

**ÇEŞİTLİ AKIŞKAN AKIŞI PROBLEMLERİNİN DOĞRUSAL VE
DOĞRUSAL OLMAYAN DİNAMİK MODELLEMESİ VE
KONTROLÜ**

H. DENİZ KARACA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

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

**ARALIK 2012
ANKARA**

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Ünver KAYNAK
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığımı onaylarım.

Doç. Dr. Hamza KURT
Anabilim Dalı Başkanı

H. Deniz KARACA tarafından hazırlanan “Çeşitli Akışkan Akışı Problemlerinin Doğrusal veya Doğrusal Olmayan Dinamik Modellemesi ve Kontrolü” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Coşku KASNAKOĞLU
Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Doç.Dr. Coşku KASNAKOĞLU

Üye : Doç.Dr. Dilek Funda KURTULUŞ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ali BOZBEY

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.

H.Deniz KARACA

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Coşku KASNAKOĞLU
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Aralık 2012

H. Deniz KARACA

**ÇEŞİTLİ AKIŞKAN AKIŞI PROBLEMLERİNİN DOĞRUSAL VEYA
DOĞRUSAL OLMAYAN DİNAMİK MODELLEMESİ VE
KONTROLÜ**

ÖZET

Bu çalışmada; dinamik davranışının matematiksel olarak modellenmenin çoğu zaman zor, olduğu, akışkan sistemlerinin dinamik modellerinin elde edilmesi ve girdaplılık ve ‘sürüklenme/kaldırma katsayısı’ gibi değerlerin geri-beslemeli kontrolü, çırpma hareketi yapan NACA0012 kanat profili, sabit silindir gövde ve sabit hücum açılı NACA23012 geometrileri üzerinde incelenmiştir. Yapılan çalışmaları seçilen geometriler altında gruplandırıp incelenecek olursa; ilk olarak çırpma hareketi yapan NACA0012 kanat profili için parçacık görüntülemeli hız ölçümü (PGH) tekniği kullanarak akışın hız vektörleri elde edilmiştir. Bu hız vektörleri bir dizi ek işleme (görüntü işleme ile kanatın tespiti) tabi tutulduktan sonra uygun dikgen ayrışımı (UDA) ve sistem tanılama işlemleri uygulanarak doğrusal bir dinamik model elde edilmiştir. İkinci olarak ise silindir bir yapının etrafından akan akışın doğrusal ve doğrusal olmayan modellenmesi konusu incelenerek bu modeller için silindir arkısında oluşan periyodik girdapları bastırarak kontrolcü tasarımları gerçekleştirilmiştir. Üçüncü olarak ise, sabit hücum açılı bir NACA23012 kanat profili için doğrusal olmayan modelleme yaklaşımı gerçekleştirilip, sürüklenme/kaldırma kuvveti oranının kontrolü konusu işlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PGH), Uygun Dikgen Ayrışımı (UDA), Dinamik Modelleme Sistem Tanılama (ST), Girdap Kontrolü, K/S Kontrolü.

University : TOBB University of Economics and Technology
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Electrical and Electronics Engineering
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Coşku KASNAKOĞLU
Degree Awarded and Date : M.Sc. – December 2012

H.Deniz KARACA

**LINEAR AND NON-LINEAR DYNAMICAL MODELING AND
CONTROL OF VARIOUS FLUID FLOW PROBLEMS**

ABSTRACT

In this study; obtaining dynamical models and feedback control of vorticity and drag/lift coefficient of fluid systems, whose dynamical behavior is often hard to express mathematically, was investigated over geometries such as, flapping NACA0012 airfoil, circular cylinder body and NACA23012 airfoil with fixed angle of attack. If we examine the studies grouped under selected geometries; firstly, velocity vectors of the flow of flapping NACA0012 airfoil was obtained by using particle image velocimetry (PIV). After applying a number of additional processes (detection of the airfoil via image processing) to these velocity vectors, a linear dynamical model was obtained by using proper orthogonal decomposition (POD) and system identification (SI). Secondly, linear and non-linear dynamical modeling of flow around a circular cylinder body was examined and design of controllers for these models to suppress vorticity was achieved. Thirdly, a non-linear modeling approach carried out and control of drag/lift coefficient for NACA23012 airfoil with fixed angle of attack was investigated.

Key Words: Particle Image Velocimetry (PIV), Proper Orthogonal Decomposition (POD), Dynamical Modeling, System Identification (SI), Vorticity Control, D/L Control.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasının her aşamasında engin tecrübelerini, zamanını, desteğini ve hoşgörüsünü benden esirgemeyen, başta çok kıymetli hocam ve danışmanım Doç. Dr. Coşku KASNAKOĞLU'na olmak üzere, birikimlerinden ve tecrübelerinden faydalandığım ve deneylerimizde laboratuvar imkânlarını bizden esirgemeyen ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Dilek Funda KURTULULŞ hocama, projemizde grup çalışması kavramı konusunda çok şey paylaştığım çalışma arkadaşlarım Oğuz DURMAZ ve G. Deniz ÖZEN'e, gerek lisans gerek yüksek lisans öğrenimim boyunca bilgilerinden faydalandığım tüm öğretim üyeleri ve asistan arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Yaptığım çalışmalar, 109E233 numaralı TÜBİTAK projesi ve PIRG-2008-GA-239536 numaralı Avrupa Birliği projesi tarafından desteklenmiştir.

H.Deniz KARACA

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÇIRPAN NACA0012 KANAT PROFİLİNİN DİNAMİK MODELLEMESİ ...	4
2.1 PGH Kullanılarak Akış Alanının Anlık Hız Bilgisinin Elde Edilmesi	4
2.2 Görüntü İşleme Kullanarak Kanat Pozisyonunun Tespiti.....	8
2.3 Anlık görüntülere UDA Uygulanması.....	11
2.4 Sistem Tanılama.....	17
3. SİLİNDİR ETRAFI AKIŞ SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ VE GİRDAPLILIK KONTROLÜ	23
3.1 Silindir Etrafı Akışın Doğrusal Dinamik Modellemesi ve Girdaplılık Kontrolü	23
3.1.1 HAD Benzetimleri ve Giriş-Çıkış Verisi Elde Etme	24
3.1.2 Sistem Tanılama.....	30
3.1.3 Kontrolcü Tasarımı	31
3.1.4 Sonuçlar.....	34
3.2 Silindir Etrafı Akışın Doğrusal Olmayan Dinamik Modellemesi ve Girdaplılık Kontrolü.....	39
3.2.1 HAD Benzetimleri ve Giriş-Çıkış Verisi Elde Etme	39
3.2.2 Sistem Tanılama.....	40
3.2.3 Kontrolcü Tasarımı	45
3.2.4 Tasarlanan Kontrolcünün Benzetimle Birleştirilmesi	47

3.2.5	Sonuçlar.....	49
4.	SABİT HÜCUM AÇILI NACA23012 KANAT PROFİLİNİN KALDIRMA/SÜRÜKLENME KATSAYISININ DOĞRUSAL OLMAYAN KONTROLÜ.....	55
4.1	HAD Benzetimleri ve Giriş-Çıkış Verisi Elde Etme.....	57
4.2	Sistem Tanılama	58
4.3	Kontrolcü Tasarımı.....	63
4.4	Sonuçlar.....	64
5.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	67
	EKLER.....	73
	ÖZGEÇMİŞ	74

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1 PHG deneyi özellikleri.....	5
Çizelge 3.1: Benzetimde kullanılan bilgisayarın özellikleri	23
Çizelge 3.2 Kestirimi yapılan parametreler.	30

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1 PGH deney düzeneği travers mekanizması.	6
Şekil 2.2 Bazı PGH deneyi anlık görüntüleri.	6
Şekil 2.3 PGH deney düzeneği.	7
Şekil 2.4 PGH deney düzeneğinin fotoğrafı.	8
Şekil 2.5 Görüntü işleme adımları; gri yelpaze, uyarlamalı filtreleme, disk şekilli yapı elementi, gürültü eliminasyonu.	9
Şekil 2.6 x yönündeki anlık hız alanları.	10
Şekil 2.7 y yönündeki anlık hız alanları.	11
Şekil 2.8 UDA kiplerinin x bileşenleri.	14
Şekil 2.9 UDA kiplerinin y bileşenleri.	14
Şekil 2.10 Enerji yüzdesi-kip sayısı grafiği.	15
Şekil 2.11 UDA kiplerinin geri çatılanmış x bileşenleri.	16
Şekil 2.12 UDA kiplerinin geri çatılanmış y bileşenleri.	16
Şekil 2.13 ST ve UDA zaman katsayılarının karşılaştırılması.	20
Şekil 2.14 ST zaman katsayıları ile geri çatılma (x hızları).	21
Şekil 2.15 ST zaman katsayıları ile geri çatılma (y hızları).	21
Şekil 3.1 Silindir gövde örgü geometrisi.	24
Şekil 3.2 Navier2d programının ilk ara yüzü.	25
Şekil 3.3 Navier2d programının geliştirilen ara yüzü.	25
Şekil 3.4 250 s çalıştırılan simülasyonun akış alanı.	27
Şekil 3.5 Eyleyici giriş ve ölçüm noktaları.	28
Şekil 3.6 Giriş sinyali (u_1) ve çıkış sinyali (y_1).	29
Şekil 3.7 Ölçülen ve benzetimden gelen çıkış değerleri.	31
Şekil 3.8 Kontrolcünün kapalı çevrim kutupları.	33
Şekil 3.9 Kontrolcü birim basamak cevabı.	33
Şekil 3.10 $t=0.8$ s de akış alanının U-V hızları.	34
Şekil 3.11 $t=18$ s de akış alanının U-V hızları.	35
Şekil 3.12 $t = 190$ s de akış alanının U-V hızları.	35
Şekil 3.13 $t = 600$ s de akış alanının U-V hızları.	36
Şekil 3.14 $t = 0.8$ s de akış alanındaki girdaplılık değeri.	36
Şekil 3.15 $t = 18$ s de akış alanındaki girdaplılık değeri.	37
Şekil 3.16 $t = 190$ s de akış alanındaki girdaplılık değeri.	37
Şekil 3.17 $t = 600$ s de akış alanındaki girdaplılık değeri.	38

Şekil 3.18 Zamana karşı ölçülen ortalama girdaplılık değeri	38
Şekil 3.19 Giriş sinyali (u_1) ve çıkış sinyali (y_1).....	40
Şekil 3.20 Hammerstein-Wiener blokları.	41
Şekil 3.21 Benzetim çıktıları (mavi) ve ölçüm çıktılarının (siyah) karşılaştırılması.	42
Şekil 3.22 Giriş doğrusal olmama fonksiyonu.	43
Şekil 3.23 Çıkış doğrusal olmama fonksiyonu.	43
Şekil 3.24 Doğrusal blok için basamak cevabı.	44
Şekil 3.25 Doğrusal blok için kutup sıfır grafiği.....	44
Şekil 3.26 LKG kontrolcüsü blok şeması.	46
Şekil 3.27 Kontrolcünün birim basamak cevabı.	47
Şekil 3.28 Kontrolcünün uyguladığı giriş.	47
Şekil 3.29 Kontrolcünün SIMULINK blok diyagramı.	48
Şekil 3.30 $t=0.74237s$ için U-V hız alanı.....	49
Şekil 3.31 $t = 620.561 s$ için U-V hız alanı.....	50
Şekil 3.32 $t = 787.8187 s$ için U-V hız alanı.....	50
Şekil 3.33 $t = 908.1186 s$ için U-V hız alanı.....	51
Şekil 3.34 $t = 999.9798 s$ için U-V hız alanı.....	51
Şekil 3.35 $t = 0.74237 s$ için girdaplılık değeri.....	52
Şekil 3.36 $t = 620.561 s$ için girdaplılık değeri.....	52
Şekil 3.37 $t = 787.8187 s$ için girdaplılık değeri.....	53
Şekil 3.38 $t = 908.1186 s$ için girdaplılık değeri.....	53
Şekil 3.39 $t = 999.9798 s$ için girdaplılık değeri.....	54
Şekil 4.1 NACA23012 örgü geometrisi	56
Şekil 4.2 Sıfır girişli 250 s süreli benzetimin D/L değeri.....	57
Şekil 4.3 Giriş sinyali (u_1) ve çıkış sinyali (y_1).	58
Şekil 4.4 Ölçülen (siyah) ve benzetimden gelen (yeşil) çıkış değerleri.....	59
Şekil 4.5 Giriş doğrusal olmama fonksiyonu.	60
Şekil 4.6 Çıkış doğrusal olmama fonksiyonu.	61
Şekil 4.7 Doğrusal blok için basamak cevabı.	62
Şekil 4.8 Doğrusal blok için kutup-sıfır grafiği.	62
Şekil 4.9 Kontrolcünün birim basamak cevabı (üstte) ve kontrolcü girişi (altta).	64
Şekil 4.10 Kontrolcü olmadığı zaman ölçülen D/L değeri.	65
Şekil 4.11 Kontrolcü devredeyken ölçülen D/L değeri.....	65
Şekil 4.12 Kontrolcü girişi.	66

KISALTMALAR

Kısaltmalar Açıklama

PGH	Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü Tekniği
UDA	Uygun Dikgen Ayrışımı
ST	Sistem Tanılama
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
LKG	Lineer Kuadratik Gaussian
İMK	İç Model Kontrolü

1. GİRİŞ

Viskoz akışkan sistemler, fiziksel özellikleri gereği doğrusal olmayan davranış sergilemekte ve istenmeyen etkiler oluşturmaktadır ve bu etkileri bertaraf etmek için ise akışkan kontrol sistemleri gerekmektedir [1]. Akışkan bir sistemin kontrolü konusu incelenirken ise akış probleminin fiziksel yapısının, matematiksel olarak ifade edilmesi gerekmektedir. Bu noktada en yaygın olarak bilinen ve kullanılan matematiksel araç ise, akışın fiziksel özelliklerini oldukça yüksek doğrulukta ifade eden Navier-Stokes kısmi türevsel denklemleridir. Karmaşık yapısı ve analitik olarak çözülememesine rağmen bu denklemler akışın fiziksel özelliklerini oldukça yüksek doğrulukta ifade edebilmektedirler [2-6]. Navier-Stokes denklemlerinin bahsedilen problemleri göz önüne alındığında, akışkan sistemleri ifade etmek için literatürde uygun dikgen ayrışımı¹ (UDA) gibi sistemin derecesini düşürme yaklaşımları veya ilerleyen bilgisayar teknolojisinin beraberinde getirdiği yüksek kapasiteli işlemciler sayesinde akışı yinelemeli² metot kullanarak ifade eden hesaplamalı akışkanlar dinamiği³ (HAD) yönteminin kullanıldığı görülmüştür [7-8].

Akış alanını ifade edebilmek için UDA metodu akış alanının anlık hız bilgisine ihtiyaç duymaktadır. Bu hız alanları ise deneysel olarak parçacık görüntülemeli hız ölçümü⁴ (PGH) tekniği ile elde edilebileceği gibi yine HAD kullanılarak da elde edilmektedir. Deneysel olarak elde edilen anlık hız görüntülerine UDA uygulanarak UDA kiplerini elde etmek mümkündür [9-10]. UDA kipleri ve zaman katsayıları elde edildikten sonra zaman katsayılarının dinamiğini elde etmek için Galerkin İzdüşümü Tekniği ya da Sistem Tanılama⁵ (ST) Tekniği uygulanabilir. Bu sayede akış alanı adi türevsel denklemler şeklinde ifade edilmiş olur. Bu çalışmada çırpma hareketi yapan bir NACA0012 kanat profilinin dinamik modellenmesi problemi bu yaklaşım kullanılarak incelenmiştir.

¹ İng: Proper Orthogonal Decomposition (POD)

² İng: Iterative

³ İng: Computational Fluid Dynamics (CFD)

⁴ İng: Particle Image Velocimetry (PIV)

⁵ İng: System Identification (SI)

Akışkan sistemlerin analizi için temel alınan problemlerden birisi ise silindir etrafı akıştır. Silindir basit geometrisi ve düşük Reynolds sayılarında arkasında bıraktığı girdap koridoru⁶ sayesinde uzun yıllardır araştırmacıların daha karmaşık akışkan problemlerinin çözümü için kullandıkları bir test alanı olmuştur [11]. Silindir arkasında oluşan girdapların kontrolü konusunda yapılan çalışmalarda ise eyleyici girişi olarak akış alanına belirli hızlarda çeşitli gazlar eklemek, silindir yüzeyini hareket ettirmek, akışı etkileyecek başka bir hareketli gövde eklemek, akışın aktığı yüzeyi soğutmak ve plazama eyleyiciler kullanmak gibi yöntemlerin uygulandığı görülebilir [12-15]. Bu çalışmada akışkan analizini yapmak için bir dizi MATLAB kodundan oluşan HAD programı Navier2d [16] geliştirilerek kullanılmıştır. Geliştirilen program sayesinde silindir üzerinden kullanıcının seçeceği noktalardan akışa hava üfleme/çekme suretiyle kontrolcü giriş noktalarının belirlen ve silindir arkasından seçilen bir bölgedeki ortalama girdaplılık⁷ değeri okunarak geri besleme bilgisi olarak kullanılacaktır. Bu noktada ST ve kontrolcü tasarımı ise doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımlar seçilerek uygulanmıştır.

Çalışmanın son kısmında ise sabit hücum açılı NACA23012 kanat profilinin kaldırma/sürüklenme katsayısının kaldırma kuvvetini sürüklenme kuvvetine göre değerini en yüksek seviyeye çekecek şekilde kontrolü hedeflenmiştir. Bu alanda yapılan çalışmalar da ise problem sürüklenme kuvvetinin eniyilemesi veya kaldırma kuvvetinin iyileştirilmesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Colonius ve grubunun yaptığı çalışmada, bir mikro hava aracının kanadı için kaldırma kuvvetinin iyileştirmesi için kanadın hücum açısının geri beslemeli kontrolü için bir metot önerilmiştir [17]. Shojaefard ve grubu ise farklı hücum açılarındaki kanat profili için gaz enjeksiyonu ve çekimi ile kaldırma kuvveti katsayısının artırımını başarmışlardır [18]. Tian ve grubu ise yüzey üzerindeki akış kopması problemi için piezoelektrik eyleyiciler kullanan uyarlamalı bir kontrol sistemi ile NACA0025 kanat profilinin üst yüzeyindeki basınç dalgalanmasını engelleyerek akış kopmalarını kontrol edebilmiştir [19]. Gerçekleştirilen çalışmada ise NACA23012 kanat profilinin sürüklenme/kaldırma katsayısının düşürülmesi konusu sistemin doğrusal olmayan

⁶ İng: Von-Karman Vortex Shedding

⁷ İng: Vorticity

dinamik modelinin elde edilmesi ve model için kontrolcü tasarımı yapılarak uygulanmaya çalışılmıştır. Yapılan bu uygulamada yine çeşitli eklentilerle geliştirilen Navier2d programı kullanılmıştır.

2. ÇIRPAN NACA0012 KANAT PROFİLİNİN DİNAMİK MODELLEMESİ

Çırpma hareketi yaparak uçuş yapılması son zamanlarda mikro hava araçlarının tasarımı alanında sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Bu araçların sabit kanatlı hava araçlarına göre verim, manevra yeteneği, daha az gürültü ve daha fazla taşıma kuvveti sağlama konularında avantajı fazladır [20-22]. Çalışmanın bu kısmında aerodinamik merkezi etrafında hücum açısı -30° ile 30° arasında değişerek çırpma hareketi yapan NACA0012 kanat profilinin dinamik modellenmesinin elde edilmesi incelenmiştir. Belirlenen problemde kullanılan yöntemler ise aşağıda detaylandırılmıştır.

2.1 PGH Kullanılarak Akış Alanının Anlık Hız Bilgisinin Elde Edilmesi

Akışkan sistemlerinin dinamiklerinin matematiksel olarak elde edilmesi Navier-Stokes denklemleri kullanılarak gerçekleştirilir. Bu denklemler ifade (2.1) ve ifade (2.2)'de incelenebilir.

$$\frac{\partial q}{\partial t} + (q \cdot \nabla)q = -\nabla p + \nu \Delta q \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot q = 0 \quad (2.2)$$

Burada; $\nu \in \mathbb{R}$ kinematik viskozite değeri, $p(x, y, t) \in \mathbb{R}^2$ basınç değeri, $q(x, y, t) \in \mathbb{R}^2$ ise akış hızı değeridir. Giriş kısmında da bahsedildiği üzere Navier-Stokes denklemlerin analitik olarak çözümünün olmaması, UDA gibi model derecesini düşürme yöntemi ile aşılabılır. Bu yöntemde ise akış alanının anlık bilgilerini kullanarak UDA kipleri oluşturulur. Akışın anlık hız bilgisi ise deneysel olarak elde edilebilmektedir.

PGH olarak adlandırılan bu teknik anlık akış alanını görüntülemeye izin veren bir ölçüm tekniğidir [23] ve temel olarak Nd:YAG lazer, CCD kamera ve lens, su tankı, travers mekanizma ve bilgisayar bileşenlerinden oluşur. PGH sisteminde Nd:YAG lazerden gelen ışınları yansıtmak ve bu yansımaları CCD kamera yardımıyla belirli

bir frekansta görüntülemek için su tankının içine çok küçük boyutlarda olan gümüş kaplı partiküller gelen lazer ışınlarını yansıtması için konur. Bu çalışmada kullanılan PGH sistemi ile ilgili bilgiler Çizelge 2.1'de gösterilmiştir [24-25].

Çizelge 2.1 PHG deneyi özellikleri

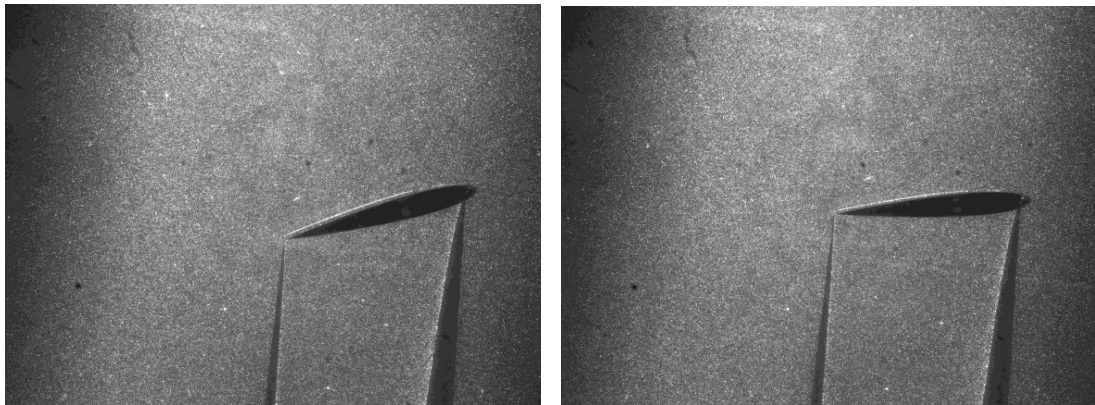
Kanat	Tip	NACA0012
	Kiriş [m]	$c = 0.06$
	Uzunluk [cm]	30
Akış	Akışkan	Su
	Sıcaklık [°C]	21
	Ortam	40 cm x 40 cm x 80 cm tank
Hareket	Periyot [s]	10
	En Yüksek. Açısal Hız [rad/s]	0.63
Partikül	Tip	Gümüş Kaplamalı Boş Cam Küreler
	Çap [μm]	10
	Yoğunluk [g/cm^3]	0.0000475
Lazer	Tip	Nd:YAG
	Güç [mJ/darbe]	120
Kayıt	Kamera Tipi	CCD FlowSense 2M/E
	Kamera Sayısı	1
	Objektif Odak Uzaklığı [mm]	60
	Resim Karesi Hızı [Hz]	5
	$\Delta t/T$	0.02
	Çözünürlük [piksel]	1600 x 1200
	Görüntüleme Gecikme Zamanı [μs]	10000
İnceleme	Metot	Çift Resim Karesi & Adaptif Çapraz Korelasyon
	Çözünürlük	50% örtüşmeli 32 x 32 piksel

Düzenekte kullanılan NACA0012 kanadının dönüş merkezi kanat profiline ucundan, kanat uzunluğunun %25 uzunluğu mesafededir. Travers yer değiştirme sistemi, iki kademeli motordan oluşmaktadır. Birinci motor öteleme hareketini, ikinci motor ise kanadın çarpma hareketini sağlamaktadır. Sistem, kanada 360 derecelik dönüş hareketi verebilmektedir. Travers mekanizmanın şematik gösterimi ise Şekil 2.1'de görülebilir.



Şekil 2.1 PGH deney düzeneği travers mekanizması.

Kanat yunuslama hareketine başlamadan önce ortamdaki hız sıfırdır. Kanat travers mekanizma sayesinde hareketine başladığında su içerisindeki gümüş kaplı kürecikler de hareket etmeye başlayacaklardır. Anlık görüntülerden hız bilgisini çıkartabilmek için, görüntülerde parçacık hareketlerini incelemek gerekmektedir. Gümüş kaplı kürelerin pozisyonlarının anlık görüntülerdeki değişimi hesaplanarak akış alanındaki hız vektörleri her anlık görüntü için oluşturulur. Yapılan deney sonucunda CCD kamera tarafından kaydedilen anlık görüntülerden iki tanesi Şekil 2.2’de görülebilir.

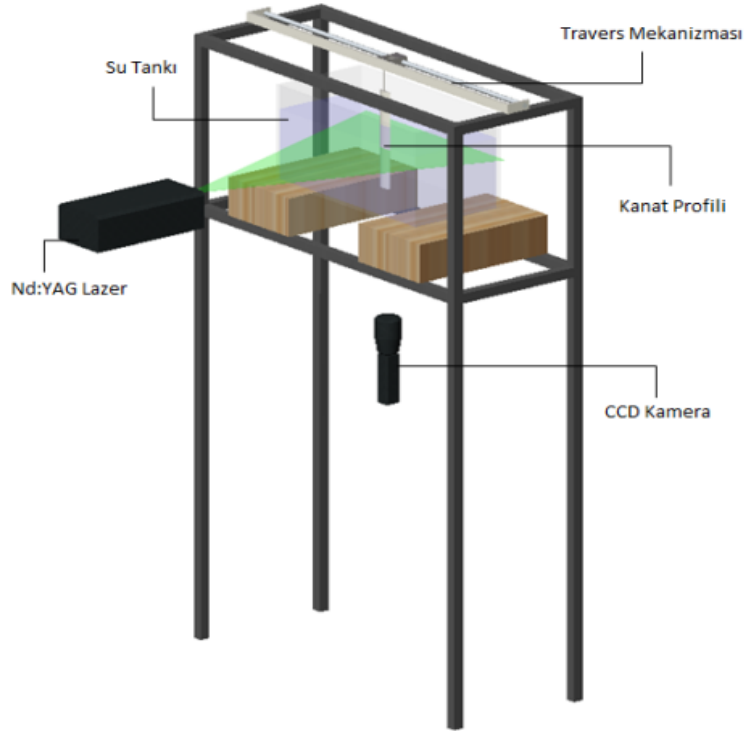


Şekil 2.2 Bazı PGH deneyi anlık görüntüleri.

Lazer tarafından aydınlatılmış parçacıklar görüntülerde beyaz renkte, hareket halindeki kanat ise görüntülerde siyah renkte görülebilir. Sonrasında PGH

görüntülerinden beş periyot için Dantec Dynamic Studio [26] programı kullanılarak hız vektörleri oluşturulur.

PGH görüntülerinde küreciklerin anlık görüntülerdeki yer değiştirmeleri kullanarak analiz yapabilmek için resimler küçük inceleme bölümlerine ayrılmaktadır [27]. PGH ölçümlerinde daha iyi çözünürlük elde etmek için bu inceleme alanlarının yeterince küçük olması tercih edilmektedir, bu alanlar çok küçük olursa, incelemenin sonunda yanlış hız vektörleri görülmesi durumu da olasıdır. Bu inceleme uyarlamalı çapraz-korelasyon yöntemiyle yapılmaktadır [28-29]. PGH tekniği ile elde edilen anlık hız görüntüleri MATLAB ortamına aktarılmıştır. Son olarak PGH deney düzeneğinin şematik olarak gösterimi ise Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te görülebilir [24-25].



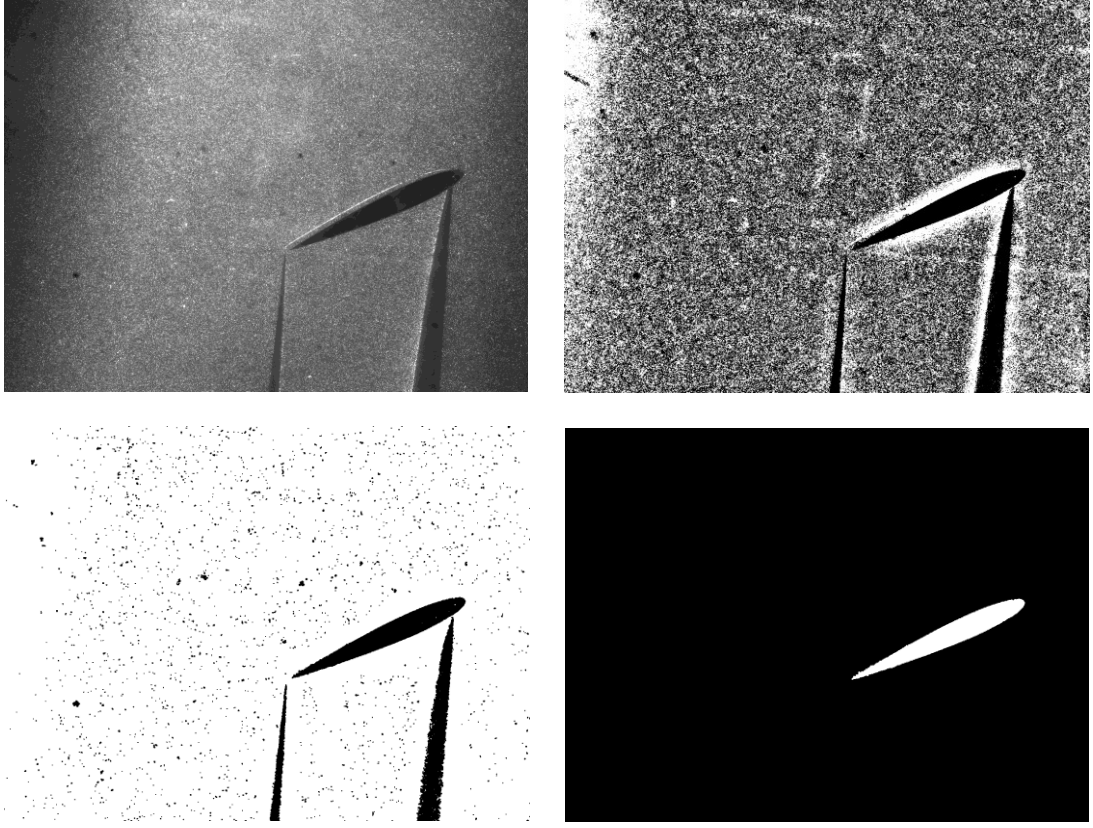
Şekil 2.3 PGH deney düzeneği.



Şekil 2.4 PGH deney düzeneğinin fotoğrafı.

2.2 Görüntü İşleme Kullanarak Kanat Pozisyonunun Tespiti

PGH tekniği ile elde edilen anlık hız görüntülerindeki hız vektörlerinin kanadın çarpma hareketinden kaynaklanan görüntülerden ayrılabilmesi için, her anlık görüntüyü tek tek işleyen bir görüntü işleme programı MATLAB Image Processing Toolbox kullanılarak yazılmıştır. Program temel olarak PGH'den gelen görüntüdeki kanat profilini, çeşitli morfolojik işlemler kullanarak gümüş kürelerden yansıyan görüntülerden ayırıp, maskeleyerek her anlık görüntüdeki kanadın dönme merkezini tespit ederek hücum açısını bulmaktadır. Yapılan morfolojik işlemlerdeki adımlar sonucunda görüntünün maskelenmesi işlemi adım adım Şekil 2.5'te görülebilir.



Şekil 2.5 Görüntü işleme adımları; gri yelpaze, uyarlamalı filtreleme, disk şekilli yapı elementi, gürültü eliminasyonu.

Bu program sayesinde anlık görüntülere kanat profili ve kanat profilinin hızı, akış hız alanına MATLAB ortamında yerleştirilebilir hâle gelmiştir. Kanat profilinin hareketi ise radyan cinsinden α açılı sinüzoidal yunuslama hareketi olarak aşağıdaki ifade (2.3)'de görülebileceği gibidir.

$$\alpha(t) = \alpha_0 \sin(2\pi ft) \quad (2.3)$$

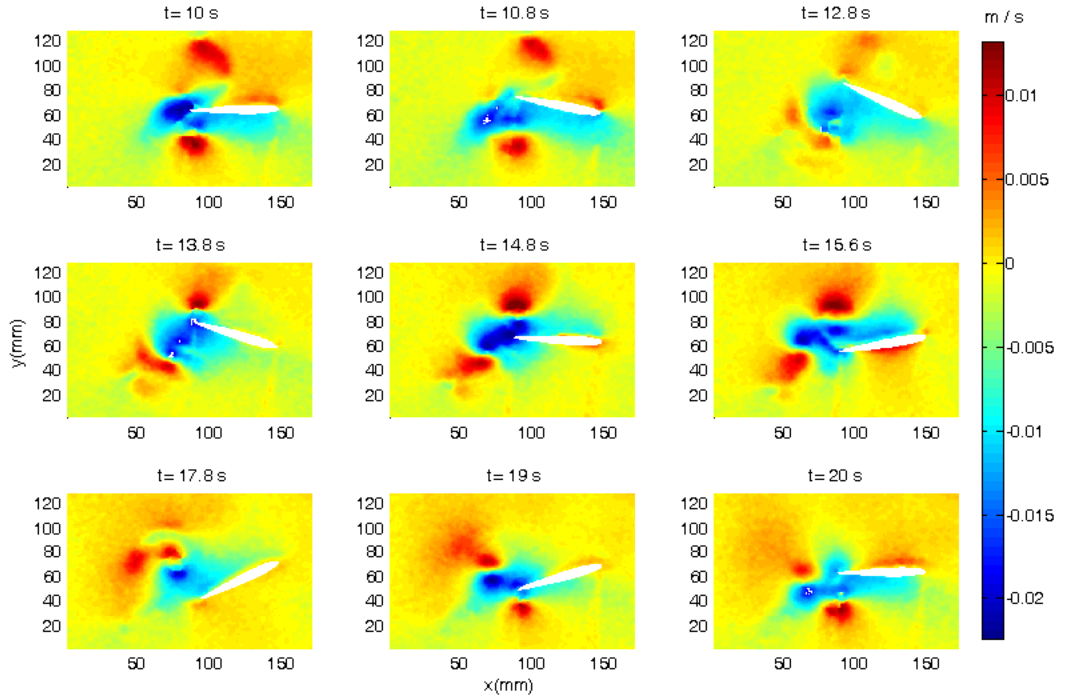
Burada $\alpha_0 = \pi/6$, sinüzoidal hareketin frekansı $f = 0.1Hz$ ve t zaman değişkeni şeklindedir. Kanat profilin aerodinamik merkezi etrafındaki açısal hızı ise $\omega \text{ rad/s}$ şeklindedir ve ifade (2.4)'te incelenebilir.

$$\omega(t) = \frac{d\alpha(t)}{dt} = 2\pi f a_0 \cos(2\pi f t) \quad (2.4)$$

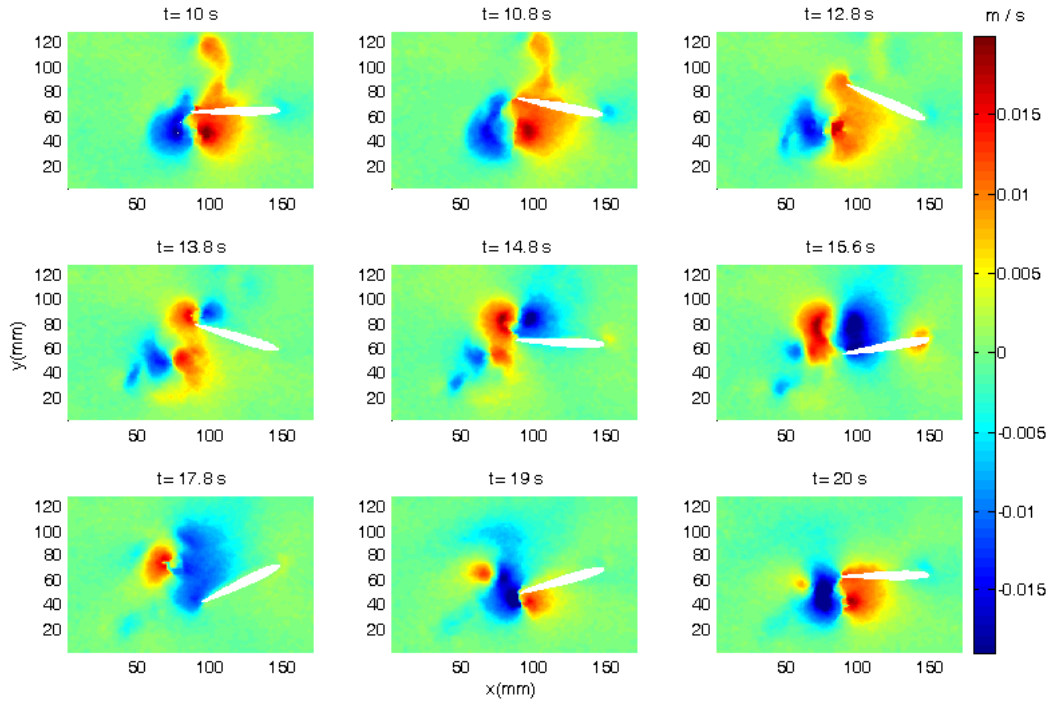
Her görüntü için kanat yüzeyinin x-y koordinatları ve açılal hızları ω bilindiğine göre, kanadın içindeki ve yüzeyindeki hız vektörleri $U(x,y)$ ifade (2.5) ile hesaplanabilir.

$$\vec{U}(x,y) = \vec{r}(x,y) \times \omega \vec{k} \quad (2.5)$$

Burada \vec{r} kanadın çeyrek kanat eni mesafesine göre olan pozisyon vektörünü, k ise z yönündeki birim vektörü temsil etmektedir. Bu bilgiler ışığında kanadın içindeki ve çevresindeki hız bilgisi (2.5) ifadesi kullanılarak doldurur. x ve y yönündeki anlık hız alanını ve uygun kanat konumunu üst üste getirilmiş hâlde sırasıyla Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de göstermektedir.



Şekil 2.6 x yönündeki anlık hız alanları



Şekil 2.7 y yönündeki anlık hız alanları

2.3 Anlık görüntülere UDA Uygulanması

UDA düşük mertebeli yaklaşımlarla daha yüksek mertebeden ve daha karmaşık olan işlemleri ifade etmek için kullanılan bir veri analizi metodudur. Bu metod sayesinde akış alanındaki hız vektörlerinden oluşan akış denklemi zaman katsayıları (zamana bağlı genlik) ve UDA kipleri olarak ifade edilebilir. Karhunen-Loeve Decomposition metodu olarak da bilinen [30] bu işlem akış alanının anlık hız görüntülerine ihtiyaç duymaktadır. UDA yönteminde deneysel PGH kullanılarak elde edilen anlık görüntüler kullanılmıştır. UDA metodu, toplanan anlık hız görüntülerini, akış alanındaki enerjiyi belli oranda temsil edecek birtakım temel fonksiyonlar üreterek uzaysal kipleri elde eder [31-32]. Akış enerjisinin ne kadar yeterli miktarının temsil edileceği de UDA kipi sayısı ile alakalıdır. Akış alanı sonlu boyut yaklaşımı yapılarak ifade (2.6) elde edilebilir.

$$U(x, y, t) \approx \sum_{i=1}^N a_i(t) \phi_i(x, y) \quad (2.6)$$

burada a_i , $i = 1, 2, \dots, N$ zaman katsayılarını, ϕ_i ise UDA kiplerini temsil etmektedir. Akış alanının UDA kiplerini (ϕ_i) bulmak için i anındaki (t_i) anlık hız verileri (U_i) bulunmalıdır. Anlık hız verileri, $U_i(x, y) = U(x, y, t_i)$ şeklinde de gösterilebilir. Anlık görüntülerin ortalamalarını ifade (2.7)'deki gibi

$$\bar{U}(x, y) = \langle U \rangle = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M U_i(x, y) \quad (2.7)$$

şeklinde tanımlayabiliriz; burada M anlık görüntü sayısını temsil etmektedir. Hız ölçümlerinden, bulunan ortalama değerler çıkartılırsa yeni anlık veriler (V_i) ifade (2.8)'deki gibi elde edilir.

$$V_i(x, y) = V(x, y, t_i) = U(x, y, t_i) - \bar{U}(x, y) = U_i(x, y) - \bar{U}(x, y) \quad (2.8)$$

Daha sonra bu yeni veriler kullanılarak $M \times M$ boyutundaki uzaysal korelasyon matrisi C ifade (2.9)'daki gibi oluşturulur.

$$C_{ij} = \frac{1}{M} \int \int V_i(x, y) V_j(x, y) dx dy, \quad (2.9)$$

Burada;

$$i = 1, \dots, M, \quad j = 1, \dots, M \quad (2.10)$$

şeklindedir. Oluşturulan bu matrisin öz-değeri ve öz-vektörü bulunarak akış alanının UDA kipleri ϕ_i ifade (2.11)'deki gibi hesaplanabilir.

$$C\phi_i = \lambda_i\phi_i \quad (2.11)$$

UDA kipleri ϕ_i , korelasyon matrisinin öz-vektörleridir. Matrisin her bir öz-değeri λ_i ise, ilgili UDA kipinin temsil ettiği akış enerjisi miktarını gösterir. Bu enerji bilgisi baz alınarak, ifade (2.6) denklemindeki yaklaşılamada kullanılacak UDA kipi sayısı (N) belirlenebilir. Bulunan UDA kipleri ortonormal olmak zorundadır. Bu nedenle UDA kipleri ifade (2.12) sağlamalıdır.

$$\frac{1}{M} \int \int \phi_i(x, y)\phi_j(x, y)dx dy = \begin{cases} 1, & \text{if } i = j \\ 0, & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (2.12)$$

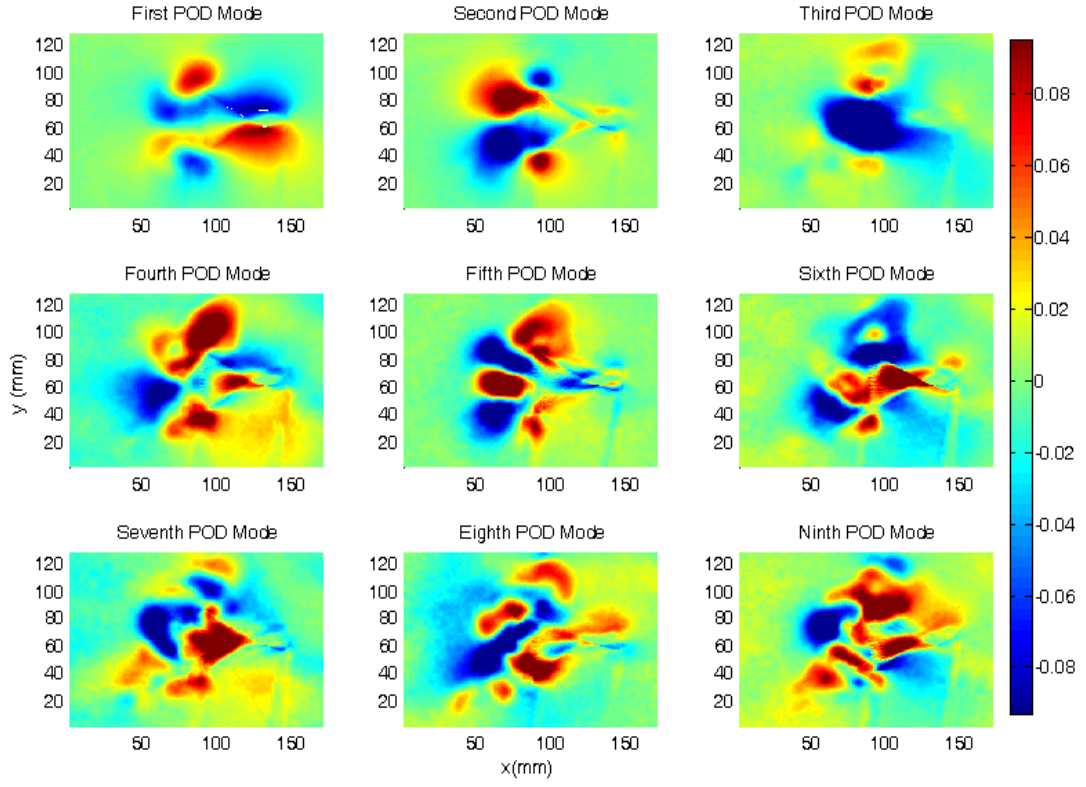
UDA kiplerini bulduktan sonra, akış alanındaki a_i zaman katsayıları anlık görüntülerin, UDA kiplerinin üzerine izdüşümü alınarak ifade (2.13)'deki gibi bulunur.

$$a_i(t_j) = \frac{1}{M} \int \int V(x, y, t_j)\phi_i(x, y)dx dy, \quad (2.13)$$

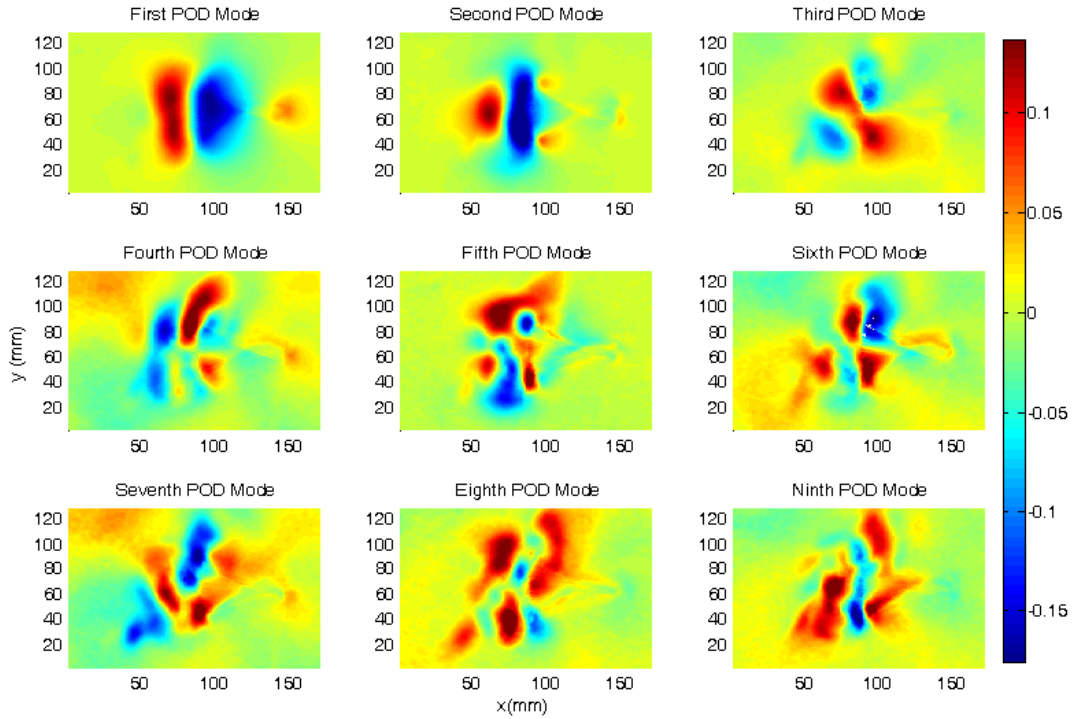
Burada;

$$i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, M \quad (2.14)$$

şeklindedir. UDA yönteminin detayları, Holmes ve grubu [33] ve Sirovich [34] kaynaklarından öğrenilebilir. UDA metodu (2.6) numaralı ifade açılımını elde etmek için, PGH tekniğiyle elde edilen anlık görüntülere uygulanmıştır. Bu amaçla 5 periyotluk kanadın yunuslama hareketinin verileri toplanmıştır. Bu 5 periyotluk veri, 250 tane çift görüntü içermektedir. Yukarıda anlatılan prosedür kullanılarak elimizdeki hız ölçümlerinin UDA kipleri bulunur. (2.12) numaralı ifadede gösterilen, anlık görüntülerin UDA kipleri üzerine izdüşümü alınarak da zaman katsayıları hesaplanır. Elde edilen ilk dokuz UDA kipinin x ve y bileşenleri sırasıyla Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'daki gibidir.

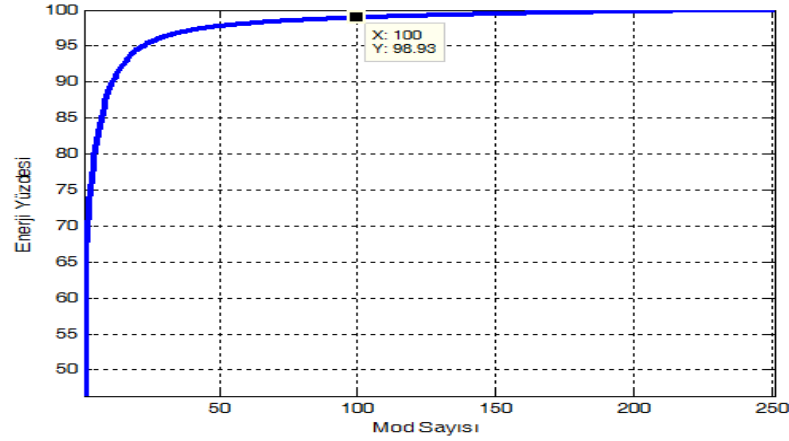


Şekil 2.8 UDA kiplerinin x bileşenleri.



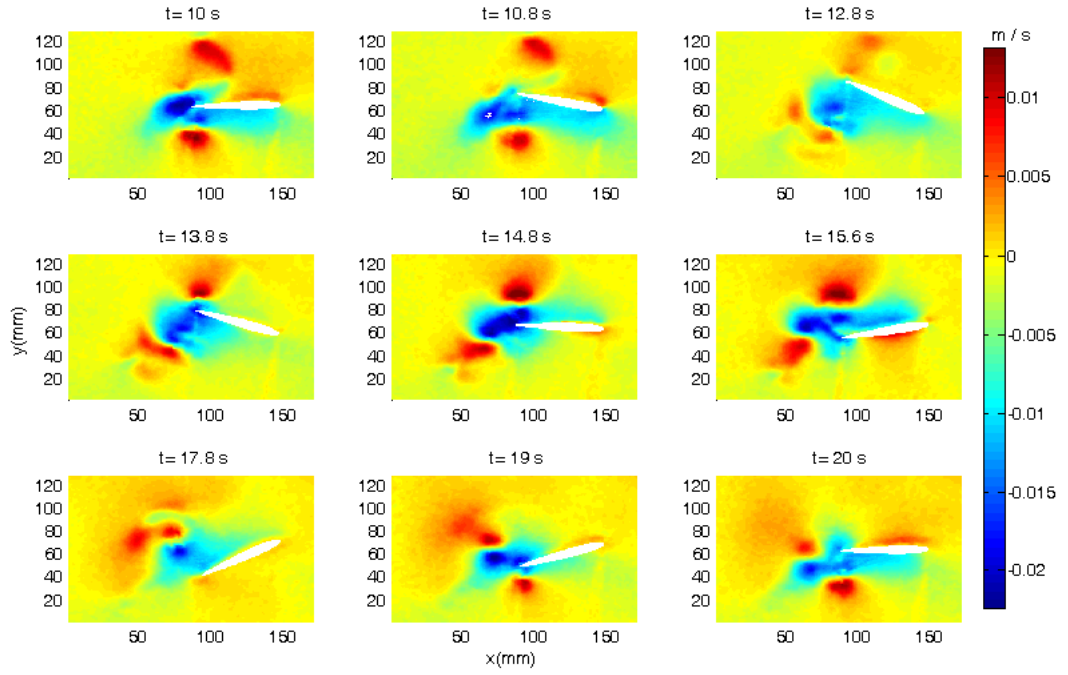
Şekil 2.9 UDA kiplerinin y bileşenleri.

İlk kip en yüksek enerjili kiptir ve akışın en baskın karakteristiğini temsil eder. Devamındaki kipler akış karakteristiğinin ek detaylarını açığa çıkartır. İfade (2.6)'nın içerdiği UDA kiplerinin sayısı, akış enerjisinin bir başka deyişle akıştaki detay miktarının ne kadarının yaklaşıma dâhil edilmek istendiğine göre seçilir. Kiplerin sayısının yüksek olması daha iyi bir yaklaşım ortaya çıkartacaktır fakat bu da modelin karmaşıklığını arttırmaktadır. Bu çalışmada 250 moddan 100 tanesi seçilmiştir ki bu da Şekil 2.10'da görülebileceği gibi akış enerjisinin %98.93 üne karşılık gelmektedir.

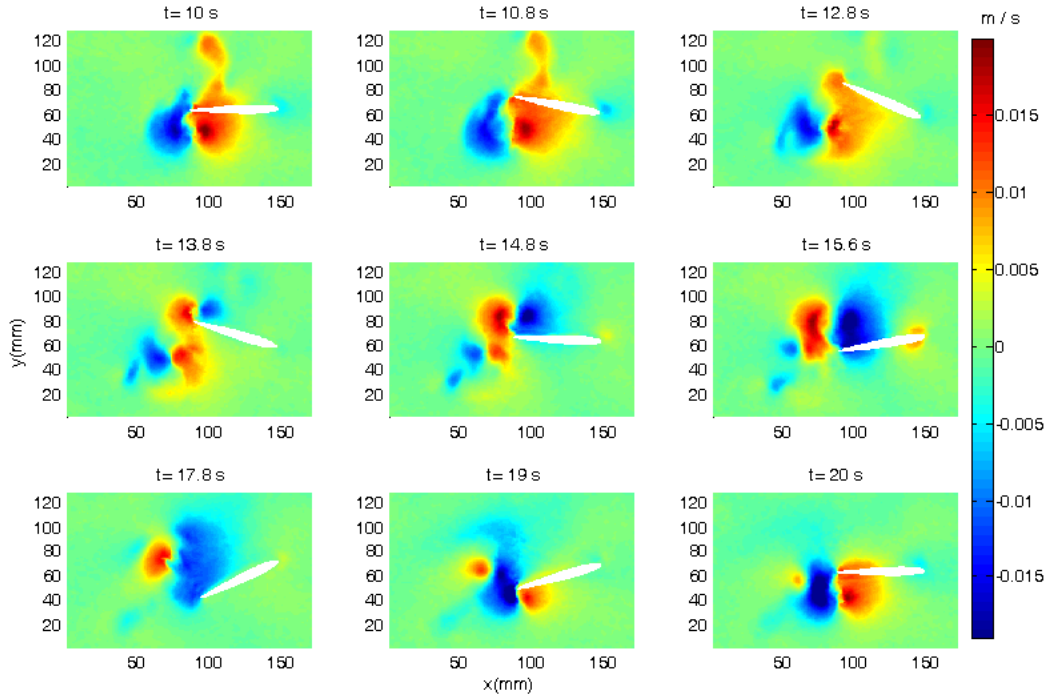


Şekil 2.10 Enerji yüzdesi-kip sayısı grafiği.

Seçilen kip sayısının akışı doğru olarak ifade ettiğini doğrulamak için ifade (2.6) (ki burada a_i zaman katsayıları ifade (2.13)'de belirtildiği gibi akış anlık görüntülerinin UDA kipleri üzerine izdüşümünün alınması ile elde edilmektedir) kullanarak bir geri çatılama elde edilmiştir. Yapılan geri çatılama sonucu elde edilen akış hızlarının x ve y bileşenleri Şekil 2.11 ve Şekil 2.12'de belirtilmiştir.



Şekil 2.11 UDA kiplerinin geri çatılanmış x bileşenleri



Şekil 2.12 UDA kiplerinin geri çatılanmış y bileşenleri

Şekillerin incelenmesi sonucunda geri çatılma yapılmış akış hızı, Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'deki PGH'den elde edilen anlık görüntülerle büyük ölçüde benzerdir.

2.4 Sistem Tanılama

Akış ifade (2.6) kullanılarak ifade edildikten ve UDA kipleri elde edildikten sonra, zaman değişiminin sadece a_i katsayıları tarafından belirlendiği gözlenmiştir. Bunun sebebi ise Φ_i kiplerinin sadece uzaysal kiplere bağlı olmasıdır, zaman değişkenlerine bir bağlılık söz konusu değildir. Bu yüzden akışı modellemek için uygun bir dinamik modelin $a_i(t)$ zaman katsayılarının yörüngesine oturtulması lazımdır. Bu amaçla aşağıdaki formda bir durum-uzay modeli gerekmektedir:

$$\xi(t + T_s) = A\xi(t) + B\gamma(t) \quad (2.15)$$

$$y(t) = C\xi(t) + D\gamma(t) \quad (2.16)$$

Burada $\xi \in \mathbb{R}^n$ durum vektörü, $n \in \mathbb{N}$ sistemin derecesi, $\gamma \in \mathbb{R}$ kontrol girişi, $y \in \mathbb{R}^n$ ise çıkış sinyalidir. Akışın anlık görüntüleri $T_s \in \mathbb{R}$ saniye örnekleme periyodu ile bölünmüş ayrık zaman aralıklarında elde edildiğinden dolayı yukarıdaki model bir ayrık-zamanlı durum-uzay modelidir. A , B , C ve D matrisleri dinamik sistemi belirler ve sistem tanılama teknikleri kullanılarak (2.15) ve (2.16)'daki modeli oluşturmak üzere elde edilirler. Bu amaçla sisteme sinüs dalgası, rampa fonksiyonu ve değişken frekanslı sinüs sinyali gibi girdiler uygulayıp sonuç çıktıları uygulanır ve buna bağlı elde edilen zaman katsayıları aşağıdaki gibi bir çıkış vektöründe toplanır.

$$y(t) = a(t) = [a_1(t) \ a_2(t) \ \dots \ a_N(t)]^T \quad (2.17)$$

Burada N ifadede kullanılan UDA kiplerinin sayısıdır. Giriş-çıkış verisine bir alt uzay sistem tanılama metodu (N4SID) uygulanarak (2.15) ve (2.16)'daki A , B , C ve D matrisleri elde edilir. Bu alt uzay metodunun ana fikri, ilk olarak genişletilmiş gözlenebilirlik matrisinin tahmininin yapılmasıdır:

$$Q_r = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{r-1} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Bunun için sisteme ait giriş-çıkış verileri kullanılarak en küçük kareler benzeri izdüşüm adımları izlenir. Özellikle aşağıdaki formda bir ifade ile bunu göstermek mümkündür.

$$Y_r(t_k) = Q_r \xi(t_k) + S_r \Gamma_r(t_k) + V(t) \quad (2.19)$$

Bu ifade (2.15) ve (2.16)'dan çıkartılabilir, burada;

$$Y_r(t_k) = \begin{bmatrix} Y(t_k) \\ Y(t_{k+1}) \\ \vdots \\ Y(t_{k+r-1}) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$\Gamma_r(t_k) = \begin{bmatrix} \gamma(t_k) \\ \gamma(t_{k+1}) \\ \vdots \\ \gamma(t_{k+r-1}) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$S_r = \begin{bmatrix} D & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ CB & D & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ CA^{r-2}B & CA^{r-3}B & \cdots & CB & D \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

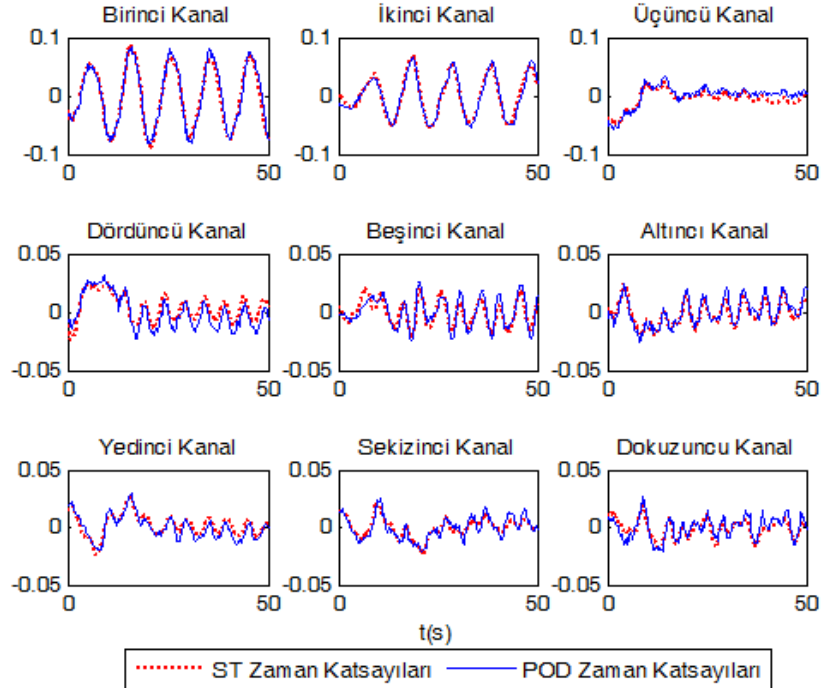
şeklinde ve $V(t)$ çıkış gürültüsünden dolayı eklenmiştir. Genişletilmiş gözlenebilirlik matrisi Q_r (2.19) ifadesinden, eşitliğin iki tarafını da $V(t)$ gürültüsünün etkisini asimptotik olarak yok edecek ve $S_r \Gamma_r(t_k)$ terimlerini eleyecek niceliklerle ilişkilendirilerek elde edilir. Q_r bilindiği takdirde, C ve A matrisleri Q_r 'nin ilk satır bloğu ve kaydırma özelliği sırasıyla kullanılarak bulunabilir. A ve C elde

edildiğinde, B ve D matrisleri doğrusal en küçük kareler kullanılarak aşağıdaki ifadeden elde edilebilir.

$$y(t_k) = C(zI - A)^{-1}B\gamma(t_k) + D\gamma(t_k) \quad (2.23)$$

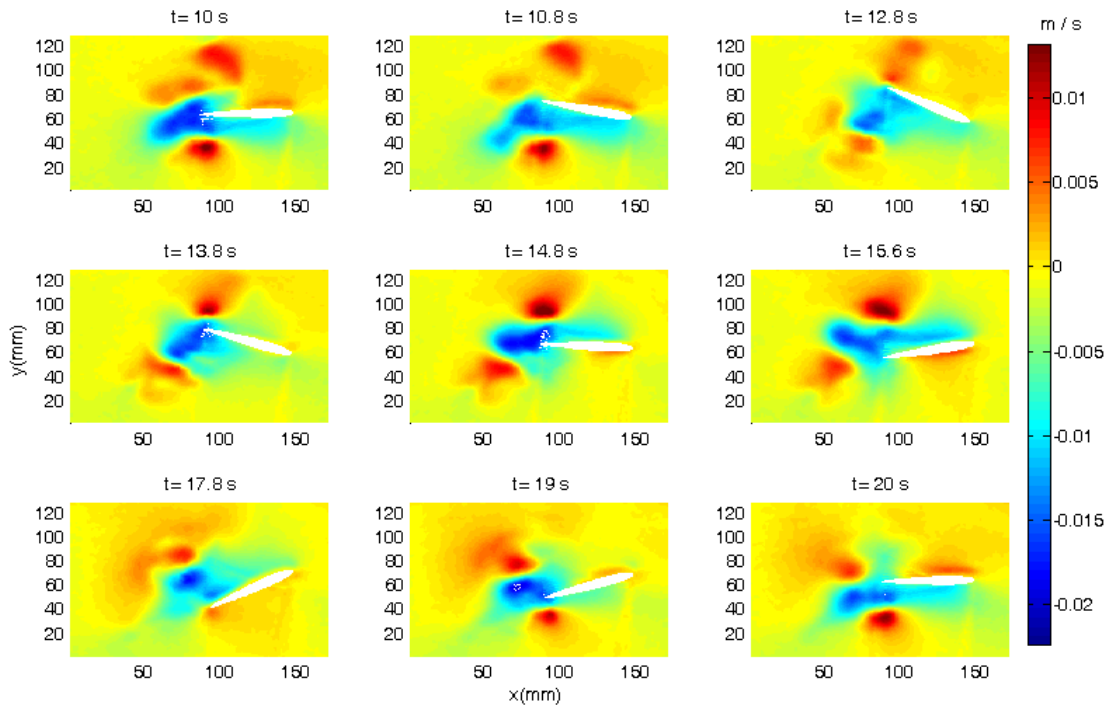
Yukarıdaki ifade, (2.15) ve (2.16) ile tanımlanan sistemin kaydırma operatörü z cinsinden ifadesidir. Durum-uzayı modellerinin tahmini için kullanılan alt uzay metodunun detayları Ljung [35], Van Overschee [36] ve Larimore [37] kaynaklarında bulunabilir.

MATLAB System Identification Toolbox çalışmadaki bütün bu adımlar için kullanılmıştır. Ayrıca UDA metoduna benzer şekilde, ifade (2.13)'teki gibi anlık görüntülerin UDA kipleri üzerine izdüşümü yapılmış ve elde edilen zaman katsayılarının dinamiğini temsil eden bir ayrık zaman durum-uzayı modeli ifade (2.15) ve ifade (2.16)'daki gibi elde edilmiştir. Bu modelin derecesi 40 olmaktadır. Bu modelin UDA zaman katsayılarına yakınsadığını değerlendirmek için, öncelikle model 5 periyot (50 saniye) kadar çalıştırılır ve çıktısı UDA zaman katsayılarıyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma Şekil 2.13'te gösterilmiştir.

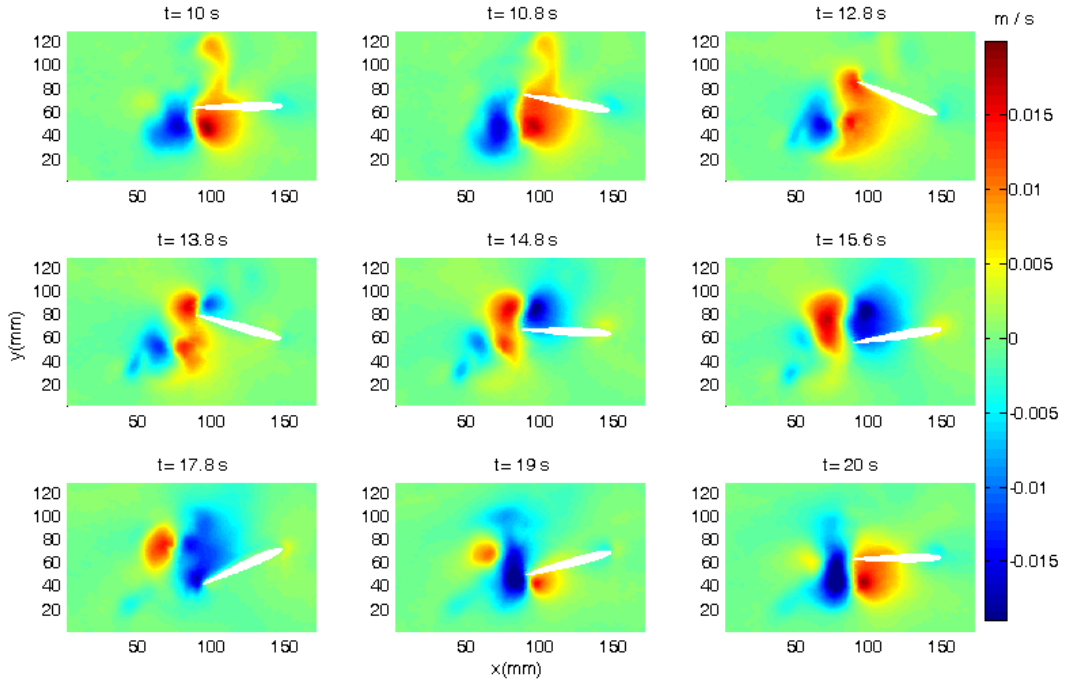


Şekil 2.13 ST ve UDA zaman katsayılarının karşılaştırılması.

Şekil 2.13 incelendiğinde Model çıktısının UDA zaman katsayılarına kabul edilebilir derecede yakın olduğu görülebilir. Bundan dolayı dinamik model akışın zaman değişimini yakalamada başarılıdır denebilir. Son bir test olarak, dinamik modelin çıktısı, ifade (2.6)'daki a_i ler olarak kullanılarak bir geri çatılma yapılmıştır ve sonuçları Şekil 2.14 ve Şekil 2.15'te gösterilmiştir.



Şekil 2.14 ST zaman katsayıları ile geri çatılama (x hızları)



Şekil 2.15 ST zaman katsayıları ile geri çatılama (y hızları)

Bu şekillerin Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'deki orijinal PGH anlık görüntüleri ile karşılaştırılması yapıldığında sonuçların birbirlerine yeterli ölçüde yakın olduğu görülebilir. Sonuç olarak bahsedilen prosedür uygulandığında elde edilen modelin, akışı kabul edilebilir bir doğrulukta ve çeşitli analiz ve kontrol tasarımı tekniklerinde kullanılabilir bir hâle getirdiği söylenebilir.

3. SİLİNDİR ETRAFI AKIŞ SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ VE GİRDAPLILIK KONTROLÜ

Karmaşık yapıdaki akışkan davranışlarının anlaşılmasında önemli bir rol oynayan silindir etrafı akışın kontrolü için girdap kontrolü için çeşitli kontrol yaklaşımları geliştirilmiştir. Bunlardan bir tanesi de silindir arkasında oluşan periyodik girdapların kontrolü konusudur. Çalışmanın bu kısmında mevzubahis problem için doğrusal ve doğrusal olmayan modelleme ve kontrol yaklaşımı ele alınmıştır. Çalışmanın bu bölümünde benzetim için kullanılan bilgisayarın özellikleri ise Çizelge 3.1'deki gibidir;

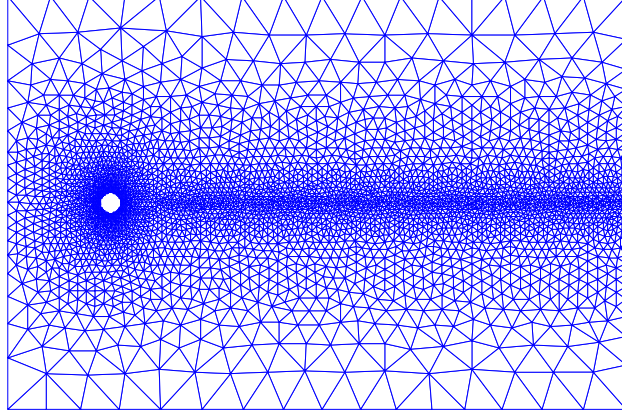
Çizelge 3.1: Benzetimde kullanılan bilgisayarın özellikleri

Üretici	Hewlett-Packerd Company
Model	h8-1100tr
İşlemci	Intel Core(TM) i7-2600 CPU@ 3.40 GHz
Bellek	16 GB
Sabit Bellek	2 TB
Grafik İşlemci	NVIDIA GeForce GT545 3GB
İşletim Sistemi	Microsoft Windows 7 Premium 64 bit

3.1 Silindir Etrafı Akışın Doğrusal Dinamik Modellemesi ve Girdaplılık Kontrolü

Von-Karman girdap koridoru olarak tanımlanan, silindir etrafından geçen akışın silindir arkasında zıt yönlere dönerek kendini tekrarlayan bir yapıdaki akış, düşük Reynolds sayılarında türbülanslı olmaktadır. İstenmeyen bu girdap etkisini ortadan kaldırmak için ise sistemin dinamik modelinin elde edilmesi ve bu modele bir kontrolcü tasarlanması gerekmektedir. Çalışmanın bu kısmında akışkan benzetimleri için kullanılacak MATLAB tabanlı Navier2d [16] HAD programındaki örgü geometrisinin görünümü Şekil 3.1'de mevcuttur.

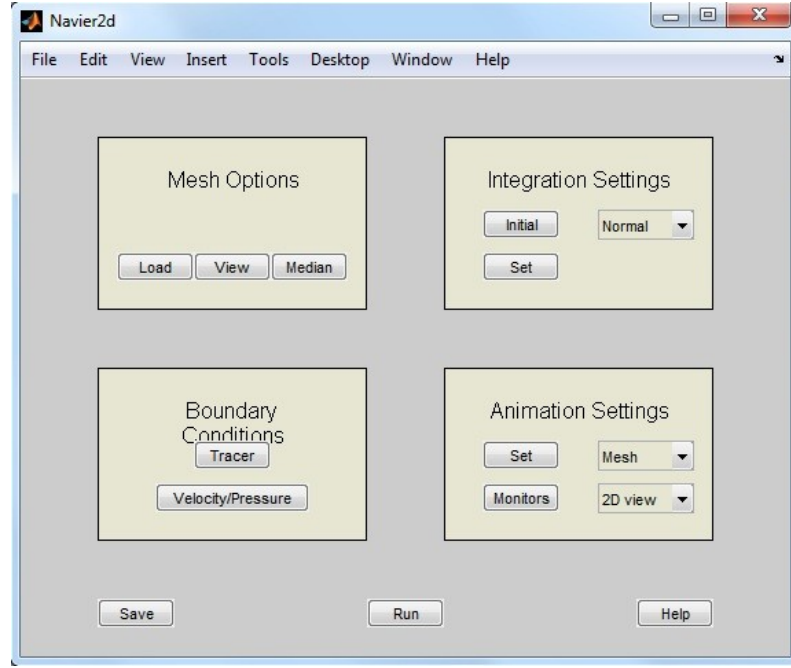
4002 Nodes, 7826 Triangles



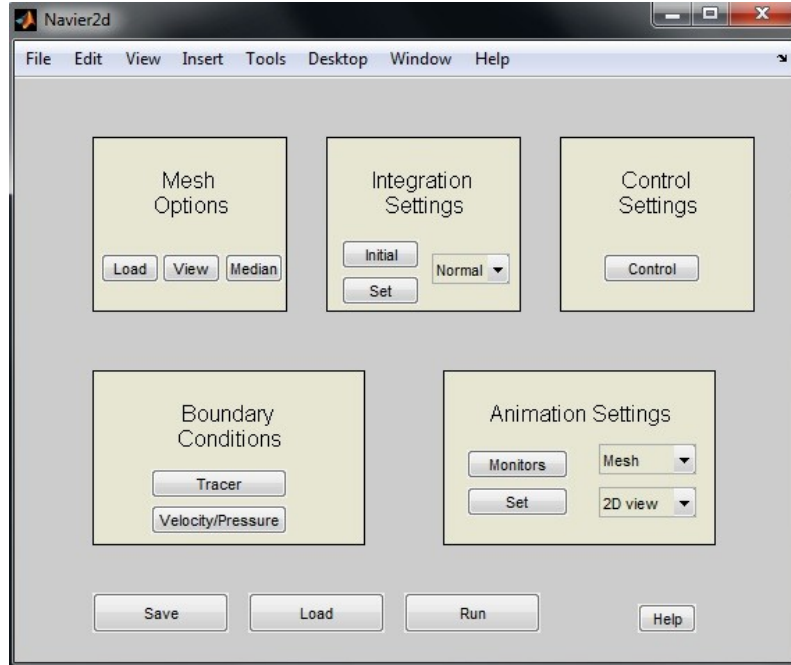
Şekil 3.1 Silindir gövde örgü geometrisi.

3.1.1 HAD Benzetimleri ve Giriş-Çıkış Verisi Elde Etme

Sistem tanılama kısmında kullanılacak giriş-çıkış veri setini elde etmek için geliştirilmiş Navier2d programını kullanarak benzetim yapmak bu bölümün temel konusu olacaktır. Kontrol probleminin çözümü için Navier2d programına çeşitli eklentiler yazılarak isteklerimiz doğrultusunda çalışabilecek duruma getirilmiştir. Bu eklentiler temel olarak kullanıcının kontrol sisteminin girişi olacak bölgeleri ve geribesleme olacak ölçüm bölgelerini örgü geometrisi üzerindeki istedikleri düğüm noktaları arasından seçebilmelerini esas almıştır. Ayrıca program Sistem Tanılama kısmında uygulanacak test girişini hazır fonksiyonlar olarak uygulayabilir ve ölçüm değerlerini kaydedebilir şekilde geliştirilmiştir. Son olarak ise, programa MATLAB Control Systems Toolbox kullanılarak tasarlanan kontrolcünün adı girildiğinde, kontrolcü tarafından uygulanacak girişi benzetime dâhil edebilecek bir tasarım yapılmıştır. Bu eklemeler yapıldığında program ara yüzünün ilk ve sonraki hâli Şekil 3.2’de ve Şekil 3.3’te incelenebilir.



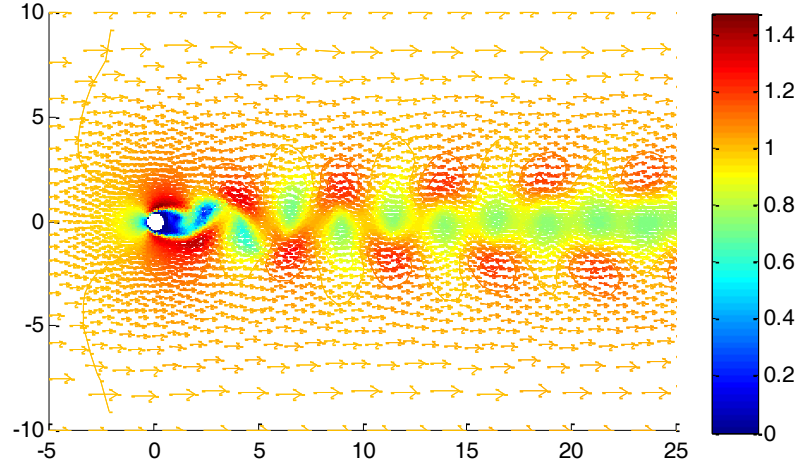
Şekil 3.2 Navier2d programının ilk ara yüzü



Şekil 3.3 Navier2d programının geliştirilen ara yüzü.

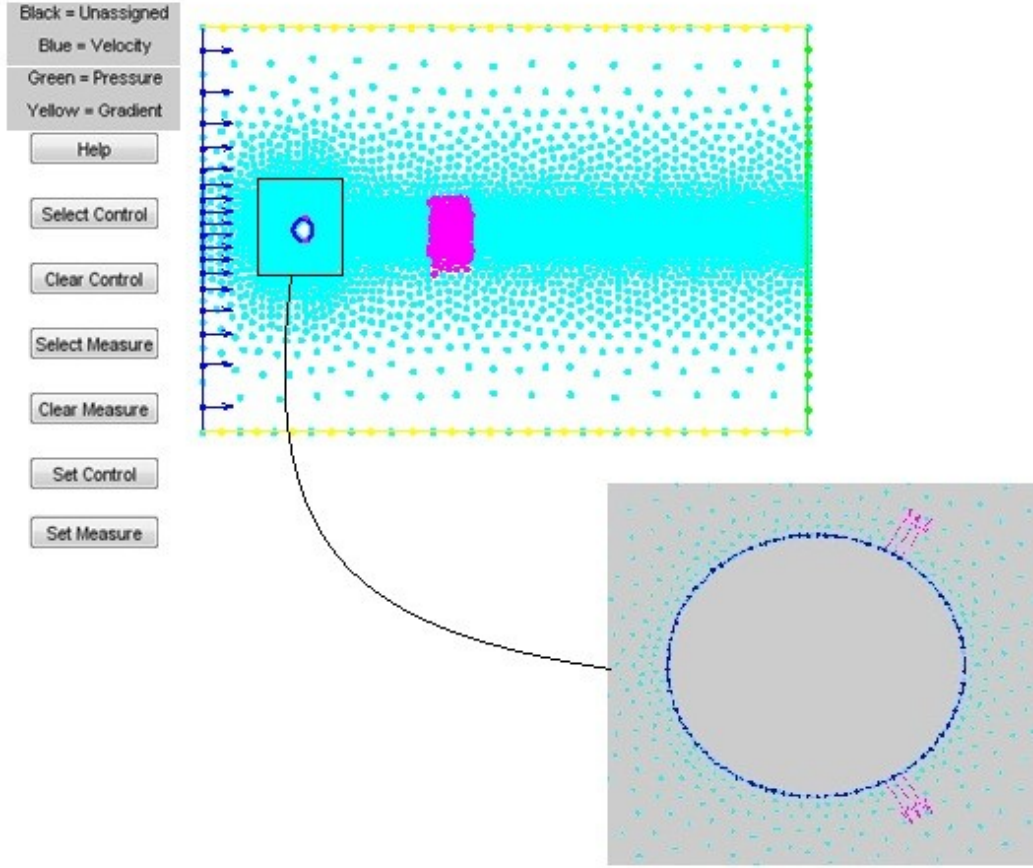
Programdaki eklentiler doğrultusunda, kontrolcü tarafından Şekil 3.3'te sağ üst kısımda görülebilen “Control” düğmesine tıklandığı anda açılan yeni bir ekranda kullanıcının örgü üzerinden ölçüm ve kontrolcü girişi noktalarını seçmeleri sağlanmıştır. Açılan yeni ekrandaki düğmeler ise seçilen ölçüm noktalarından hangi değerlerin ölçüleceği seçeneklerini kullanıcıya sunarken, kontrolcü için ise bir transfer fonksiyonu veya SIMULINK kullanılarak tasarlanan bir kontrolcüyü seçme imkânı tanımaktadır.

Geliştirilen bu program kullanılarak yapılan benzetimlerde kullanılan sınır değerleri ve parametreler şu şekildedir: Akış alanı $\Omega = [-5 m, 25 m] \times [-10 m, 10 m]$ büyüklüğündedir, (0,0) noktasında merkezi konumlanmış silindirin çapı ise $d = 1 m$ olarak alınmıştır. Kinematik viskozite değeri ise $\nu = 0.0067 \frac{m^2}{s}$ şeklindedir. Akış alanına akacak olan akışkan alanın sol sınırından hızı $1 \frac{m}{s}$ olacak şekilde yani $U = 1 \frac{m}{s}$ ve $V = 0$ akmaktadır. Alt ve üst sınırlar ise sürtünmesiz olacak şekilde seçilmiştir, başka bir deyişle $\frac{dU}{dn} = 0$ ve $V = 0$ olarak düşünülebilir, burada n yüzeylere dik yön olarak alınmıştır. Akış alanından geçen akışkanın alanın sağ sınırından sabit basınçla alanı terk ettiği düşünülmüştür. Silindirin yüzeyi de kaymasız yani $U = V = 0$ olacak şekilde ayarlanmıştır [38]. Benzetimde düşük bir Reynolds sayısı $Re = 150$ olarak alınmıştır ki bu değerde girdapların birbirini tekrarlayan örüntüsünün görülmesi beklenmektedir. Bu parametreler kullanılarak benzetim 250 s çalıştırılmıştır ve görülmesi beklenen girdap hareketleri Şekil 3.4'teki gibi gözlenmiştir.



Şekil 3.4 250 s çalıştırılan simülasyonun akış alanı.

Yapılan çalışmada modelleme ve kontrol kısmı için bahsedilen eklentiler yapılan programda, giriş noktası Şekil 3.5'te görülebileceği üzere silindirin alt ve üst noktalarından akış alanına hava üfleyecek/çekecek şekilde seçilmiştir. Girdaplılık değerlerinin okunacağı ölçüm noktaları ise yine Şekil 3.5'te görülebilen silindirin arkasında kalan bölgedeki düğümler olarak seçilmiştir.



Şekil 3.5 Eyleyici giriş ve ölçüm noktaları.

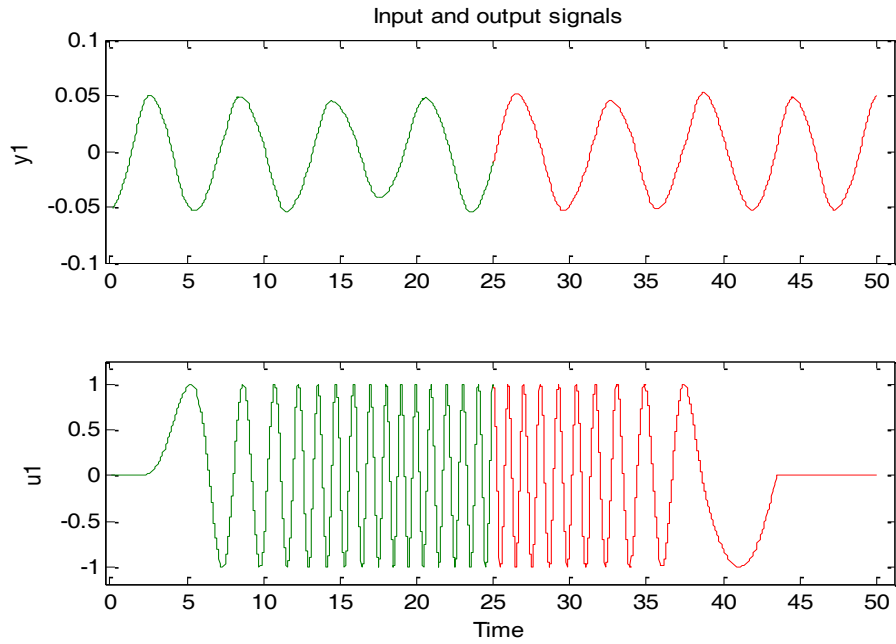
Giriş/çıkış noktaları belirlendikten sonra ölçüm alanlarındaki girdaplılık değerinin hesaplanması için de aşağıdaki ifade kullanılmıştır [38].

$$\eta = \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} \quad (3.1)$$

Burada U ve V değerleri sırasıyla akışın yönüne paralel ve dik vektörlerdir. Ölçüm olarak alınacak girdaplılık değeri her düğümde farklı olacağı için bu değerlerin ortalaması ölçüm verisi olarak kaydedilmiştir.

$$y = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |\eta_i| \quad (3.2)$$

Burada η_i kaçınıcı ölçüme ait girdaplılık değeri olduğunu belirlerken M de düğüm noktası sayısını belirtir. Sistem giriş/çıkış yerleri belirlendikten sonra sistem tanılama uygulamak için benzetim belli bir giriş altında çalıştırılıp çıktılar kaydedilmelidir. Sistemin dinamiklerini daha doğru ve etkin elde etmek için uygulanacak girişte birden fazla frekans bulunmalıdır. Bu nedenle giriş olarak değişken frekanslı sinüs fonksiyonu⁸ uygulanmıştır. Bu fonksiyonun başlıca özellikleri, birim genliğe sahip olması, ilk 25 saniye frekansın 0.1 Hz 'den 1 Hz 'e artması, sonraki 25 saniyede 1 Hz 'den 0.1 Hz 'e azalması, böylece toplamda 50 saniye süren bir sinüzoidal fonksiyon olmasıdır. Benzetim çalıştırıldığında belirlenen girdi ve bu girdiye karşı elde edilen çıktı Şekil 3.6'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.6 Giriş sinyali (u_1) ve çıkış sinyali (y_1).

Şekil 3.6 incelendiğinde giriş sinyali u_1 'in ilk 25 saniyesi (yeşil) ile son 25 saniyesi (kırmızı) ayrılmıştır. Bunun nedeni Sistem Tanılamada ilk 25 s (yeşil) kullanılarak dinamik modeli oluşturacak sonraki 25 s (kırmızı) kullanılarak da sistemin doğruluğu kontrol edilecek olmasıdır.

⁸ İng: Chirp Function

3.1.2 Sistem Tanılama

Benzetim çalıştırılıp akışkan sistemi için bir giriş çıkış ilişkisi elde edildikten sonraki adım Sistem Tanılama yaklaşımları kullanarak elimizdeki problem için doğrusal bir dinamik model elde etmektir. Bunun için; alt uzay sistem tanılama tekniği N4SID, süreç modeli, ARX modeli gibi birden fazla Sistem Tanılama algoritması mevcuttur, fakat hepsi aynı doğrulukta sonuç verememektedir [5]. Bu çalışmada bahsedilen yöntemleri denenmiş ve giriş-çıkış verisi için en verimli sonuç verenin Süreç Modeli⁹ yaklaşımı olduğu görülmüştür. Bu yaklaşımda sistem dinamikleri ifade (3.3)'deki gibidir.

$$\frac{K_p(1 + T_z s)e^{-T_d s}}{s(1 + (2\zeta T_w)s + (T_w s)^2)(1 + T_{p3}s)} \quad (3.3)$$

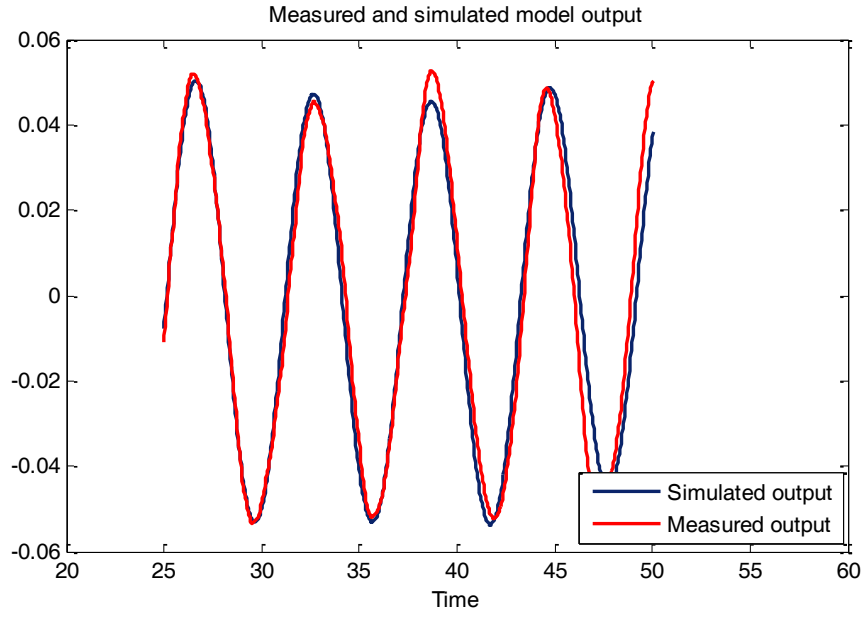
Bu ifade sistem dinamiklerini statik kazanç K_p , sönüm sabiti ζ , ters doğal frekans T_w , proses sıfırı T_z , zaman gecikmesi T_d , zaman sabiti T_{p3} ve bir integratör cinsinden göstermektedir. Bu parametrelerin kestirimi yapılırken MATLAB System Identification Toolbox'ta bulunan adaptif Gauss-Newton alt uzay yaklaşımı [39] kullanan tahmin hatası sıfırlama (PEM) tekniğinden faydalanılmıştır. Kestirim sonucunda elde edilen değerler Çizelge 3.22'de görülebilir.

Çizelge 3.2 Kestirimi yapılan parametreler.

K_p	-0.0023515
T_w	0.40249
ζ	0.0086464
T_{p3}	9.6647
T_d	0.80912
T_z	75.345

⁹ İng: Process Model

Bulunan bu değerler giriş sinyalinin ilk 25 saniyelik kısmı kullanılarak elde edilmiştir. Sonraki 25 saniyelik kısmı ise elde edilen sistemin doğruluğunun kontrol edilmesinde kullanılmıştır. Bunun için sinyalin ikinci kısmı elde edilen modele girdi olarak verilmiştir ve daha sonra buradan alınan ıkış HAD'dan elde edilen benzetim ıkışları ile Şekil 3.7'deki gibi karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.7 Ölçülen ve benzetimden gelen çıkış değerleri.

Şekil 3.7'den de anlaşılacağı gibi Sistem Tanılama sonucunda elde ettiğimiz sistemin ıktısı, HAD kullanılarak elde edilen çıktı ile çok yakın çıkarak Sistem Tanılama sonucunda kestirimi yapılan dinamik modelin gerçek sistemi kabul edilebilir bir doğrulukta temsil ettiğini göstermiştir.

3.1.3 Kontrolü Tasarımı

Ölçümü yapılan girdaplılık değerinin azaltılması için kontrolü tasarımı konusu bu bölümün temel amacı olacaktır. Doğrusal olarak kestirilen sistemde kontrolü $C(s)$ 'yi otonom olarak tasarlamak için MATLAB Control Systems Toolbox kullanılarak iç model kontrol¹⁰ (İMK), lineer kuadratik Gaussian¹¹ (LKG) ve

¹⁰ İng: Internal Model Control

¹¹ İng: Linear Quadratic Gaussian

optimizasyon tabanlı yaklaşım gibi otomatik PID ayarlama yöntemleri denenmiştir. Bahsi geçen farklı yöntemler ile birçok derecelerden çeşitli kontrolcü tasarımları yapılmıştır ve sonuçlar incelenmiştir. İncelemeler sonunda görülmüştür ki İMK ayarlama yöntemi [40-41] problemimizin çözümü için en iyi sonucu vermiştir. Otomatik İMK kontrolcü tasarımının ardından elde edilen kapalı çevrim sisteminin kök yer eğrisi üzerinde de elle düzenlemeler yapılarak kontrolcü başarımı iyileştirilmiştir. Yapılan bu tasarımlar sonucunda elde edilen kontrolcünün transfer fonksiyonu ise ifade (3.4)'deki gibidir;

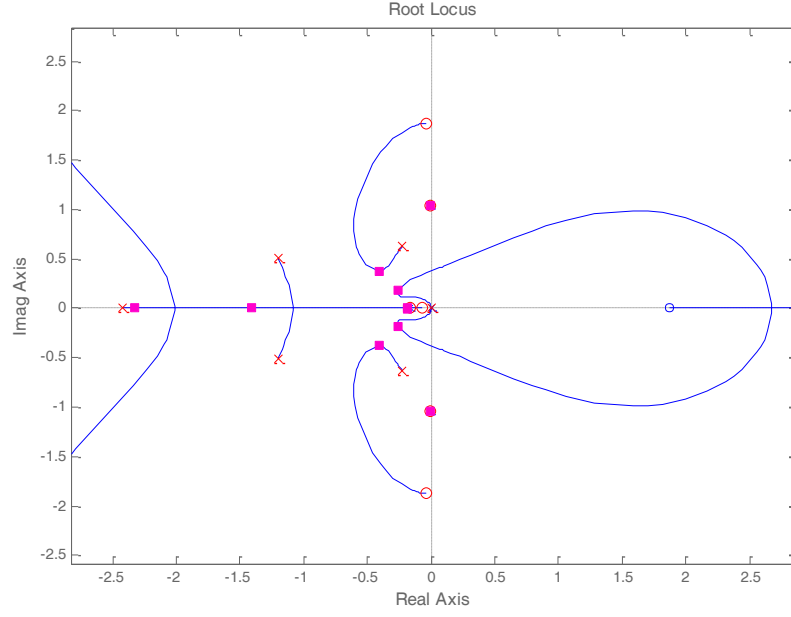
$$C(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (3.4)$$

burada

$$N(s) = -107.6 s^6 - 33.63 s^5 - 499 s^4 - 127.8 s^3 - 420.9 s^2 - 97.37 s - 4.843 \quad (3.5)$$

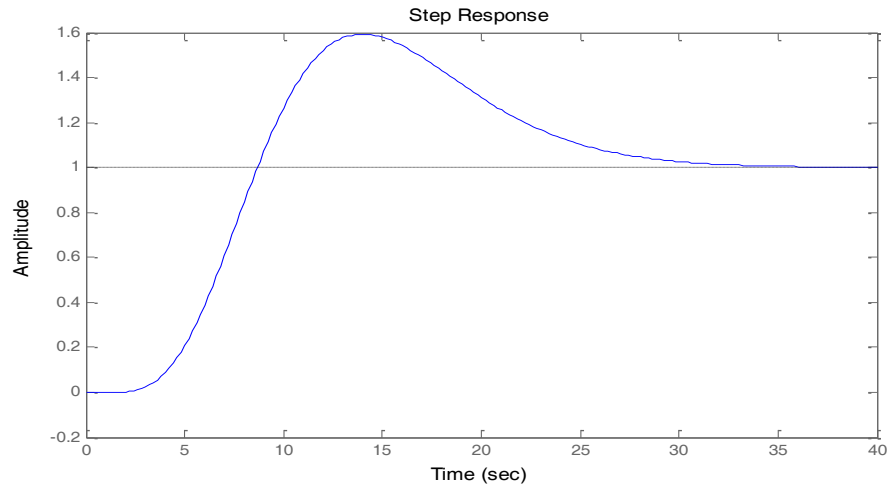
$$D(s) = s^6 + 5.278 s^5 + 10.16 s^4 + 9.688 s^3 + 5.222 s^2 + 1.844s \quad (3.6)$$

şeklindedir. Tasarlanan kontrolcünün girişi $e(t) = r(t) - y(t)$ şeklinde ifade edilen hata fonksiyonudur. Burada $y(t)$ sistem çıkışı, $r(t)$ ise referans girişidir ki bu da sıfır olarak alınmıştır çünkü amaç girdaplılığının mümkün olduğunca azaltılmasıdır. Kontrolcü çıkışı ise silindir üzerindeki noktalardan akış alanına üflenecek veya alandan çekilecek havanın hızını içeren bir fonksiyondur ki bunu da $u(t)$ olarak gösterilmiştir. Tasarlanan kontrol sisteminin kapalı çevrim kutuplarının yerleri Şekil 3.8'deki kök yer eğrisi grafiğinde görülebilir.



Şekil 3.8 Kontrolcünün kapalı çevrim kutupları.

Kök yer eğrisinde bütün kutupların sol tarafta olduğu görülmektedir ki bu da kapalı çevrim sisteminin kararlı olduğunu göstermektedir. Fakat bu eğride sanal eksene çok yakın iki kutup olduğu görülmektedir, bu da yavaş cevap ve yüksek aşım sebep olacaktır. Bu etkiler ise Şekil 3.9'daki birim basamak cevabı incelenerek gözlemlenebilir.

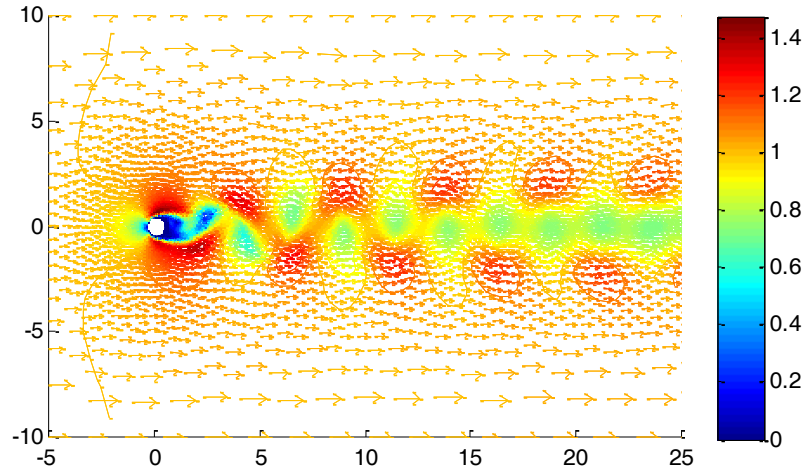


Şekil 3.9 Kontrolcü birim basamak cevabı.

Burada sistemin genlik değerinin 1 seviyesine oturması yaklaşık 35 s civarında sürmekte ve 0.6 şeklinde bir genlik aşımı gözlenmektedir. Bu değerlerin sebebi ise bahsedildiği üzere sanal eksene çok yakın olan iki kutuptan kaynaklanmaktadır.

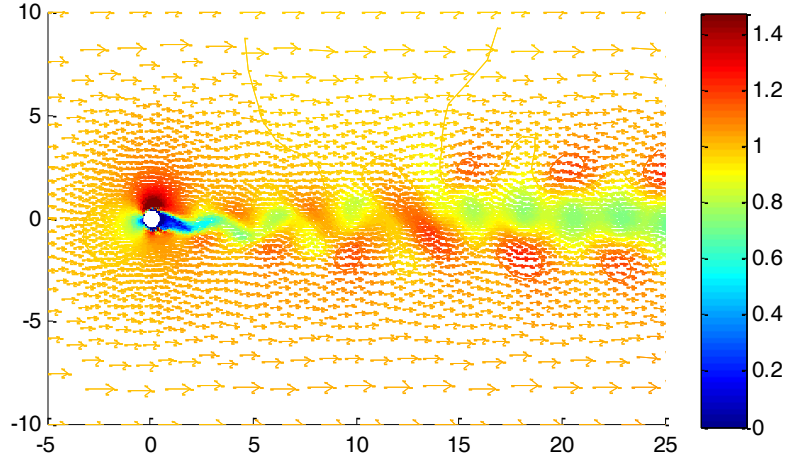
3.1.4 Sonuçlar

Kontrolcünün sistem üzerindeki etkisini gözlemek için Reynolds sayısı 150, kinematik viskozite değeri $0.0067m^2/s$ ve kontrolcü başlangıç zamanı $t = 2 s$ olan 600 s'lik bir benzetim çalıştırılmıştır. Sisteme başlangıç koşulu olarak Şekil 3.4'te gösterilen ve girdapların belirgin bir şekilde görülebileceği profil verilmiştir. $t = 0.8 s$ 'deki U-V hızları Şekil 3.10'da gözlenebilir.



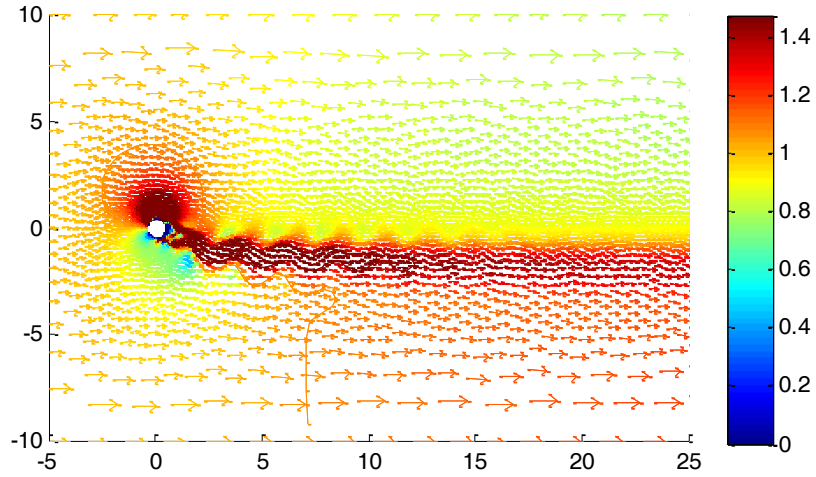
Şekil 3.10 $t=0.8 s$ de akış alanının U-V hızları

İkinci saniyeden itibaren kontrolcü devreye girerek silindirin üst ve alt noktalarından akış alanına hava üflemeye başlamaktadır. Bu etkiyi görmek için $t = 18 s$ 'deki U-V hızlarını gösteren Şekil 3.11 incelenebilir.



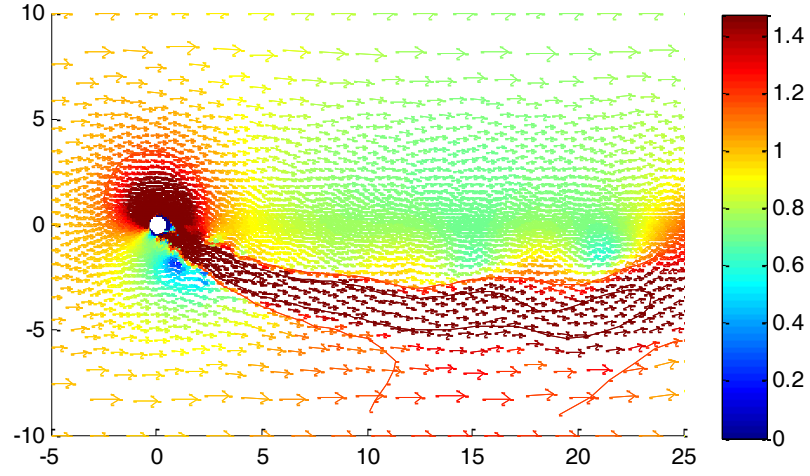
Şekil 3.11 $t=18$ s de akış alanının U-V hızları

Zaman ilerledikçe kontrolcünün etkisi daha baskın bir şekilde gözlenmekte olup, silindir arkasındaki girdaplar bastırılmaya başlanmıştır. Bu etki Şekil 3.12'deki U-V hızlarına bakarak da görülebilmektedir.



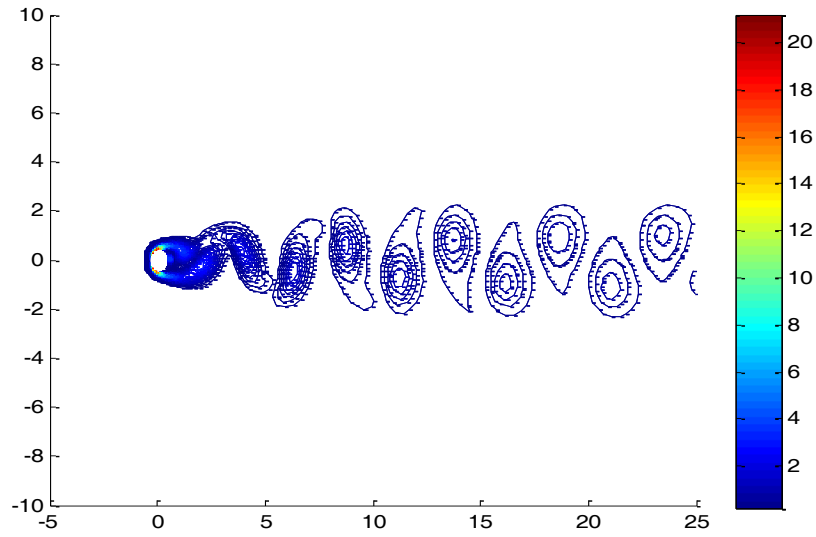
Şekil 3.12 $t = 190$ s de akış alanının U-V hızları

Son olarak benzetimin sonundaki ($t = 600$ s) U-V hızları da Şekil 3.13'te görülmektedir.

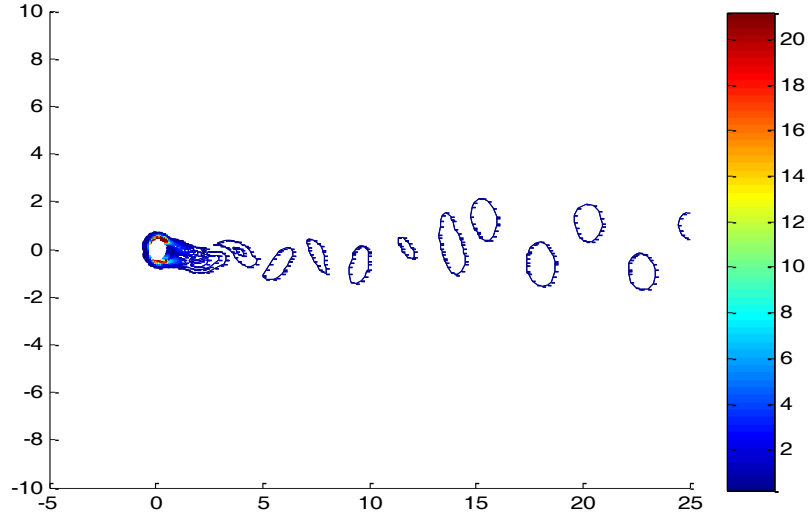


Şekil 3.13 t = 600s de akış alanının U-V hızları

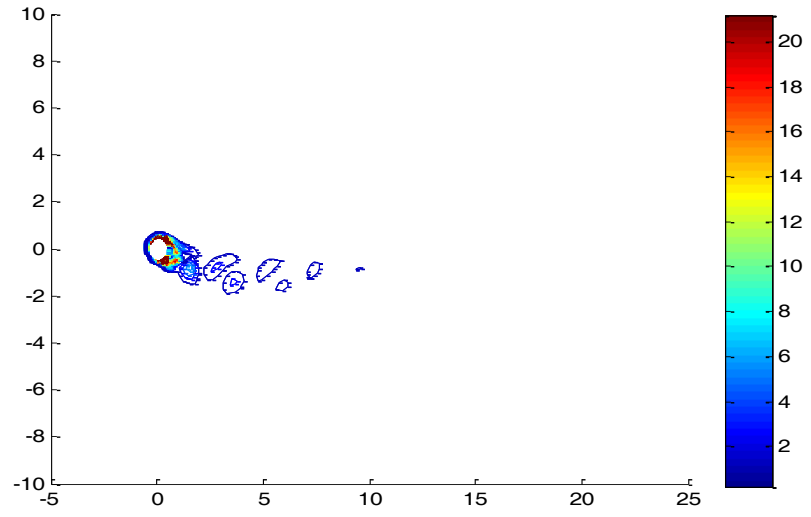
Ayrıca belirlenen zamanlardaki akış alanındaki girdaplılık değerleri de incelenmiştir. Şekil 3.14, Şekil 3.15, Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de incelenebilecek girdaplılık değerleri giderek azalmaktadır; bu da kontrolcünün akışkan sistemine olan etkisini göstermektedir.



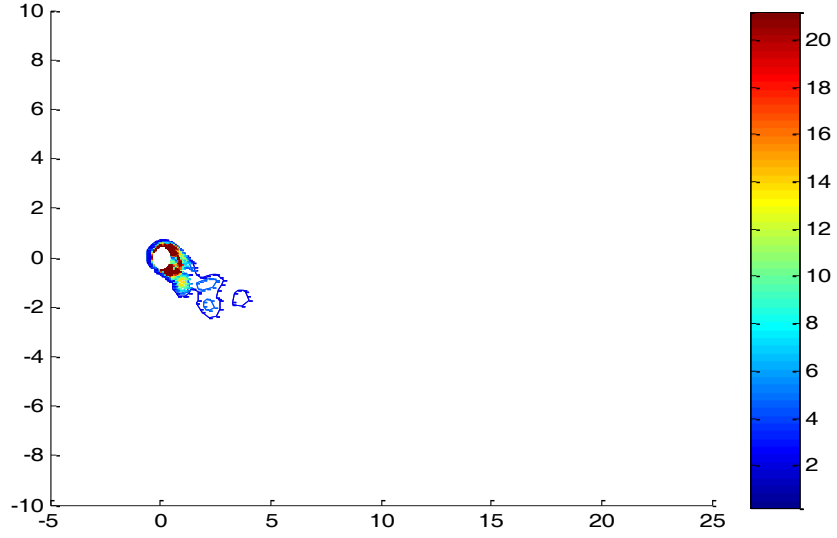
Şekil 3.14 t = 0.8s de akış alanındaki girdaplılık değeri.



Şekil 3.15 $t = 18s$ de akış alanındaki girdaplılık değeri.

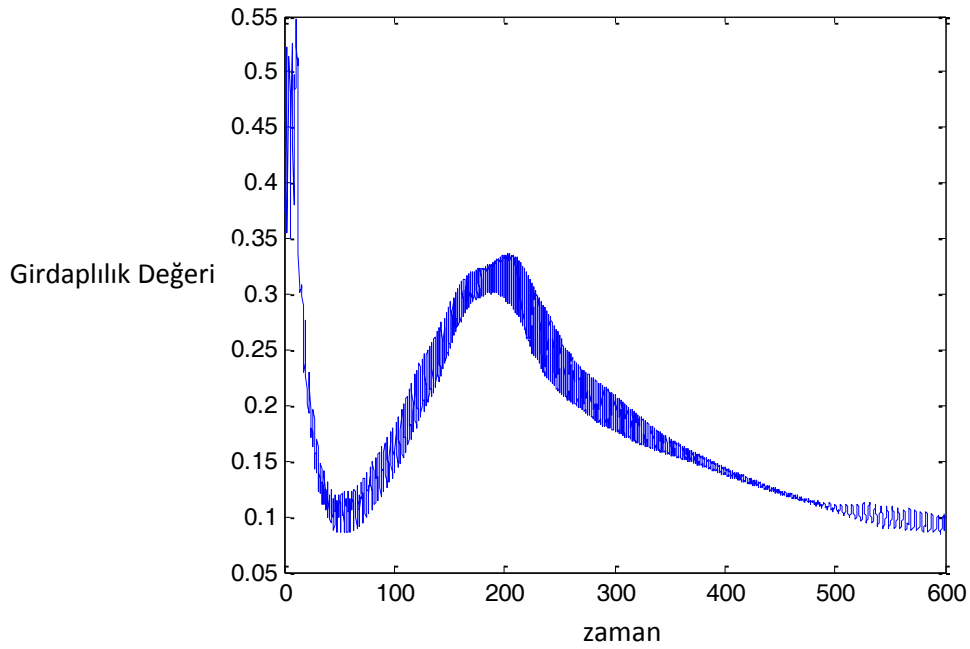


Şekil 3.16 $t = 190s$ de akış alanındaki girdaplılık değeri.



Şekil 3.17 $t = 600s$ de akış alanındaki girdaplılık değeri.

Ayrıca benzetim boyunca geri besleme sinyali olan ve kullanıcı tarafından önceden belirlenmiş olan ortalama girdaplılık değeri de kaydedilmiştir. Bu değerın zamanla değişimi de Şekil 3.18’de mevcuttur.



Şekil 3.18 Zamana karşı ölçülen ortalama girdaplılık değeri

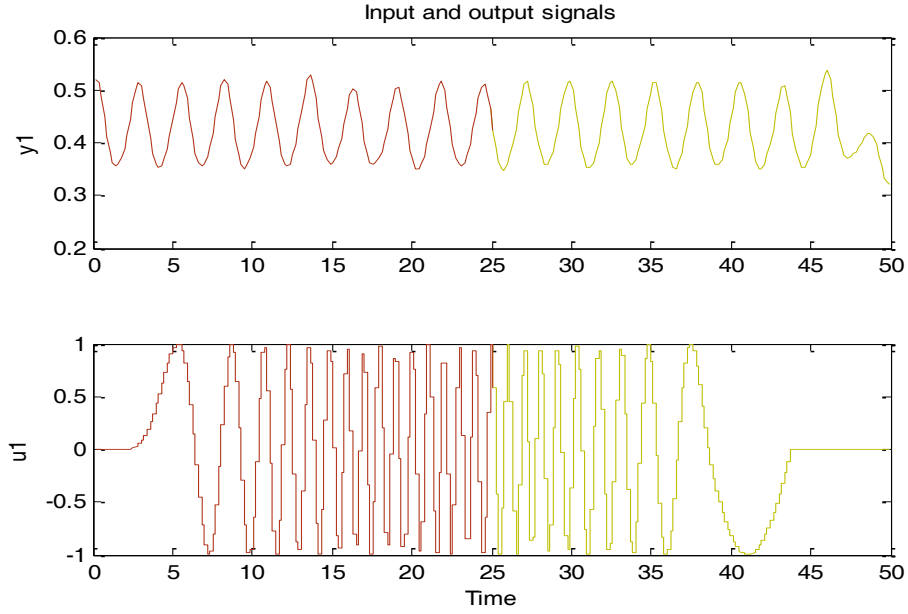
Sonuçlardan da anlaşılabilceği üzere, kontrolcü benzetim esnasında okuduğu ortalama girdaplılık değerini zaman ilerledikçe sıfır olarak atanan referans değerine getirmeye çalışarak seçilen bölgedeki girdapları bastırmayı başarmıştır.

3.2 Silindir Etrafı Akışın Doğrusal Olmayan Dinamik Modellemesi ve Girdaplılık Kontrolü

Önceki kısımda silindir etrafından akan değişken iki boyutlu akışın incelenmesi, doğrusal dinamik model elde edilmesi ve elde edilen model kullanılarak silindirin arkasında oluşan girdapların kontrolü konusu ele alınmıştır. Bu çalışmada ise silindir etrafı akışın doğrusal olmayan modellemesi ve kontrol sistemi tasarımı yaklaşımlarının geliştirilmesi konusu incelenmiştir. Çalışmanın bu kısmında da yine geliştirilen ve eklentiler yazılan MATLAB tabanlı Navier2d programı kullanılacaktır. Önceki doğrusal modelleme ve kontrol çalışmamızda Navier2d programına ve ara yüzüne yapılan eklentiler ile akış alanını temsil eden örgü üzerinden ölçüm ve kontrolcü girişinin uygulanacağı noktaların kullanıcı tarafından seçilebilecek hâle getirilmesinden bahsedilmişti. Yine aynı benzetim parametreleri ile aynı kontrolcü girişi ve ölçüm noktaları bu problem için seçilmiştir.

3.2.1 HAD Benzetimleri ve Giriş-Çıkış Verisi Elde Etme

Çalışmanın bu kısmındaki ilk adım, sisteme verilecek belli bir girişe karşılık çıkış elde edilmesi ve bu giriş-çıkış verisi kullanılarak doğrusal olmayan bir dinamik model elde etmek olacaktır. Sistemin giriş-çıkış bölgeleri belirlendikten sonra doğrusal olmayan dinamik modelin kestirimini yapabilmek için sistemin bilinen bir giriş altında çalıştırılıp ölçümlerin de kaydedilmesi gerekmektedir. Sistemin dinamiklerini etkin bir şekilde kestirebilmek için yine doğrusal modelde olduğu gibi değişken frekanslı bir sinüs grafiği sisteme giriş olarak verilmiştir. Benzetim çalıştırıldığında belirlenen girdi ve bu girdiye karşı elde edilen çıktı Şekil 3.19'daki gibi elde edilmiştir.



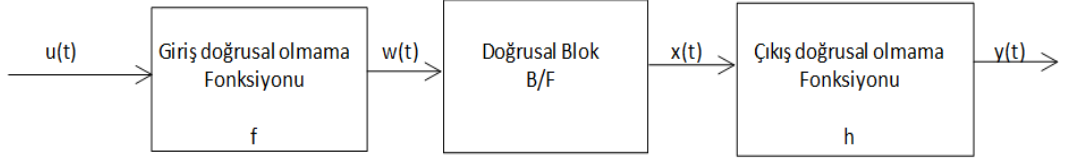
Şekil 3.19 Giriş sinyali (u_1) ve çıkış sinyali (y_1).

Benzer şekilde ilk 25s (kırmızı) ve son 25s (sarı) verilerinin ayrılmasının sebebi ise sistem tanımlama yapılırken ilk 25 saniyenin dinamik modelin oluşturulmasında kullanılması, son 25 saniyenin ise oluşturulan sistemi doğrulama verisi olarak kullanılmasıdır.

3.2.2 Sistem Tanılama

Bir önceki adımda elde edilen giriş-çıkış verisi kullanılarak sistemin doğrusal dinamik modeli elde edilmiştir. Bu çalışmada ise benzer bir yöntem kullanarak sistemin doğrusal olmayan modeli elde edilmeye çalışılmıştır. Giriş olarak 50s uygulanan değişken frekanslı sinüs dalgası ve bu girişe karşılık silindirin arkasından seçilen bölgedeki ortalama girdaplılık değeri kullanılmıştır. MATLAB System Identification Toolbox yardımıyla sistemin giriş-çıkış verisi tanımlandıktan sonra doğrusal olmayan Hammerstein-Wiener metodundan yararlanılmıştır. Bu metotta eğer sistemin çıkışı, girişteki doğrusal olmamaya bağlı ise giriş-çıkış ilişkisini iki veya daha fazla elemente ayırmak mümkündür [42]. Bu durumda sistemin dinamikleri bir doğrusal transfer fonksiyonu ve giriş ve çıkıştaki doğrusal olmama durumlarını temsil edecek, seri bağlı fonksiyonlarla ifade edilebilir [43-44].

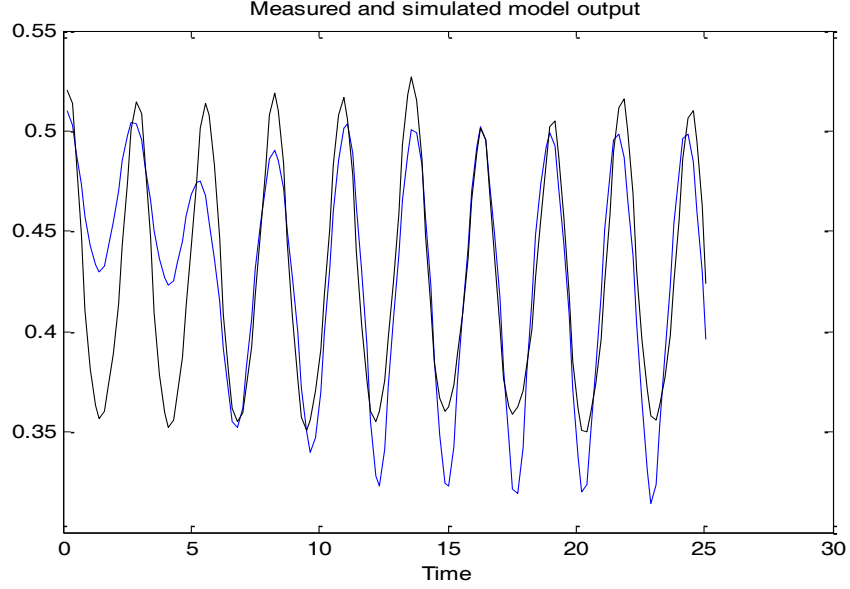
Hammerstein-Wiener metodu bu düzenlemeyi, Şekil 3.20’de görülebileceği gibi, seri bağlı durgun giriş doğrusal olmama fonksiyonu, doğrusal dinamik model ve durgun çıkış doğrusal olmama fonksiyonu bloklarıyla gerçekleştirmektedir.



Şekil 3.20 Hammerstein-Wiener blokları.

Burada $w(t)$ girişi doğrusal olmayan hale çeviren fonksiyondur, $x(t)$ ise doğrusal sistemi temsil eden transfer fonksiyonudur. Doğrusal bloktaki B ve F ise doğrusal çıkış hatasındaki polinomlara karşılık gelmektedir. $y(t)$ ise doğrusal bloğun çıkışını sistem çıkışı yapan doğrusal olmayan fonksiyondur.

MATLAB System Identification Toolbox kullanarak Hammerstein-Wiener modelindeki giriş ve çıkış doğrusal olmama durumu belirlenirken kullanılacak birkaç teknik mevcuttur. Çalışmamızda giriş ve çıkış doğrusal olmama durumları için 3. dereceden tek boyutlu polinom tekniği kullanılarak, doğrusal olmayan modelin kestirimi gerçekleştirilmiştir. Kestirim sonucunda elde edilen model çıktısının, kestirilen modelin benzetimle ne derecede benzer olduğunu belirlemek için, benzetim çıktısına yakın olması beklenmektedir. Sonuçlar karşılaştırıldığında benzetim çıktılarının ölçüm çıktıları eğiliminde olduğu ve kabul edilebilir bir derecede benzer oldukları sonucuna varılmıştır. Bu karşılaştırma Şekil 3.21’de görülebilir.



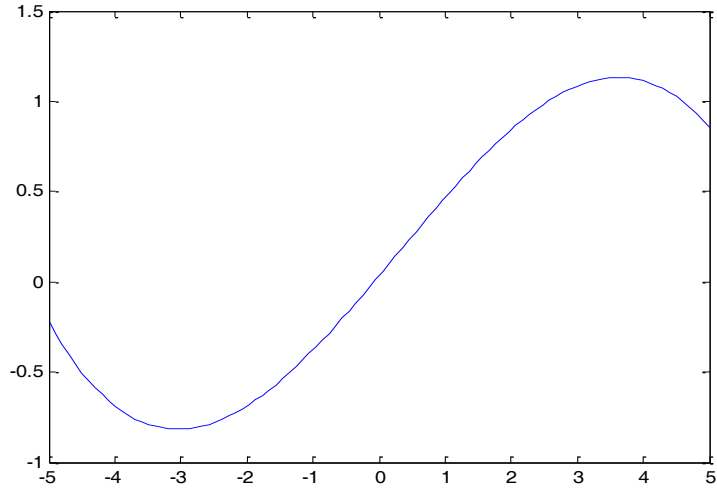
Şekil 3.21 Benzetim çıktıları (mavi) ve ölçüm çıktılarının (siyah) karşılaştırılması.

Doğrusal olmayan modelin kestirimi sonucunda kontrol edilmesi gereken en önemli noktalardan birisi de; kontrolcü tasarımında önem arz eden, giriş ve çıkış doğrusal olmama fonksiyonlarının terslenebilir olmasıdır. Hammerstein-Wiener modelindeki doğrusal blok için tasarlanan bir kontrolcünün, doğrusal olmayan sistemde de çalışabilmesi için bu fonksiyonların terslenebilir olması önemlidir. Bu şart göz önüne alındığında giriş ve çıkıştaki doğrusal olmayan fonksiyonların sistem için uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Fonksiyonların ifadeleri ise ifade (3.7) ve ifade (3.8)'deki gibi olmaktadır.

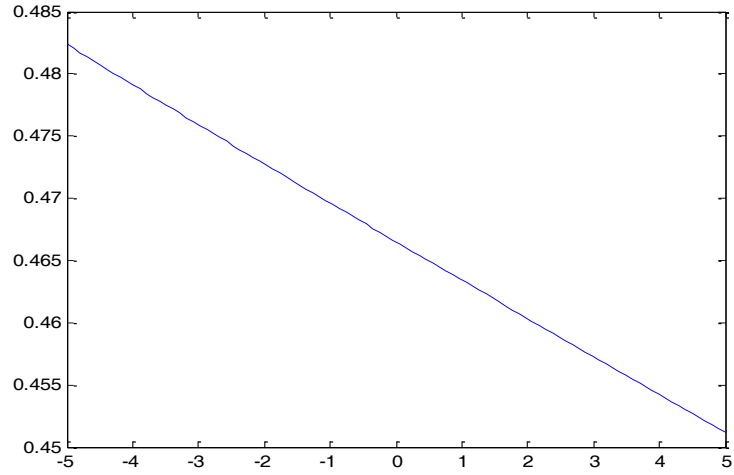
$$y = -0.0131 x^3 + 0.0113 x^2 + 0.4349 x + 0.0332 \quad (3.7)$$

$$y = -7.5976 \cdot 10^{-7} x^3 + 1.0690 \cdot 10^{-5} x^2 + -0.0031 x + 0.4665 \quad (3.8)$$

Giriş-çıkış fonksiyonlarının grafikleri ise sırasıyla Şekil 3.22 ve Şekil 3.23'te görülebilir.



Şekil 3.22 Giriş doğrusal olmama fonksiyonu.

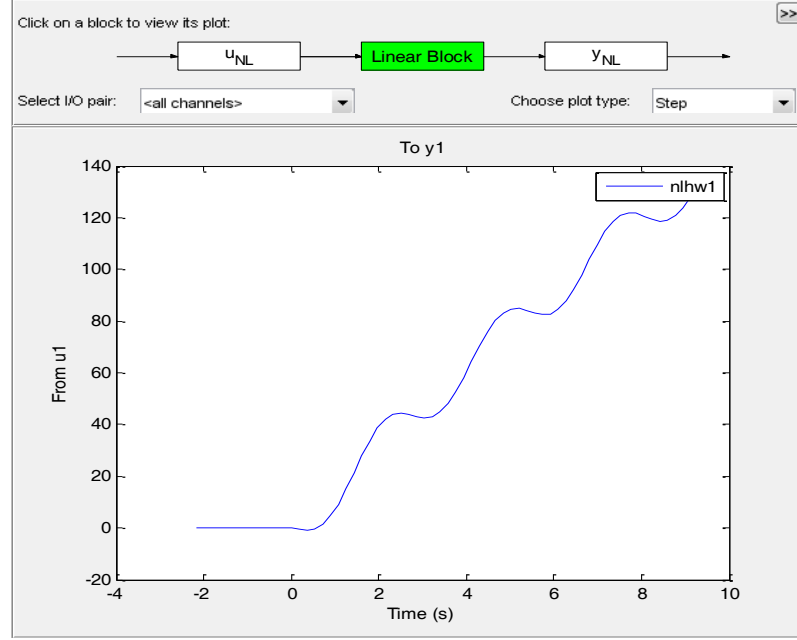


Şekil 3.23 Çıkış doğrusal olmama fonksiyonu.

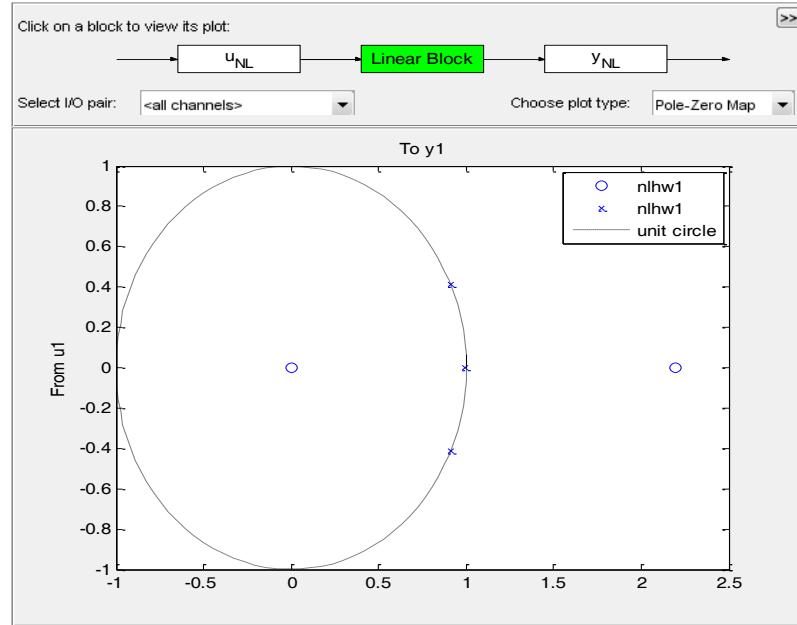
Tasarlanan Hammerstein-Wiener modelindeki doğrusal bloğa ait transfer fonksiyonu ise ifade (3.9)'daki gibidir.

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{-1.84 s^2 - 14.46 s + 96.48}{s^3 + 0.03386 s^2 + 5.59s + 0.01893} \quad (3.9)$$

Doğrusal bloğa ait basamak cevabı ve kutup-sıfır grafikleri ise sırasıyla Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'teki gibidir.



Şekil 3.24 Doğrusal blok için basamak cevabı.



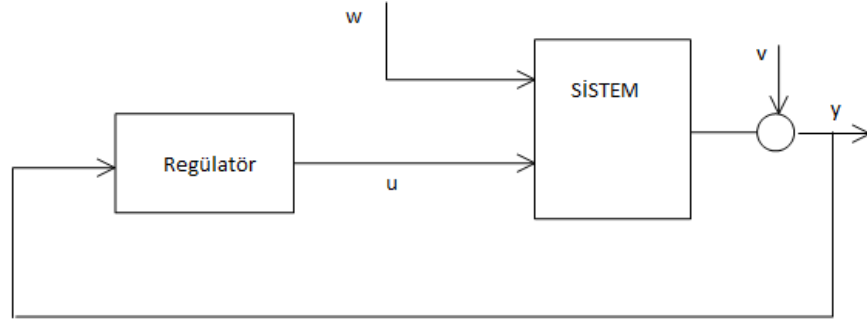
Şekil 3.25 Doğrusal blok için kutup sıfır grafiği.

Kutup sıfır grafiğinden de anlaşılacağı üzere birim çember içerisinde kalan kutuplar sistemin kararlı bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Fakat birim çembere yakın olan kutuplar ise sistemin yavaş oturacağını göstermektedir.

3.2.3 Kontrolcü Tasarımı

Sistem tanımlama kullanılarak akışkan sisteminin doğrusal olmayan dinamikleri elde edildikten sonraki adım olan kontrolcü tasarımıdır. Kontrolcü tasarımı bir önceki kısımda da belirtildiği gibi Hammerstein-Wiener modelinin doğrusal kısmı için yapılacak ve giriş çıkış doğrusal olmama fonksiyonları terslenebilir olduğu için doğrusal olmayan sistem için de çalışacaktır fakat tasarım yapılırken Hammerstein-Wiener modelinde yapılan bazı düzenlemeler de mevcuttur, bu düzenlemeler ilerleyen kısımlarda anlatılacaktır. Kontrolcü tasarımı kısmını otonom olarak yapmak için iç model kontrolü (İMK), lineer karesel Gaussian (LKG) ve optimizasyon tabanlı yaklaşım gibi otomatik PID ayarlama yöntemleri denenebilir. MATLAB Control Systems Toolbox kullanılarak yukarıdaki farklı yöntemler ile birçok derecelerden çeşitli kompensatör tasarımları yapılmıştır ve sonuçlar incelenmiştir. İncelemeler sonunda görülmüştür ki LKG ayarlama yöntemi problemimizin çözümü için en iyi sonucu vermiştir.

Kontrolcü tasarımı çalışmamızda kullanılan LKG metodu, temel olarak integral hareketi kullanarak optimal dinamik regülatör tasarlamak için kullanılan bir durum uzayı tekniğidir [45-47]. Bu teknik ölçüm gürültüsü ve bozucuları hesaba katarak kontrolcü eforu ve regülatör performansı arasında bir denge oluşturmayı temel almaktadır. LKG kontrolcüsünün blok diyagramı Şekil 3.26'da incelenebilir.



Şekil 3.26 LKG kontrolcüsü blok şeması.

Burada sistem QXU ve QWV ağırlık matrislerine sahip (sys bloğu) ifade (3.10) ve ifade (3.11)'deki gibi olan durum uzayı biçimindedir ve y ölçümlerini kullanarak regülâtör “ u ” kontrol sinyalini oluşturup y sinyalini sıfır etrafına dengelemeye çalışır.

$$\dot{x} = Ax + Bu + w \quad (3.10)$$

$$y = Cx + Du + v \quad (3.11)$$

Burada w işlem gürültüsü, v ise ölçüm gürültüsüdür ve beyaz Gauss gürültüsü olarak kabul edilirler ve kovaryansları ifade (3.12) şeklinde hesaplanmaktadır.

$$QWV = E([w, v] * [w', v']) \quad (3.12)$$

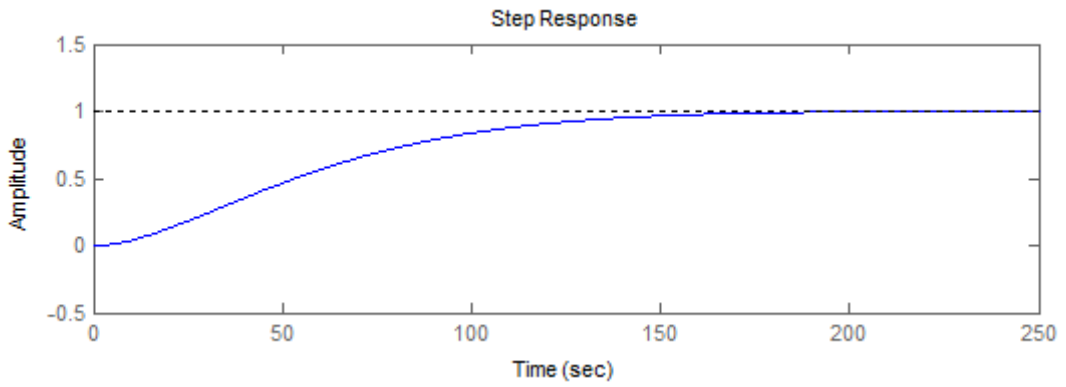
LKG regülâtörü ifade (3.13)'teki şekilde olan maliyet fonksiyonunu en aza indirmeye çalışmaktadır.

$$J = E \left\{ \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \int_0^T [x', u'] QXU \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} dt \right) \right\} \quad (3.13)$$

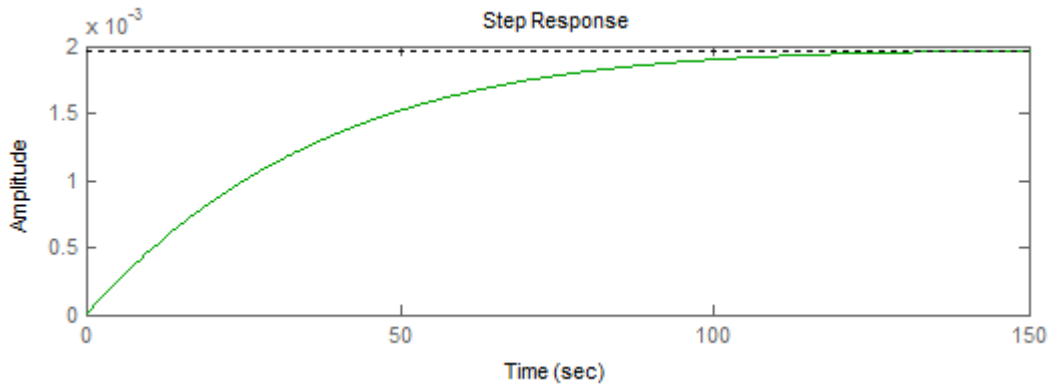
Bu çalışmamızda elde ettiğimiz doğrusal olmayan dinamik model için tasarlanmış olduğumuz LKG kontrolcüsünün transfer fonksiyonu ifade (3.14)'deki gibidir.

$$\frac{7.28 \cdot 10^{-7} s^2 + 5.247 \cdot 10^{-5} s + 1.819 \cdot 10^{-6}}{s^2 + 0.05734 s - 2.132 \cdot 10^{-16}} \quad (3.14)$$

Kontrolcünün kapalı çevrim birim basamak cevabı ve uygulanan girişin büyüklüğünün incelenebileceği grafik ise aşağıdaki Şekil 3.27 ve Şekil 3.28 de incelenebilir.



Şekil 3.27 Kontrolcünün birim basamak cevabı.



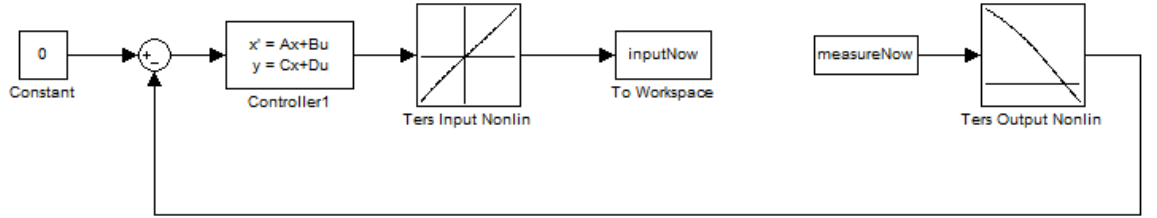
Şekil 3.28 Kontrolcünün uyguladığı giriş.

3.2.4 Tasarlanan Kontrolcünün Benzetimle Birleştirilmesi

Bir önceki kısımda tasarlamış olduğumuz kontrolcünün Navier2d programı kullanarak akışkan benzetimini yaptığımız sistemle bütünleştirilmesi bu kısımda ele

alınacaktır. Bu noktada akışkan benzetimi devam ederken her zaman aralığında, okunan girdaplılık ölçümlerini kullanarak bir kontrolcü çıktısı oluşturacak ve bunu benzetme seçilen giriş noktalarından uygulayacak bir tasarım yapılmıştır.

İlk olarak tasarlanan kontrolcü SIMULINK ortamında blok diyagramları şeklinde ifade edilmiştir ve benzetimin her zaman adımında bu SIMULINK model dosyası çalıştırılarak kontrol girişi üretilmesi planlanmıştır. Tasarlanan kontrolcünün SIMULINK blok diyagramı Şekil 3.29'da incelenebilir.



Şekil 3.29 Kontrolcünün SIMULINK blok diyagramı.

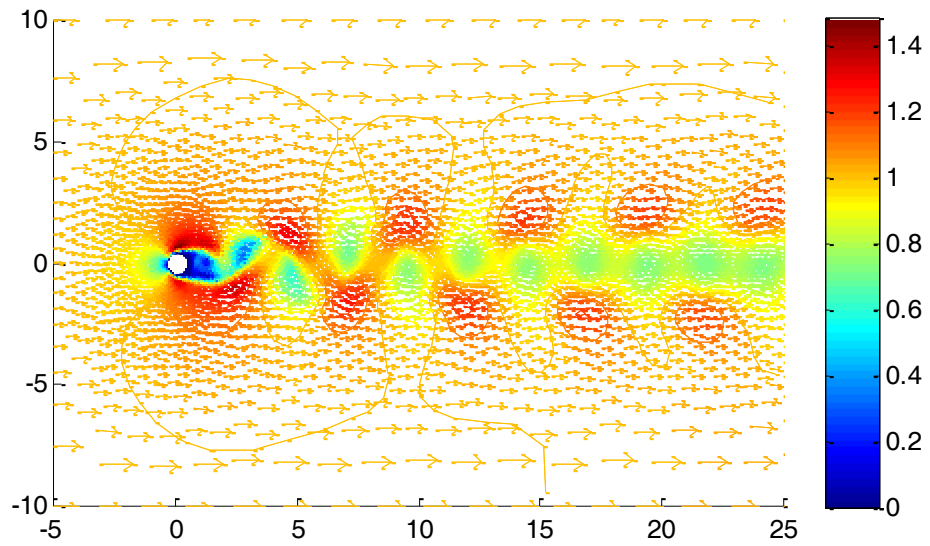
Önceki kısımlarda bahsedilen Hammerstein-Wiener modelinin doğrusal kısmı için tasarlanan kontrolcünün doğrusal olmayan modelde çalışabilmesi için Şekil 3.29'da görülen düzenleme yapılmıştır. Şekildeki "Ters Input/Output Nonlin" tabloları (lookup table bloğu kullanılmıştır) giriş ve çıkış doğrusal olmama fonksiyonlarını terslemek için kullanılmaktadır [42]. Önceden de bahsedildiği gibi bu fonksiyonların terslenebilir olması doğrusal olan kontrolcünün doğrusal olmayan sistemde de çalışmasını sağlamaktadır. Sistemin devamı maddeler şeklinde incelenecek olursa;

- Navier2d benzetiminden gelen çıkış Hammerstein-Wiener modelinin çıkış doğrusal olmama fonksiyonunun tersinden geçerek referansla kıyaslanmakta ve doğrusal sistem için bir hata fonksiyonu oluşturulmaktadır.
- Sonrasında bu hata fonksiyonu tasarlanan kontrolcüye verilerek lineer sistem için giriş oluşturulmaktadır.

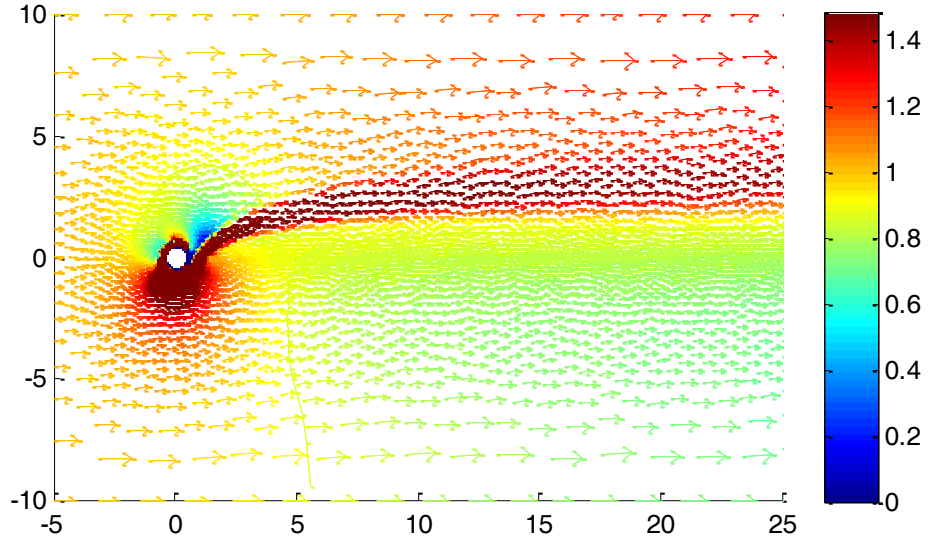
- Devam eden kısımda sinyal Hammerstein-Wiener modelinin çıkış doğrusal olmama fonksiyonunun tersinden geçirilerek doğrusal olmayan sisteme uygulanabilecek bir hale getiriliyor.
- Sonrasında ise elde edilen bu kontrol girişi, silindirin üzerinde seçilmiş olan kontrol noktalarından Navier2d programı kullanılarak yapılan benzetime giriş uygular ve bu işlemler bir döngü içerisinde her zaman adımında gerçekleşir [42].

3.2.5 Sonuçlar

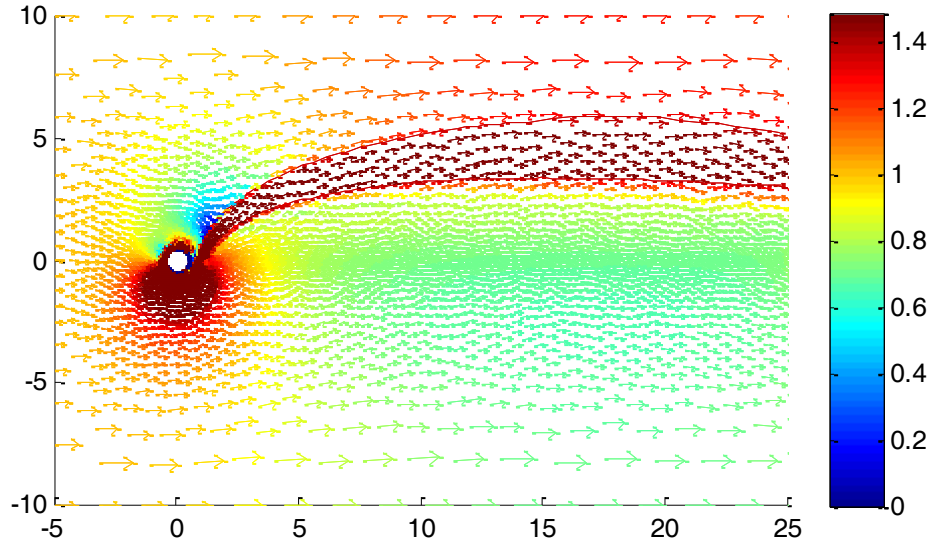
Kontrolcünün sistem üzerindeki etkisini gözlemlemek için Reynolds sayısı 150, kinematik viskozite değeri $0.0067m^2/s$ olan 1000 s'lik bir benzetim çalıştırılmıştır. Sisteme başlangıç koşulu olarak Şekil 2'de gösterilen ve girdapların belirgin bir şekilde görülebileceği akış alanı verilmiştir. Yapılan benzetime ait $t = 0.74237s, 620.561s, 787.8187s, 908.1186s$ ve $999.9798s$ zamanlarındaki U-V hız alanları Şekil 3.30, Şekil 3.31, Şekil 3.32, Şekil 3.33 ve Şekil 3.34'te görülebilir.



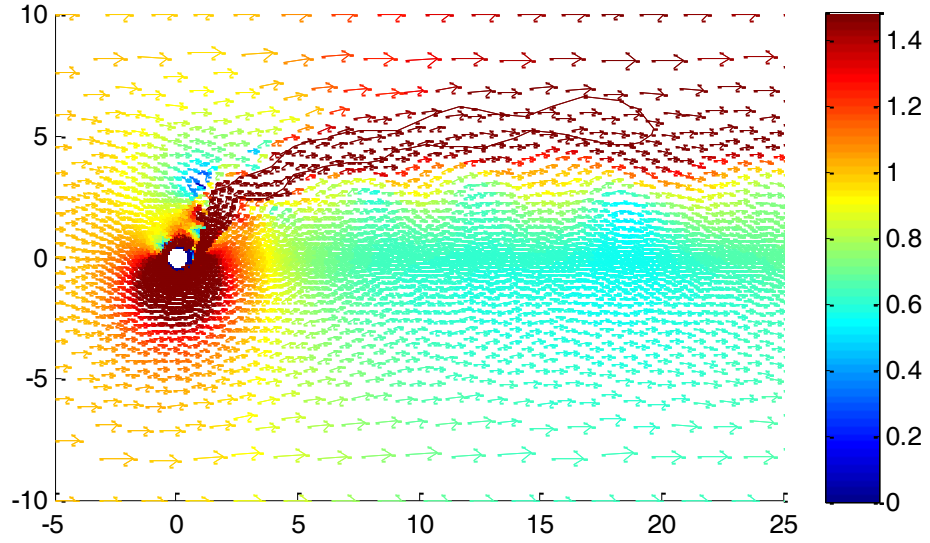
Şekil 3.30 $t=0.74237s$ için U-V hız alanı



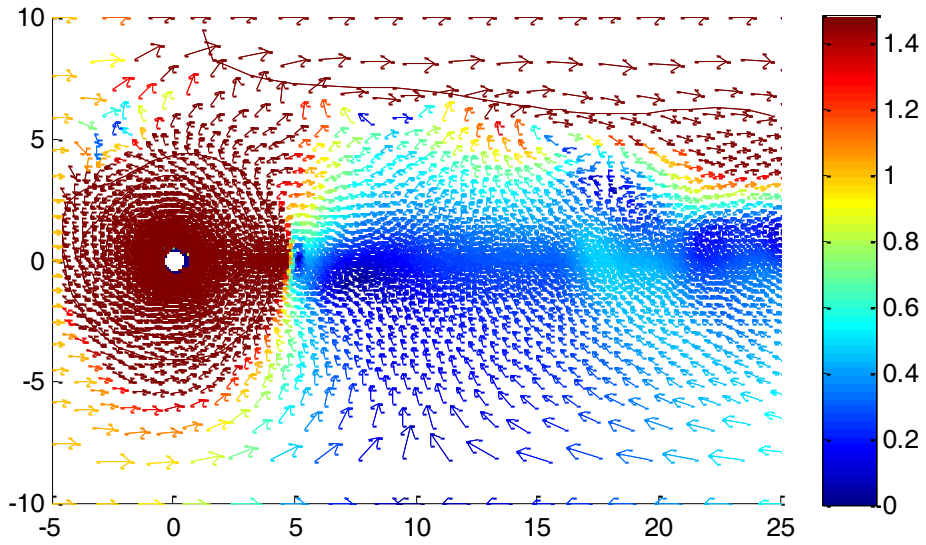
Şekil 3.31 $t = 620.561$ s için U-V hız alanı



Şekil 3.32 $t = 787.8187$ s için U-V hız alanı



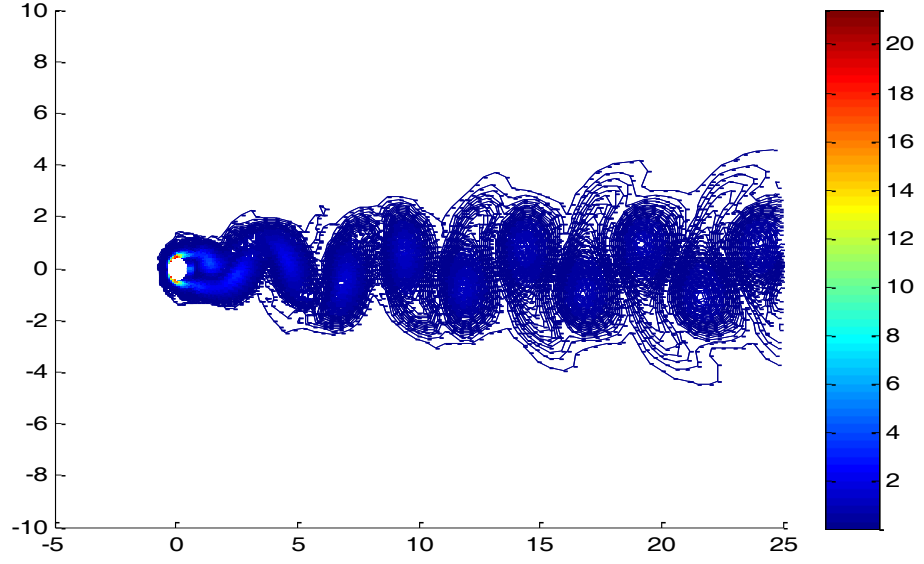
Şekil 3.33 $t = 908.1186$ s için U-V hız alanı



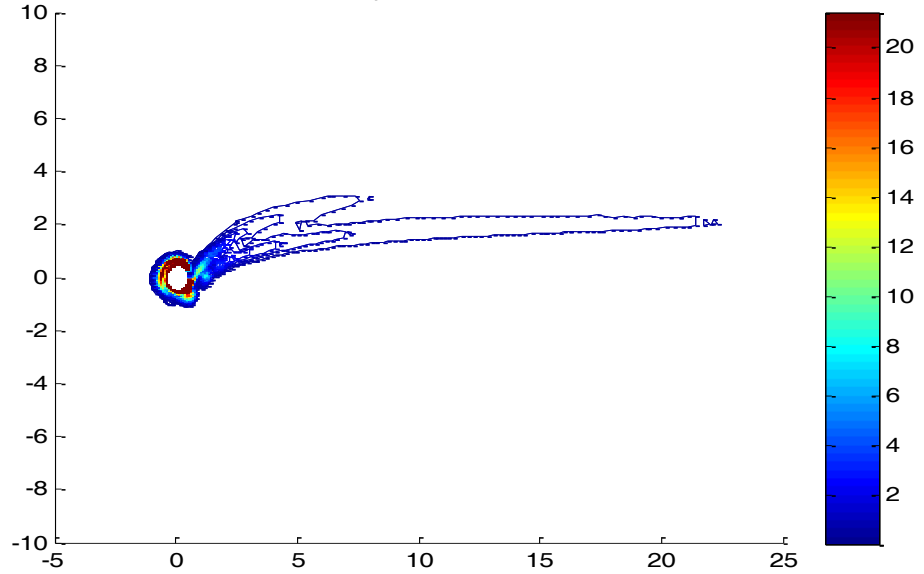
Şekil 3.34 $t = 999.9798$ s için U-V hız alanı

Burada benzetim başladığı andan itibaren kontrolcünün devreye girdiği görülmekte ve zaman ilerledikçe etkisini artırarak silindir arkasındaki girdapları bastıracağı görülmektedir. Ayrıca şekiller incelendiğinde kontrolcü girişi sayesinde silindir etrafını dolaşan belirgin bir akış olduğu ve bu akışın seçilen bölgedeki girdap oluşumunu engellediği görülebilir fakat bu akışın silindirin sürüklenme kuvveti üzerinde de bir etkisi mevcuttur [48].

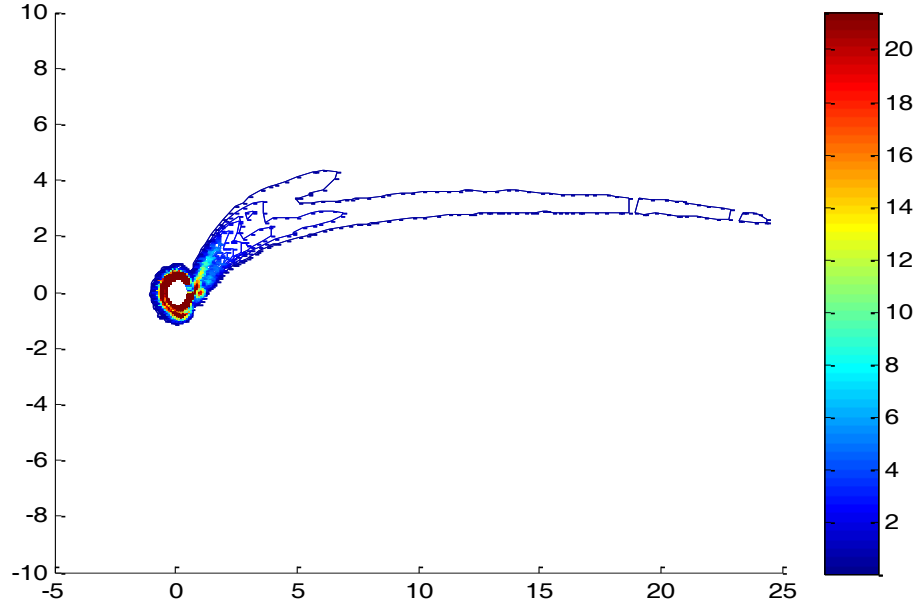
Benzetim sonuçları kullanarak $t = 0.74237 s$, $620.561 s$, $787.8187 s$, $908.1186 s$ ve $999.9798 s$ zamanlarındaki girdaplılık değerleri de Şekil 3.35, Şekil 3.36, Şekil 3.37, Şekil 3.38 ve Şekil 3.39'da görülebilir.



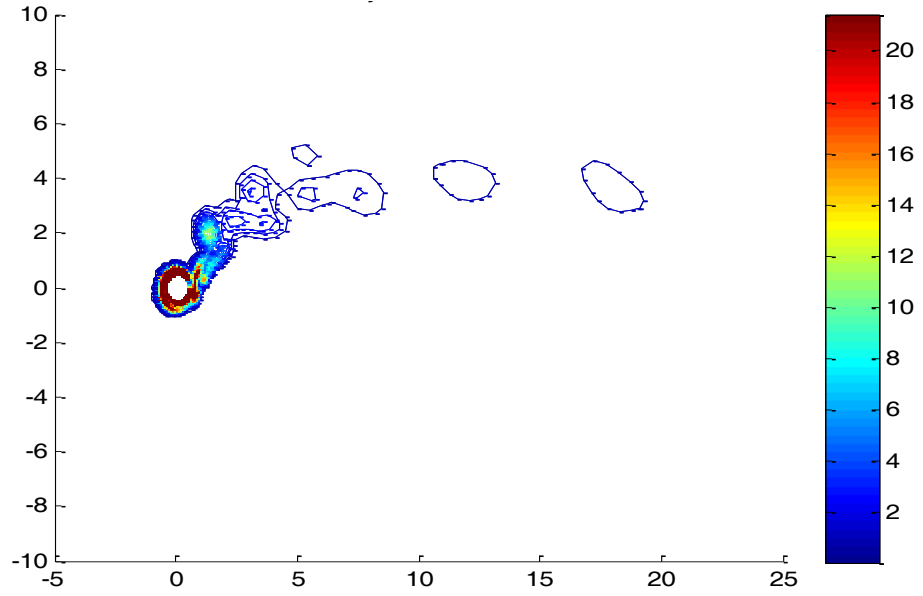
Şekil 3.35 $t = 0.74237 s$ için girdaplılık değeri



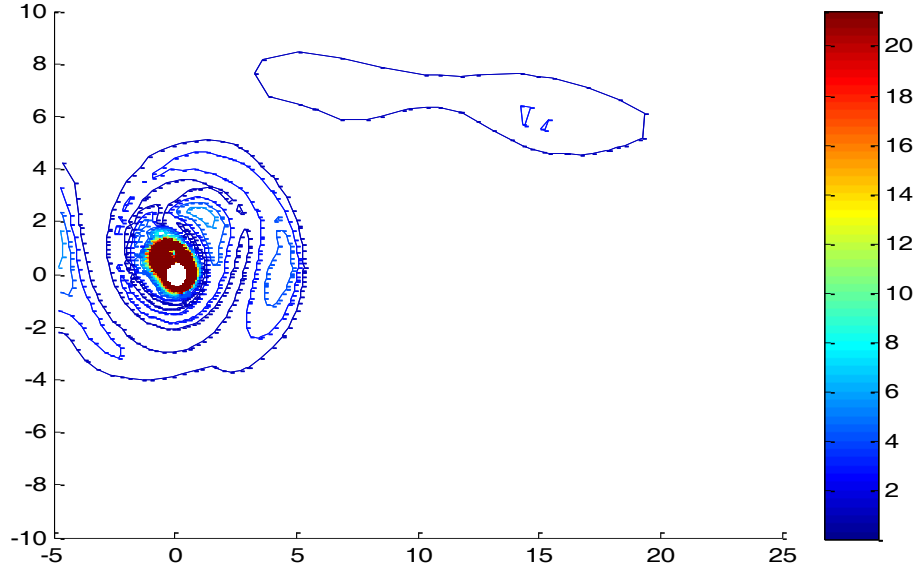
Şekil 3.36 $t = 620.561 s$ için girdaplılık değeri



Şekil 3.37 $t = 787.8187$ s için girdaplılık değeri



Şekil 3.38 $t = 908.1186$ s için girdaplılık değeri



Şekil 3.39 $t = 999.9798$ s için girdaplılık değeri

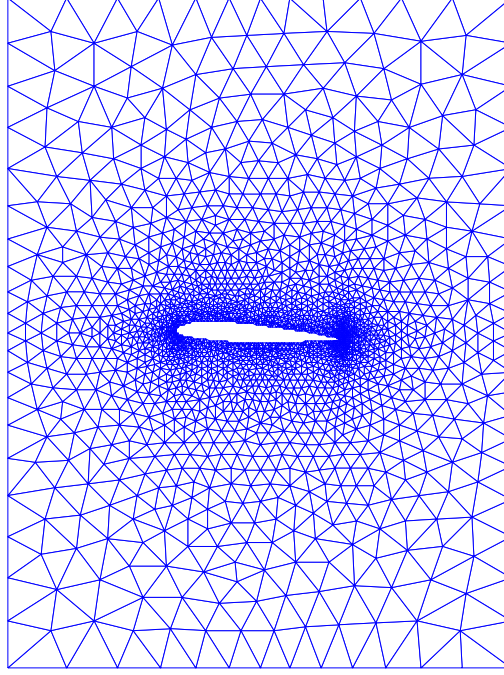
Girdaplılık şekilleri de incelenirse eğer, zaman ilerledikçe silindirin arkasında seçilen bölgedeki girdaplılık değerlerinin kontrolcünün etkisi ile azaldığı gözlenebilir.

4. SABİT HÜCUM AÇILI NACA23012 KANAT PROFİLİNİN KALDIRMA/SÜRÜKLENME KATSAYISININ DOĞRUSAL OLMAYAN KONTROLÜ

Bir kanat profili üzerinden akan akışın sonucu gözlenen kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvveti isimli iki temel kuvvet vardır. Kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri profilin geometrisinden kaynaklı olarak profilin etrafından akan akışın fiziksel davranışı sonucu oluşmaktadır [48]. Sabit kanatlı hava araçlarında, uçuşun sağlanması kaldırma kuvveti ile ilgili olup bunun artması için akışın hızının artması gerekmektedir fakat bu da beraberinde sürüklenme kuvvetinin artmasını getirecektir [49]. Uygun ve etkin bir uçuşun sağlanması için bu iki kuvvet katsayısı arasında uygun bir oran olması gerekmektedir. Literatürde ise bu konuda Bai ve grubu yaptıkları çalışmada akış saptırıcı kullanarak, kaldırma kuvveti katsayısı¹² iyileştirmesi yaparak rüzgar tribünleri için hız kaybederek düşme¹³ problemini ve akış ayrılmasını geciktirmektedir [50]. Yapılan çalışmada, sürüklenme/kaldırma kuvveti katsayısı oranı mümkün olduğu kadar küçültülerek, etkin bir uçuş şartı oluşturmak için bir doğrusal olmayan kontrol sistemi tasarlanması konusu incelenmiştir. Bahsedilen bu problemin çözümünde kullanılacak örgü geometrisinin, MATLAB tabanlı Navier2d [16] HAD programındaki görünümü Şekil 4.1'de mevcuttur.

¹² İng: Lift Coefficient

¹³ İng: Stall

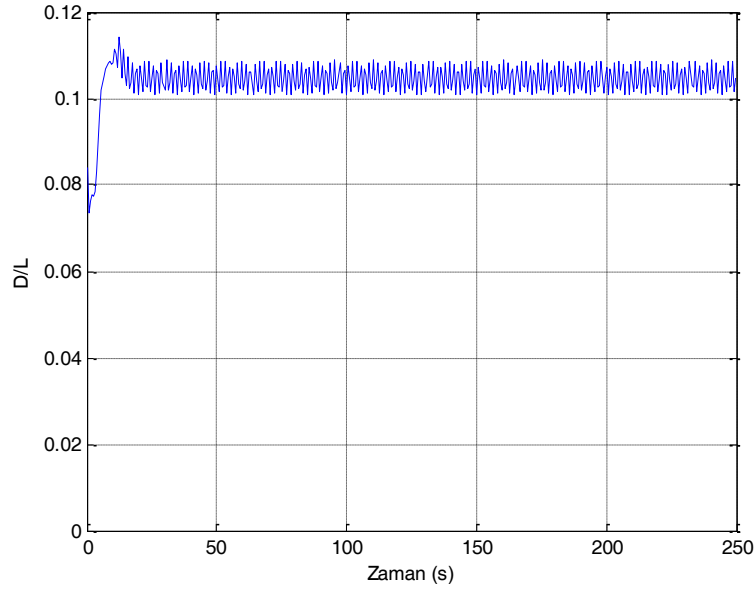


Şekil 4.1 NACA23012 örgü geometrisi

Kontrol probleminin çözümü için önceki kısımlarda bahsedilen geliştirilmiş Navier2d programı kullanılmıştır. Geliştirme doğrultusunda kullanıcının kontrol sisteminin girişi olacak bölgeleri ve geri-besleme olacak ölçüm bölgelerini seçebilmeleri gerekmektedir. Bu seçim, kontrol girişi olarak kanadın uç noktasından giriş fonksiyonu ve ölçüm olarak ise benzetim değişkenlerinden L/D değerinin çarpmaya göre tersi alınarak, yani D/L değeri alınarak, gerçekleştirilmiştir. Burada programa yapılan eklenti gereği ölçüm düğümleri olarak rastgele noktalar seçildikten sonra ölçüm değeri olan D/L katsayısı yazılan eklentideki seçim penceresinden gerçekleştirilmiştir.

Problemin çözümü için yapılan benzetimlerde kullanılan sınır değerleri ve parametreler önceki problemlere benzer şekildedir: Akış alanı $\Omega = [-5 m, 25 m] \times [-10 m, 10 m]$ büyüklüğündedir, $(0,0)$ noktasında aerodinamik merkezi konumlanmış kanat bulunmaktadır. Kinematik viskozite değeri ise $\nu = 10^{-6} \frac{m^2}{s}$ şeklindedir. Akış alanına akacak olan akışkan alanın sol sınırından hızı $1 \frac{m}{s}$ olacak

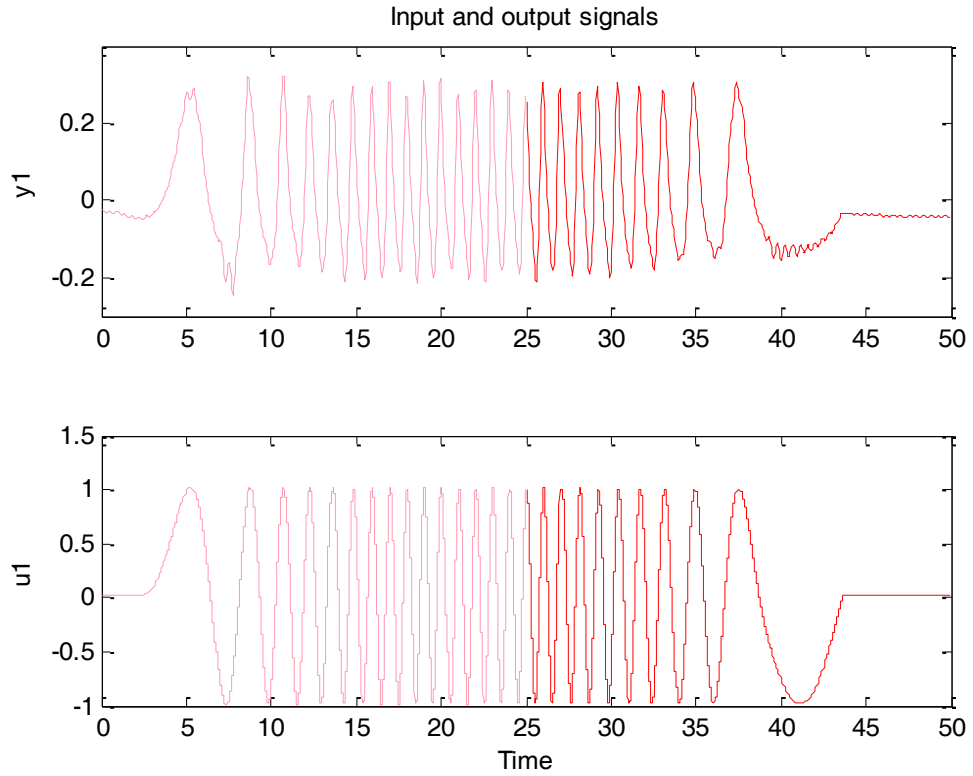
şekilde yani $U = 1 \frac{m}{s}$ ve $V = 0$ akmaktadır. Alt ve üst sınırlar ise sürtünmesiz olacak şekilde seçilmiştir, başka bir deyişle $\frac{dU}{dn} = 0$ ve $V = 0$ olarak düşünülebilir, burada n yüzeylere dik yön olarak alınmıştır. Akış alanından geçen akışkanın alanın sağ sınırından sabit basınçla alanı terk ettiği düşünülmüştür. Kanadın yüzeyi de silindir problemine benzer şekilde kaymasız yani $U = V = 0$ olacak şekilde ayarlanmıştır. Benzetimde Reynolds sayısı yine $Re = 150$ olarak alınmıştır. Bu parametreler kullanılarak benzetim 250 s çalıştırılarak D/L katsayısı Şekil 4.2'deki gibi gözlenmiştir.



Şekil 4.2 Sıfır girişi 250 s süreli benzetimin D/L değeri.

4.1 HAD Benzetimleri ve Giriş-Çıkış Verisi Elde Etme

Çalışmanın bu kısmında sistem tanılama için gerekli olan giriş-çıkış veri setinin elde edilmesi için sisteme önceki çalışmalara benzer şekilde değişken frekanslı sinüs girdisi uygulanarak ölçüm verisi olarak D/L katsayısı kaydedilmiştir. Bir sonraki adım ise bu giriş-çıkış verisi kullanılarak doğrusal olmayan bir dinamik model elde etmek olacaktır. Benzetim çalıştırıldığında belirlenen girdi ve bu girdiye karşı elde edilen çıktı Şekil 4.3'teki gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.3 Giriş sinyali (u_1) ve çıkış sinyali (y_1).

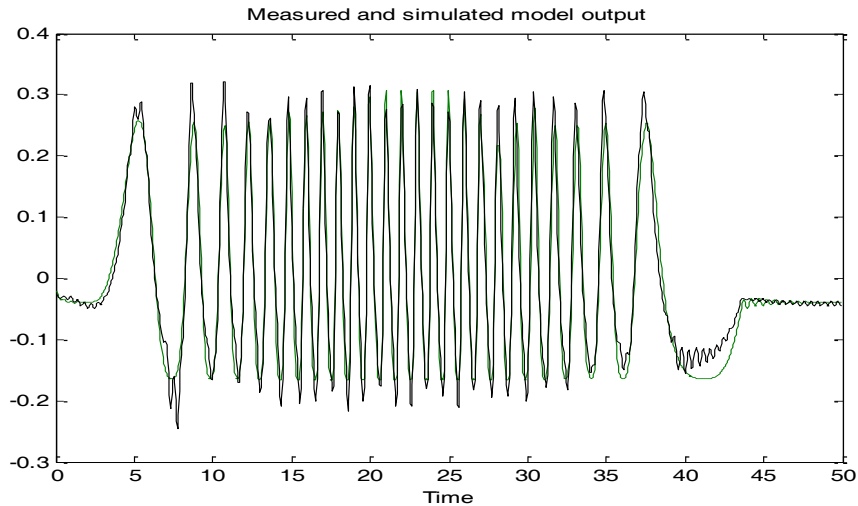
Benzer şekilde ilk 25s (pembe) ve son 25s (kırmızı) verilerinin ayrılmasının sebebi ise sistem tanımlama yapılırken ilk 25 saniyenin dinamik modelin oluşturulmasında kullanılması, son 25 saniyenin ise oluşturulan sistemi doğrulama verisi olarak kullanılmasıdır.

4.2 Sistem Tanılama

Bölüm 3.2.2 de ki yaklaşıma benzer şekilde doğrusal olmayan sistem tanımlama işlemi için bir önceki adımda elde edilen giriş-çıkış verisi kullanılarak sistemin doğrusal olmayan dinamik modeli elde edilmiştir. Giriş olarak 50s uygulanan değişken frekanslı sinüs dalgası ve bu girişe karşılık NACA23012 kanadına ait D/L katsayısı değeri kullanılmıştır. MATLAB System Identification Toolbox yardımıyla sistemin giriş-çıkış verisi tanımlandıktan sonra doğrusal olmayan Hammerstein-Wiener metodundan yararlanılmıştır. Bu metotta da yine bölüm 3.2.2'ye benzer şekilde sistemin çıkışı, girişteki doğrusal olmamaya bağlı ise giriş-çıkış ilişkisini iki veya

daha fazla elemente ayırmak mümkündür. Bu durumda sistemin dinamikleri bir doğrusal transfer fonksiyonu ve giriş ve çıkıştaki doğrusal olmama durumlarını temsil edecek fonksiyonlarla ifade edilebilir. Hammerstein-Wiener metodu bu düzenlemeyi, yine Şekil 3.20’te görülebileceği gibi, seri bağlı durgun giriş doğrusal olmama fonksiyonu, doğrusal dinamik model ve durgun çıkış doğrusal olmama fonksiyonu bloklarıyla gerçekleştirmektedir.

MATLAB System Identification Toolbox kullanarak Hammerstein-Wiener modelindeki giriş ve çıkış doğrusal olmama durumu belirlenirken kullanılacak birkaç teknik mevcuttur. Çalışmamızda giriş ve çıkış doğrusal olmama durumları için 2 dereceden tek boyutlu polinom tekniği kullanılarak, doğrusal olmayan modelin kestirimi gerçekleştirilmiştir. Kestirim sonucunda elde edilen model çıktısının, kestirilen modelin benzetimle ne derecede benzer olduğunu belirlemek için, benzetim çıktısına yakın olması beklenmektedir. Sonuçlar karşılaştırıldığında benzetim çıktılarının ölçüm çıktıları eğiliminde olduğu ve kabul edilebilir bir derecede benzer oldukları sonucuna varılmıştır. Bu karşılaştırma Şekil 4.4’te görülebilir.



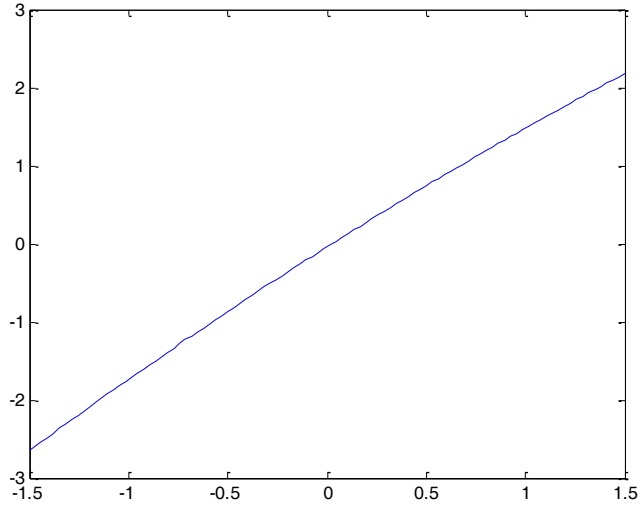
Şekil 4.4 Ölçülen (siyah) ve benzetimden gelen (yeşil) çıkış değerleri.

Burada da yine Bölüm 3.2.2'de bahsedildiği üzere, giriş ve çıkış doğrusal olmama fonksiyonlarının terslenebilir olmasının kontrol edilmesi gerekmektedir. Hammerstein-Wiener modelindeki doğrusal blok için tasarlanan bir kontrolcünün, doğrusal olmayan sistemde de çalışabilmesi için bu fonksiyonların terslenebilir olması önemlidir. Bu şart göz önüne alındığında giriş ve çıkıştaki doğrusal olmayan fonksiyonların sistem için uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Fonksiyonların ifadeleri ise önce giriş doğrusal olmama fonksiyonu sonra ise çıkış doğrusal olmama fonksiyonu olmak üzere ifade (4.1) ve ifade (4.2)'deki gibi olmaktadır.

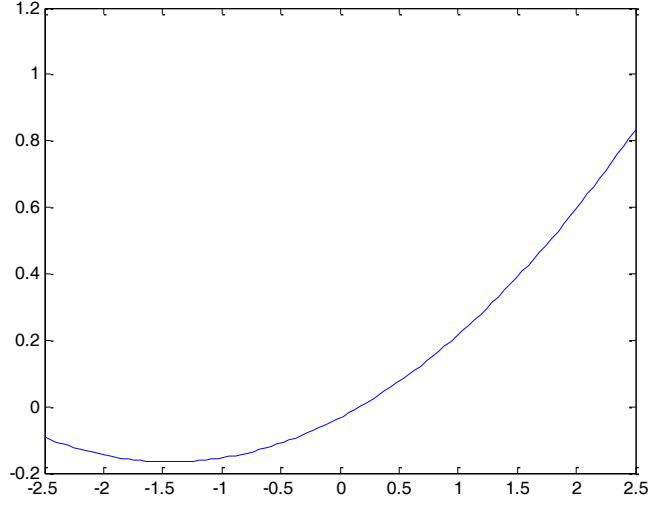
$$y = -0.0311 x^2 + 0.9650 x - 0.0385 \quad (4.1)$$

$$y = 0.0162 x^2 + 0.0928 x - 0.0337 \quad (4.2)$$

Giriş-çıkış fonksiyonlarının grafikleri ise sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da görülebilir.



Şekil 4.5 Giriş doğrusal olmama fonksiyonu.

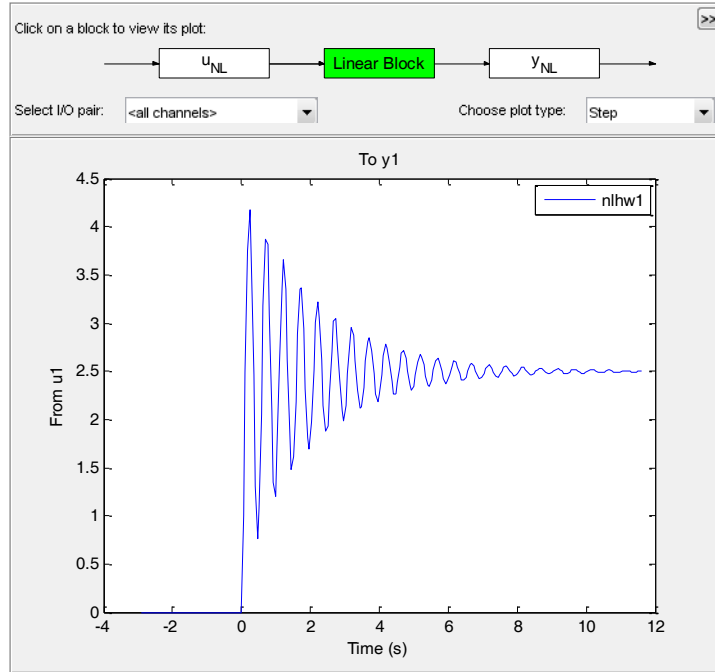


Şekil 4.6 Çıkış doğrusal olmama fonksiyonu.

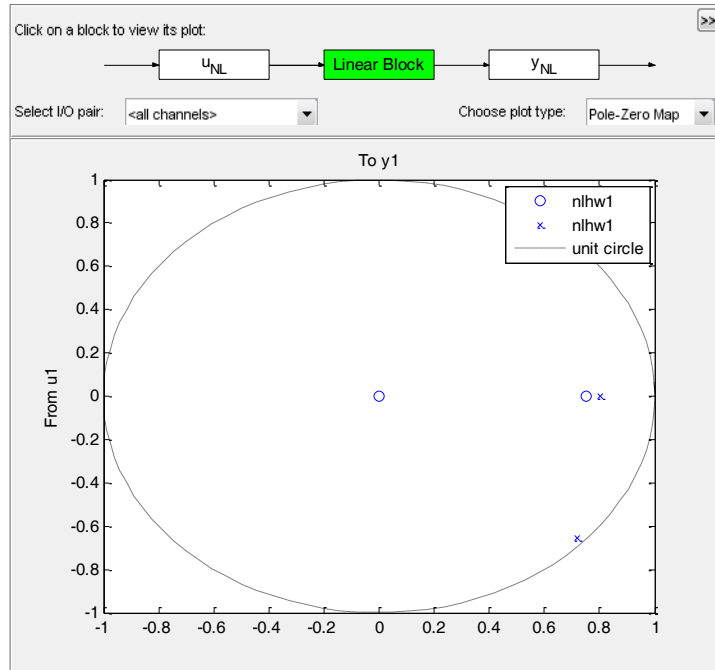
Bu fonksiyonlar incelendiğinde, (0,0) noktası yakınından geçtikleri ve terslenebilir oldukları gözlenebilir. Tasarlanan Hammerstein-Wiener modelindeki doğrusal bloğa ait transfer fonksiyonu ise aşağıdaki ifadedeki gibidir.

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{9.419 s^2 - 355 s + 1532}{s^3 + 4.779 s^2 + 164s + 613.4} \quad (4.3)$$

Doğrusal bloğa ait basamak cevabı ve kutup-sıfır grafikleri ise sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'deki gibidir.



Şekil 4.7 Doğrusal blok için basamak cevabı.



Şekil 4.8 Doğrusal blok için kutup-sıfır grafiği.

Burada da kutupların birim çember içerisinde kalıyor olması sistemin kararlı olduğunu göstermektedir. Son olarak ise tasarlanan kontrol sistemi bölüm 3.2.4'te belirtildiği üzere bir SIMULINK model dosyası üzerinden benzetimin her zaman adımında çalışarak üretilen kontrol girdisini akış alanına uygulamaktadır.

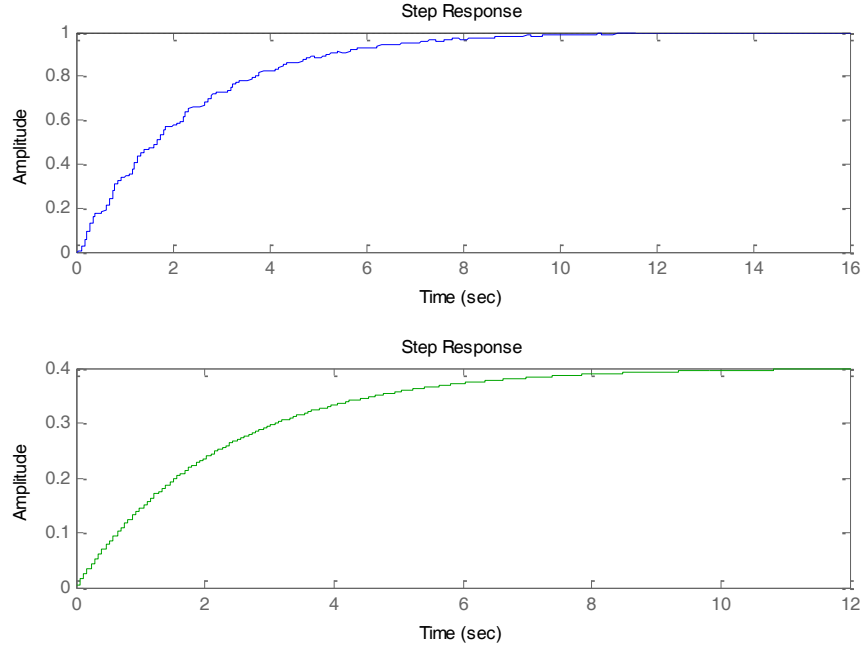
4.3 Kontrolcü Tasarımı

Akışkan sisteminin doğrusal olmayan dinamikleri elde edildikten sonra kontrolcü tasarımı Bölüm 3.23'te belirtildiği gibi Hammerstein-Wiener modelinin doğrusal kısmı için yapılacak ve giriş çıkış doğrusal olmama fonksiyonları terslenebilir olduğu için doğrusal olmayan sistem için de çalışacaktır. Kontrolcü tasarımı kısmını otonom olarak yapmak için PID yöntemi denenmiştir. MATLAB Control Systems Toolbox kullanılarak birçok derecelerden çeşitli kompensatör tasarımları yapılmıştır ve sonuçlar incelenmiştir. İncelemeler sonunda görülmüştür ki PID yöntemi problemimizin çözümü için hızlı ve etkin bir yol önermiştir. PID yöntemi temel olarak anlık ölçüm değeri ile istenen referans değeri arasındaki farkı bir hata fonksiyonu olarak alıp, kontrolcü çıkışını bu hata değerini sıfıra indirmeye çalışarak gerçekler. Kontrolcü bu işlemi oransal türevsel ve integral katsayıları ile gerçekleştirir. Oransal katsayısı mevcut hatayı temsil ederken, integral katsayısı hatanın birikimini temsil eder, türev katsayısı ise değişimin mevcut oranını gösterir [51].

Bu çalışmamızda elde ettiğimiz doğrusal olmayan dinamik model için tasarlanmış olduğumuz PID kontrolcüsünün transfer fonksiyonu aşağıdaki ifadedeki gibidir.

$$\frac{7.28 \cdot 10^{-7} s^2 + 5.247 \cdot 10^{-5} s + 1.819 \cdot 10^{-6}}{s^2 + 0.05734 s - 2.132 \cdot 10^{-16}} \quad (4.4)$$

Kontrolcünün kapalı çevrim birim basamak cevabı ve uygulanan girişin büyüklüğünün incelenebileceği grafik ise Şekil 4.9'da incelenebilir.

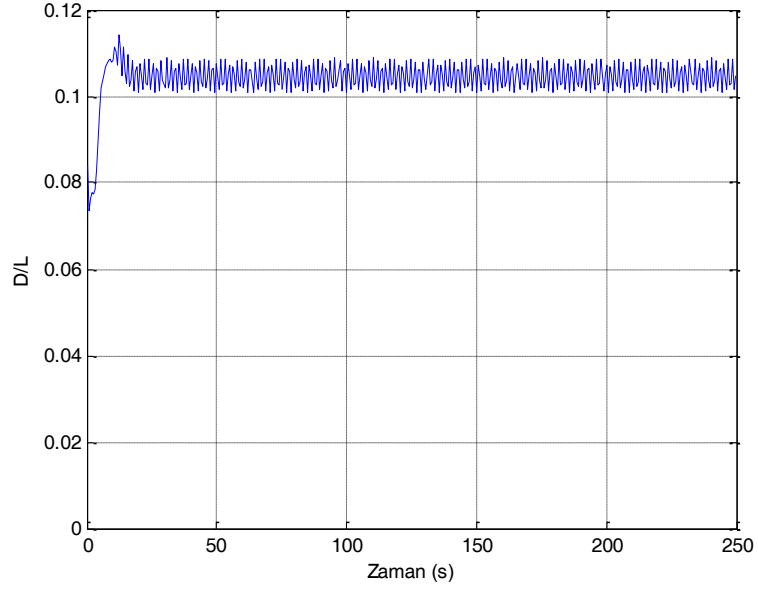


Şekil 4.9 Kontrolcünün birim basamak cevabı (üstte) ve kontrolcü girişi (altta).

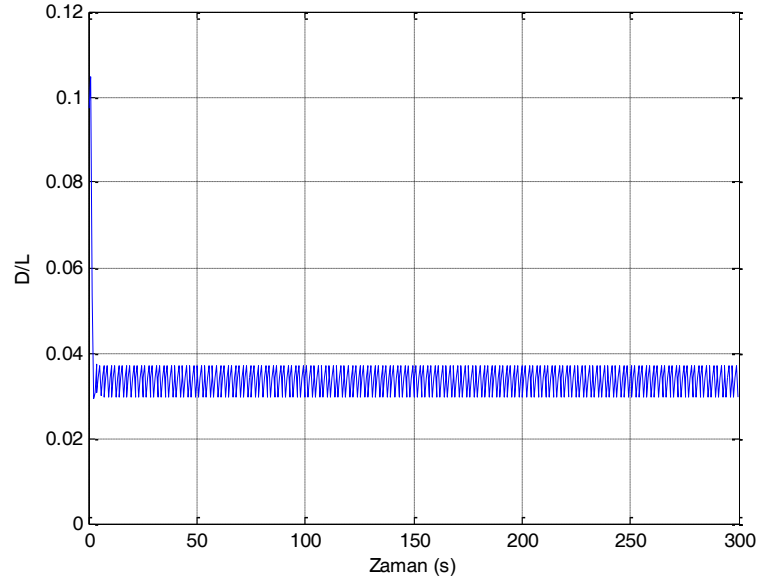
Buradan da anlaşılacağı üzere sistem $t = 12 s$ civarında referans değerine oturmakta ve kontrolcü girişinin genliği 0.4 değerini aşmamaktadır.

4.4 Sonuçlar

Sisteme başlangıç koşulu olarak, Reynolds sayısı 150, kinematik viskozite değeri $10^{-6} m^2/s$ olan 250 s süreli sıfır girişli bir benzetim çalıştırılarak uygulanmıştır, bunun amacı sistem kararlı duruma oturduktan sonra kontrol sisteminin devreye alınmasıdır. Kontrolcünün sistem üzerindeki etkisini gözlemlemek içinse yine aynı sınır koşullarında 300 s süreli benzetim uygulanmıştır. Benzetim sonucunda ise, girişsiz sistemdeki D/L katsayısı Şekil 4.10'daki gibi 0.105 mertebesindeyken, kontrolcünün devreye girmesi ile 15 s civarında kısa bir sürede, Şekil 4.11'deki gibi 0.03 mertebesine düşmüştür. Bu da göstermektedir ki Hammerstein-Wiener modelinin doğrusal bloğu için tasarlanan PID kontrolcünün beklenen etkiyi sergilediğini göstermektedir.

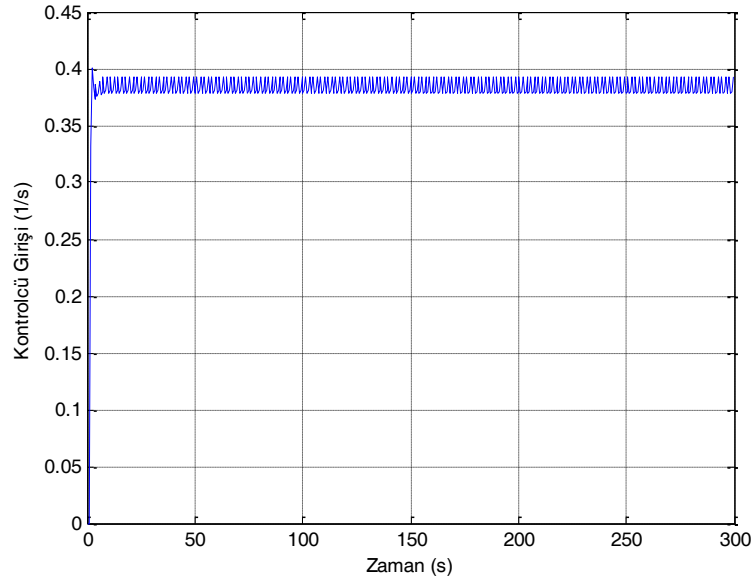


Şekil 4.10 Kontrolcü olmadığı zaman ölçülen D/L değeri.



Şekil 4.11 Kontrolcü devredeyken ölçülen D/L değeri.

Ayrıca MATLAB Control Systems Toolbox kullanılarak yapılan tasarımda da sistemin oturma zamanı ve en yüksek kontrolcü girişi seviyesinin (0.4) doğruluğunu görmek için Şekil 4.12'deki kontrol girdisi incelenebilir.



Şekil 4.12 Kontrolcü girişi.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, üç farklı akışkan akışı problemi için doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik modelleme ve kontrol yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu problemler sırasıyla; çarpma hareketi yapan bir NACA0012 kanat profili için doğrusal dinamik modelleme, silindir etrafı akışlarda girdapların kontrolü için doğrusal ve doğrusal olmayan modelleme ve kontrol ve son olarak da sabit hücum açılı bir NACA23012 kanat profilinin doğrusal olmayan modellemesi ve kontrolüdür.

İlk olarak ele alınan sistemde, çarpma hareketi yapan NACA0012 kanat profilinin akış hız alanları deneysel PGH tekniği ile ölçülmüştür. Sonrasında ise deneyden alınan bu anlık hız görüntülerine, kanadın açılma hareketi de eklenerek modelin doğru bir şekilde elde edilmesi için çeşitli görüntü işleme teknikleri, uygulanmıştır. İşlenmiş akış alanı görüntülerine UDA uygulanarak akış uzaysal kipler ve zaman katsayıları cinsinden ifade edilmiştir, bu noktada akış alanının enerjisinin %98.93'lük bir bölümü 100 adet UDA kipi ile ifade edilmektedir. Seçilen UDA kipleri sayısının akışı doğru ifade ettiğini göstermek için ise bir geri-çatılama yapılmış ve sonucunda akış hız alanının PGH tekniğinden elde edilen hız alanına benzer çıktığı görülmüştür. Sonrasında ise ST tekniği N4SID kullanılarak bir ayrık zaman durum uzayı modeli zaman katsayıları yörüngesine oturtularak bir dinamik model elde edilmiştir ve modelin çıktısı PGH ile elde edilen akış hız alanları ile benzerliği gözlenmiş ve modelin akışı kabul edilebilir bir doğrulukta temsil ettiği anlaşılmıştır [52].

Çalışmanın ikinci kısmında ise bir silindir etrafından akan akışın, silindir arkasında bıraktığı periyodik girdapların kontrolü konusu incelenmiştir. Yine sistem modellemeye dayanan bu çalışmada Navier2d isimli HAD programı geliştirilerek kullanılmıştır. Yapılan benzetimler öncelikle sıfır girdi altında 250 s çalıştırılarak periyodik girdap koridorunun oluşması ve akışın kararlı duruma gelmesi ile başlamaktadır. Sonrasında ise sisteme silindir üzerinden, kullanıcının belirleyeceği noktalardan (bu çalışmada silindirin alt ve üst bölgesinden noktalar seçilmiştir) değişken frekanslı sinüs fonksiyonu uygulanıp, silindir arkasından seçilen ve ortalama girdaplılık değerinin ölçüleceği noktalardan ise ölçüm değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen bu giriş-çıkış verisi ST tekniğinde akış alanının dinamik modelinin kestirimi için kullanılmıştır. Bu noktada model kestirimi doğrusal ve doğrusal olmayan olarak iki başlığa ayrılmıştır. Doğrusal modelde Süreç Modeli yaklaşımı tercih kullanılarak sistem dinamikleri elde edilmiştir ve iç model kontrolü tekniğinden faydalanarak tasarlanan kontrolcü kullanılarak akış alanındaki istenen bölgedeki girdaplılık değerinin bastırılması gerçekleştirilmiştir. Doğrusal olmayan modelde ise, sistemin dinamikleri bir doğrusal transfer fonksiyonu ve giriş ve çıkıştaki doğrusal olmama durumlarını temsil edecek fonksiyonlarla ifade eden Hammerstein-Wiener modeli kullanılmıştır. Bu modelde sistemin doğrusal bloğu için

tasarlanan doğrusal LKG kontrolcüsü, doğrusal olmayan sistemi de kontrol edebilmektedir.

Üçüncü ve son olarak ise, sabit hücum açılı bir NACA23012 kanat profilinin D/L katsayısı kontrolü için doğrusal olmayan bir yaklaşım ele alınmıştır. Bu yaklaşımda kanat üzerindeki kaldırma kuvvetinin sürüklenme kuvvetine oranla daha iyi olması için, yine Navier2d programı vasıtasıyla, önce kontrol girişi olmayan 250 s süreli bir benzetim yapılmış, ardından değişken frekanslı sinüs fonksiyonu akış alanına uygulanarak D/L katsayısı kaydedilmiştir. Yine bu veri seti kullanılarak bir Hammerstein-Wiener modelinin kestirimi ikinci dereceden bir boyutlu polinom tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonrasında ise Hammerstein-Wiener modelinin doğrusal bloğu için bir PID kontrolcü tasarlanarak kontrol sisteminin de dâhil edildiği bir benzetim çalıştırılarak D/L katsayısının kontrolü gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak D/L katsayısı 0.105 seviyesinden 0.03 seviyesine düşürülmüştür.

Akışkan akışı problemleri konusunda yapılan bu çalışmalarda akış, sistemlerin dinamik modellerinin yüksek doğruluklarda yapılabildiği ve tasarlanan kontrolcülerin de sistemleri istenilen şekilde kontrol ettikleri gösterilmektedir. Bu yaklaşımların uygulanabilirliği konusunda ise fiziksel kısıtlamalar bulunmaktadır. Bir akış kontrolü probleminin kapalı çevrim kontrolü için akış alanının hız bilgisini anlık bir şekilde ölçebilecek bir algılayıcı sistemi gerekmektedir fakat günümüz teknolojisi basit basınçölçerlerin ötesine geçememektedir. İlerideki çalışmalar içinse, akış kontrolü gerektiren başka geometrilerin modellenmesi ve kontrolü konusu incelenip, ses ötesi gibi yüksek hızlı sistemlerde akışkan kontrolü konusunun incelenmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] B. Çuhadaroğlu, Geçirgen yüzeylelerinden üfleme yapılan kare kesitli silindir etrafındaki akışta ısı geçişinin sayısal olarak incelenmesi, 8. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, s:15-29 (2007).
- [2] C.W. Rowley, T. Colonius, R.M. Murray, Model reduction for compressible flows using POD and Galerkin projection, *Physica D*, 189, 115-129, 2004.
- [3] R.Temam, Navier-Stokes Equations Theory and Numerical Analysis, *AMS Chelsea Publishing*, Providence, Rhode Island, 2001.
- [4] G.P.Galdi, An Introduction to the Mathematical Theory of the Navier-Stokes Equations, Springer New York Dordrecht Heidelberg, London.
- [5] H.D.Karaca, G.D.Özen, C.Kasnakoğlu, Silindir Etrafındaki Akışın Modellenmesi, Analizi ve Girdapların Kontrolü, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Toplantısı (TOK 2012), 306-312, Niğde, Türkiye, Ekim 2012.
- [6] M.G El Hak, Flow Control: Passive, Active, and Reactive Flow Management, *Cambridge University press*, New York, 2000
- [7] B.R. Noack, M. Schlegel, M. Morzyński & G. Tadmor, “System reduction strategy for Galerkin models of fluid flows, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 63, 231–248, 2010.
- [8] B.R. Noack, K. Afanasiev, M. Morzynski, G. Tadmor, “A hierarchy of low-dimensional models for the transient and post-transient cylinder wake, *Journal Fluid Mechanics*, 497, 335–363, 2003.
- [9] P. Druault, C. Challiou, Use of proper orthogonal decomposition for reconstructing the 3D in-cylinder mean-flow Field from PIV data *Comptes Rendus Mécanique*, 335(1), 42-47, 2007.
- [10] P. Guibert, F. Alizon, P. Druault, Use of proper orthogonal decomposition for time interpolation from PIV data, *Experiments in Fluids*, 39(6), 1009-1023, 2005.
- [11] B. Protas, Linear feedback stabilization of laminar vortex shedding based on a point vortex model, *Physics of Fluids*, 16(12), 2004
- [12] H. Schlichting, Boundary-layer theory, *Mc Graw-Hill*, New York, 1979
- [13] M. Pastoor, L. Henning, B.R. Noack, R. King, G. Tadmor, Feedback shear layer control for bluff body drag reduction, *Journal of Fluid Mechanics*, 608, 161–196, 2008.
- [14] M. Bergmann, L. Cordier, J. P. Brancher, Optimal rotary control of the cylinder wake using proper orthogonal decomposition reduced order model, *Physics of Fluids*, 17(9), 2005.

- [15] W. Fan, Numerical Study on Plasma-Based Control of Flow over a Square Cylinder, *Applied Mechanics and Materials*, 110-116, 4351-4357, 2011.
- [16] D. Engwirda, An unstructured mesh Navier-Stokes solver, *Master tezi*, School of Engineering, University of Sydney, 2005.
- [17] T. Colonius, C. W. Rowley, G. Tadmor, D. R. Williams, K. Taira, W. B. Dickson, M. Gharib, and M. Dickinson, Closed-loop control of leading-edge and tip vortices for small UAV, *First Berlin Conference on Active Flow Control*, Berlin, Almanya, Eylül 2006,
- [18]] M. H. Shojaefard, A. R. Noorpoor, A. Avanesians, M. Ghaffarpour, Numerical Investigation of Flow Control by Suction and Injection on a Subsonic Airfoil, *American Journal of Applied Sciences*, 2, 1474–1480, 2005.
- [19] Y. Tian, Q. Song, L. Cattafesta, Adaptive Feedback Control of Flow Separation, *3rd AIAA Flow Control Conference*, San Francisco, California, Haziran 2006
- [20] A. Azuma, O. Masato, Y. Kunio, T.J. Mueller (ed.) “Aerodynamic characteristics of wings at low Reynolds Numbers. Fixed and flapping wings aerodynamics for micro air vehicle applications” In *Progress in Astro. & Aero*, 195, 341–398, 2001.
- [21] R.S. Fearing, K. H. Chiang, M. H. Dickinson, Wing transmission for a micromechanical flying insect *Proceedings of the 2000 IEEE, International Conference on Robotics & Automation*, 1509–1516, San Fransisco, California, 2000.
- [22] S. Ho, H. Nassef, N. Pornsinsirirak “Unsteady aerodynamics and flow control for flapping wing flyers” *Progress in Aerospace Science*, 635–681, 2003.
- [23] M. Raffel, C. Willert, S. Wereley, J. Kompenhans, *Particle image velocimetry: a practical guide*, Springer Science & Business, New York, 1998.
- [24] O.Durmaz, Dynamical Modeling of the Flow Over Flapping Wing by Applying Proper Orthogonal Decomposition and System Identification, *Master Tezi*, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, 2011.
- [25] O.Durmaz, H.D.Karaca, G.D.Özen, C.Kasnakoğlu, D.F. Kurtuluş, Dynamical modelling of the flow over a flapping wing using proper orthogonal decomposition and system identification techniques, *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 2012.
- [26] “Particle Image Velocimetry measurement principles, Dantec Dynamics” erişim adresi: <http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=1049>, erişim tarihi Ekim 2010.
- [27] D. M. Luchtenburg, B. R. Noack, M. Schlegel “An introduction to the POD and Galerkin method for fluid flows with analytical examples and MATLAB source codes” *Berlin Institute of Technology, Technical Report*, 2009.

- [28] J. Kostas, J. Soria, M. Chong, Particle image velocimetry measurements of a backward-facing step flow, *Experiments in Fluids*, 33, 838-853, 2002.
- [29] O. Uzol, J. Katz, Flow measurement techniques in turbomachinery, *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*, 14, 919-958, 2007.
- [30] T.N. Erbil, C. Kasnakoglu “Feedback flow control employing local dynamical modeling with wavelets” *Mathematical and Computer Modeling of Dynamical Systems*, 15, 493 – 513, 2009.
- [31] D. M. Luchtenburg , B. R. Noack, M. Schlegel, An introduction to the POD and Galerkin method for fluid flows with analytical examples and MATLAB source codes, Berlin Institute of Technology, Technical Report, 2009.
- [32] A. Chatterjee, An introduction to the proper orthogonal decomposition, *Current Science*, 78(7), 808-817, 2008.
- [33] P. Holmes, J.L. Lumley, G. Berkooz, Turbulence, coherent structures, dynamical system, and symmetry, Cambridge University Press, 1996.
- [34] L. Sirovich, Turbulence and the dynamics of coherent structures, *Quarterly of Applied Mathematics*, 45, 561-590, 1987.
- [35] L. Ljung, System Identification: Theory for the User, *PTR Prentice Hall*, Upper Saddle River, NJ, U.S.A., 1999.
- [36] P. Van Overschee, B. De Moor, Subspace identification for linear systems: Theory-Implementation-Applications, *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht, 1996.
- [37] W.E. Larimore, Statistical optimality and canonical variate analysis system identification, *Signal Process*, 52, 131-144, 1996.
- [38] H.D.Karaca, G.D.Özen, C.Kasnaoğlu, Designing a Feedback Vorticity Control System for the Flow Past a Circular Cylinder, *Modeling Identification and Control (MIC 2013)*, Innsbruck, Austria, February 2013.
- [39] B. Ninness, A. Wills and S. Gibson , The University Newcastle Identification Toolbox (UNIT), In *Proceeding of the IFAC World Congress*, Prague, 2005.
- [40] I. L. Chien and P. S. Fruehauf, Consider IMC tuning to improve controller performance. *Chem. Eng. Prog.* , 86, 33–41, 1990.
- [41] D. E. Rivera, M. Morari, M. S. Skogestad, S, Internal model control 4 PID controller design. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* , 25: 252–265, 1986.
- [42] H.D.Karaca, G.D.Özen, C.Kasnaoğlu, A Nonlinear Dynamical Modeling and Control Method for the Vorticity Control of the Flow Past a Circular Cylinder, *ICIMA 2013*, Male, Maldives, February 2013.

- [43] P. Crama, J. Schoukens, Hammerstein-Wiener System Estimator Initialization, Proceedings of ISMA, 3, 1169-1176, 2002.
- [44] E.W. Bai, A Blind Approach to the Hammerstein-Wiener Model Identification, Automatica. 38, 967-979, 2002.
- [45] S.S. Collis, R.D. Joslin, A. Seifert, V. Theofilis, Issues in Active Flow Control: Theory, control, simulation and experiment, Progress in Aerospace Sciences, 40, 237-289, 2004.
- [46] M. Athans, The role and use of the stochastic linear quadratic-Gaussian problem in control system design, IEEE Trans Automat Control, AC-16, 529–552, 1971.
- [47] T.F. Edgar, J.G. Vermeychuk, L. Lapidus, The Linear Quadratic Control Problem: a Review of Theory and Practice, Chemical Engineering Communications, 1-2, 57-76, 1973.
- [48] J. W. He, R. Glowinski, R. Metcalfe, A. Nordlander, J. Periaux, Active Control and Drag Optimization for Flow Past a Circular Cylinder, Journal of Computational Physics, 163, 83-117, 2000.
- [49] D. Raymer, Aircraft Design: A Conceptual Approach, *AIAA*, Washington, 2002.
- [50] Y. Bai, X. Ba, X. Ming, Lift Enhancement of Airfoil and Tip Flow Control for Wind Turbine, Applied Mathematics and Mechanics, 32 (7), 825-836, 2011.
- [51] K. Ogata, Modern Control Engineering, *Prentice Hall*, Upper Saddle River, New Jersey, 2002.
- [52] H.D. Karaca, O. Durmaz, G.D. Özen, C. Kasnakoğlu, D.F. Kurtuluş, Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümlerine Uygun Dikgen Ayrışımı ve Sistem Tanılama Uygulayarak bir Çırpan Kanat Üzerindeki Değişken Akışın Dinamik Modellemesi, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Toplantısı (TOK 2011), 306-312, İzmir, Türkiye, Eylül 2011.

EKLER

Bu çalışmada bahsi geçen tüm dosyalar Cd içerisinde aşağıdaki adreslerde bulunmaktadır.

EK 1. CD\EKLER\FlappingWing\PIV	NACA0012 PGH görüntüleri ve dosyaları
EK 2. CD\EKLER\FlappingWing\Goruntu	Görüntü işleme kodları.
EK 3. CD\EKLER\FlappingWing\POD	UDA kodları.
EK 4. CD\EKLER\FlappingWing\SI	Kaydedilen MATLAB sistem tanılama oturumları
EK 5. CD\EKLER\Cylinder\ReadMe	Navier2d programı kullanımı.
EK 6. CD\EKLER\Cylinder\L\Navier2d	Silindir doğrusal modelleme ve kontrol dosyaları.
EK 7. CD\EKLER\Cylinder\NL\Navier2d	Silindir doğrusal olmayan modelleme ve kontrol dosyaları.
EK 8. CD\EKLER\NACA23012\NL\Navier2d	NACA23012 doğrusal olmayan modelleme ve kontrol dosyaları.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KARACA, H.Deniz
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 20.12.1987 Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (537) 727 63 10
e-posta : hdkaraca@gmail.com

Eğitim

<i>Derece</i>	<i>Eğitim Birimi</i>	<i>Mezuniyet tarihi</i>
Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2010

İş Deneyimi

<i>Yıl</i>	<i>Yer</i>	<i>Görev</i>
09/2010 - 12/2012	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Arş.Görevlisi
09/2010 – 06/2012	PIRG-2008-GA-239536 numaralı Avrupa Birliği projesi	Araştırmacı
09/2010 - ...	109E233 numaralı TÜBİTAK projesi	Araştırmacı

Yabancı Dil

İngilizce
İspanyolca

Yayımlar

1. O.Durmaz, H.D.Karaca, G.D.Özen, C.Kasnakoğlu, D.F. Kurtuluş, Dynamical modelling of the flow over a flapping wing using proper orthogonal decomposition and system identification techniques, Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, 2012.
2. O.Durmaz, H.D.Karaca, G.D. Özen, C.Kasnakoğlu, D.F.Kurtuluş, Dynamical Modeling of the Unsteady Flow over a Flapping Wing by applying Proper Orthogonal Decomposition and

System Identification to Particle Image Velocimetry Data, IEEE CDC-ECC Conference on Decision and Control, Florida, USA, 2011.

3. H.D.Karaca, O.Durmaz, G.D. Özen, C.Kasnakoğlu, D.F.Kurtuluş, Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümlerine Uygun Dikgen Ayrışımı ve Sistem Tanılama Uygulayarak bir Çırpan Kanat Üzerindeki Değişken Akışın Dinamik Modellemesi, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Toplantısı (TOK 2011), 306-312, İzmir, Türkiye, Eylül 2011.
4. H.D.Karaca, G.D.Özen, C.Kasnakoğlu, Silindir Etrafındaki Akışın Modellenmesi, Analizi ve Girdapların Kontrolü, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Toplantısı (TOK 2012), 306-312, Niğde, Türkiye, Ekim 2012.
5. H.D.Karaca, G.D.Özen, C.Kasnakoğlu, A Nonlinear Dynamical Modeling and Control Method for the Vorticity Control of the Flow Past a Circular Cylinder, ICIMA 2013, Male, Maldives, February 2013.
6. H.D.Karaca, G.D.Özen, C.Kasnakoğlu, Designing a Feedback Vorticity Control System for the Flow Past a Circular Cylinder, Modeling Identification and Control (MIC 2013), Innsbruck, Austria, February 2013.