeta_{i,n} = \frac{2(\psi_{i,n} - \psi_{i,n-1})}{(\Delta y)^2} - \frac{2U_p}{\Delta y} \quad (4.10)$$

Sayısal çözümler için sonlu farklar denklemleri elde edildikten sonra, vortisite taşınım denkleminin çözümünde, taşınım terimleri için Alternating Direction Implicit (ADI) metodu ile çözüm yaklaşımı; Poisson denklemi ile ilişkilendirilen akım fonksiyonunun çözümü için ise Point Successive Over-Relaxation (PSOR) metodu ile çözüm yaklaşımı uygulanmıştır. Her iki çözüm metodu için ayrıntılı bilgi Tannehill vd. [84] tarafından hazırlanan çalışmada yer almaktadır.

Zamana bağılı veri topluluğunu elde etmek için, hareketli üst sınır (plaka) için tanımlanan ve zamanda sinüsel salınım biçiminin oluşmasını sağlayan hız fonksiyonu Denklem 4.11 ile gösterilmektedir.

$$U_p(t) = \left[\left(A \sin \frac{2\pi}{\Delta t \cdot T} t \right) B \right] / C \quad (4.11)$$

Burada, Δt sayısal zaman adımını, T simülasyonun bir periyodunda yer alan toplam zaman adımını, t gerçek zamanı ve A , B ve C ise isteğe bağılı seçilen katsayıları ifade etmektedir. Bu katsayılar minimum plaka hızının “0” (sıfır) değerinden büyük olmasını, aynı zamanda, maksimum hız değerinin ise istenilen limit düzeylerinde tutulmasını sağlamaktadır. Zamana bağılı değişen ve sinüsel salınım yapan hız fonksiyonu için maksimum hız değerinin istenilen düzeylerde tutulması önemlidir; çünkü, Reynolds sayısı (Re) hesaplaması kavite yüksekliği (0.01 m) ve plakanın çekildiği hız skalasının maksimum değeri dikkate alınarak hesaplanmaktadır.

Zamana bağılı iki boyutlu sürülmüş kavite akışı uygulaması kapsamında, Reynolds sayısının (Re) değişimi 100, 500, 1000, 5000 ve 10000 olacak şekilde, toplamda beş farklı sayısal simülasyon durumu incelenmiştir. Denklem 4.11 ile gösterilen ve hareketli plakada, zamana bağılı hız değişimini ifade eden fonksiyon için, incelenen tüm durumlarda parametrelere uygun değerlerin atanması sonucunda, hız fonksiyonunun 10 tam sinüs periyodu için çözüm oluşturması sağlanmıştır. Toplamda 3000 sayısal zaman adımının dikkate alındığı ve toplamda 10 sinüs periyodunun oluşturulduğu çözümlerde, her periyot 300 sayısal zaman adımını içermektedir. Analizleri yapılan Reynolds sayıları için kullanılan parametreler, gözlemlenen minimum ve maksimum hız değerleri Çizelge 4.1’de verilmektedir.

Sayısal simülasyonlar için gerekli tüm kodlar ve algoritmalar Matlab yazılımı kullanılarak geliştirilmiştir. HAD analizi için yapılandırılan kodlar, her zaman adımında iki boyutlu sürülmüş kavite akışı problemi çözüm ağının her noktasında x

ve y düzlemlerindeki iki hız bileşeninin, akım fonksiyonunun ve vortisitenin değerlerini verecek şekilde düzenlenmiştir.

Çizelge 4.1. Tüm inceleme durumları için Denklem 4.11’de kullanılan plaka tarafı hız parametreleri ve gözlemlenen minimum ve maksimum hızlar

Re	Plaka Tarafı Hız Fonksiyonu Parametreleri			Hız (m/s)	
	A	B	C	Minimum ($\times 10^{-5}$)	Maksimum
100	0.999	1.001	200	1.0	0.01
500	0.999	1.000	40	2.5	0.05
1000	0.999	1.000	20	5.0	0.10
5000	0.999	1.001	4	50.0	0.50
10000	0.999	1.002	2	15.0	1.00

İki boyutlu kavite hesaplama alanı yapısal çözüm ağı elemanları kullanılarak 101x101 (gevşek ağ), 201x201 ve 301x301 (sıkı ağ) boyutlarında yapılandırılmıştır. Zamana bağlı durumlar için analizlere başlamadan önce, her çözüm ağı zamandan bağımsız olacak şekilde 3000 iterasyon ve maksimum 1.00 m/s plaka hızının olduğu (Re=10000) durumda simülasyonlara tabi tutulmuştur. Çizelge 4.2’de her çözüm ağı için elde edilen maksimum akım fonksiyonu değerlerinin karşılaştırması gösterilmektedir.

Çizelge 4.2. Reynolds sayısı (Re) 10000 için 3000 iterasyon kullanılarak test edilen çözüm ağlarında gözlemlenen maksimum akım fonksiyonu değerleri

Çözüm Ağı	Akım Fonksiyonun Maksimum Değeri
101x101	0.000440
201x201	0.000445
301x301	0.000416

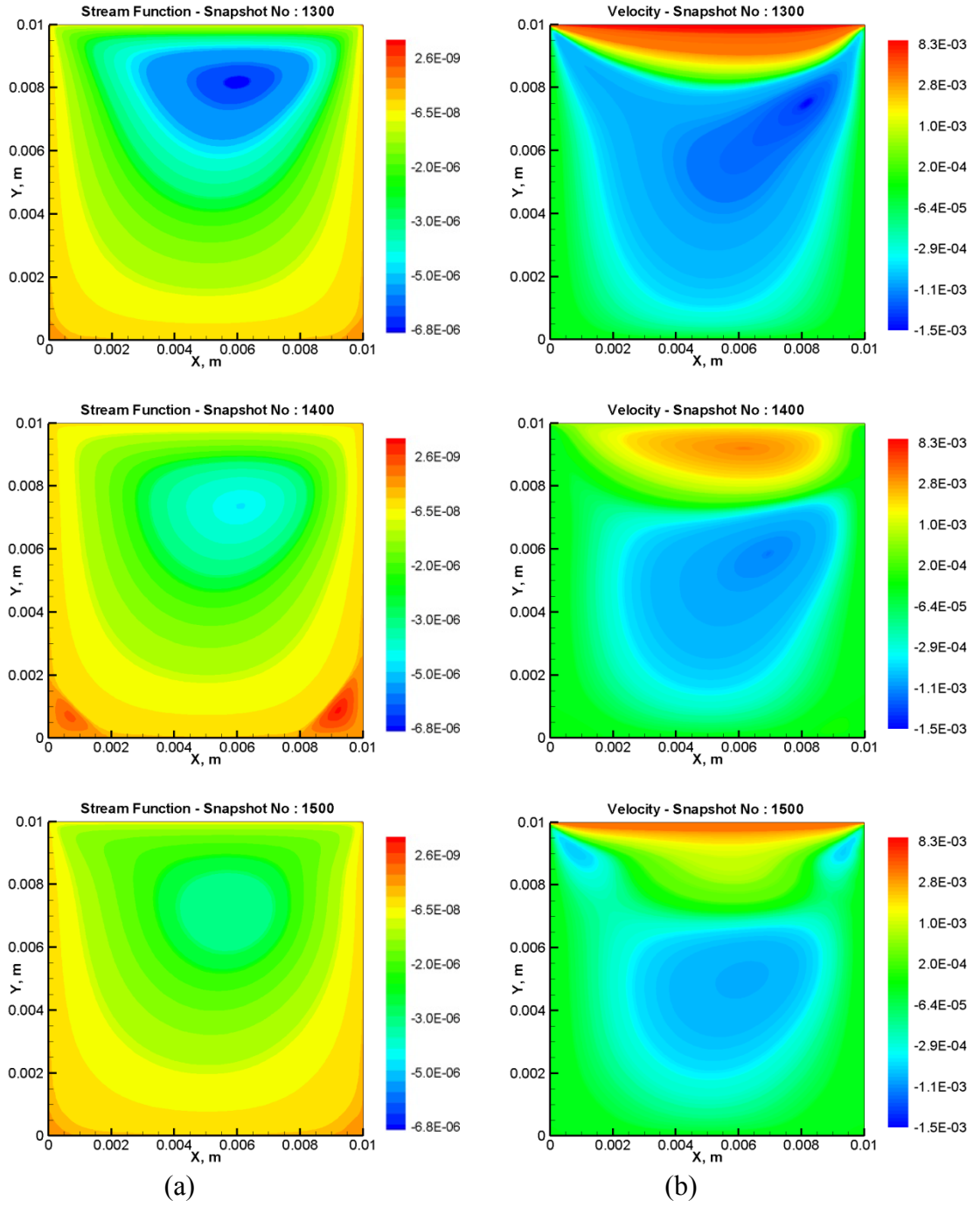
Çizelge 4.2’ye göre, çözüm ağı sıkılaştırıldıkça maksimum akım fonksiyonun değeri değişmektedir; ancak, bu değişim 101x101 (gevşek ağ) ve 301x301 (sıkı ağ) arasında %5 civarındadır. Kavite akış alanında gözlemlenen akış özelliklerinin HAD ile tüm akış dinamiklerinin detaylı simülasyonlarının yapılması bu çalışma kapsamı dışında

olduğundan ve 101x101 boyutlarındaki çözüm ağı gerçek zamanlı kontrol uygulamaları açısından yeteri kadar doğru sonuçlar verdiğiinden, bu ağ DAY ve YSA uygulamalarında analizleri yapılacak veri topluluğu olarak kullanılmak üzere uygun bulunmuştur.

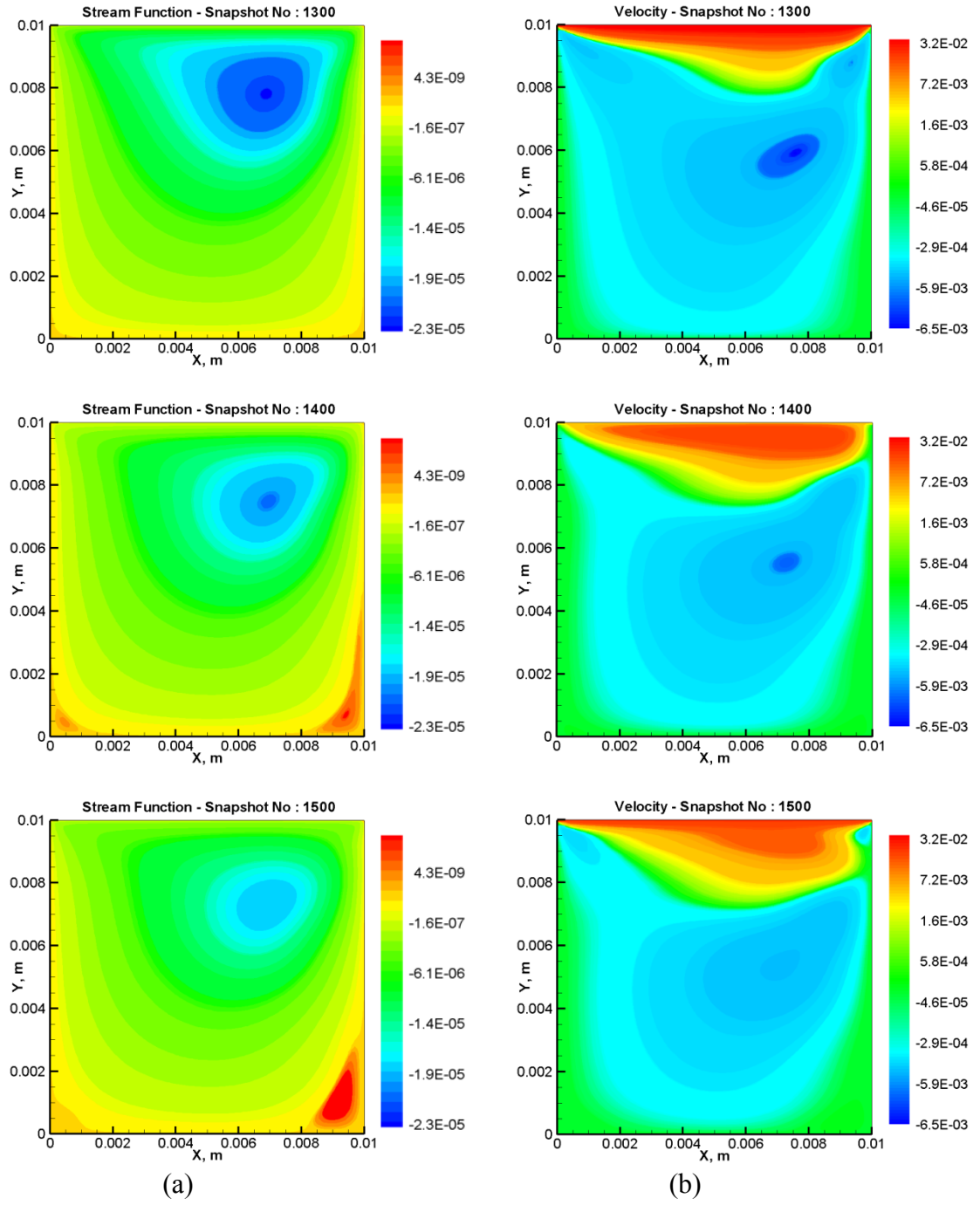
4.1. Akış Alanının Sayısal Çözümlemesi için Sonuçlar

Akış alanında zamana bağlı değişen davranışlar ve akış yapıları, akım fonksiyonu ve akış alanının x-yönü hız bileşeni temel alınarak incelenmiştir. Şekiller 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6 iki boyutlu kavite akışı uygulaması kapsamında, Reynolds sayılarının (Re) sırasıyla 100, 500, 1000, 5000 ve 10000 olduğu durumlarda, kavite içinde gözlemlenen akış yapılarını ve karakteristiklerini göstermektedirler. Bu şekillerde, zamana bağlı değişim ifade eden toplam 10 salınım periyodunun 5'nci periyodunda yer alan 1300, 1400 ve 1500 numaralı anlık görüntü sayıları dikkate alınmıştır.

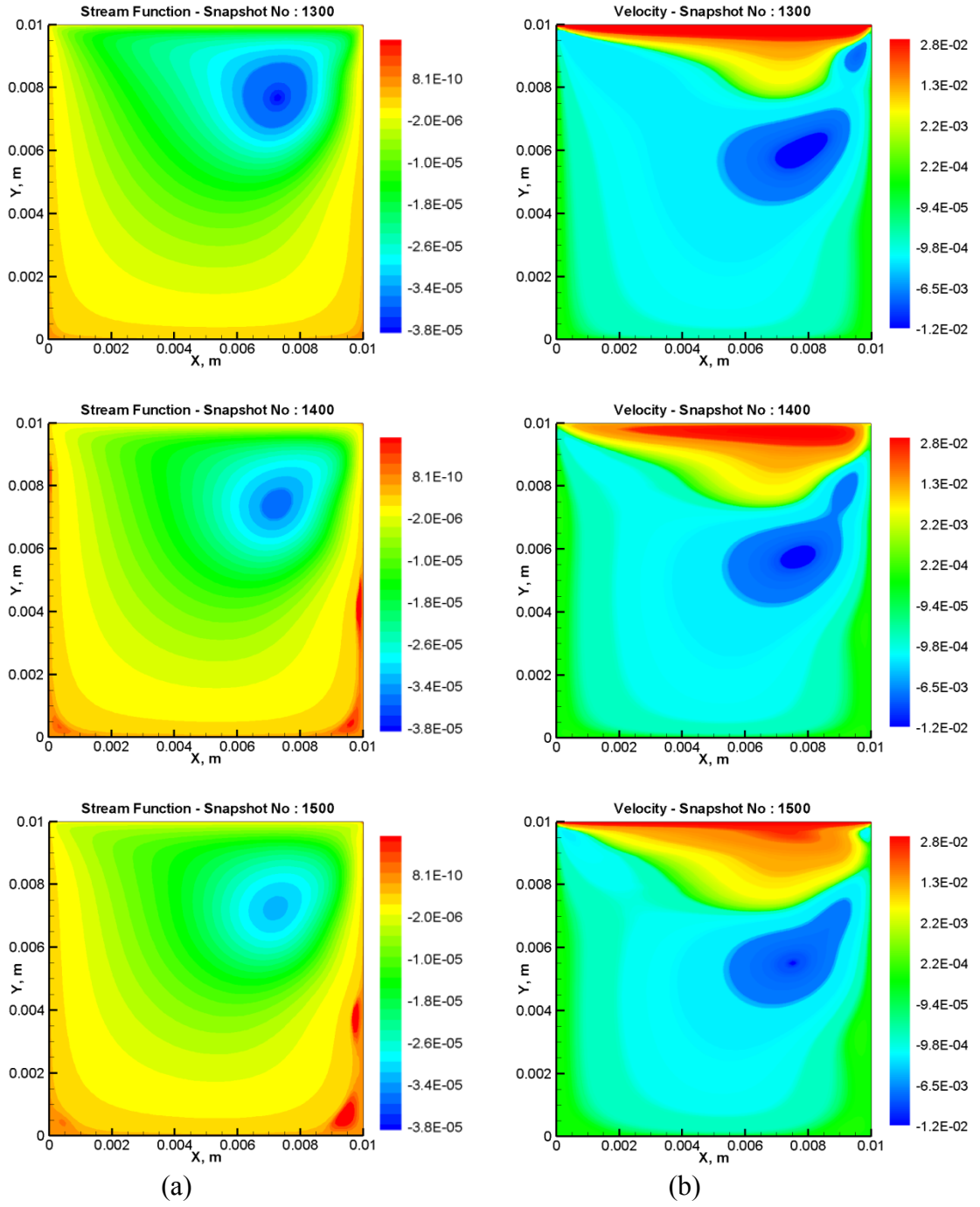
Şekiller 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6'ya ilk bakışta, artan Reynolds sayısı (Re) ile ana girdap merkez bölgesinin kavitenin üst sağ köşesine doğru yer değiştirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, Re=100 ve Re=500 gibi daha düşük Reynolds sayılarının (Re) incelendiği durumlarda iki boyutlu kavitenin alt köşelerinde ikincil akış yapılarının oluştuğu ve kümelenildiği sonucuna varılmıştır. Re=1000, Re=5000 ve Re=10000 gibi daha yüksek Reynolds sayılarının (Re) incelendiği durumlarda ise, ikincil girdap yapılarının kavitenin köşelerinde toplanmadığı; buna karşılık, bu yapıların kavitenin dikey kenarlarında yayıldığı ve daha küçük bir alana hapsedildiği gözlemlenmiştir. Bu durumun sebeplerinden birisi, artan plaka hızlarının uygulanmasına bağlı olarak, daha yüksek Reynolds sayılarının (Re) söz konusu olduğu şartlarda akış alanına hapsedilen akışkanın geliştirilmiş dolaşımının bulunmasıdır. Bu ifadeye bağlı olarak gözlemlenen diğer sonuçlar ise, daha düşük Reynolds sayıları (Re) için ana girdap oluşumunun zamanla belirgin bir şekilde kavite içinde yayıldığı ve girdap derinliğinin daha az olduğudur.



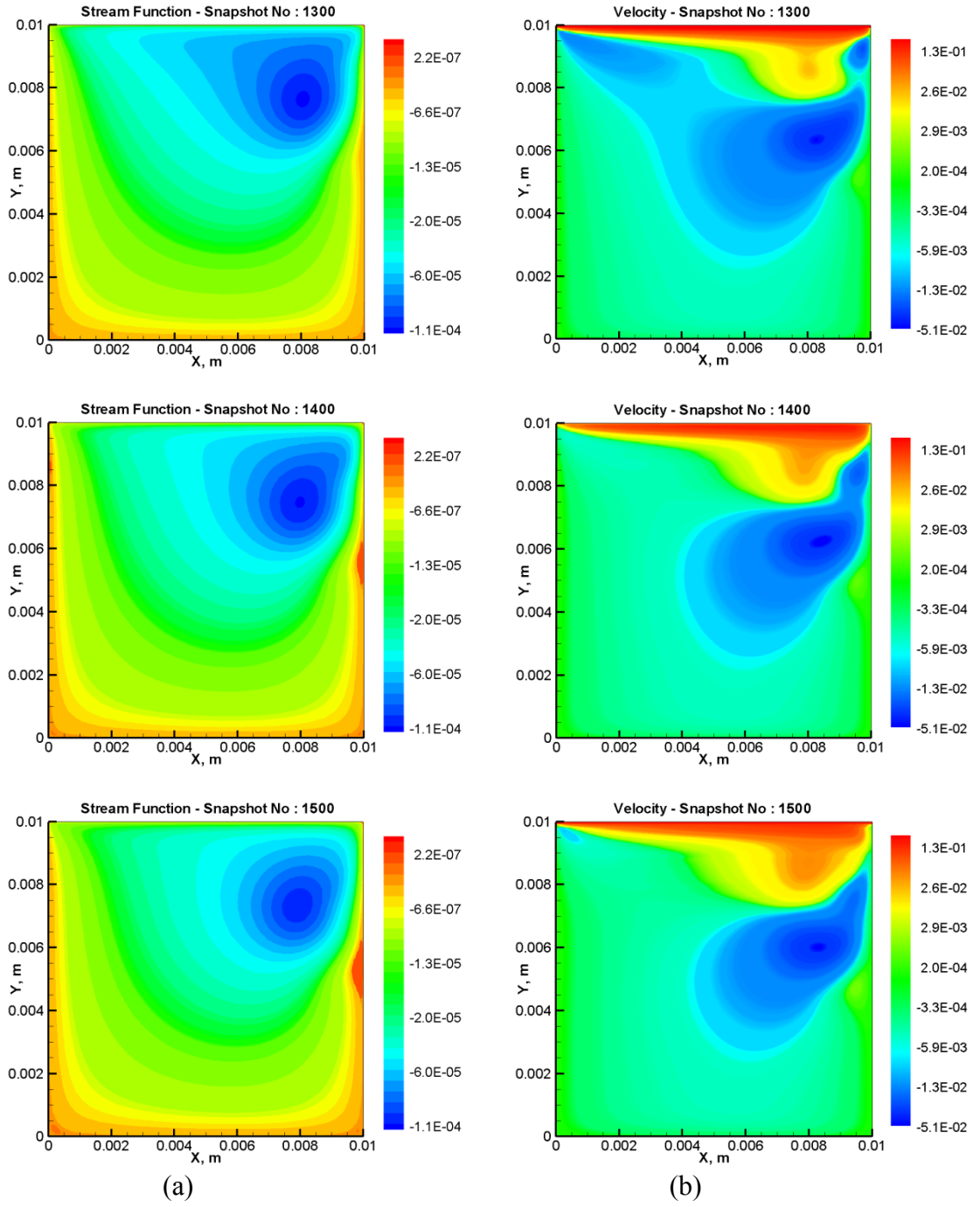
Şekil 4.2. Zamana bağlı iki boyutlu kavite akış alanının 101x101 boyutlarındaki çözüm ağının kullanıldığı $Re=100$ test durumu için değişik anlık görüntü sayılarında a) akım fonksiyonu ve b) x-yönü hız verilerinin kullanılarak incelenmesi



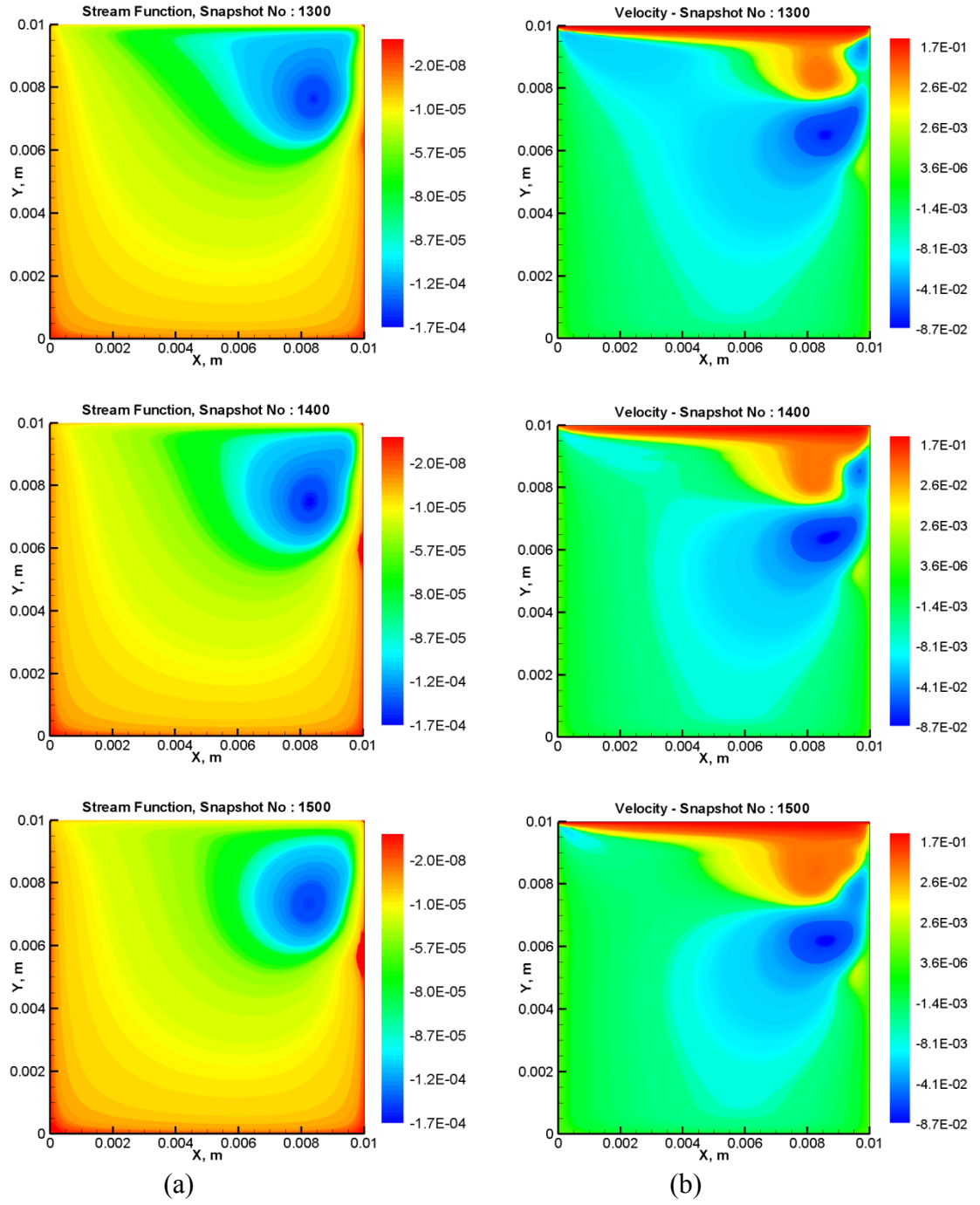
Şekil 4.3. Zamana bağlı iki boyutlu kavite akış alanının 101x101 boyutlarındaki çözüm ağının kullanıldığı $Re=500$ test durumu için değişik anlık görüntü sayılarında a) akım fonksiyonu ve b) x-yönü hız verilerinin kullanılarak incelenmesi



Şekil 4.4. Zamana bağlı iki boyutlu kavite akış alanının 101×101 boyutlarındaki çözüm ağınnın kullanıldığı $Re=1000$ test durumu için değişik anlık görüntü sayılarında a) akım fonksiyonu ve b) x-yönü hız verilerinin kullanılarak incelenmesi

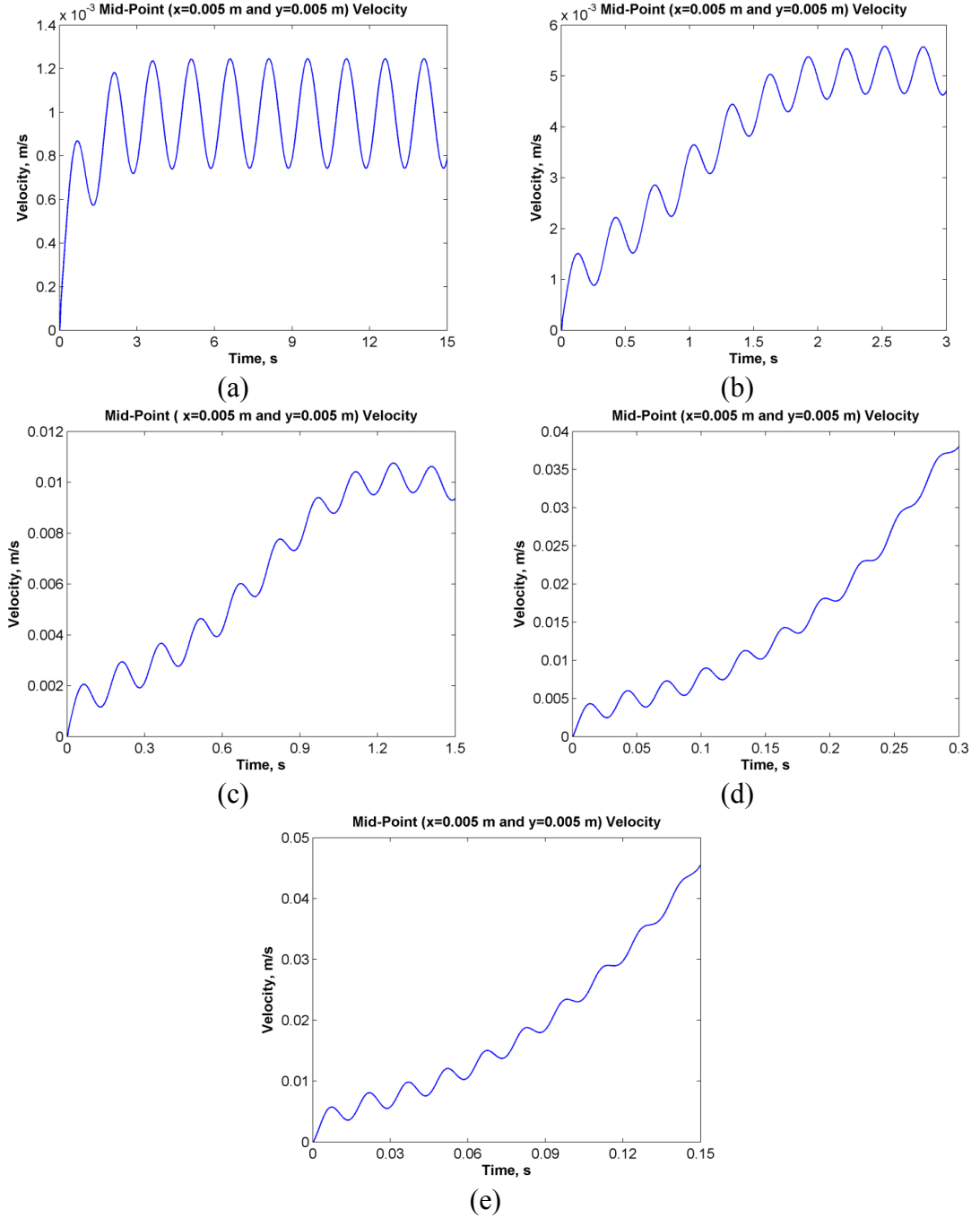


Şekil 4.5. Zamana bağlı iki boyutlu kavite akış alanının 101x101 boyutlarındaki çözüm ağınnın kullanıldığı $Re=5000$ test durumu için değişik anlık görüntü sayılarında a) akım fonksiyonu ve b) x-yönü hız verilerinin kullanılarak incelenmesi



Şekil 4.6. Zamana bağlı iki boyutlu kavite akış alanının 101x101 boyutlarındaki çözüm ağınnın kullanıldığı $Re=10000$ test durumu için değişik anlık görüntü sayılarında a) akım fonksiyonu ve b) x-yönü hız verilerinin kullanılarak incelenmesi

Kavite akış alanının orta noktasının ($x=0.005$ m ve $y=0.005$ m) hızının (x ve y bileşenlerinin dikkate alındığı) zamana bağlı değişimi incelendiğinde $Re=100$, 500 ve 1000 olduğu durumlarda akışın periyodik, $Re=5000$ ve 10000 olduğu durumlarda ise akışın gelişmekte olduğu (developing flow) gözlemlenmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Kavite akış alanında $x=0.005$ m ve $y=0.005$ m noktasının hızının zamana bağlı değişimi a) $Re=100$, b) $Re=500$, c) $Re=1000$, d) $Re=5000$ ve e) $Re=10000$

4.3. Dikgen Ayırıştırma Yöntemi (DAY) Uygulama Sonuçları

Dikgen Ayırıştırma Yöntemi (DAY), iki boyutlu kavite akışı probleminde Reynolds sayısı (Re) 100, 500, 1000, 5000 ve 10000 için yapılan HAD analizleri sonucunda elde edilen, toplamda 3000 anlık görüntü sayısı ile incelenen, akım fonksiyonu ve x yönündeki hız verilerine uygulanmıştır.

DAY uygulaması ile kavitede oluşan baskın özelliğe ve eğilime sahip akış yapıları ve karakteristikleri esas veri topluluğundan ayırıştırılmıştır. Uygulama sonucunda elde edilen her DAY kipi, iki boyutlu kavite akış alanında zamana bağlı akım fonksiyonu ve x-yönü hız verileri ile ifade edilen fiziksel davranışların belirli mekansal karakteristik parçalarını taşımaktadır. Her kipin veri topluluğundaki karakteristikleri görüntüleyebilme başarısı ilgili kipin enerji içeriği ile ilişkilendirilir. Mekansal karakteristiklerin ve akış yapılarının yeterince iyi görüntülenip, temsil edilebilmesi için en yüksek enerji içeriğine sahip birkaç DAY kipinin dikkate alınması yeterlidir. Çalışma kapsamında Reynolds sayılarının (Re) 100 ile 10000 arasında değişim gösterdiği tüm test durumları için Çizelge 4.3'te akım fonksiyonu veri topluluklarının ve Çizelge 4.4'te ise x-yönü hız verilerinin DAY analizleri neticesinde elde edilen en yüksek enerjiye sahip dört kipin enerji içeriklerindeki değişimleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.3. Tüm test durumları için akım fonksiyonu veri topluluğunun DAY analizleri sonucunda gözlemlenen en yüksek enerjiye sahip dört kipin enerji içerikleri

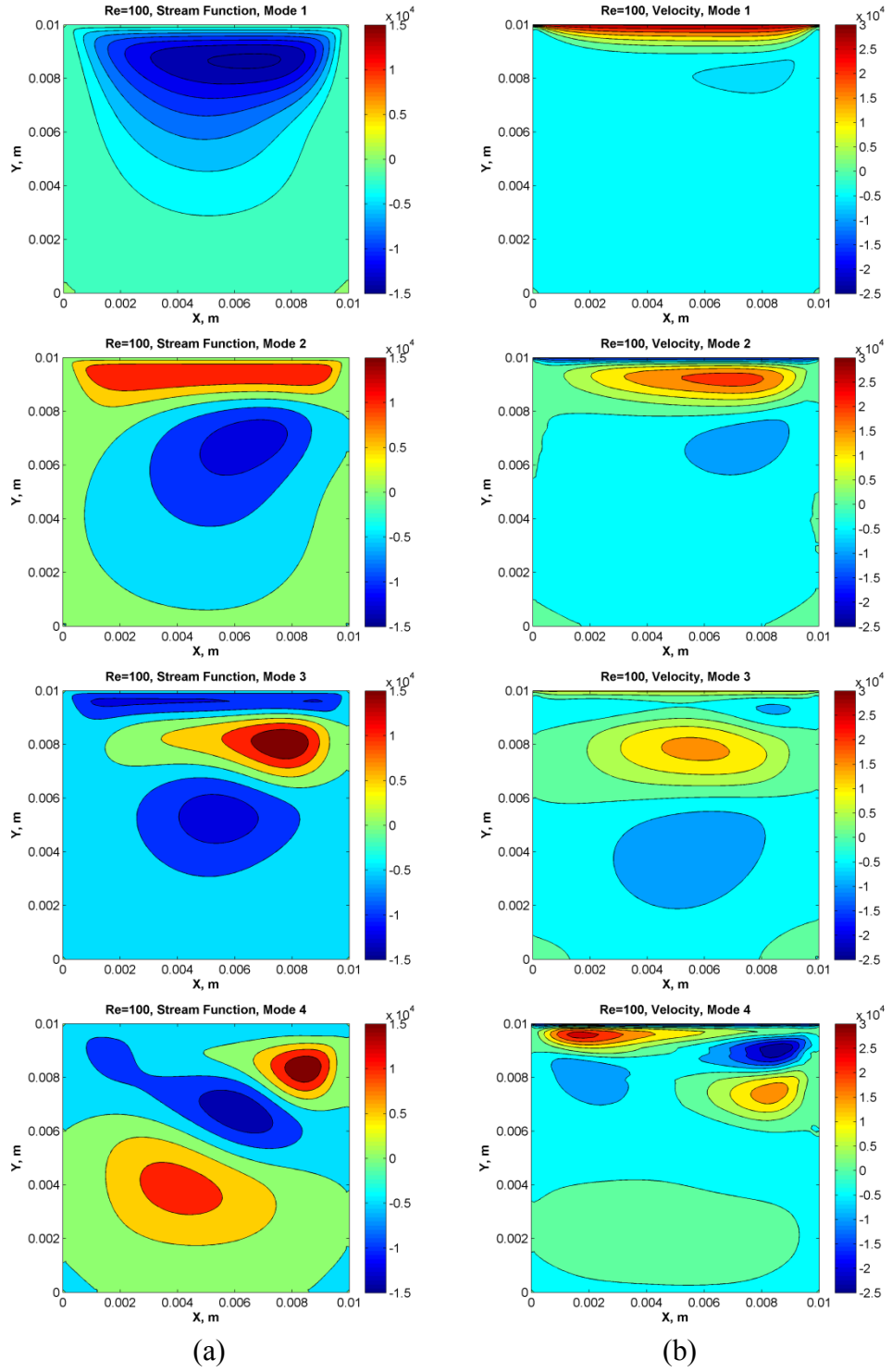
Kip Numarası	Enerji İçerikleri (%), Akım Fonksiyonu Veri Analizleri				
	Re=100	Re=500	Re=1000	Re=5000	Re=10000
1	89.73	79.94	83.99	87.10	87.60
2	9.13	16.24	11.08	7.57	7.64
3	1.09	2.72	3.76	3.86	3.17
4	0.03	0.93	0.83	0.99	1.07
Toplam (4 Kip)	99.98	99.83	99.66	99.52	99.48

Çizelge 4.4. Tüm test durumları için x-yönü hız verilerinin DAY analizleri sonucunda gözlemlenen en yüksek enerjiye sahip dört kipi enerji içerikleri

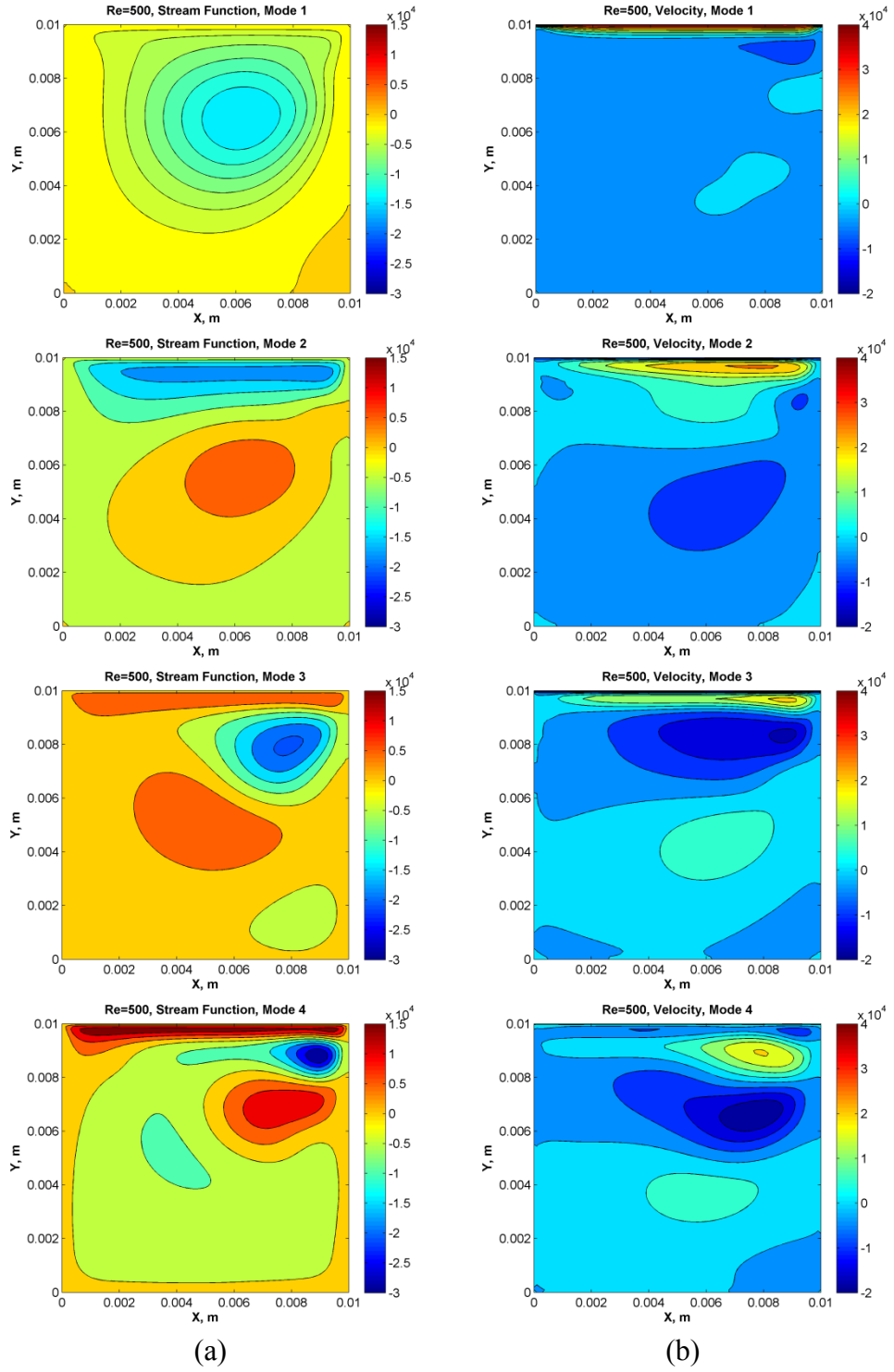
Kip Numarası	Enerji İçerikleri (%), X-Yönü Hız Verileri Analizleri				
	Re=100	Re=500	Re=1000	Re=5000	Re=10000
1	82.67	78.57	76.64	81.14	86.43
2	12.47	12.32	13.44	9.66	6.60
3	0.89	7.30	7.44	5.68	3.40
4	0.03	1.43	1.50	1.77	2.08
Toplam (4 Kip)	96.06	99.62	99.02	98.25	98.51

Çizelgeler 4.3 ve 4.4'te gösterilen tüm test durumlarında hem akım fonksiyonu hem de x-yönü veri topluluklarının DAY analizi sonuçlarına göre, toplam enerji içeriğinin büyük bölümünün ilk iki DAY kipinde biriktiği gözlemlenmiştir. Çizelge 4.3'te gösterilen akım fonksiyonu veri topluluğunun DAY sonuçlarına göre, en yüksek enerjiye sahip iki DAY kipi dikkate alınmasıyla açığa çıkan toplam enerji içeriği %99 civarında olurken, Çizelge 4.4'te gösterilen sonuçlara göre, bu değer x-yönü verileri analizlerinde %90 – %95 düzeyinde kalmaktadır. Akım fonksiyonu veri toplulukları akış alanında gözlemlenen her iki hız bileşeninin (x-y düzlemleri hızları) karakteristiklerini birlikte barındırdığından, DAY uygulaması esnasında akış alanı tanımlaması için daha fazla akış özellikleri kiplerin yapısında tutulmaktadır.

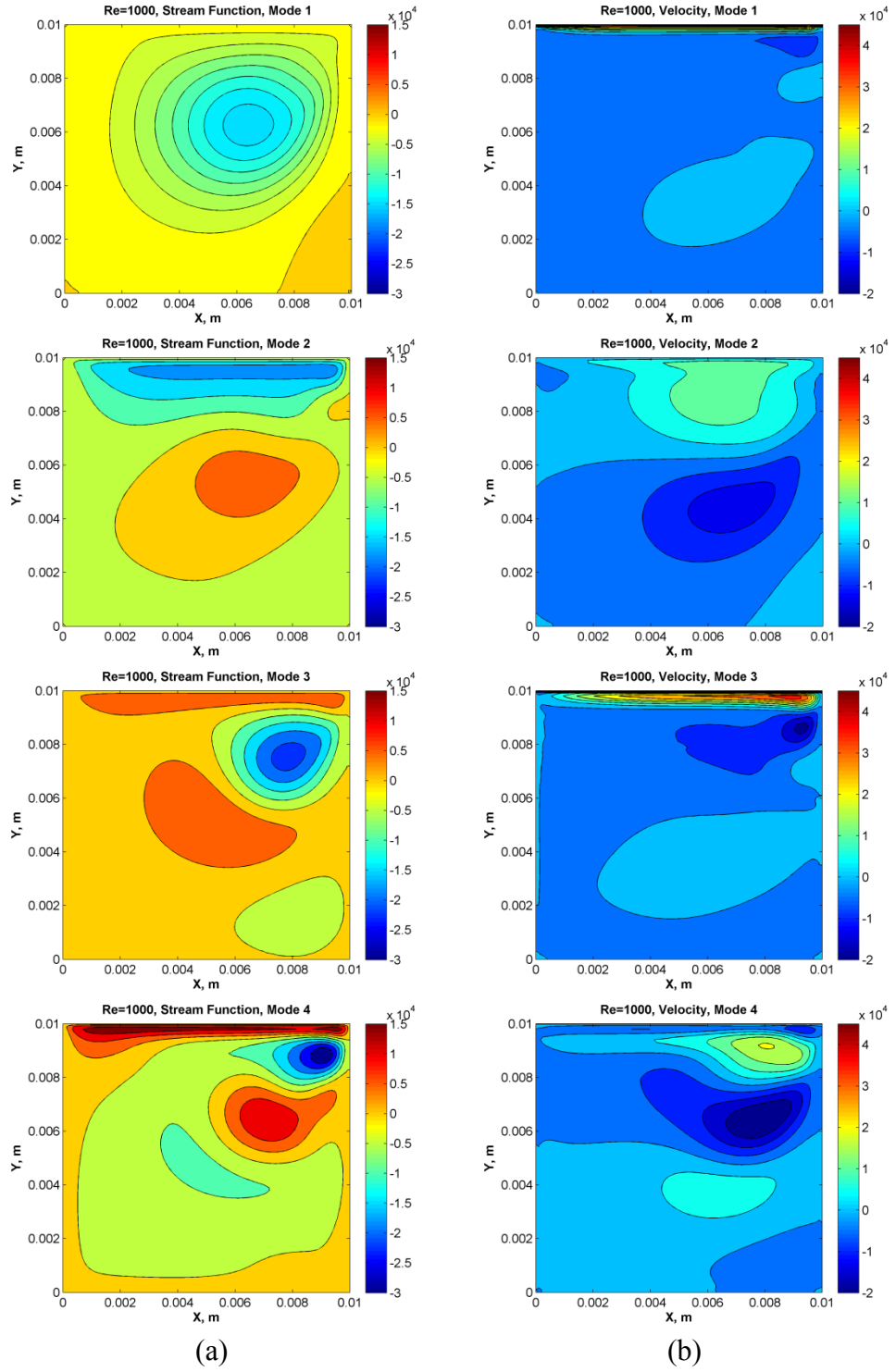
Reynolds sayısının (Re) 100, 500, 1000, 5000 ve 10000 olduğu test durumlarında, hem akım fonksiyonu hem de x-yönü hız verileri analizleri neticesinde gözlemlenen en yüksek enerjiye sahip dört DAY kipi betimlemeleri sırasıyla Şekiller 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 ve 4.12 ile gösterilmiştir. Bu şekillerde akış alanında girdap oluşumunun mekansal karakteristikleri betimlenmiştir. Kiplerin enerji içerikleri birinci kipten dördüncü kipe gidildikçe azaldığından, oluşan girdapların boyutları da bu duruma bağlı olarak küçülmektedir. Ayrıca, akış alanındaki ana girdapların varlıkları en yüksek enerjili ilk kipte betimlenirken, diğer kipler akış alanının kenarlarına yayılan ve daha küçük alanlara hapsedilen ikincil girdapların varlıklarını göstermektedir.



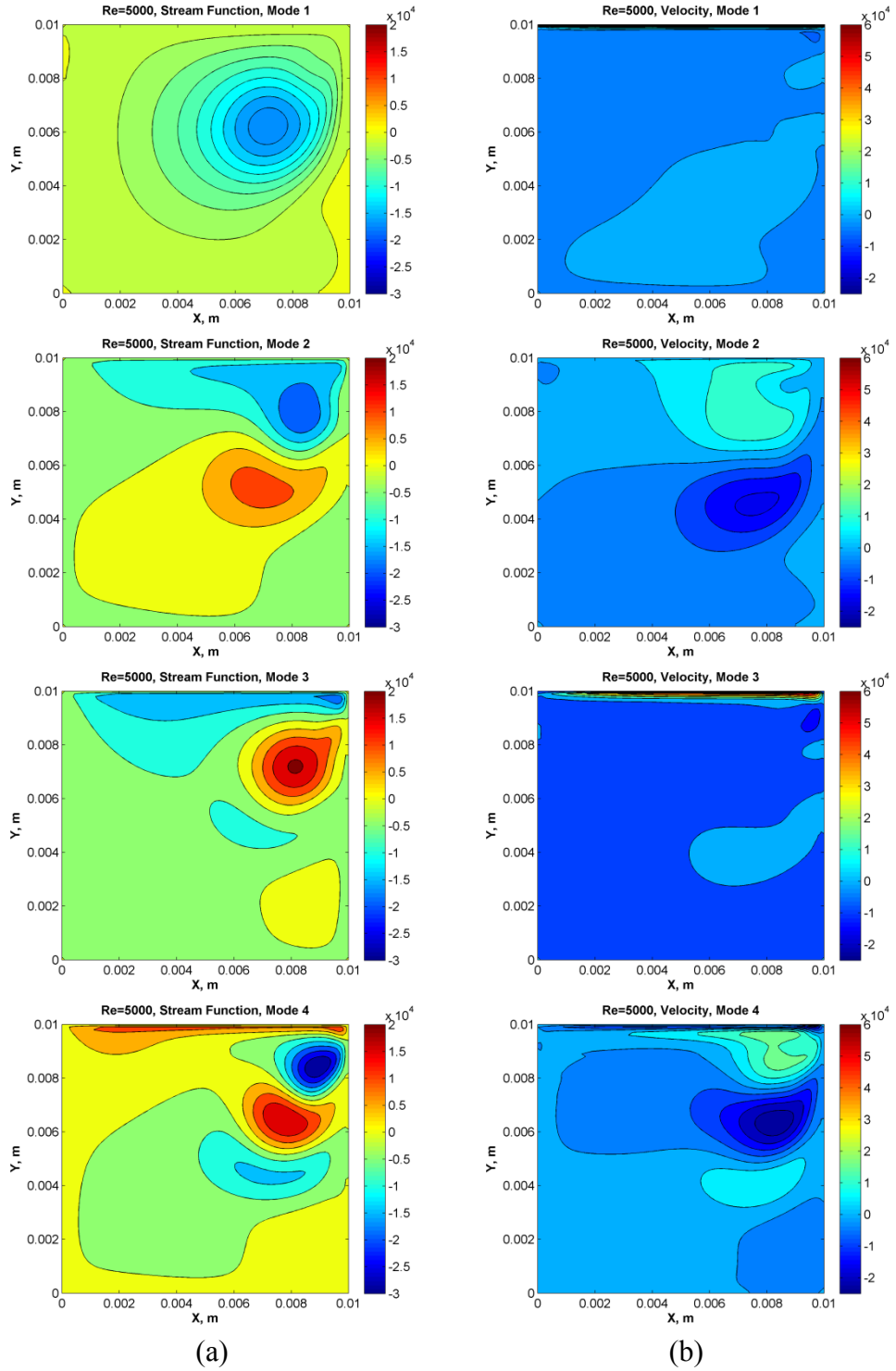
Şekil 4.8. $Re=100$ test durumu için en yüksek enerjili dört DAY kipinin (mode) betimlemeleri a) akım fonksiyonu ve b) x-yönü hızı



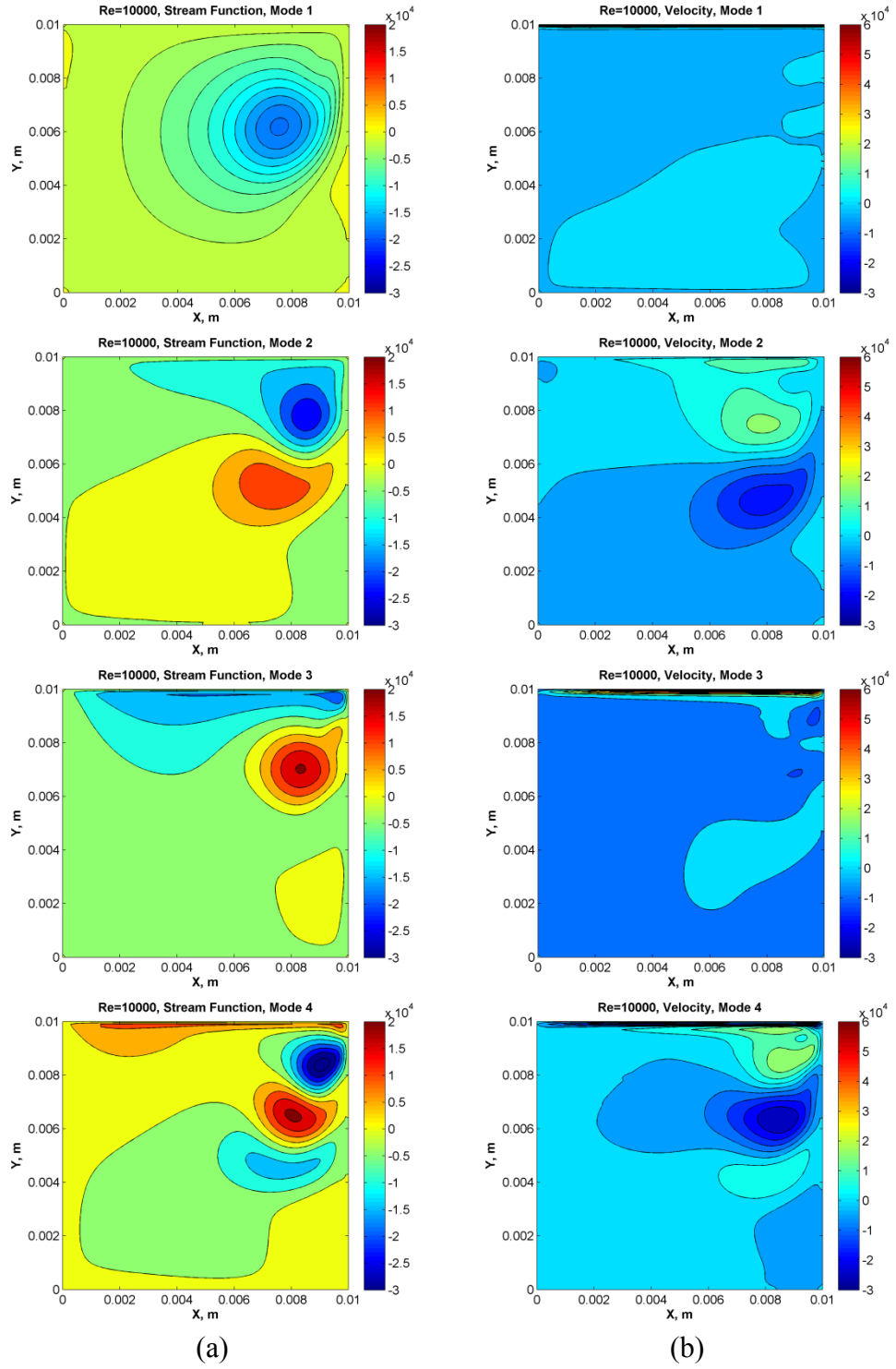
Şekil 4.9. Re=500 test durumu için en yüksek enerjili dört DAY kipinin (mode) betimlemeleri a) akım fonksiyonu ve b) x-yönü hızı



Şekil 4.10. $Re=1000$ test durumu için en yüksek enerjili dört DAY kipinin (mode) betimlemeleri a) akım fonksiyonu ve b) x-yönü hızı



Şekil 4.11. $Re=5000$ test durumu için en yüksek enerjili dört DAY kipinin (mode) betimlemeleri a) akım fonksiyonu ve b) x-y yönü hızı



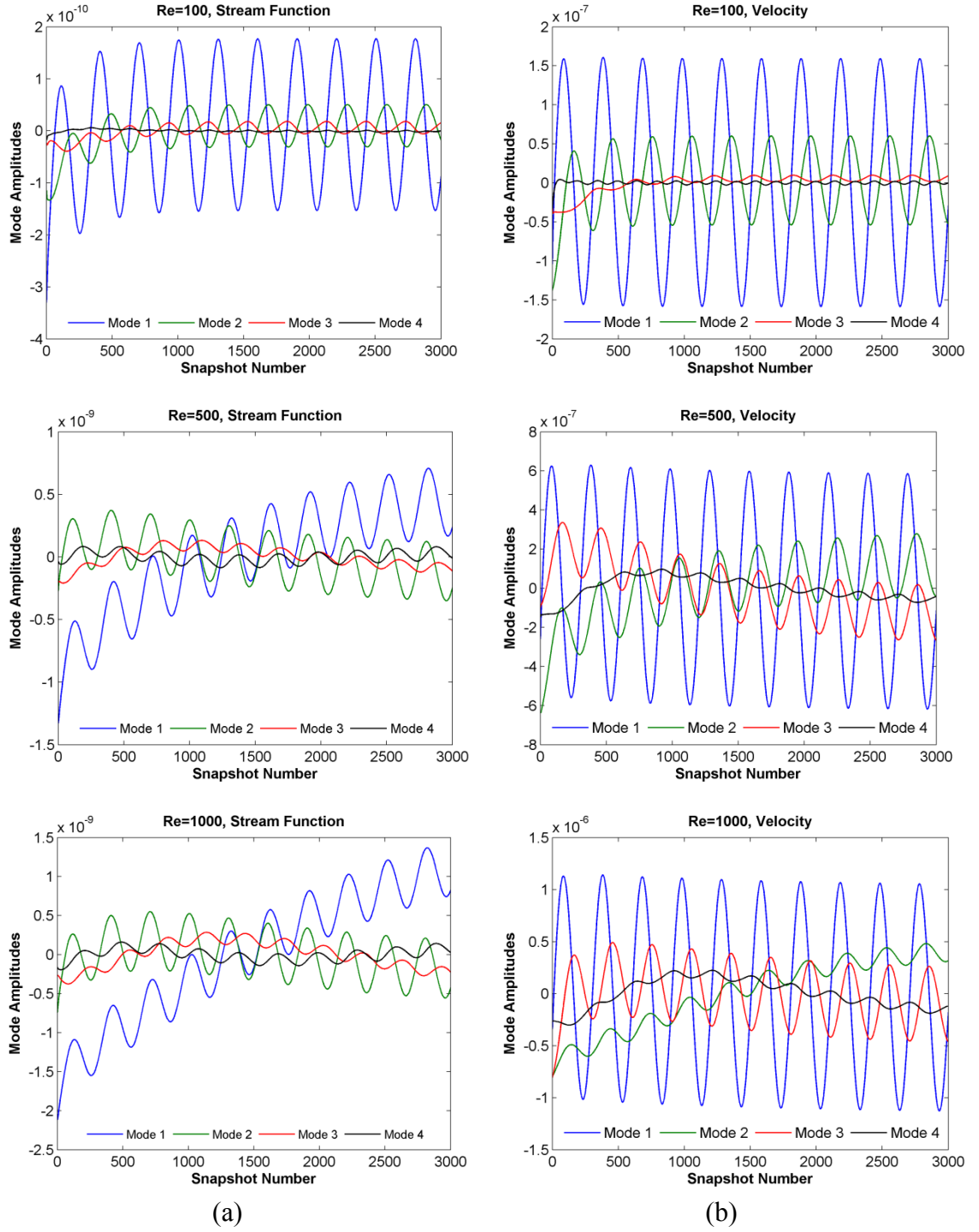
Şekil 4.12. Re=10000 test durumu için en yüksek enerjili dört DAY kipinin (mode) betimlemeleri a) akım fonksiyonu ve b) x-yönü hızı

Reynolds sayısının (Re) 100, 500, 1000, 5000 ve 10000 olduğu her test durumu için akış alanında gözlemlenen zamansal karakteristikler kip genlikleri ile ifade edilmektedir. Şekiller 4.13 ve 4.14, hem akım fonksiyonu hem de x-yönü hız verilerinin DAY analizleri sonucunda gözlemlenen, en yüksek enerjiye sahip olan ilk dört kip için zamana bağlı katsayıların geçmişini, yani kip genliklerini göstermektedir.

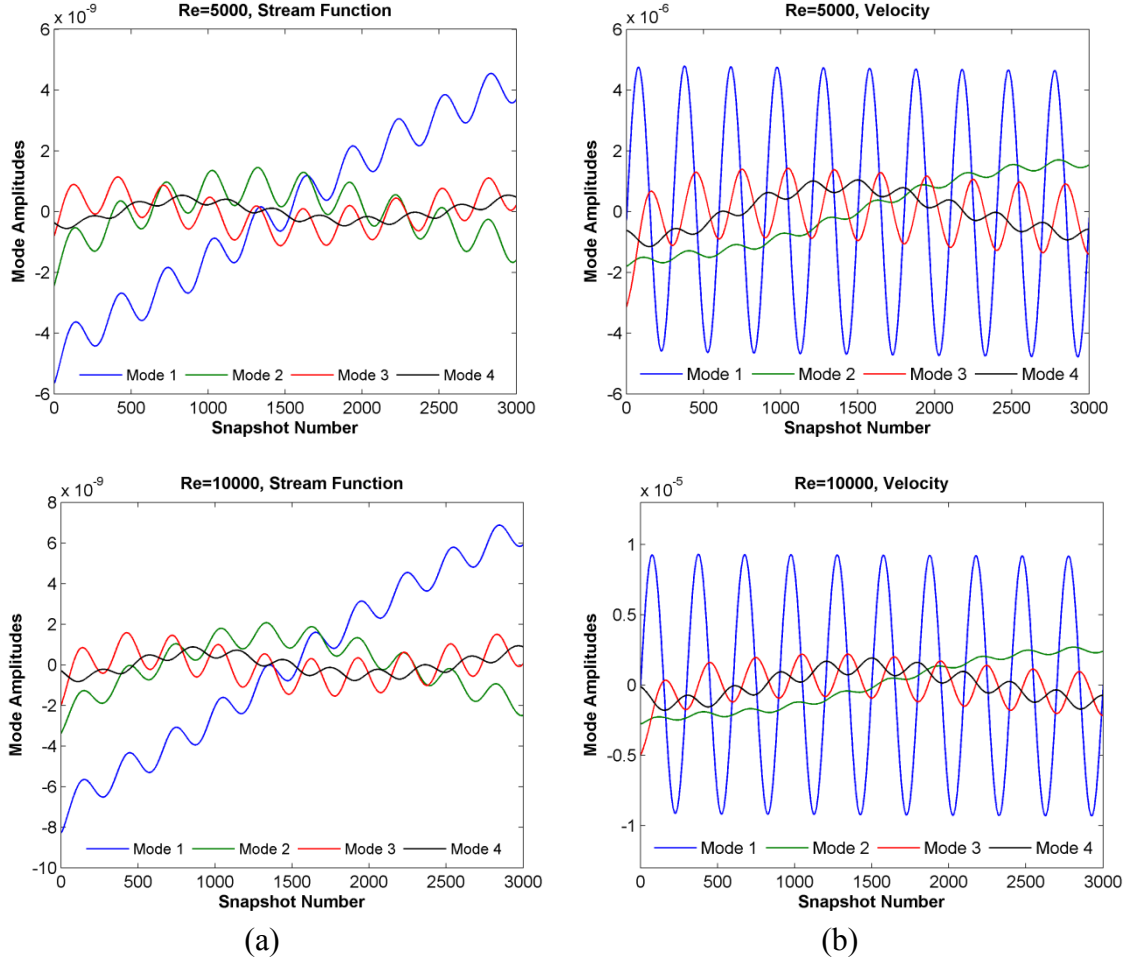
Şekiller 4.13 ve 4.14 incelendiğinde, ilk anda göze çarpan ifade Reynolds sayısının (Re) azalmasıyla beraber hem akım fonksiyonu hem de x-yönü hızı için gözlemlenen kip genliklerinin daha dar bir alanda salınım yapmaya başladıklarıdır. Fiziksel olarak bu ifade, daha yavaş plaka hızlarına bağlı olarak gözlemlenen daha düşük Reynolds sayıları (Re) için, akış alanına hapsedilmiş akışkanın zamana bağlı hareketlilik düzeyinin (aktifliğinin) bir belirtisidir.

Ayrıca, $Re=100$ olduğu test durumunda, anlık görüntü sayısına bağlı olarak sinüsel salınım yapan kip genlikleri, hem akım fonksiyonu hem de x-yönü hız verileri analiz sonuçlarına göre düzgün periyodik hareket sergilemektedir. Daha yüksek Reynolds sayıları (Re) için ise kip genliklerinde tekdüze değişim mevcut olarak gözükmektedir; ancak, bu değişim sayısal simülasyonların bir periyoduna karşılık gelen her 300 anlık görüntü sayısında bir aşamalı olarak değişecek şekilde bir davranış sergilemektedir. Bu ifadeye bağlı sonuçlar, $Re=100$ haricindeki tüm test durumlarının akım fonksiyonu verilerinin analiz edildiği tüm kip genliklerinde, ayrıca, x-yönü hız verilerinin analiz edildiği ikinci, üçüncü ve dördüncü kiplere bağlı genliklerde gözlenmektedir.

Şekiller 4.13 ve 4.14'te betimlenen, anlık görüntü sayısına bağlı olarak sinüsel salınım yapan kip genliklerinin düzgün periyodik, aşamalı değişim sergileyen vaziyetleri ve kip genliklerinin değişen büyüklükleri, fiziksel olarak iki boyutlu kavite akış alanında ana ve ikincil girdap yapılarının oluştüğünün ve bu yapılarının şiddetlerinin zamanla değiştiğinin bir ifadesidir.

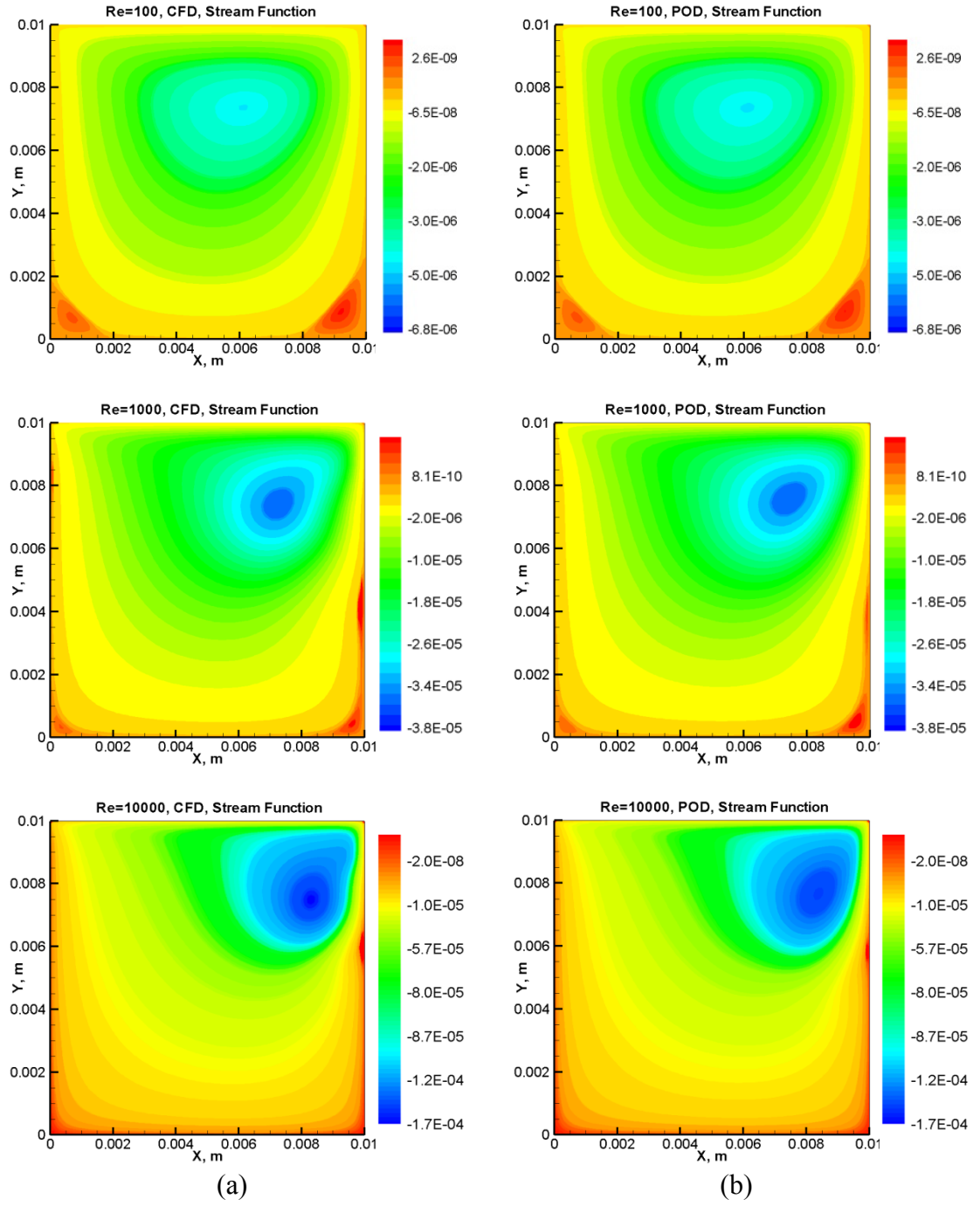


Şekil 4.13. $Re=100$, $Re=500$ ve $Re=1000$ için anlık görüntü sayısına karşılık a) akım fonksiyonu ve b) x-yönü hız verilerinin DAY analizleri neticesinde elde edilen kip genlikleri (mode amplitudes)



Şekil 4.14. Re=5000 ve Re=10000 için anlık görüntü sayısına karşılık a) akım fonksiyonu ve b) x-yönü hız verilerinin DAY analizleri neticesinde elde edilen kip genlikleri (mode amplitudes)

DAY uygulaması sonucunda elde edilen sonuçların doğruluğunu denetlemek adına, kiplerin ve bağıl kip genliklerinin kullanılmasıyla iki boyutlu kavite akış alanı yeniden yapılandırılmıştır. Şekil 4.15 HAD analizleri sonucunda elde edilen esas veri topluluğunu ile en yüksek enerjiye sahip dört DAY kipinin ve ilgili kip genliklerinin dikkate alınmasıyla, akım fonksiyonu temel alınarak elde edilen yeniden yapılandırma sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 4.15. $Re=100$, $Re=1000$ ve $Re=10000$ test durumlarında, 1400 numaralı anlık görüntü sayısı için, akım fonksiyonu esas alınarak gözlemlenen a) HAD analizleri sonucunda elde edilen esas veri topluluğu ve b) en yüksek enerjiye sahip dört DAY kipinin ve ilgili kip genliklerinin dikkate alınmasıyla elde edilen yeniden yapılandırma sonuçları

Şekil 4.15’te, yeniden yapılandırmada ortaya çıkan düşük seviyeli farklılıklar kesme hatalarından kaynaklanmaktadır. Eğer, akış alanının yeniden yapılandırması sırasında sınırsız sayıda kip ve bağıl kip genliklerinin kullanımı mümkün olsaydı, HAD sonuçları ile tıpatıp uyan bir gösterim elde edilirdi.

4.4. Yapay Sinir Ağı (YSA) Uygulama Sonuçları

Kullanılan Yapay Sinir Ağı (YSA) yöntemi sayesinde, spesifik bir veri setinin ağ yapısında eğitim seti olarak kullanıldığı, değişik plaka hızlarında ve buna bağlı olarak değişik Reynolds sayıları (Re) için yeni kip genlikleri tahmin edilebilmektedir. Sürülmüş kavite akışı uygulaması kapsamında, Reynolds sayısının (Re) 100, 500, 1000, 5000 ve 10000 olduğu toplam beş farklı test durumu arasından, Re=100 durumu ağ yapısı tasarım parametrelerinin belirlenmesinde ve doğrulanmasında kullanılmıştır. Re=10000 test durumu ise, Re=500, Re=1000 ve Re=5000 durumları için kip genliklerinin tahmin edilmesinde kullanılmıştır.

Sürülmüş kavite akışı kapsamında kullanılan YSA yapısı, üçüncü bölümde silindir üzerindeki laminer ve türbülanslı akışta kullanılan aynı ağ yapısıdır. Çok sayıda girdinin ve çok sayıda çıktının arasındaki doğrusal olmayan ilişkinin doğru bir şekilde gözlemlenebilmesi için kullanılan Mekansal-Zamansal Zamanda-Gecikmeli Çok Katmanlı Algılayıcı (Spatio-Temporal Time-Lagged Multi Layer Perceptron – MLP) tabanlı ağ yapısı, sistem girdilerinin verildiği bölüm haricinde, tek bir gizli katman ve tek bir çıktı katmanı içermektedir. Gizli katman nöronlarına ve çıktı katmanına atanan aktivasyon fonksiyonları değiştirilmemiş, gizli katmanda doğrusal olmayan *tanh* ve çıktı katmanında ise doğrusal aktivasyon fonksiyonları kullanılmıştır. Oluşturulan YSA yapısı, DAY analizleri sonucunda elde edilen en yüksek enerjili iki DAY kipinin bağıl kip genliklerini tahmin etmekte kullanılmıştır. Tahminler için oluşturulan ağ yapısının eğitim sürecinde, yeterli miktarda veri topluluğunun kullanılması neticesinde öğreticili öğrenme yaklaşımı kullanılmıştır.

Ağ tasarım parametrelerinin (zaman gecikmesi ve gizli katman nöron sayısı) belirlenmesi ve doğrulanması sürecinde gerçekleştirilen eğitim sürecinde, Re=100

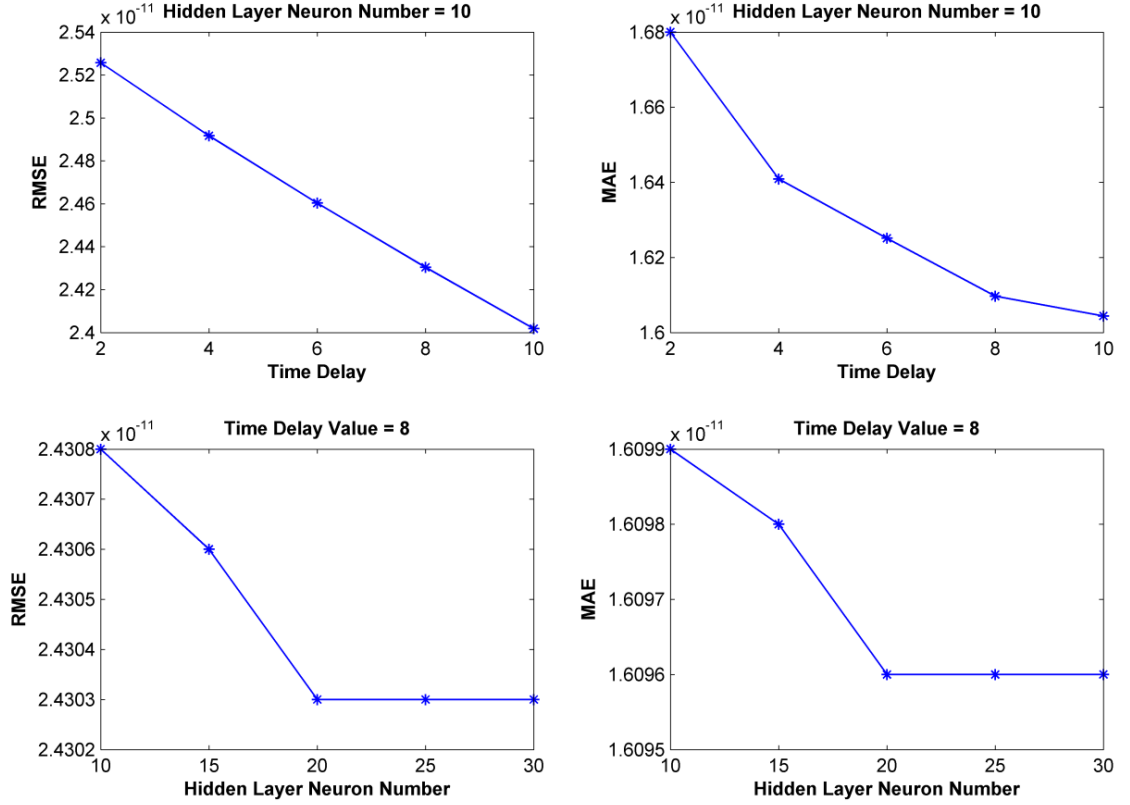
test durumu için elde edilmiş kip genlikleri ve zamanla değişim gösteren plaka hızları kullanılmıştır. 10 periyodik gözlemin ilk yarısını oluşturan ve 1500 zaman anına karşılık gelen veri topluluğu ağı eğitmek (öğrenme süreci) için kullanılmıştır. Toplamda 3000 zaman anına karşılık gelen gözlemde geriye kalan veri topluluğu ise ağ yapısının tahminler üretmesinde ve doğrulamasında kullanılmıştır.

Oluşturulan ağ yapısının karmaşıklığı ve boyutu zaman gecikmesi ve gizli katman nöron sayısı parametrelerinin değiştirilmesiyle ayarlanabilir. Zaman gecikmesi değeri, bir başka deyişle gecikme uzunluğunun mertebesi, tahmin edilmesi gereken ve ağ girdileri bölümüne dışarıdan sağlanan verilerin (zaman bağlı plaka hızları) haricinde önceki örnekleme anı verileri olarak gönderilen kip genliklerinin sayısını nitelendirmektedir. Bir diğer önemli tasarım parametresi olan gizli katman nöron sayısı kip genliklerinin tahmin doğruluğunu etkilemektedir. Her iki parametre için de uygun değerlerin seçilebilmesi amacıyla ağ performansı denetlenmiştir. Bu amaçla, zaman gecikmesi ve gizli katman nöron sayısı parametreleri değişik değerlere atanarak, hataların karekökünün ortalaması ve ortalama mutlak hatanın kıyaslanması ile uygun değerlerin seçimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.16, $Re=100$ test durumu akım fonksiyonu veri topluluğunun taban alındığı ağ performansı analiz sonuçlarını göstermektedir.

Zaman gecikmesi parametresinin uygun değerini belirlemek adına, ilk olarak gizli katman sayısı 10 alınarak, zaman gecikmesi parametresi 2 ile 10 arasında ikinin katları alınarak ağ yapısı performansı denetlenmiştir. Bu denetleme esnasında kullanılan gizli katman nöron sayısı (10), karmaşıklık düzeyini artırmadan zaman gecikmesi parametresinin değerindeki değişimin gözlemlenmesi adına düşük bir değerde alınmıştır.

Şekil 4.16'ya göre, zaman gecikmesi parametresinin değerindeki artış, sonuçların doğruluğunu olumlu olarak etkilemektedir ve buna bağlı olarak oluşan hata sinyallerinin mertebesi azalmaktadır. Daha büyük zaman gecikmesi değerleri için, ağ yapısı daha fazla sayıda bilinen veriyi önceki örnekleme anı verileri olarak kullanarak kendini eğitmektedir. Sonuç olarak, daha iyi tahminler yapılmasına

karşılık, girdi seti verileri ile dolaylı olarak diğer katmanlardaki nöronlar arasında daha fazla sayıda ara bağlantı oluşturulmakta, ağ yapısının karmaşıklık düzeyi artmakta ve tahmin süreci uzamaktadır.



Şekil 4.16. Re=100 test durumunda uygulanan ağ performans analizi, zaman gecikmesi (time delay) ve gizli katman nöron sayısının (hidden layer neuron number) tayini için hataların karekökünün ortalaması (RMSE) ve ortalama mutlak hatanın (MAE) kıyaslanması

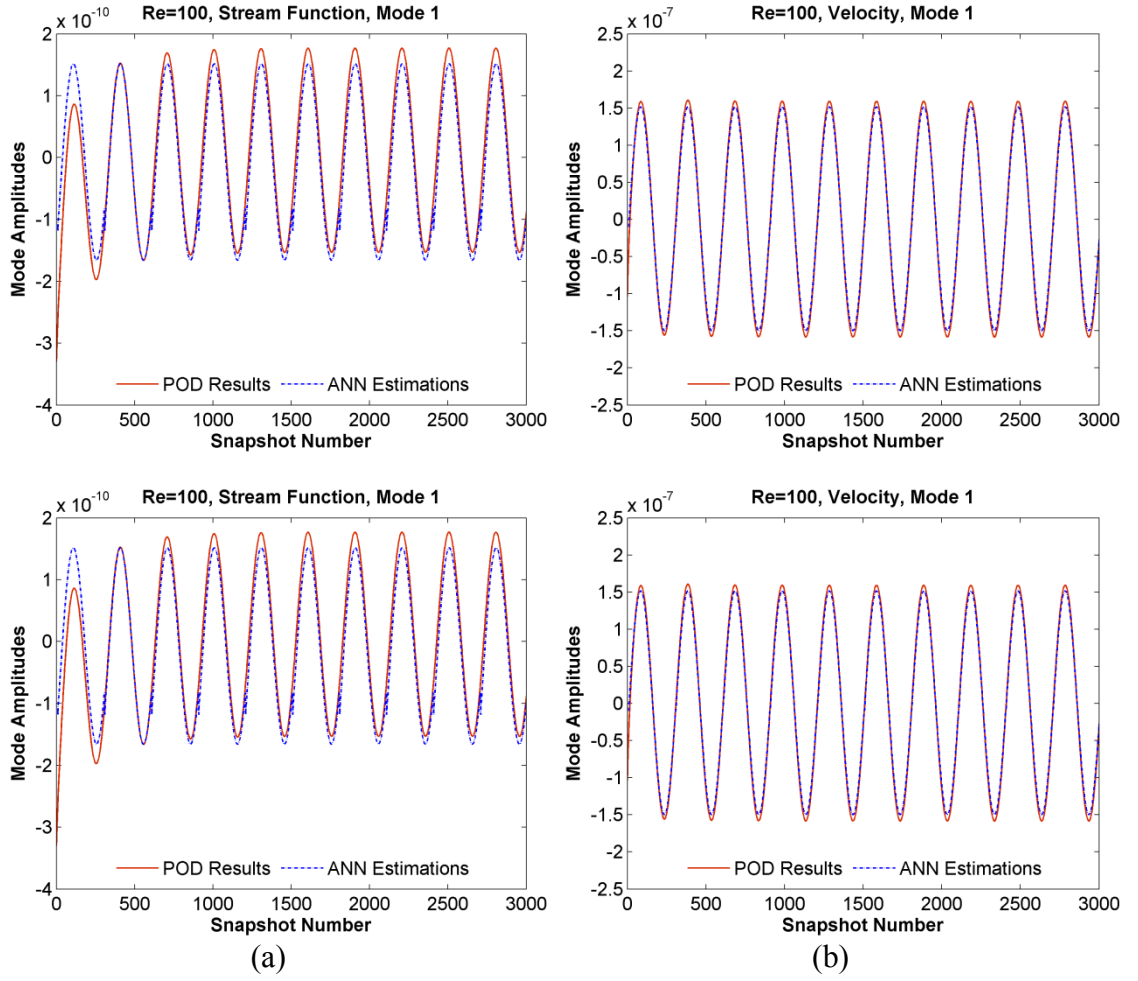
Şekil 4.16'ya göre, hataların karekökünün ortalaması zaman gecikme parametresinin belirlenmesi için fark edilebilir düzeyde bir değişim eğilimi göstermemektedir. Buna karşılık, ortalama mutlak hatanın kıyaslanmasında, zaman gecikmesi değerinin 8 ve 10 olduğu durumlar arasında %1'den daha az bir farklılık gözlemlenmiştir. Bu yaklaşıma göre, ağ tasarımında zaman gecikmesi parametresi değerinin 8 olarak alınmasına karar verilmiştir.

Zaman gecikmesi parametresinin 8 olarak tayininden sonra, gizli katman nöron sayısının değerine karar vermek için 10 ile 30 arasında beşin katları alınarak ağ yapısı performansı denetlenmiştir. Şekil 4.16'dan da görülebileceği gibi, gizli katman nöron sayısının 20, 25 ve 30 olarak alındığı denemelerde hem hataların karekökünün ortalamasında hem de ortalama mutlak hatanın kıyaslanmasında herhangi bir değişim gözlemlenmemiştir. Sonuç olarak, sonuçların elde edilmesi için gereken çabanın, hesaplama zamanının ve ağ yapısı karmaşıklılığının makul bir düzeyde olması amaçlandığından, gizli katman nöron sayısının 25 olarak alınmasının yeterli olduğuna karar verilmiştir.

İki boyutlu sürülmüş kavite akışı probleminin sayısal çözümü neticesinde elde edilen HAD verilerine DAY uygulaması sonucunda, akım fonksiyonunun temel alındığı durumlar için toplam enerji içeriğinin %95'i sadece en yüksek enerjili iki DAY kipinin dikkate alınmasıyla temsil edilmektedir. Buna karşılık, x-yönü hız verilerinin temel alındığı durumlarda, sadece en yüksek enerjili iki DAY kipi göz önüne alındığında, toplam enerji içeriği %90 civarında kalmaktadır. Her iki türdeki analiz durumları için, en yüksek enerjili iki DAY kipi ve bağıl kip genlikleri akış alanındaki mekansal ve zamansal akış yapılarının ve karakteristiklerinin büyük çoğunluğunu barındırmaktadır.

$Re=100$ test durumu kullanılarak ağ tasarım parametrelerinin belirlendiği ve oluşturulan YSA yapısının kullanımı neticesinde tahmin edilen kip genlikleri ve DAY sonucunda gözlemlenen esas kip genliklerinin karşılaştırması ve ağ yapısının verimliliği Şekil 4.17'de gösterilmektedir.

Şekil 4.17 incelendiğinde, hem akım fonksiyonu hem de x-yönü hız durumu için, YSA yapısı kullanılarak tahmin edilen birinci kipi genliklerinin özellikle pik bölgelerinde gözlemlenen sapmalar dışında esas kip genlikleri ile yeterince iyi düzeyde bağdaştığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.17. $Re=100$ test durumu için a) akım fonksiyonu ve b) x-yönü hız verilerinin DAY analizleri sonucunda elde edilen esas kip genlikleri ile YSA uygulaması sonucunda tahmin edilen kip genliklerinin karşılaştırması

Ağ yapısının doğrulamasından sonra, farklı Reynolds sayılarındaki (Re) kip genliklerinin tahmin edilmesi amacıyla, sadece $Re=10000$ test durumunun kip genlikleri ve zamana bağlı plaka hızı değerleri ağ yapısının eğitim sürecinde kullanılmıştır. Reynolds sayısının (Re) 500, 1000 ve 5000 olduğu durumlardaki kip genliklerinin tahminlerinde, YSA sisteminin girdileri olarak sadece tahmin analizi yapılacak olan Reynolds sayısında (Re) gözlemlenen plaka hızları dış veriler olarak ağın girdi bölümüne beslenmiştir ve eğitim için $Re=10000$ durumunun 3000 zaman anına karşılık gelen 10 periyotluk kip genlikleri geçmişinin tamamı kullanılmıştır.

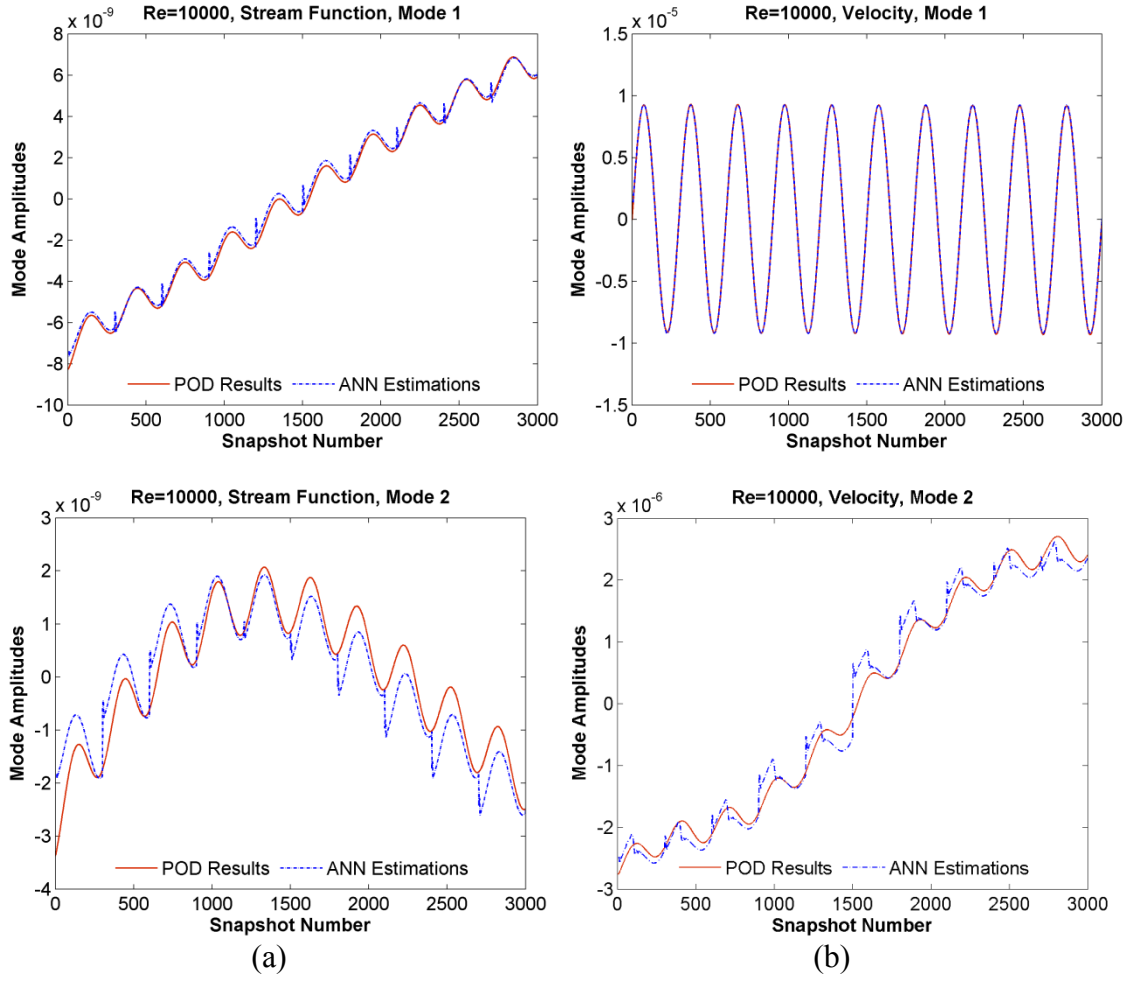
Tahmini yapılacak olan $Re=500$, $Re=1000$ ve $Re=5000$ durumlarında hem akım fonksiyonunun hem de x-yönü hız verilerinin temel alındığı durumlarda aşamalı değişim vaziyeti gösteren kiplerin genliklerinin tahmininde, buluşsal bir yaklaşım kullanılmıştır. En büyük aşamalı değişim gösteren $Re=10000$ test durumu bu buluşsal yaklaşımın yapılandırılması için seçilmiştir.

$Re=10000$ analiz durumunda YSA yapısı kullanılarak yine $Re=10000$ durumu için kip genlikleri tahmin edilmiştir. Daha sonra, toplam 10 periyotluk incelemenin, her periyodundaki 300'üncü zaman anında, YSA tahminleri sonucunda elde edilen kip genlikleri esas kip genlikleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta, YSA tahminlerinin aşamalı değişim gösteren kalıp davranışı sergilemesine olanak tanıyan 10 ölçeklendirme verisi elde edilmiştir. Bu buluşsal ölçeklendirme yaklaşımı periyodik davranış sergileyen kip genliklerinin tahmin süreçlerinde kullanılmamıştır.

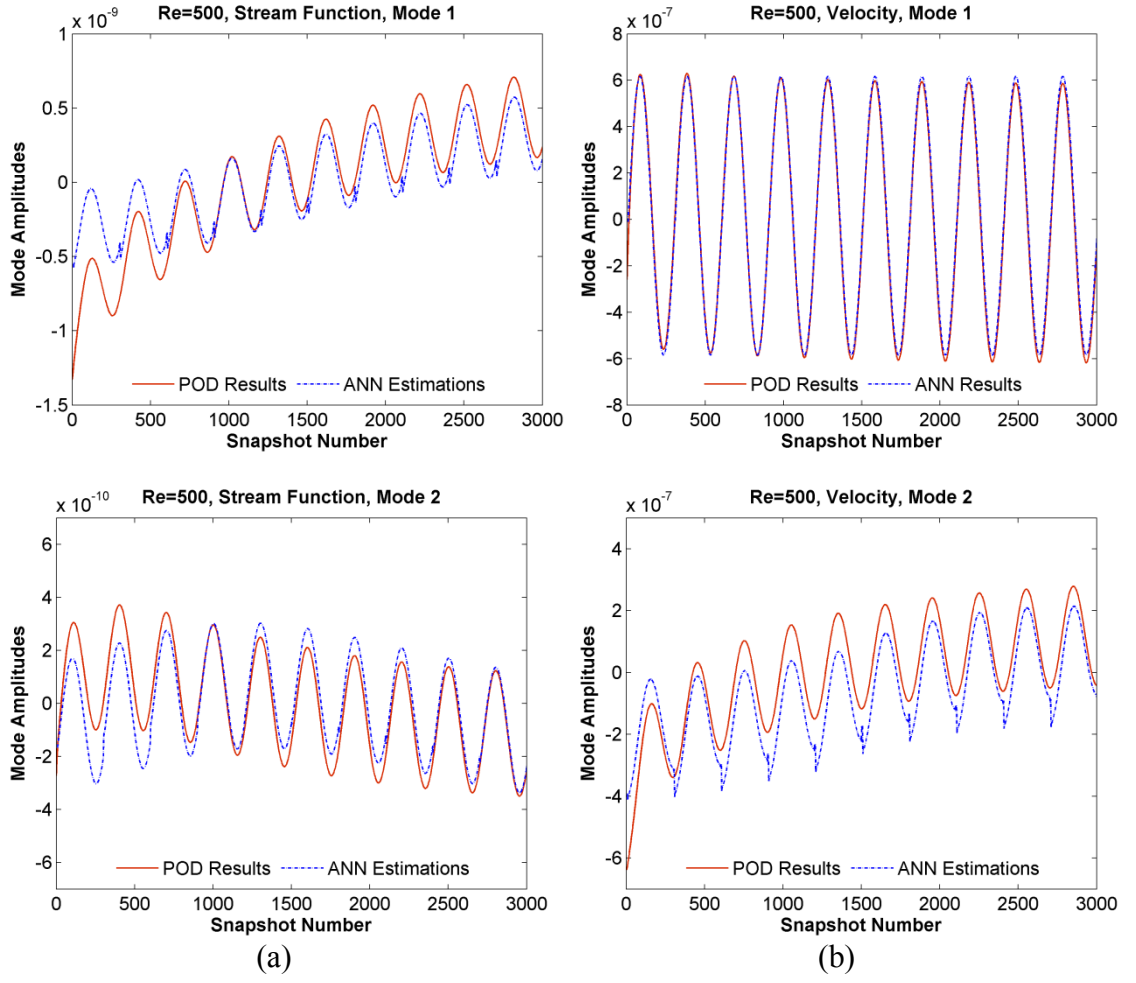
$Re=500$, $Re=1000$ ve $Re=5000$ test durumlarında en yüksek enerjili aşamalı değişim gösteren kiplerinin YSA tahminleri yapıldıktan sonra, daha önce elde edilmiş 10 ölçeklendirme verisi analizi yapılan Reynolds sayısında (Re) gözlemlenen ortalama hız ile çarpılıp $Re=10000$ durumundaki ortalama hız ile bölünerek tahmin sonuçlarına uygulanmıştır.

Şekil 4.18 $Re=10000$ test durumunda YSA tahminlerine ölçeklendirme uygulandıktan sonraki kip genliklerinin karşılaştırmalarını göstermektedir.

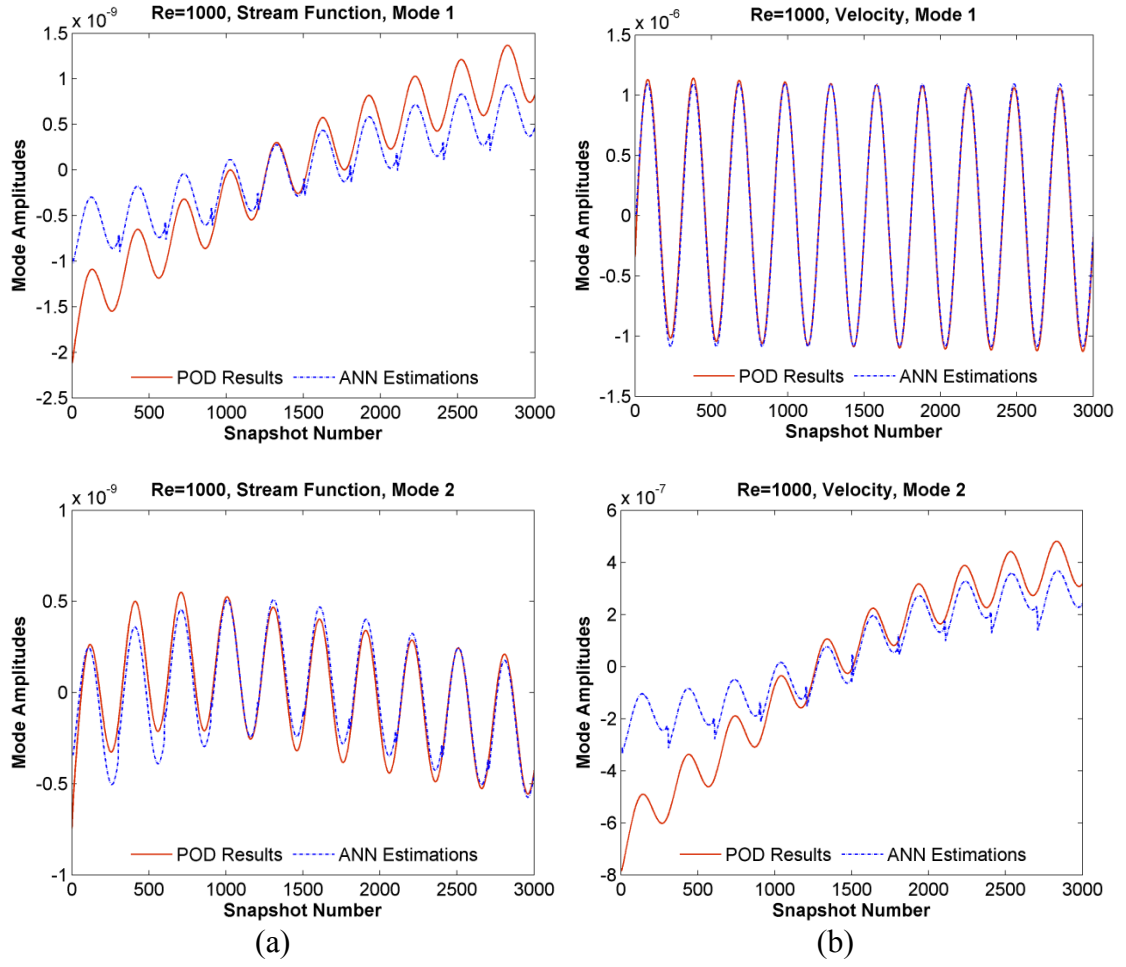
Şekiller 4.19, 4.20 ve 4.21 sırasıyla $Re=500$, $Re=1000$ ve $Re=5000$ test durumları için zaman gecikmesinin 8, gizli katman nöron sayısının 25 olarak alındığı Mekansal-Zamansal Zamanda-Gecikmeli Çok Katmanlı Algılayıcı YSA yapısı sonucunda tahmin edilen ve sadece aşamalı değişim gösteren kip genlikleri için buluşsal ölçeklendirmenin uygulandığı, esas kip genlikleri ile tahmin edilen kip genliklerinin karşılaştırmalarını göstermektedir.



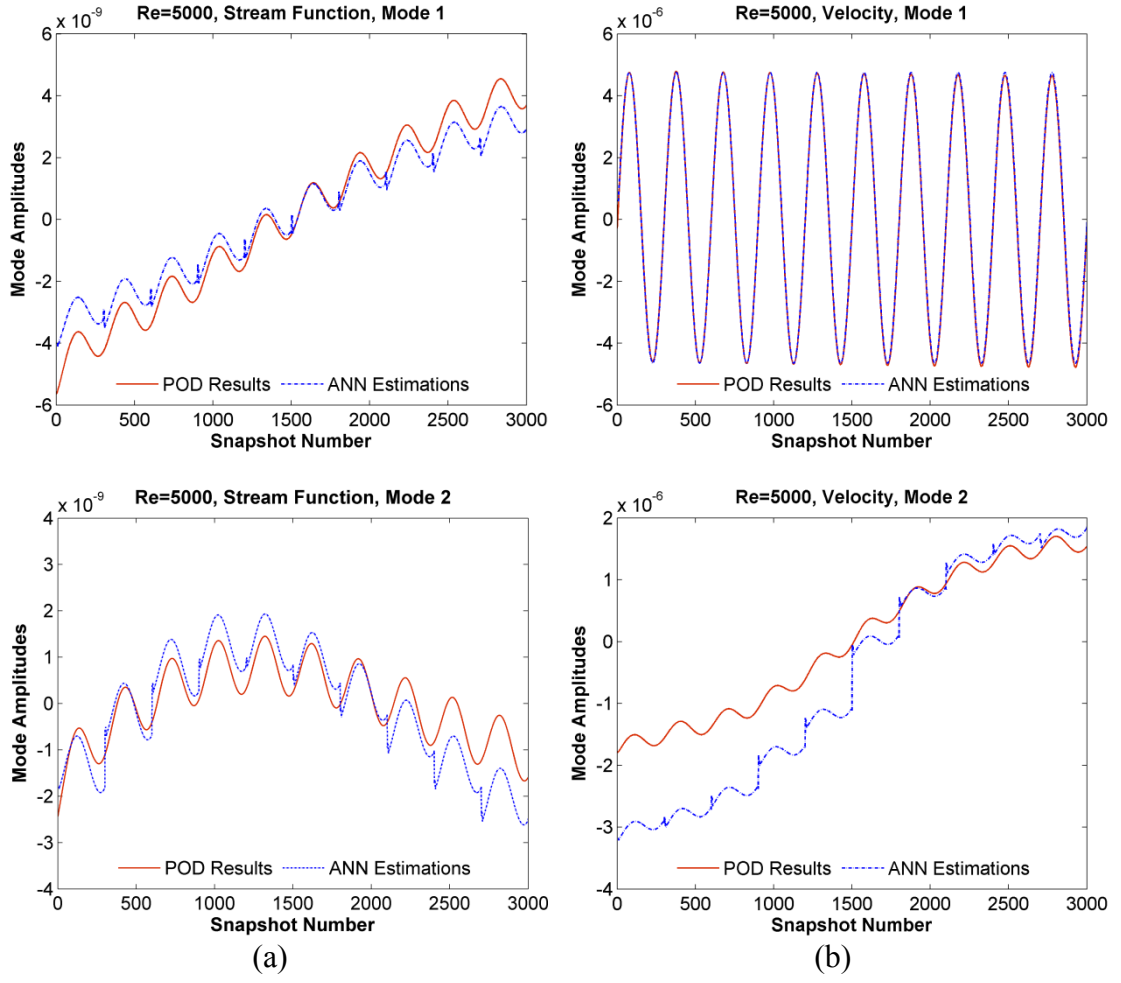
Şekil 4.18. Re=10000 test durumu için a) akım fonksiyonu ve b) x-yönü hız verilerinin DAY analizleri sonucunda elde edilen esas kip genlikleri ile YSA uygulaması tahmin edilen ve ölçeklendirme yapılmış kip genliklerinin karşılaştırması



Şekil 4.19. Re=500 test durumu için a) akım fonksiyonu ve b) x-yönü hız verilerinin DAY analizleri sonucunda elde edilen esas kip genlikleri ile YSA uygulaması tahmin edilen ve ölçeklendirme yapılmış kip genliklerinin karşılaştırması



Şekil 4.20. Re=1000 test durumu için a) akım fonksiyonu ve b) x-yönü hız verilerinin DAY analizleri sonucunda elde edilen esas kip genlikleri ile YSA uygulaması tahmin edilen ve ölçeklendirme yapılmış kip genliklerinin karşılaştırması



Şekil 4.21. Re=5000 test durumu için a) akım fonksiyonu ve b) x-yönü hız verilerinin DAY analizleri sonucunda elde edilen esas kip genlikleri ile YSA uygulaması tahmin edilen ve ölçeklendirme yapılmış kip genliklerinin karşılaştırması

5. SONUÇLAR VE YAPILMASI ÖNERİLEN ÇALIŞMALAR

Akış alanı içinde kalan cisimlerin arkasında oluşan periyodik girdapların ve bu periyodik girdaplara bağlı olarak gözlemlenen akış karakteristiklerinin kontrolü mühendislik uygulamaları açısından büyük önem taşımaktadır. Akışın temas ettiği parçalarda yarattığı sürüklenme, kaldırma ve titreşim gibi aerodinamik etkilerin büyüklükleri akış kontrolü ile değiştirilebilir ve iyileştirilebilir.

Bu çalışmada, Dikgen Ayrıştırma Yöntemi (DAY) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) yardımıyla potansiyel bir akış kontrolü stratejisi oluşturmak amacıyla, zamana bağlı iki boyutlu dairesel silindir üzerinde laminer ve türbülanslı rejimlerdeki akışlar ile zamana bağlı iki boyutlu sürülmüş kavite uygulamaları temel alınarak, akış alanında gözlemlenen etkin mekansal ve zamansal karakteristikler incelenmiş, asıl veri grubunun alt uzayı olarak nitelendirilen düşük mertebeli yaklaşımlar oluşturulmuş ve her iki uygulamada da değişik akış durumları için en yüksek etkinliğe sahip zamansal karakteristikler oluşturulan YSA modelleri ile tahmin edilmiştir.

Çalışma kapsamında, DAY iki boyutlu silindir etrafında laminer ($Re=100$) ve türbülanslı ($Re=20000$) rejimlerdeki akışlar ile Reynolds sayısının (Re) 100, 500, 1000, 5000 ve 10000 olduğu iki boyutlu sürülmüş kavite akışı için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanılarak elde edilmiş veri topluluklarının analiz edilmesinde bir ard işleme aracı olarak kullanılmıştır. Temelleri istatistiğe dayanan DAY uygulaması ile incelenen veri grubu içinde, genel anlamda mekana ve zamana bağlı kalıplardan oluşan tutarlı yapıların baskın özellikleri ve eğilimleri seçilip ortaya çıkarılmıştır. Akış alanında periyodik girdap oluşumu ile ilişkilendirilen fiziksel davranışın mekanda gözlemlenen etkin değişim karakteristikleri bir dizi kip (temel fonksiyon) ile ve zamanda gözlemlenen baskın değişim karakteristikleri ise bağıl kip genlikleri (zaman katsayılarının geçmişi) ile ifade edilmiştir.

İki boyutlu dairesel silindir uygulamasında, her iki akış rejimi için, HAD analizleri sonucunda elde edilmiş x-yönü hız verilerine DAY uygulanması ile silindirin arkasında kalan iz bölgesinde gözlemlenen akış yapıları ve karakteristikleri

incelenmiştir. Akış alanında mekana ve zamana bağlı olarak gözlemlenen baskın (etkin) yapılar ve eğilimler frekans içeriklerine, bir başka deyişle enerji içeriklerine göre ayrıştırılmıştır. Her bir DAY kipinin enerji içeriği, ilgili kipi iz bölgesindeki ana girdapların oluşum karakteristiklerinin betimlendiği verileri taşıma ihtimalini göstermektedir. Akış alanında enerji içeriği yüksek olan bölgelerin belirlenmesi gerçek zamanlı akış kontrolü yaklaşımı oluşturmada büyük önem taşımaktadır.

KontROLSÜZ ve kontrollü laminer akış test durumlarının DAY analizleri sonucunda, sadece en yüksek enerjili dört DAY kipinin dikkate alınmasıyla toplam enerji içeriğinin %99'u ifade edilmiştir. Her test durumu için kiplerin enerji içerikleri birinci kipten dördüncü kipe gidildikçe azalmaktadır; buna bağlı olarak, kiplerde barındırılan karakteristik girdapların boyutları da küçülmektedir. Laminer akış DAY analizi sonuçlarına göre, tüm deliklerin açık olduğu ve 0.5U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü akış test durumu haricinde, geriye kalan tüm test durumlarının hem toplam enerji içerikleri hem de enerji içeriklerinin bireysel olarak kiplere dağılımlarında belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir. Buna karşılık, tüm deliklerin açık olduğu ve 0.5U hızı ile hava üflemesinin yapıldığı kontrollü akış test durumunda hem toplam enerji içeriği diğer test durumlarına göre daha yüksektir hem de en yüksek enerjili kipe aktarılan enerji içeriği yüzdesi %50 seviyesine yükselmiştir.

KontROLSÜZ ve kontrollü laminer akışlar için uygulanan tüm test durumlarında elde edilen kiplerin genlikleri sinüsel salınım eğrileri şeklindedir. Zamanda periyodik olarak hareket eden bu eğriler, iki boyutlu silindirin arkasında kalan iz bölgesinde von Kármán girdap yolunu temsil eden girdapların var olduğunun ve bu girdapların akış yönünde akış alanında hareket ettiğinin ifadesidir. Kontrollü laminer akış test durumlarında, silindir yüzeyindeki deliklerden hava üfleme suretiyle, silindir etrafındaki hava akışına müdahale edilmiştir. Buna bağlı olarak, akış alanında gözlemlenen birincil ve ikincil düzeydeki girdap yapılarının oluşumunu ifade eden sinüsel salınım frekanslarının kaydığı ve sonuç olarak girdap saçıntısının geciktirildiği yargısı, en yüksek enerjili dört kipi bağlı kipi genliklerindeki sinüs eğrilerinin başlangıç ve bitiş noktalarının kaydığı gözlemlenmesi ile doğrulanmıştır.

İki boyutlu laminer akışlar için kullanılan DAY yaklaşımı, akış alanı içindeki bağımsız yapıları tanımada ve akış alanının gerçek zamanlı durum tahmininde başarılı sonuçlar verirken, türbülanslı akışların olduğu durumlarda, akış enerjisi daha hızlı bir şekilde küçük boyutlara aktarıldığından, akış enerjik ve rastgele olduğundan alışlagelmiş DAY yaklaşımının direkt olarak kullanılması özellikle akış kontrolü açısından bakıldığında verimli sonuçlar elde edilmesini engellemektedir. Bu sebepten dolayı, akış alanındaki yapıların ve karakteristiklerin büyüklüklerine göre ayrıştırılmasının önemli olduğu türbülanslı akış test durumlarının DAY analizlerinde, HAD simülasyonları sonucunda elde edilen veri grubuna öncelikle Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) uygulanarak filtreleme gerçekleştirilmiş ve silindirin arkasında kalan iz bölgesindeki büyük ölçekli türbülans yapılarının etkileri ayrıştırılmıştır.

Tüm türbülanslı akış test durumlarının HFD-DAY analizi sonuçlarına göre toplam enerji içeriğinin %98'den fazlasının en yüksek enerjiye sahip ilk iki kipi dikkate alınmasıyla karşılandığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, filtreleme sonrasında akış alanında bulunan küçük ölçekli türbülans yapılarının etkileri ayrıldığından, elde edilen kiplerdeki yapıların oldukça düzgün olduğu, bir başka deyişle akış kontrolü stratejisi amaçlarına uygun olduğu gözlemlenmiştir. Fiziksel olarak düzgün yapıların gözlemlendiği bu durum, HFD-DAY uygulaması ile silindir arkasında oluşan baskın özellikteki von Kármán girdaplarının ve enerjik yapıdaki türbülanslı akış rejiminde akış alanındaki hız değişiminin, düşük mertebeli alt uzay tanımlaması olarak verimli bir şekilde görüntülediğinin de bir ifadesidir.

Yukarıda belirtilen sonuçların haricinde, türbülanslı ve laminer akış test durumları için birtakım benzer sonuçlar gözlemlenmiştir. Örneğin, kiplerin enerji içerikleri birinci kipten dördüncü kipe gidildikçe azalmaktadır, en yüksek enerjili kiplerin bağlı kip genlikleri zamanda periyodik olarak hareket eden sinüsel salınım eğrileri şeklindedir ve kontrollü türbülanslı test durumlarında da birincil ve ikincil düzeydeki girdap yapılarının oluşumunu ifade eden sinüsel salınım frekanslarının kaydığı ve sonuç olarak girdap saçıntısının geciktirildiği sonuçları ortaktır.

Yapay Sinir Ağları (YSA) en temel işlem birimi nöronlar olan ve belirli bir grup girdiyi yapısında tanımlanan matematiksel ve istatistiksel fonksiyonları kullanarak çıktılara dönüştüren sistemlerdir. Kontrolsüz ve kontrollü laminer ve türbülanslı akış test durumları için YSA uygulamalarında, çok sayıda girdinin ve çok sayıda çıktının arasındaki doğrusal olmayan ilişkilerin verimli olarak gözlemlenmesine olanak tanıyan Mekansal-Zamansal Zamanda-Gecikmeli Çok Katmanlı Algılayıcı (Spatio-Temporal Time-Lagged Multi Layer Perceptron – MLP) tabanlı ağ yapısı kullanılmıştır. Her iki akış rejiminde kullanılmak üzere iki ayrı ağ yapısı oluşturulmuştur.

Ağ yapıları hazırlanırken zaman gecikmesi ve gizli katman nöron sayısı parametreleri değişik değerlere atanarak, hataların karekökünün ortalaması ve ortalama mutlak hatanın kıyaslanması ile ağ performansları denetlenmiştir. Ağ performanslarının analizleri sonucunda zaman gecikmesi parametresinin mertebesi laminer akış test durumları için 6, türbülanslı akış test durumları için 8 olarak belirlenmiştir. Her iki ağ için gizli katman nöron sayısı 25 olarak alınmıştır.

Gerçek zamanlı akış sistemlerinde, belirli bir akış kontrolü stratejisi oluşturmak için, sistemdeki zamana bağlı ana akış davranışlarının teşkil edildiği kip genliklerinin tahmini gereklidir. Çalışma kapsamında oluşturulan YSA yapısıyla laminer ve türbülanslı akışların tüm test durumları için akış alanında baskın özelliklerin ve eğilimlerin görüntülendiği en yüksek enerjili ilk iki kipi bağlı kip genlikleri ve tahminleri dikkate alınmıştır. Tahmin sürecinde dikkate alınan en yüksek enerjili iki kipi laminer akış test durumları için toplam enerji içeriği %94, türbülanslı akış test durumları için ise %98 seviyelerinde elde edilmiştir. Sezgisel olarak %90 düzeyini geçen bu değerler çalışma kapsamında incelenmek üzere yeterli bulunmuştur.

YSA tahmin analizlerinde, silindirik yüzeyine yerleştirilen 6 farklı sensörden gelen statik basınç verileri, ayrıca, her akış rejimi için seçilen spesifik test durumlarının DAY analizleri neticesinde elde edilen kip genliklerinin geçmişi girdi setleri olarak kullanılmıştır. Ağ eğitimi için kullanılan spesifik test durumları haricindeki diğer akış durumlarına ait kip genlikleri oluşturulan YSA yapıları aracılığıyla tahmin

edilmiştir. Kabul edilebilir düzeylerdeki tahmin hatalarının, periyodik sinüsel salınım yapan eğrilerin özellikle üst ve alt dönüş uçlarında toplandığı gözlemlenmiştir.

İki boyutlu dairesel silindir üzerinde yapılan uygulamalarda, laminar ve türbülanslı akışlar için 6 farklı konuma yerleştirilen sensörler ile silindir yüzeyindeki en yüksek aktifliğe sahip olan 6 noktadan statik basınç değerleri toplanmıştır. Etkin sensör konumları ve sayıları, her iki akış rejimi için silindir yüzeyindeki statik basınç dağılımını veren HAD analizi sonuçlarına tek boyutta alışlagelmiş DAY uygulaması sonucunda elde edilmiştir. Sensör yerleştirme çalışmaları kapsamında, her iki akış rejiminde, tüm deliklerin kapalı olduğu kontrolsüz ve tüm deliklerin açık olup 0.5U akış hızı ile üfleme yapıldığı en etkili kontrollü akış durumları ve bu durumların DAY analizi sonuçları dikkate alınmıştır. Analizler sonucunda, sırasıyla laminar ve türbülanslı akış durumları için elde edilen yüksek enerjili ilk iki ve ilk üç kipin minimum ve maksimum noktalarına karşılık gelen silindir yüzeyi açısı değerlerine sensörler yerleştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında incelenen, Reynolds sayısının (Re) 100, 500, 1000, 5000 ve 10000 olduğu zamana bağlı iki boyutlu sürülmüş kavite akışı uygulamasında, bir önceki uygulama konusu silindir üzerindeki akıştan farklı olarak, toplamda beş farklı akış durumu için sayısal çözümler yapılmıştır. İki boyutlu Navier-Stokes denklemleri, x-y düzleminde vortisite-akım fonksiyonu yaklaşımı kullanılarak ile Matlab yazılımı ile oluşturulan algoritma ile çözülmüştür.

Toplamda 3000 sayısal zaman adımının dikkate alındığı ve toplamda 10 sinüs periyodunun oluşturulduğu çözümlerde, kavite akış alanı 101×101 boyutlarındaki yapısal ağ kullanılarak incelenmiştir. Akım fonksiyonu ve x-y yönü hız verilerinin dikkate alındığı kavite akış alanında, artan Reynolds sayısı (Re) ile artan akışkan dolaşımı ile girdap merkez bölgesinin yer değiştirdiği, girdap derinliğinin arttığı, kavitenin alt köşelerinde kümelenen ikincil akış yapılarının kavitenin dikey kenarlarında yayıldığı ve daha küçük bir alana hapsedildiği gözlemlenmiştir.

Zamana bağılı iki boyutlu sürülmüş kavite akışı uygulaması test durumlarına yapılan DAY analizlerinde, akış alanında gözlemlenen her iki hız bileşeninin (x-y düzlemleri hızları) karakteristiklerini birlikte barındıran akım fonksiyonunun temel alındığı en yüksek enerjili dört kipin enerji içeriği %99 seviyelerinde olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşılık, x-yönü hız verilerinin analizlerinde aynı sayıda kip için toplam enerji içeriği değişik test durumları için %95 – %99 arasında değişmektedir. Her iki parametrenin temel alındığı DAY kiplerinde, kavite akış alanındaki girdapların oluşum aktiviteleri verimli bir şekilde gözlemlenmiştir.

Zamana bağılı değişimleri ifade eden bağılı kip genlikleri, iki farklı parametrenin temel alındığı akım fonksiyonu ve x-yönü hızı verilerinin analizlerinde, $Re=100$ test durumu için düzgün periyodik hareket sergilerken, diğer test durumlarında aşamalı değişim eğilimi göstermektedir. Değişik davranış eğilimleri gösteren kip genlikleri, fiziksel olarak, iki boyutlu kavite akış alanında ana ve ikincil girdap yapılarının oluştuğunun ve bu yapılarının şiddetlerinin zamanla değiştiğinin bir ifadesidir.

Zamana bağılı iki boyutlu sürülmüş kavite akışı uygulamasında kullanılan YSA yapısı iki boyutlu silindir üzerindeki uygulama kapsamında oluşturulan ağ yapıları ile benzerlik göstermektedir. Ancak, kavite akışında kullanılan YSA sisteminde sensörler yerine hareketli üst plakanın hız değişimi sistem girdisi olarak kullanılmıştır. Zaman gecikmesi mertebesinin 8, gizli katman nöron sayısının 25 olarak alındığı analizlerde, tüm test durumları için en yüksek enerjili iki kipin bağılı kip genlikleri tahmin edilmiştir. Düzgün periyodik hareket sergileyen kip genliklerinin tahmin sonuçlarında tahmin hatası daha az olurken, aşamalı değişim gösteren kip genliklerinin tahmin verimliliği daha düşüktür. Bu durum ağ eğitim sürecinde kullanılan spesifik test durumları ile tahmin edilmeye çalışılan test durumlarının kip genliklerindeki beklenmedik değişimlerden kaynaklanmaktadır.

Sonuç olarak, zamana bağılı iki boyutlu dairesel silindir üzerinde laminer ve türbülanslı rejimlerdeki akışlar ile zamana bağılı iki boyutlu sürülmüş kavite uygulamaları temel alındığı bu çalışma ile DAY ve YSA yardımıyla gerçek zamanlı bir akış kontrolü stratejisi oluşturmak için zaman gerektiren, uygulama maliyetlerinin

yüksek olduğu ve gerçek zamanlı akış kontrolünde sorunlara yol açan HAD simülasyonlarına gerek duyulmadan, akış alanının düşük mertebeli modellerinden yola çıkılarak, akışın durumunun yeterli düzeyde tahmin edilebileceği gösterilmiştir.

Yapılan çalışmalar gelecekte farklı incelemelerin önünü açmaktadır. Geliştirilen yöntemler değişik akış geometrilerinde, örneğin, sesüstü kavitelerde akış, uçak kanatları üzerinde akış, vb. uygulamalarda veya şu anki haliyle kapalı devre kontrol uygulamalarına uygun olacak şekilde düzenlenerek kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Cohen, K., Siegel, S., Seidel, J., Aradag, S., McLaughlin, T., Reduced Order Based Controller Design for Feedback Controlled Cylinder Wake, 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 2008-556, Nevada, U.S.A., 2008.
- [2] Gillies, E. A., Low Dimensional Control of the Circular Cylinder Wake, *Journal of Fluid Mechanics*, 371, 157-178, 1998.
- [3] Newman, A. J., Model Reduction via the Karhunen Loève Expansion Part 1 An Exposition, Institute for Systems Research, Technical Report No. 96-32, 1996.
- [4] Bergmann, M., Laurent, C., Brancher, J.P., Optimal Rotary Control of the Cylinder Wake Using Proper Orthogonal Decomposition Reduced Order Model, *Physics of Fluids*, 17, 2005.
- [5] Berkooz, G., Holmes, P., Lumley, J. L., The Proper Orthogonal Decomposition in the Analysis of Turbulent Flows, *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, 25, 539-575, 1993.
- [6] Haykin, S., *Neural Networks*, Macmillan College Printing Company, New Jersey, 1994.
- [7] Cao, Y., Zhu, J., Luo, Z., Navon, I., Reduced Order Modeling of the Upper Tropical Pacific Ocean Model Using Proper Orthogonal Decomposition, *Computer and Mathematics with Applications*, 52(8-9), 1373-1386, 2006.
- [8] Lumley, J.L., The Structure of Inhomogeneous Turbulent Flows, *Atmospheric Turbulence and Radio Propagation*, 166-178, 1967.
- [9] Holmes, P., Lumley, J.L., Berkooz, G., *Turbulence and Coherent Structures, Dynamical Systems and Symmetry*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1996.
- [10] Newman, A.J., Model Reduction via the Karhunen-Loève Expansion Part 2 Some Elementary Examples, Institute for Systems Research, Technical Report No. 96-33, 1996.
- [11] Chatterjee, A., An Introduction to the Proper Orthogonal Decomposition, Computational Science Section Tutorial, Department of Engineering Science and Mechanics, Pennsylvania State University, 2000.
- [12] Aubry, N., Holmes, P., Lumley, J.L., Stone, E., The Dynamics of Coherent Structures in the Wall Region of a Turbulent Boundary Layer, *Journal of Fluid Mechanics*, 192, 115-173, 1988.
- [13] O'Donnell, B.J., Helenbrook, B.T., Proper Orthogonal Decomposition and Incompressible Flow: An Application to Particle Modeling, *Computers and Fluids*, 36(7), 1174-1186, 2007.
- [14] Sen, M., Bhaganagar, K., Juttijudata, V., Application of Proper Orthogonal Decomposition (POD) to Investigate a Turbulent Boundary Layer in a Channel with Rough Walls, *Journal of Turbulence*, 8(41), 2007.
- [15] Connell, R., Kulasiri, D., Modeling Velocity Structures in Turbulent Floods Using Proper Orthogonal Decomposition, International Congress on Modeling and Simulation, Melbourne, Avustralya, Aralık 2005.

- [16] Lieu, T., Farhat, C., Lesoinne, M., Reduced-Order Fluid/Structure Modeling of a Complete Aircraft Configuration, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195(41-43), 5730-5742, 2006.
- [17] Cohen, K., Siegel, S., Seidel, J., McLaughlin, T., System Identification of a Low Dimensional Model of a Cylinder Wake, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit AIAA 2006-1411, Reno, Nevada, Ocak 2006.
- [18] Cohen K., Siegel, S., McLaughlin, T., A Heuristic Approach to Effective Sensor Placement for Modeling of a Cylinder Wake, *Computers and Fluids*, 35, 103-120, 2006.
- [19] Seidel, J., Siegel, S., Cohen, K., Becker, V., McLaughlin, T., Simulations of Three Dimensional Feedback Control of a Circular Cylinder Wake, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit AIAA 2006-1404, Reno, Nevada, Ocak 2006.
- [20] Siegel, S.G., Cohen, K., Seidel, J., McLaughlin, T., Proper Orthogonal Decomposition Snapshot Selection for State Estimation of Feedback Controlled Flows, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit AIAA 2006-1400, Reno, Nevada, Ocak 2006.
- [21] Siegel, S., Cohen, K., McLaughlin, T., Feedback Control of a Circular Cylinder Wake in Experiment and Simulation, 33rd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit AIAA 2003-3569, Orlando, Florida, Haziran 2003.
- [22] Ma, X., Karniadakis, G.E., A Low-Dimensional Model for Simulating Three-Dimensional Cylinder Flow, *Journal of Fluid Mechanics*, 458, 181-190, 2002.
- [23] Fitzpatrick, K., Feng, Y., Lind, R., Kurdila, A.J., Mikolaitis, D.W., flow Control in a Driven Cavity Incorporating Excitation Phase Differential, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 28, 63-70, 2005.
- [24] Erturk, E., Corke, T.C., Gokcol, C., Numerical Simulations of 2-D Steady Incompressible Driven Cavity Flow at High Reynolds Numbers, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 45, 747-774, 2005.
- [25] Perumal, D.A., Dass, A.K., Simulation of Incompressible Flows in Two-Sided Lid-Driven Square Cavities, *CFD Letters*, 2, 13-24, 2010.
- [26] Peng, Y.F., Shiau, Y.H., Hwang, R.R., Transition in a 2-D Lid-Driven Cavity Flow, *Computers and Fluids*, 32, 337-352, 2003.
- [27] Koblitz, T.W., Bechmann, A., Sørensen, N.N., The 2D Lid-Driven Cavity, Validation of CFD Code to Model Non-Neutral Atmospheric Boundary Layer Conditions, *Wind Energy Research*, erişim adresi: <http://windenergyresearch.org>, 2010.
- [28] Gracia, M.M., Reduced Models to Calculate Stationary Solutions for the Lid-Driven Cavity Problem, *M.Sc. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya – Barcelona Tech.*, Department of Aerospace Science and Technology, Barcelona, Spain, 2010.
- [29] Ahlman, D., Söderlund, F., Jackson, J., Kurdila, A., Shyy, W., Proper Orthogonal Decomposition for Time-Dependent Lid-Driven Cavity Flows, *Numerical Heat Transfer Part B: Fundamentals*, 42, 285-306, 2002.
- [30] Cazemier, W, Verstappen, R.W.C.P., Veldman, A.E.P., Proper Orthogonal Decomposition and Low-Dimensional Models for Driven Cavity Flows, *Physics of Fluids*, 10(7), 1685-1699, 1998.

- [31] Bishop, C.M., *Neural Networks and Their Applications*, Review of Scientific Instruments, 65(6), 1803-1832, 1994.
- [32] McCulloch, W., Pitts, W., A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity, *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 7, 115-133, 1943.
- [33] Rosenblatt, F., The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain, *Psychological Review*, 65, 1958.
- [34] Khataee, A.R., Zarei, M., Pourhassan, M., Bioremediation of Malachite Green from Contaminated Water by Three Microalgae: Neural Network Modeling, *Clean-Soil, Air, Water*, 38, 96-103, 2010.
- [35] Spencer, M., McCullagh, J., Whitfort, T., Reynard, K., An Application into Using Artificial Intelligence for Estimating Organic Carbon, *Proceedings of International Congress on Modeling and Simulation*, Melbourne, Australia, 2005.
- [36] Wu, C.H., McLarty, J.W., *Neural Networks and Genome Informatics*, Series on Methods in Computational Biology and Biochemistry, *Elsevier Science*, Oxford, 2002.
- [37] Samarasinghe, S., Kulasiri, D., Rajanayake, C., Chandraratne, M., Three Neural Network Application Case Studies in Biology and Natural Resource Management, *Proceedings of the 9th International Conference on Neural Information Processing*, Los Alamitos, California, U.S.A, 2002.
- [38] Jiang, D., Zhang, Y., Hu, X., Zeng, Y., Tan, J., Shao, D., Progress in Developing an ANN Model for Air Pollution Index Forecast, *Atmospheric Environment*, 38, 2004.
- [39] Chiang, Y.M., Chang, L.C., Chang, F.J., Comparison of Static Feedforward and Dynamic Feedback Neural Networks for Rainfall-Runoff Modeling, *Journal of Hydrology*, 290-297, 2004.
- [40] Ordonez, E., Samarasinghe, S., Torgeson, L., Neural Networks for Assessing Waste generation Factors and Forecasting Future Waste Generation in Chile, *Proceedings of the Waste and Recycle Conference*, Australia, 2004.
- [41] Chaturvedi, D.K., Mohan, M., Singh, R.K., Karla, P.K., Improved Generalized Neuron Model for Short-Term Load Forecasting, *Soft Computing*, 8, 2004.
- [42] Smith, M., *Neural Networks for Statistical Modeling*, *International Thompson Computer Press*, London, United Kingdom, 1996.
- [43] Xie G., Sunden B., Wang Q., Tang L., Performance Predictions of Laminar and Turbulent Heat Transfer and Fluid Flow of Heat Exchangers Having Large Tube-Row by Artificial Neural Networks, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 2484-2497, 2009.
- [44] Shayya, W.H., Sablani S.S., An Artificial Neural Network for Non-iterative Calculation of the Friction Factor in Pipeline Flow, *Computers and Electronics in Agriculture*, 21, 219-228, 1998.
- [45] Zhang, L., Akiyama, M., Huang, K., Sugiyama H., Ninomiya, N., Estimation of Flow Patterns by Applying Artificial Neural Networks, *Information Intelligence and Systems*, 1-4, 1358-1363, 1996.

- [46] Siegel, S., Cohen, K., Seidel, J., Aradag, S., McLaughlin, T., Low Dimensional Development using Double Proper Orthogonal Decomposition and System Identification, 4th Flow Control Conference, AIAA 2008-4193, Seattle, Washington, 2008.
- [47] Athanasios, P., Unnikrishna Pillai, S., Probability, Random Variables and Stochastic Processes with Errata Sheet, *McGraw Hill Science/Engineering/Math*, New York, 2001.
- [48] Deane, A.E., Kevrekidis, I.G., Karniadakis, G.E., Orszag, S.A., Low-Dimensional Models for Complex Geometry Flows Application to Grooved Channels and Circular Cylinders, *Physics of Fluids*, 3, 2337-2354, 1991.
- [49] Lall, S., Marsden, J.E., Glavaski, S., A Subspace Approach to Balanced Truncation for Model Reduction of Nonlinear Control Systems, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 12, 519-535, 2002.
- [50] Zhang, Y., Henson, M.A., Kevrekidis, Y.G., Nonlinear Model Reduction for Dynamic Analysis of Cell Population Models, *Chemical Engineering Science*, 58, 429-445, 2003.
- [51] Ly, H.V., Tran, H.T., Modeling and Control of Physical Processes Using Proper Orthogonal Decomposition, *Mathematical and Computer Modeling*, 33, 223-236, 2001.
- [52] Sanghi, S., Hasan, N., Proper Orthogonal Decomposition and Its Applications, *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 6, 120-128, 2011.
- [53] Smith, T.R., Moehlis, J., Holmes, P., Low Dimensional Modeling of Turbulence Using the Proper Orthogonal Decomposition: A Tutorial, *Nonlinear Dynamics*, 41, 275-307, 2005.
- [54] Sirovich, L., Turbulence and the Dynamics of Coherent Structures Part 1 Coherent Structures, *Quarterly Applied Mathematics*, 45(3), 561-571, 1987.
- [55] Mehrotra, K., Chilukuri, K., M., Ranka, S., Elements of Artificial Neural Networks, *The MIT Press*, 2000.
- [56] Samarasinghe S., Neural Networks for Applied Sciences and Engineering, From Fundamentals to Complex Pattern Recognition, *Auerbach Publications Taylor and Francis Group*, 2006.
- [57] Cryan, D., Shatil, S., Mayblin, B., Mantık, *NTV Yayınları*, İstanbul, 2010.
- [58] Efe M.Ö., Kaynak O., Yapay Sinir Ağları ve Uygulamaları, *Boğaziçi Üniversitesi Yayınları*, İstanbul, 2004.
- [59] Freeman, W.H., Mind and Brain, Readings from Scientific American Magazine, New York, 1993.
- [60] Eberhart, R.C., Dobbins, R.W., Neural Networks PC Tools: A Practical Guide, *Academic Press*, San Diego, CA, 1990.
- [61] “Biyolojik bir nöron hücresinin şematik gösterimi”, erişim adresi: <http://www.ieacell.org/images/images/Neuron.jpg>, Ekim 2010.
- [62] “NeuroAI, Artificial Neural Networks”, erişim adresi: <http://www.learnartificialneuralnetworks.com>, Eylül 2010.
- [63] Nørgaard, M., Ravin, O., Poulsen, N.K., Hansen, L.K., Neural Networks for Modeling and Control of Dynamic Systems, *Springer*, London, 2000.
- [64] Gurney, K., An Introduction to Neural Networks, *CRC Press*, 1997.

- [65] “The Homepage of Magnus Nørgaard”, erişim adresi: <http://www.iau.dtu.dk/~pmn/>, Ekim 2010.
- [66] Apaçoğlu, B., 2010, Silindir Üzerindeki Laminer ve Türbülanslı Akışın Kontrolsüz ve Kontrollü HAD Analizleri, *Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [67] Aradag, S., Unsteady Vortex Structure behind a Three Dimensional Turbulent Cylinder Wake, *Journal of Thermal Science and Technology*, 29(1), 91-98, 2009.
- [68] Aradag, S., Siegel S., Jürgen S., Cohen, K., McLaughlin T., Filtered POD-Based Low Dimensional Modeling of the 3D Turbulent Flow Behind a Circular Cylinder, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, doi:10.1002/flid.2238, 2010.
- [69] Prazenica, R., Kudila, A.J., Vignola, J.F., Spatial Filtering and Proper Orthogonal Decomposition of Scanning Laser Doppler Vibrometry Data for the Nondestructive Evaluation of Frescoes, *Journal of Sound and Vibration*, 304(3-5), 735-751, 2007.
- [70] Aubry, N., Holmes, P., Lumley, J., Stone, E., The Dynamics of Coherent Structures in the Wall Region of a Turbulent Boundary Layer, *Journal of Fluid Mechanics*, 192, 115-173, 1988.
- [71] Smith, T.R., Moehlis, J., Holmes, P., Low Dimensional Models for Turbulent Plane Couette Flow in a Minimal Flow Unit, *Journal of Fluid Mechanics*, 538, 71-110, 2005.
- [72] Johansson, P.B., George, W., Woodward, S.H., Proper Orthogonal Decomposition of an Axisymmetric Turbulent Wake behind a Disk, *Physics of Fluids*, 14:2508, doi: 10.1063/1.1476301, 2002.
- [73] Gamard, S., George, W., Application of a ‘Slice’ Proper Orthogonal Decomposition to the Far Field of an Axisymmetric Turbulent Jet, *Physics of Fluids*, 14:2515, doi: 10.1063/1.1471875, 2002.
- [74] Dowell, E.H., Hall, K.C., Modeling of Fluid Structure Interaction, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 33, 445-490, doi:10.1146/annurev.fluid.33.1.445 2001.
- [75] Attar, P.J., Dowell, E.H., White, J.R., Thomas, J.P., Reduced Order Nonlinear System Identification Methodology, *AIAA Journal*, 44(8), 1895-1904, 2006.
- [76] Tadmor, G., Bissex, D., Noack, B.R., Morzynsky, M., Colonius, T., Taira, K., Temporal-Harmonic Specific POD Mode Extraction, 4th Flow Control Conference, AIAA paper 2008-4190, Seattle, Washington, U.S.A., 2008.
- [77] Siegel, S., Aradag, S., Seidel, J., Cohen, K., McLaughlin, T., Low Dimensional POD Based Estimation of 3D Turbulent Separated Flow, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA Paper 2007-0112, Reno, Nevada, U.S.A., 2007.
- [78] Aradag, S., Siegel, S., Seidel, J., Cohen, K., McLaughlin, T., Filtered POD Based Estimation of 3D Turbulent Separated Flows, 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA Paper 2008-0554, Reno, Nevada, U.S.A., Haziran 2008.
- [79] Asmar, N.H., Partial Differential Equations with Fourier Series and Boundary Value Problems, 2nd Edition, *Prentice Hall Publishing*, Upper Saddle River, New Jersey, 2005.

- [80] De Noyer, B., 1999, Tail Buffet Alleviation of High Performance Twin Tail Aircraft using Offset Piezoceramic Stack Actuators and Acceleration Feedback Control, *Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Aerospace Engineering, Atlanta, Georgia.*
- [81] Seidel, J., Cohen, K., Aradag, S., Siegel, S., McLaughlin, T., Reduced Order Modeling of a Turbulent Three Dimensional Cylinder Wake, 37th American Institute of Aeronautics and Astronautics Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Miami, Florida, U.S.A., 2007.
- [82] Cybenko, G., Neural Networks in Computational Science and Engineering, *IEEE Computational Science and Engineering*, 3, 1, 36-42, 1996.
- [83] Matyka, M., 2004, Solution to Two-Dimensional Incompressible Navier-Stokes Equations with SIMPLE, SIMPLER and Vorticity-Stream Function Approaches, Driven-Lid Cavity Problem: Solution and Visualization, University of Wroclaw, Computational Physics Section of Theoretical Physics, Polonya.
- [84] Tannehill, J.C., Anderson, D.A., Pletcher, R.H., Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, 2nd Edition, *Taylor & Francis*, 1997.

EK 1: Laminer ve Türbülanslı Akış Test Durumlarında Kullanılan ve Matlab Yazılımı ile Oluşturulan Alışlagelmiş Dikgen Ayrıştırma Yöntemi (DAY) Algoritması

Aşağıda örnek olarak gösterilen kodlar kontrolsüz laminer akış test durumu için çözüm üretmektedir. Diğer laminer ve türbülanslı akış test durumlarının DAY uygulamalarında temel çözüm algoritması aynı olmakla beraber, dosya okuma vb. kısımlarda değişiklikler bulunmaktadır.

```
%% Identity
=====
%
%           CONVENTIONAL SNAPSHOT-BASED
%           PROPER ORTHOGONAL DECOMPOSITION METHOD
%           APPLICATION ON TWO-DIMENSIONAL LAMINAR FLOW DATA
%
%                   -o-
%           TOBB UNIVERSITY OF ECONOMICS & TECHNOLOGY
%           DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
=====
%
%           |           Prepared By           |
%           |   M.Sc. Student Akin PAKSOY   |
%           |   apaksoy@etu.edu.tr         |
%           |=====|
%           |           Advisor           |
%           | Assist. Prof. Dr. Selin ARADAG |
%           |   saradag@etu.edu.tr         |
%           |=====|
%
%           FLOW_LAM_POD_CAS1.M
=====
%% Notification to User
% Menu Options
clc
clear all
close all
choice = menu('ALL SLOTS CLOSED CASE:',...
             'START',...
             'QUIT APPLICATION');
if choice==1
=====
%% Preparation of Matlab for Execution
c=fix(clock);
fprintf(''),disp('=====');
fprintf(''),disp('CONVENTIONAL SNAPSHOT-BASED');
fprintf(''),disp('PROPER ORTHOGONAL DECOMPOSITION METHOD');
fprintf(''),disp('APPLICATION ON 2D LAMINAR FLOW DATA');
fprintf(''),disp('TOBB UNIVERSITY OF ECONOMICS & TECHNOLOGY');
fprintf(''),disp('DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING');
fprintf(''),disp('=====');
fprintf('POD method initiated at %2i.%2i.%2i\n\n',c(4),c(5),c(6));
fprintf(''),disp('RUNNING: All SLOTS CLOSED CASE');
```

```

%% Data Collection for Analysis
tic
h=waitbar(0,'Collecting data, please wait...');
k=1;
total=1800;
Data=zeros(8181,3,1800);
for i=7201:9000
    FN=['F:\RD Analyses\Laminar Flow POD\All
Closed\Data\',num2str(i),'.dat'];
    New_Data=importdata(FN);
    Data(:,:,k)=New_Data.data;
    k=k+1;
    waitbar(k/total);
end
close(h);
disp('Data importing process...
Successful');
%% Arrangement of Imported Data
[Y,X]=meshgrid(18:0.05:22,20.5:0.05:25.5);
clear a b i j plotter fname
h=waitbar(0,'Arranging data, please wait...');
for j=1:1800
    a=1;
    b=101;
    for i=1:81
        A(:,i,j)=Data(a:b,3,j);
        a=a+101;
        b=b+101;
    end
    waitbar(j/1800);
end
close(h);
plotter=figure(1);
surf(X,Y,A(:,:,1800))
title('Laminar Flow Original Data, Snapshot No:1800, Surface
Figure')
xlabel('X, m')
ylabel('Y, m')
zlabel('X-Velocity, m/s')
colorbar
colormap(jet)
grid on
fname='F:\RD Analyses\Laminar Flow POD\All
Closed\Figures\OrgSurface';
hgsave(plotter,fname);
clear plotter fname
plotter=figure(2);
contourf(X,Y,A(:,:,1800))
title('Laminar Flow Original Data, Snapshot No:1800, Contour
Figure')
xlabel('X, m')
ylabel('Y, m')
colorbar
colormap(jet)
grid off
fname='F:\RD Analyses\Laminar Flow POD\All
Closed\Figures\OrgContour';
hgsave(plotter,fname);

```

```

disp('Data arrangement process...
Successful');
disp('Mesh grid structure initiation...
Successful');
disp('Plotting original data...
Successful');
%% Pre Study for POD Method
clear prompt dlg_title num_lines def answer
prompt = {'Enter the desired total mode number.'};
dlg_title = 'User Input';
num_lines = 1;
def = {'4'};
answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
UserModNumber = str2double(answer);
M=1800;          % Number of total snapshots
N=101*81;       % Number of spatial points in each snapshot
% Determination of the average snapshot matrix and modification
clear k
New_A=zeros(101,81);
V=zeros(101,81,1800);
h=waitbar(0,'Adding snapshots, please wait...');
for k=1:M
    New_A=New_A+A(:,:,k);          % Addition of snapshots
    waitbar(k/M);
end
close(h);
U_Mean=New_A/M;                    % Determination of the mean matrix
clear k
h=waitbar(0,'Modifying snapshots, please wait...');
for k=1:M
    V(:,:,k)=A(:,:,k)-U_Mean;      % Subtracting mean value from each
    element of the ensemble
    waitbar(k/M);
end
close(h);
disp('Pre-study for POD method...
Successful');
%% Determination of the covariance matrix
C_Temp3=zeros(101,81);
C=zeros(101,81);
clear i j
h=waitbar(0,'Generating covariance matrix, please wait...');
for i=1:M
    for j=1:M
        C_Temp1=V(:,:,i).*V(:,:,j);
        C_Temp2=sum(C_Temp1);
        C_Temp3(i,j)=sum(C_Temp2);
        C(i,j)=(0.05^2/M)*C_Temp3(i,j);
    end
    waitbar(i/M);
end
close(h);
disp('Determination of the covariance matrix...
Successful');
%% Eigen Value Decomposition and Energy Distribution
[EVector,EValue,dummy]=svd(C);
[T_EValue,Order]=sort(diag(EValue));
TotalEnergy=sum(T_EValue);

```

```

clear i
EnergyDistribution=zeros(M,1);
h=waitbar(0,'Calculating energy distribution, please wait...');
for i=1:M
    EnergyDistribution(i,1)=T_EValue(i,1)/TotalEnergy;
    waitbar(i/M);
end
close(h);
disp('Eigen value decomposition and energy distribution...
Successful');
%% Determination of the Basis Functions
clear r k n
r=UserModNumber;
Phi_Mode=zeros(101,81,r);
h=waitbar(0,'Generating modes, please wait...');
for k=1:r
    Phi=zeros(101,81);
    for n=1:M
        Phi=Phi+(EVector(n,k)/sqrt(EValue(k,k))*V(:, :, n));
    end
    Phi_Mode(:, :, k)=Phi;
    waitbar(k/r);
end
close(h);
disp('Determination of the basis functions...
Successful');
%% Graphing Modes
h=waitbar(0,'Graphing modes, please wait...');
for i=1:r
    clear plotter fname
    plotter=figure(i+2);
    contourf(X,Y,Phi_Mode(:, :, i));
    title(['Laminar Flow - Mode ', num2str(i)])
    xlabel('X, m')
    ylabel('Y, m')
    colorbar
    colormap(jet)
    grid off
    fname=['F:\RD Analyses\Laminar Flow POD\All
Closed\Figures\Mode', num2str(i)];
    hgsave(plotter, fname);
    waitbar(i/r);
end
close(h);
disp('Plotting modes...
Successful');
%% Determination of the Time Coefficients
clear r
r=UserModNumber;
New_Phi_Mode = zeros(101*81,r);
TimeC=zeros(r,M);
h=waitbar(1,'Modifying modes, please wait...');
for i=1:r
    Temporary_Mode=Phi_Mode(:, :, i);
    New_Phi_Mode(:, i)=Temporary_Mode(:);
    waitbar(i/r);
end
close(h);

```

```

h=waitbar(1,'Estimating time coefficients, please wait...');
for i=1:M
    Selected_Data_Ensemble=V(:, :, i);
    TimeC(:, i)=New_Phi_Mode\Selected_Data_Ensemble(:);
    waitbar(i/M);
end
close(h);
disp('Determination of the time coefficients...
Successful');

%% Reconstruction
clear t i
r=UserModNumber;
h=waitbar(1,'Reconstructing, please wait...');
for t= 1:M
    RDE(:, :, t)=U_Mean;
    for i=1:r
        RDE(:, :, t)=RDE(:, :, t)+(Phi_Mode(:, :, i)*TimeC(i, t));
    end
    waitbar(t/M);
end
close(h);
disp('Reconstruction process...
Successful');
%% Comparison Study
clear prompt dlg_title num_lines def answer
prompt = {'Do you want to make comparison with the original data?
Answer must be "1" for Yes or "0" for No.'};
dlg_title = 'User Input';
num_lines = 1;
def = {'1'};
answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
UserDefinition = str2double(answer);
if UserDefinition==1
    clear prompt dlg_title num_lines def answer plotter fname
    prompt = {'Enter the snapshot number (1 to 1800) you needed to
compare.'};
    dlg_title = 'User Input';
    num_lines = 1;
    def = {'1800'};
    answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
    UserAction = str2double(answer);
    clear r
    r=UserModNumber;
    plotter=figure(3+r);
    surf(X,Y,A(:, :, UserAction));
    i=UserAction;
    title(['Laminar Flow, Reconstructed Surface Figure, Snapshot
Number:', num2str(i)])
    xlabel('X, m')
    ylabel('Y, m')
    zlabel('X-Velocity, m/s')
    colorbar
    colormap(jet)
    grid on
    fname='F:\RD Analyses\Laminar Flow POD\All
Closed\Figures\RecSurface';
    hgsave(plotter, fname);

```

```

clear plotter fname
plotter=figure(4+r);
    contourf(X,Y,RDE(:,:,UserAction));
    title(['Laminar Flow, Reconstructed Contour Figure, Snapshot
Number:', num2str(i)])
    xlabel('X, m')
    ylabel('Y, m')
    zlabel('X-Velocity, m/s')
    colorbar
    colormap(jet)
    grid off
    fname='F:\RD Analyses\Laminar Flow POD\All
Closed\Figures\RecContour';
    hgsave(plotter,fname);
    % Calculation of the Maximum Value and Error
    S1_temp=max(A(:,:,UserAction));
    S1=max(S1_temp,[],2);
    S2_temp=max(A(:,:,UserAction));
    S2=max(S2_temp,[],2);
    VmaxError=(abs(S2-S1)/S1)*100;
disp('');
disp('Maximum (Vmax) Error Value for the User Selected Time
Value')
disp(VmaxError)
disp('');
clear prompt dlg_title num_lines def
prompt = {'Do you want to see the error matrix? Answer must be
"1" for Yes or "0" for No.'};
dlg_title = 'User Input';
num_lines = 1;
def = {'1'};
answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
TakeDecision = str2double(answer);
if TakeDecision==1
    ErrorMatrix=RDE(:,:,UserAction)-A(:,:,UserAction);
    disp('Error Matrix for the User Selected Time Value')
    disp(ErrorMatrix)
disp('');
disp('You have reached the end.')
disp('');
else
disp('');
disp('You have reached the end.')
disp('');
end
else
disp('You have reached the end.')
disp('');
end
disp('Comparison process...
Successful');
%% Check Orthonormality
clear i j
for i=1:r
    for j=1:r
OC(i,j)=(sum(sum(Phi_Mode(:,:,i).*Phi_Mode(:,:,j))))*((0.05^2)/M);
end
end
end

```

```

disp('Orthonormality Check Results:');
disp('');
disp(OC)
disp('');
%% Additional Graphs
j=1;
for i=1800:-1:1
    Temp(j,1)=EnergyDistribution(i,1);
    EnergyContent(j,1)=Temp(j,1);
    j=j+1;
end
clear plotter fname
plotter=figure(5+r);
clear xaxis
xaxis=1:10;
plot(xaxis,EnergyContent(1:10,1))
title('All Slots Closed Case')
xlabel('Mode Number')
ylabel('Energy Content, x 100%')
grid on
fname='F:\RD Analyses\Laminar Flow POD\All
Closed\Figures\EnergyContent';
hgsave(plotter,fname);
clear plotter fname
plotter=figure(6+r);
xaxis=1:1800;
plot(xaxis,TimeC)
title('All Slots Closed Case')
xlabel('Snapshot Number')
ylabel('Mode Amplitude')
legend('Mode 1','Mode 2','Mode 3','Mode 4')
grid on
fname='F:\RD Analyses\Laminar Flow POD\All
Closed\Figures\ModeAmplitudes';
hgsave(plotter,fname);
toc
%=====
end
if choice==2
    toc
    msgbox('GoodBye','POD Application','Help');
    error('Application terminated by user.');
```

EK 2: Türbülanslı Akış Durumlarında Kullanılan ve Matlab Yazılımı ile Oluşturulan Yapay Sinir Ağı (YSA) Algoritması

Aşağıda örnek olarak gösterilen kodlar Nørgaard [65] tarafından Matlab yazılımı kullanılarak hazırlanmış YSA araç kutusu kodlarını bir araya getiren kısmı göstermektedir ve kontrolsüz türbülanslı akış test durumu için çözüm üretmektedir. Aşağıda verilen bölüm haricinde, Nørgaard [65] tarafından oluşturulmuş YSA araç kutusu diğer laminer ve türbülanslı akış test durumlarının YSA uygulamalarında kullanılırken, araç kutusunun çeşitli kısımlarında değişiklikler yapılmıştır.

```
%% IDENTITY
%=====
%                               Sensor Pressure Data Arrangement
% This code is written to analyze pressure data taken around the
% cylinder surface. Input1 to ANN is provided from sensor pressure
% data.
%=====
%% Preparation for Execution
clc
clear all
close all
%% Data Collection
tic
h=waitbar(0,'Processing, please wait...');
k=1;
total=1337;
Temp_Data=zeros(360,1337);
A=zeros(360,1337);
for i=6686:8022
    FN=['F:\RD Analyses\Turbulent Flow SENSOR\All
Closed\Data\static-pressure-',num2str(i)];
    New_Data=importdata(FN);
    Temp_Data=New_Data.data;
        clear p
        clear s
        s=1;
        for p=360:-1:1
            A(s,k)=Temp_Data(p,4);
            s=s+1;
        end
        A(:,k)=A(:,k)';
        A(:,k)=A(:,k)+872.36;
        k=k+1;
        waitbar(k/total);
    end
close(h);
%% Specification of Data for Sensors
% Sensor angles : 87°, 134°, 184°, 213°, 224°, 274° - totally 6
sensors
```



```

SensorPressureData=[A(87,:);A(134,:);A(184,:);A(213,:);A(224,:);A(27
4,:)];
save('SensorPressureData','SensorPressureData')
%% End
%=====
%
%               ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS
%       APPLICATION ON TWO-DIMENSIONAL TURBULENT FLOW DATA
%               TRAINING AND ESTIMATION MODULE
%               -o-
%       TOBB UNIVERSITY OF ECONOMICS & TECHNOLOGY
%       DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
%=====
%
%               |           Prepared By           |
%               | M.Sc. Student Akin PAKSOY      |
%               | apaksoy@etu.edu.tr             |
%               |-----|
%               |           Advisor              |
%               | Assist. Prof. Dr. Selin ARADAG |
%               | saradag@etu.edu.tr            |
%=====
%
%               ANN_PARENT_MODULE.M
%               for turbulent flow all slots closed
%=====
%% PARENT MODULE
clear all
close all
clc
tic
c=fix(clock);
fprintf(''),disp('=====');
fprintf(''),disp('ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS');
fprintf(''),disp('APPLICATION ON 2D TURBULENT FLOW DATA');
fprintf(''),disp('TRAINING AND ESTIMATION MODULE');
fprintf(''),disp('=====');
fprintf('ANN_parent_module initiated at
%2i.%2i.%2i\n\n',c(4),c(5),c(6));
% Menu Options
choice = menu('Please choose to continue:',...
             'Start ANN Training',...
             'Go Back to the Main Menu',...
             'Quit Application');
% Take a Decision
if choice==1
%=====
%       Neural Network Training Process
%=====
%       Training is done by using Levenberg-Marquardt backpropagation.
%       The function NNARXM is used because it enables to handle
multi-output systems.
%       The network contains one hidden layer and one linear output
layer.
% Time delay                = 2,4,6,8,10
% Hidden neuron number      = 10
% Training process data     = 668 time steps of sensor pressure data
%                           = 668 time steps of time coefficients
obtained from POD results
% This part uses the function ANN_training_module.m
c=fix(clock);

```

```

    fprintf('
    fprintf('ANN training process initiated at
%2i.%2i.%2i\n\n',c(4),c(5),c(6));
load SensorPressureData.mat
load TimeC.mat
TD=input('Enter a time delay value: ');
HN=input('Enter hidden neuron number: ');
SPD=SensorPressureData;           % TimeSignalsU
TC=TimeC(1:2,:);                 % TimeCoeff
disp('Data collection and management      --->
SUCCESSFUL')
NN_TD_HN = ANN_training_module(SPD(:,1:668), TC(:,1:668),TD,HN);
=====
% Set up Simulation Sensor Pressure Data (Sim_SPD)
=====
Sim_SPD=importdata('SensorPressureData_Sim.mat');
Sim_TC=importdata('TimeC_Sim.mat');
=====
% Neural Network Estimation Process
=====
% Sub Menu Options
subchoice = menu('Please choose to continue:',...
                'Start ANN Estimation with Original Data',...
                'Start ANN Estimation with Simulation Data',...
                'Quit Application');
    if subchoice==1
        c=fix(clock);
        fprintf('
        fprintf('ANN estimation process initiated at
%2i.%2i.%2i\n\n',c(4),c(5),c(6));
        [EstModeAmps, MeanErrors, ErrorSignals]=...
            ANN_estimation_module(NN_TD_HN,SPD,TC);
        disp('Estimation process          --->
SUCCESSFUL')
    elseif subchoice==2
        % Trial Simulation Data
        c=fix(clock);
        fprintf('
        fprintf('ANN estimation process initiated at
%2i.%2i.%2i\n\n',c(4),c(5),c(6));
        [EstModeAmps, MeanErrors, ErrorSignals]=...
            ANN_estimation_module(NN_TD_HN,Sim_SPD,TC);
        disp('Estimation process          --->
SUCCESSFUL')
    elseif subchoice==3
        msgbox('GoodBye','POD Application','Help');
        disp('Application terminated by user.');
```

```

    end
=====
% Plot of Results
=====
    if subchoice==1
        % Plot the original time coefficients
        figure('Name','ANN Simulation Plot
Window','NumberTitle','off')
        Time=1:1:1337;
        plot(Time,TC')

```

```

        title('Time Delay=N/A, Hidden Neuron Number= N/A, Simulation
for Original Data')
        hold on
        % Plot ANN estimation results
        plot(Time(TD:end),EstModeAmps,'x')
    elseif subchoice==2
        % Plot the original time coefficients
        figure('Name','ANN Simulation Plot
Window','NumberTitle','off')
        Time=1:1:1337;
        title('Time Delay= N/A, Hidden Neuron Number= N/A,
Simulation for Simulation Data')
        plot(Time,Sim_TC(1:2,:))
        hold on
        % Plot ANN estimation results
        plot(Time(TD:end),EstModeAmps,'x')
    end
    % Note that the result is by TD time steps, which is the number
of time delays. Entire time sequence is estimated, half of which is
the original training data, and the second half being validation
data that was not used to train the net.
    toc
elseif choice==2
    clc
    ANN_parent_module
elseif choice==3
    msgbox('GoodBye','POD Application','Help');
    disp('Application terminated by user.');
```

end

```

=====
%% END OF PARENT MODULE
```

EK 3: Türbülanslı Akış Test Durumlarında Kullanılan ve Matlab Yazılımı ile Oluşturulan Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) ile Filtreleme Yöntemi Algoritması

Aşağıda örnek olarak gösterilen kodlar tüm türbülanslı akış koşulları için kullanılan HFD filtreleme yöntemini göstermektedir. HFD ile filtreleme işleminden sonra DAY analizleri için EK 1’de gösterilen kodlar türbülanslı akış test durumları için de kullanılmıştır. Aşağıda örneği verilen kodlar, kontrolsüz türbülanslı akış test durumunda kullanılmıştır. Diğer türbülanslı akış test durumlarında temel çözüm algoritması aynı olmakla beraber, dosya okuma vb. kısımlarda değişiklikler bulunmaktadır.

```
%% Identity
=====
%           FAST FOURIER TRANSFORM (FFT) BASED FILTERING INTEGRATED
%           PROPER ORTHOGONAL DECOMPOSITION METHOD
%           APPLICATION ON TWO-DIMENSIONAL TURBULENT FLOW DATA
%           -o-
%           TOBB UNIVERSITY OF ECONOMICS & TECHNOLOGY
%           DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
=====
%           |           Prepared By           |
%           | M.Sc. Student Akin PAKSOY      |
%           | apaksoy@etu.edu.tr             |
%           |=====|
%           |           Advisor              |
%           | Assist. Prof. Dr. Selin ARADAG |
%           | saradag@etu.edu.tr            |
%           |=====|
%           |           FLOW_TUR_POD_CAS1.M  |
%           |=====|
%% Notification to User
% Menu Options
clc
clear all
close all
choice = menu('ALL SLOTS CLOSED CASE:',...
             'START',...
             'QUIT APPLICATION');

if choice==1
%% Preparation of Matlab for Execution
c=fix(clock);
fprintf(''),disp('=====');
fprintf(''),disp('FFT FILTERING INTEGRATED');
fprintf(''),disp('PROPER ORTHOGONAL DECOMPOSITION METHOD');
fprintf(''),disp('APPLICATION ON 2D TURBULENT FLOW DATA');
fprintf(''),disp('TOBB UNIVERSITY OF ECONOMICS & TECHNOLOGY');
fprintf(''),disp('DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING');
fprintf(''),disp('=====');
```

```

fprintf('POD method initiated at %2i.%2i.%2i\n\n',c(4),c(5),c(6));
%% Data Collection for FFT Analysis
tic
h=waitbar(0,'Collecting data for FFT analysis, please wait...');
k=1;
total=1337;
Data=zeros(8181,3,1337);
for i=6686:8022
    FN=['F:\RD Analyses\Turbulent Flow POD\All
Closed\Data\',num2str(i),'.dat'];
    New_Data=importdata(FN);
    Data(:,:,k)=New_Data.data;
    k=k+1;
    waitbar(k/total);
end
close(h);
disp('Data importing process...
Successful');
%% Mesh Creation for FFT Study
[Y,X]=meshgrid(18:0.05:22,20.5:0.05:25.5);
XSpan=20.5:0.05:25.5;
XSpan=XSpan';
YSpan=18:0.05:22;
%% Arrangement of Data for FFT Study
clear a b i j
h=waitbar(0,'Arranging data for FFT analysis, please wait...');
for j=1:1337
    a=1;
    b=101;
    for i=1:81
        A(:,i,j)=Data(a:b,3,j);
        a=a+101;
        b=b+101;
    end
    waitbar(j/1337);
end
close(h);
disp('Data arrangement process...
Successful');
%% FFT Analysis Through X Direction (Columns Work)
clear i j
h=waitbar(0,'FFT Analysis Through Columns, Please Wait...');
UXFFT=zeros(101,81,1337);
UX=zeros(101,81,1337);
for j=1:1337
    for i=1:81
        Temp1=A(:,i,j);
        UXFFT(:,i,j)=fft(Temp1);
        UXFFT(4:101,i,j)=0;
        UX(:,i,j)=real(ifft(UXFFT(:,i,j)));
    end
    waitbar(j/1337);
end
close(h);
disp('FFT analysis through the x-direction...
Successful');
%% Plots of Analysis Results for X Direction (Columns Work)
clear k prompt dlg_title num_lines def answer plotter fname

```

```

prompt = {'How many data do you want to compare?'};
dlg_title = 'User Input';
num_lines = 1;
def = {'1'};
answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
User_Entry_x=str2double(answer);
for k=1:User_Entry_x
    clear prompt dlg_title num_lines def answer
    prompt = {'Enter snapshot number (1-1337).'};
    dlg_title = 'User Input';
    num_lines = 1;
    def = {'50'};
    answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
    User_Entry_j=str2double(answer);
    clear prompt dlg_title num_lines def answer
    prompt = {'Enter column number (1-81).'};
    dlg_title = 'User Input';
    num_lines = 1;
    def = {'50'};
    answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
    User_Entry_i=str2double(answer);
    plotter=figure(k);
    plot(XSpan,A(:,User_Entry_i,User_Entry_j),'color','blue');
    hold on
    plot(XSpan,UX(:,User_Entry_i,User_Entry_j),'color','red');
    hold off
    title('X Direction Filtering Results')
    xlabel('X, m')
    ylabel('Velocity Distribution, m/s')
    legend('Without FFT','With FFT')
    grid off
    fname=['F:\RD Analyses\Turbulent Flow POD\All
Closed\Figures\XDFFT',num2str(User_Entry_j),'-
',num2str(User_Entry_i)];
    hgsave(plotter,fname);
end
disp('Plotting FFT results through the x-direction...
Successful');
%% FFT Analysis Through Y Direction (Rows Work)
clear i j
h=waitbar(0,'FFT Analysis Through Rows, Please Wait...');
UYFFT=zeros(101,81,1337);
UY=zeros(101,81,1337);
for j=1:1337
    for i=1:101
        Temp2=UX(i,:,j);
        UYFFT(i,:,j)=fft(Temp2);
        UYFFT(i,4:81,j)=0;
        UY(i,:,j)=real(ifft(UYFFT(i,:,j)));
    end
    waitbar(j/1337);
end
close(h);
disp('FFT analysis through the y-direction...
Successful');

%% Plots of Analysis Results for Y Direction (Rows Work)
clear f prompt dlg_title num_lines def answer plotter fname

```

```

prompt = {'How many data do you want to compare?'};
dlg_title = 'User Input';
num_lines = 1;
def = {'1'};
answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
User_Entry_y=str2double(answer);
User_Entry_r=User_Entry_x+User_Entry_y;
for f=k+1:User_Entry_r
    clear prompt dlg_title num_lines def answer User_Entry_j
User_Entry_i
    prompt = {'Enter snapshot number (1-1337).'};
    dlg_title = 'User Input';
    num_lines = 1;
    def = {'50'};
    answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
    User_Entry_j=str2double(answer);
    clear prompt dlg_title num_lines def answer User_Entry_i
    prompt = {'Enter column number (1-101).'};
    dlg_title = 'User Input';
    num_lines = 1;
    def = {'50'};
    answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
    User_Entry_i=str2double(answer);
    plotter=figure(f);
    plot(YSpan,A(User_Entry_i,:,User_Entry_j),'color','blue');
    hold on
    plot(YSpan,UY(User_Entry_i,:,User_Entry_j),'color','red');
    hold off
    title('Y Direction Filtering Results')
    xlabel('Y, m')
    ylabel('Velocity Distribution, m/s')
    legend('Without FFT','With FFT')
    grid off
    fname=['F:\RD Analyses\Turbulent Flow POD\All
Closed\Figures\YDFFT',num2str(User_Entry_j),'-
',num2str(User_Entry_i)];
    hgsave(plotter,fname);
end
disp('Plotting FFT results through the y-direction...
Successful');
%% End

```

EK 4: Zamana Bağlı İki Boyutlu Sürülmüş Kavite Akışı Kapsamında Matlab Yazılımı ile Oluşturulan Sayısal Çözüm Algoritması

Aşağıda örnek olarak gösterilen kodlar Reynolds sayısının (Re) 100 olduğu test durumu için çözüm üretmektedir. Reynolds sayısının (Re) 500, 1000, 5000 ve 10000 olduğu diğer test durumlarında temel çözüm algoritması aynı olmakla beraber, dosya okuma vb. kısımlarda değişiklikler bulunmaktadır.

```
%% Identity
%=====
%                               LID-DROVEN CAVITY FLOW
%                               GENERATION OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS DATA
%                               -o-
%                               TOBB UNIVERSITY OF ECONOMICS & TECHNOLOGY
%                               DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
%=====
%                               |           Prepared By:           |
%                               | M.Sc. Student Akin PAKSOY      |
%                               | apaksoy@etu.edu.tr             |
%                               |-----|
%                               |           Advisor:             |
%                               | Assist. Prof. Dr. Selin ARADAG  |
%                               | saradag@etu.edu.tr             |
%                               |-----|
%=====
%                               DCAVITY_001.M
%=====
%% Preparation for Execution
clear all
close all
clc
tic
%% Given Parameters
L      = 0.01;           % Length
vis    = 1E-6;         % Viscosity
Up_max = 0.01;         % Maximum lid velocity
n      = 101;          % Nodal points
delta  = L/(n-1);      % Delta
itcno  = 3000;         % Total number of time steps
%% Some Calculated Values
% Iteration parameters : i_c1, j_c1
x      = zeros(n,n);   % Pre-allocation for speed
y      = zeros(n,n);   % Pre-allocation for speed
for j_c1=1:n
    for i_c1=1:n
        x(i_c1,j_c1)=delta*(i_c1-1);
        y(i_c1,j_c1)=delta*(j_c1-1);
    end
end
deltat = delta/(2*Up_max); % Scalar
w      = 1.9;           % Scalar
Re     = Up_max*L/vis;  % Scalar
```



```

u          = zeros(n,n);           % Pre-allocation for speed
v          = zeros(n,n);           % Pre-allocation for speed
sf         = zeros(n,n);           % Pre-allocation for speed
vort       = zeros(n,n);           % Pre-allocation for speed
ex         = zeros(n,n);           % Pre-allocation for speed
ey         = zeros(n,n);           % Pre-allocation for speed
vorticity  = zeros(1,n);           % Pre-allocation for speed
A          = zeros(1,n);           % Pre-allocation for speed
B          = zeros(1,n);           % Pre-allocation for speed
C          = zeros(1,n);           % Pre-allocation for speed
D          = zeros(1,n);           % Pre-allocation for speed
E          = zeros(1,n);           % Pre-allocation for speed
F          = zeros(1,n);           % Pre-allocation for speed
error      = zeros(1,itcno);       % Pre-allocation for speed
Uplate     = zeros(1,itcno);       % Pre-allocation for speed
%% Unsteady State Iterative Solution
for tvar=1:1:itcno;                % Time variation
    Uplate(tvar)=(0.999*sin(2*pi()*tvar/300)+1.001)/200; % Time-
    variant velocity
% -----
% -----
% Part 0 - Iterative Solution
    sfold=sf;                       % Stream function
    for i_c22=1:n
        u(i_c22,n)=Uplate(tvar);     % Lid side initial condition
    end
    % Iteration parameters : i_c3, j_c2
    for i_c3=2:(n-1);
        for j_c2=2:(n-1);
            if (u(i_c3,j_c2)>0)
                ex(i_c3,j_c2)=1;     % ADI method parameter
adjustment
            elseif (u(i_c3,j_c2)<0)
                ex(i_c3,j_c2)=-1;    % ADI method parameter
adjustment
            elseif (u(i_c3,j_c2)==0)
                ex(i_c3,j_c2)=0;
            end
            if (v(i_c3,j_c2)>0)
                ey(i_c3,j_c2)=1;     % ADI method parameter
adjustment
            elseif (v(i_c3,j_c2)<0)
                ey(i_c3,j_c2)=-1;    % ADI method parameter
adjustment
            elseif (v(i_c3,j_c2)==0)
                ey(i_c3,j_c2)=0;
            end
        end
    end
    dx=(vis*deltat)/(delta*delta);
    dy=dx;
    % Boundary conditions for stream function
    % Iteration parameters : i_c4
    for i_c4=1:n
        sf(i_c4,1)=0;                % Horizontal downside x boundary
        sf(i_c4,n)=0;                % Horizontal upside x boundary
    end
    % Iteration parameters : j_c3

```

```

for j_c3=1:n
    sf(1,j_c3)=0;           % Vertical left y boundary
    sf(n,j_c3)=0;         % Vertical right y boundary
end
% -----
% -----
% Parts 1 and 2 - Iterative Solution
% Boundary conditions for vorticity
% Iteration parameters : j_c4
% Part 1
for j_c4=1:n
    var1_p1=sf(1,j_c4);
    var2_p1=sf(2,j_c4);
    vort(1,j_c4)=(2*(var1_p1-var2_p1))/(delta*delta); % Vertical
left y
    var3_p1=sf(n,j_c4);
    var4_p1=sf(n-1,j_c4);
    vort(n,j_c4)=(2*(var3_p1-var4_p1))/(delta*delta); % Vertical
left y
end
% Part 2
% Iteration parameters : i_c5
for i_c5=1:n
    var1_p2=sf(i_c5,1);
    var2_p2=sf(i_c5,2);
    vort(i_c5,1)=(2*(var1_p2-var2_p2))/(delta*delta);
% Horizontal down x
    var3_p2=sf(i_c5,n);
    var4_p2=sf(i_c5,n-1);
    vort(i_c5,n)=((2*(var3_p2-var4_p2))/(delta*delta))-
(2*Uplate(tvar)/delta); % Horizontal up x
end
% -----
% -----
% Part 3 - Iterative Solution
% Alternating Direction Implicit Method for X-Sweep
crx=u*deltat/delta;
cry=v*deltat/delta;
% Iteration parameters : i_c6, j_c5
for j_c5=2:(n-1)
    for i_c6=2:(n-1)
        % A parameter
        var1_p3=ex(i_c6,j_c5);
        var2_p3=crx(i_c6+1,j_c5);
        A(i_c6)=0.5*(dx-0.5*(1-var1_p3)*var2_p3);
        % B parameter
        var3_p3=ex(i_c6,j_c5);
        var4_p3=crx(i_c6,j_c5);
        B(i_c6)=1+dx+0.5*var3_p3*var4_p3;
        % C parameter
        var5_p3=ex(i_c6,j_c5);
        var6_p3=crx(i_c6-1,j_c5);
        C(i_c6)=0.5*(dx+0.5*(1+var5_p3)*var6_p3);
        % D parameter
        var7_p3=ey(i_c6,j_c5);
        var8_p3=cry(i_c6,j_c5+1);
        var9_p3=vort(i_c6,j_c5+1);
        Temp1_p3=0.5*(dy-0.5*(1-var7_p3)*var8_p3)*var9_p3;
    end
end

```

```

        var10_p3=ey(i_c6,j_c5);
        var11_p3=cry(i_c6,j_c5);
        var12_p3=vort(i_c6,j_c5);
        Temp2_p3=(1-dy-0.5*var10_p3*var11_p3)*var12_p3;
        var13_p3=ey(i_c6,j_c5);
        var14_p3=cry(i_c6,j_c5-1);
        var15_p3=vort(i_c6,j_c5-1);
        Temp3_p3=0.5*(dy+0.5*(1+var13_p3)*var14_p3)*var15_p3;
        D(i_c6)=Temp1_p3+Temp2_p3+Temp3_p3;
    end
    % Subroutine
    % The conditions of the first boundary
    E(1)=0;
    F(1)=vort(1,j_c5);
    % Loop for the values of arrays E and F
    % Iteration parameters : i_c7
    for i_c7=2:(n-1)
        E(i_c7)=A(i_c7)/(B(i_c7)-(C(i_c7)*E(i_c7-1)));
        F(i_c7)=(D(i_c7)+(C(i_c7)*F(i_c7-1)))/(B(i_c7)-
(C(i_c7)*E(i_c7-1)));
    end
    % The conditions of the second boundary
    vorticity(n)=vort(n,j_c5);
    % Loop for vorticity
    % Iteration parameters : i_c8
    for i_c8=(n-1):-1:1
        vorticity(i_c8)=(E(i_c8)*vorticity(i_c8+1))+F(i_c8);
    end
    % Iteration parameters : i_c9
    for i_c9=2:(n-1)
        vort(i_c9,j_c5)=vorticity(i_c9);
    end
end
% -----
% -----
% Part 4 - Iterative Solution
% Alternating Direction Implicit Method for Y-Sweep
% Iteration parameters : i_c10, j_c6
for i_c10=2:(n-1)
    for j_c6=2:(n-1)
        % A parameter
        var1_p4=ey(i_c10,j_c6);
        var2_p4=cry(i_c10,j_c6+1);
        A(j_c6)=0.5*(dy-0.5*(1-var1_p4)*var2_p4);
        % B parameter
        var3_p4=ey(i_c10,j_c6);
        var4_p4=cry(i_c10,j_c6);
        B(j_c6)=1+dy+0.5*var3_p4*var4_p4;
        % C parameter
        var5_p4=ey(i_c10,j_c6);
        var6_p4=cry(i_c10,j_c6-1);
        C(j_c6)=0.5*(dy+0.5*(1+var5_p4)*var6_p4);
        % D parameter
        var7_p4=ex(i_c10,j_c6);
        var8_p4=crx(i_c10+1,j_c6);
        var9_p4=vort(i_c10+1,j_c6);
        Temp1_p4=0.5*(dx-0.5*(1-var7_p4)*var8_p4)*var9_p4;
        var10_p4=ex(i_c10,j_c6);

```

```

        var11_p4=crx(i_c10,j_c6);
        var12_p4=vort(i_c10,j_c6);
        Temp2_p4=(1-dx-0.5*var10_p4*var11_p4)*var12_p4;
        var13_p4=ex(i_c10,j_c6);
        var14_p4=crx(i_c10-1,j_c6);
        var15_p4=vort(i_c10-1,j_c6);
        Temp3_p4=0.5*(dx+0.5*(1+var13_p4)*var14_p4)*var15_p4;
        D(j_c6)=Temp1_p4+Temp2_p4+Temp3_p4;
    end
    % Subroutine
    % The conditions of the first boundary
    E(1)=0;
    F(1)=vort(i_c10,1);
    % Loop for the values of arrays E and F
    % Iteration parameters : i_c11
    for i_c11=2:(n-1)
        E(i_c11)=A(i_c11)/(B(i_c11)-(C(i_c11)*E(i_c11-1)));
        F(i_c11)=(D(i_c11)+(C(i_c11)*F(i_c11-1)))/(B(i_c11)-
(C(i_c11)*E(i_c11-1)));
    end
    % The conditions of the second boundary
    vorticity(n)=vort(i_c10,n);
    % Loop for vorticity
    % Iteration parameters : i_c12
    for i_c12=(n-1):-1:1
        vorticity(i_c12)=(E(i_c12)*vorticity(i_c12+1))+F(i_c12);
    end
    % Iteration parameters : j_c7
    for j_c7=2:(n-1)
        vort(i_c10,j_c7)=vorticity(j_c7);
    end
end
% -----
% -----
% Part 5 - Iterative Solution
% Point Successive Over-Relaxation for Stream Function
% Iteration parameters : k, j_c8, i_13
for k=1:10
    for j_c8=2:(n-1)
        for i_c13=2:(n-1)
            var1_p5=sf(i_c13+1,j_c8);
            var2_p5=sf(i_c13-1,j_c8);
            var3_p5=sf(i_c13,j_c8+1);
            var4_p5=sf(i_c13,j_c8-1);
            var5_p5=sf(i_c13,j_c8);
            var6_p5=vort(i_c13,j_c8);
            R=(var1_p5+var2_p5+var3_p5+var4_p5-
4*var5_p5+delta*delta*var6_p5)/4.0;
            sf(i_c13,j_c8)=var5_p5+w*R;
        end
    end
end
% -----
% -----
% Part 6 - Iterative Solution
% Derivative of Stream Function for Velocity Calculation
% Iteration parameters : i_14, j_c9
for i_c14=2:(n-1)

```

```

        for j_c9=2:(n-1)
            var1_p6=sf(i_c14,j_c9+1);
            var2_p6=sf(i_c14,j_c9-1);
            u(i_c14,j_c9)=(var1_p6-var2_p6)/(2*delta);
            var3_p6=sf(i_c14+1,j_c9);
            var4_p6=sf(i_c14-1,j_c9);
            v(i_c14,j_c9)=-(var3_p6-var4_p6)/(2*delta);
        end
    end

% -----
% -----
% Part 7 - Error Calculation
error(tvar)=sum(abs(sf-sfold)/((n-2)^2)/max(abs(sf)));
% -----
% -----
% Iteration Count Display
fprintf('iteration count is %4.0f --- error value is %4.10f \n',
tvar,error(tvar))
% -----
% -----
% Part 8 - Horizontal Velocity Component at the Centroid
yc      = zeros(1,n);      % Pre-allocation for speed
uc      = zeros(1,n);      % Pre-allocation for speed
for j_c99=1:n
    yc(j_c99)=y(51,j_c99);
    uc(j_c99)=u(51,j_c99);
end
% Save Variables
modf_yc=yc';
modf_uc=uc';
R1 = [modf_yc modf_uc];
FN1 = ['F:\RD Analyses\Driven Cavity
Package\dc001\centerline\' ,num2str(tvar)];
save(FN1,'R1','-ASCII')
R2 = [tvar error(tvar)];
FN2 = ['F:\RD Analyses\Driven Cavity
Package\dc001\errors\' ,num2str(tvar)];
save(FN2,'R2','-ASCII')
% -----
% -----
% Part 9 - Drag Force and Maximum Stream Function Value Calculation
derv    = zeros(1,n);      % Pre-allocation for speed
for i_c99=1:n
    derv(i_c99)=(3*u(i_c99,n)-4*u(i_c99,n-1)+u(i_c99,n-
2))/(2*delta);
end
drag=1000*vis*delta*sum(derv);
sfmax=max(max(abs(sf)));
R3 = [sfmax drag];
FN3 = ['F:\RD Analyses\Driven Cavity
Package\dc001\parameters\' ,num2str(tvar)];
save(FN3,'R3','-ASCII')
% -----
% -----
% Part 10 - Save Output Data
clear a b
a=1;
b=n;

```

```

for count=1:n
    x_points(a:b,1)=x(:,count);
    y_points(a:b,1)=y(:,count);
    u_points(a:b,1)=u(:,count);
    v_points(a:b,1)=v(:,count);
    sf_points(a:b,1)=sf(:,count);
    vort_points(a:b,1)=vort(:,count);
    a=a+n;
    b=b+n;
end
R4 = [x_points y_points u_points v_points sf_points vort_points];
FN4 = ['F:\RD Analyses\Driven Cavity
Package\dc001\snapshots\' ,num2str(tvar)];
save(FN4, 'R4', '-ASCII')
% -----
% -----
end
% -----
% -----
%% End
toc

```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : PAKSOY, Akın
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 29.09.1986 Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (532) 333 79 16
e-mail : apaksoy@etu.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	2011 (bekleniyor)
Lisans	Hacettepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü	2009

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2009 – 2011	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi
2008 – Haziran	TAI – Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş. Üretim Teknolojileri Birimi	Stajyer
2007 – Temmuz	ŞİŞECAM Kimyasallar Grubu Soda Sanayi A.Ş. Proses Kontrol Birimi	Stajyer

Yabancı Dil

İngilizce (ileri düzeyde), Almanca (temel düzeyde)

Yayınlar

1. Paksoy, A., Apacoglu, B., Aradag, S., Kasnakoglu, C., Analysis of Flow over a Circular Cylinder by CFD and Reduced Order Modeling, American Society of Mechanical Engineers (ASME) 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Istanbul, Turkey, July 2010, doi: 10.1115/ESDA2010-24302.
2. Paksoy, A., Aradag, S., Kakac, S., Biofuels, the Effects of Biofuels on Climate Change and Biofuels Policy of Turkey, 10th International Conference on Clean Energy (ICCE), Famagusta, Northern Cyprus, September 2010.
3. Apaçoğlu, B., Paksoy, A., Aradağ, S., Silindir Üzerindeki Kontrolsüz ve Kontrollü Laminer Akışın HAD Analizi ve Düşük Boyutlu Modellemesi, III. Havacılık ve Uzay Konferansı, UHUK-2010-126, Eskişehir, Türkiye, Eylül 2010.
4. 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, 5(1), 67-82, 2011.
5. Paksoy, A., Apacoglu, B., Aradag, S., Reduced Order Modeling of a Turbulent Two Dimensional Cylinder Wake with Filtered POD and Artificial Neural Networks, 49th American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida, January 2011.
6. Bayer, O., Oskay, R., Paksoy, A., Aradag, S., CFD Simulations and Reduced Order Modeling of a Refrigerator Compartment Including Radiation Effects, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS), Elazig, Turkey, May 2011.
7. Paksoy, A., Aradag, S., Prediction of Lid-Driven Cavity Flow Characteristics Using an Artificial Neural Network Based Methodology Combined with CFD and Proper Orthogonal Decomposition, 7th International Conference on Computational Heat and Mass Transfer, Istanbul, Turkey, July 2011.
8. Apaçoğlu, B., Paksoy, A., Aradağ, S., Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Düşük Boyutlu Modelleme ve Yapay Sinir Ağları ile Akış Kontrolü, 18. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Zonguldak, Türkiye, Eylül 2011.
9. Apacoglu, B., Paksoy, A., Aradag, S., Effects of Air Blowing on Turbulent Flow over a Circular Cylinder, Journal of Thermal Science and Technology, 2011 (*yayına kabul edildi, basım aşamasında*).

10. Bayer, O., Oskay, R., Paksoy, A., Aradag, S., CFD Simulations and Reduced Order Modeling of a Refrigerator Compartment Including Radiation Effects, Energy Conversion and Management (*gönderildi, inceleme aşamasında*)
11. Paksoy, A., Aradag, S., Artificial Neural Network Based Prediction of Time Dependent Behavior of Lid-Driven Cavity Flows, Journal of Computational Physics (*gönderildi, inceleme aşamasında*).
12. Aradag, S., Paksoy, A., Modeling of the Wake Behind Bluff Bodies for Flow Control Using ANN'S, *Transition at Low Reynolds Numbers*, ISBN 979-953-307-627-9, 2011 (*yayına kabul edildi*).