

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR SUALTI ARACININ MODELLENMESİ
BENZETİMİ VE DENETLEYİCİ TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Cesur Cevdet OKUTAN**

**Anabilim Dalı: MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
Programı: SİSTEM DİNAMİĞİ VE KONTROL**

HAZİRAN 2008

**BİR SUALTI ARACININ MODELLENMESİ
BENZETİMİ VE DENETLEYİCİ TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Cesur Cevdet OKUTAN
(503051603)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Haziran 2008**

**Tez Danışmanı: Doç.Dr. Şeniz ERTUĞRUL
İkinci Danışman: Doç.Dr. Murat AYDIN
Diğer Jüri Üyeleri: Prof.Dr. Hakan TEMELTAŞ
Y. Doç.Dr. Z. Yağız BAYRAKTAROĞLU
Y. Doç.Dr. İ. Murat KOÇ**

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Bu çalışmamda değerli bilgileri ile bana yol gösteren sayın hocalarım Doç. Dr. Şeniz Ertuğrul ve Doç. Dr. Murat Aydın ile yardımlarını esirgemeyen TÜBİTAK MAM BTE çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2008

Cesur Cevdet Okutan

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	
SUMMARY	
1. GİRİŞ	1
1.1. Sualtı Aracının Bileşenleri	2
1.2. Literatürde İnsansız Sualtı araçları	2
1.2.1. ARIES ve Phoenix	2
1.2.2. ORCA	3
1.2.3. CUAUV	4
1.2.4. REMUS	4
2. MATEMATİKSEL MODELİN OLUŞTURULMASI	5
2.1. Giriş	5
2.2. Kinematik	5
2.2.1. Hız Dönüşüm Matrisinin Bulunması	7
2.2.2. Açısal Hız Dönüşüm Matrisinin Bulunması	8
2.3. Hareket Denklemleri	11
2.3.1. Doğrusal Hareket Denklemleri	11
2.3.2. Dönme Hareket Denklemleri	13
3. ARACA ETKİYEN KUVVETLER	16
3.1. Sürtünme Kuvvet ve Momentleri	16
3.2. Eksu Kütle Etkisi	18
3.3. Hidrostatik Kuvvet ve Momentler	20
3.4. İtme Kuvvet ve Moment	21
4. SUALTI ARACI BENZETİMİ	22
4.1. Benzetim Modelinin Doğrulaması	24
4.1.1. Standart Manevra Testleri	25
5. DENETLEYİCİ TASARIMI	28

5.1.	Giriş	28
5.2.	Derinlik Denetleyici Tasarımı	29
5.2.1.	Giriş	29
5.2.2.	Doğrusal Derinlik Modeline Kayan Kipli Denetleyici Tasarımı	29
5.3.	Rota Denetleyici Tasarımı	34
5.3.1.	Giriş	34
5.3.2.	Doğrusal Rota Modeline Kayan Kipli Denetleyici Tasarımı	34
5.3.3.	Doğrusal Olmayan Modele Kayan Kipli Denetleyici Tasarımı	35
5.3.4.	Bulanık Mantık Denetleyici Tasarımı	40
6.	SONUÇLAR	46
	KAYNAKLAR	48
	ÖZGEÇMİŞ	50

KISALTMALAR

AUV	: Autonomous Underwater Vehicle
ROV	: Remotely Operated Vehicle
n DOF	: n Degrees of Freedom
PID	: Proportional Integral Derivative
NPSC	: Naval Postgraduate School of California
MIT	: Massachusetts Institute of Technology

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 : Altı Serbestlik Dereceli Hareketin Eksenlerdeki Tanımı	6
Tablo 3.1 : Sürtünme Katsayısı Tablosu	18
Tablo 3.2 : Ampirik χ Değerleri	19
Tablo 3.3 : Eksu Kütle Katsayı Tablosu	20
Tablo 5.1 : Kural Tablosu	41
Tablo 5.2 : Bulanık Mantık Kural İsimlerinin Açıklaması	41

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : İnsansız Sualtı Aracı Bileşenleri	2
Şekil 1.2 : ARIES (üstte) ve Phoenix (altta).....	3
Şekil 1.3 : MIT Tarafından Geliştirilen ORCA.....	3
Şekil 1.4 : Cornell Üniversitesi Tarafından Geliştirilen Sualtı Aracı.....	4
Şekil 1.5 : REMUS Sualtı Aracı.....	4
Şekil 2.1 : Dünya Eksen Takımı.....	5
Şekil 2.2 : Gövde Sabitli Eksen Takımı	6
Şekil 2.3 : Dünya Eksen Takımından Gövde Eksen Takımına Dönüşüm.....	7
Şekil 2.4 : Dünya Eksen Takımı ve Gövde Sabitli Eksen Takımı.....	8
Şekil 3.1 : R(x) Sualtı Araç Formu.....	17
Şekil 4.1: Sualtı Araç Benzetim Modeli.....	24
Şekil 4.2: Benzetim Modellerinin Karşılaştırılması	25
Şekil 4.3 : Dönüş Dairesi Testi: X-Y Konum.....	26
Şekil 4.4 : Dönüş Dairesi Testi: U Hızı-Zaman.....	26
Şekil 4.5 : Dönüş Dairesi Testi: r Sapma Açısız Hızı-Zaman	26
Şekil 4.6 : Zig-Zag Testi: Sapma Açısız Hızı- Zaman	27
Şekil 4.7 : Zig-Zag Testi: u Boyuna Hızı-Zaman	27
Şekil 5.1 : Kayan Kipli Derinlik Denetleyici Tasarımı	31
Şekil 5.2 : Doğrusallaştırılmış Modelin Referans Cevabı	33
Şekil 5.3 : Doğrusal Olmayan Modelin Referans Cevabı.....	33
Şekil 5.4 : Doğrusallaştırılmış Modelin Referans Cevabı	35
Şekil 5.5 : Doğrusal Olmayan Modelin Referans Cevabı.....	35
Şekil 5.6 : Kayan Kipli Denetleyici Tasarımı.....	37
Şekil 5.7: Kd ile Psi Basamak Giriş Cevabı	38
Şekil 5.8: Kd Değişimi	38
Şekil 5.9 : λ Optimizasyon Sonucu.....	39
Şekil 5.10 : λ Değişimi Basamak Cevabı	39

Şekil 5.11 : Bulanık Mantık Denetleyici Tasarımı	40
Şekil 5.12 : Üyelik Fonksiyonu	40
Şekil 5.13 : Bulanık Mantık Denetleyici Çıkış Kazancı- Ölçeklendirme2.....	42
Şekil 5.14 : Araç Maksimum Dönme Hızı	42
Şekil 5.15 : Ölçeklendirme2 Değeri ile Çıkış Kazancı Grafiği	43
Şekil 5.16 : 10 Derece Basamak Girişi Cevabı.....	43
Şekil 5.17 : 40 Derece Basamak Girişi Cevabı.....	44
Şekil 5.18 : 10 Derece Basamak Girişi Cevabı	44

SEMBOL LİSTESİ

W	: Ağırlık
B	: Kaldırma Kuvveti
g	: Yerçekimi İvmesi
m	: Kütle
ρ	: Yoğunluk
V	: Araç Hacmi
c_d	: Sürtünme Katsayısı
R	: Doğrusal Hız Dönüşüm Matrisi
T	: Açısal Hız Dönüşüm Matrisi
x	: x Eksenine Boyunca Konum
y	: y Eksenine Boyunca Konum
z	: z Eksenine Boyunca Konum
ϕ	: Yalpa Euler Açısı
θ	: Yunuslama Euler Açısı
ψ	: Sapma Euler Açısı
u	: x_b Eksenindeki Hız Bileşeni
v	: y_b Eksenindeki Hız Bileşeni
w	: z_b Eksenindeki Hız Bileşeni
p	: x_b Eksenine Etrafındaki Açısal Hız Bileşeni
q	: y_b Eksenine Etrafındaki Açısal Hız Bileşeni
r	: z_b Eksenine Etrafındaki Açısal Hız Bileşeni
X	: x_b Eksenine Boyunca Etkiyen Kuvvet Bileşeni
Y	: y_b Eksenine Boyunca Etkiyen Kuvvet Bileşeni
Z	: z_b Eksenine Boyunca Etkiyen Kuvvet Bileşeni
K	: x_b Eksenine Etrafında Etkiyen Moment Bileşeni
M	: y_b Eksenine Etrafında Etkiyen Moment Bileşeni
N	: z_b Eksenine Etrafında Etkiyen Moment Bileşeni
$\dot{\phi}$: Yalpa Euler Açısal Hızı
$\dot{\theta}$: Yunuslama Euler Açısal Hızı
$\dot{\psi}$: Sapma Euler Açısal Hızı
I_x	: x_b Eksenine Etrafındaki Eylemsizlik Momenti
I_y	: y_b Eksenine Etrafındaki Eylemsizlik Momenti
I_z	: z_b Eksenine Etrafındaki Eylemsizlik Momenti
\dot{x}	: x Eksenine Boyunca Hız
\dot{y}	: y Eksenine Boyunca Hız
\dot{z}	: z Eksenine Boyunca Hız
x_g	: Ağırlık Merkezinin Orjinden x_b Eksenine Boyunca Uzaklığı
y_g	: Ağırlık Merkezinin Orjinden y_b Eksenine Boyunca Uzaklığı
z_g	: Ağırlık Merkezinin Orjinden z_b Eksenine Boyunca Uzaklığı
x_b	: Hacim Merkezinin Orjinden x_b Eksenine Boyunca Uzaklığı
y_b	: Hacim Merkezinin Orjinden y_b Eksenine Boyunca Uzaklığı
z_b	: Hacim Merkezinin Orjinden z_b Eksenine Boyunca Uzaklığı

BİR SUALTI ARACININ MODELLENMESİ, BENZETİMİ VE DENETLEYİCİ TASARIMI

ÖZET

Bu tez çalışmasında; bir sualtı aracının benzetim modeli geliştirilmiştir. Rijit bir cismin kinematik ve dinamik denklemlerinden başlayarak altı serbestlik dereceli hareket denklemleri elde edilmiştir. Geliştirilen benzetim modeli eksü kütlesi, sürtünme, kaldırma kuvveti gibi hidrodinamik kuvvetleri ve ağırlık, itki kuvvetini içermektedir. Araç benzetim modelinin oluşturulması için gerekli parametreler literatürden alınmıştır.

Sualtı aracının kontrolü için kayan kipli denetleyici, durum geri beslemeli kayan kipli denetleyici ve bulanık mantık denetleyici olmak üzere üç çeşit denetleyici tasarlanmıştır. Her denetleyicinin MATLAB/Simulink'te hazırlanan doğrusal olmayan araç modeli ile benzetimi yapılmıştır.

Rota hareketi için basitleştirilmiş doğrusal olmayan araç modeli kullanılarak kayan kipli denetleyici tasarlanmıştır. Daha sonra bu denetleyicinin doğrusal olmayan sualtı araç modeli ile benzetimi yapılmıştır. Bu tasarım yönteminin kullanılması belirli parametrelerin seçilmesi gerekliliğine yol açmış ve bu parametreler hazırlanan temel bir eniyileme algoritması kullanılarak seçilmiştir.

Doğrusal olmayan sualtı araç modeli doğrusallaştırılarak doğrusal derinlik ve rota modeli elde edilmiştir. Bu modeller üzerinden durum geri beslemeli kayan kipli denetleyici tasarlanmıştır. Bu doğrusal modelden elde edilen denetleyici girişi doğrusal olmayan modele uygulanarak benzetimi yapılmıştır.

Rota hareketi için bulanık mantık denetleyici tasarlanmış ve bu denetleyici doğrusal olmayan benzetim modeli ile test edilmiştir. Daha sonra denetleyicinin performansını arttırmak için hazırlanan temel eniyileme algoritması kullanılarak belirli parametreler saptanmıştır.

Rota hareketi için tasarlanan denetleyicilerin karşılaştırıldığı bir çalışma hazırlanmış ve ileride yapılabilecek çalışmalar hakkında öneriler sunulmuştur.

MODELLING, SIMULATION AND CONTROL OF AN UNDERWATER VEHICLE

SUMMARY

In this thesis, simulation of an underwater vehicle motion has been developed. The six degrees-of-freedom dynamic equations of motion have been obtained starting with kinematic and dynamic equations of motion of a rigid body. The model developed in this thesis includes hydrodynamic forces such as added mass, viscous drag, buoyancy, weight and thrust force. Necessary parameters for the modeling of the vehicle have been obtained from the available literature.

For the control system of the underwater vehicle three types of controllers have been designed including sliding mode control, sliding mode control based on state feedback and fuzzy logic control. Each controller has been simulated with the nonlinear model derived in MATLAB/Simulink.

The sliding mode controller has been designed in the course plane using a simple nonlinear model. Then, the controller is implemented in the nonlinear simulation model. This design method requires the selection of certain parameters that were calculated by using a basic optimization algorithm in this study.

Linear model in the depth plane and the course plane has been derived from nonlinear Autonomous Underwater Vehicle model. Then, a sliding mode controller has been designed based on this linear model by using state feedback. The control law derived from this linear model has been used in simulation with nonlinear model.

Fuzzy logic controller has also been designed in the course plane and tested using the nonlinear simulation model. Then, a basic optimization algorithm has been used to optimize certain parameters to increase its performance.

A comparative study between the controllers designed in the course plane is presented and suggestions about future work are also given.

1. GİRİŞ

Okyanuslar dünyanın üçte ikisini kaplamasına rağmen kara ve atmosfere gösterilen ilgiye oranla yeterli ilgiyi görmemiştir. Okyanusun tüm derinlikleri keşfedilememiş ve okyanus derinliklerindeki maden kaynakları ya da yaşayan farklı organizmalar hakkında yeterli bilgi edinilememiştir. Sualtı araçları okyanusun derinliklerinin araştırılmasında çok önemli bir görev üstlenmektedir. Bu amaçla dünyada okyanus araştırmalarında kullanılmak üzere uzaktan kontrol edilebilen binlerce sualtı aracı (ROV) üretilmiştir. Bu araştırmalar sırasında karşılaşılan haberleşme güçlükleri ve karşılaşılan tehlikeler bu araçların insansız çalışabilen araçlar haline gelmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır [1].

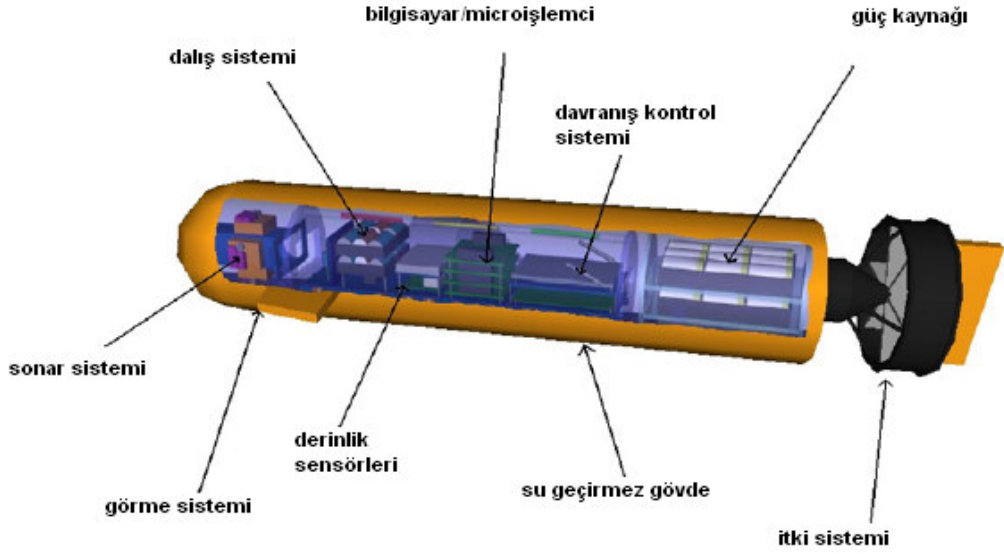
ROV' un engellerinden ve eksiklerinden kurtulmak için, tamamen otomatik, verilen görevleri üzerinde bulunan sensörler yardımıyla yerine getirebilen insansız sualtı araçları (AUV) geliştirilmeye başlanmıştır. İnsansız su altı aracı geliştirilmesinde geleneksel noktada amaç, dışarıdan müdahaleye gerek duymayan, karar verebilen, akıllı araçlar üretmektir. Bu amaçla çoğu araştırma amaçlı kullanılmak üzere 46'dan fazla farklı tipte insansız sualtı aracı geliştirilmiştir. Sensör ve malzeme teknolojisinin gelişmesi ise daha güvenilir sualtı araçları geliştirmenin ilk adımlarını oluşturmaktadır [2].

İnsansız sualtı araçlarının kullanım alanları sadece bilimsel araştırmalarla sınırlı değildir. Birçok ülke bu araçları askeri ve endüstriyel alanlarda farklı uygulamalarda kullanmaktadır. Bunların bazıları;

- Deniz yüzeyi harita çıkarma
- Jeolojik örnek toplama
- Uzun süreli gözlem (kirlilik)
- Denizaltına sistem kurma
- Denizaltına kurulan sistemlerin kontrol ve bakımları
- Deniz mayını arama ve imhasıdır [1].

1.1 Sualtı Aracının Bileşenleri

İnsansız bir sualtı aracının başarılı bir şekilde çalışması etrafından gerekli verileri gerçek zamanlı olarak toplayabilmesine bağlıdır. Bu verilerin toplanabilmesi için üzerinde birçok sensör sisteminin bulunmasına ihtiyacı vardır. İnsansız bir sualtı aracı en temelde itki sistemi, navigasyon sistemi, sensör sistemleri ve bileşenlerini kuru tutacak bir gövdeden oluşmaktadır. Bu bileşenler Şekil 1.1’de gösterilmiştir [2].



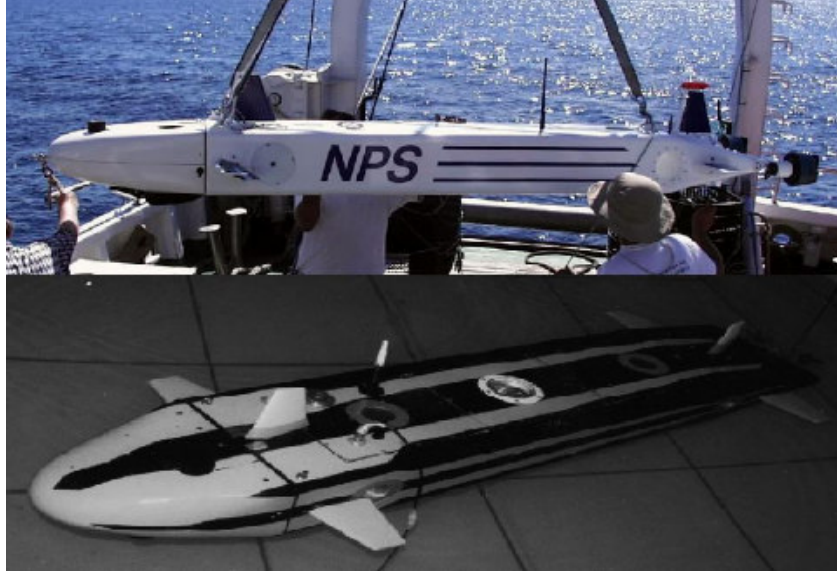
Şekil 1.1 : İnsansız Sualtı Aracı Bileşenleri

1.2 Literatürde İnsansız Sualtı araçları

Literatür incelendiğinde birçok sualtı aracı ile karşılaşılmaktadır. Bu çalışmada farklı tipteki bazı araçlar tanıtılmıştır [1].

1.2.1 ARIES ve Phoenix

NPSC ARIES ve Phoenix isimlerinde kendi sualtı araçlarına sahip bir enstitüdür. Enstitüde bu araçlara denetleyici tasarımı çalışmaları ve bilgisayar benzetimleri gibi araştırmalar yapılmaktadır. ARIES navigasyon sistemleri tasarımı, Phoenix ise denetleyici sistemleri tasarımı için kullanılmaktadır.



Şekil 1.2 : ARIES (üstte) ve Phoenix (altta)

1.2.2 ORCA

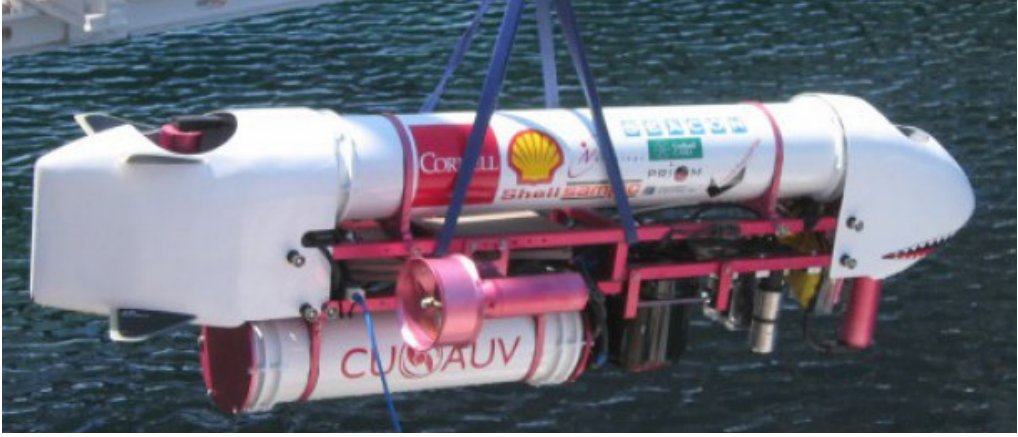
MIT' nin geliştirdiği ORCA' nın itki kuvveti yanlarda bulunan iki adet elektrik motoru ile sağlanmaktadır. Ayrıca derinlik kontrolü için de iki adet dikey elektrik motoruna sahiptir. ORCA üzerinde 2 adet jiroskop ve 3 adet ivmeölçer bulundurmaktadır.



Şekil 1.3 : MIT Tarafından Geliştirilen ORCA

1.2.3 CUAUV

CUAUV Cornell Üniversitesi tarafından geliştirilen bir sualtı aracıdır. İki adet yatay ve iki adet dikey itki sistemine sahiptir ve bu aracın yatay, dikey, yunuslama ve sapma olmak üzere dört serbestlik derecesine sahip olmasını sağlar. Üzerinde bulunan iki bilgisayardan biri görme sistemi için diğeri ise motor kontrol ve sonar sistemi içindir.



Şekil 1.4 : Cornell Üniversitesi Tarafından Geliştirilen Sualtı Aracı

1.2.4 REMUS

Woods Hole Oceanographic Enstitüsünde geliştirilen REMUS sualtı aracının MIT’de Prestero tarafından yapılan çalışmayla benzetim modeli oluşturulmuştur. Bu çalışmada REMUS parametreleri kullanılarak benzetim modeli elde edilmiştir.



Şekil 1.5 : REMUS Sualtı Aracı

2. MATEMATİKSEL MODELİN OLUŞTURULMASI

2.1 Giriş

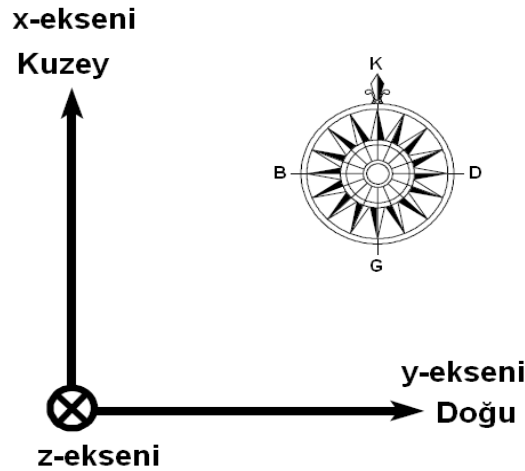
Bu bölümde altı serbestlik derecesine sahip bir aracın benzetim modelinin oluşturulması için gerekli olan genel hareket denklemleri elde edilecektir. Bu hareket denklemleri kinematik, aracın dinamiği ve harekete neden olan kuvvet ve momentler olmak üzere üç temel öğeden oluşur.

Bir sualtı aracının matematiksel modellenmesi birçok kaynakta incelenmiş bir konu olup bu çalışmada genel olarak [3] ve [4] referans alınmıştır.

2.2 Kinematik

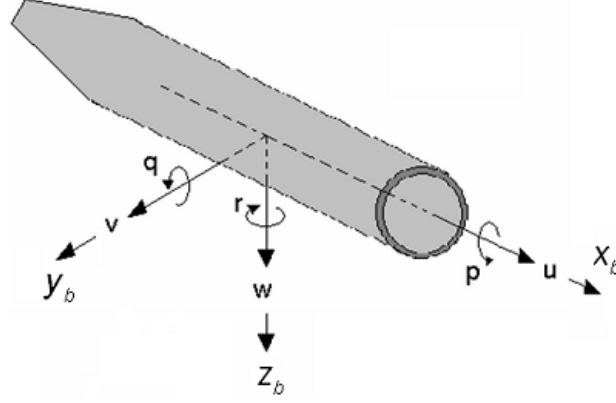
Sualtı aracının 6 serbestlik dereceli hareketi incelendiğinde, hareketin tanımlanabilmesi için iki eksen takımının kullanılmasına ihtiyaç duyulduğu gözlemlenir.

- Dünya Eksen Takımı (Kuzey – Doğu – Aşağı) : Dünya üzerinde sabitlenmiş eksen takımudur. x-ekseni kuzey, y-ekseni doğu ve z- eksteni de dünya yüzeyinden aşağıya doğru tanımlanmıştır.(NED). Sağ el kuralına göre tanımlanan bu eksen Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Dünya Eksen Takımı

Gövde Sabitli eksen takımı: Sualtı aracına sabitlenmiş eksen takımıdır (Body Fixed). Bu eksen takımı sualtı aracıyla birlikte hareket eden eksen takımıdır. Hareket denklemleri bu eksen takımında çözülecektir.



Şekil 2.2 : Gövde Sabitli Eksen Takımı

Sualtı aracının altı serbestlik dereceli hareketinin her bir eksen takımı için tanımı ve notasyonu Tablo 2.1’de gösterilmiştir. Bu çalışmada, SNAME notasyonu kullanılmıştır [3].

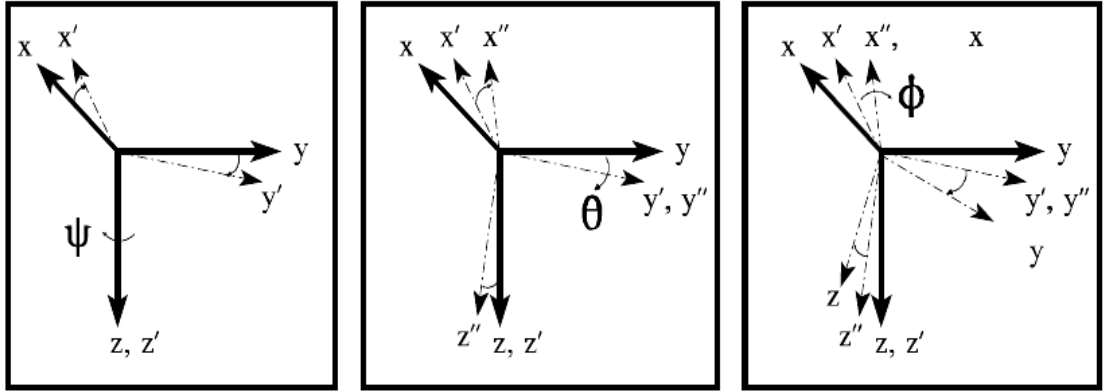
Tablo 2.1 : Altı Serbestlik Dereceli Hareketin Eksenlerdeki Tanımı

Serbestlik Derecesi	Tanım	Eksen	Kuvvet ve Momentler	Doğrusal ve Açısal Hız	Konum ve Euler Açıları
1	Boyuna Öteleme	x	X	u	x
2	Yanal Öteleme	y	Y	v	y
3	Dalıp Çıkma	z	Z	w	z
4	Yalpa	x	K	p	ϕ
5	Yunuslama	y	M	q	θ
6	Sapma	z	N	r	ψ

Tabloda tanımlı ilk üç değer ve onların zamana bağlı türevleri, platformun x-, y-, z- eksenindeki konumunu ve hareketini, diğer üç değer ise platformun oryantasyonunu ve dönme hareketlerini tanımlamaktadır.

2.2.1 Hız Dönüşüm Matrisinin Bulunması

Hareket denklemleri gövde sabitli ekseninde çözüldükten sonra dünya eksen takımına aktarılır. Tanımlanan eksen takımları arasında geçiş için üç dönüşüm matrisi sağ el kuralına uyularak uygulanır. Bu dönüşümde Şekil 2.3' te gösterildiği üzere, x, y, z eksen takımı z -ekseni etrafında ψ kadar döndürülerek x', y', z' eksen takımına çevrilir. Daha sonra yeni oluşan x', y', z' eksen takımı Y - eksenini etrafında θ kadar döndürülerek x'', y'', z'' eksen takımına çevrilir. En sonunda x'', y'', z'' eksen takımı X -ekseni etrafında ϕ kadar döndürülerek araç üzerine sabitlenmiş yeni x, y, z eksen takımı elde edilmiş olunur.



Şekil 2.3 : Dünya Eksen Takımından Gövde Eksen Takımına Dönüşüm

$R_z(\psi)$, z eksenini etrafında ψ açısı kadar dönüşüm matrisi; $R_y(\theta)$, y eksenini etrafında θ açısı kadar dönüşüm matrisi; $R_x(\phi)$, x eksenini etrafında ϕ açısı kadar dönüşüm matrisi olarak tanımlanır.

$$R_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\theta & -\cos\psi \sin\theta \sin\phi - \sin\psi \cos\phi & \cos\psi \sin\theta \cos\phi \\ \sin\psi \cos\theta & \sin\psi \sin\theta \sin\phi + \cos\psi \cos\phi & \sin\psi \sin\theta \cos\phi - \cos\psi \sin\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta \sin\phi & \cos\theta \cos\phi \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Sağ el kuralına göre elde ettiğimiz $R = R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\phi)$ dönüşüm matrisi ile gövde sabitli eksen takımında tanımlanan hız vektörü, dünya ekseninde tanımlanan hız vektörüne çevrilebilir.

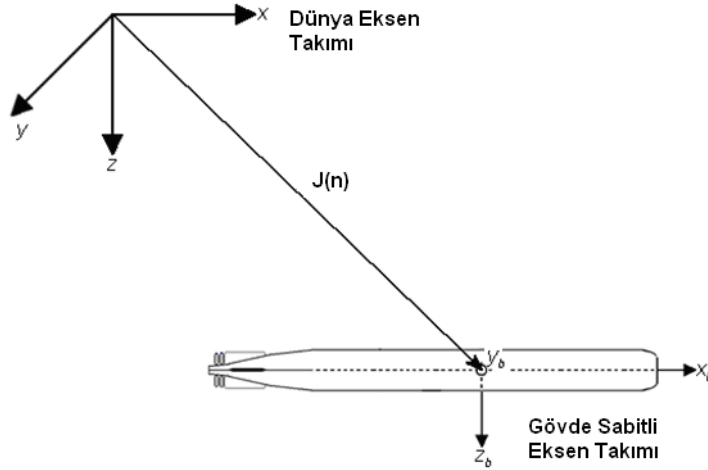
$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Gövde sabitli eksen takımından dünya eksen takımına dönüşüm matrisi R ' nin ortogonal olma özelliği kullanılarak (2.4) eşitliği yazılabilir.

$$R^{-1} = R^T \quad (2.4)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = R^T \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

2.2.2 Açısal Hız Dönüşüm Matrisinin Bulunması



Şekil 2.4 : Dünya Eksen Takımı ve Gövde Sabitli Eksen Takımı

Gövde sabitli eksen takımında tanımlı açısal hız vektörü ile dünya eksen takımında tanımlı açısal hız vektörü arasında dönüşüm matrisi T olarak tanımlanır. T matrisi farklı yollar kullanılarak bulunabilir. Bu çalışmada [3] numaralı referans kullanılarak (2.6) yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + R_x^T(\phi) \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + R_x^T(\phi) R_y^T(\theta) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

T açışal hız dönüşüm matrisinin bulunmasında (2.1) matrisleri kullanılır ve (2.6) numaralı denklemde yerine yerleştirilir.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

(2.7) denkleminde matris çarpımları yapılır.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \cos\theta\sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

(2.8) denklemiyle dünya eksen takımında tanımlanmış olan hız vektöründen gövde sabitli eksen takımında tanımlanmış olan hız vektörüne dönüşüm matrisi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \cos\theta\sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

T matrisi ortogonal matris olmadığından $T^{-1} \neq T^T$ yazılabilir. Gövde sabitli eksen takımında tanımlanmış olan hız vektöründen dünya eksen takımında tanımlanmış olan hız vektörüne dönüşüm matrisi;

$$T = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi / \cos\theta & \cos\phi / \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Tablo 2.1’de gövde sabitli ekseninde tanımladığımız hız bileşenlerini $V_{gövde}$ olarak tanımlarsak ve dünya sabitli ekseninde tanımlı hız bileşenlerini $V_{dünya}$ olarak tanımlarsak;

$$[V]_{gövde} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$[V]_{dünya} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Gövde sabitli eksen takımında tanımlanmış olan hız vektöründen dünya eksen takımında tanımlanmış olan hız vektörüne dönüşüm matrisi;

$$[V]_{gövde} = \begin{bmatrix} R^T & 0 \\ 0 & T^{-1} \end{bmatrix} [V]_{dünya} \quad (2.15)$$

Gövde sabitli eksen takımında tanımlanmış olan hız vektöründen dünya eksen takımında tanımlanmış olan hız vektörüne dönüşüm matrisi;

$$[V]_{dünya} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix} [V]_{gövde} \quad (2.16)$$

2.3 Hareket Denklemleri

2.3.1 Doğrusal Hareket Denklemleri

Aracımızın rijit olduğu ve dünya dönüş hızının araca etkiyen hidrodinamik kuvvetler yanında ihmal edilebilecek kadar küçük olduğunu kabul eder ve gövde sabitli eksen takımına göre lineer momentumun korunumunu uygularsak [4],

$$\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = \sum_{i=1}^N \frac{d}{dt} \left(m_i \vec{v}_i \right) \quad (2.17)$$

$$\vec{v}_i = \vec{v}_0 + \vec{\omega} \times \vec{r}_i \quad (2.18)$$

r_i , her bir parçacığın gövde sabitli eksen takımına göre konum vektörü; v_i , her bir parçacığın hareketli eksen takımına göre hız vektörüdür. v_i her bir "i" noktasının lineer ve dönme hızının bileşiminden oluşmaktadır.(2.18) denklemi (2.17) denkleminde yerine konur.

$$\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = \sum_{i=1}^N \frac{d}{dt} \left(m_i \left(\vec{v}_0 + \vec{\omega} \times \vec{r}_i \right) \right) \quad (2.19)$$

r_G , ağırlık merkezinin gövde sabitli ekseninde konum vektörüdür ve genel hareket denklemini elde etmek için $r_{G \neq 0}$ seçilir.

$$m = \sum_{i=1}^N m_i \quad (2.20)$$

$$m \vec{r}_G = \sum_{i=1}^N m_i \vec{r}_i \quad (2.21)$$

(2.20) ve (2.21) denklemleri (2.19) 'da yerine konur.

$$\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = m \frac{\partial \vec{v}_0}{\partial t} + m \frac{d}{dt} \left(\vec{\omega} \times \vec{r}_G \right) \quad (2.22)$$

$$\dot{\vec{r}}_G = \vec{v}_0 + \vec{\omega} \times \vec{r}_G \quad (2.23)$$

(2.23), denklemi (2.22) denkleminde yerine konursa (2.25) denklemi elde edilir.

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i = m \left(\frac{\partial \vec{v}_0}{\partial t} + \vec{\omega} \times \vec{v}_0 + \frac{d\vec{\omega}}{dt} \times \vec{r}_G + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_G) \right) \quad (2.24)$$

$\vec{v}_0 = \{u, v, w\}$, gövde sabitli ekseninde tanımlı hız vektörü; $\vec{r}_G = \{x_G, y_G, z_G\}$,

gövde sabitli ekseninde tanımlı ağırlık merkezi vektörü; $\vec{\omega} = \{p, q, r\}$, gövde sabitli

ekseninde tanımlı açısal hız vektörü; $\vec{F} = \{X, Y, Z\}$, gövde sabitli ekseninde tanımlı dış

kuvvet vektörü olarak tanımlıdır.

$$\vec{\omega} \times \vec{v}_0 = \begin{bmatrix} i & j & k \\ p & q & r \\ u & v & w \end{bmatrix} \rightarrow \vec{\omega} \times \vec{v}_0 = \begin{bmatrix} qw - rv \\ ru - pw \\ pv - qu \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$\frac{d\vec{\omega}}{dt} \times \vec{r}_G = \begin{bmatrix} i & j & k \\ \frac{dp}{dt} & \frac{dq}{dt} & \frac{dr}{dt} \\ x_G & y_G & z_G \end{bmatrix} \rightarrow \frac{d\vec{\omega}}{dt} \times \vec{r}_G = \begin{bmatrix} \frac{dq}{dt} z_G - \frac{dr}{dt} y_G \\ \frac{dr}{dt} x_G - \frac{dp}{dt} z_G \\ \frac{dp}{dt} y_G - \frac{dq}{dt} x_G \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$\vec{\omega} \times \vec{r}_G = \begin{bmatrix} i & j & k \\ p & q & r \\ x_G & y_G & z_G \end{bmatrix} \rightarrow \vec{\omega} \times \vec{r}_G = \begin{bmatrix} qz_G - ry_G \\ rx_G - pz_G \\ py_G - qx_G \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_G) = \begin{bmatrix} (qy_G + rz_G)p - (q^2 + r^2)x_G \\ (rz_G + px_G)q - (r^2 + p^2)y_G \\ (px_G + qy_G)r - (p^2 + q^2)z_G \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

(2.24) numaralı denkleme (2.25), (2.26), (2.28) numaralı denklemler yerleştirilirse genel doğrusal hareket denklem seti elde edilir.

$$\begin{aligned} X &= m \left[\dot{u} + qw - rv + x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(rp + \dot{q}) \right] \\ Y &= m \left[\dot{v} + ru - pw - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r}) \right] \\ Z &= m \left[\dot{w} + pv - qu - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rp + \dot{p}) \right] \end{aligned} \quad (2.29)$$

2.3.2 Dönme Hareket Denklemleri

Aracımızın rijit olduğu ve dünya dönüş hızının araca etkiyen hidrodinamik kuvvetler yanında ihmal edilebilecek kadar küçük olduğunu kabul eder ve gövde sabitli eksen takımına göre açısal momentumun korunumunu uygularsak;

$$\sum_{i=1}^N \left(\vec{M}_i + \vec{r}_i \times \vec{F}_i \right) = \sum_{i=1}^N \vec{r}_i \times \frac{d}{dt} \left(m_i \vec{v}_i \right) \quad (2.30)$$

\vec{M}_i , i parçacığına etkiyen dış moment vektörü; \vec{F}_i , i parçacığına etkiyen dış kuvvet vektörü; r_i , her bir parçacığın gövde sabitli eksen takımına göre konumu; v_i , her bir parçacığın hareketli eksen takımına göre hız vektörüdür. (2.18), (2.20), (2.21) denklemleri (2.30) denklemine yerine konur.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \left(\vec{M}_i + \vec{r}_i \times \vec{F}_i \right) &= m \vec{r}_G \times \left[\frac{\partial \vec{v}_0}{\partial t} + \vec{\omega} \times \vec{v}_0 \right] + \sum_{i=1}^N m_i \vec{r}_i \times \left(\frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t} \times \vec{r}_i \right) + \\ &+ \sum_{i=1}^N m_i \vec{r}_i \times \left(\vec{\omega} \times \left(\vec{\omega} \times \vec{r}_i \right) \right) \end{aligned} \quad (2.31)$$

(2.25) numaralı denklem kullanılarak (2.32) eşitliği elde edilir.

$$m \vec{r}_G \times \left[\frac{\partial \vec{v}_0}{\partial t} + \vec{\omega} \times \vec{v}_0 \right] = m \begin{bmatrix} y_G (\dot{w} + pv - qu) - z_G (\dot{v} + ru - pw) \\ z_G (\dot{u} + qw - rv) - x_G (\dot{w} + pv - qu) \\ x_G (\dot{v} + ru - pw) - y_G (\dot{u} + qw - rv) \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$\vec{a} \times (\vec{b} \times \vec{c}) = (\vec{a} \cdot \vec{c}) \vec{b} - (\vec{a} \cdot \vec{b}) \vec{c}$ özelliği kullanılarak (2.33) eşitliği yazılır.

$$\sum_{i=1}^N m_i \vec{r}_i \times \left(\frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t} \times \vec{r}_i \right) = \sum_{i=1}^N m_i \left(\left(\vec{r}_i \cdot \vec{r}_i \right) \frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t} - \left(\frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t} \cdot \vec{r}_i \right) \vec{r}_i \right) \quad (2.33)$$

$\vec{r}_i = \{x_i, y_i, z_i\}$, $\vec{\omega} = \{p, q, r\}$ olduğu göz önüne alınırsa (2.33) denkleminde (2.34) denklem takımı yazılabilir.

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^N m_i \left((y_i^2 + z_i^2) \dot{p} - (y_i \dot{q} + z_i \dot{r}) x_i \right) \\
& \sum_{i=1}^N m_i \left((x_i^2 + z_i^2) \dot{q} - (x_i \dot{p} + z_i \dot{r}) y_i \right) \\
& \sum_{i=1}^N m_i \left((x_i^2 + y_i^2) \dot{r} - (x_i \dot{p} + y_i \dot{q}) z_i \right)
\end{aligned} \tag{2.34}$$

Gövde sabitli eksen takımında x-y-z eksenlerine göre eylemsizlik matrislerini yazarsak;

$$\begin{aligned}
I_{xx} &= \sum_{i=1}^N m_i (y_i^2 + z_i^2) & I_{yy} &= \sum_{i=1}^N m_i (x_i^2 + z_i^2) & I_{zz} &= \sum_{i=1}^N m_i (x_i^2 + y_i^2) \\
I_{xy} &= I_{yx} = -\sum_{i=1}^N m_i x_i y_i & I_{xz} &= I_{zx} = -\sum_{i=1}^N m_i x_i z_i & I_{yz} &= I_{zy} = -\sum_{i=1}^N m_i y_i z_i
\end{aligned} \tag{2.35}$$

(2.35), (2.34), denklemlerini (2.33) denkleminde yerine koyarsak (2.36) eşitliği elde edilir.

$$\sum_{i=1}^N m_i \vec{r}_i \times \left(\frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t} \times \vec{r}_i \right) = \begin{bmatrix} I_{xx} \dot{p} + I_{xy} \dot{q} + I_{xz} \dot{r} \\ I_{yx} \dot{p} + I_{yy} \dot{q} + I_{yz} \dot{r} \\ I_{zx} \dot{p} + I_{zy} \dot{q} + I_{zz} \dot{r} \end{bmatrix} \tag{2.36}$$

$\vec{a} \times (\vec{b} \times \vec{c}) = (\vec{a} \cdot \vec{c}) \vec{b} - (\vec{a} \cdot \vec{b}) \vec{c}$ özelliği kullanılarak (2.37) eşitliği yazılır.

$$\sum_{i=1}^N m_i \vec{r}_i \times \left(\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_i) \right) = \sum_{i=1}^N m_i \vec{r}_i \times \left((\vec{\omega} \cdot \vec{r}_i) \vec{\omega} - (\vec{\omega} \cdot \vec{\omega}) \vec{r}_i \right) \tag{2.37}$$

$\vec{r}_i = \{x_i, y_i, z_i\}$, $\vec{\omega} = \{p, q, r\}$ olduğu göz önüne alınırsa (2.37) denkleminin (2.38) denklem takımı yazılabilir.

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^N m_i (y_i r - z_i q) (x_i p + y_i q + z_i r) \\
& \sum_{i=1}^N m_i (z_i p - x_i r) (x_i p + y_i q + z_i r) \\
& \sum_{i=1}^N m_i (x_i q - y_i p) (x_i p + y_i q + z_i r)
\end{aligned} \tag{2.38}$$

(2.35) denklem takımını (2.38)' de yerine koyarak (2.39) elde edilir.

$$\begin{aligned}
& I_{yz}(q^2 - r^2) + I_{xz}pq - I_{xy}pr + (I_{zz} - I_{yy})rq \\
& I_{xz}(r^2 - p^2) + I_{xy}rq - I_{yz}pq + (I_{xx} - I_{zz})rp \\
& I_{xy}(p^2 - q^2) + I_{yz}pr - I_{xz}qr + (I_{yy} - I_{xx})qp
\end{aligned} \tag{2.39}$$

(2.32), (2.36), (2.39) denklemleri (2.31) denkleminde yerine konursa genel dönme hareket denklem seti elde edilir.

$$\begin{aligned}
K &= I_{xx}\dot{p} + I_{xy}\dot{q} + I_{xz}\dot{r} + I_{yz}(q^2 - r^2) + I_{xz}pq - I_{xy}pr + (I_{zz} - I_{yy})rq + \\
&\quad + m[y_G(\dot{w} + pv - qu) - z_G(\dot{v} + ru - pw)] \\
M &= I_{yx}\dot{p} + I_{yy}\dot{q} + I_{yz}\dot{r} + I_{xz}(r^2 - p^2) + I_{xy}rq - I_{yz}pq + (I_{xx} - I_{zz})rp + \\
&\quad + m[z_G(\dot{u} + qw - rv) - x_G(\dot{w} + pv - qu)] \\
N &= I_{zx}\dot{p} + I_{zy}\dot{q} + I_{zz}\dot{r} + I_{xy}(p^2 - q^2) + I_{yz}pr - I_{xz}qr + (I_{yy} - I_{xx})qp + \\
&\quad + m[x_G(\dot{v} + ru - pw) - y_G(\dot{u} + qw - rv)]
\end{aligned} \tag{2.40}$$

3. ARACA ETKİYEN KUVVETLER

Temelde sualtı aracına etkiyen kuvvet ve momentler, sürtünme kuvvet-momentleri, eksu kütle etkisi kuvvet ve momentleri, hidrostatik kuvvet ve momentleri, kontrol yüzeyi kuvvet ve momentleri ve itki kuvvet ve momentleridir [5,6].

$$\begin{aligned} F_{dis} &= F_{sürtünme} + F_{eksukütle} + F_{hidrostatik} + F_{kontrol} + F_{itki} \\ M_{dis} &= M_{sürtünme} + M_{eksukütle} + M_{hidrostatik} + M_{kontrol} + M_{itki} \end{aligned} \quad (3.1)$$

3.1 Sürtünme Kuvvet ve Momentleri

Sualtı aracına etkiyen sürtünme kuvvetleri, aracın x-y ve x-z düzlemlerine göre simetrik olduğu ve yüksek dereceli terimlerin (Y_{rv}, Y_{vv}) ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu kabulü altında yazılmıştır. Araca etkiyen kuvvetler genel olarak (3.2)'de gösterildiği gibi yazılabilir [6].

$$\begin{aligned} F_x &= X_{u|u} u|u| \\ F_y &= Y_{v|v} v|v| + Y_{r|r} r|r| \\ F_z &= Z_{w|w} w|w| + Z_{q|q} q|q| \\ K &= K_{p|p} p|p| \\ M &= M_{w|w} w|w| + M_{q|q} q|q| \\ N &= N_{v|v} v|v| + N_{r|r} r|r| \end{aligned} \quad (3.2)$$

(3.2) denkleminde yer alan $X_{uu}, Y_{vv}, Y_{rr}, Z_{ww}, Z_{qq} \dots$ gibi katsayı değerleri üç farklı yolla bulunabilir.

- Havuz testleri ile gerçeğe uygun hazırlanmış modelden elde edilmesi
- Sualtı aracının CAD modelini oluşturup, hesaplama dayalı akışkanlar mekaniği (HAD – CFD) yazılımlarını kullanarak
- Önceki deney verilerinden elde edilen ampirik formüllerden yararlanılarak

Bu çalışmada ampirik formüllerden yararlanılarak katsayı değerleri hesaplanmış ve REMUS sualtı aracı [5] için elde edilen ampirik değerler kullanılmıştır.

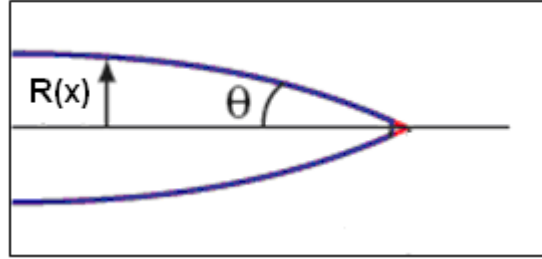
$$X_{u|u} = -\frac{1}{2} \rho c_d A_f \quad (3.3)$$

ρ , aracı çevreleyen su yoğunluğu; A_f , aracın ön yüzey alanı; c_d , sürtünme katsayısı olarak tanımlanır.

$$c_d = c_f \left[1 + 60 \left(\frac{d}{l} \right)^3 + 0.0025 \left(\frac{l}{d} \right) \right] \quad (3.4)$$

$$c_f = \frac{c_{ss} \pi A_p}{A_f} \quad A_p = ld$$

l , aracın uzunluğu; d , aracın çapı olarak tanımlanır [7]. (3.2) denklemindeki diğer katsayılar Şekil 3.1’de gösterilen araç geometrisine bağlı olarak hesaplanır



Şekil 3.1 : R(x) Sualtı Araç Formu

$$Y_{v|v} = -\frac{1}{2} \rho c_{dc} \int_{xt}^{xb} 2R(x)dx - 2 \left(\frac{1}{2} \rho S_{fin} c_{df} \right)$$

$$Y_{r|r} = -\frac{1}{2} \rho c_{dc} \int_{xt}^{xb} 2x|x|R(x)dx - 2x_{fin} |x_{fin}| \left(\frac{1}{2} \rho S_{fin} c_{df} \right)$$

$$M_{w|w} = \frac{1}{2} \rho c_{dc} \int_{xt}^{xb} 2xR(x)dx - 2x_{fin} \left(\frac{1}{2} \rho S_{fin} c_{df} \right) \quad (3.5)$$

$$M_{q|q} = -\frac{1}{2} \rho c_{dc} \int_{xt}^{xb} 2x^3 R(x)dx - 2x_{fin}^3 \left(\frac{1}{2} \rho S_{fin} c_{df} \right)$$

$$K_{p|p} = Y_{v|v} r^3_{ort}$$

c_{dc} , araç geometrisi $R(x)$ 'e bağlı sürtünme katsayısıdır ve silindirik cisimler için 1.1 olarak alınabilir [8]. c_{df} katsayısı hesabı için $c_{df} = 0.1 + 0.7t$ deneye dayalı formül kullanılabilir [9]. Burada t , kanatçıkların üst ve alt kısmının kalınlıklarının oranıdır.

Tablo 3.1 : Sürtünme Katsayısı Tablosu

$Z_{w w} = Y_{v v}$	$N_{v v} = -M_{w w}$
$Z_{q q} = Y_{r r}$	$N_{r r} = M_{q q}$

3.2 Eksu Kütle Etkisi

Eksu kütlesi etkisi, sualtı aracı su içinde ivmelenirken araçla beraber hareket eden kütlelerin yarattığı etkidir. Eksu kütlelerinin araç üzerinde etkilediği kuvveti aracın x-z ve x-y eksenlerinde simetrik olduğunu kabul ederek (3.6) numaralı denklem gibi tanımlanabilir. Simetrik olmayan bir araca etkileyen toplam kuvvet için [3]'e bakılabilir.

$$\begin{aligned} F_x &= X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{vr}vr + X_{rr}rr \\ F_y &= Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq \\ F_z &= Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp \\ K &= K_{\dot{p}}\dot{p} \\ M &= M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp \\ N &= N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq \end{aligned} \quad (3.6)$$

(3.6) numaralı denklem takımında SNAME notasyonu kullanılmıştır. y yönünde oluşan \dot{v} ivmesinin y yönündeki eksu kütle kuvveti F_y olarak tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} F_y &= Y_{\dot{v}}\dot{v} \\ Y_{\dot{v}} &= \frac{\partial Y}{\partial \dot{v}} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Literatürde eksu kütlesi katsayılarının hesaplanması için en yaygın olarak kullanılan yöntem iki boyutlu kesitsel değerler cinsinden hesaplanması yaklaşımı olan dilim teorisidir. Bu teori kullanılarak ve araç şeklinin elipsoit olduğu kabul edilirse eksanel eksu kütlesi etkisinin hesaplanması için (3.8)denklemini yazılabilir [10].

$$X_u = \frac{4\chi\rho\pi}{3} \frac{l}{2} r^2 \quad (3.8)$$

l , araç uzunluğu; ρ , aracı çevreleyen su yoğunluğu; r , araç yarıçapı olarak tanımlanır. χ ise araç uzunluğunun araç çapına oranına bağlı bir sabit olup deneye dayalı olarak hesaplanabilir [10].

Tablo 3.2 : Ampirik χ Değerleri

L/D	χ
0.1	0.148
0.2	3.008
0.4	1.428
0.6	0.9078
0.8	0.6514
1.0	0.50
1.5	0.3038
2.0	0.210
2.5	0.1583
3.0	0.1220
5.0	0.05912
7.0	0.03585
10.0	0.02071

a_{fin} , kanatçığın araç ekseninden maksimum yüksekliği; $R(x)$, araç formu olarak tanımlanırsa, üzerinde kanatçık bulunan bir daire diliminin eksu kütle etkisi aşağıdaki gibi tanımlanır [10].

$$m_a(x) = \pi\rho R(x)^2$$

$$m_{af}(x) = \pi\rho(a_{fin}^2 - R(x)^2 + \frac{R(x)^4}{a_{fin}^2}) \quad (3.9)$$

(3.6) denklem takımındaki eksü kütlesi katsayıları (3.10) numaralı denklem takımında hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned}
Y_{\dot{v}} &= -\int_{xt}^{xf} m_a(x) dx - \int_{xt}^{xf} m_{af}(x) dx - \int_{xt}^{xf} m_a(x) dx \\
Y_{\dot{r}} &= -\int_{xt}^{xf} m_a(x) dx - \int_{xt}^{xf^2} x m_{af}(x) dx - \int_{xf^2}^{xb^2} x m_a(x) dx \\
Z_{\dot{q}} &= \int_{xt}^{xf} x m_a(x) dx - \int_{xfin}^{xfin^2} x m_{af}(x) dx - \int_{xbow}^{xfin^2} x m_a(x) dx \\
M_{\dot{q}} &= -\int_{xt}^{xf} x^2 m_a(x) dx - \int_{xf}^{xf^2} x^2 m_{af}(x) dx - \int_{xf^2}^{xb^2} x m_a(x) dx \\
K_{\dot{q}} &= \int_{xt}^{xf} \frac{2}{\pi} a^4_{fin} dx
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Aracın x-z ve x-y eksenlerinde simetrik olduğunu kabul edersek Tablo 3.3' teki eşitlikler yazılabilir.

Tablo 3.3 : Eksü Kütle Katsayı Tablosu

$Z_{\dot{w}} = Y_{\dot{v}}$	$N_{\dot{r}} = M_{\dot{q}}$	$Y_{ur} = X_{\dot{u}}$	$Z_{vp} = Y_{\dot{v}}$
$N_{\dot{v}} = -M_{\dot{w}}$	$X_{wq} = Z_{\dot{w}}$	$Y_{wp} = -Z_{\dot{w}}$	$M_{uq} = -Z_{\dot{q}}$
$X_{qq} = Z_{\dot{q}}$	$X_{vr} = -Y_{\dot{v}}$	$Y_{pq} = -Z_{\dot{q}}$	$M_{vp} = -Y_{\dot{r}}$
$Z_{rp} = Y_{\dot{r}}$	$X_{rr} = -Y_{\dot{r}}$	$Z_{uq} = -X_{\dot{u}}$	$M_{rp} = K_{\dot{p}} - N_{\dot{r}}$
$N_{ur} = -Y_{\dot{r}}$	$N_{wp} = Z_{\dot{q}}$	$N_{pq} = -(K_{\dot{p}} - M_{\dot{q}})$	$M_{\dot{w}} = Z_{\dot{q}}$

3.3 Hidrostatik Kuvvet ve Momentler

$\vec{r}_G = \{x_G, y_G, z_G\}$, ağırlık merkezi vektörü; $\vec{r}_B = \{x_B, y_B, z_B\}$ hacim merkezi vektörü, m, aracın kütlesi, ρ , aracı çevreleyen suyun yoğunluğu; g, yerçekimi ivmesi, ∇ , aracın hacmi olarak tanımlanır. $W = mg$, araç ağırlığı; $B = \rho g \nabla$, araca etkiyen kaldırma kuvveti olmak üzere f_g , ağırlık ve f_b , kaldırma kuvveti vektörleri gövde sabitli ekseninde (2.2) denklemini kullanılarak aşağıdaki gibi yazılır.

$$\vec{f}_g = R^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix} \quad \vec{f}_b = -R^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \vec{F}_{hidrostatik} &= \vec{f}_g - \vec{f}_b \\ \vec{M}_{hidrostatik} &= \vec{r}_G \times \vec{f}_G - \vec{r}_B \times \vec{f}_b \end{aligned} \quad (3.12)$$

(3.12) vektörel çarpımı yapılırsa gövde sabitli eksen takımında araca etkiyen hidrostatik kuvvet ve momentler denklem (3.13) olarak yazılır.

$$\begin{aligned} F_x &= (W - B) \sin \theta \\ F_y &= -(W - B) \cos \theta \sin \phi \\ F_z &= -(W - B) \cos \theta \cos \phi \\ K &= -(y_g W - y_b B) \cos \theta \cos \phi + (z_g W - z_b B) \cos \theta \sin \phi \\ M &= (z_g W - z_b B) \sin \theta + (x_g W - x_b B) \cos \theta \cos \phi \\ N &= -(x_g W - x_b B) \cos \theta \sin \phi - (y_g W - y_b B) \sin \theta \end{aligned} \quad (3.13)$$

3.4 İtki Kuvvet ve Moment

Bu çalışmada modellenen aracın 1.54 m/s sabit hızla hareket ettiği kabulü yapılırsa, itki kuvvetinin sürtünme kuvvetine eşit olduğu basit bir itki modeli kullanılmıştır [5].

$$F_x = -X_{u|u} |u| = -2.37 X_{u|u} \quad (3.14)$$

Aracın itkisinden dolayı oluşan momentin ise hidrostatik momente eşit olduğu kabulü yapılır.

$$K = -K_{hidrostatik} = (y_g W - y_b B) \cos \theta \cos \phi + (z_g W - z_b B) \cos \theta \sin \phi \quad (3.15)$$

4. SUALTI ARACI BENZETİMİ

(3.6) numaralı denklemdeki ivme terimlerini diğer terimlerden ayırarak (2.29), (2.40) ve (3.1) denklemleri birleştirilirse (4.1) matris formu elde edilir.

$$\begin{bmatrix} m-X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m-Y_{\dot{v}} & 0 & -mz_g & 0 & mx_g-Y_{\dot{r}} \\ 0 & 0 & m-Z_{\dot{w}} & my_g & -mx_g-Z_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & -mz_g & my_g & I_x-K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ mz_g & 0 & -mx_g-M_{\dot{w}} & 0 & I_y-M_{\dot{q}} & 0 \\ -my_g & mx_g-N_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & I_z-N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum X \\ \sum Y \\ \sum Z \\ \sum K \\ \sum M \\ \sum N \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

(3.1)' de tanımlanan dış kuvvet denklem takımından ivme terimleri ayrıldıktan sonra sisteme etkiyen toplam dış kuvvet aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \sum X &= X_{HS} + X_{u|u}|u| + (X_{wq-m})wq + (X_{qq} + mx_g)q^2 + (X_{vr} + m)vr + (X_{rr} + mx_g)r^2 \\ &\quad - my_g pq - mz_g pr + F_{itki} \\ \sum Y &= Y_{HS} + Y_{v|v}|v| + Y_{r|r}|r| + my_g r^2 + (Y_{ur} - m)ur + (Y_{wp} - m)wp \\ &\quad + (Y_{pq} - mx_g)pq + Y_{uv}uv + my_g p^2 + mz_g qr + Y_{u\delta u}u^2\delta_r \\ \sum Z &= Z_{HS} + Z_{w|w}|w| + Z_{q|q}|q| + (Z_{uq} + m)uq + (Z_{vp} - m)vp + (Z_{rp} - mx_g)rp + \\ &\quad + Z_{uw}uw + mz_g(p^2 + q^2) - my_g rq + Z_{u\delta u}u^2\delta_s \quad (4.2) \\ \sum K &= K_{HS} + K_{p|p}|p| - (I_z - I_y)qr + m(uq - vp) - mz_g(wp - ur) + K_{itki} \\ \sum M &= M_{HS} + M_{w|w}|w| + M_{q|q}|q| + (M_{uq} - mx_g)uq + (M_{vp} + mx_g)vp + \\ &\quad [M_{rp} - (I_x - I_z)]rp + mz_g(vr - wq) + M_{uw}uw + M_{u\delta u}u^2\delta_s \\ \sum N &= N_{HS} + N_{v|v}|v| + N_{r|r}|r| + (N_{ur} - mx_g)ur + (N_{wp} + mx_g)wp + \\ &\quad [N_{pq} - (I_y - I_x)]pq - my_g(vr - wq) + N_{uv}uv + N_{u\delta u}u^2\delta_r \end{aligned}$$

Bu çalışmada hazırlanan benzetim programında (4.1) ve (4.2) denklemleri kullanılmıştır. Bu benzetimde;

$$\begin{bmatrix} M \\ \text{k\u00fctle} \\ \text{eylemsizlik} \\ \text{eksuk\u00fctlesi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{hidrostatik Kuvvet ve Momentler} \\ \text{Hidrodinamik Kuvvet ve Momentler} \\ \text{İtki Kuvveti} \\ \text{Hareket Denklemi İvmesiz Terimler} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

M matrisinin tersi hesaplanıp her iki tarafla \u00e7arpılarak sol tarafta sadece ivme ifadeleri b\u0131rakılır.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M^{-1} \\ \text{k\u00fctle} \\ \text{eylemsizlik} \\ \text{eksuk\u00fctlesi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{hidrostatik Kuvvet ve Momentler} \\ \text{Hidrodinamik Kuvvet ve Momentler} \\ \text{İtki Kuvveti} \\ \text{Hareket Denklemi İvmesiz Terimler} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

B\u00f6ylece dinamik denklem takımı sayısal integrasyon ile benzetim yapılacak forma getirilir. \u00d6rnek olarak Euler integrasyonu yap\u0131larak;

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix}_{(t_0+\partial t)} = \partial t \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix}_{t_0} + \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix}_{t_0} \quad (4.5)$$

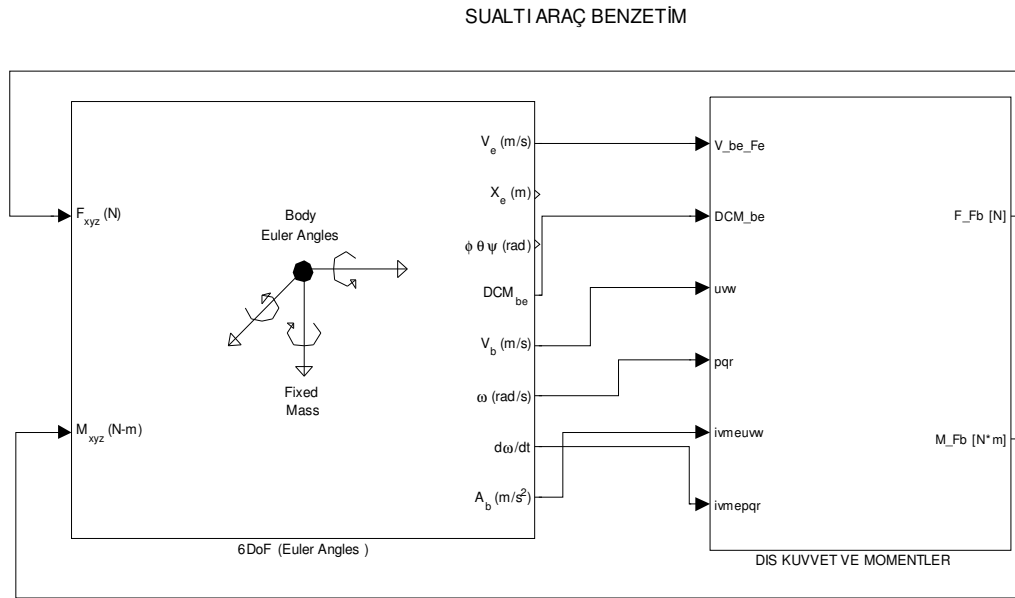
(2.15) numaralı denklem kullanılarak g\u00f6vde sabitli h\u0131z vekt\u00f6r\u00fcnden d\u00fcnya sabitli h\u0131z vekt\u00f6r\u00fcne ge\u00e7i\u015f yap\u0131lır. Buradan d\u00fcnya sabitli eksen takımındaki konum vekt\u00f6r\u00fc ise su denklemden elde edilir.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}_{(t_0+\partial t)} = \partial t \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}_{t_0} + \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}_{t_0} \quad (4.6)$$

Euler integrasyonu hazırlanan benzetim mantığını anlatmak amacıyla kullanılmıştır. Hazırlanan programda Runge Kutta metodu kullanılmıştır.

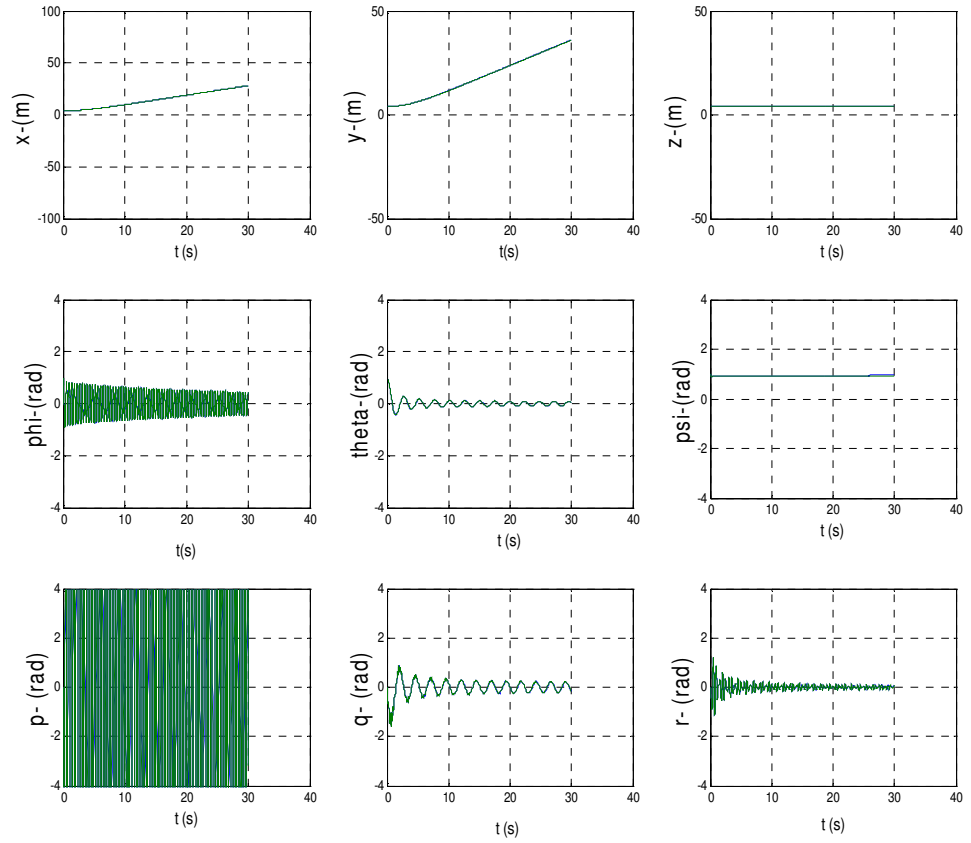
4.1 Benzetim Modelinin Doğrulaması

Hazırlanan benzetim modelinin doğrulanması amacıyla MATLAB/M-file ve MATLAB/Simulink ortamlarında iki ayrı program hazırlanmıştır. Simulink ortamında hazırlanan programda standart olan “6DOF (euler angles)” bloğu kullanılmıştır. Böylece dönüşüm matrislerinde veya sayısal integrasyonda oluşabilecek programsal hata engellenmiştir. Ayrıca Simulink ortamında hazırlanan program denetleyici tasarımında esneklik sağladığından denetleyiciler Simulink ortamında geliştirilmiştir. Simulink ortamında hazırlanan program Şekil 4.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Sualtı Araç Benzetim Modeli

Hazırlanan iki programın karşılaştırması ise başlangıç değerleri $x_0=4$, $y_0=4$, $z_0=4$, $\phi_0=1$ rad/s, $\theta_0=1$ rad/s, $\psi_0=1$ rad/s, $u_0=0$, $v_0=0$, $w_0=0$, $p_0=0$, $q_0=0$, $r_0=0$ olarak alınmıştır. Bu iki programın karşılaştırılması Şekil 4.2’ de gösterilmiştir.

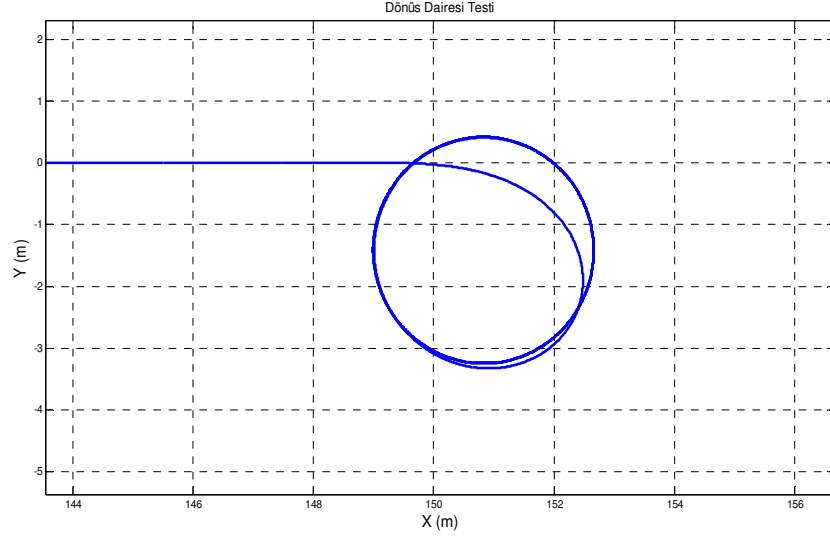


Şekil 4.2: Benzetim Modellerinin Karşılaştırılması

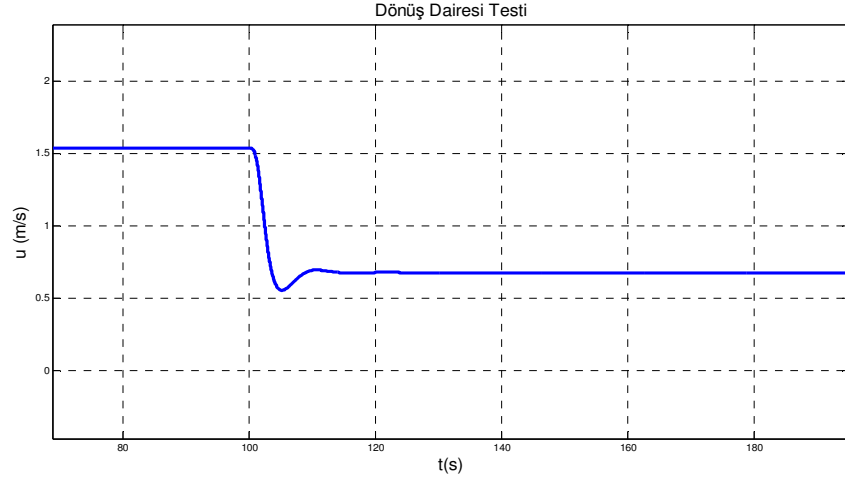
4.1.1 Standart Manevra Testleri

Literatürde sualtı ve su üstü araçların kararlılık ve performanslarını değerlendirmek için standart manevra testleri tanımlanmıştır. Bunlardan bazıları;

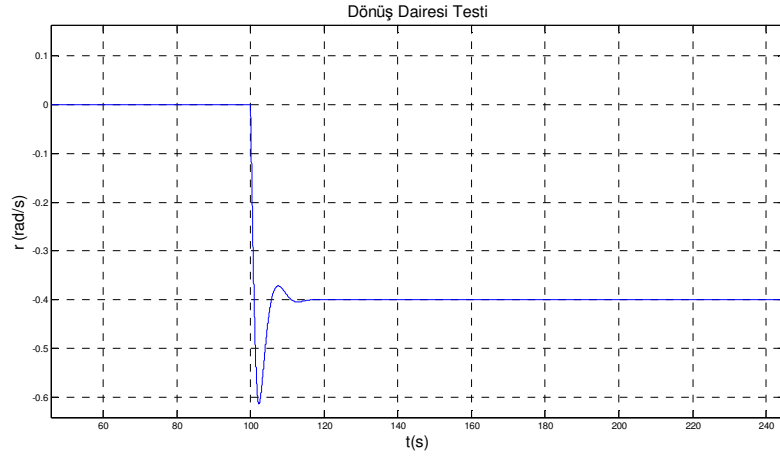
- Dönüş dairesi testi: $t=100\text{sn}$ ' ye kadar kanatçık açıları 0 derecede tutulur ve $100.\text{sn}$ ' de kanatçık açıları 15 dereceye sabitlenir. Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5' te test sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.3 : Dönüş Dairesi Testi: X-Y Konum

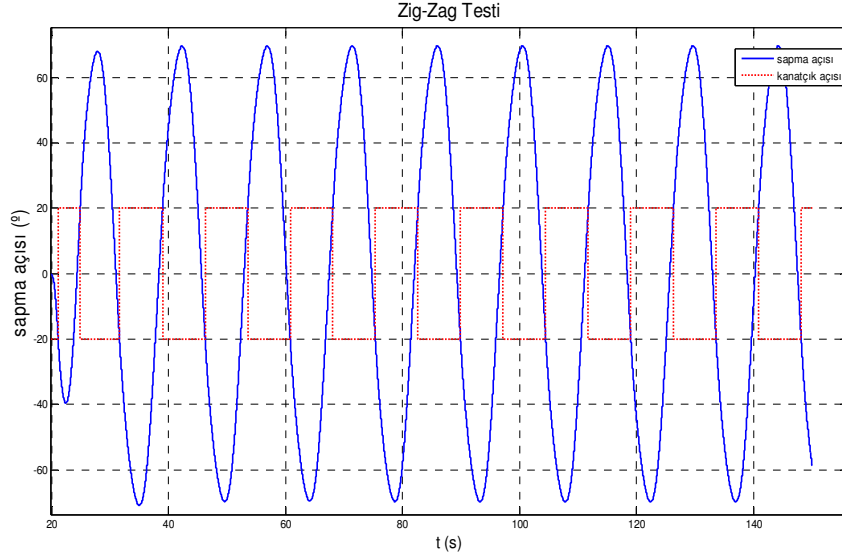


Şekil 4.4 : Dönüş Dairesi Testi: U Hızı-Zaman

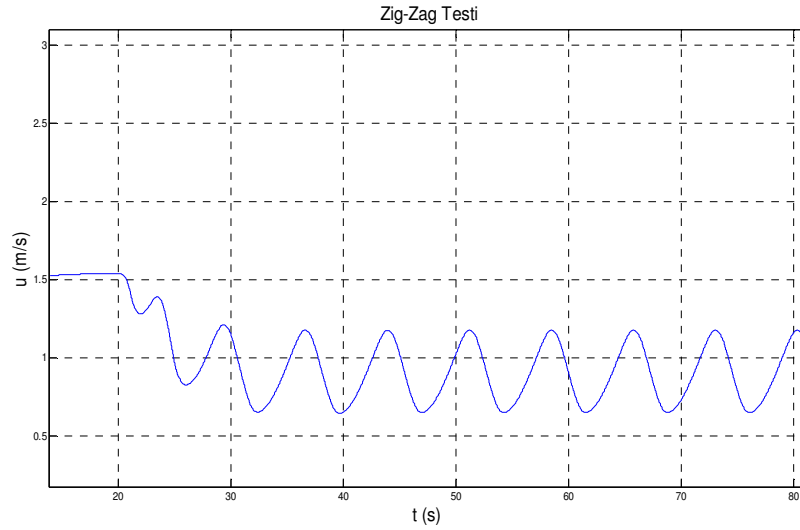


Şekil 4.5 : Dönüş Dairesi Testi: r Sapma Açısai Hızı-Zaman

- Zig-Zag (Kempf) Testi: Zig-Zag testinde kanatçık açısı 20 dereceye getirilir ve sapma açısı (r) 20 derece olana kadar beklenir. Sapma açısı 20 derece olduğunda kanatçık açısı -20 dereceye getirilir ve sapma açısı (r) -20 dereceye gelene kadar beklenir.



Şekil 4.6 : Zig-Zag Testi: Sapma Açısı Zaman



Şekil 4.7 : Zig-Zag Testi: u Boyuna Hızı Zaman

Test sonuçları incelendiğinde gerçek bir sualtı araç dinamiğine uygun sonuçlar olduğu ve literatürde bulunan araçların hareketiyle benzerlik taşıdığı görülmüştür.

5. DENETLEYİCİ TASARIMI

5.1 Giriş

Sualtı araçlarına olan ilginin artması ve sualtı araç teknolojisinin gelişmesi bu araçlara tasarlanan denetleyicilerinde geliştirilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Literatür incelendiğinde PID gibi basit kontrol tekniklerinin hem benzetim modellerine hem de gerçek sistemlere başarıyla uygulandığı gözlenmiştir. Bunun yanı sıra doğrusal kuadratik Gauss denetleyicileri geliştirilmiştir. Bu basit denetleyicilerin yanı sıra çok daha karmaşık denetleyiciler tasarlanmıştır [2].

Uyarlamalı (Adaptive) denetleyici tasarımının basit bir yenileme algoritmasıyla Farrell and Clauberg (1993) tarafından başarıyla uygulandığı görülmektedir. Ayrıca uyarlamalı (adaptive) kayan kipli denetleyici geliştirilmiştir. Bu denetleyicide araç modeli nominal bir hız değerinde doğrusallaştırılmış durum uzay modelinin özellikleri kullanılarak denetleyici tasarlanmıştır. Farklı hız değerleri için aracın bu noktalarda doğrusallaştırılmış modelleri yerleştirilerek uyarlamalı hale getirilmiştir. Daha sonra ise Healey ve Lienard (1993) NPS AUV II sualtı aracına durum geri beslemeli kayan kipli kontrol uygulayarak bu adaptasyonun gereksiz olduğunu göstermiştir [11].

Literatürde bulanık mantık denetleyici tasarımının sualtı araçlarına birçok kez başarıyla uygulandığı görülmektedir [12]. Bulanık mantık denetleyici doğası gereği matematik modelin tam olarak bilinmediği ya da karmaşık hidrodinamik kuvvetler modellenemediği durumlarda sağladığı avantajlarla tercih edilen bir denetleyicidir. Bunun yanı sıra tasarlanan denetleyicinin gerçek sisteme uygulanmasında ortaya çıkan sorunlar dezavantaj oluşturmaktadır [2].

Bu denetleyici teknikleri yanında, bu tekniklerin birbirleriyle birleşimleri de kullanılmaktadır. Mills ve Harris [13] yapay sinir ağları ve bulanık mantık tekniklerini birleştirerek kullandığı görülmektedir. Bulanık mantık ve kayan kipli denetleyicilerin birlikte kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır [14,15].

Literatür incelendiğinde tasarlanan denetleyicilerin çoğunun benzetim modellere uygulandığı ve gerçek ortamda nasıl tepki vereceğinin incelenmediği görülmektedir.

Ayrıca yapılan çalışmaların çoğunda tasarlanan denetleyicilerin doğrusal kontrolcülerle karşılaştırıldığı ya da karşılaştırma yapılmadığı görülmektedir [11].

Doğrusal olmayan etkiler ve hidrodinamik belirsizlikler göz önüne alındığında klasik denetleyiciler, bulanık mantık ve kayan kipli denetleyiciler başlangıç için daha uygun görülmektedir [11].

Bu çalışmada sualtı aracına denetleyici tasarlarken temel olarak aracın iki ayrı harekette bulunduğu kabul edilmiştir ve bu iki hareket için denetleyici tasarlanmıştır. Bunlar derinlik ve rota denetleyicileridir.

5.2 Derinlik Denetleyici Tasarımı

5.2.1 Giriş

Sualtı aracına derinlik kontrolü için doğrusallaştırılmış araç modeline kayan kipli denetleyici tasarlanmıştır. Bu denetleyici bir referans değerini izlettirilmiştir.

5.2.2 Doğrusal Derinlik Modeline Kayan Kipli Denetleyici Tasarımı

Doğrusallaştırılmış derinlik denklemini elde etmek için $p = \varphi = r = \psi = v = y = 0$ kabulü yapılır ve (2.16) numaralı dönüşüm matrisinde yerine konursa (5.1) denklem seti elde edilir [3].

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \cos \theta u + \sin \theta w \\ \dot{z} &= -\sin \theta u + \cos \theta w \\ \dot{\theta} &= q\end{aligned}\tag{5.1}$$

(5.1) denklemi $\theta \approx 0$ ve $u \approx u_0$ civarında doğrusallaştırılırsa;

$$\begin{aligned}\dot{x} &= u + \theta w \\ \dot{z} &= -\theta u_0 + w \\ \dot{\theta} &= q\end{aligned}\tag{5.2}$$

$p = r = v = y_g = 0$ kabulü yapılır ve (2.29), (2.40) hareket denklemlerinde yerine konursa (5.3) denklemi yazılır.

$$\begin{aligned}
X &= m[\dot{u} + qw - x_G q^2 + z_G \dot{q}] \\
Z &= m[\dot{w} - uq - z_G q^2 - x_G \dot{q}] \\
M &= I_{yy} \dot{q} + m[z_G (\dot{u} + wq) - x_G (\dot{w} - uq)]
\end{aligned} \tag{5.3}$$

Yüksek dereceli terimleri ihmal eder ve $u \approx u_0$ etrafında doğrusallaştırırsak;

$$\begin{aligned}
X &= m[\dot{u} + z_G \dot{q}] \\
Z &= m[\dot{w} - u_0 q - x_G \dot{q}] \\
M &= I_{yy} \dot{q} + m[z_G \dot{u} - x_G (\dot{w} - u_0 q)]
\end{aligned} \tag{5.4}$$

Toplam dış kuvvet denkleminde (4.2) yüksek dereceli terimleri ihmal eder, $x_g \approx x_b$ kabulü yapılırsa sualtı aracına etkiyen dış kuvvet [5];

$$\begin{aligned}
\sum X &= X_{\dot{u}} \dot{u} + X_u u + X_q q + X_{\theta} \theta \\
\sum Z &= Z_{\dot{w}} \dot{w} + Z_{\dot{q}} \dot{q} + Z_w w + Z_q q + Z_{\delta_s} \delta_s \\
\sum M &= M_{\dot{w}} \dot{w} + M_{\dot{q}} \dot{q} + M_w w + M_q q + M_{\theta} \theta + M_{\delta_s} \delta_s
\end{aligned} \tag{5.5}$$

(5.2), (5.4) ve (5.5) denklemleri kullanılarak doğrusal derinlik modeli edilir [3].

$$\begin{bmatrix} m - Z_w & -(mx_g + Z_q) & 0 & 0 \\ -(mx_g + M_w) & I_{yy} - M_{\dot{w}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Z_w & -mu_0 - Z_q & 0 & 0 \\ -M_w & mx_g - M_q & -M_{\theta} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & u_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{\delta} \\ M_{\delta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\delta_s] \tag{5.6}$$

$$N = \begin{bmatrix} Z_w & mu_0 + Z_q & 0 & 0 \\ M_w & -mx_g + M_q & M_{\theta} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -u_0 & 0 \end{bmatrix} M = \begin{bmatrix} m - Z_w & -Z_q & 0 & 0 \\ -M_w & I_{yy} - M_{\dot{w}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} D = \begin{bmatrix} Z_{\delta} \\ M_{\delta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.7}$$

(5.6) denkleminde elde ettiğimiz doğrusal derinlik modeli $\dot{x} = Ax + bu$ formuna (5.8) dönüşümü yapılarak getirilir.

$$A = M^{-1}N \quad b = M^{-1}D \tag{5.8}$$

$$\dot{x} = Ax + bu + f(x, t) \tag{5.9}$$

$f(x, t)$, modellenmeyen dinamikleri, dış etkileri temsil eden doğrusal olmayan fonksiyon olarak tanımlanır. Denetleyici girişi $u = -k^T x + u_0$ olarak seçilir ve (5.9)'da yerine konur [3, 6, 14].

$$\dot{x} = (A - bk^T)x + bu_0 + f(x, t) \quad (5.10)$$

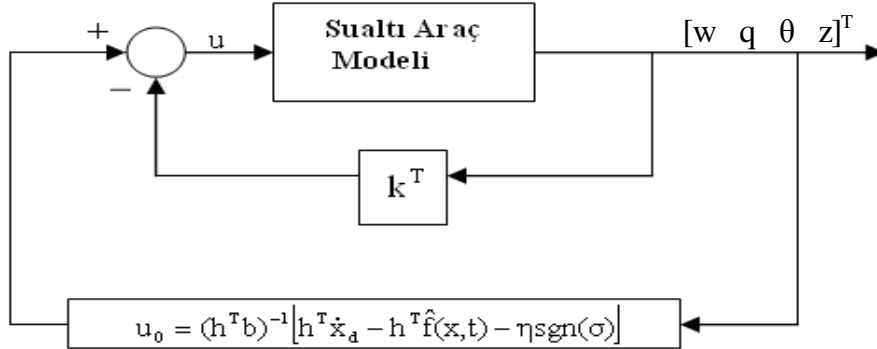
$k \in R^3$ geri besleme kazanç vektörü ve u_0 denetleyici girişinin doğrusal olmayan kısmıdır. Burada $\sigma(\tilde{x}) = h^T \tilde{x}$ olmak üzere bir kayma yüzeyi tanımlanır, $\tilde{x} = x - x_d$ takip hatası ve $h \in R^3$ ise $\sigma(\tilde{x}) \rightarrow 0$ 'ı sağlayacak vektör olarak tanımlanırsa, $\sigma(\tilde{x}) \rightarrow 0$ olması takip hatasının $\tilde{x} = x - x_d \rightarrow 0$ olmasını sağlayacaktır.

Bu durumda $A_c = (A - bk^T)$ olarak tanımlanır, (5.10) denkleminin her iki tarafı h^T ile çarpılır ve her iki taraftan $h^T \dot{x}_d$ çıkarılır.

$$\dot{\sigma}(\tilde{x}) = h^T A_c x + h^T b u_0 + h^T f(x, t) - h^T \dot{x}_d \quad (5.11)$$

$h^T b \neq 0$ olduğu kabul edilirse denetleyici girişinin doğrusal olmayan kısmı (5.11) olarak seçilebilir.

$$u_0 = (h^T b)^{-1} \left[h^T \dot{x}_d - h^T \hat{f}(x, t) - \eta \operatorname{sgn}(\sigma) \right] \quad \eta > 0 \quad (5.12)$$



Şekil 5.1 : Kayan Kipli Derinlik Denetleyici Tasarımı

Burada $\hat{f}(x, t)$, $f(x, t)$ fonksiyonunun tahmini değeridir ve $\Delta f(x, t) = f(x, t) - \hat{f}(x, t)$ olarak tanımlanır. (5.12) (5.11) denkleminde yerine konursa ve $h^T A_c x = x^T A_c h$ özelliği kullanılırsa (5.13) denklemi yazılır.

$$\dot{\sigma}(\tilde{x}) = x^T A_c^T h - \eta \operatorname{sgn}(\sigma(\tilde{x})) + h^T \Delta f(x, t) \quad (5.13)$$

(5.7) ve (5.8) den elde edilen A matrisinin özvektör değerlerinden biri sıfır olduğu gözükmemektedir. Burada $k = [k_1, k_2, k_3, 0]^T$ seçilecek A_c matrisinin özvektör

değerlerinden birinin sıfır olması sağlanır. Böylece $A_c^T h = 0$ eşitliğini sağlayan bir h vektörü olduğunu ispatlar.

$$A_c V = VD \quad (5.14)$$

V özdeğer matrisi, D özvektör olmak üzere, h vektörü V matrisin bir kolonudur. Bu h vektörü bulunur ve (5.13) denklemi tekrar yazılır.

$$\dot{\sigma}(\tilde{x}) = -\eta \operatorname{sgn}(\sigma(\tilde{x})) + h^T \Delta f(x, t) \quad (5.15)$$

Tasarlanan denetleyicinin kararlılığını kontrol etmek için aday Lypunov fonksiyonu $V(\sigma)$ seçilir.

$$\begin{aligned} V(\sigma) &= \frac{1}{2} \sigma^2 \\ \dot{V}(\sigma) &= \sigma \dot{\sigma} \\ \dot{V}(\sigma) &= -\eta \sigma \operatorname{sgn}(\sigma(\tilde{x})) + \sigma h^T \Delta f(x, t) \\ \dot{V}(\sigma) &= -\eta |\sigma| + \sigma h^T \Delta f(x, t) \end{aligned} \quad (5.16)$$

$\eta > \|h\| \|\Delta f(x, t)\|$ seçerek $\dot{V} \leq 0$ sağlanır. η 'in $\Delta f(x, t)$ 'ten büyük olması sistemin kararlılığını arttırmakla beraber performansını düşürmektedir.

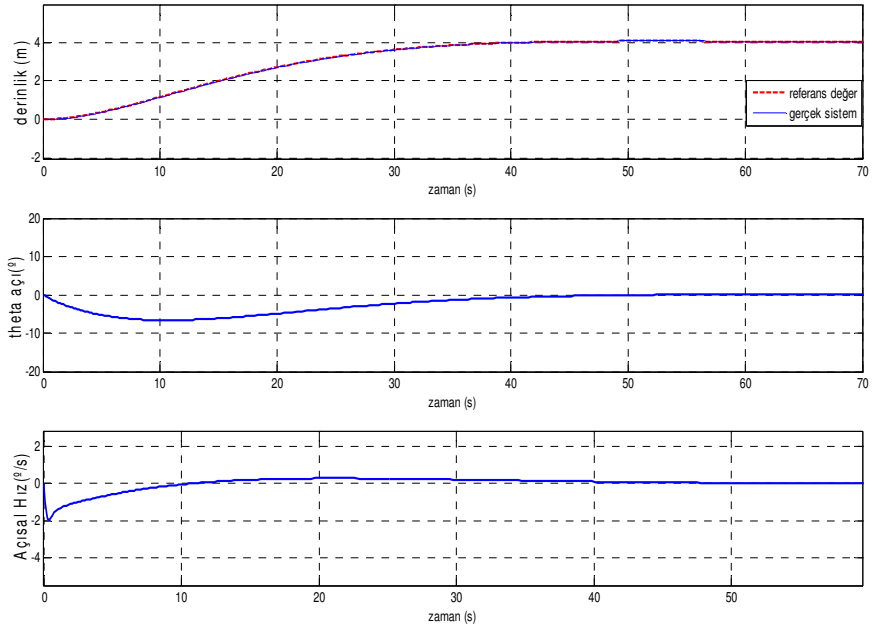
Tasarlanan kayan kipli derinlik denetleyicisinde, A_c matrisini kökleri $p = [0, -2, -4, -6]$ olarak seçilmiştir. Buna göre $k = [-0.1739 - 2.4481 - 6.6793, 0]$ hesaplanmıştır. Kayma yüzeyi ve denetleyici girişi ise;

$$\begin{aligned} \sigma &= 0.3225(w - w_d) - 0.0895(q - q_d) - 0.6416(\theta - \theta_d) + 0.6901(z - z_d) \\ \delta_s &= 0.1739w + 2.4481q + 6.6793\theta + \\ &\quad + 6.7209(0.3225\dot{w}_d - 0.0895\dot{q}_d - 0.6416\dot{\theta}_d + 0.6901\dot{z}_d - \tanh(\sigma/0.4)) \end{aligned} \quad (5.17)$$

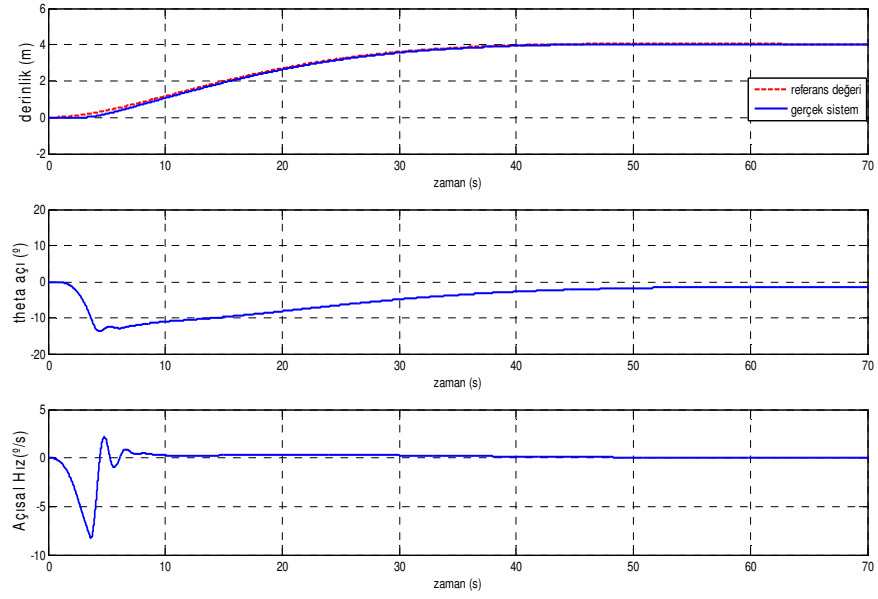
Tasarlanan denetleyici (5.18) de tanımlanan ikince dereceden referans modelini takip ettirilecektir. Burada $\zeta = 0.1$, $\omega_n = 0.1$ alınmıştır.

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_n^2 \end{bmatrix} z_{ref} \quad (5.18)$$

z ve w takip edilecek referans modelin derinlik ve hız değerleridir.



Şekil 5.2 : Doğrusallaştırılmış Modelin Referans Cevabı



Şekil 5.3 : Doğrusal Olmayan Modelin Referans Cevabı

5.3 Rota Denetleyici Tasarımı

5.3.1 Giriş

Sualtı aracına rota kontrolü için üç adet denetleyici tasarlanmıştır. Bunlar doğrusallaştırılmış araç modeline kayan kipli denetleyici, basitleştirilmiş doğrusal olmayan araç modeline kayan kipli denetleyici tasarımı ve bulanık mantık denetleyici tasarımıdır.

5.3.2 Doğrusal Rota Modeline Kayan Kipli Denetleyici Tasarımı

Doğrusal derinlik modeli elde edilirken yapılan kabuller altında doğrusal rota modeli (5.19) elde edilir [1] [16] [17].

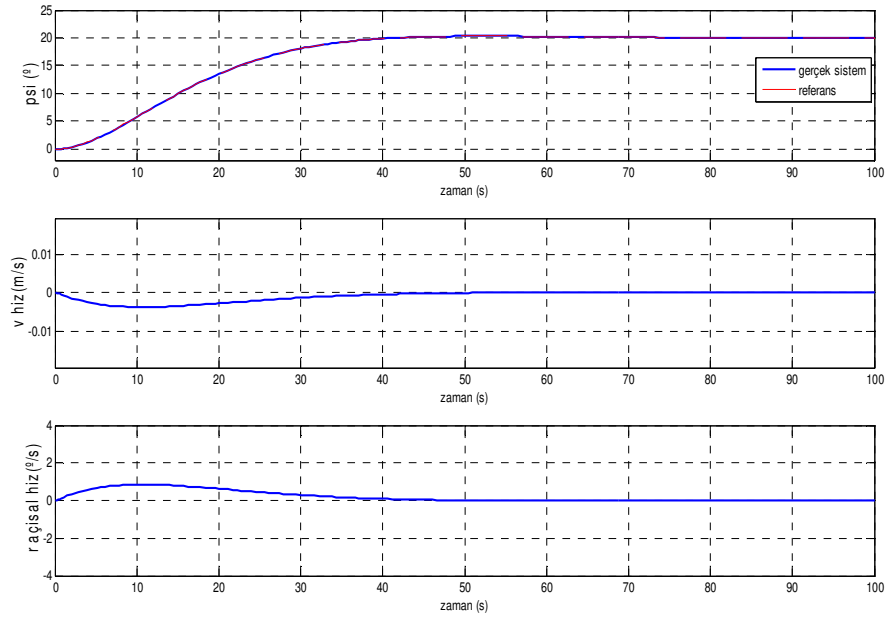
$$\begin{bmatrix} m-Y_v & mx_g-Y_r & 0 \\ mx_g-Y_r & I_z-N_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Y_v & (m-X_u)u_0-Y_r & 0 \\ (X_u-Y_v)u_0-N_v & mx_g u_0-N_r & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_s \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

$$N = \begin{bmatrix} -Y_v & (m-X_u)u_0-Y_r & 0 \\ (X_u-Y_v)u_0-N_v & mx_g u_0-N_r & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad M = \begin{bmatrix} m-Y_v & mx_g-Y_r & 0 \\ mx_g-Y_r & I_z-N_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

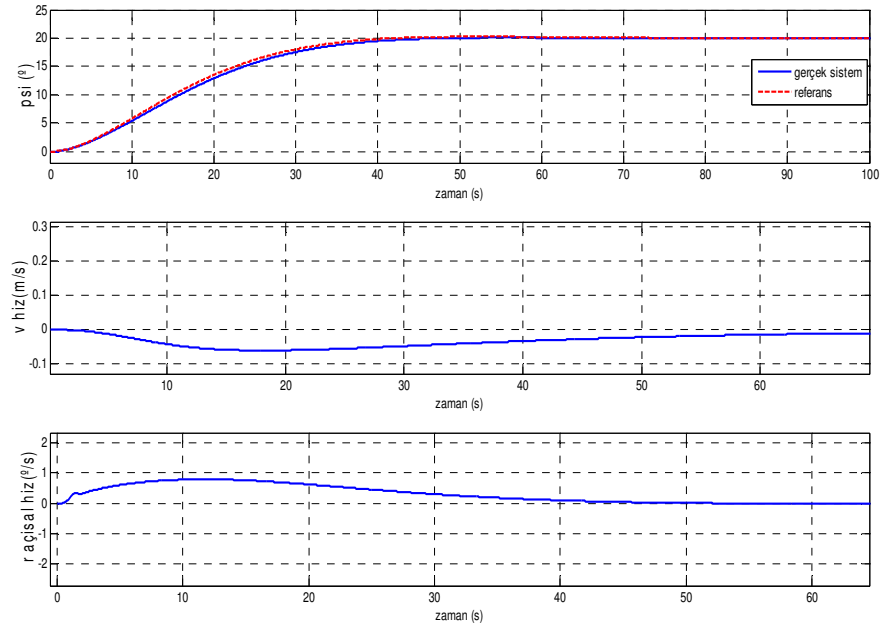
Tasarlanan kayan kipli rota denetleyicisinde, A_c matrisini kökleri $p = [0, -3, -6]$ olarak seçilmiştir. Buna göre $k = [12.0442, -7.3456, 0]$ hesaplanmıştır. Kayma yüzeyi ve denetleyici girişi ise;

$$\begin{aligned} \sigma &= -0.1004v + 0.1542(r - r_d) + 0.9829(\psi - \psi_d) \\ \partial_s &= -12.0442v + 7.3456r - 8.2022(0.1542\dot{r}_d + 0.9829\dot{r}_d - 2 \tanh(\frac{\sigma}{0.1})) \end{aligned} \quad (5.21)$$

Tasarlanan denetleyici (5.18) de tanımlanan ikince dereceden referans modelini takip ettirilecektir. Burada $\zeta = 0.1$, $\omega_n = 0.1$ seçilmiştir.



Şekil 5.4 : Doğrusallaştırılmış Modelin Referans Cevabı



Şekil 5.5 : Doğrusal Olmayan Modelin Referans Cevabı

5.3.3 Doğrusal Olmayan Modele Kayan Kipli Denetleyici Tasarımı

Doğrusal olmayan modele kayan kipli denetleyici tasarımı için (5.22) formunda basitleştirilmiş doğrusal olmayan model kullanılır [3] [18]. $m>0$ ve $d>0$ olmak üzere;

$$m\ddot{x} + d|\dot{x}|\dot{x} = \tau \quad (5.22)$$

$$M = \begin{bmatrix} m - X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m - Z_w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x - K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_y - M_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_z - N_r \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

$$N = -[X_{u|u|}, Y_{v|v|}, Z_{w|w|}, K_{p|p|}, M_{q|q|}, N_{r|r|}]^T \quad (5.24)$$

$i=1...6$ olmak üzere $m=M_{ii}$, $d=N_i$ olarak ve kayma yüzeyi $s = \dot{\tilde{x}} + \lambda\tilde{x}$ olarak tanımlanır. x_d , istenen x değeri ve $\tilde{x} = x - x_d$ olarak tanımlansın. $s=0$ olduğunda x istenen x değerini alacaktır. Yardımcı değişken olarak $\dot{x}_r = \dot{x}_d - \lambda\tilde{x}$ olarak tanımlanır. Yeni kayma yüzeyi (5.25) olarak tanımlanır.

$$\begin{aligned} s &= \dot{x} - \dot{x}_r \\ \dot{s} &= \ddot{x} - \ddot{x}_r \end{aligned} \quad (5.25)$$

Lyapunov fonksiyon adayı olarak denklem (5.26) seçilir. $m>0$ olmak üzere;

$$\begin{aligned} V(s, t) &= \frac{1}{2}ms^2 \\ \dot{V} &= ms\dot{s} < 0 \end{aligned} \quad (5.26)$$

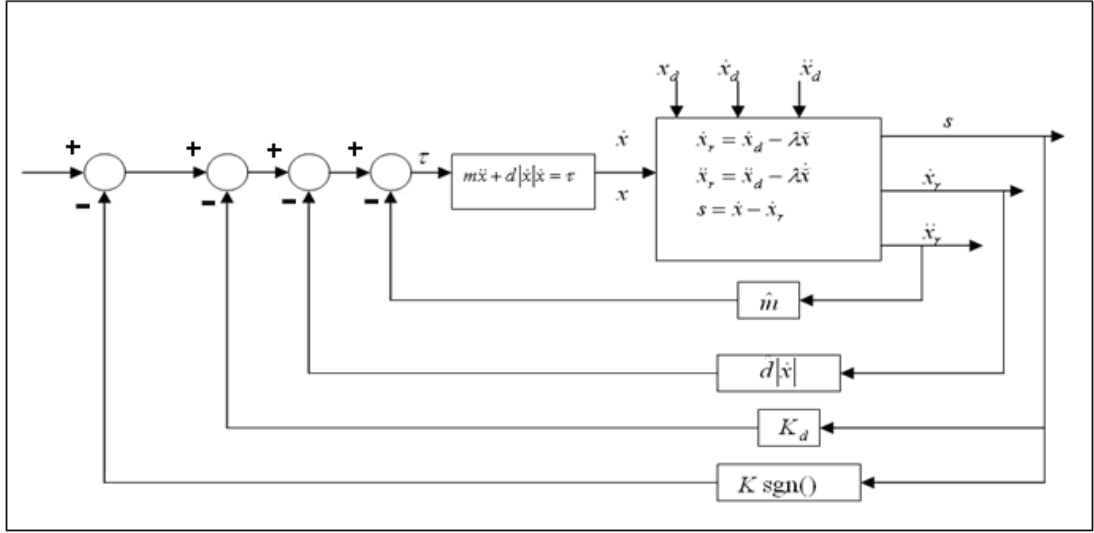
(5.25) ve (5.22) denklemi (5.26) denkleminde yerine konur.

$$\dot{V} = ms\dot{s} = -d|\dot{x}|s^2 + s(\tau - m\ddot{x}_r - d|\dot{x}|\dot{x}_r) \quad (5.27)$$

$\dot{V} < 0$ sağlanabilmesi için kontrol giriş değeri (5.28) olarak seçilir.

$$\tau = \hat{m}\ddot{x}_r + \hat{d}|\dot{x}|\dot{x}_r - K_d s - K \operatorname{sgn}(s) \quad K_d \geq 0 \quad (5.28)$$

\hat{m} ve \hat{d} ; m ve d matrislerinin tahmini değerleridir. Şekil 5.6'da tasarlanan denetleyici şeması gösterilmiştir.



Şekil 5.6 : Kayan Kipli Denetleyici Tasarımı

(5.28) denklemini (5.27) denkleminde yerine yerleştirilir.

$$\dot{V} = -(K_d + d|\dot{x}|)s^2 + \tilde{m}\ddot{x}_r + \tilde{d}|\dot{x}|\dot{x}_r s - K|s| \quad (5.29)$$

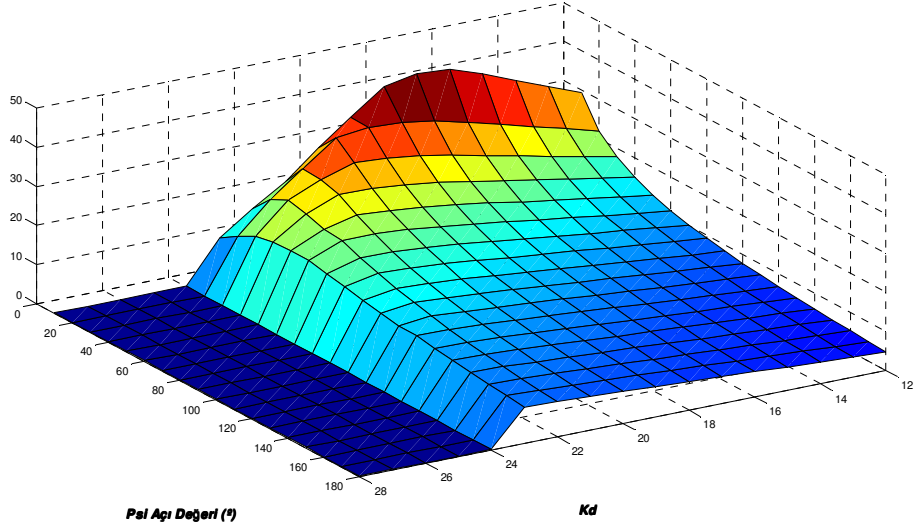
$\tilde{m} = \hat{m} - m$ $\tilde{d} = \hat{d} - d$ olarak tanımlanır ve K katsayısı $\dot{V} \leq 0$ olacak şekilde (5.30) seçilir.

$$K \geq |\tilde{m}\ddot{x}_r + \tilde{d}|\dot{x}|\dot{x}_r| + \eta \quad (5.30)$$

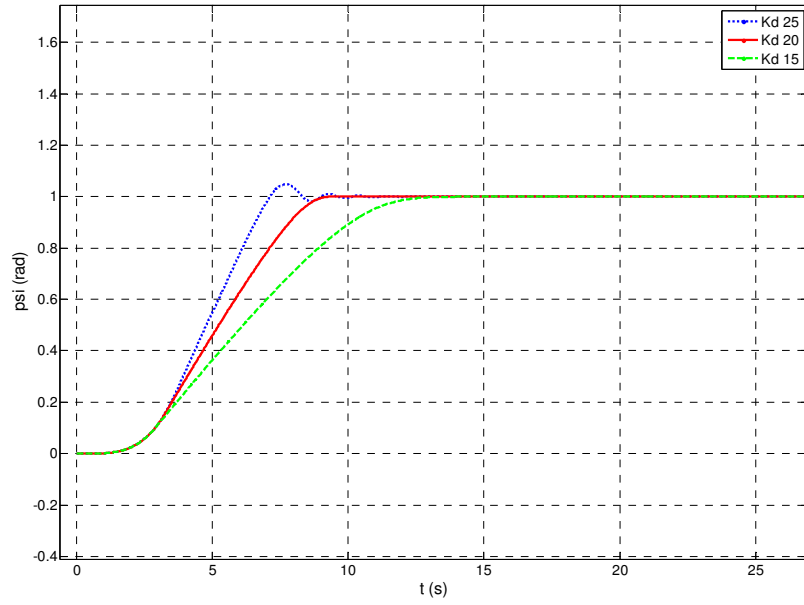
K_d ve λ değerlerinin optimum değerini bulmak için temel düzeyde bir optimizasyon programı yazılmıştır. Bu programda sistem cevabının; m_p , maksimum aşma; t_r yükselme zamanı; t_s , yerleşme zamanı; e_{ss} , kalıcı durum hatası olarak tanımlanır. Yapılan optimizasyon;

$$p = 1000 / (100m_p + 6t_r + 3t_s + 100e_{ss}) \quad (5.31)$$

Bu optimizasyon programında farklı basamak giriş değerleri için optimum K_d ve λ değerleri grafikleri Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10'da gösterilmiştir.

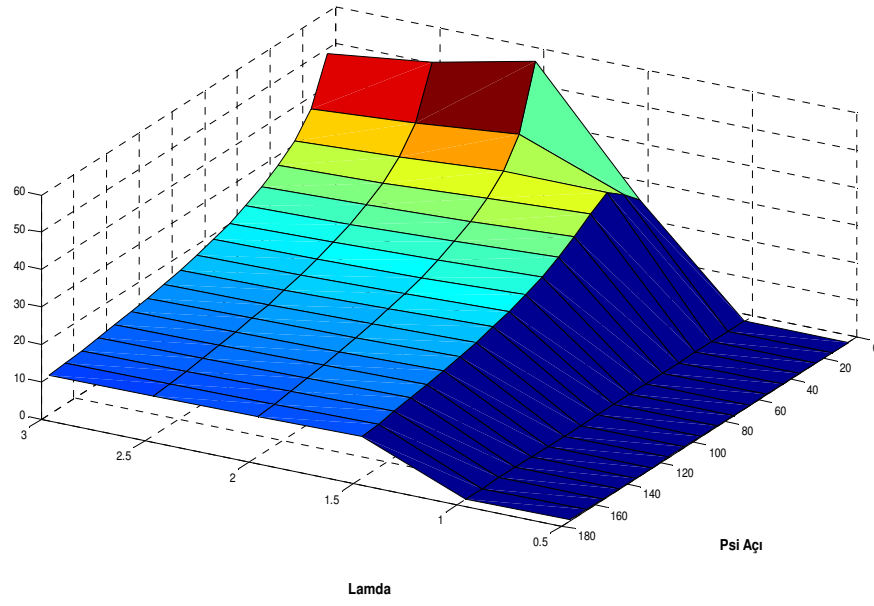


Şekil 5.7: Kd ile Psi Basamak Giriş Cevabı

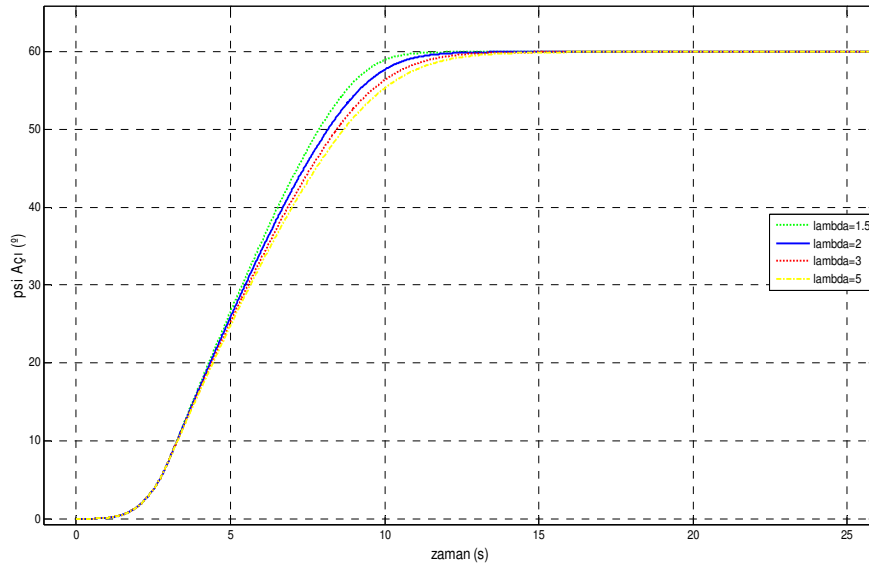


Şekil 5.8: Kd Değişimi

Şekil 5.7 Kd'nin 0-180 derece basamak girişine göre cevabın değişimini göstermektedir. Küçük basamak girişlerinde Kd'nin değişiminin etkisinin daha fazla olduğu, büyük basamak girişlerinde ise değişiminin etkisinin daha az olduğu görülmüştür. Burada Kd'nin 15-22 aralığında seçilmesi gerektiği görülmüştür. Şekil 5.8'de ise farklı Kd değerlerinin sistem cevabına etkisi gösterilmiştir.



Şekil 5.9 : λ Optimizasyon Sonucu

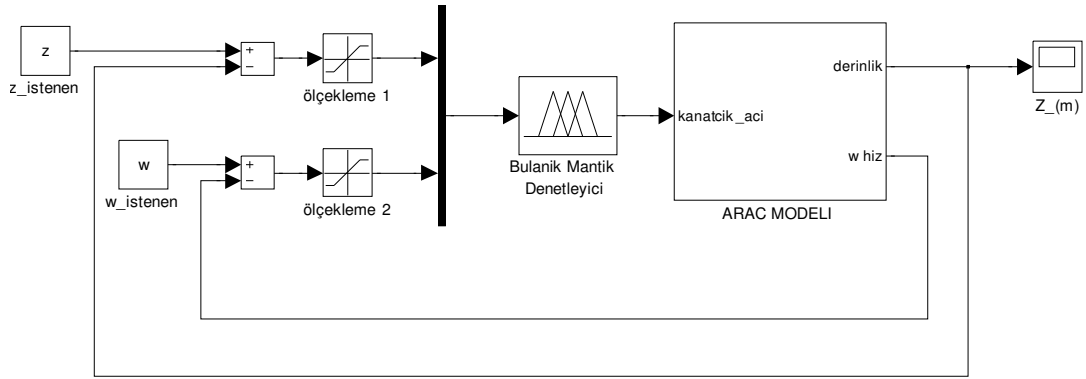


Şekil 5.10 : λ Değişimi Basamak Cevabı

Şekil 5.9’da λ değişiminin 0-180 derece basamak girişine göre cevabın değişimini göstermektedir. Küçük basamak girişlerinde λ ’nın değişiminin etkisinin daha fazla olduğu, büyük basamak girişlerinde ise değişiminin etkisinin daha az olduğu görülmüştür. Burada λ ’nin 1.5-2.5 aralığında seçilmesi gerektiği görülmüştür. Şekil 5.10 ise farklı λ değerlerinin sistem cevabına etkisi gösterilmiştir.

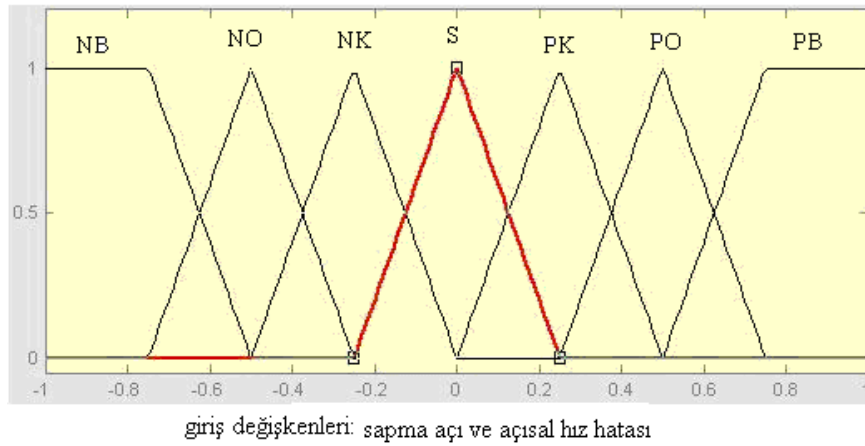
5.3.4 Bulanık Mantık Denetleyici Tasarımı

Sualtı araç modelinin rota kontrolü için bulanık mantık denetleyici tasarlanmıştır. Bu denetleyici Tablo 5.1’de gösterildiği üzere 7x7 kural tabanlı olarak tasarlanmıştır. Bulanık mantık denetleyicinin girişleri olarak sapma açısı hatası (ψ) ve sapma açısız hız hatası ($\dot{\psi}$) seçilmiştir. Denetleyici çıkışı ise kanatçık açısıdır.



Şekil 5.11 : Bulanık Mantık Denetleyici Tasarımı

Üyelik fonksiyonu olarak Şekil 5.12 de görüldüğü üzere her iki giriş için üçgen üyelik fonksiyonu kullanılmıştır.



Şekil 5.12 : Üyelik Fonksiyonu

Kural tabanı 49 kuraldan oluşmaktadır. Bu kurallar Tablo 5.1ve Tablo 5.2’ ye göre yazılır.

Eğer Sapma Açısı Hatası **NB** ve Açısal Hız Hatası **PB** ise Kanatçık Açısı **S**

Ya da

Eğer Sapma Açısı Hatası **NB** ve Açısal Hız Hatası **PO** ise Kanatçık Açısı **NK**

Ya da

Eğer Sapma Açı Hatası **PB** ve Açısal Hız Hatası **NB** ise Kanatçık Açısı **S**

Tablo 5.1 : Kural Tablosu

Açı hatası (rad)

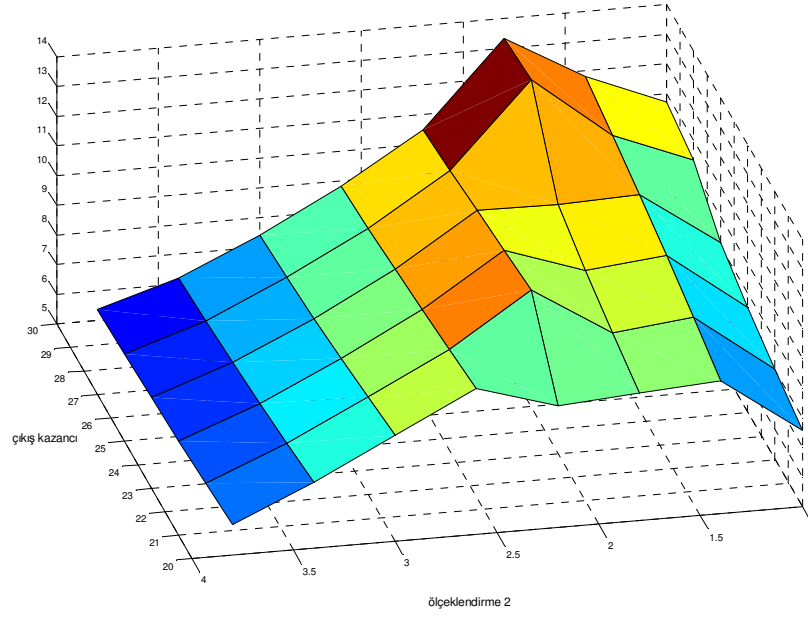
	PB	PO	PK	S	NK	NO	NB
PB	PB	PB	PB	PB	PO	PK	S
PO	PB	PB	PB	PO	PK	S	NK
PK	PB	PB	PO	PK	S	NK	NO
S	PB	PO	PK	S	NK	NO	NB
NK	PO	PK	S	NK	NO	NB	NB
NO	PK	S	NK	NO	NB	NB	NB
NB	S	NK	NO	NB	NB	NB	NB

Açısal Hız Hatası (rad/s)

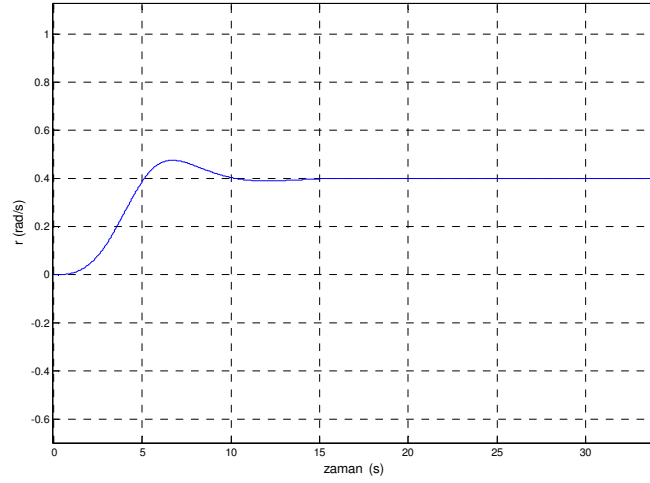
Tablo 5.2 : Bulanık Mantık Kural İsimlerinin Açıklaması

NB	Negatif Büyük
NO	Negatif Orta
NK	Negatif Küçük
S	Sıfır
PK	Pozitif Küçük
PO	Pozitif Orta
PB	Pozitif Büyük

Şekil 5.11’ da gösterilen bulanık mantık denetleyici modelinde ölçeklendirme değerleri (5.31)’ de belirtilen temel optimizasyon programı ile belirlenmiştir.

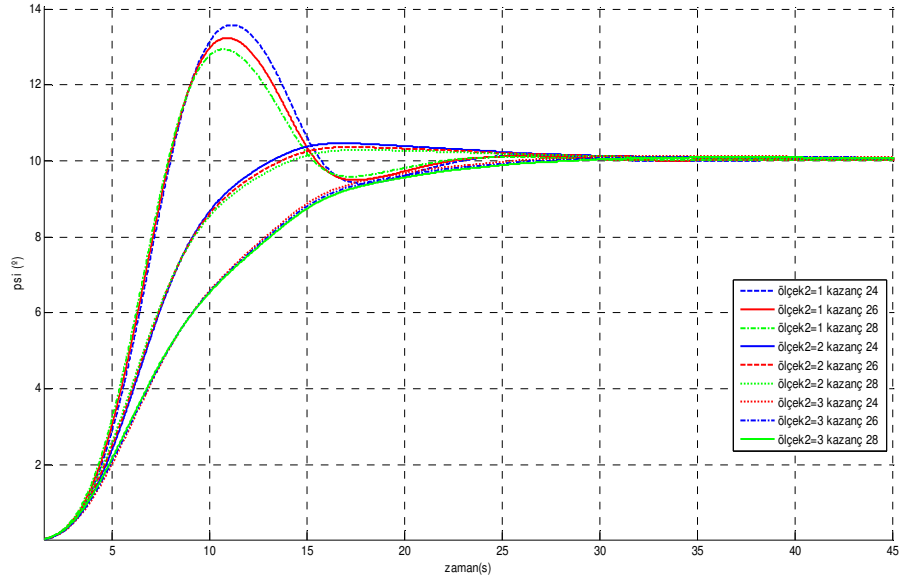


Şekil 5.13 : Bulanık Mantık Denetleyici Çıkış Kazancı- Ölçeklendirme2



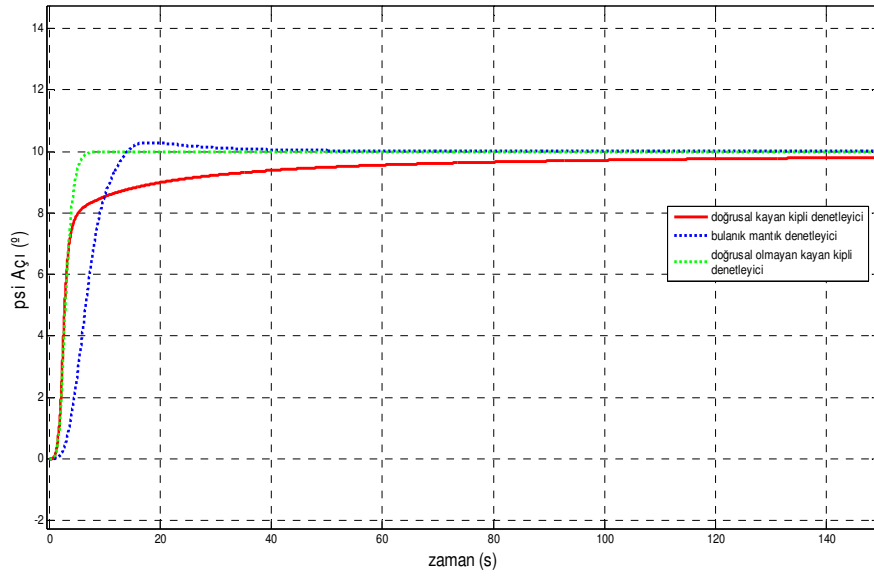
Şekil 5.14 : Araç Maksimum Dönme Hızı

Sualtı aracının sapma hareketini yaparken maksimum dönme hızı kanatçık açısının aldığı maksimum değere sabitlenerek Şekil 5.14’ de elde edilmiştir. Ölçeklendirme2 değerinin -1,+1 değer aralığına getirmek için gereken katsayının 2.5 olduğu görülmektedir. Yapılan optimizasyon sonucunun bu değere yakın çıktığı Şekil 5.13’ te görülmektedir.

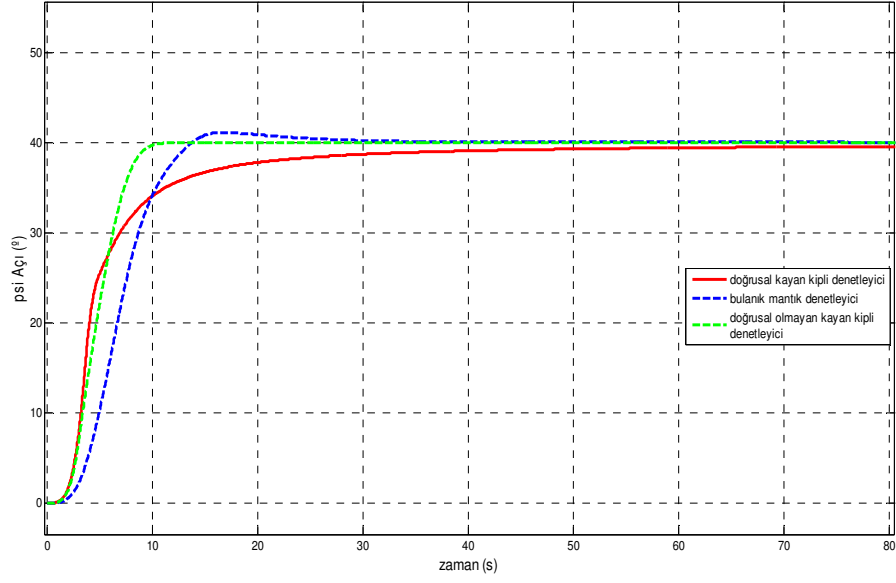


Şekil 5.15 : Ölçeklendirme2 Değeri ile Çıkış Kazancı Grafiği

Rota hareketi için tasarlanan doğrusal modele kayan kipli denetleyici, doğrusal olmayan modele kayan kipli denetleyici, bulanık mantık denetleyicilerinin 10 derece ve 40 derece basamak girişi Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’ de gösterilmiştir.



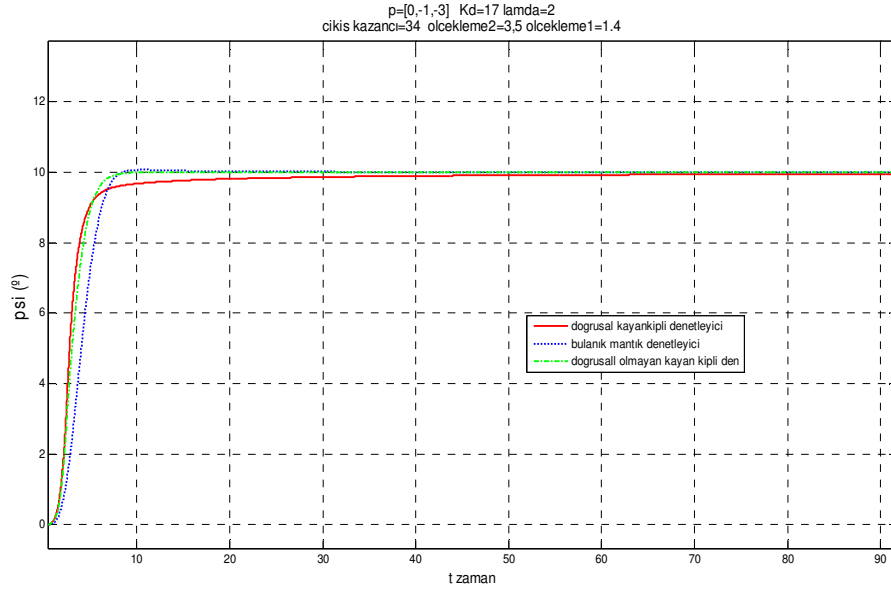
Şekil 5.16 : 10 Derece Basamak Girişi Cevabı



Şekil 5.17 : 40 Derece Basamak Girişi Cevabı

Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’de optimizasyon sonucu doğrusal olmayan modele kayan kipli denetleyici tasarımı için $\lambda = 2$, $K_d=17$ seçilmiştir. Bulanık mantık denetleyici tasarımı için ise çıkışkazancı=28 ölçekleme2 =2 seçilmiştir.

Şekil 5.18’de ise doğrusal model kullanılarak tasarlanan denetleyicinin kökleri $p=[0,-1,-3]$ alınmıştır ve bulanık mantık denetleyicinin çıkışkazancı=34, ölçekleme2=34 ölçekleme1=1.4 olarak alınmıştır.



Şekil 5.18: 10 Derece Basamak Girişi Cevabı

Tasarlanan denetleyiciler karşılaştırıldığında basamak cevapları arasında büyük farklılıklar olmadığı görülmektedir. Bunun sebebi tasarlanan denetleyici parametrelerinin aynı performans değerlerini sağlayacak şekilde optimize edilmesidir. Burada denetleyiciler performans açısından birbirlerine büyük üstünlük sağlamamaktadırlar. Ancak denetleyicileri gerçekleştirme açısından karşılaştırmak mümkündür. Burada bulanık mantık denetleyicinin gerçek bir sisteme entegrasyonu oldukça zor olmaktadır. Bunun yanı sıra doğrusallaştırılmış model kullanılarak tasarlanan denetleyici, doğrusallaştırıldığı hız değerinden farklı değerler için kötü performans göstermektedir. Ayrıca doğrusallaştırılmış modelin elde edilebilmesi için aracın model parametrelerinin elde edilmesi gibi zorluk bulunmaktadır. Doğrusal olmayan model kullanılarak tasarlanan denetleyicinin bazı parametrelerinin ise optimizasyon programı ile belirlenmesi gerekmektedir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada altı serbestlik derecesine sahip bir sualtı aracının genelleştirilmiş dinamik modeli oluşturulmuştur. Sualtı aracına etkiyen kaldırma, ağırlık, sürtünme ve eksu kütle etkisi gibi kuvvetler modellenerek dinamik modele eklenmiş ve literatürde bulunan bir sualtı aracının parametreleri kullanılarak benzetimi yapılmıştır.

Benzetimi yapılan sualtı aracının hareketi temel olarak derinlik ve rota hareketi olarak ikiye ayrılmıştır. Derinlik ve rota hareketi için doğrusal olmayan araç modeli doğrusallaştırılarak durum geri beslemeli kayan kipli denetleyici tasarlanmıştır. Tasarlanan denetleyicilerden elde edilen kontrol girişleri benzetim modeline uygulanarak sistemin basamak girişine cevabı incelenmiştir. Bunun yanında her iki hareket için ikinci dereceden bir referans girişi uygulanarak sistem cevabı incelenmiştir.

Rota hareketi için basitleştirilmiş doğrusal olmayan model kullanılarak kayan kipli denetleyici tasarlanmış ve bu denetleyici benzetim modeline uygulanarak sistemin basamak girişine cevabı incelenmiştir. Denetleyici performansını arttırmak için gerekli parametrelere eniyileme yapan temel bir algoritma hazırlanmıştır.

Rota hareketi için bulanık mantık denetleyici tasarlanmış ve benzetim modeline uygulanmıştır. Tasarlanan denetleyicinin performansını arttırmak amacıyla ölçeklendirme katsayıları hazırlanan eniyileme algoritmasıyla belirlenmiştir.

Benzetim modeli oluşturulan su altı aracının rota hareketine üç farklı denetleyici tasarlanmıştır. Bu denetleyiciler doğrusallaştırılmış dinamik model kullanılarak, doğrusal olmayan dinamik model kullanılarak ve dinamik model kullanılmadan tasarlanmıştır. Bu üç denetleyicinin basamak girişine cevabı karşılaştırılmıştır. Tasarlanan denetleyicilerin basamak girişine cevapları performans açısından karşılaştırıldığında büyük farklar olmadığı görülmüştür. Bunun sebebi tasarlanan denetleyicilerin aynı performans kriterlerine göre optimize edilmesidir. Tasarlanan denetleyicileri gerçekleştirme açısından karşılaştırsak bulanık mantık denetleyicinin gerçek bir sisteme entegrasyonunun oldukça zor olacağı söylenebilir. Bunun yanı sıra doğrusallaştırılmış model kullanılarak tasarlanan durum geri beslemeli kayan kipli

denetleyici, doğrusallaştırıldığı hız değerinden farklı değerler için kötü performans göstermektedir. Ayrıca doğrusallaştırılmış modelin elde edilebilmesi için aracın bütün model parametrelerinin elde edilmesi gibi bir zorluk bulunmaktadır. Doğrusal olmayan model kullanılarak tasarlanan kayan kipli denetleyicinin ise bazı parametrelerinin optimizasyon programı ile belirlenmesi gerekmektedir

Bu çalışmada hazırlanmış olan benzetim modeline okyanus akıntısı ve dalga etkisi gibi çevresel etkiler eklenebilir. Bu çevresel etkilerin tasarlanan denetleyicilerin performansına etkileri incelenebilir. Basitleştirilmiş doğrusal olmayan model kullanılarak tasarlanan kayan kipli denetleyicinin tasarım katsayıları daha detaylı bir eniyileme algoritması ile ayrıntılı bir şekilde araştırılabilir ve denetleyicinin performansı arttırılabilir.

Bulanık mantık denetleyici başlangıç olarak 7x7 kural tabanlı oluşturulmuştur. Bu denetleyici 5x5 kural tabanlı hale getirilip performans karşılaştırması yapılabilir. Ayrıca ölçeklendirme katsayıları daha detaylı bir eniyileme algoritması ile belirlenerek denetleyici performansı arttırılabilir.

Bu denetleyicilerin yanı sıra araç benzetim modeline, kayan kipli denetleyici ve bulanık mantık denetleyicinin birleşimi olan, bulanık mantıklı kayan kipli denetleyici tasarımı uygulanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Yuh, J.**, 2000. Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey, *Autonomous Robots*, **8**, 7-24.
- [2] **Gonzalez, L.A.**, 2004. Design, Modeling and Control of an Autonomous Underwater Vehicle, *Honours Thesis*, The University of Western Australia.
- [3] **Fossen, T.I.**, 1994. Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley & Sons, New York.
- [4] **Triantafyllou, M.S. and Hover, F.S.**, 2003. Maneuvering and Control of Marine Vehicles, Lecture Notes for MIT Ocean Engineering Course.
- [5] **Timothy, J.P.**, 2001. Verification of A Six Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS AUV, *Master's Thesis*, Massachusetts Institute of Technology/Woods Hole Oceanographic Institution, Departments of Ocean and Mechanical Engineering.
- [6] **Patel, N.M., Gano, S.E., Renaud, J.E., Martin, F.D. and Michael, A.Y.**, 2003. Simulation Model of an Autonomous Underwater Vehicle for Design Optimization, *Structural Dynamics & Materials Conference*, California 19 - 22 April.
- [7] **Triantafyllou, M.S.**, 1996. Maneuvering and Control of Surface and Underwater Vehicles, Lecture Notes for MIT Ocean Engineering Course 13.49.
- [8] **Hoerner, S.F.**, 1965. Fluid Dynamic Drag, Published by author.
- [9] **Whicker, L.F. and Fehlner, L.F.**, 1958. Free-stream Characteristics of a Family of Low-aspect Ratio Control Surfaces, *Technical Report 933*, David Taylor Model Basin.
- [10] **Blevins, R.D.**, 1979. Formulas for Natural Frequency and Mode Shape, Kreiger Publishing, Florida.

- [11] **Lea, R.K., Allen, R. and Merry, S.L.**, 1999. A Comparative Study of Control Techniques for an Underwater Flight Vehicle, *International Journal of Systems Science*, **30**,9.
- [12] **Smith, S.M, Rae, G.J.S., Anderson, D.T. and Shein, A.M.**, 1994. Fuzzy Logic Control of an Autonomous Underwater Vehicle, *Control Engineering Practice*, **2**, 321-331.
- [13] **Mills, D. and Harris, C.**, 1996. Neurofuzzy Modelling and Control of a Six Degree of Freedom AUV, *Oceans 1996 MTS/IEEE*, Florida, USA, September, 576-583.
- [14] **Smith, S.M. and Song, F.**, 2000. Design of Sliding Mode Fuzzy Controllers for an Autonomous Underwater Vehicle without System Model, *Oceans 2000, MTS/IEEE Conference and Exhibition*, **2**.
- [15] **Kim, H., Shin, Y.**, 2005. Design of Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller Based on Fuzzy Basis Function Expansion for UFV Depth Control, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, **3**, 217-224.
- [16] **Salgado-Jimenez, T. and Jouvencel, B.**, 2003. Using High Order Sliding Modes for Diving Control a Torpedo Autonomous Underwater Vehicle, *Oceans 2003*, San Diego, USA, 934-393.
- [17] **Vuilmet, C.**, 2005. High Order Sliding Mode Control Applied to a Heavyweight Torpedo, *IEEE Conference on Control Applications*, Toronto, Canada, August 28 – 31.
- [18] **Rodrigues, P., Tavares, P. and Prado, M.**, 1996. Sliding Mode Control of an AUV in the Diving and Steering Planes, *Oceans 1996, MTS/IEEE*, pp. 576-583,, Fort Lauderdale, Florida, USA, September.
- [19] **Healey, A. J.,Lienard, D.**, 1993. Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicle, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **18**, 3.
- [20] **Yoerger, D. R., Slotine, J. –J. E.**, 1985. Robust Trajectory Control of Underwater Vehicles, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **OE 10**, 4.

ÖZGEÇMİŞ

1982’de İstanbul’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini İstanbul’da tamamladı. Sakıp Sabancı Anadolu Lisesi’nden 2000 yılında mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde üniversite öğrenimine başladı. 2005 yılında lisans eğitimini başarıyla tamamlayıp İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Sistem Dinamiği ve Kontrol Yüksek Lisans Programında yüksek lisans eğitimine başladı. Aynı yıl KaleAltınay Robotik ve Otomasyon firmasında Tasarım ve Uygulama Mühendisi olarak işe başladı, 2007 yılından beri TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Bilişim Teknolojileri Enstitüsünde araştırmacı olarak görev almaktadır.