

**DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ İLE AKIŞ KONTROLÜ PROBLEMLERİNİN
BÖLGESEL MODELLENMESİ VE KONTROLÜ**

TÜRKER NAZMI ERBİL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2010

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Ünver KAYNAK

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. M. Önder EFE

Anabilim Dalı Başkanı

Türker Nazmi ERBİL tarafından hazırlanan DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ İLE AKIŞ KONTROLÜ PROBLEMLERİNİN BÖLGESEL MODELLENMESİ VE KONTROLÜ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Coşku KASNAKOĞLU

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Veysel GAZİ _____

Üye : Yrd. Doç. Dr. Coşku KASNAKOĞLU _____

Üye : Yrd. Doç. Dr. Selin ARADAĞ ÇELEBİOĞLU _____

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.

Türker Nazmi ERBİL

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı : Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Coşku KASNAKOĞLU
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans - Temmuz 2010

TÜRKER NAZMI ERBİL

**DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ İLE AKIŞ KONTROLÜ PROBLEMLERİNİN
BÖLGESEL MODELLENMESİ VE KONTROLÜ**

ÖZET

Bu tez çalışmasında dalgacık dönüşümü ile değişik akmazlık koşulları altında geri beslemeli akış kontrolü problemleri için bölgesel dinamik modeller elde edilmesi konusu anlatılmıştır. Öncelikle akışın anlık görüntüleri bu akışı tanımlayan Navier-Stokes denklemlerinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği benzetimlerinden elde edilmiştir. Daha sonra Dalgacık dönüşümü, eşikleme ve geri çatılma ile görüntülerden oluşturulan katsayılardan sadece yaklaşıklama katsayılarıyla anlık görüntülerin kabul edilebilir derecede iyi oranda temsil edildiği gözlemlenmiştir. Bunun ardından yaklaşıklama katsayılarının zamana bağlı değişimlerini temsil eden düşük boyutlu dinamik sistem modeli, alt uzay tanımlama yöntemleri ile oluşturulmuştur. Bütün bu yöntem ve uygulamalar karesel alan üzerinde girişin sınır koşullarından sistemi etkilediği bir akış örneği üzerinde geliştirilmiş ve istenen derecede başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Dinamik modele uygun bir denetleyici tasarımı yapılmış ve ilgili akış alanındaki bir noktanın hızını denetim altına aldığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akış kontrolü, Bölgesel dinamik modelleme, Dalgacık dönüşümü,

University : TOBB University of Economics and Technology
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Electrical and Electronics Engineering
Supervisor : Assistant Professor Coşku KASNAKOĞLU
Degree Awarded and Date : M.S. - July 2010

TÜRKER NAZMI ERBİL

**REGIONAL DYNAMIC MODELLING AND CONTROL OF FLOW
PROBLEMS WITH WAVELETS**

ABSTRACT

In this thesis, wavelet transform is used to obtain dynamical models describing the behavior of fluid flow in a local spatial region of interest. First, snapshots of the flow are obtained from computational fluid dynamics (CFD) simulations of the governing equations. A wavelet family and decomposition level is selected by assessing the success of reconstruction under the resulting inverse transform. The flow is then expanded onto a set of basis vectors which are constructed from the wavelet function. The wavelet coefficients associated with the basis vectors capture the time variation of the flow within the spatial region covered by the support of basis vectors. A dynamical model is established for these coefficients by using subspace identification methods. The approach developed is applied to a sample flow configuration on a square domain where the input affects the system through the boundary conditions. It is observed that there is good agreement between CFD simulation results and the predictions of the dynamical model. A controller is designed based on the dynamical model and is seen to be successful in regulating the velocity of a given point within the region of interest.

Keywords: Flow control, Regional dynamic modeling, Wavelet transform,

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Coşku KASNAKOğLU'na, değerli hocalarım Doç. Dr. Veysel GAZI, Yrd. Doç. Dr. Selin ARADAğ ÇELEBIOğLU ve yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine,

Ve her zaman beni destekleyen ve bugünlere getiren aileme teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------|--------------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT | v |
| TEŞEKKÜR | vi |
| İÇİNDEKİLER | vii |
| 1. GİRİŞ | 2 |
| 1.1. Problemin Tanımı ve Literatür Taraması | 2 |
| 1.2. Tezin Organizasyonu | 7 |
| 2. TEMEL BİLGİLER | 8 |
| 2.1. Dalgacık Dönüşümü | 8 |
| 2.1.1. Dalgacık Dönüşümü Kavramı ve Tarihi | 8 |
| 2.1.2. Sürekli Dalgacık Dönüşümü | 9 |
| 2.1.3. Ayrık Dalgacık Dönüşümü | 10 |
| 2.2. Navier-Stokes Denklemleri | 13 |
| 2.2.1. Sıkıştırılmaz Akışlar | 14 |
| 2.3. Uygun Dikgen Ayrışımı -Galerkin İzdüşümü ve Bölgesel Modelleme | 15 |
| 2.3.1. Uygun Dikgen Ayrışımı Kavramı ve Tarihi | 15 |
| 2.3.2. Matematiksel Bakış | 16 |
| 2.3.3. Galerkin İzdüşümü | 17 |
| 2.3.4. Sistem Tanılama | 18 |
| 2.4. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği | 19 |
| 3. MODELLEME VE KONTROL YAKLAŞIMI | 21 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1. Problem tanımı | 21 |
| 3.2. Anlık görüntülerinin elde edilmesi ve dalgacık ayrışım teknikleri | 21 |
| 3.3. Taban vektörlerinin bulunması ve Dinamik Model Oluşturulması | 24 |
| 3.4. Denetleyici Tasarımı | 28 |
| 3.4.1. D-K ötelemesi ve μ sentezi | 29 |
| 3.4.2. Orantısal İntegral ve filtrelenmiş Türevsel Denetleyici Tasarımı | 30 |
| 4. ÖRNEK DURUM İNCELEMESİ | 32 |
| 4.1. İki Boyutlu Navier-Stokes denklemleri ile yönetilen ve sınır koşullarına tabi bir akışın dinamik modellemesi | 32 |
| 4.2. Tek akma hızı değeri için bölgesel dinamik modelleme | 33 |
| 4.3. Değişik akma hızı koşulları altında bölgesel dinamik modelleme | 46 |
| 5. SONUÇ | 53 |
| 5.1. Yorumlar | 53 |
| 5.2. Gelecekteki Çalışmalar | 54 |
| KAYNAKLAR | 54 |

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 1.1. Tarımsal Uçak kanatları tarafından oluşan girdap (renklendirilmiş duman ile) [6]. | 3 |
| Şekil 1.2. Denizaltı gövdesindeki su akışı [7]. | 3 |
| Şekil 1.3. Kovuk (kavite) akış şeması [8]. | 4 |
| Şekil 2.1. Ayrık Dalgacık Dönüşümü [22]. | 11 |
| Şekil 2.2. Daubechies Dalgacığı [25]. | 12 |
| Şekil 2.3. 2 boyutlu çok seviyeli Dalgacık dönüşümü. Katsayılar "N XY" olarak tanımlanmıştır. Burada N seviye X, Y de sırasıyla sütun ve satırlara uygulanan filtreleme işlemini gösterir [26]. | 12 |
| Şekil 3.1. Akışın x yönündeki anlık görüntüsü ($t = 0.003$ sn) | 22 |
| Şekil 3.2. Çok seviyeli ayrık dalgacık dönüşüm | 23 |
| Şekil 3.3. İkinci seviye ayrışım için geri çatılama işlemi [22]. | 24 |
| Şekil 3.4. Belirsiz sistem modeli blok diagramı (çarpım tipi) [33]. | 30 |
| Şekil 4.1. Şekil 4.2. ve Şekil 4.3. ' teki akışın anlık görüntülerini elde etmek için kullanılan değişken frekanslı sinyal | 35 |
| Şekil 4.2. Değişken frekanslı sinyal ile uyarılmış akışın anlık görüntülerinin x yönündeki bileşeni | 35 |
| Şekil 4.3. Değişken frekanslı sinyal ile uyarılmış akışın anlık görüntülerinin y yönündeki bileşeni | 36 |
| Şekil 4.4. Orijinal anlık görüntü (üst-sol) ve bu görüntünün sadece yaklaşıklama katsayıları kullanılarak geri çatılması ile elde edilen görüntü (üst-sağ) - İki seviye ayrıştırma sonucu dalgacık katsayıları (alt-sol) ve eşikleme sonucu detayların sıfırlanması sonucu oluşan katsayılar (alt-sağ) | 36 |
| Şekil 4.5. Farklı dalgacık fonksiyonları için kullanılan ayrışım alçak-geçiren filtreler | 37 |
| Şekil 4.6. Farklı dalgacık fonksiyonları için kullanılan ayrışım yüksek-geçiren filtreler | 38 |
| Şekil 4.7. $\{\phi\}_1^8$ taban vektörlerinin oluşturmak için kullanılan $\{\Upsilon\}_1^4$ fonksiyonları | 42 |
| Şekil 4.8. UDA ile elde edilen $\{\phi\}_1^4$ taban vektörlerinin x yönündeki bileşeni | 42 |
| Şekil 4.9. Değişken frekanslı sinyal ve sıfır giriş ile uyarılan anlık görüntülerden elde edilen katsayılar | 43 |
| Şekil 4.10. Değişken frekanslı sinyal ve sıfır giriş ile uyarılan dinamik modelden elde edilen katsayılar | 43 |
| Şekil 4.11. Kapalı çevrim sisteminden elde edilen akışın anlık görüntüleri (x yönündeki hız bileşeni) | 45 |
| Şekil 4.12. Kapalı çevrim sisteminden elde edilen akışın anlık görüntüleri (y yönündeki hız bileşeni) | 46 |
| Şekil 4.13. Kapalı çevrim sisteminden elde edilen akışın (x_c, y_c) noktasındaki hızı ve takip edilecek y_{ref} referans sinyali | 47 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.14.Çarpım tipi belirsiz sistem modeli Bode çizelgesi | 48 |
| Şekil 4.15. $e - y$ ve $y_{ref} - u - \nu$ | 49 |
| Şekil 4.16. $e - y$ ve $y_{ref} - u - \nu$ | 49 |
| Şekil 4.17.DK ötelemesi kullanılarak kapalı çevrim sistemi için HAD benzetimlerinden elde edilen akışın anlık görüntüleri (x yönündeki hız bileşeni) | 50 |
| Şekil 4.18.DK ötelemesi kullanılarak kapalı çevrim sistemi için HAD benzetimlerinden elde edilen akışın anlık görüntüleri (y yönündeki hız bileşeni) | 50 |
| Şekil 4.19.PID denetleyici kullanılarak kapalı çevrim sistemi için HAD benzetimlerinden elde edilen akışın anlık görüntüleri (x yönündeki hız bileşeni) | 51 |
| Şekil 4.20.PID denetleyici kullanılarak kapalı çevrim sistemi için HAD benzetimlerinden elde edilen akışın anlık görüntüleri (y yönündeki hız bileşeni) | 51 |

BÖLÜM 1

1. GİRİŞ

1.1. Problemin Tanımı ve Literatür Taraması

Akış problemleri, genel olarak sıvıların, gazların ve bunların dışında da bazı maddelerin fiziksel davranışlarını inceler. Örnek olarak, denizaltı gövdesi etrafındaki suyun akışı, uçağın kanatları üzerindeki hava akışı, boru hatlarındaki petrol akışları sayılabilir (Bkz. Şekil 1.1. - Şekil 1.2.).

Günlük hayatta çok sık karşılaşılan bu kavramın modellenmesi ve üzerine çalışmalar yapılması teknik açıdan önemlidir [1, 2]. Bilimsel ve teknolojik açıdan akış kontrolü ele alındığında; hava araçlarında ve bu araçların kanat, kanatçık, pervane istikamet dümeni ile hareket ettirdiği hava ceyyanı ile komutaya yardımcı olan satırların kontrolleri, kanallardaki sıvı veya gaz akışının modellenmesi ve denetimi, kavite kontrolü ve girdap-türbülans denetimi gibi daha birçok buna benzer konular karşımıza çıkmaktadır. Genel olarak yazın taraması yapıldığında bazı kavramların belirlenmesi önem taşımaktadır. Akış alanı eğer uçaklarda, roketlerde ve dünya yüzeyinde olduğu durumlarda ise dış akışlar, akış alanının boru akışlarında olduğu gibi sınırlarla çevrildiği durumlara da iç akışlar denir. Yüzeye yakın kesimlerde sürtünme kuvvetlerinin mevcut olduğu ve yüksek hız değişimlerinin gözlemlendiği bölgelere sınır tabaka denir. Yüzeyden uzak bölgelerde, serbest akış alanında atalet kuvvetleri daha baskın ve etkindir. Bu nedenle akış, hız ya da kuvvetler arasındaki orana göre sınıflandırılır. Atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı Reynolds sayısı diye tanımlanmaktadır [3].

Akış alanının incelenmesinde yaygın olarak diferansiyel yöntemler, integral yöntemleri, boyut analizi ve deneysel yöntemler kullanılmaktadır. Diferansiyel ve integral yöntemleri, Navier-Stokes ve akış ile ilgili enerji denklemlerinin çözümüne dayandığından çoğu zaman bir takım kabullerle denklemler basitleştirilerek çözüme gidilir. Bazı durumlarda eğer tam çözüm bu kabullerle sağlanamıyorsa, sayısal veya nümerik yöntemlerle sistem analiz edilir. Deneysel yöntemlerde genellikle bütün parametreler ölçülebilmesine rağmen ergonomik olamayabileceği için her zaman kullanılmayabilir. Akışkan akışlarında genelde deneysel olarak ölçülmesi gereken büyüklükler arasında akmazlık, hız, basınç, sıcaklık, yoğunluk, debi ve türbülans yoğunluğu sayılabilir. Akmazlık ölçümünde viskometreler (serbest akışlı, döner



Şekil 1.1. : Tarımsal Uçak kanatları tarafından oluşan girdap (renklendirilmiş duman ile) [6].

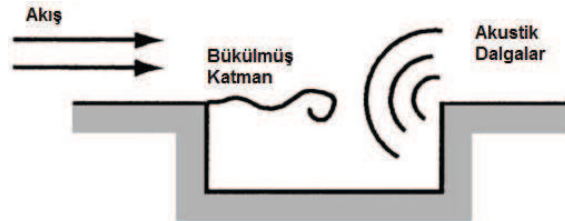


Şekil 1.2. Denizaltı gövdesindeki su akışı [7].

eksenli ve tablalı, düşen bilyalı, ince tüplü), hız için Laser Doppler hız ölçer, kızgın tel (hot wire) anemometresi ve pitot tüpü, sıcaklık için sıvı kristal ısıtıcı ve termo elemanlar, türbülans yoğunluğu ve Reynolds gerilmeleri için laser ve kızgın tel anemometreleri, yoğunluk için ise hidrometreler kullanılır. Debi ölçümünde kapalı kesitlerde orifismetre, venturimetre, akış lülesi ve çeşitli tipte debimetreler, açık kanallarda ise savaklar kullanılır [40].

Bu tez çalışmasında benzetimler birden farklı akmazlık değerleri altında gerçekleştirilmiştir. Bu durumda akmazlık kavramının tanımlanması önem taşımaktadır. Bir akışkanın (sıvı veya gaz) akmazlığı, akışkan üzerine uygulanan kaydırma kuvvetinin karşılaştığı sürtünme direncinin bir ölçüsü olarak tanımlanabilir. Örnek olarak, bir akışkan herhangi bir yüzeyin üst bölgesinden geçerek aktığı anda, yüzeye komşu olan akış tabakası durgun halde olur ve bu yüzeyden itibaren birbirini takip eden tabakaların hızları gitgide artar. Bu bağlamda yüzeye en yakın tabakaların hızları düşük, yüzeyden uzak olan tabakaların hızları ise daha yüksek olur. Akışkanlar akışları konusunda birçok çalışma yapmış olan Newtonun akmazlık akış (diğer adıyla laminer veya tabakalı akış) kanununa göre sıvı içerisinde bulunan iki komşu tabakanın birbirlerine göre hareketine direnç gösteren sürtünme kuvveti, akışın aktığı alan ve gradyenti ile orantılıdır [5].

Birçok sıvı akışların akmazlığı, artan sıcaklıkla azalır. Boşluk (hole) teorisine göre bir sıvı içerisinde boşluklar bulunur ve sıvı molekülleri sürekli olarak boşluklara doğru hareket etmeye meyillidirler (Bkz. Şekil 1.3.). Bu olay sonucunda akış gerçekleşmektedir, ancak bir molekülün bir boşluğa taşınması bir aktivasyon enerjisine ihtiyaç duyar ve enerji gerektirmektedir. Yüksek sıcaklıklarda aktivasyon enerjisi daha kolay elde edileceğinden sıcaklık yükseldikçe sıvı daha kolay akmaktadır. Diğer yandan da artan basınçla bir sıvının akmazlığı artar, çünkü basıncın artırılması



Şekil 1.3. Kovuk (kavite) akış şeması [8].

sıvı içerisindeki boşluk sayısını azaltmaktadır ve bunun sonucu olarak moleküllerin hareketi zorlaşır. Bu durumda akışın gerçekleşmesi zorlaşmaktadır [4, 10].

Akışkan akışlarının dinamik modellemesinde en çok uygulanan yöntemler Uygun Dikgen Ayrışım (UDA)/Galerkin İzdüşümü (Gİ) teknikleridir. Bu yöntemlerde akışın bir açılımı, sonlu alt uzay oluşturacak şekilde hesaplanan ve akış enerjisinin büyük kısmını içeren UDA kipleri ile ifade edilmektedir. Sonraki aşama ise akışı temsil eden Navier-Stokes, Burgers vb. kısmi türevsel denklemlerde (KTD) bu açılımın yerine konması ve Gİ kullanılarak dinamik sistemlerin UDA katsayıları cinsinden elde edilmesidir [28–30].

Burada, girdi ayrıştırma teknikleri UDA'nın uzantıları olarak önem kazanmaktadır. Bu metotlar, kontrol girişinin sistem katsayıları içine gömülü kalması problemi ile ilgilenir ve dinamiklerde bağımsız kontrol terimleri üreterek problemi ortadan kaldırmaya çalışırlar. UDA tabanlı metodlar, modelleme ve çok sayıdaki akış uygulamalarında kullanılmakta, geribeslemeli kavite kontrolü, optimal kontrol ve sistem kararlılığı uygulamalarında da bunlardan faydalanılmaktadır [20].

Yukarıda bahsedilen yöntemler düşük boyutlu dinamik modeller üretirler ama bu modeller doğrusal olmayan modeller olduklarından üzerlerinde analiz ve denetleyici tasarımı yapılması çok zordur. Bu modellerde görülen bir başka zorluk da akışın özel olarak ilgilenilen bir bölgesini yerel modelleme ve analiz yapmak istenildiğinde UDA kiplerinin akış alanının neredeyse bütününe dağılması sebebiyle sıkıntı yaşanmasıdır. Bundan ötürü, kiplerle ilişkili zaman katsayıları ilgilenen bölgesel uzaysal alan hakkında doğrudan bilgi edinilmesine olanak sunmaz. Çoğu kez, sistem durumlarının direkt olarak ilişkili olduğu uzaysal alanla ilgilenilir ve bu sebepten dolayı sadece verilen bir bölgesel alanın dinamiksel davranışlarıyla çalışmak genelde tercih edilen yol olmuştur.

Akış kontrolünün tarihsel açıdan gelişimine bakıldığında kökeninin çok eskilere dayandığı göze çarpmaktadır. İnsanoğlu avlanmak için kullandığı oklarda daha etkin ve daha aerodinamik şekilde olması için deneme yanılma yoluyla iyileştirmeler yapmıştır. Böylece daha uzak mesafelerden kararlı ve hızlı şekilde hedefi bulabilmişlerdir. Ayrıca, Archimedes (M.Ö 287-212) ve Da Vinci (1452-1519) akışkanlar dinamiği ile ilgili çalışmalar yapsalar da esas olarak bilimsel çalışmalar Isaac Newton'un akışkan mekaniği ve dinamiğini konu aldığı "Book II of Principia Mathematica" adlı kitabını yayınlamasıyla başlamış kabul edilmektedir. Leonhard Euler (1707-83) ilk olarak akışkan akışlarındaki matematiksel denklem önermelerinde

bulunmuştur; bundan yaklaşık yüz yıl sonra da bu önermeler geliştirilerek Navier-Stokes denklemleri olarak günümüzde kullanılmaktadır [5,41]. Bu denklemler dahi akış problemleri için tam olarak genel çözüm vermemesine karşın en çok kullanılan denklemlerdir.

Açık kanal akışları, boru akışları, dalgalar, türbinler ve gemi sürüklenme katsayıları üzerinde Antonie de Chezy (1718-1789), Henri Pitot (1695-1771), Wilhelm Eduard Weber (1804-1891), James Bicheno Francis (1815- 1892), Jean Louis Marie Poiseuille (1799-1869) yaptıkları deneysel çalışmalarla akışkanlar mekaniğinin geliştirilmesinde önemli katkılarda bulunmuşlardır [5].

1980'li yıllarda teknik makaleleri yayınlanan ve akış kontrolü konusunda uluslar arası ün kazanan başka bir bilim adamı da Osborne Reynolds'tır. Türbülans kontrolü ve akış görselleştirme konularında çalışmalar yapmış ve özellikle akışkan akmazlığı, yoğunluğu ve akışkan hızı gibi fiziksel niceliklerin belirlenmesinde öncü olmuştur [37]. Günümüz fizikçileri ve mühendisleri tarafından sıkça kullanılan birimsiz parametre olarak da bilinen Reynolds sayısı literatürde yerini almıştır.

Yirminci yüzyılların başlarında ise Wright kardeşler yine aerodinamik alanında testler ve deneysel araştırmalar yapmış; uçak yapımında önemle ihtiyaç duyulan denge ve kontrol konusunda bu araştırmalardan faydalanmışlardır. Birkaç başarısız uçuş denemelerinin ardından yapılan kanat iyileştirmesi, denge ve kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi ile ilgili birçok çalışmalar yapmışlardır. 1903 yılında da başarılı uçuş denemesini gerçekleştirmişlerdir [77].

P.Holmes, J.L. Lumley gibi bilim adamları türbülans içeren akışların matematiksel modellenmesi ve sıkıştırılmaz akışların Uygun Dikgen Ayrışım (UDA) teknikleri kullanarak düşük boyutlu dinamik modeller elde edilmesi gibi konularda çalışmalar gerçekleştirmiştir. Akış kontrolü alanında önemli çalışmalar yapmış kişilerden biri de Gad-el-Hak'tır [1].

Yirmibirinci yüzyılda uygun yazılımlar yardımıyla kullanılan süper bilgisayarlar, Navier-Stokes denklemlerinin çözümlenmesinde önemli bir rol oynamıştır. Yüksek Reynolds sayısı altında ve türbülans içeren akışlar için nümerik çözümler geliştirerek literatürde önemli bir yer edinmiştir [31].

1.2. Tezin Organizasyonu

Bu tez çalışmasında akış problemlerinin modellenmesinde kullanılacak bir dinamik modelleme ve uygun denetleyici tasarımı uygulaması dalgacık dönüşüm yöntemleri [15–18] kullanılarak anlatılacaktır. Bu tezde akış sıkıştırılmaz olarak kabul edilecek ve çalışmalar bu koşula göre gerçekleştirilecektir. Önemli bir basitleştirmeyi mümkün kılan özel bir durum olan sıkıştırılmaz akış, kısaca yoğunluk değişimlerinin ihmal edildiği akış olarak anlatılabilir. Ayrıca akışkan akışlarındaki akmazlık kavramının modellemeye etkisi de dikkate alınacaktır. Akmazlık, akışkanın akmaya karşı gösterdiği iç direnç olarak tanımlanabilir. Bu çalışmada farklı ortam şartlarına (sıcaklık, basınç, vs.) bağlı olarak değişen akmazlık değerleri altında modelleme ve denetleyici tasarımı yapılacak ve sonuçları gözlemlenecektir. İlk aşama olarak, üzerinde çalışılan akışın anlık görüntülerinin dalgacık ayrışımı elde edilip akış görüntülerinin sadece bu ayrışımından elde edilen yaklaşılama katsayılarıyla kabul edilebilir oranda iyi temsil edildiği görülecektir. Sonra akışın dinamik değişimini hesaplamak için dalgacık fonksiyonları kullanılacak ve her akmazlık (ν) değeri için, sistemin girişi frekansı değişen sinüs, çıkış da bu katsayıların zamanla değişimi olacak şekilde sistem tanımlama yöntemleri ile doğrusal modeller oluşturulacak, akış verileri ile kıyaslanacaktır. Değişik akmazlık değerleri için denetleyici tasarımı ve modelleme yapılacak ve son olarak da sonuç ve gelecekteki çalışmalar ile tez sonlandırılacaktır.

BÖLÜM 2

2. TEMEL BİLGİLER

2.1. Dalgacık Dönüşümü

2.1.1. Dalgacık Dönüşümü Kavramı ve Tarihi

Dalgacık dönüşümü Fourier dönüşümünün durağan olmayan sinyallerdeki dezavantajlarını gidermek için geliştirilmiş farklı bir dönüşüm yöntemidir. Bu analiz yöntemi gürültüye karşı daha az hassasiyet göstermektedir. Bundan dolayı sinyal işleme ile ilgili çalışmalar frekans tabanlı Fourier dönüşümünden ölçek tabanlı dalgacık dönüşümüne doğru saptmıştır.

Tarihsel açıdan dalgacık analizi son dönemlerde daha sıkça kullanılmaya başlanmış bir yöntem olup, temeli Joseph Fourier'e kadar uzanmaktadır. Dalgacık dönüşümünden önce kullanılan kısa süreli Fourier dönüşümündeki pencere fonksiyonunun, tarama sırasında sabit bir genişlikte olması, sinyalin hızlı değişen yüksek frekanslı değişimlerinin zaman ortamında tam olarak bölgelendirilememesine sebep vermiştir [81]. Bu duruma çözüm olarak, sabit genişlikteki pencereler yerine, işaretteki yavaş değişimleri yakalamak üzere geniş pencere fonksiyonları ve hızlı değişimlerin olduğu yerlerde ise dar pencere fonksiyonlarının kullanımı düşünülmüş böylece dalgacık dönüşümü konusu ortaya çıkmıştır.

Dalgacık dönüşümü birçok farklı alanda çalışılabilen bir analiz yöntemidir. Uygulamalı matematik, sinyal işleme teknikleri, ses ve görüntü sıkıştırma teknikleri başta olmak üzere daha birçok bilimsel çalışmalarda dalgacık dönüşümü kullanılmaktadır. Dalgacık, ayrıştırma (decomposition) tekniklerine dayanan sinyal işlemeden türetilmiştir. Dalgacık dönüşüm tekniğinin arkasındaki temel fikir sinyali çoklu parçalara ayırmak ve bu her bir parçayı ayrı ayrı analiz etmektir. Bir sinyalin bu şekilde analiz edilmesi, o sinyalin frekanslarının hangi özelliklerde oluşturulduğuna dair daha çok bilgi alınabileceğine sebep vermektedir [23, 24]. Dalgacık dönüşümü zaman ve frekans gösterimini aynı ortamda sunabilmektedir. Dalgacıklar, veri veya fonksiyonların gösteriminde kullanılan belirli matematiksel özellikleri ifade etmekte kullanılan fonksiyonlardır. Dalgacık kullanımı ve seçimindeki en önemli etkenlerden birisi bir sinyaldeki özelliklerin saptanması için gerekli olan zaman ve frekans

verilerini kapsamayı ve çoklu-çözünürlük analizine dayanmasıdır.

2.1.2. Sürekli Dalgacık Dönüşümü

Sayısal sinyal işleme konusunda sıklıkla kullanılan yöntemlerin başında Dalgacık Dönüşüm yöntemi gelmektedir. Bu yöntemle ilgili birçok çalışma ve kaynak bulmak mümkündür [21–24]. Dalgacık, uzayda yayılan ve enerjinin taşınmasına yol açan sınırlı sürede salınım yapan sıfır ortalama değerli titreşimli dalga formudur. Diğer analiz yöntemlerine nazaran bölgesel analiz yapma olanağı sağlaması nedeniyle tercih edilen bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Dalgacık dönüşümü yöntemlerinden biri olan Sürekli Dalgacık Dönüşümü, analizde kullanılan ölçeğin zamana bağlı olarak analiz penceresinin sinyal üzerinde kaydırılıp çarpma işleminin yapılması ve bu işlemler sonucunda elde edilen verilerin toplanması ile hesaplanır. Dalgacık dönüşümü dalgacık fonksiyonunun kaydırılmış ve ölçeklendirilmiş şeklinin tüm zamanlar üzerindeki toplamı olarak tanımlanabilir. Aşağıda matematiksel ifadesi gösterilmektedir.

$$C(\text{ölçek, pozisyon}) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(\text{ölçek, pozisyon}, t) dt \quad (2.1)$$

Bu ifadede C dalgacık dönüşümünün katsayılarını, ψ da dalgacık fonksiyonu göstermektedir; dalgacık fonksiyonu ψ kullanılan dalgacık tipine göre değişiklik göstermektedir. Oluşturulan C katsayılarının, dalgacık fonksiyonun uygun ölçek ve pozisyondaki hali ile tümlenmesiyle f fonksiyonunun geri çatımı elde edilir. Sürekli Dalgacık Dönüşümü, Kısa Süreli Fourier Dönüşümü'nden farklı olarak değişken pencere genişliklerine sahiptir. Dalgacık metodu kullanarak bir sinyalin ayrıştırılması ve tekrar oluşturulması genel olarak üç aşamadan oluşur:

- Ayrık dalgacık dönüşümü kullanarak sinyalin bileşenlerine ayrılması,
- Ortaya çıkan katsayıların eşikleme (thresholding) metotlarıyla yumuşatılması, ve istenen katsayıların elenmesi,
- Eşikleme yapılmış ayrık dalgacık katsayılarından tekrardan orijinal sinyalin oluşturulması.

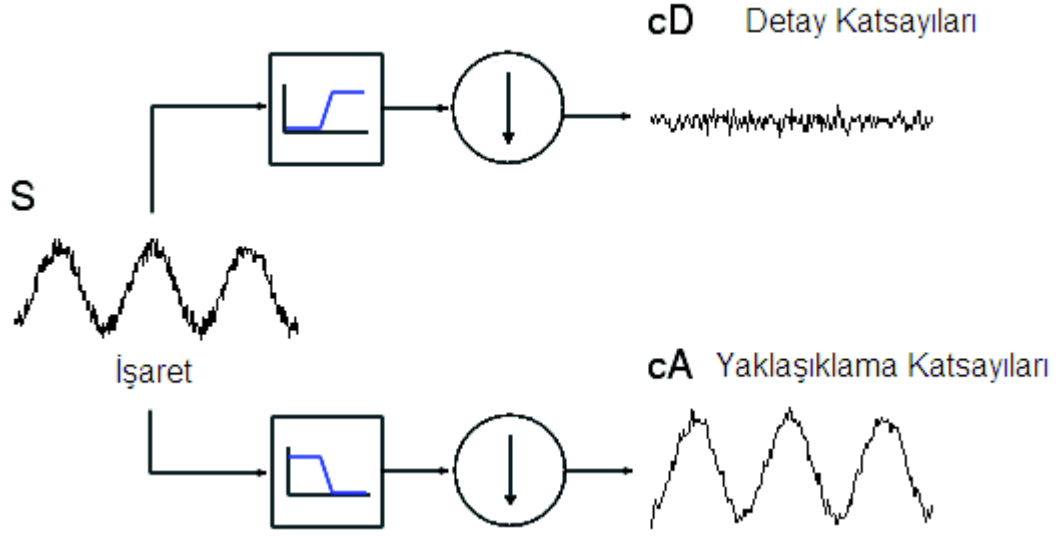
Sürekli dalgacık dönüşümünde ölçeklendirme ve dalgacık fonksiyonu parametrelerinin sürekli olarak değişimi göstermesi sebebiyle her bir ölçek için dalgacık katsayılarının ayrı ayrı hesaplanması zor ve zaman alıcı olduğu için genellikle tercih edilmemektedir.

2.1.3. Ayrık Dalgacık Dönüşümü

Yukarıda bahsedilen sürekli dalgacık dönüşümünün örneklenmiş haliyle elde edilen ayrık dalgacık dönüşümü sayısal analiz veya fonksiyonel analiz çalışmalarında sıkça kullanılmaktadır. Ayrık Dalgacık Dönüşümünde, sinyali analiz etmek için farklı ayrık frekanslar kullanılmaktadır. Son yıllardaki çalışmalara bakıldığında dalgacık dönüşümü birçok sinyal işleme problemleri ve diğer mühendislik alanlarındaki uygulamaların analizi için yeni bir zaman-frekans dönüşüm yöntemi olarak önerilmiştir. Dalgacık dönüşümü, tıpkı Fourier dönüşümünde olduğu gibi durağan ve durağan olmayan işaret analizinde kullanılan ve bir işareti farklı ölçeklerdeki çözünürlük seviyelerinde tek bir fonksiyonu genişleterek ayrıştıran çok önemli bir matematiksel tekniktir. Dalgacık dönüşümünü Fourier dönüşümünden ayıran en önemli özellik, Fourier dönüşümünde bir işaretin frekans bilgisi elde edilirken, dalgacık dönüşümünde ise verilen bir işaretin aynı anda hem zaman hem de frekans temsilinin elde edilmesidir. Bu sebepten dolayı dalgacık dönüşümünün sinyal işleme kalitesindeki bozulmalarını belirleyebilme ve onlara ait özellikleri çıkarmada önemli üstünlüklerinin olduğu söylenebilir [47,78].

Ayrık Dalgacık Dönüşümünde sinyal yüksek frekansı analiz etmek için bir takım yüksek geçiren filtreden geçirilir, daha sonra alçak frekansı incelemek için de yine aynı şekilde bir dizi alçak geçiren filtreden geçirilir (bkz. Şekil 2.1.). Görüntüler iki boyutlu verilerden oluştuğu için görüntü sıkıştırma işleminde 2 boyutlu Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) kullanılmaktadır. 2 boyutlu Ayrık Dalgacık Dönüşümünde veri satırların ve de sütunların dönüşümü yapılabilecek şekilde ayrılabilir bir dönüşümdür. Fourier dönüşümündeki tüm frekanslardaki tekdüze zaman çözünürlüğüne karşılık, Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD), yüksek frekanslarda yüksek zaman çözünürlüğü ve düşük frekans çözünürlüğü, alçak frekanslarda ise yüksek frekans çözünürlüğü ve düşük zaman çözünürlüğünü sağlar. Ayrık Dalgacık Dönüşümü, Dalgacık Dönüşümünün özel bir durumudur ve sinyalin, zaman ve frekans alanında etkin bir şekilde işlenmesini sağlar.

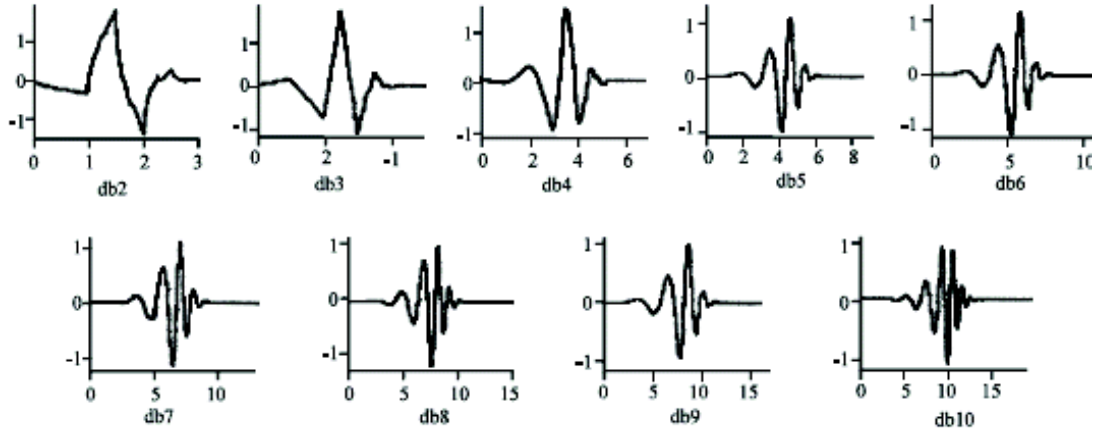
Bu analiz yönteminde de, çok frekanslı filtre bankaları kullanılmakta ve verimli sonuçlar elde edilmektedir. Ayrıca bu dönüşüm sinyali yaklaşıklama ve detay katsayılarına ayrıştırarak farklı frekans bantlarında farklı çözünürlüklerde analiz eder. İşareti farklı frekans bantlarına ayrıştırmak, zaman alanı işaretini ard arda yüksek ve alçak geçiren süzgeçlerden geçirerek sağlanır. Bir seviyeli ayrıştırma işlemi sonrasında, tüm işaret yarı sayıda örnek ile temsil edilir ve bu da zamandaki



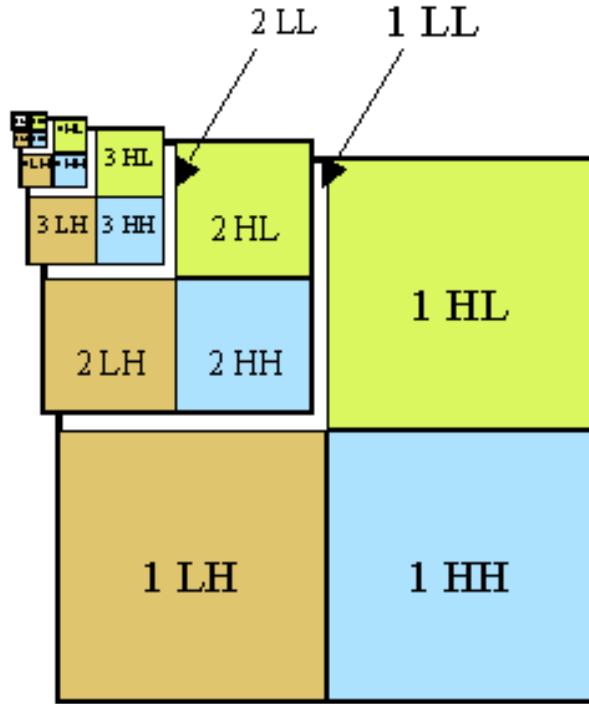
Şekil 2.1. Ayrık Dalgacık Dönüşümü [22].

çözünürlüğün de yarıya inmesi anlamına gelir. Buna karşın frekanstaki çözünürlük artar. Çünkü elde edilen sinyalin içerdiği frekans genişliği bir üst seviyedeki işaretin frekans bandının yarısıdır. Bu yüzden frekanstaki belirsizlik yarı yarıya azalmış olur. Dalgacık dönüşümünün en yaygın uygulamalarından biri görüntü sıkıştırılmasıdır. Dalgacık tabanlı sıkıştırma işleminin birçok avantajları bulunmaktadır. Aktarma ve kodlama hatalarına karşı duyarlı olması, sıkıştırmadan önce etkili olduğu gibi aktarmayı da kolaylaştırmakta ve etkin bir ayrıştırma sağlamaktadır. Dalgacık tabanlı sıkıştırma sistemi, görüntünün dönüşümü sırasında görüntü işaretine değişik ölçekte defalarca dalgacıklar uyguladığı için yüksek sıkıştırma oranları elde edilebilir. Ayrıca düşük bit hızlarında mükemmel yakın şekilde çalışmaktadır.

Dalgacık dönüşümünde kullanılacak çok sayıda dalgacık tipi vardır. Bunlar arasında Beylkin, Biorthogonal nearly Coiflet, Coiflet-Daubechies-Feauveau, Daubechies, Haar, Mathieu, Legendre, Villasenor, Symlet sayılabilir. İki boyutlu sinyallerde Dalgacık dönüşümü yatay, dikey ve diyagonal yönlerdeki tek boyutlu dalgacık dönüşümlerinin birleşimi olarak ifade edilebilir. Bu çalışmada Daubechies-4 (db4) tipi dalgacık seçilmiş ve çalışmalar bu dalgacık kullanılarak yapılmıştır (Bkz. Şekil 2.2.). Ayrışım sonucunda elde edilen yaklaşık katsayılarına aynı işlem tekrar tekrar uygulanarak daha yüksek seviyelerde dalgacık dönüşümü yapmak da mümkündür. Şekil 2.3. 'de iki seviye ayrık dalgacık dönüşümü görülmektedir. Örnek olarak, 2 LH, önce 1 LL'nin sütunları için alçak geçiren filtreleme ve aşağı örnekleme



Şekil 2.2. Daubechies Dalgacığı [25].



Şekil 2.3. : 2 boyutlu çok seviyeli Dalgacığ dönüşümü. Katsayılar "N XY" olarak tanımlanmıştır. Burada N seviye X, Y de sırasıyla sütun ve satırlara uygulanan filtreleme işlemini gösterir [26].

daha sonra satırlar için yüksek geçiren filtreleme ve aşağı örnekleme uygulanmasıyla elde edilen ikinci seviye dalgacık katsayılarıdır. Ayırıştırma seviyesini giderek artırmak mümkün olmakla beraber yaklaşıklama katsayılarının sayısının çok fazla azalması istenen bölgeyi tasvir etmedeki çözünürlüğü düşüreceği için tercih edilmemiştir.

Dalgacık dönüşümündeki aşamalardan biri de eşikleme işlemidir. Eşikleme işlemi, dalgacık dönüşümünü ile bulunan yaklaşıklama ve detay katsayılarına uygulanan bir basamaktır. Eşikleme işlemi yumuşak ve sert eşikleme olarak iki aşamadan oluşmaktadır ve matematiksel ifadesi aşağıdaki gibi özetlenebilir.

$$Y = \text{sgn}(X) \cdot \text{maks}(|X|, 0) \quad (2.2)$$

$$Y = X \cdot 1[|X| > T] \quad (2.3)$$

Burada X detay katsayısı, Y eşiklenmiş katsayı ve $T \in \mathbb{R}_+$ de eşik değeridir. 1 fonksiyonu da içindeki argüman doğru olduğunda 1 değerini alan, yanlış olduğunda ise 0 değerini alan bir işlemdir. Seçilen eşik değerinin altındaki detay katsayılarının sıfırlandığı bu işlemin ardından geride kalan katsayılarla akışın anlık görüntülerinin elde edilmesi ve bunların akışı ne kadar iyi temsil edildiğinin görülmesi için yapılacak son uygulama ayırıştırma işleminin tersi olan geri çatılama işlemidir. Sonraki aşama, geri çatılmış sinyalle giriş sinyalinin kıyaslanması işlemidir. Eşik değerinin sıfıra kadar küçültülmesi demek, geri çatım işleminin tüm detay katsayıları atılarak sadece yaklaşıklama katsayıları kullanılmasıyla yapılması demektir. İstenilen ideal sonuç, bu durumda dahi giriş sinyali ile geri çatılmış sinyalin yakın olmasıdır.

2.2. Navier-Stokes Denklemleri

Viskoz akış problemlerinin çözümünde kullanılan Navier-Stokes denklemleri, ikinci dereceden kısmi diferansiyel denklemlerdir. Çok sınırlı olarak bazı özel uygulamalar dışında, bu denklemlerin tam çözümleri elde edilememektedir. Bu nedenle, çeşitli akış problemleri için sayısal yöntemler ile yaklaşık çözümler bulunabilmektedir. İki boyutlu ve zamana bağlı Navier-Stokes denklemlerinin sayısal hassas çözümü, analiz edilecek alanın büyüklüğü ile doğru orantılı karmaşıklık içerir. Bu amaca uygun olarak, zamanda ve uzayda ikinci mertebeden hassas kapalı sayısal bir çözüm tekniği bu çalışma çerçevesinde geliştirilmiştir. Akış problemlerinin hassas olarak analiz edilebilmesi için Navier-Stokes denklemlerinin sayısal çözümü bu çalışmada gerçekleştirilmiştir. Uygulanan zamanda ve uzayda ikinci mertebeden hassas kapalı sayısal çözüm tekniği, az sayıda nokta kullanarak ve zaman adımı büyüklüğüne sınır getirmeden, akış alanını kararlı ve hassas bir şekilde çözebilmektedir. Bu çalışmada

da MATLAB kullanılarak istenen sonuçlar elde edilmiştir. Genel olarak zamana bağlı, viskoz ve sıkıştırılmaz akışların analizi, akış alanlarının sonlu hacimler metodu yardımıyla ayrıklaştırılması temeline dayandırılırken, zaman boyutundaki integrasyon ise kesirli zaman adımları kullanılarak yapılmaktadır. Belirlenen akış alanı için bir başlangıç koşulu ile başlatılan çözümler iteratif bir yöntemle elde edilmektedir. Bu kriterler arakesitte bilinmeyen sürekliliğini sağlayacak şekilde saptanmaktadır [83, 85]. Navier-Stokes denklemlerini çözerek ulaşılmaya çalışılan esas değer bu çalışmada olduğu gibi hızdaki anlık değişim ifadesidir. Navier-Stokes denklemleri sıvılar ve gazlar gibi akışkanların hareketini tanımlamaya yarayan bir dizi denklemden oluşmaktadır. Bu denklemler akışın içerisindeki birim kütleye etki eden momentum değişimlerinin, basınç değişimleri ve sürtünme kayıplarına neden olan akmazlık kuvvetlerinin toplamına eşit olduğunu tanımlar.

2.2.1. Sıkıştırılmaz Akışlar

Navier-Stokes denklemlerinin pek çok çeşidi vardır; en çok kullanılan biçimlerinden biri (2.5) ifadesinde verilmiştir.

$$\frac{\partial q}{\partial t} + (q \cdot \nabla)q = -\nabla p + \nu \Delta q \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot q = 0 \quad (2.5)$$

Bu çalışma için akış sıkıştırılmaz kabul edilecektir; bu da (2.5) şartını sağlaması demektir. Yukarıdaki denklemde $\nu \in \mathbb{R}$ parametresi akmazlık (viskozite) değeri ¹, $p(x, y, t) \in \mathbb{R}$ değişkeni basınç ve $q(x, y, t) = (u(x, y, t), v(x, y, t)) \in \mathbb{R}^2$ da akış hızını gösterir; burada u yatay ve v de dikey bileşendir.

Sıkıştırılmaz akışlar genel olarak yoğunluğun sabit ya da yoğunluk değişiminin çok küçük olduğu akışlar olarak kısaca tanımlanabilir. Buna göre genelde tüm sıvılar sıkıştırılmaz olarak ele alınır. Mach sayısı da akışkanların sıkıştırılabilir ya da sıkıştırılmaz olduğunu karar vermede önemli bir faktördür. Mach sayısının 0.3'ten küçük olduğu akışlarda sıkıştırılmaz akışkanlar olarak değerlendirilir [37]. Mach sayısı $\frac{v_s}{u}$ şeklinde ifade edilir. Burada v_s akım hızı, u ise yerel ses hızıdır. Diğer yandan matematiksel olarak sıkıştırılmaz kavramı ise akış hızının $q = (u, v)$ iraksamasının sıfır olduğu anlamına gelmektedir ($\nabla \cdot q = 0$).

¹Bu çalışmada, akmazlık dendiği zaman aksi belirtilmedikçe kinematik akmazlık anlaşılacaktır.

2.3. Uygun Dikgen Ayrışımı -Galerkin İzdüşümü ve Bölgesel Modelleme

2.3.1. Uygun Dikgen Ayrışımı Kavramı ve Tarihi

Modellemeyi gerçekliğin basit gösterimi ya da soyutlaması olarak tanımlayabiliriz. Modelleme süreci ile gerçek sistem ya da durumun bir model aracılığı ile en iyi şekilde temsil edilmesi gerçekleşir. Gerçek durumun tam olarak modellenmesinin problemin çözümü zorlaştırmasından dolayı istenilen sonuca götürecek şekilde modeller geliştirilir. Modelleme ile gerçek sistemin çok karmaşık ve zor süreçleri basitleştirilerek sunulmaktadır. Ancak sistemin modellenmesinin, iyi bir temsil görevinin yanında kontrol edilebilir olması da gerekmektedir. Sistemi en iyi şekilde temsil etmek için oluşturulacak olan modellemenin nasıl bir şekilde gerçekleşeceğine karar vermek için, sistemin özellikleri ve değişkenleri göz önünde tutularak temsili en iyi sağlayacak model tercih edilmelidir. Dinamik model ise belirli bir zaman boyutunda değişim gösteren modelleri içeren bir sistemdir. Dinamik modellerinin temel özelliği kendi kendini düzenleyici bir dönüştürme sürecine sahip olmasıdır. Yani dinamik modellerde girdi herhangi bir dönüşüme uğrayıp bir çıktıya dönüşebilir.

Uygun Dikgen Ayrışımı (UDA) parametrik sistemlerden düşük boyutlu dinamik modeller elde etmek için kullanılan indirgeme metodu olarak tanımlanmaktadır. Buna ek olarak UDA, dinamik sistemlerden elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlardan toplanmış bir veri topluluğunu kapsayan taban fonksiyonları bulmak için kullanılan optimal bir indirgeme tekniğidir. Uygun Dikgen Ayrışımı (UDA) son yıllarda karmaşık fiziksel sistemlerin analizinde sıkça tercih edilen yöntemlerin başında gelmektedir. Temelde bu metod fiziksel bir model için makul sayıda en uygun çözümleri üretmesi için kullanılan güvenilir bir problem çözücü fikrine dayanmaktadır. Anlık görüntüler (snaphots) olarak da adlandırılan bu çözümlerin optimal temsili için kullanılan bu ayrışım tekniğinin temeli birçok matematiksel özelliklere dayandığı için de bir çok bilimsel uygulamalarda çok tercih edilen bir yöntem olmuştur. Uygun Dikgen Ayrışımı (UDA) ilk olarak Karhunen, Loève, Pougachev, Obukhov ve Berkooz tarafından önerilmiştir. Birçok uygulamaya ve araştırmaya konu olan UDA, genellikle akışkan akışlarının hareketini incelemekte karşımıza çıkmaktadır. Aubry, Holmes, Lumley ve Stone gibi bilim adamları bu metodu türbülans akış çalışmalarında kullanmıştır. Bu tekniğin akışkan akışları uygulamaları dışında insan yüzünün tanınmasında da kullanan bilim adamları Kirby ve Sirovich imge tanıma konusunda yaptıkları çalışmalarla uluslar arası alanda üne sahip olmuşlardır [36, 74].

2.3.2. Matematiksel Bakış

$\dot{u} = X(u)$ şeklindeki bir Kısmi Diferansiyel Denklemler (KDD) için çözüm $u(x, t)$ olacaktır ve bu çözüm bir vektördür. $u_k(x) = u(x, t_k)$, t_k anında alınan anlık görüntüler olsun ve $\{u_k\}_{k=1}^M \subset \mathbb{H}$ ifadesi de $M \subset \mathbb{N}$ 'de $\{t_k\}_{k=1}^M$ anında toplanan anlık görüntülerin bir kümesi olsun. $u_0 = E[u_j]$ olsun öyle ki E , j indeksi üzerindeki doğrusal ortalama işlemidir. Verilen bir $N < M$ boyutundaki tüm $S \subset \mathbb{H}$ altuzayları için minimize edilmiş ortalama hata

$$J(S) = E[\|u_j - P_S u_j\|^2] \quad (2.6)$$

olur. Burada $\|\cdot\|$, \mathbb{H} 'deki normdur ve P_S ise S üzerindeki izdüşümdür ve ortonormal özfonksiyonlar ϕ_i 'lerin en büyük sıfır olmayan N özdeğerlerinin alt uzayları tarafından kapsanır. Doğrusal işleç $R : \mathbb{H} \rightarrow S$ için verilen korelasyon vektörü ise;

$$R = E[u_j \otimes u_j^*] \quad (2.7)$$

olur. Burada u_j^* , u_j 'nin \mathbb{H} 'deki çiftel vektörüdür. ϕ_i , $i = 1, \dots, N$ vektörleri UDA kipleri olarak tanımlanmaktadır. Buradaki problem, sonsuz boyutlu sonuçlar ve çözümünün zor olması durumudur. Ancak sonlu M boyutlu özdeğer problemin çözümü aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$C\alpha_i = \lambda_i\alpha_i \quad (2.8)$$

Burada, $\alpha_i = \alpha_{i1}, \dots, \alpha_{iM}$ 'dir. $C \in R^{M \times M}$ ifadesi ise $C_{ij} = \langle u_j, u_i \rangle$ girdileri ile birlikte korelasyon matrisidir. Bu teknik anlık görüntüler metodu olarak tanımlanmaktadır ve UDA kipleri ϕ_i 'ler elde edildikten sonra akışı temsil eden sonlu boyutlu bir açılım aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$u(x, t) \approx \sum_{i=1}^N a_i(t)\phi_i(x) \quad (2.9)$$

Genelde ortalama değer olan u_0 , UDA kiplerinin hesaplamasında çıkarılmaktadır. Bu yüzden $\{u_k\}_{k=1}^M$ ifadesinin yerine $\{(u_k - u_0)\}_{k=1}^M$ kullanılacak ve akışın yukarıdaki süreçte yapılan açılımı

$$u(x, t) \approx u_0 + \sum_{i=1}^N a_i(t)\phi_i(x) \quad (2.10)$$

haline gelecektir. Burada a_i sistem katsayılarını ifade etmektedir [30].

KDD kullanılarak modellenen bir fiziksel sistemin geribeslemeli kontrolü belirli gereksinimleri beraberinde getirmektedir. Sistem için uygun sayısal model kullanımı, bu model için en önemli değişkenlerin seçimi, denetleyici tasarımı, geribeslemeli kontrolün gerçek zamanlı kullanışlılığı, indirgenmiş modelin verimliliği gibi birbirleriyle doğrudan ilişkili olan bu gereksinimlerin karşılanması önemlidir [102].

Girdi seçimi UDA sürecinde önemli bir kısmı oluşturmaktadır ve UDA taban fonksiyonları da girdi seçimi sürecindeki bilgi toplama aşamasında kilit rol oynamaktadır. Anlık görüntülerin girdi toplaması model indirgemesinde UDA kipleri kullanılmasıyla seçilmektedir. Bu teknik UDA tabanlarındaki sistem dinamiklerini tutmak için kullanılmaktadır. Açık ve anlaşılır bilgi gerekliliği için ne kadar sayıda anlık görüntü seçimi, ve bu anlık görüntülerin üretmek için ne kadar sürede benzetimlerin gerçekleştirileceği, hangi başlangıç ve sınır koşullarının kullanılacağı gibi önemli etkenlerin karşılaştırılması modelleme ve kontrol sürecinin aşamalarını oluşturmaktadır.

2.3.3. Galerkin İzdüşümü

$\dot{u} = X(u)$ gibi bir sistemi ele alalım. Bu sistemi yaklaşık olarak ifade edecek

$$\dot{r} = X_S(r) \quad (2.11)$$

biçiminde bir denklem ve S üzerine aşağıdaki gibi bir izdüşüm (Galerkin İzdüşümü-Gİ) yapılarak ifade edilebilir.

$$X_S(r) = P_S X_r \quad (2.12)$$

Galerkin İzdüşümünün, $\|X_S(r) - X(r)\|$ ifadesini minimize ettiği gösterilebilir. $X_S - X(r) \perp S$ olduğundan dolayı,

$$\langle X_S(r) - X(r), \phi_i \rangle = 0, \quad i=1, \dots, N. \quad (2.13)$$

yazılabilir. $r = u_0 + a_j \phi_j$ ifadesini (2.13)'de yerine yazarak ve dikgenlik şartı ile (2.12) denklemini kullanarak aşağıdaki gibi bir doğrusal olmayan Adi Diferansiyel

Denklem kümesi elde edilir.

$$\dot{a}_k = \langle X(r), \phi_k \rangle, \quad k=1, \dots, N. \quad (2.14)$$

2.3.4. Sistem Tanılama

Sistem Tanılama matematiksel araçları ve algoritmaları kullanarak ölçülmüş verilerden dinamik bir model çözümü için gereken bir teknik olarak tanımlanabilir. Bu yöntemin temeline bakıldığında istatistiksel yöntemlerden "en küçük kareler" ve "en büyük benzerlik" prensipleri karşımıza çıkmaktadır. Doğrusal modellerin incelenmesinde kullanılan "En küçük kareler" yöntemi ve veri gruplarına ait olasılık ve istatistik dağılımlarının çözümlenmesinde tercih edilen "En büyük benzerlik" yöntemi parametre çıkarsama konularının temelini teşkil etmektedir. Tarihsel süreçte sistem tanılamaya bakıldığında ilk uygulanabilir hali 1960'lara rastlayan ve K.J. Aström ve I. Bohlin tarafından yayımlanan bazı bilimsel makalelerde ortaya çıkmıştır. Sistem tanılama için gerçekleştirilen metodların sanayi ve endüstrideki uygulamaları ise ilk olarak Lennart Ljung ile ortaya çıkmıştır. Bu konu hakkında Box Jenkins, Eykhoff, Spriet Vansteenkiste, Johansson ve Ljung Glad tarafından yazılmış birçok kitap bulunmaktadır. Fiziksel niceliklerin ve kanunların mühendislik uygulamalarına uyarlanması ile ilgili çalışmalar ise Wellstead, Ljung Glad, Cellier ve buna benzer birçok bilim adamı tarafından yapılmıştır [65]. Sistem tanılama, mevcut gerçek sistemin giriş ve çıkışların ölçümlerinden faydalanarak dinamik bir sistem modeli tasarlama tekniği olarak tanımlanabilir. Sistem davranışlarının önceden tahmin edilebilmesi ve istenilen şekilde kontrol edilip gözlenebilmesi açısından kullanılacak güvenilir bir matematiksel bir model sistem tanılamanın başlıca amaçları arasında sayılabilir. Gerçeği mümkün oldukça yansıtılabilmek ve elde edilen modelin giriş-çıkış arasındaki matematiksel ilişkiyi ortaya koymak amacıyla sistem tanılama metodu tercih edilir.

Sistemler giriş-çıkış sayılarına göre adlandırılırlar. Tek giriş-tek çıkışlı sistem (SISO) ve çok giriş-çok çıkışlı sistem (MIMO) gibi sistemlerde deneysel çalışma, veri toplama, model tasarımı, bilinmeyen parametrelerin deneysel veriler kullanılarak tahmini, sistem karakteristiklerinin matematiksel olarak formüle edilmesi ve buna bağlı olarak verimli çalışan kontrol sistemlerinin oluşturulması sistem tanılamanın başlıca konuları arasında yer almaktadır. Sistem tanılama genelde dört ana aşamadan oluşmaktadır. Deneysel program, model yapısının seçimi, parametre kestirimi ve oluşturulan modelin gerçekliliğinin test edilmesi işlemleri sırasıyla bu aşamaların titiz

ve dikkatlice uygulanmasından ibarettir. Bu aşamalardan kısaca bahsetmek gerekirse ilk adım sistemi uyaracak uygun giriş işaretinin seçilmesidir. Sistemden toplanan uygun verilerle model tasarlanır ve tercih edilen bir yöntemle parametre kestirimi yapılır. Eğer sistem doğrusal bir modelle temsil edilemiyorsa akıllı sistemler gibi doğrusal olmayan modelleme yapılarak planlama yukarıda bahsedilen aşamaların baştan sona tekrar uygulanmasıyla yeniden süreç işletilir [66,67].

2.4. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

Bilimsel çalışmalarda ve çoğu mühendislik uygulaması alanlarında çalışılan akışlar, karmaşık geometriler göstermekte olup, genelde üç-boyutlu, zamana bağlı olarak değişen, türbülanslı akışlar olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Bu sebeple üç-boyutlu karmaşık akış problemlerinin bilgisayar ortamında daha yaygın kullanımı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile çözümü ve benzetimleri günümüzde daha mümkün olmaya başlamıştır ve HAD benzetimleri artık bütün bilim ve mühendislik alanlarında önemi gittikçe artan bir rol oynamaktadır. Genel olarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, her türlü akışkan akışlarının değişik koşullar altındaki analizini yapan disiplin olarak tanımlanabilir. Temel olarak üç ana denklemin (süreklilik, momentum ve enerji denklemleri) esas alınması ile çözümler yapılır ve akışın dinamik parametreleri bulunabilmektedir. Ancak hala bu yöntemler kullanılarak geliştirilen tasarım aşamasında istenilen hız ve çabuklukta çözümlerin elde edilememesi, bu benzetimlerin tasarım sırasında ancak ve ancak sınırlı sayıdaki akış koşulları için uygulanmasına ve daha çok akademik amaçlı sayısal deneyler olarak kullanılmasına sebep vermektedir. Günümüzde hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) endüstriyel açıdan da bakıldığında araştırma geliştirme ve de ürün tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Örnek olarak bir uçak kanadının üzerindeki basınçlar, bir yeraltı rezervuarının sıcaklık dağılımı, bir ortamdaki hava akımı dağılımı veya hareketli bir arabanın etrafındaki havanın hızı gibi akış ile ilgili birçok parametre hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak bulunabilmektedir [87,88].

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği için gerçekleştirilen benzetimler genelde üç aşamadan oluşmaktadır: ön-işleme (preprocessing), hesaplama (computation) ve ard-işleme (postprocessing) [89]. Ön-işleme, akış problemleri için en uygun geometri modelinin tanımlanması ve katı modelleme yazılımlarının tamamlanması, bu geometriye uygun hesaplama alanının belirlenmesi, yapısal veya yapısal olmayan çözüm ağının belirli yazılımlar yardımı ile oluşturulması, ve bu çözüm ağının akış çözücüye uygun formatta hazırlanması işlemleri vardır. İkinci aşama ise Hesaplama

adımıdır. Akış çözücü ile çözüm ağındaki hesaplamalar için gerekli sayısal yöntemler, uygun algoritmalar ve sınır koşullarının seçilmesi işlemleri bu adımın aşamalarıdır. Ard-işleme adımında ise bir önceki aşamadan elde edilen verilerin analiz edilmesi, bu analizlerle paralel şekilde çizgi grafikler, eş değer eğrileri, gerçek zamanlı üç boyutlu görüntüler ile akışın görüntülenmesi ve yorumlanması işlemleri yapılmaktadır.

BÖLÜM 3

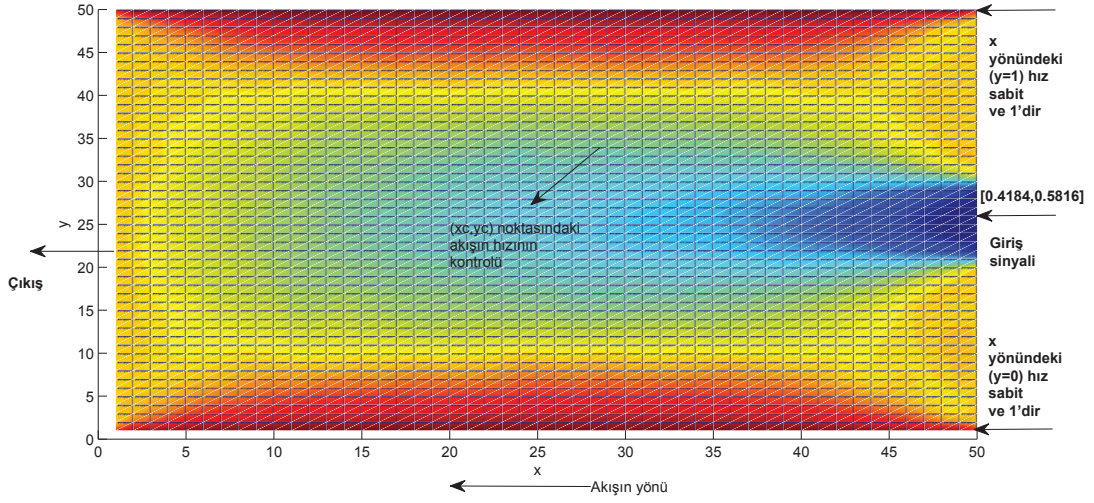
3. MODELLEME VE KONTROL YAKLAŞIMI

3.1. Problem tanımı

Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan yöntemler anlatılacaktır. Birçok akma hızı değeri altında gerçekleştirilen benzetimlerin ön işleme kısımları ayrıntılı olarak belirtilecektir. Tez çalışması boyunca kullanılacak metodların anlaşılması bir sonraki bölümde yapılacak olan örneklerin daha iyi açıklanmasında bir ön adım olacaktır. İlk olarak anlık görüntülerin Navier-Stokes denklemlerinin çözümünün ardından kaydedilmesi gösterilecek daha sonra uygun dalgacık seçimi yapılarak Dalgacık dönüşümü işlemleri anlatılacaktır. Bölgesel modelleme öncesinde gerekli olan eşikleme yönteminden bahsedilecek ve farklı girişler altında çıkış verilerinin kıyaslanması belirlenecektir. Burada giriş çıkış arasındaki benzerlik çalışmanın hangi ölçüde başarılı olup olmadığı hakkında izlenimler verecektir. Daha sonra bölgesel modelleme ile çalışılan alanın taban vektörleri ile tanımlanması ve sonrasında akış hızının açılımı gösterilecektir. Parametre kestirimi için gerekli olan sistem tanımlama ile elde edilen sistem matrislerinin bulunmasıyla, ilgilenilen alanın bölgesel dinamik modeli çıkarılacak ve uygun denetleyici tasarımı ile çalışmada kullanılan tüm yöntemler anlatılacaktır.

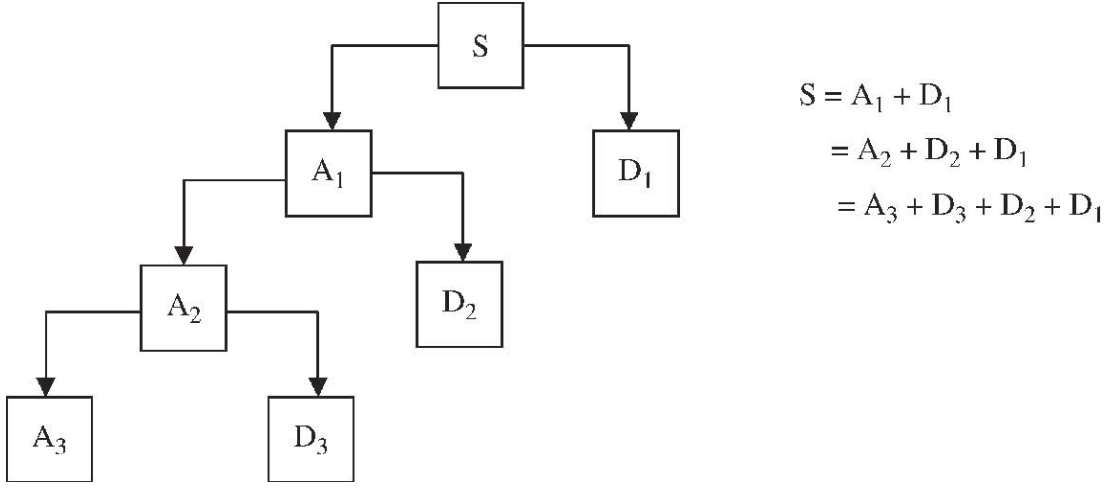
3.2. Anlık görüntülerinin elde edilmesi ve dalgacık ayrışım teknikleri

Bölgesel dinamik model elde edilmesine giden yoldaki ilk aşama, (2.5) ifadesindeki Navier-Stokes denklemleri ile yönetilen akış için belirli zaman anlarında anlık görüntülerin kaydedilmesi ve bunlara dalgacık ayrışımı uygulanmasıdır. Şekil 3.1. 'de HAD benzetimleri yapılarak x yönünde elde edilen akışın anlık görüntülerden bir tanesi görülmektedir. Navier-Stokes denklemleriyle yönetilen iki boyutlu karesel alanda akışın iki yöndeki başlangıç hızları sıfırdır ve karesel alanın ortasında gerçekleşen akış üzerine yöntemler uygulanacaktır. Sınır koşullarına göre, $y = 0$ ve $y = 1$ noktalarında x yönündeki hız sabittir ve y yönündeki akışın hızı ise sıfırdır. $x = 0$ noktasında $y \in [0.0918, 0.1735] \cup [0.8265, 0.9082]$; bölgeleri arasında basınç değişimi olmamaktadır. $x = 0$ noktasında y yönündeki akışın hız değişimi de sıfırdır. Kontrol giriş sinyali ise $y \in [0.4184, 0.5816]$; noktasından uygulanmaktadır. Buradaki kontrol hedefi, (x_c, y_c) gibi bir noktadaki akışın hızının kontrol edilmesidir.



Şekil 3.1. Akışın x yönündeki anlık görüntüsü ($t = 0.003$ sn)

Akışın anlık görüntülerinin elde edilip kaydedilmesinden sonra dalgacık tipinin seçilmesi gerekmektedir. Geri çatılmış anlık görüntülerle orjinal anlık görüntülerin benzer olması için dalgacık fonksiyonu seçimi çok önemlidir. Dalgacık tipi olarak Daubechies dalgacığı seçilecektir. Asimetrik ve gelişigüzele yakın bir yapısı olması, dikgen olması, tam geri çatılama gerçekleştirebilmesi ve sonlu destek alanına sahip olması sebebiyle akış problemlerinde görülen yapıları yakalama başarımının yüksek olacağı düşünülerek bu dalgacık çeşidi tercih edilecektir. Buna ek olarak, Daubechies dalgacığı için dönüşüm için hızlı yöntemlerin mevcut olması sebebiyle akış deneylerinden elde edilen yüksek sayıda anlık görüntünün kısa sürede işlemde geçirilebilecek olması da bir avantajdır. Dalgacık tipi olarak birçok fonksiyon denenmesine karşın $db4$ dalgacığının en iyi sonucu verdiği görülecektir. Ayrıca diğer dalgacık tipleri için de çalışmalar gerçekleştirilecek ve tüm sonuçlar tablolar halinde verilecektir. Burada performans kriterleri göz önünde bulunarak çalışmanın sonraki aşamaları yapılacaktır. Dalgacık ayrışımı sonunda, anlık görüntünün boyutu ile eşit sayıda dalgacık katsayısı elde edilecektir; bunların yarısı yaklaşıklama, yarısı da detay katsayısı olacaktır (bkz. Şekil 2.1.). Dalgacık dönüşümü işlemi yaklaşıklama katsayılarına tekrar uygulanarak bu katsayıları da ayrıştırmak ve bu şekilde devam ederek değişik seviyelerde dalgacık dönüşümü elde etmek mümkündür. Örnek olarak Şekil 3.2. çoklu seviye ayırık dalgacık dönüşümünü göstermektedir. Bu işlem sonucunda yaklaşıklama katsayılarının yarısı detay katsayısına dönüşeceği için daha az yaklaşıklama katsayısı ile akış anlık görüntülerini temsil etmek mümkün olacaktır. Bu işlemi daha da devam ettirmek ve yaklaşıklama katsayılarını tekrar tekrar



Şekil 3.2. Çok seviyeli ayrık dalgacık dönüşüm

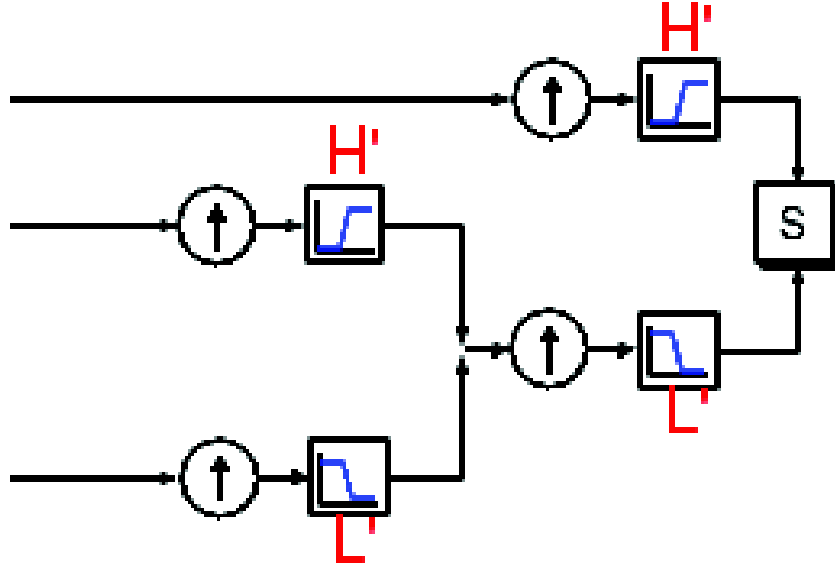
ayrıştırmak mümkündür. Ancak yaklaşıklama katsayılarının azalması, her katsayının temsil ettiği bölgesel alanı arttıracığı için modelleme çözünürlüğü düşecektir.

Yukarıdaki artılar ve eksiler göz önüne alınarak her problem için duruma uygun bir seviye seçimi yapılması gerekmektedir. Dalgacık dönüşümünün seviyesinin belirlenmesi önemlidir. Yüksek seviye kullanımı ayrıştırma kısmında çok sayıda yaklaşıklama katsayısı seçimine sebep olur. Eğer yaklaşıklama katsayısı az olursa anlık görüntülerin yeterli enerji seviyesinde temsil edilmesinde sıkıntı yaşanmasına sebep olabilecektir. O yüzden bu iki kriter dikkate alınarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Eşikleme işlemi, dalgacık dönüşümünden elde edilen katsayılarına uygulanan bir sonraki aşamadır. (2.2) ve (2.3)'deki eşikleme işlemleri aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir.

$$Y = \begin{cases} X, & |X| > T; \\ 0, & |X| \leq T. \end{cases} \quad (3.1)$$

Yukarıda gerçekleştirilen eşikleme işleminde X detay katsayısı, Y eşiklenmiş katsayı ve $T \in \mathbb{R}_+$ de eşik değeridir. Uygulanan eşik değerinin altındaki detay katsayılarının elenmesi bu sıfırlama işleminden sonra elde kalan katsayılarla akışın anlık görüntülerinin belirlenmesi ve bunların akışı ne kadar iyi temsil edildiğinin görülmesi için yapılacak son uygulama ayrıştırma işleminin tersi olan geri çatılama işlemidir. Bunu takiben, geri çatılmış sinyalle giriş sinyalinin kıyaslanması işlemidir.



Şekil 3.3. İkinci seviye ayrışım için geri çatılama işlemi [22].

Eşik değeri T 'nin sıfır değerine kadar düşürülmesi durumunda geri çatım işlemi tüm detay katsayılarının elenerek yalnızca yaklaşıklama katsayılarının kullanılmasıyla yapılacak ve arzu edilen sonuçların elde edildiği görülecektir.

Eşikleme ile elde edilen Y katsayılarının, akışın anlık görüntülerini ve dolayısıyla da akışı ne kadar iyi temsil edebildiğini görmek için bu katsayılara dalgacık geri dönüşüm işlemi uygulanarak orijinal anlık görüntü geri çatılmalıdır. Bahsedilen geri dönüştürme işlemi temelde ayrıştırma işleminin tersidir. Şekil 3.3. 'te görüldüğü gibi örnekleme yükseltme işlemleri ve filtreleme işlemleri uygulanmasından ibarettir. Sonraki aşama, oluşturulan geri çatılmış sinyalin girişteki sinyalle benzerliğinin ölçülmesidir. İdeal durum, T eşik değerinin sıfıra kadar düşürüldüğü durumda bile kabul edilebilir bir geri çatılama elde edilebilmesidir. Eğer bu gerçekleşirse, tüm detay katsayılarını atıp sadece az sayıdaki yaklaşıklama katsayısını kullanarak akışı temsil etmek mümkün olacaktır.

3.3. Taban vektörlerinin bulunması ve Dinamik Model Oluşturulması

Akışın anlık görüntülerinin dalgacık katsayılarından yukarıda anlatılan eşikleme/sıkıştırma işlemi sonucunda detay katsayılarının atılmasının ardından gelen adım bölgesel modelleme için istenilen bölgeyi tasvir edecek taban vektörlerinin oluşturulmasıdır. Dalgacık ayrışımı ile elde edilen yaklaşıklama katsayılarından her

birinin belli bir bölgeyi temsil ettiği hatırlanırsa, $\phi_i(x, y)$ vektörlerinin oluşturmak için ilgilenilen bölgeyi temsil eden belli sayıda katsayı seçildikten sonra, katsayılar tek tek 1 değeri verilip geri çatlama işlemi yapılmak suretiyle $\phi_i(x, y)$ taban vektörleri elde edilebilir. Bunun ardından akış hızının yatay yöndeki bileşeni için aşağıdaki gibi bir açılım elde edilebilir.

$$u(x, y, t) = \sum_{i=1}^N a_i(t)\phi_i(x, y) \quad (3.2)$$

Burada $N \in \mathbb{N}$ istenilen bölgeyi temsil eden katsayı sayısı ve $a_i(t)$ 'de, t anında u yatay hızının dalgacık dönüşümünde i dizininin karşılık geldiği yaklaşıklama katsayısının değeridir. Daubechies dalgacığının dikgen özelliğinden dolayı iki farklı taban vektörünün iç çarpımı da sıfır olacaktır, yani $i \neq j$ için

$$\langle \phi_i(x, y), \phi_j(x, y) \rangle = 0, \text{ her } i \neq j \quad (3.3)$$

olacaktır. Böyle olunca ϕ_i vektörlerine N boyutlu bir alt uzayı oluşturan koordinat eksenleri, a_i katsayılarına da u hızının bu taban vektörleri üzerindeki bileşenleri olarak da bakılabilir. Bu çıkarımlardan sonraki adım, akış alanının ilgilenilen bölgesindeki akış dinamiğini temsil eden bir model oluşturulmasıdır. Yukarıdaki (3.2) açılımının sağ tarafına bakılacak olursa zamanla değişimi belirleyen ögenin a_i katsayıları olduğu görülmektedir; ϕ_i vektörleri zamana göre sabittir. O halde akışın zamanla değişimini modellemek için a_i katsayıları için bir dinamik model oluşturmak kâfidir. Her bir taban vektörü bölgesel akış uzay alanının temsil edilmesinde önemli rol oynamaktadır ve bu taban vektörlerinin akışın hem yatay doğrultusu hem de akışın enine yönündeki ifadeleri tek bir gösterimle $i = 1, \dots, N$ için aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\phi(x, y) = \begin{bmatrix} \phi_{i,u}(x, y) \\ \phi_{i,v}(x, y) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Burada akışın yatay doğrultusundaki taban vektörü aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\phi_{i,u}(x, y) = \begin{cases} \Upsilon_i(x, y), & i = 1, \dots, \frac{N}{2}; \\ 0, & i = \frac{N}{2} + 1, \dots, N. \end{cases} \quad (3.5)$$

$\phi_{i,v}$ dikey doğrultusundaki taban vektörü ise aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\phi_{i,v}(x, y) = \begin{cases} 0, & i = 1, \dots, \frac{N}{2}; \\ \Upsilon_{i-\frac{N}{2}}(x, y), & i = \frac{N}{2} + 1, \dots, N. \end{cases} \quad (3.6)$$

Burada $\Upsilon_i : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ ve $i = 1, \dots, \frac{N}{2}$ için kullanılan kaydırılmış ve ölçeklenmiş dalgacık fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonlar ilgilenilen bölgedeki katsayı değerinin 1 seçilip diğer kısımlarda da 0 olduğu durumdaki katsayı matrislerinden ve ters dönüşümlerin yapılarak tamamlanmasıyla elde edilmektedir. Dalgacık katsayısının yerine bağlı olarak Υ_i fonksiyonunun salınım yapan kısmı, uzaysal domenin farklı bir bölgesine atanacaktır. Böylece ilgilenilen alanı kapsamaları için uygun sayıda ve \mathbb{R}^2 'de Υ_i fonksiyonları seçilmelidir.

Dalgacık katsayısı $a_i(t)$, ϕ_i taban fonksiyonlarının üzerindeki akışın anlık görüntülerinin izdüşümü haline gelmektedir. Bu özellik taban vektörü ϕ_i 'lerin N boyutlu alt uzaylarını üreten koordinat eksenlerinin kestiriminde ve a_i katsayılarının da bu eksenler üzerindeki u akış değişkenlerinin kısımlarının bulunmasında kullanılmaktadır.

Akışın (3.2)'deki gibi açılımının elde edilmesi ile akışın zamanla değişiminin, a_i katsayıları tarafından belirlendiği görülmektedir. ϕ_i taban vektörleri ise zamana bağlı olarak değişmemektedir. Böylece akışın modellenmesi kısmı, $a_i(t)$ gezingelerine uygun bir dinamik model uygulanmasına indirgenmiş olmaktadır.

Bölgesel modelleme için öncelikle ilgilenen alanı hemen hemen kapsayacak şekilde bu alana karşılık gelecek belirli sayıda yaklaşıklık katsayıları seçilmiştir. Ayrıca hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) benzetimlerinden değişik akmazlık değerleri için anlık görüntüler edilmiştir. Bu anlık görüntülerin hepsine dalgacık dönüşümü uygulanmıştır ve katsayılar elde edilmiştir. İstenilen bölgeye karşılık gelen katsayıların zamanla değişimi her bir akmazlık değeri için bulunmuştur. Akmazlık değerleri $[0.000001, 1]$ aralığında değişmekte olan 28 adet değerdir. Her akmazlık değeri için sistemin girişi değişken frekanslı sinüs, çıkış da bu katsayıların zamanla değişimi olacak şekilde sistem tanılama yöntemleri ile doğrusal modeller oluşturulmuştur. Elde edilen giriş-çıkış verilerinden sistem matrislerini elde etmek için alt uzay sistem tanılama (N4SID) yöntemleri kullanılmıştır [64]. Alt uzay sistem tanılama yöntemleri ile akışın zamansal değişimini tasvir eden bir ayrık zamanlı durum uzayı modeli oluşturulur. Aşağıda elde edilen ayrık zamanlı bir dinamik model ifadesi gösterilmiştir. Bu amaçla durum uzay modeli aşağıdaki gibi aranacaktır.

$$\xi(t + T_s) = A\xi(t) + B\gamma(t) \quad (3.7)$$

$$y(t) = C\xi(t) + D\gamma(t) \quad (3.8)$$

Yukarıdaki durum uzay modeline bakıldığında ayrık zamanlı bir model karşımıza

çıkacaktır ve akışın anlık görüntüleri de $T_s \in \mathbb{R}$ örnekleme periyoduyla ayrıklaştırılacaktır. Burada $T_s \in \mathbb{R}$ örnekleme zamanı, $\xi \in \mathbb{R}^N$ durum vektörü, $n \in N$ sistemin derecesi, $\gamma \in N$ kontrol girişi ve $y \in \mathbb{R}^N$ de çıkış sinyalidir. İstenilen bölgeyi temsil eden dört tane yaklaşıklama katsayısı da sistem çıkışı olarak alınmıştır. Sistem tanımlama için gerekli olan verilerin oluşturulması için değişik tipte giriş sinyalleri (sinüs, rampa, değişken frekanslı sinüs gibi) örnekleme periyodu T_s seçilerek sisteme uygulanmıştır ve anlık görüntülerin kaydedilme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu anlık görüntülere uygulanan dalgacık dönüşümü, akışın ilgilenilen bölgesini tasvir eden N adet dalgacık katsayısı ile sistem çıkışını belirlemektedir. Aşağıda bu ifade gösterilmektedir.

$$y(t) = a(t) = [a_1(t) \ a_2(t) \ a_3(t) \dots \ a_N(t)]^T \quad (3.9)$$

Alt uzay tanılamada önce, giriş-çıkış verileri için Kalman durumları tabir edilen durum gezinmeleri oluşturulur. Ardından en küçük kareler metoduyla sistem matrisleri olan A, B, C, D matrisleri bulunur. Alt uzay metodundaki temel mantık aşağıdaki (3.10) ifadesindeki genişletilmiş gözlenebilirlik matrisinin kestirimidir.

$$O_r = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ CA^{r-1} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Daha açık bir biçimde yazmak gerekirse (3.7)- (3.8) ifadeleri,

$$Y_r(t_k) = O_r \xi(t_k) + S_r \Gamma_r(t_k) + V(t) \quad (3.11)$$

şeklinde yazılabilir. Buradan;

$$Y_r(t_k) = \begin{bmatrix} y(t_k) \\ y(t_{k+1}) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y(t_{k+r-1}) \end{bmatrix}, \quad \Gamma_r(t_k) = \begin{bmatrix} \gamma(t_k) \\ \gamma(t_{k+1}) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \gamma(t_{k+r-1}) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$S_r = \begin{bmatrix} D & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ CB & D & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ CA^{r-2}B & CA^{r-3}B & \cdots & CB & D \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

ve $V(t)$ çıkıştaki gürültüden gelen katkıdır. Genişletilmiş gözlenebilirlik matrisinin kestirimi, (3.11) ifadesindeki eşitliğin her iki tarafının $S_r \Gamma_r(t_k)$ niceliklerin elenmesi ve $V(t)$ asimptotik olarak sifıra gitmesini sağlayacak terimler ile ilintilendirilmesi yoluyla yapılır. Eğer O_r biliniyorsa C ve A matrislerinin bulunması O_r 'deki ilk satır bloğu ve kaydırma özelliğini kullanarak gerçekleştirilir. A , C 'yi elde ettikten sonra doğrusal en küçük kareler yöntemiyle B , D matrislerinin kestirimi (3.7)- (3.8) denklemlerinin aşağıdaki ifadesi kullanılarak yapılır.

$$y(t_k) = C(zI - A)^{-1}Bu(t_k) + Du(t_k) \quad (3.14)$$

Burada z zaman kaydırma operatörüdür.

Sistem tanılama, elimizde çalışılmak üzere bulunan gerçek sistemin giriş ve çıkışların ölçümlerinden veya benzetimlerinin kullanılarak dinamik bir sistem modeli tasarlama yöntemi olarak önem taşımaktadır. Doğrusal modellerin çalışılmasında incelenen "En küçük kareler" yöntemi ve veri gruplarına ait olasılık ve istatistik dağılımlarının çözümlenmesinde tercih edilen "En büyük benzerlik" yöntemi parametre çıkarsamada ve sistem matrislerinin kestiriminde temel teşkil etmektedir. Alt uzay sistem tanılama yöntemleri ile ilgili detaylı bilgiye [31, 32] kaynaklarından ulaşılabilir.

Yukarıda bahsedilen sistem tanılama yaklaşımı, akış modellemesinde sıkça kullanılan kalibrasyon tekniklerine göre [64] farklılık gösterebilmektedir. Kalibrasyon tekniğinde, ilk olarak UDA tabanlı indirgenmiş model elde edilir. Daha sonra zaman katsayıları ile modelin durumları (ya da türevleri) arasındaki hatanın en aza indirilmesi için katsayı ayarlaması yapılır. Bu bölümde tasarlanan yaklaşımda, doğrusal ayırık zamanlı model girdi-çıkış verilerinden ve genel amaçlı altuzay sistem tanılama (N4SID) araçları kullanılarak anlık indirgenmiş model dikkate alınmadan elde edilir. Bölgesel dinamik modelleme yaklaşımı bir sonraki bölümde daha detaylı şekilde ele alınacak bir örnekle ayrıntılı bir şekilde anlatılacaktır.

3.4. Denetleyici Tasarımı

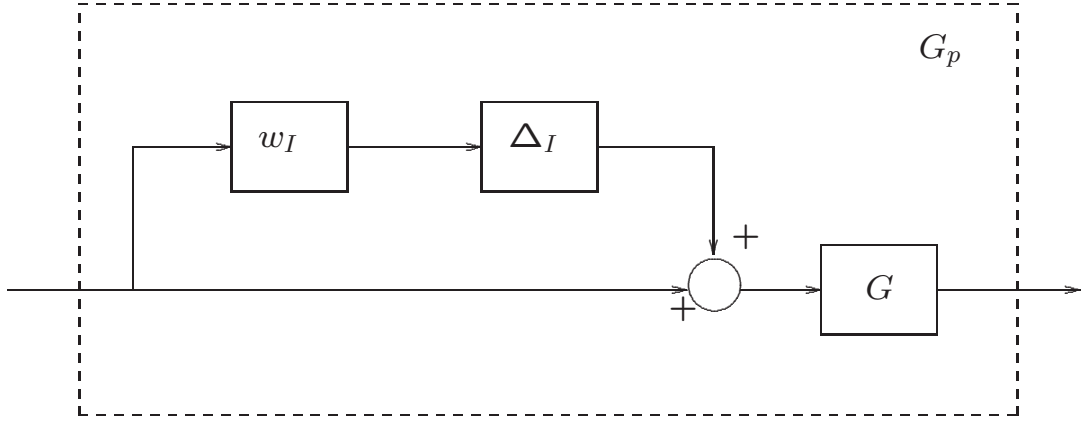
Denetleyici tasarımı elde edilen dinamik modele uygulanan ve sistemin tepkilerinin istenilen sonuca varmasını sağlayan bir aşamadır. Burada tasarlanan denetleyicinin

girdi-çıkı ilişkisi, referans takibi, model performansı gibi kontrol teorisindeki temel hedeflerin karşılanması önem teşkil etmektedir. Bu çalışmada ilk olarak elde edilen bölgesel dinamik model daha sonraki aşamalarda üzerinde denetleyici kullanılarak istenilen sonuçların alınması açısından gereklidir. Bölgesel dinamik modelleme yaklaşımı tamamlandıktan sonra, elde edilen doğrusal modellerin dinamiğini kapsayan tek bir belirsiz sistem oluşturulur. Bu sistem için gürbüz kontrol yöntemleri (μ sentezi, D-K ötelemesi) kullanılarak denetleyici tasarımı yapılmış ve istenen hedeflere ulaşması sağlanmıştır. Bu hedeflere örnek olarak referans girişin takibi verilebilir. Burada kullanılan D-K ötelemesi, H_∞ sentezi ve μ analizini birleştiren bir denetleyici tasarımı tekniğidir. En küçük μ üst değeri etrafındaki frekans değerleri ile sonuçlanan bir denetleyici tasarlamak amaçlı kullanılmaktadır [34].

3.4.1. D-K ötelemesi ve μ sentezi

D-K ötelemesi prosedürü μ sentez kontrol tasarımında kullanılan bir tekniktir ve bir dizi azaltma/indirgeme aşamaları içermektedir. İlk olarak bu teknik denetleyici değişkeni K 'yı D değişkeninin yüksek μ sınır ölçeğinde sabit tutulması ve sonrada bu işlemin tersi olan D değişkeninin K 'nın sabitlenmesiye minimizasyon işleminin tanımlanmasıyla gerçekleşmektedir. Bu yöntem μ değerinin minimum değere yakınsamasını garanti eden bir yöntem olmamasına karşın pratikte çok başarılı sonuçlar vermektedir.

μ sentezinde amaç yapısal tekil μ değerinin gürbüz performans şartları altında belirsiz sistemde minimize edilmesidir. Belirsiz sistem bir açık-çevrim ara bağlantısıdır ve nominal modeldeki parçaları, bilinmeyen parametreleri, modellenmemiş doğrusal zamanla değişmeyen dinamikleri, performans kriterlerini ve belirsiz ağırlık fonksiyonlarını içerir. Bu ağırlık fonksiyonları optimizasyon aşamasındaki genlik ve frekans şekillendirme bilgilerini dahil etmek için kullanılır. Denetlemedeki amaç kararlı bir K denetleyici sentezi yapmaktır ve kararlı denetleyici sınır koşullarına bağlı olarak μ değerinin gürbüz performansı ile minimize etmektir. Aşağıdaki blok diagramda tek girdi-tek çıktılı belirsiz bir model gösterilmektedir. Nominal model G için $w_I \Delta I$ ağırlıkları çarpım tipi belirsizlik olarak eklenmektedir. Bu çalışmada çarpım tipinde belirsiz model kullanılacaktır. Gürbüz kararlılıktaki amaç kararlı bir doğrusal zamanla değişmeyen denetleyici sentezi işlemidir. Kapalı çevrim performans hedeflerinin ve belirsiz sistem modeli için tüm ana hedeflerin gerçekleştirilmesi ağırlıklı hassas minimizasyon problemi olarak tanımlanmaktadır. Yapısal tekil μ değerinin yüksek sınır değerlerinde hesaplanması bir sorun olarak göze çarpsa da D-K



Şekil 3.4. Belirsiz sistem modeli blok diagramı (çarpım tipi) [33].

öteleme kontrol tasarımı tekniği birçok mühendislik problemlerinde başarılı sonuçlar vermektedir. Bu uygulamalara örnek olarak uçuş kontrolü, kimyasal süreç kontrolü, vibrasyon sıkıştırma gibi uygulamalar sayılabilir. Detaylı bilgiye [34]'den ulaşılabilir.

3.4.2. Orantısal İntegral ve filtrelenmiş Türevsel Denetleyici Tasarımı

Orantısal İntegral Türevsel (PID) kontrol tekniği günümüzde en çok kullanılan kontrol yöntemlerinden biridir. Sadece akademik veya bilimsel çalışmalarda değil, endüstriyel alanda da birçok uygulamada tercih edilen bir kontrol tekniğidir. PID denetleyici tasarımında istenilen sistem tepkisini elde etmekte bazı aşamalar gereklidir. Örnek olarak yükselme zamanını düzeltimi için orantısal denetleyici kullanılır. Ayrıca türevsel denetleyici aşımı düzeltmek için gereklidir. Kararlı hal hatasının düzeltimi için de integral denetleyici seçilmelidir. İstenilen sistem tepkisi elde edilene kadar K_p , K_i ve K_d değerlerinin ayarlanması önemlidir. PID kontrol yönteminde girdi-çıkı ilişkisinde transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi s domeninde ifade edilebilmektedir [103,104].

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s \quad (3.15)$$

Burada K 'lar gerçel ve negatif olmayan sayılar olup kazanç katsayıları olarak tanımlanmaktadır. PID kontrol teorisinde K_i sürekli-hal cevabını etkiler. Sistemin süresiz-hal davranışı ise s 'in en yüksek derecedeki durumundan yani K_p ve K_d terimlerinden etkilenmektedir. Kazançların değişimleri de farklı sistem cevaplarına sebep olmaktadır. Eğer kazanç s 'in derecesinin büyük olduğu değerlerde fazla

ise süreksiz-hal cevabı da o kadar güçlü olmaktadır. Ayrıca kazanç değerleri s 'in derecesinin küçük olduğu durumda büyük ise süreksiz-hal cevabı bastırılır ve sürekli-hal cevabı hızlı bir şekilde ortaya çıkar. Temel PID kontrol kuralındaki alışagelmış türevsel ifadenin filtrelenmiş türevsel hale getirilmesi s 'in yüksek derecede olduğu durumlardaki sistem modeli $C(s)$ 'in davranışını yumuşatmasını sağlamaktadır. Böylece yeni $C(s)$ transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi değişecektir.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot \frac{As}{s + A} \quad (3.16)$$

Bu eşitlikteki A filtresel kazanç değeri olmaktadır. Transfer fonksiyonundaki A değeri sonsuza gittiği durumda filtreli türevsel PID kontrol yöntemi klasik PID yöntemine dönüşmektedir.

Denetleyici tasarımında gerçekleştirilen diğer bir aşama ise denetleyici parametrelerinin ayarlanmasıdır. Otomatik ayarlama kullanılarak İç Model Kontrol (İMK) seçimi yapılmıştır (ing. Internal Model Control). Bu yöntem tam-derece kararlılık sağlayan geribeslemeli bir denetleyici tasarlanmasını sağlamaktadır. İlk olarak baskın kapalı-çevrim zaman sabiti belirlenmektedir. Genelde bu değer artırılması kapalı sistemi yavaşlatmakta ve daha gürbüz hale getirmektedir [9, 105]. Daha sonra istenilen denetleyici derecesi belirlenir. Tam-derece geribeslemeli denetleyici tasarlandıktan sonra koşullara bağlı olarak derece düşürümü yapılabilir fakat bu işlem performans kaybına ve kapalı-çevrim kararsız sistem oluşumuna sebep verebilmektedir.

Bu tez çalışmasında oluşturulan sistem için gürbüz kontrol yöntemleri olan D-K öteleme ve μ sentez yöntemleri kullanılarak bir denetleyici tasarlanmış ve sistemin istenilen amaçlara ulaşması sağlanmıştır. Referans girdi takibi bu hedeflere örnek olarak sayılabilir. D-K öteleme H_∞ sentezi ile μ analizini birleştiren bir denetleyici tasarımı tekniğidir. Bu yöntem yüksek frekans değerlerinde sonuçlanan en küçük μ değeri için denetleyici tasarlamakta kullanılmaktadır. μ sentezi ve D-K öteleme ile tasarlanan denetleyiciden sonra sonuçları kıyaslamak için faydalı olacak başka bir yöntem de kullanılmıştır. Orantısal İntegral Türevsel (PID) denetleyicisi seçilen belli sayıda akma değeri karşılık gelen sistem için tasarlanmıştır. Daha sonra oluşturulan bu sistemler birleştirilmiş ve denetleyici tasarımı sonlandırılmıştır. Bu denetleyici kullanılarak referans girdi takibi başarıyla sağlanmıştır.

BÖLÜM 4

4. ÖRNEK DURUM İNCELEMESİ

4.1. İki Boyutlu Navier-Stokes denklemleri ile yönetilen ve sınır koşullarına tabi bir akışın dinamik modellemesi

Bu bölümde önceki bölümlerde anlatılan yöntemler örnek bir akış kontrolü problemi üzerinde gösterilecektir. Akışkan akışlarının bölgesel modellemesi, değişik akmazlık koşulları altında karesel bir alan üzerindeki akış için gerçekleştirilecektir. İlk olarak tek bir akmazlık değeri altında geliştirilen yöntemler ele alınacaktır. Akışı ifade eden açılımı elde etmekte kullanılan taban vektörleri, ilk aşamada sekiz adet seçilecek ve sistem tanımlama teknikleri ile dördüncü dereceden bir model elde edilecektir. Dalgacık dönüşümünden elde edilen sekiz adet yaklaşıklama katsayıları kullanılarak dinamik modelin sıfır-giriş ve rampa giriş etkisi altındaki sonuçları gözlemlenecektir. Bu sonuçlardan gelen çıkış verileri ve gezinimler ile HAD benzetimlerinden elde edilen sonuçlar kıyaslanacaktır. Bu aşamadan sonra, iki Boyutlu Navier-Stokes denklemleri ile yönetilen ve sınır koşullarına tabi bir akışın Dinamiksel Modellemesi önceki tekniklerin biraz daha geliştirilmesi ile gerçekleştirilecektir. Birçok benzetim değişik girdi sinyalleri uygulanarak sonuçlar yorumlanacaktır. Birden fazla dalgacık fonksiyonu test edilecek ve dalgacık fonksiyonlarının performansları değerlendirilerek en uygun dalgacık tipi seçimi de yapılacaktır. Ayrıca dalgacık taban fonksiyonlarının standart UDA kiplerine olan avantajları belirtilecektir. İstenilen referans takibi için sistem dinamikleri için gerekli olan otomatikleşmiş İç Model Kontrol (İMK) tasarım teknikleri kullanılarak uygun denetleyici tasarımı gerçekleştirilecektir. Bunun ardından, gerçekleştirilen yaklaşım birden fazla akmazlık değerine ait görüntülerden elde edilen verilerden modeller elde etmek ve bunların kontrolü için kullanılacaktır. 28 adet akmazlık değeri altında HAD benzetimleri yapılacaktır. Dört adet taban vektörü kullanılacak ve altıncı dereceden modeller elde edilecektir. Bu modelleri temsil eden belirsiz bir model üzerinden gürbüz kontrol teknikleri (D-K ötelemesi) kullanılarak denetleyici tasarımı yapılacaktır. Elde edilen sonuçlarla kıyaslamak için standard PID yöntemi kullanılarak alternatif bir kontrol tasarımı yapılacaktır. Bunun için seçilen 10 akmazlık değeri için ayrı ayrı PID kontrolör tasarımı yapılacak ve bu denetleyiciler birleştirilecektir. Bu iki farklı yaklaşımdan elde edilen sonuçlar kıyaslanacak ve gürbüz kontrolden elde edilen sonuçların daha üstün olduğu görülecektir.

4.2. Tek akmaזlık değeri için bölgesel dinamik modelleme

Bu kısımda, akışkan dinamiklerinin Navier-Stokes denklemleri tarafından yönetildiği ve kontrol girişinin sistemi sınır koşulları altında etkilediği, iki boyutlu karesel alan $\Omega = [0, 1] \times [0, 1] \subset \mathbb{R}^2$ üzerindeki akışkan akışı göz önünde bulundurulmuştur. Temel amaç $\Omega_R = [0.3878, 0.5102] \times [0.4694, 0.5918]$ içerisinde konumlandırılmış ilgilenilen bölge Ω için dinamik bir model elde etmektir. Bu Ω_R seçimi herhangi bir özel kriter gözetilerek yapılmamıştır; önerilen yaklaşım herhangi başka bir ilgilenilen bölgeye benzer bir şekilde uygulanabilir. Dinamik model elde edildikten sonra, bu modelin ilgilenilen bölge içerisindeki bir kontrol hedefinin gerçekleştirilmesinde nasıl kullanılabileceği gösterilecektir. (2.4)-(2.5)'deki Navier-Stokes ifadesinin iki boyutlu halini aşığıdaki gibi yeniden yazalım.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x}u + \frac{\partial u}{\partial y}v = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x}u + \frac{\partial v}{\partial y}v = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4.3)$$

Önceki bölümlerde olduğu gibi burada $q(x, y, t) = (u(x, y, t), v(x, y, t)) \in \mathbb{R}^2$ akış hızıdır ve u ile v yatay akış ve dikey yöndeki akışın kısımlarıdır. Re parametresi 10 olarak alınmıştır; yani $\nu = \frac{1}{Re} = 0.1$ 'dir. Başlangıç koşulları ise,

$$u(x, y, 0) = v(x, y, 0) = 0 \quad (4.4)$$

ve sınır koşulları da,

$$u(x, 0, t) = u(x, 1, t) = 1 \quad (4.5)$$

$$v(x, 0, t) = v(x, 1, t) = 0 \quad (4.6)$$

$$u(0, y, t) = 0, y \in [0, 0.0918] \cup (0.1735, 0.8265) \cup (0.9082, 1]; \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x}(0, y, t) = 0, y \in [0.0918, 0.1735] \cup [0.8265, 0.9082]; \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x}(0, y, t) = 0, \quad (4.9)$$

$$u(1, y, t) = \begin{cases} 0, & y \in [0, 0.4184]; \\ \gamma(t), & y \in [0.4184, 0.5816]; \\ 0, & y \in (0.5816, 1]. \end{cases} \quad (4.10)$$

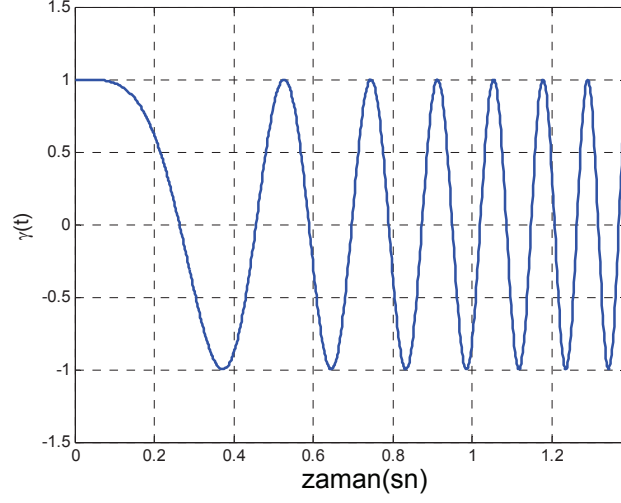
$$v(1, y, t) = 0 \quad (4.11)$$

$\gamma \in \mathbb{R}$ kontrol girişidir. Bu örnek, uygulanması göreceli olarak kolay olduğu, ancak aynı zamanda modelleme ve kontrol için zorluklar içermesi sebebiyle seçilmiştir. Bu problem Dirichlet ve Neuman türü sınır koşullarının bir karışımını içermektedir (sabit akış, kaymasız, stressiz, sabit basınçta dış akış tipi sınırlara denk gelmektedir) ve kontrol girişi γ sisteme, sağ taraf sınırlarının sadece kısıtlı bir kısmı üzerinden etki edebilmektedir. Sıfır giriş, değişken frekanslı sinüs, kare dalga, rampa fonksiyonu ve beyaz gürültünün de içinde bulunduğu farklı girdiler kullanılarak bir çok HAD benzetim oluşturulmuştur.

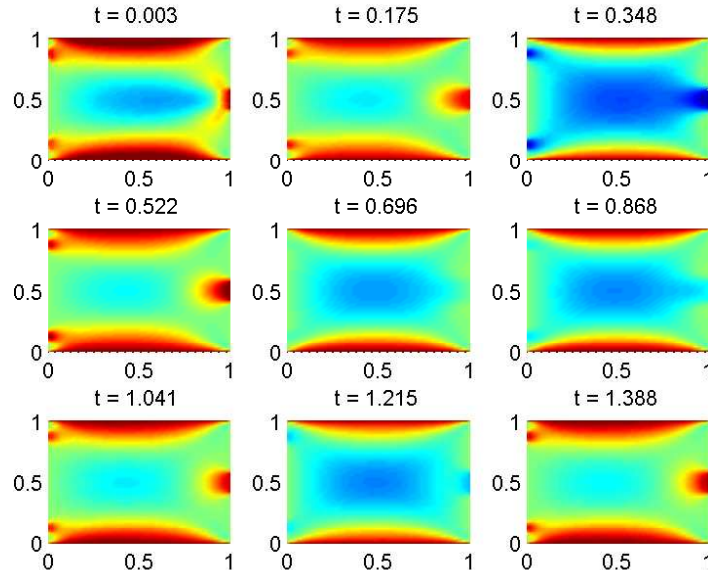
Her bir benzetim, uzaysal domenin 50 x 50 düzgün bir örgüsü üzerinde $T_s = 0.00014$ sn. aralıklı 1000 anı için gerçekleştirilmiştir. Bu örnekleme periyodu, akışın anlık görüntülerini elde etmek için yapılan nümerik hesaplamada gerekli olan en uygun değer olarak gözlemlendiği için seçilmiştir. Örnek olarak uygulanan girdilerden biri olan değişken frekanslı sinüs sinyali Şekil 4.1. 'te gösterilmiştir ve bu giriş için, HAD benzetimlerinden elde edilen birkaç anlık görüntü de Şekil 4.2. ve Şekil 4.3. 'te gösterilmiştir.

Sonra, anlık görüntülerin dalgacık ayrışımı Matlab Wavelet Toolbox yardımıyla, değişik seviyelerde farklı dalgacık fonksiyonları kullanılarak yapılmıştır ve bu fonksiyonlar arasında en uygun dalgacık fonksiyonu olarak Daubechies 4 dalgacığı seçilmiştir. Bu dalgacık fonksiyonu gelişigüzele yakın bir şekilde asimetric yapıya sahiptir, dikgendir, tam geri çatılmayı üretir, sonlu destek alanına sahiptir, ve belirli destek genişliği için en fazla kaybolan durumlarına sahiptir. Bu özellikler Daubechies dalgacığını akışkan akışı sürecinden alınan anlık görüntüleri tasvir etmek için uygun bir aday haline getirir. Ek olarak, Daubechies dalgacığı ile ADD ve TADD elde etmek için hızlı ve verimli metodların varlığı, kısa bir zaman dilimi içerisinde çokça anlık görüntü işlemeyi mümkün kılar. Daubechies 4 dalgacığının seçiminin ardındaki matematiksel dayanak bir kaç paragraf sonra detaylıca anlatılacaktır.

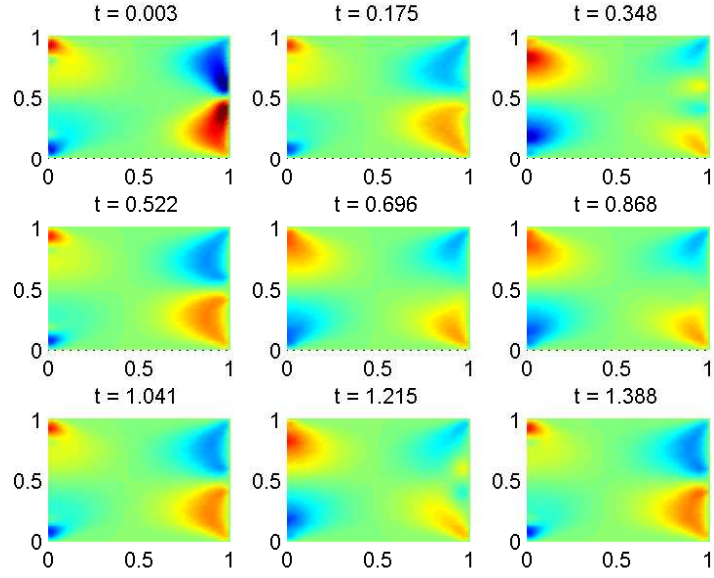
Şekil 4.4. örnek olarak seçilmiş bir anlık görüntünün x parçasını, Daubechies 4 dalgacığı kullanılarak gerçekleştirilmiş iki seviyeli ayrışımı ile birlikte göstermektedir. Bu şekilde ayrıca, dalgacık katsayılarına uygulanan eşikleme sonucunu da gösterilmiştir. T eşik değerinin farklı değerleri test edilmiş, seçilen farklı seviyeler



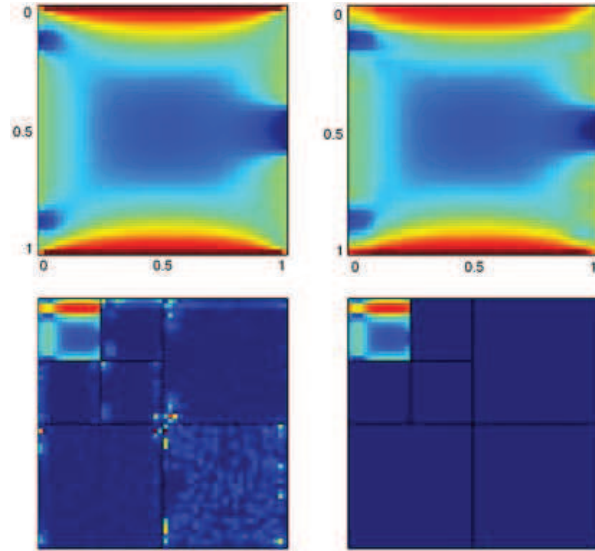
Şekil 4.1. : Şekil 4.2. ve Şekil 4.3. ' teki akışın anlık görüntülerini elde etmek için kullanılan değişken frekanslı sinyal



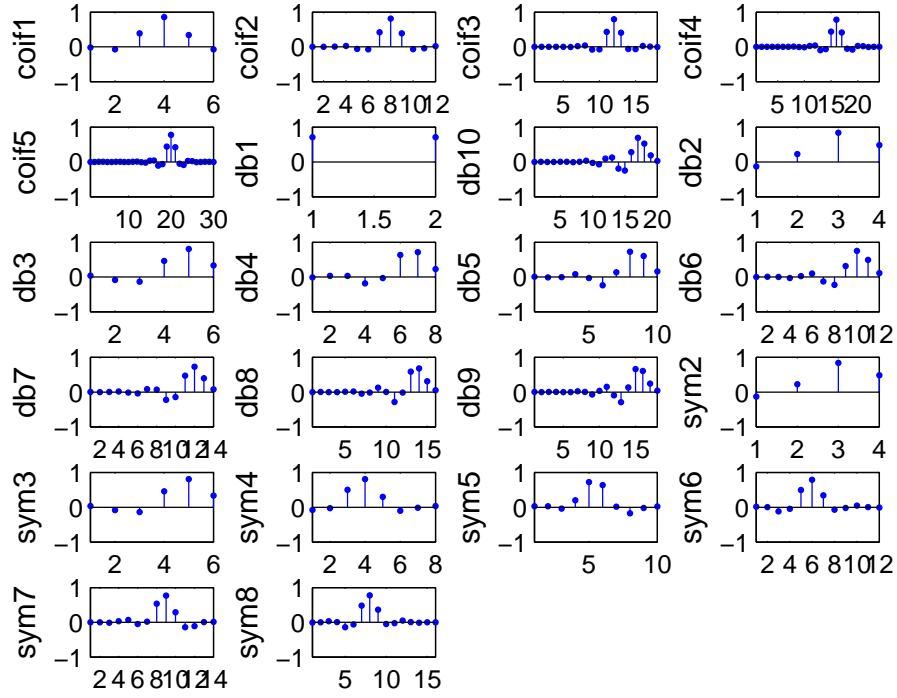
Şekil 4.2. : Değişken frekanslı sinyal ile uyarılmış akışın anlık görüntülerinin x yönündeki bileşeni



Şekil 4.3. : Değişken frekanslı sinyal ile uyarılmış akışın anlık görüntülerinin y yönündeki bileşeni



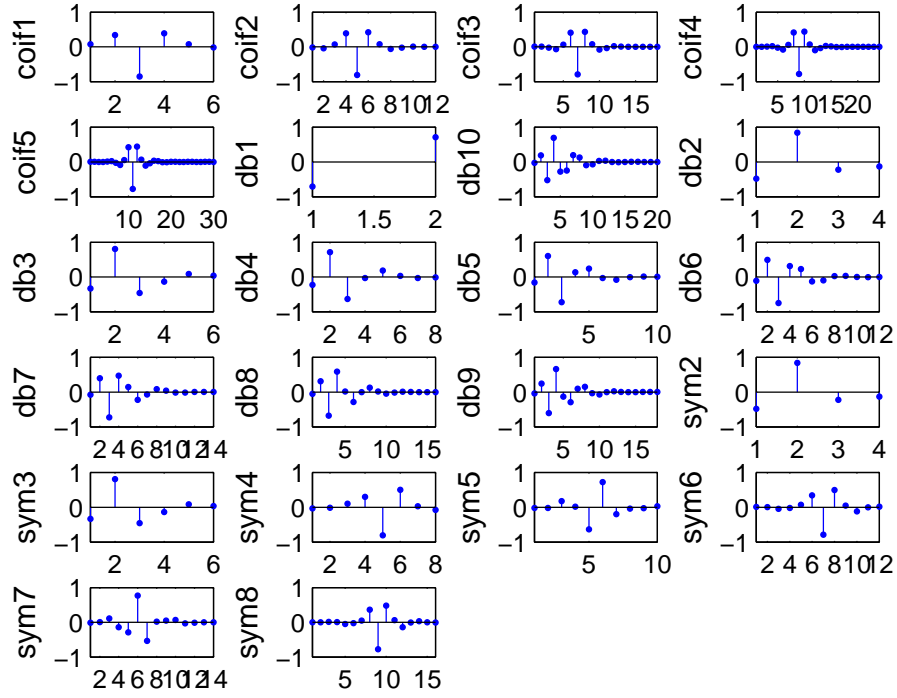
Şekil 4.4. : Orijinal anlık görüntü (üst-sol) ve bu görüntünün sadece yaklaşıklama katsayıları kullanılarak geri çatılması ile elde edilen görüntü (üst-sağ) - İki seviye ayrıştırma sonucu dalgacık katsayıları (alt-sol) ve eşikleme sonucu detayların sıfırlanması sonucu oluşan katsayılar (alt-sağ)



Şekil 4.5. Farklı dalgacık fonksiyonları için kullanılan ayrışım alçak-geçiren filtreler

ve dalgacık fonksiyonları altında eşiklenmiş katsayıların, çok küçük T değerleri için bile, iyi geri çatılmalar ürettiği gözlemlenmiştir. Aslında, geri çatılmanın, şekilde gösterilen durumda olduğu durum için bile, $T = 0$ için başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Buradan anlaşıldığı üzere, her detay katsayısı saf dışı bırakıldığında bile, yaklaşıklık katsayıları anlık görüntüleri yeterli derecede geri çatılabilmektedir. Anlık görüntüleri ait y parçasının sonuçları ve diğer 999 anlık görüntü de benzer şekilde de başarılı sonuçlar vermiştir.

Db4 dalgacığının ve 2 seviye ayrıştırmanın seçilmesinin bir başka açıklaması olarak, aynı dönüşüm, eşikleme ve geri çatılma işlemleri, başka kompakt destekli dikgen dalgacık ve ayrışım seviyeleri kullanarak, uygulanmıştır. Test edilen dalgacık fonksiyonları Coiflet (coif) 1, 2, 3, 4, 5; Daubechies (db) 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10; ve Symlet (sym) 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 ve ayrışım seviyeleri de 1, 2, 3, ve 4' tür. Dalgacık isimlerinin yanındaki numaralar, destek genişliği, filtre boyu ve kaybolan moment sayısı gibi belli karakteristikleri belirleyen dalgacık derecesini belirtmektedir. Örnek vermek gerekirse, kullanılmış dalgacıklar için, alçak ve yüksek geçiren ayrışım filtre katsayıları (dürtü tepkileri) Şekil 4.5. ve Şekil 4.6. 'de gösterilmiştir. Bu dalgacıklarla ilgili detaylı bilgiye [21]'de verilmiştir. Çizelge 4.1. ve



Şekil 4.6. : Farklı dalgacık fonksiyonları için kullanılan ayrışım yüksek-geçiren filtreler

Çizelge 4.2. , dalgacık fonksiyonlarının ve ayrışım seviyelerinin performanslarını değerlendirmek için birçok ölçütü göstermektedir. Sütunlar sırasıyla dalgacığın ismini, ayrışım seviyesini, detayların eşiklenmesinden sonraki katsayıların sayısını, x yönünde kapsanan bütün anlık görüntüler üzerindeki ortalama enerji yüzdesini, v yönündeki ortalama enerji yüzdesini, u yönündeki ortalama karesel hataların ortalamasını ve, v yönündeki ortalama karesel hataların ortalamasını göstermektedir. Hatırlamak gerekirse, istenilen sonuç, küçük bir sayıda yaklaşıklama katsayıları iyi bir geriçatılama (örn. Yüksek oranda enerji ve düşük ortalama karesel hata) elde etmektir. Bundan dolayı, her bir ölçütün sonuçları üç sınıfa ayrılır ve tablolardaki hücrelerin içerisindeki görsel semboller şu anlama gelmektedir: ✓ istenilen değeri, ! kabul edilebilir sınır değerini ve ×'da kabul edilemez değeri ifade etmektedir. Yaklaşıklama katsayılarının sayısı için sınıf sınırları 300 ve 600 olarak, enerji yüzdeleri için sınır oranları yüzde 93 ve 97 olarak ve ortalama karesel hata değerleri ise 0.1 ve 0.2 olarak belirlenmiştir. Tablolara bakıldığında, Db4 dalgacıklı iki seviyeli dalgacık ayrışımı değerlerinin her ölçüm için istenilen sınırlar içerisinde olduğu gözlemlenir. İki seviyeli ayrışımli coif1, db2, db5, db6, db7, db8, sym5, sym6, sym7 ve sym8 dalgacıklarının performanslarının da kabul edilebilir, fakat iki seviyeli db4 ayrışımı kadar iyi düzeyde

| İsim | Seviye | #Kats. | Enerji(U) | Enerji(V) | OKH(U) | OKH(V) |
|--------|--------|--------|------------|-------------|---------|----------|
| co if1 | 1 | 729 | 98.7423479 | 98.74234787 | 0.02999 | 0.029988 |
| co if2 | 1 | 900 | 99.0410067 | 99.04100668 | 0.02502 | 0.025019 |
| co if3 | 1 | 1089 | 99.1994768 | 99.19947676 | 0.02363 | 0.023634 |
| co if4 | 1 | 1296 | 99.3135472 | 99.31354723 | 0.02296 | 0.022958 |
| co if5 | 1 | 1521 | 99.4078238 | 99.40782379 | 0.02255 | 0.022552 |
| db 1 | 1 | 625 | 97.6161262 | 97.61612623 | 0.05613 | 0.056128 |
| db 2 | 1 | 676 | 98.5776496 | 98.57764963 | 0.03411 | 0.034114 |
| db 3 | 1 | 729 | 99.5475703 | 99.54757028 | 0.01863 | 0.01863 |
| db 4 | 1 | 784 | 99.9295786 | 99.92957858 | 0.00759 | 0.007586 |
| db 5 | 1 | 841 | 99.6754476 | 99.67544757 | 0.01504 | 0.015036 |
| db 6 | 1 | 900 | 99.1785908 | 99.1785908 | 0.02421 | 0.024215 |
| db 7 | 1 | 961 | 98.8533744 | 98.85337441 | 0.02902 | 0.029016 |
| db 8 | 1 | 1024 | 98.8885058 | 98.88850582 | 0.02896 | 0.028963 |
| db 9 | 1 | 1089 | 99.2091437 | 99.20914371 | 0.02475 | 0.024752 |
| db 10 | 1 | 1156 | 99.5844191 | 99.58441915 | 0.01813 | 0.018135 |
| sym2 | 1 | 676 | 98.5776496 | 98.57764963 | 0.03411 | 0.034114 |
| sym3 | 1 | 729 | 99.5475703 | 99.54757028 | 0.01863 | 0.01863 |
| sym4 | 1 | 784 | 98.6951202 | 98.69512017 | 0.0286 | 0.028596 |
| sym5 | 1 | 841 | 98.3688238 | 98.36882381 | 0.03185 | 0.031855 |
| sym6 | 1 | 900 | 98.8701267 | 98.87012671 | 0.02679 | 0.026787 |
| sym7 | 1 | 961 | 99.550435 | 99.55043496 | 0.01708 | 0.01708 |
| sym8 | 1 | 1024 | 99.0023563 | 99.00235625 | 0.02579 | 0.025794 |
| co if1 | 2 | 256 | 96.2290678 | 96.22906781 | 0.05945 | 0.059446 |
| co if2 | 2 | 400 | 93.6503965 | 93.65039646 | 0.05605 | 0.056054 |
| co if3 | 2 | 625 | 95.6123898 | 95.61238981 | 0.04772 | 0.047715 |
| co if4 | 2 | 841 | 96.2467795 | 96.24677947 | 0.04742 | 0.047421 |
| co if5 | 2 | 1156 | 97.0655349 | 97.06553487 | 0.04652 | 0.046525 |
| db 1 | 2 | 169 | 94.3143386 | 94.31433858 | 0.09489 | 0.094891 |
| db 2 | 2 | 196 | 96.3309065 | 96.33090651 | 0.05446 | 0.054457 |
| db 3 | 2 | 256 | 95.7813833 | 95.78138326 | 0.04933 | 0.049332 |
| db 4 | 2 | 289 | 97.1604309 | 97.16043094 | 0.04842 | 0.048418 |
| db 5 | 2 | 361 | 96.0196462 | 96.01964617 | 0.05994 | 0.05994 |
| db 6 | 2 | 400 | 98.3429988 | 98.34299883 | 0.04055 | 0.040552 |
| db 7 | 2 | 484 | 98.2234596 | 98.22345962 | 0.0415 | 0.041497 |
| db 8 | 2 | 529 | 97.6434158 | 97.64341578 | 0.05399 | 0.053988 |
| db 9 | 2 | 625 | 98.2710506 | 98.27105062 | 0.04474 | 0.044737 |
| db 10 | 2 | 676 | 97.5612652 | 97.56126522 | 0.04269 | 0.042694 |
| sym2 | 2 | 196 | 96.3309065 | 96.33090651 | 0.05446 | 0.054457 |
| sym3 | 2 | 256 | 95.7813833 | 95.78138326 | 0.04933 | 0.049332 |
| sym4 | 2 | 289 | 92.9023109 | 92.90231093 | 0.06068 | 0.060682 |
| sym5 | 2 | 361 | 93.1454346 | 93.14543458 | 0.05686 | 0.056865 |
| sym6 | 2 | 400 | 93.4253015 | 93.42530154 | 0.06135 | 0.061347 |
| sym7 | 2 | 484 | 94.0364659 | 94.03646592 | 0.05543 | 0.055425 |
| sym8 | 2 | 529 | 94.3909896 | 94.39098957 | 0.0459 | 0.045901 |

Çizelge 4.1. : Farklı dalgacık fonksiyonları ve ayrışım seviyeleri için anlık görüntülerin geri çatılama performansları

olmadığı görülmektedir. Dalgacık tipi ve ayrışımın seviyesi belirlendikten sonra taban vektörlerinin ϕ_i oluşturulması mümkün olmaktadır. İlgilenilen Ω_R bölgesini kapsamak üzere, her yön için 4 taban vektörü kullanılması gerektiği (ki bu da toplamda 8 taban vektörü etmektedir) ortaya çıkmaktadır. $i = 1, \dots, 4$ için Υ_i fonksiyonları, ilgilenilen Ω_R bölgesinin bu fonksiyonların destek alanı içerisinde bulunduğu Şekil 4.7. 'de gösterilmiştir.

Bu noktada, mevcut yöntemden biraz uzaklaşarak, akışkan akış modelleme literatüründe en sık rastlanan yaklaşım olan UDA tekniği kullanılarak elde edilmiş taban vektörleriyle bu çalışmada elde edilmiş taban vektörleri arasında karşılaştırma yapmak bu çalışmanın ileriki kısımlarında etkin sonuç kıyaslaması için faydalı olacaktır. Hatırlanmalıdır ki, $i = 1, \dots, 4$ için $\phi_{i,u} = \Upsilon_i$ 'dir ve Şekil 4.7. 'de gösterildiği gibi her bir Υ_i 'nin destek alanı kompakt bir uzaysal bölgedir. Öyleyse, a_i katsayısı sadece kompakt uzaysal bölge ile ilgili bilgi sağlar. Eğer taban vektörleri UDA tekniği kullanılarak elde edilmiş olsaydı (örneğin [28]'te yapıldığı gibi), o zaman $i = 1, \dots, 4$ için $\phi_{i,u}$ Şekil 4.8. 'de gösterildiği şekilde olurdu. Fark edileceği üzere, her bir $\phi_{i,u}$ 'nun destek alanı tüm akış domenine yayılmıştır. Bundan dolayı a_i katsayısının zaman değişkenliği tüm akış domenindeki bir değişikliği ifade eder, ve belli bir a_i katsayısını belirli bir akış domeni bölgesine bağlamak imkansızdır. Bu görüşler, $\phi_{i,v}$ 'ye de aynı şekilde uygulanabilir. Bu durum, UDA'yı bölgesel dinamik modeller oluşturmak için uygunsuz kılan önemli bir eksikliktir, ve bu çalışmada dalgacık tabanlı yaklaşımın geliştirilmesindeki ana sebeplerden bir tanesidir. Taban vektörleri ϕ_i 'yi elde ettikten sonra a_i 'nin yaklaşılma katsayılarını ifade ettiği akışın açılımını aşağıdaki gibi yapılabilir.

$$q(x, y, t) = \sum_{i=1}^8 a_i(t) \phi_i(x, y) \quad (4.12)$$

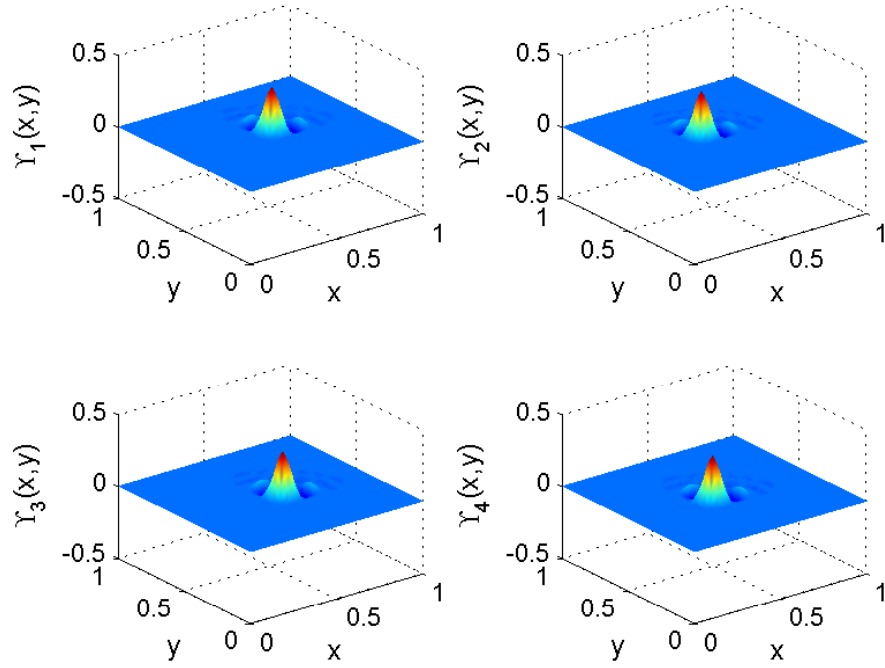
Taban vektörleri ϕ_i 'leri elde ettikten sonraki basamak, bir dinamiksel durum uzay modelinin tanılaması için girdi-çıkı verisi üretilmesidir. Hatırlanacağı üzere, tanılama maksatlı sistem çıktıları aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$y(t) = a(t) = [a_1(t) \ a_2(t) \ a_3(t) \dots \ a_8(t)]^T \quad (4.13)$$

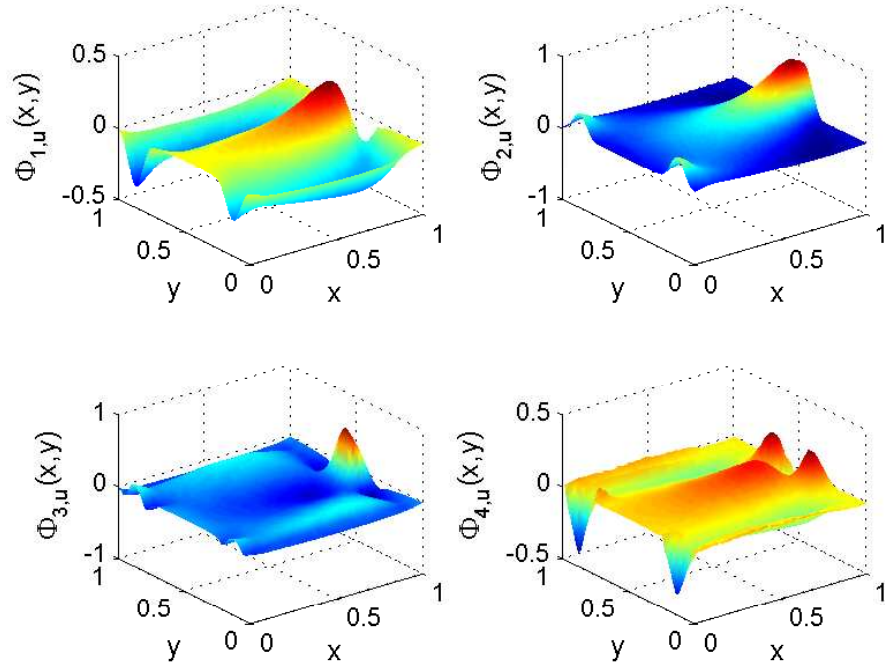
Öyle ki, bu çıktılar farklı test girdileri ile sistemin anlık görüntülerinin dalgacık dönüşümü yapılarak ve ilgilenilen katsayılar kaydedilerek elde edilebilir. Sıfır giriş durumu ve değişken frekanslı sinüs durumundan elde edilen çıktı bilgisi Şekil 4.9. 'da gösterilmiştir. Aynı şekilde, kare dalga, rampa fonksiyonları ve beyaz gürültü

| İsim | Seviye | #Kats. | Enerji(U) | Enerji(V) | OKH(U) | OKH(V) |
|-------|--------|--------|------------|-------------|---------|----------|
| coif1 | 3 | 100 | 93.061951 | 93.06195097 | 0.08709 | 0.087092 |
| coif2 | 3 | 225 | 83.1642388 | 83.1642388 | 0.10508 | 0.105079 |
| coif3 | 3 | 441 | 79.8074672 | 79.80746719 | 0.11197 | 0.11197 |
| coif4 | 3 | 676 | 83.9565327 | 83.95653271 | 0.117 | 0.116996 |
| coif5 | 3 | 961 | 89.9811197 | 89.98111972 | 0.09655 | 0.096546 |
| db 1 | 3 | 49 | 88.0438509 | 88.04385093 | 0.1613 | 0.161305 |
| db 2 | 3 | 64 | 92.1584426 | 92.1584426 | 0.09112 | 0.09112 |
| db 3 | 3 | 100 | 93.1415122 | 93.14151223 | 0.09269 | 0.092691 |
| db 4 | 3 | 144 | 84.5527122 | 84.55271219 | 0.09891 | 0.098912 |
| db 5 | 3 | 196 | 87.6134052 | 87.61340515 | 0.10896 | 0.108965 |
| db 6 | 3 | 225 | 93.2901932 | 93.29019319 | 0.06912 | 0.069116 |
| db 7 | 3 | 289 | 90.8154361 | 90.81543614 | 0.10576 | 0.105764 |
| db 8 | 3 | 361 | 95.4861172 | 95.48611721 | 0.06996 | 0.069962 |
| db 9 | 3 | 441 | 92.3276191 | 92.32761906 | 0.0939 | 0.0939 |
| db 10 | 3 | 484 | 94.3985082 | 94.39850818 | 0.08374 | 0.083738 |
| sym2 | 3 | 64 | 92.1584426 | 92.1584426 | 0.09112 | 0.09112 |
| sym3 | 3 | 100 | 93.1415122 | 93.14151223 | 0.09269 | 0.092691 |
| sym4 | 3 | 144 | 93.463259 | 93.46325901 | 0.09018 | 0.090178 |
| sym5 | 3 | 196 | 83.5776873 | 83.57768732 | 0.08246 | 0.082458 |
| sym6 | 3 | 225 | 78.0425283 | 78.04252827 | 0.12285 | 0.122845 |
| sym7 | 3 | 289 | 77.4950346 | 77.49503457 | 0.09273 | 0.09273 |
| sym8 | 3 | 361 | 74.4244992 | 74.42449923 | 0.12285 | 0.122847 |
| coif1 | 4 | 49 | 90.0126135 | 90.01261346 | 0.14948 | 0.149485 |
| coif2 | 4 | 169 | 86.5875342 | 86.58753422 | 0.16425 | 0.164251 |
| coif3 | 4 | 361 | 63.4987778 | 63.4987778 | 0.19879 | 0.198786 |
| coif4 | 4 | 576 | 55.9462443 | 55.94624432 | 0.15478 | 0.154776 |
| coif5 | 4 | 900 | 64.7796876 | 64.77968763 | 0.19514 | 0.195143 |
| db 1 | 4 | 16 | 80.2178489 | 80.21784894 | 0.26108 | 0.261078 |
| db 2 | 4 | 25 | 85.2158431 | 85.2158431 | 0.16762 | 0.167617 |
| db 3 | 4 | 49 | 91.525582 | 91.52558201 | 0.14782 | 0.147821 |
| db 4 | 4 | 81 | 86.9190587 | 86.9190587 | 0.15327 | 0.153271 |
| db 5 | 4 | 121 | 84.7852631 | 84.78526308 | 0.13724 | 0.137236 |
| db 6 | 4 | 169 | 75.2976566 | 75.29765657 | 0.17034 | 0.170345 |
| db 7 | 4 | 225 | 69.3504698 | 69.35046981 | 0.17272 | 0.172719 |
| db 8 | 4 | 289 | 60.667004 | 60.667004 | 0.15913 | 0.159134 |
| db 9 | 4 | 361 | 69.183353 | 69.18335297 | 0.19911 | 0.199112 |
| db 10 | 4 | 400 | 77.3505764 | 77.35057637 | 0.16699 | 0.166987 |
| sym2 | 4 | 25 | 85.2158431 | 85.2158431 | 0.16762 | 0.167617 |
| sym3 | 4 | 49 | 91.525582 | 91.52558201 | 0.14782 | 0.147821 |
| sym4 | 4 | 81 | 93.0473145 | 93.0473145 | 0.13496 | 0.134957 |
| sym5 | 4 | 121 | 87.6403668 | 87.64036679 | 0.13749 | 0.137493 |
| sym6 | 4 | 169 | 88.3161985 | 88.31619853 | 0.15165 | 0.151654 |
| sym7 | 4 | 225 | 77.6244315 | 77.62443152 | 0.16308 | 0.163077 |
| sym8 | 4 | 289 | 67.6138562 | 67.61385625 | 0.17221 | 0.172209 |

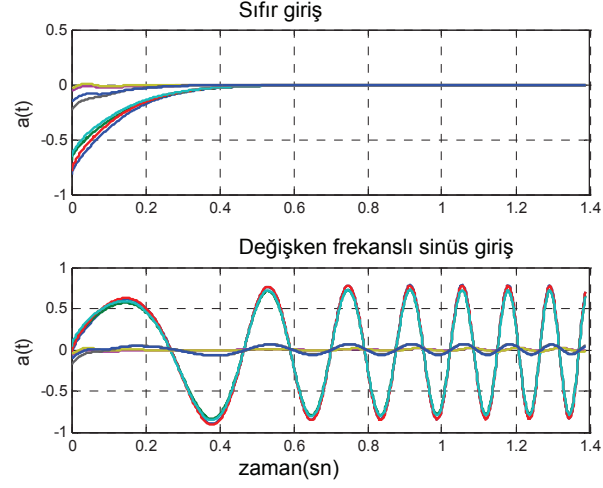
Çizelge 4.2. : Farklı dalgacık fonksiyonları ve ayrışım seviyeleri için anlık görüntülerin geri çatılama performansları (devamı)



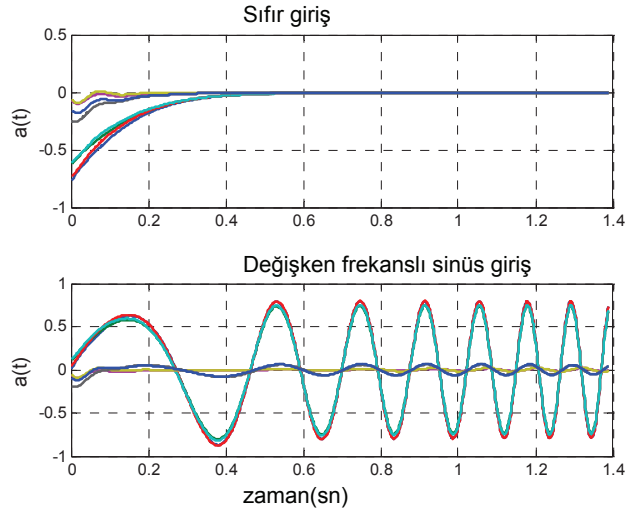
Şekil 4.7. $\{\phi\}_1^8$ taban vektörlerinin oluşturmak için kullanılan $\{\Upsilon\}_1^4$ fonksiyonları



Şekil 4.8. UDA ile elde edilen $\{\phi\}_1^4$ taban vektörlerinin x yönündeki bileşeni



Şekil 4.9. : Değişken frekanslı sinyal ve sıfır giriş ile uyarılan anlık görüntülerden elde edilen katsayılar



Şekil 4.10. : Değişken frekanslı sinyal ve sıfır giriş ile uyarılan dinamik modelden elde edilen katsayılar

sinyallerinin de içinde bulunduğu başka girdi gezintileri ile oluşturulan çıktı bilgisi de elde edilmiş ve kaydedilmiştir. Bu girdi-çıkıtı bilgilerini, (3.7)- (3.8)'deki şekilde olan bir dinamiksel sistemi, MATLAB System Identification Toolbox aracı içerisinde bulunan altuzay sistem tanılama metodları (N4SID) kullanarak, elde etmek maksadıyla kullanılmıştır. Bu amaçla, verilerin bir yarısı kestirim için ayrılmıştır, diğer yarısı ise doğrulama için kullanılmıştır. Sonra gelen denemeler gösterir ki, veriye yeterli derecede uyum, sıfır-girdi ve değişken frekanslı sinüs girdisi altındaki tepkisi Şekil 4.10. 'de gösterildiği gibi olan, 8. dereceden bir model için elde edilebilir. Şekil 4.9. ile karşılaştırmak gerekirse, sistem cevaplarının birbirine çok yakın olduğu gözlemlenebilir. Sonuçlar, test edilen başka girdiler için de oldukça benzerdir; dolayısıyla, oluşturulan modelin ilgilenilen Ω_R uzaysal bölgesinin dinamiklerini tasvir etmekte yeterli olduğu söylenebilir.

Şüphesiz, ilgilenilen Ω_R bölgesi için dinamiksel bir model oluşturmaktaki temel amaç bölge içerisinde bir denetleyici tasarımı uygulamaktır. Varsayalım, kontrol amacı $(x_c, y_c) := (0.5, 0.5) \in \Omega_R$ noktasındaki yatay akış hızını düzenlemek olsun. Diyelim ki, düzenlenecek bu nicelik (4.12)'te gösterildiği gibi bir y_2 olsun.

$$y_2 = u(x_c, y_c, t) = \sum_{i=1}^8 a_i(t) \phi_{i,u}(x_c, y_c) =: C' a(t) \quad (4.14)$$

Burada C' , 1×8 'lik bir matristir.

$$C' := [\phi_{1,u}(x_c, y_c) \phi_{2,u}(x_c, y_c) \dots \phi_{8,u}(x_c, y_c)] \quad (4.15)$$

O halde (4.13)- (3.8)'den,

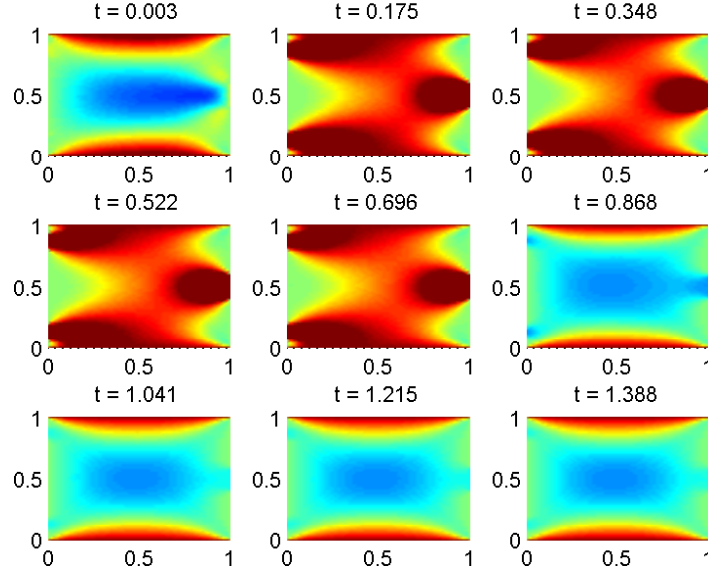
$$y_2 = C' a = C'(C\xi + D\gamma) = C'C\xi + C'D\gamma = C_2\xi + D_2\gamma \quad (4.16)$$

olur. Burada ise $C_2 := C'C$ ve $D_2 := C'D$ 'dir. Sonra, durum dinamiklerini (3.7) kontrol edilecek çıktıyla birleştirecek şekilde aşağıdaki eşitlikleri elde ederiz.

$$\xi(t + T_s) = A\xi(t) + B\gamma(t) \quad (4.17)$$

$$y_2 = C_2\xi(t) + D_2\gamma(t) \quad (4.18)$$

Bu γ 'dan y_2 'ye tek girdili tek çıktılı bir sistemdir. Diyelim ki y_{ref} , y_2 tarafından takip edilecek referans sinyalini ifade etsin. İstenilen takibi elde edebilmek için aşağıdaki



Şekil 4.11. : Kapalı çevrim sisteminden elde edilen akışın anlık görüntüleri (x yönündeki hız bileşeni)

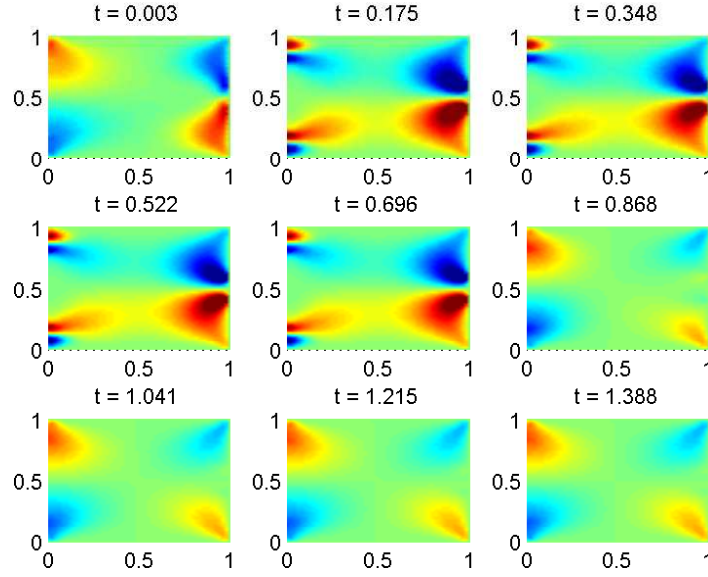
aktarım işlevine sahip K denetleyicisi tasarlanır.

$$K(z) := \frac{\Gamma(z)}{E(z)} \quad (4.19)$$

Burada $\Gamma(z)$, $\gamma(t)$ 'nin z dönüşümüdür ve $E(z)$ takip hatası $e(t) := y_{ref}(t) - y_2(t)$ 'nin z dönüşümüdür. $K(z)$ 'yi elde etmek için, PID ayarlaması teknikleri İMK tasarım teknikleri, LQG sentezleri ve optimize tabanlı tasarımı da içeren birçok standard ve otomatikleşmiş tasarım teknikleri mevcuttur. Mevcut akış problemi için, değişik derecelerde çok sayıda denetleyici Matlab Control Toolbox yardımı ile tasarlanmıştır. En iyi sonuçlar, İMK tasarım teknikleri kullanılarak oluşturulan aşağıdaki 3. derecede denetleyici ile elde edilmiştir [9].

$$K(z) = \frac{0.1194z^3 - 0.1159z^2 - 0.1193z + 0.116}{z^3 - 2.968z^2 + 2.936z - 0.9681} \quad (4.20)$$

Bu denetleyici (4.1)- (4.11)'de tanımlanan akış problemine uygulanmış ve HAD benzetimleri yapılmıştır. Benzetimler için referans sinyali y_{ref} , 0.5 değerinde $t = 0.7$ saniyesine kadar sabit tutulmuş daha sonra -0.5 'e değiştirilmiştir. Durumu daha da zorlayıcı ve gerçekçi kılmak için sistemin girdi ve çıktılarını dış bozulmalar da eklenmiştir. Eklenen bu dış bozulmalar 0.05 genliğinde, (referans sinyalinin yüzde 10'u) beyaz gürültü sinyalleri şeklindedir. Kapalı çevrim işleminden elde edilmiş

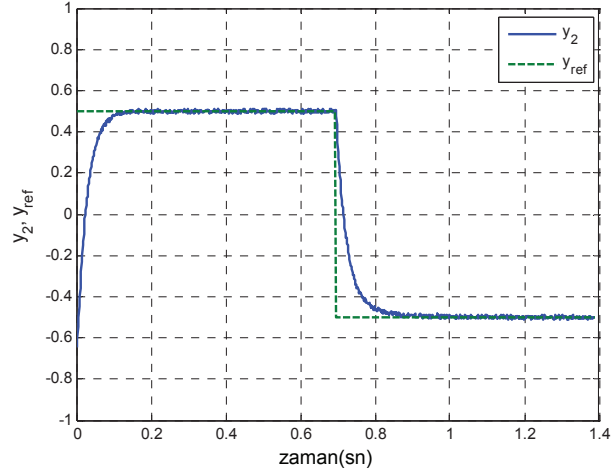


Şekil 4.12. : Kapalı çevrim sisteminden elde edilen akışın anlık görüntüleri (y yönündeki hız bileşeni)

anlık görüntüler Şekil 4.11. ve Şekil 4.12. 'da gösterilmiş, ve $x_c, y_c = (0.5, 0.5)$ gezinme noktası ile birlikte referans sinyali y_{ref} ise Şekil 4.13. 'de gösterilmiştir. Şekillerden, denetleyici (4.20) ile oluşturulmuş kapalı çevrim sisteminin istenilen takibi başarıyla sağladığı ve verilen bir noktadaki hız değerini referans sinyaline yakın tutabildiği gözlemlenmiştir. Referans sinyali etrafındaki küçük salınımlar kabul edilebilir düzeyde olup, sonlu boyutlu doğrusal model ile, sonsuz boyutlu doğrusal olmayan KDD sistemi arasındaki modellenmemiş dinamik farklarına olduğu kadar, girdi ve çıktı gürültülerine de bağlanabilir. Özetlemek gerekirse, bu çalışmada önerilen yaklaşım kullanılarak oluşturulmuş bölgesel dinamik modelin, akış sürecini yeterli derecede tasvir ettiği ve bu model kullanılarak yapılmış bir kontrol tasarımının, akış dinamiklerini yöneten karmaşık KDD sistemlerine uygulandığı zaman, tatmin edici sonuçlar doğurduğu söylenebilir.

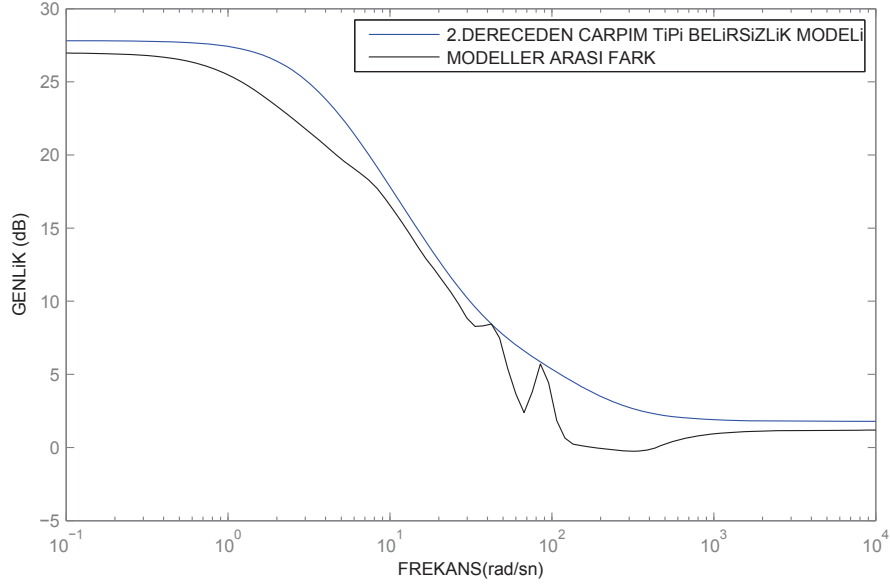
4.3. Değişik akmazlık koşulları altında bölgesel dinamik modelleme

Çalışmanın bu kısmında ise önceki bölümlerden farklı olarak birden fazla akmazlık değeri altında yaklaşımlar gerçekleştirilmiş ve sonuçları gözlemlenmiştir. Kullanılan yöntemler önceki durumlardaki gibi benzer şekilde yapılmış ve çalışma değişik akmazlık koşulları altında da gerçekleştirilmiştir. Akışın anlık görüntüleri [0.0000010, 0.0000026, 0.0000071, 0.0000193, 0.0000517, 0.0001389, 0.0003727, 0.0010000,



Şekil 4.13. : Kapalı çevrim sisteminden elde edilen akışın (x_c, y_c) noktasındaki hızı ve takip edilecek y_{ref} referans sinyali

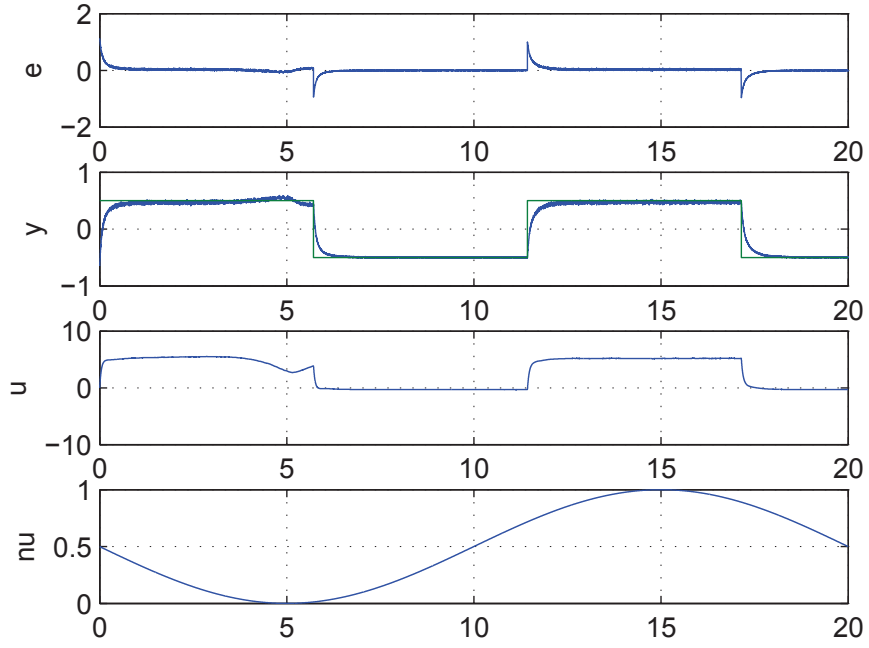
0.0026826, 0.0071968, 0.0193069, 0.0517947, 0.0714295, 0.1389495, 0.1428580, 0.2142865, 0.2857150, 0.3571435, 0.3727593, 0.4285720, 0.5000005, 0.5714290, 0.6428575, 0.7142860, 0.7857145, 0.8571430, 0.9285715, 1.0000000] değerleri arasındaki 28 değişik akmazlık değeri için akışın tasvirinin yapılmasında kullanılan Navier-Stokes denklemlerinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği benzetimlerinden elde edilmiştir. Bu adımı takiben anlık görüntülere sırasıyla Dalgacık dönüşümü, eşikleme ve geri çatılma işlemleri uygulanmıştır. Bu aşamalardan elde edilen dalgacık katsayılarından sadece yaklaşıklama katsayılarının kullanımı ile anlık görüntülerin iyi oranda temsil edildiği görülmüştür. Alt uzay sistem tanılama teknikleri kullanarak yaklaşıklama katsayılarının zamana göre değişimlerini temsil eden düşük dereceli dinamik bir sistem modeli elde edilmiştir. Bu aşamaya kadar geliştirilen yaklaşımlar karesel alan üzerinde girişin sınır koşulları ile sistemi etkileyen bir akış problemi örneğine uygulanmıştır ve kontrol hedeflerini sağlayıp sağlayamadığı test edilmiş ve istenilen sonuçların başarıyla alındığı görülmüştür. Daha önceki bölümde de belirtildiği gibi, alt uzay sistem tanılama (N4SID) yöntemleri kullanılmış, ve altıncı dereceden bir model aranmıştır. Bu çalışmada bu teknikler MATLAB System Identification Toolbox altındaki fonksiyonlar yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Her akmazlık değeri için (28 tane), sistemin girişi değişken frekanslı sinüs, çıkış da bu dört katsayının zamanla değişimi olacak şekilde sistem tanılama (N4SID derece = 6) yöntemleri ile 28 adet doğrusal modeller oluşturulmuştur. Bu sistemlerin dinamiğini kapsayacak şekilde 28 adet modeli temsil edebilecek bir nominal model ile çarpım



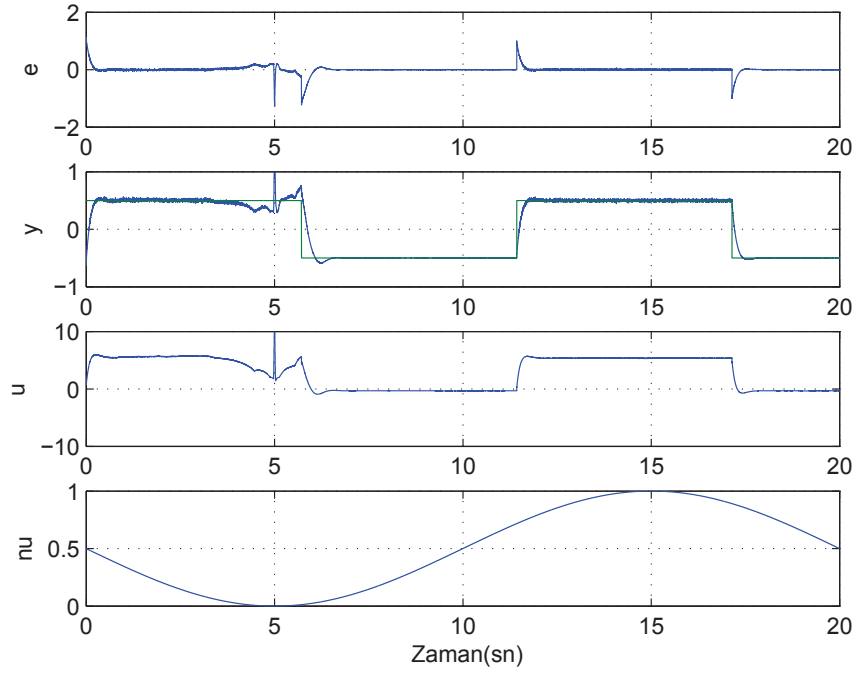
Şekil 4.14. Çarpım tipi belirsiz sistem modeli Bode çizelgesi

şeklinde bir belirsizlik modeli oluşturulmuştur. Burada nominal sistem olarak ν_{14} için oluşturulan sistem alınmış ve çarpım türünde bir belirsizlik ile tüm sistemler kapsamıştır. Belirsiz sistem ile nominal sistem arasındaki fark ile oluşturulan çarpım belirsizliğini Bode genlik çizgesi Şekil 4.14. 'de görülebilir. Bu model için gürbüz kontrol yöntemleri (μ -sentezi veya onun yaklaşılması olan D-K ötelemesi) kullanarak denetleyici tasarımı yapılmış ve istenen referans girişi takip edilmesi sağlanmıştır. Şekil 4.15. 'de hata değeri, çıkış ve referans girişi ve akma değeri verilmiştir.

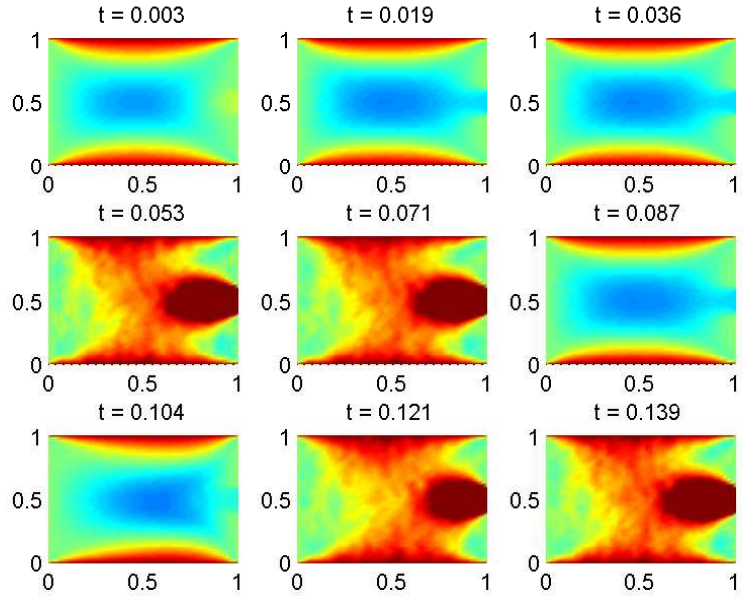
Kıyaslamak amacıyla diğer bir denetleyici tasarımı için PID ayarlama tekniği de kullanılmıştır. İç Model Kontrol (İMK) tipi kullanılarak otomatikleştirilmiş ayarlama yapılmış ve baskın kapalı çevrim zaman sabiti 0.06 seçilmiştir. Daha sonra [0.0000010, 0.0000190, 0.0003727, 0.0071968, 0.0714295, 0.3727593, 0.5714290, 0.7857145, 0.9285715, 1.0000000] aralığında değişen 10 adet ν değerleri için elde edilen kontrolörler birleştirilerek birden fazla akma koşulları altında etkili olacak bir kontrolör elde edilmiş ve istenilen referans takibi ve hata performansları gözlemlenmiş ve Şekil 4.16. 'de gösterilmiştir. İki farklı denetleyici tipini kıyaslamak gerektiğinde, μ -sentezi veya onun yaklaşılması olan D-K ötelemesi yönteminin PID tekniğine karşı daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Referans takibi durumunda çıkış sinyalinde ve dolayısıyla hata kısmında küçük sıçramalar olduğu görülmektedir.



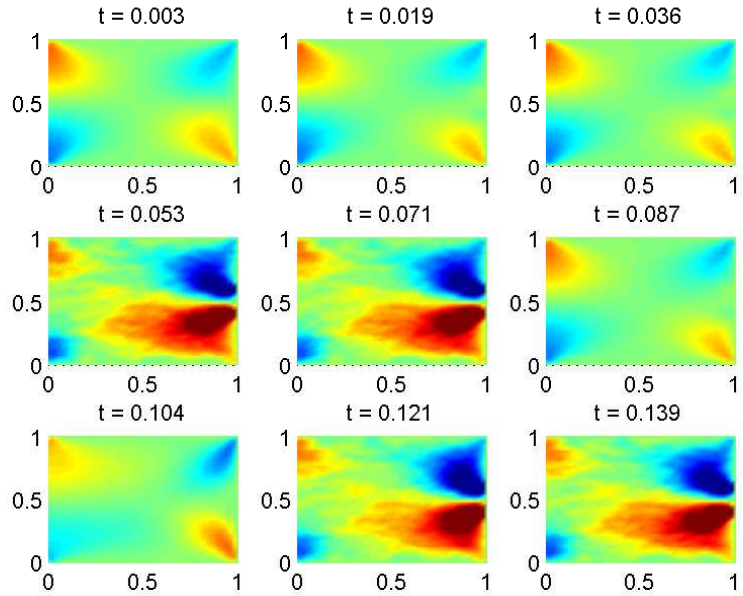
Şekil 4.15. $e - y$ ve $y_{ref} - u - \nu$



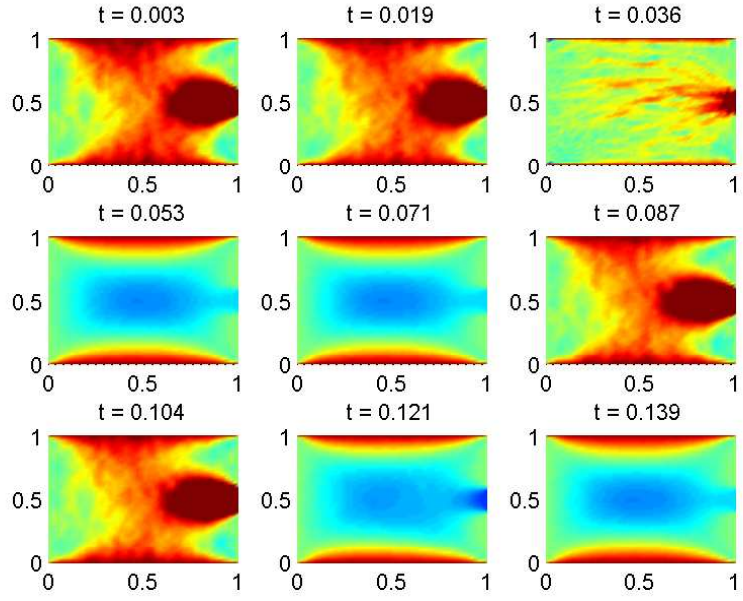
Şekil 4.16. $e - y$ ve $y_{ref} - u - \nu$



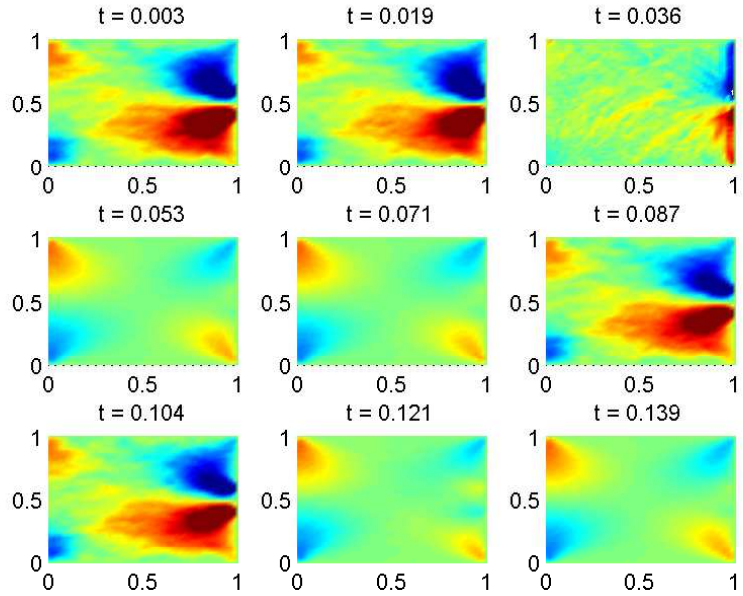
Şekil 4.17. : DK ötelemesi kullanılarak kapalı çevrim sistemi için HAD benzetimlerinden elde edilen akışın anlık görüntüleri (x yönündeki hız bileşeni)



Şekil 4.18. : DK ötelemesi kullanılarak kapalı çevrim sistemi için HAD benzetimlerinden elde edilen akışın anlık görüntüleri (y yönündeki hız bileşeni)



Şekil 4.19. : PID denetleyici kullanılarak kapalı çevrim sistemi için HAD benzetimlerinden elde edilen akışın anlık görüntüleri (x yönündeki hız bileşeni)



Şekil 4.20. : PID denetleyici kullanılarak kapalı çevrim sistemi için HAD benzetimlerinden elde edilen akışın anlık görüntüleri (y yönündeki hız bileşeni)

Şekil 4.17. - Şekil 4.18. - Şekil 4.19. - Şekil 4.20. 'de de görüldüğü gibi DK ötelemesi ve PID denetleyici tasarım yöntemleri kullanılarak kapalı çevrim sistemi için HAD benzetimlerinden elde edilen akışın anlık görüntüleri (u ve v kısımları) elde edilmiştir. μ sentezi veya onun yaklaşıklaması olan D-K ötelemesinin PID denetleyicisine göre daha dayanıklı ve başarılı bir yöntem olduğu bu çalışma için söylenebilmektedir. Ayrıca PID için gerçek zamanlı akmazlık ölçümü gerekmektedir ki bu durum hem zor hem pahalıdır. D-K ötelemesi yöntemi için akmazlık değerinin bilinmesine gerek yoktur. Bu yüzden, bu yöntem pratikte uygulaması daha kolay bir teknik olarak karşımıza çıkmaktadır.

BÖLÜM 5

5. SONUÇ

5.1. Yorumlar

Bu tez çalışmasında, dalgacık dönüşümü ile farklı akmazlık koşulları altında akış kontrolü problemleri için bölgesel dinamik modeller elde edilmesi ve kontrolü konusu anlatılmıştır. İlk önce akışın anlık görüntüleri değişik akmazlık değerleri için bu akışı tasvir eden Navier-Stokes denklemlerinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği benzetimlerinden elde edilmiş ve daha sonra Dalgacık dönüşümü, eşikleme ve geri çatılama ile görüntülerden oluşturulan katsayılardan sadece yaklaşıklama katsayılarıyla anlık görüntülerin kabul edilebilir derecede iyi oranda temsil edildiği gözlemlenmiştir. Daha sonra yaklaşıklama katsayılarının zamana bağlı değişimlerini temsil eden düşük boyutlu dinamik sistem modeli alt uzay tanımlama yöntemleri ile oluşturulmuştur. Bütün bu yöntem ve uygulamalar karesel alan üzerinde girişin sınır koşullarından sistemi etkilediği bir akış örneği üzerinde örneklendirilmiş ve istenen derecede başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Bu çalışmada yer alan yöntemler, birden fazla akmazlık değerli akış problemleri için düşük boyutlu bölgesel dinamik modeller oluşturulması için sistematik bir yöntem sunması bakımından önemlidir. Akış problemlerinin modellenmesinde literatürde en sık kullanılan yöntemler olan UDA/Gİ metotları da düşük boyutlu modeller vermesine karşın bu modellerin doğrusal olmaması, üzerlerinde analiz ve kontrol tasarımı yapılması açısından sıkıntı yaratmaktadır. Bu standart yöntemlerle ilgili diğer bir sıkıntı ise UDA kiplerinin destek alanının akış alanının tamamına yayılması sebebiyle akışın sadece bir bölgesini ilgilendiren bölgesel modelleme ve analizler yapılmak istendiğinde sıkıntı yaşanmasıdır. Bildiride geliştirilen teknikler, standart UDA/Gİ modelleme metotları ile ilgili bu sıkıntılara çözüm getirerek akış problemleri için düşük boyutlu doğrusal ve bölgesel dinamik modeller oluşturulması gereken durumlarda fayda sağlayacaktır.

İlk olarak tek bir akmazlık değeri için karesel bir alanda Navier-Stokes denklemleriyle yönetilen bir akış örneği için bölgesel dinamik modelleme yapılmıştır. Sistem tanımlama ile elde edilen düşük modelin, (NS) denklemlerinin (HAD) benzetimlerinden oluşturulan sonuçlar yorumlanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu aşamadan

sonra, geliştirilen yöntemler birden fazla akmazlık koşulları altında gerçekleştirilmiş ve uygun denetleyici tasarımı yapılarak kontrol hedefleri sağlanmıştır.

Bu çalışmada Dalgacık Dönüşümünde birçok dalgacık tipi kullanılmış fakat en iyi sonuçlar Daubechies-4 dalgacığında gözlemlenmiştir. Bu dalgacık, asimetrik yapıya sahip olması sebebiyle yine asimetrik yapıya sahip olan akışın anlık görüntülerinin sıkıştırılması işleminde bir avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Dikgen özelliğe ve gelişigüzel yapıya sahip olması ve ayrıca benzetimler yapılırken hızlı sonuçlar vermesi de bu dalgacığın diğer dalgacık tiplerine olan avantajları arasında sayılabilir. Bu sebepten dolayı en uygun dalgacık tipi test edilmiş ve iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Akışın modellenmesinin fiziksel olarak anlam ifade etmesi için değişik akışkanlar kullanılmış bunlara bağlı olarak yoğunluk ve viskozite değerleri de değişmiştir. Böylece farklı Reynolds sayıları altında modelleme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışmada önerilen yaklaşımlar kullanılarak oluşturulmuş bölgesel bir dinamik modelin, akış sürecini yeterli derecede tasvir ettiği ve bu model kullanılarak yapılmış bir kontrol tasarımının, akış dinamiklerini yöneten karmaşık KDD sistemlerine uygulandığı zaman, başarılı sonuçlar doğurduğu söylenebilir.

5.2. Gelecekteki Çalışmalar

Gelecekteki çalışmalar arasında, değişik dalgacık türleri kullanılarak modellemeler yapılması ve karşılaştırılması ile, önerilen tekniklerin farklı akış problemlerine uygulanması sayılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] M. Gad-el Hak. *Flow Control - Passive, Active, and Reactive Flow Management*. Cambridge University Press, New York, NY, 2000.
- [2] T.R. Bewley. Flow control: new challenges for a new Renaissance. *Progress in Aerospace Sciences*, 37(1):21–58, 2001.
- [3] R.D. Joslin. Aircraft laminar flow control. *Annual review of fluid mechanics.*, 30:1–29, 1998.
- [4] Jiezhi Wu, Xiyun Lu, A.G. Denny, M. Fan, and J.M. Wu. Post-stall flow control on an airfoil by local unsteady forcing. *Journal of Fluid Mechanics*, 371:21–58, 1998.
- [5] O. M. Aamo, M. Krstic, and T. R. Bewley. Control of mixing by boundary feedback in 2d channel flow. *Automatica*, 39(9):1597–606–, 2003.
- [6] <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Airplanevortexedit.jpg>
- [7] <http://www.hnn.navy.mil/Archives/LosAngeles.JPG>
- [8] <http://www.le.ac.uk/eg/ar45/index.htm>
- [9] L. Baramov, O. R. Tutty, and E. Rogers. H-infinity control of non-periodic two-dimensional channel flow. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 12(1):111–122, 2004.
- [10] J. Kim. Control of turbulent boundary layers. *Physics of Fluids*, 15:1093, 2003.
- [11] A. Banaszuk, K. B. Ariyur, M. Krstic, and C. A. Jacobson. An adaptive algorithm for control of combustion instability. *Automatica*, 40(11):1965–72–, 2004.
- [12] K. Cohen, S. Siegel, T. McLaughlin, E. Gillies, and J. Myatt. Closed-loop approaches to control of a wake flow modeled by the Ginzburg-Landau equation. *Computers & Fluids*, 34(8):927–49–, 2005.
- [13] B. R. Noack, K. Afanasiev, M. Morzynski, G. Tadmor, and F. Thiele. A hierarchy of low-dimensional models for the transient and post-transient cylinder wake. *Journal of Fluid Mechanics*, 497:335–63, 2003.
- [14] B. R. Noack, P. Papas, and P. A. Monkewitz. The need for a pressure-term representation in empirical Galerkin models of incompressible shear flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 523:339–65, 2005.
- [15] C. W. Rowley, T. Colonius, and R. M. Murray. Model reduction for compressible flows using POD and Galerkin projection. *Physica D*, 189(1-2):115–29, 2004.

- [16] K. Fitzpatrick, Y. Feng, R. Lind, A. J. Kurdila, and D. W. Mikolaitis. Flow control in a driven cavity incorporating excitation phase differential. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 28(1):63–70, 2005.
- [17] M. Samimy, M. Debiasi, E. Caraballo, A. Serrani, X. Yuan, J. Little, and J. H. Myatt. Feedback control of subsonic cavity flows using reduced-order models. *Journal of Fluid Mechanics*, 579:315–346, 2007.
- [18] E. Caraballo, C. Kasnakoglu, A. Serrani, and M. Samimy. Control input separation methods for reduced-order model-based feedback flow control. *AIAA Journal*, 46(9):2306–2322, 2008.
- [19] W. R. Graham, J. Peraire, and K. Y. Tang. Optimal control of vortex shedding using low-order models. i - open-loop model development. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 44:945–972, 1999.
- [20] S. N. Singh, J. H. Myatt, G. A. Addington, S. Banda, and J. K. Hall. Optimal feedback control of vortex shedding using proper orthogonal decomposition models. *Transactions of the ASME. Journal of Fluids Engineering*, 123(3):612–618, 2001.
- [21] I. Daubechies and B.J. Bates. Ten Lectures on Wavelets. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 93:1671, 1993.
- [22] S. Mallat. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press, 1999.
- [23] CK Chui. *An Introduction to Wavelets*. Academic Press, 1992.
- [24] G. Strang and T. Nguyen. *Wavelets and Filter Banks*. Wellesley Cambridge Pr, 1996.
- [25] <http://www.mathworks.com/access/wavelet/ch06ad9.html45577>
- [26] <http://www.eetimes.com/design/signal-processing-dsp/4013113>
- [27] M. Raffel, C. E. Willert, and Jurgen Kompenhans. *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1998.
- [28] R Chris Camphouse. Boundary feedback control using Proper Orthogonal Decomposition models. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 28:931–938, 2005.
- [29] M. O. Efe and H. Ozbay. Low dimensional modelling and Dirichlet boundary controller design for Burgers equation. *International Journal of Control*, 77(10):895–906, July 2004.
- [30] C. Kasnakoglu, A. Serrani, and M. O. Efe. Control input separation by actuation mode expansion for flow control problems. *International Journal of Control*, 81(9):1475–1492, 2008.

- [31] P. Holmes, J.L. Lumley, and G. Berkooz. *Turbulence, Coherent Structures, Dynamical System, and Symmetry*. Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
- [32] L. Sirovich. Turbulence and the dynamics of coherent structures. *Quarterly of Applied Math.*, XLV(3):561–590, 1987.
- [33] www.personal.reading.ac.uk/shs99vmb/notes/robust/lecture4.pdf
- [34] IA Griffin and PJ Fleming. A Multiobjective Optimization Approach to DK-Iteration. In *Proceedings of the European Control Conference*, 2003.
- [35] D. Engwirda. An unstructured mesh navier-stokes solver. Master’s thesis, School of Engineering, University of Sydney, 2005.
- [36] M. Bergmann, L. Cordier, and J.-P. Brancher. Optimal rotary control of the cylinder wake using proper orthogonal decomposition reduced-order model. *Physics of Fluids*, 17:097101, 2005.
- [37] A. K. Saha, G. Biswas, and K. Muralidhar. Three-dimensional study of flow past a square cylinder at low reynolds number. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 24:54–66, 2003.
- [38] A. Sohankar, C. Norberg, and L. Davidson. Simulation of three-dimensional flow around a square cylinder at moderate reynolds numbers. *Physics of Fluids*, 11(2):288–306, 1999.
- [39] J. Becker, T. Preußner, and M. Rumpf, *PDE methods in flow simulation post processing*, *Comput. Visual. Sci.* **3** (2000), 159–167.
- [40] J. Becker and M. Rumpf, *Visualization of time-dependent velocity fields by texture transport*, Proc. of the Eurographics Workshop on Scientific Visualization ’98, Blaubeuren, Springer, 1998.
- [41] J. Becker and M. Rumpf, *A flow with a free boundary and dynamic contact angle*, Konferenzbericht über die NAVier-STokes-Tagung in Oberwolfach (Masuda, Rautmann, and Solonikov, eds.), 1988.
- [42] M. Ohlberger, *Adaptive mesh refinement for single and two phase flow problems in porous media*, Proc. of the 2nd International Symposium on: Finite Volumes for Complex Applications - Problems and Perspectives, Duisburg (1999), Hermes Science Publications, Paris, 1999, pp. 761–768.
- [43] Menter, F., 2-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models For Engineering Applications, *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 5, 1994, pp. 1598–1605.
- [44] Rumsey, C., Gatski, T., Sellers, W., Vatsa, V., and Viken, S., Summary of the Computational Fluid Dynamics Validation Workshop on Synthetic Jets, *AIAA Journal*, Vol. 44, No. 2, February 2006, pp. 194–207.

- [45] S. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press, 1998.
- [46] D. Stanhill, Y. Y.Zeevi."2D Multiwavelets for Image Representation", The 19th Convention of the IEEE, Jerusalem 1996, pp. 251-254
- [47] H. Bölcskei, "Oversampling in wavelet subspaces", *Proc. of IEEE International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis (TFTS)*, Pittsburgh (PA), pp. 489-492, Oct. 1998.
- [48] P. Bochev, S.D. Kim, and B.-C. Shin. Analysis and computation of least-squares methods for a compressible Stokes problem. *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, 22:867–883, 2006.
- [49] E. Feireisl. Dynamics of viscous compressible flows. volume 26 of *Oxford Lecture Series in Mathematics and its Applications*. Oxford University Press, 2004.
- [50] R. Temam. Navier-stokes equations. volume 2 of *Studies in mathematics and its applications*. North Holland, 1977.
- [51] F. Nataf, F. Rogier, and E. Sturler. *Navier-Stokes Equations and Related Nonlinear Analysis*, chapter Domain decomposition methods for fluid dynamics, pages 367–376. Plenum, New York, a. sequeira edition, 1995.
- [52] Joseph Oliger and Arne Sundström. Theoretical and practical aspects of some initial boundary value problems in fluid dynamics. *SIAM J. Appl. Math.*, 35(3):419–446, November 1978.
- [53] J. S. Fabnis, H. J. Giblet, and H. McDormand. Navier-stokes analysis of solid rocket motor internal flow. *J. Prop. and Power*, 2:157–164, 1980.
- [54] Hauser, T. and Huang, P., A Hierarchical Parallelization Concept for a High-performance Navier-Stokes Solver, *Proceedings of International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA'99)*, June 28 - July 1 1999.
- [55] Blaisdell, G. A., Mansour, N., and Reynolds, W., Numerical Simulations of Compressible Homogeneous Turbulence, AFOSR Report TF-50, Stanford University, 1991.
- [56] ACHESON, D. 1990 *Elementary Fluid Dynamics*. Oxford University Press.
- [57] G. CHAVENT, G. COHEN, AND J. JAFFRÉ, *A finite element simulator for incompressible two-phase flow*, *Transport in Porous Media*, 2 (1987), pp. 465–478.
- [58] E. F. TORO, *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics*, Springer-Verlag, 1999.

- [59] H. Bijl and P. Wesseling. A unified method for computing incompressible and compressible flows in boundary-fitted coordinates. *Journal of Computational Physics*, 141:153–173, 1998.
- [60] A.J. Chorin. Numerical solution of the Navier-Stokes equations. *Mathematics of Computation*, 22:745–762, 1968.
- [61] M. Marion and R. Temam. Navier-Stokes equations: Theory and approximation. In P. Ciarlet and J.L. Lions, editors, *Handbook of Numerical Analysis, Volume VI*. North Holland, 1998.
- [62] F. Moukalled and M. Darwish. A high-resolution pressure-based algorithm for fluid flow at all speeds. *Journal of Computational Physics*, 168:101–133, 2001.
- [63] P. Wesseling. Principles of computational fluid dynamics. volume 29 of *Springer Series in Computational Mathematics*. Springer, 2001.
- [64] H. Akaike. Statistical predictor identification. *Ann. Inst. Statist. Math.*, 22:203–217, 1970.
- [65] H. Akaike. A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans. Automatic Control*, AC-19:716–723, 1974. System identification and time-series analysis.
- [66] G. Schwarz. Estimating the dimension of a model. *Ann. Statist.*, 6(2):461–464, 1978.
- [67] M. Barenthin, H. Jansson, and H. Hjalmarsson. Applications of mixed H_2 and H_∞ input design in identification. In *Proc. 16th IFAC World Congress on Automatic Control*, Prague, 2005. CD-ROM – Paper 03882.
- [68] H.A. Barker and K.R. Godfrey. System identification with multi-level periodic perturbation signals. *Control Engineering Practice*, 7:717–726, 1999.
- [69] U. Forssell and L. Ljung. Closed-loop identification revisited. *Automatica*, 35:1215–1241, 1999.
- [70] H. Hjalmarsson, M. Gevers, and F. De Bruyne. For model-based control design, closed-loop identification gives better performance. *Automatica*, 32(12):1659–1673, 1996.
- [71] T.L. Lai and C.Z. Wei. Least squares estimates in stochastic regression models with applications to identification and control of dynamic systems. *Annals of Statistics*, 10(1):154–166, 1982.
- [72] H.-F. Raynaud, L. Pronzato, and E. Walter. Robust identification and control based on ellipsoidal parametric uncertainty descriptions. *European J. of Control*, 6(3):245–257, 2000.

- [73] C.R. Rojas, J.S. Welsh, G.C. Goodwin, and A. Feuer. Robust optimal experiment design for system identification. *Automatica*, 43:993–1008, 2007.
- [74] T. Bui-Thanh, M. Damodaran, and K.E. Willcox. Aerodynamic data reconstruction and inverse design using proper orthogonal decomposition. *AIAA Journal*, 42(5):1505–1516, 2004.
- [75] P. A. LeGresley and J.J. Alonso. Dynamic domain decomposition and error correction for reduced order models. In *41st AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, AIAA Paper 2003-0250*, pages 1–13, 2003.
- [76] D.J. Lucia, P.I. King, and P.S. Beran. Reduced order modeling of a two-dimensional flow with moving shocks. *Computers and Fluids*, 32:917–938, 2003.
- [77] J. L. Lumley. The structure of inhomogeneous turbulent flows. In *Atmospheric Turbulence and Radio Wave Propagation*, edited by A. M. Yaglom and V. L. Tatarski, Moscow, pages 166–178, 1967.
- [78] A. Cohen. *Numerical analysis of wavelet methods*, volume 32 of *Studies in Mathematics and its Applications*. North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 2003.
- [79] H. Heijmans and J. Goutsias. “Nonlinear Multiresolution Signal Decomposition Schemes—Part II: Morphological Wavelets.” *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000.
- [80] E. Simoncelli and J. Portilla. Texture characterization via joint statistics of wavelet coefficient magnitudes. In *Fifth International Conference on Image Processing*, October 1998.
- [81] D. Stanhill and Y. Y. Zeevi. 2d multiwavelets for image representation. *The 19th Convention of the IEEE*, pages 251–254, 1996.
- [82] D. Weitzer, D. Stanhill, and Y. Y. Zeevi. Nonseparable two-dimensional multiwavelet transform for image coding and compression. *Proc. SPIE*, 3309: 944–954, 1997.
- [83] Dennis, S. C. R. 1985 Compact explicit finite difference approximations to the Navier–Stokes equation. In *Ninth Intl Conf. on Numerical Methods in Fluid Dynamics* (ed. Soubbaramayer and J. P. Boujot). Lecture Notes in Physics, vol. 218, pp. 23–51. Springer.
- [84] C. N. Dawson, M. L. Martínez-Canales; Characteristic-Galerkin approximation to a system of shallow water equation. *Numer. Math.* 86 (2000), p.p 239-256.
- [85] R. Temam, *Navier-Stokes Equations*, North-Holland, Amsterdam, 1977.

- [86] A. Parekh and R. Gallager. A Generalized Processor Sharing Approach to Flow Control in Integrated Services Networks: The Single-Node Case. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1(3):344–357, June 1993.
- [87] O. GHATTAS AND J.-H. BARK, *Optimal control of two- and three-dimensional incompressible Navier–Stokes flows*, *Journal of Computational Physics*, 136 (1997), pp. 231–244.
- [88] M. HEINKENSCHLOSS, *Formulation and analysis of a sequential quadratic programming method for the optimal Dirichlet boundary control of Navier-Stokes flow*, Tech. Rep. TR97-14, Department of Computational and Applied Mathematics, Rice University, May 1997.
- [89] P.L. Lions, *Mathematical Topics in Fluid Mechanics. Vol. 1: Incompressible models.*, Oxford University Press, 1996.
- [90] S.A Finogenov and Y.A. Kuznetsov. Two stage fictitious components methods for solving the Dirichlet boundary value problem. *Sov. J. Num. Anal. Math. Modelling*, 3:301–323, 1988.
- [91] Beylkin G., Coifman R. and Rokhlin V. (1991) Fast wavelet transform, *Comm. Pure Appl.Math.*, **44**, pp. 141–183.
- [92] Coifman R.R., Wickerhauser M.V. (1993) Wavelets analysis and signal processing, in *Wavelets*, SIAM, pp. 153–178.
- [93] Cohen A., Daubechies I., Vial P. (1993) Wavelets on the interval and fast wavelet transforms, preprint.
- [94] Dahlke S., Weinreich I. (1993) Wavelet–Galerkin methods, *Constructive approximation*, **9**, pp 237–262.
- [95] Daubechies I. (1988) Orthonormal bases of compactly supported wavelets, *Comm. Pure Appl. Math.*, **41**, pp. 906–1003.
- [96] Fedorova A.N, Zeitlin M.G. (1996) Wavelets in Dynamics, Optimal Control and Galerkin Approximations, *IEEE Digital Signal Processing Workshop*, Norway, pp. 409–412.
- [97] Theodossiou V. M. & Sousa A. C. M. (1986) An Efficient Algorithm for Solving the Incompressible Fluid Flow Equations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 6, 8, p. 557–572.
- [98] Hall C. A., Porsching T. A. & Mesina G. L. (1992) On a Network Method for Unsteady Incompressible Fluid Flow on Triangular Grids. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 15, 12, p. 1383–1406.
- [99] Gresho P. M. (1991) Incompressible Fluid Flow Dynamics: Some Fundamental Formulation Issues. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23, p. 413–453.

- [100] J. F. Brady and A. Acrivos, *Steady flow in a channel or tube with an accelerating surface velocity. An exact solution to the Navier-Stokes equations with reverse flow*, *J. Fluid Mech.*, 112 (1981), pp. 127–150.
- [101] J. R. OCKENDON, *The unsteady motion of a small sphere in a viscous fluid*, *J. Fluid Mech.*, 34 (1968), pp. 229–239.
- [102] V. Isakov, *Inverse problems for partial differential equations*, Springer-Verlag, Berlin, 1998.
- [103] J. Han, From PID to active disturbance rejection control, *IEEE Trans. Ind. Elec.*, vol. 56, pp. 900-906, 2009.
- [104] M. Fliess, C. Join, Model-free control and intelligent PID controllers: towards a possible trivialization of nonlinear control?, *15th IFAC Symp. System Identif.*, Saint-Malo, 2009 (online <http://hal.inria.fr/inria-00372325/en/>).
- [105] L. Jaulin and E. Walter. Guaranteed tuning, with application to robust control and motion planning. *Automomatica*, 32(8):1217–1221, 1996.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : Erbil, Türker Nazmi
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum tarihi ve yeri : 01.04.1984 Burdur
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (312) 213 05 74
e-mail : tnerbil@etu.edu.tr

Eğitim

| Derece | Eğitim Birimi | Mezuniyet Tarihi |
|--------|-----------------------------------------------------------------|------------------|
| Lisans | Dokuz Eylül Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği | 2007 |

İş Deneyimi

| Yıl | Yer | Görev |
|-----------|----------|---------------------|
| 2008-2010 | TOBB ETÜ | Araştırma Görevlisi |

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Erbil N. T., Kasnakoğlu C., Akış kontrolü problemleri için Dalgacık dönüşümü ile Bölgesel Modelleme, Türkiye Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, İstanbul, Türkiye, Ekim 2008.

Erbil N. T., Kasnakoğlu C., "Obtaining regional dynamical models for flow control using wavelet transform," med, pp.576-581, 2009 17th Mediterranean Conference on Control and Automation, 2009

Erbil N. T., Kasnakoğlu C., Dalgacık dönüşümü ile değişik akmazlık koşulları altında akış kontrolü problemlerinin bölgesel modellemesi, Türkiye Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, İstanbul, Türkiye, Ekim 2009

Erbil N. T., Kasnakoğlu C., Feedback flow control employing local dynamical modelling with wavelets, Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, Volume 15, Issue 6 December 2009 , pages 493 - 513