

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DÖRT SERBESTLİK DERECELİ SUALTI ARACININ**  
**DİNAMİK MODELLENMESİ VE BENZETİM ÇALIŞMALARI**

**SADETTİN BURAK KILCI**

**KOCAELİ 2020**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DÖRT SERBESTLİK DERECELİ SUALTI ARACININ**  
**DİNAMİK MODELLENMESİ VE BENZETİM ÇALIŞMALARI**

**SADETTİN BURAK KILCI**

Doç .Dr. Serhat YILMAZ  
Danışman, Kocaeli Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan KARAHAN  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Dilek BİLGİN TÜKEL  
Jüri Üyesi, Doğu Üniversitesi

  
.....  
  
.....  
  
.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 29.01.2020

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Akademik kariyerimin başlangıcı olan yüksek lisans eğitimimde bana danışmanlık yapan, beni destekleyen ve bana çalışmalarımın her noktasında üstün akademik birikimiyle yardım eden değerli hocam sayın Doç. Dr. Serhat YILMAZ'a, engin bilgisi ve tecrübesiyle çalışmalarına ışık tutan ve değerli önerilerini esirgemeyen hocam sayın Dr. Öğretim Üyesi Oğuzhan KARAHAN'a ve maddi manevi desteklerini hiç esirgemeyen sevgili annem Berrin KILCI ve sevgili babam Muzaffer KILCI'ya teşekkürü borç bilirim.

Ocak – 2020

Sadettin Burak KILCI



## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ .....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ÖZET.....	viii
ABSTRACT .....	ix
GİRİŞ.....	1
1. OTONOM SUALTI ARACI TASARIMI .....	4
1.1. Subjugator İSAA.....	4
1.2. Orca.....	5
1.3. Cornell Üniversitesi'nin İSAA .....	6
1.4. Nautilus .....	6
1.5. Remus .....	7
2. BİR İNSANSIZ SUALTI ARACININ DİNAMİK MODEL ÇIKARIMI.....	8
2.1. Giriş.....	8
2.2. Kinematik Modelleme .....	8
2.2.1. Koordinat sistemi Euler açıları.....	9
2.2.2. Bir sualtı aracının matematiksel modeli ve Euler açıları .....	9
2.3. Dinamik Modelleme .....	13
2.3.1. Kütle ve eylemsizlik matrisi .....	13
2.3.2. Coriolis ve merkezci matris .....	15
2.3.3. Hidrodinamik sürüklenme matrisi .....	17
2.3.4. Yerçekimi ve kaldırma kuvveti matrisi.....	18
3. LUCKY FIN SUALTI ARACININ DİNAMİĞİNİN ÇIKARIMI.....	19
3.1. Araç Dinamiğindeki Varsayımlar .....	19
3.2. Araç Dinamik Modelinin Parametrelerinin Belirlenmesi.....	23
3.2.1. Lucky Fin sualtı aracına ait bilinmeyen parametrelerinin bulunması.....	24
3.3. Aracın Parametrelerinin Bilgisayar Destekli Tasarım Programı Kullanarak Elde Edilmesi .....	24
3.3.1. Lucky Fin aracına ait SolidWorks çizimleri ve parametre hesabı .....	25
3.4. Deneysel Verilerin Elde Edilmesi.....	31
4. SUALTI ARACI BENZETİMİ.....	37
4.1. Simulink Gösterimi.....	37
4.2. Benzetim Modelinin Doğrulanması.....	37
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	45
KAYNAKLAR .....	46
EKLER.....	49
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER .....	58
ÖZGEÇMİŞ .....	59

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	İSAA mekanik tasarımının farklı açılardan görüntüsü .....	4
Şekil 1.2.	Florida Subjugatörünün iki farklı motor yapılanması .....	5
Şekil 1.3.	ORCA sualtı aracı .....	5
Şekil 1.4.	Cornell Üniversitesi tarafından geliştirilen sualtı aracı.....	6
Şekil 1.5.	Naitilus sualtı aracı.....	7
Şekil 1.6.	Remus.....	7
Şekil 2.1.	NPS AUV II şematik çizimi.....	9
Şekil 2.2.	Kuzey, Doğu, Aşağı (NED) ve gövde ekseninde bir referans sualtı aracı .....	9
Şekil 3.1.	Lucky Fin'in genel görünümü.....	20
Şekil 3.2.	Lucky Fin'in motorlarının konumu.....	21
Şekil 3.3.	Lucky Fin'in ön kısmı .....	22
Şekil 3.4.	Kocaeli Üniversitesi Lucky Fin test platformu .....	22
Şekil 3.5.	Lucky Fin'in ana parçalarının vektörel çizimi .....	24
Şekil 3.6.	Lucky Fin'in özdeş pilinin çizimi .....	25
Şekil 3.7.	Lucky Fin'in bir ön motorunun çizimi.....	26
Şekil 3.8.	Lucky Fin'in SolidWorks çiziminin ön görüntüsü.....	26
Şekil 3.9.	Lucky Fin otonom sualtı aracının üst ve alt açıdan çizimi.....	27
Şekil 3.10.	SolidWorks çizimi Lucky Fin'in arka motorları .....	27
Şekil 3.11.	Lucky Fin'in SolidWorks çizimi.....	27
Şekil 3.12.	Lucky Fin'in aşağı yukarı öteleme testleri.....	31
Şekil 3.13.	Lucky Fin'in sıfır PWM aşağı yukarı ötelemesi .....	32
Şekil 3.14.	Aracın aşağı yukarı öteleme hızının zamana göre değişimi.....	32
Şekil 3.15.	Lucky Fin'in sıfır PWM aşağı yukarı öteleme hareketi ivmesi .....	33
Şekil 3.16.	Lucky Fin'in tam PWM aşağı yukarı öteleme hareketi .....	33
Şekil 3.17.	Lucky Fin'in tam PWM aşağı yukarı öteleme hızı (w).....	34
Şekil 3.18.	Lucky Fin'in tam PWM aşağı yukarı öteleme ivmesi.....	34
Şekil 3.19.	Lucky Fin'in ileri geri öteleme testi.....	35
Şekil 3.20.	Lucky Fin'in ileri geri öteleme yerdeğiştirme.....	35
Şekil 3.21.	Lucky Fin'in ileri geri öteleme hızı (u).....	36
Şekil 4.1.	Lucky Fin Simülink dinamik model .....	37
Şekil 4.2.	Benzetim sonucu Lucky Fin'in doğrusal (a) ve dönme hızları (b) .....	38
Şekil 4.3.	Benzetim sonucu Lucky Fin'in serbest doğrusal (a) ve dönme hareketleri (b) .....	39
Şekil 4.4.	Benzetim sonucu Lucky Fin'in ön motorlarının tam PWM'de doğrusal (a) ve dönme hareketleri (b) .....	40
Şekil 4.5.	Benzetim sonucu Lucky Fin'in ön motorları tam PWM'de doğrusal (a) ve dönme hızları (b) .....	41
Şekil 4.6.	Benzetim sonucu Lucky Fin'in itiş motorlarının tam PWM'de doğrusal (a) ve dönme hızları (b) .....	42
Şekil 4.7.	Benzetim sonucu Lucky Fin'in itiş motorlarının tam PWM'de doğrusal (a) ve dönme hareketleri (b) .....	43
Şekil A.1.	Aracın bir pilinin vektörel çizimi .....	50

Şekil A.2. Lucky Fin'in bir arka motorunun vektörel çizimi.....	51
Şekil A.3. Lucky Fin'in bir ön motorunun vektörel çizimi.....	52
Şekil A.4. Lucky Fin'in gövde kısmının vektörel çizimi .....	53
Şekil B.1. Lucky Fin dinamik benzetim modeli akış şeması .....	56
Şekil B.2. Lucky Fin'in dinamik parametrelerini içeren Matlab dosyası .....	57



## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. SNAME notasyonu için aksenal yol tarifi .....	10
Tablo 3.1. Lucky Fin otonom sualtı aracının başlıca özellikleri .....	21
Tablo 3.2. Silindir test platformunun özellikleri .....	23
Tablo 3.3. SolidWorks ile elde edilen Lucky Fin'e ait bazı parametreler.....	28
Tablo 3.4. SolidWorks ile elde edilen atalet tensörü parametreleri .....	28



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

W	: Ağırlık, (N)
$x_G$	: Ağırlık merkezinin orjinden x eksenini boyunca uzaklığı, (m)
$y_G$	: Ağırlık merkezinin orjinden y eksenini boyunca uzaklığı, (m)
$z_G$	: Ağırlık merkezinin orjinden z eksenini boyunca uzaklığı, (m)
V	: Araç hacmi, ( $m^3$ )
$x_b$	: Hacim merkezinin orjinden x eksenini boyunca uzaklığı, (m)
$y_b$	: Hacim merkezinin orjinden y eksenini boyunca uzaklığı, (m)
$z_b$	: Hacim merkezinin orjinden z eksenini boyunca uzaklığı, (m)
B	: Kaldırma kuvveti, (N)
m	: Kütle, (kg)
$c_d$	: Sürtünme katsayısı
$\dot{x}$	: x eksenini boyunca hız, (m/sn)
x	: x eksenini boyunca konum
X	: $x_b$ eksenini boyunca etkiyen kuvvet bileşeni
K	: $x_b$ eksenini etrafında etkiyen moment bileşeni
p	: $x_b$ eksenini etrafındaki açısal hız bileşeni, ( $^\circ$ /sn)
$I_x$	: $x_b$ eksenini etrafındaki eylemsizlik tensörü, ( $kgm^2$ )
u	: $x_b$ eksenindeki hız bileşeni, (m/sn)
$\dot{y}$	: y eksenini boyunca hız, (m/sn)
y	: y eksenini boyunca konum
$\dot{\psi}$	: Yalpalanma Euler açısal hızı, ( $^\circ$ /sn)
$\psi$	: Yalpalanma Euler açısı, ( $^\circ$ )
Y	: $y_b$ eksenini boyunca etkiyen kuvvet bileşeni
M	: $y_b$ eksenini etrafında etkiyen moment bileşeni
q	: $y_b$ eksenini etrafındaki açısal hız bileşeni, ( $^\circ$ /sn)
$I_y$	: $y_b$ eksenini etrafındaki eylemsizlik tensörü, ( $kgm^2$ )
v	: $y_b$ eksenindeki hız bileşeni, (m/sn)
G	: Yerçekimi ivmesi, ( $m/sn^2$ )
$\rho$	: Yoğunluk, ( $kg/m^3$ )
$\dot{\theta}$	: Yunuslama Euler açısal hızı, ( $^\circ$ /sn)
$\theta$	: Yunuslama Euler açısı, ( $^\circ$ )
$\varphi$	: Yuvarlanma Euler açısı, ( $^\circ$ )
$\dot{\phi}$	: Yuvarlanma Euler açısal hızı, ( $^\circ$ /sn)
$\dot{z}$	: z eksenini boyunca hız, (m/sn)
z	: z eksenini boyunca konum
Z	: $z_b$ eksenini boyunca etkiyen kuvvet bileşeni
N	: $z_b$ eksenini etrafında etkiyen moment bileşeni
r	: $z_b$ eksenini etrafındaki açısal hız bileşeni, ( $^\circ$ /sn)
$I_z$	: $z_b$ eksenini etrafındaki eylemsizlik tensörü, ( $kgm^2$ )
w	: $z_b$ eksenindeki hız bileşeni, (m/sn)



## **Kısaltmalar**

- AUV : Autonomous Underwater Vehicle (Otonom Sualtı Aracı)  
CAD : Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)  
DOF : Degree of Freedom (Serbestlik Derecesi)  
İSAA : İnsansız Sualtı Aracı  
ROV : Remotely Operated Vehicle (Uzaktan Kumandalı Araç)  
SMC : Sliding Mode Control (Kayan Kipli Kontrol)  
SNAME : Society of Naval Architect and Marine Engineering (Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Topluluğu)



## DÖRT SERBESTLİK DERECELİ SUALTI ARACININ DİNAMİK MODELLENMESİ VE BENZETİM ÇALIŞMALARI

### ÖZET

Günümüz dünyasında; petrol, bor gibi enerji kaynaklarının arama ve tarama çalışmaları, ticaret yolu ile sınır güvenliği, bilimsel araştırmalar gibi faaliyetler; İnsansız Sualtı Araçlarının (İSAA), toplumlar ve devletler için kullanım sayısını ve etkisini büyük ölçüde artırmaktadır. Bu nedenle, İSAA'lar son dönemlerde dünya pazarında öneme sahip olmuşlardır. Özellikle son yıllarda otonom İSAA'larının da yüksek görev başarımları sağlaması ve bu araçların kullanıcı kaynaklı hataların olma ihtimalini ortadan kaldırmasıyla; otonom sualtı araçları üzerindeki çalışmaların sayısı, uzaktan kumandalı yarı otonom İSAA'larına nazaran artmıştır. İSAA'larının tasarımı ile ilgili çalışmalar daha ileri ve verimli noktalara ulaştıkça, araç daha zor ve tehlikeli koşullar altında çalışabilir hale gelmiştir. Bu noktada, çalışmaların amacı sualtı araştırmalarında insana olan bağımlılığı azaltmak olmalıdır. İSAA'larının bu amaç için tasarlanması önemlidir ancak aracın sistemsel olarak karmaşık bir hale geldiği aşıkardır.

Çalışmada, bir İSAA'na ait dinamik matematiksel modelinin elde edilmesi ve aşamaları gösterilmiştir. Literatürdeki bazı insansız sualtı araçlarının tasarımı ve özellikleri incelenmiştir. Suda; araçların hareketleri esnasında ne gibi hidrodinamik etkilere maruz kaldığı ve bu hidrodinamik etkilerin formülleri genel olarak elde edilmiştir.

Dört serbestlik derecesine sahip Lucky Fin otonom İSAA'nın tam dinamik modeli elde edilmiştir. Lucky Fin'in karmaşık bir geometriye sahip olması, onun dinamik parametrelerini çıkartmayı matematiksel olarak zor ve zahmetli bir süreç haline getirmiştir. Bu yüzden; dinamik parametreler; bilgisayar destekli matematiksel modelleme, tasarım ve çizim programları yardımıyla hesaplanmıştır. Sualtı robotunun tam dinamik modelinin üç boyutlu çizim programından elde edilen kütle ve atalet parametreleri ile buna bağlı oluşturulan denklemler hesaplanmıştır ve Matlab'ta benzetimi gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak elde edilen sonuçlarla elde edilen benzetim sonuçları karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Dört Serbestlik Dereceli Sualtı Aracı, İnsansız Sualtı Araçları, İnsansız Sualtı Araçları Dinamiği, Matematiksel Model ve Benzetim.

## **DYNAMIC MODELING AND SIMULATIONS FOR A FOUR DEGREE OF FREEDOM UNDERWATER VEHICLE**

### **ABSTRACT**

In today's world, activities such as energy resources exploration and rapidly escalating commercial and border security rise the number of the use of Unmanned Underwater Vehicles (UUV) greatly and they have gained significant prominence for societies and governments. Hence, UUVs have made their presence felt dramatically in the market. In recent years, especially Autonomous Underwater Vehicles (AUV) have achieved high mission performance and removed the possibility of user-based errors, thus, studies and uses of AUV have risen remarkably against remote-controlled semi-autonomous underwater vehicles. As the studies on the design of UUV reach further and more efficiently, it leads to be able to run under more difficult and dangerous conditions. At this point, the purpose of studies should be to reduce dependence on human beings in underwater researches. Being designed UUVs for this purpose are becoming more crucial but it causes more complex systems to be worked on.

In this study, the dynamic mathematical model of an UUV is obtained and its stages are shown. The design and properties of several UUVs in the literature have been examined. Under water, what hydrodynamic effects occur to during the movement of vehicles and the formulas of these hydrodynamic effects are obtained with general forms of them.

The full dynamic model of Lucky Fin with 4 degrees of freedom AUV which has been designed and developed by the result of co-operation of students and tutors of Kocaeli University Electronics and Communication Engineering has obtained. Lucky Fin's complex geometry has made mathematically difficult and laborious to get its dynamic parameters. Therefore, dynamic parameters were calculated with the help of computer aided mathematical modeling, design and drawing programs. The mass and inertia parameters of the solid model of the UUV were obtained by using SolidWorks. The mass and inertia parameters obtained from the three-dimensional drawing program of the full dynamic model of the Lucky Fin and the related equations were calculated. As the following step, Matlab simulations were performed regarding them. The experimental results and the simulation results were compared and interpreted.

**Keywords:** Four Degree of Freedom Underwater Vehicle, Unmanned Underwater Vehicles, Dynamic of Unmanned Underwater Vehicles, Mathematical Modeling and Simulation.

## GİRİŞ

Sualtı aracının veya denizaltının ilk kavramsal tasarımı, İngiliz matematikçi William Bourne tarafından yapıldı. Bourne, kendisine ait ilk sualtı aracının tasarımını 1578'de yayınladı. Genel hacmi azaltılarak su geçirmez deri ile kaplanmış ahşap bir araç suya batırılabilir, yönlendirme ve itiş için bir sualtı kürekleme yöntemi kullanılabilir fikrini ortaya attı. Bu fikir 1620'de Hollandalı Cornelius Drebbel tarafından hayata geçirildi [1]. 1776 yılına kadar hiçbir bir askeri operasyonda denizaltı kullanılmamıştı. David Bushnell tarafından o yıllarda tasarlanan denizaltı askeri alanda kullanılan ilk sualtı aracı oldu ve böylece sualtı araçları, her geçen gün önemi katlanarak artan savunma sanayinin temel taşlarından biri haline geldi. David Bushnell, demir kayışlarla bir arada tutulan yumurta şeklinde bir ahşap denizaltı tasarladı. Denizaltı, pompalar kullanarak dalış yapabiliyordu [2]. Son otuz yılda; robotik, elektronik, yazılım ve kontrol gibi disiplinlerdeki gelişmelere bağlı olarak; otonom, yarı otonom ve uzaktan yönetilen sualtı araçları üzerinde yenilikçi uygulamalar ve gelişmeler ciddi bir şekilde artmıştır. Savunma ve taaruz amaçlı kullanımların yanı sıra, sualtı araçları; ticari, petrol ve batık aramaları gibi uygulama alanlarında varlıklarını göstermeye başladı. Kontrolörler; teknolojinin gelişmesiyle beraber sualtı araçlarının görev başarımını kayda değer şekilde yükseltti. Literatürde, zaman içinde pek çok yeni kontrol modelleri önerilmiştir. Bunlardan bazıları; iyi derecede performans gösteren doğrusal denetleyiciler [3-8] ve bunlara ek olarak iyi bir sağlamlık ve ayarlanabilirlik kabiliyeti gösteren modeller; SMC kontrolleri [9,10], adaptif kontrol [10-12], bulanık mantık kontrolü [13], prediktif kontrol [14,15], statik geri besleme kontrolü [16] ve sinir ağı tabanlı kontrolüdür [17-19].

Matematiksel model, bir davranışı matematiksel terimlerle tanımlayan bir formül dizisidir. Fiziksel dünya matematiksel denklemlerle ifade edilebilir. Bir problemi çözmek için modellemeyi kullanmanın birçok nedeni vardır. Örnek olarak, probleme çözüm bulmada deneysel yöntemlerin maliyeti çok yüksek olabilir veya bazı durumlarda deneysel yöntemlerin kullanılması mümkün olmayabilir. Sualtı araçları gibi karmaşık sisteme sahip robotların sistem davranışı parametrelerinin belirlenmesi

zor bir işlemdir. Analiz edilmeleri iki tank testi [20] veya deniz altında telemetri gibi pek çok deneysel testi gerektirir [21,22]. Tüm bu sebeplerden dolayı, çeşitli şartlar altında sistemin davranışını tahmin etmek için matematiksel olarak formüle edilmesi, bir başka deyişle, modellenmesi en uygun yaklaşımlardan biri olarak kabul edilebilir. Çünkü başarımı ve doğruluğu yüksek bir sualtı aracı kontrolü ve navigasyonu elde etmek için; aracın matematiksel modelini bilmek, hidrostatik, hidrodinamik ve kinematik disiplinler arası çalışmasını doğru biçimde çıkartıp hesaplamak oldukça önemli bir noktadır.

Benzetim uygulamalarında kullanılacak model gerçeğe olabildiğince yakın bir sonuç vermelidir. Bu nedenle, model, kullanılmadan önce güvenilirliği ve tutarlılığı gerçek olaylarla kanıtlanmalıdır. Sualtı aracı üzerinde karmaşık ve doğrusal olmayan çok sayıda etkinin varlığı araçların kontrolünü zorlaştırmaktadır. Bu etkilerden bazıları; hidrodinamik sürtünme, sönümlenme, kaldırma kuvvetleri, Coriolis ve merkezci kuvvetler, yerçekimi ve yüzdürme kuvvetleri, itici kuvvetler ve çevresel bozucu etkilerdir [23].

İSAA'lar Uzaktan Kumadalı Araçlar (ROV) ve Otonom Sualtı Araçları(AUV) olmak üzere iki başlık altında incelenebilir. Her bir aracın deniz ortamındaki görev türünden dolayı kendine özgü avantaj ve dezavantajları vardır. ROV'lar kullanıcı bağımlı sualtı mobil araçlardır bu yüzden doğrudan kontrol edilmeye ihtiyaçları vardır. AUV ise özerk davranışları, bağlama kablosunun olmaması ile karakterize edilebilir. Başka bir ifadeyle, AUV bağımsız olarak çalışır ve hiçbir bağlantı kablosuna sahip olmaz ama ROV'lar bir operatöre bağlı bir kabloyla (örneğin fiber optik, bakır, vb.) çalışırlar. ROV'lar ve AUV'lar arasındaki temel fark, AUV'ların algılama ve otomatik karar alma gibi özellikleri olmasıdır. Görevleri özerk bir şekilde yerine getirmelerine olanak tanıyan önceden belirlenmiş operasyon planlarına sahiptir [24].

Sualtı aracını, geliştirmek ve özel parkurlardaki ya da normal koşullar altındaki yetersizliklerini azaltmak için bütünüyle otonom İSAA'lar üretilmeye başlanılmıştır. Bunlar görevlerini kendilerine entegre edilmiş sensörler sayesinde tamamlar. Bu tip İSAA'ların üretilip geliştirilmesinin altında yatan temel etken, herhangi bir dış müdahaleye gerek kalmaksızın kendi rotasını çizebilen ve bu doğrultuda hareketlerini ve görevlerini yüksek başarımla yerine getiren akıllı araç teknolojisine

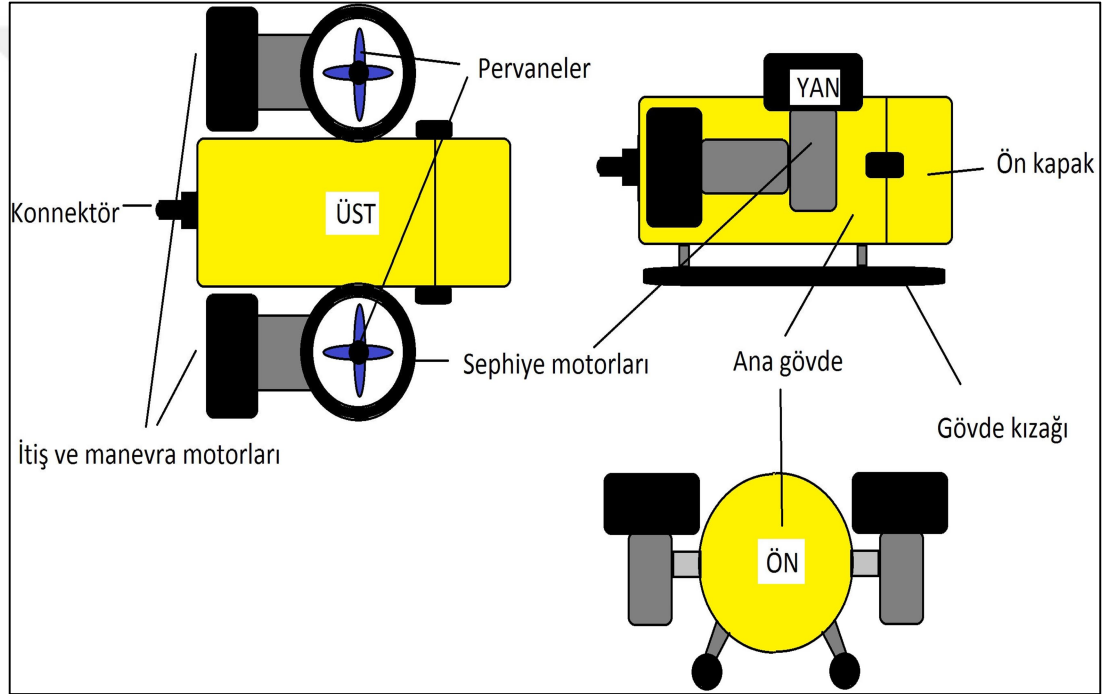
sahip olmalarıdır. Bu bağlamda 100 ün üzerinde çeşitli İSAA modeli üzerinde çalışılmış ve geliştirilmiştir. Şüphesiz ki sensör ve malzeme teknolojisinin etkisiyle başarımı daha yüksek İSAA'ları üretilmesinin temelleri atılmaktadır [25].

İSAA'ları, akademik çalışmaların yanı sıra birçok endüstriyel alanlarda farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Jeolojik çalışmalar, deniz aşırı derinlik keşifleri, büyük yük gemilerin ve denizaltıların tamir ve bakımları, askeri amaçla deniz haritalandırılması ve mayın tespiti bunlardan bazılarıdır [26].

Bu çalışmada; otonom bir sualtı aracının parametreleri çözümlenerek tam dinamik modeli elde edilmiş ve model üzerinde benzetim çalışmaları yapılmıştır. Çıkarılan model üzerinde yapılacak ileriki çalışmalar Lucky Fin otonom sualtı aracına ait en uygun kontrol yöntemlerinin bulunmasına ve aracın başarımının artmasına katkı sağlayacaktır.

## 1. OTONOM SUALTI ARACI TASARIMI

Otonom sualtı aracının performansı yüksek olarak verimli bir şekilde çalışması; onun doğru tasarımı ve mekanik yapısının sualtı koşullarına uygun olmasına ve ayrıca aracın hareketini etkileyen çevresel kuvvetlerin hassas bir şekilde hesaplanıp buradan aracın modelinin etkili kurgulanmasına doğrudan bağlıdır. Bir İSAA'nın motor ve diğer parçalarının konumları ve tasarımları Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



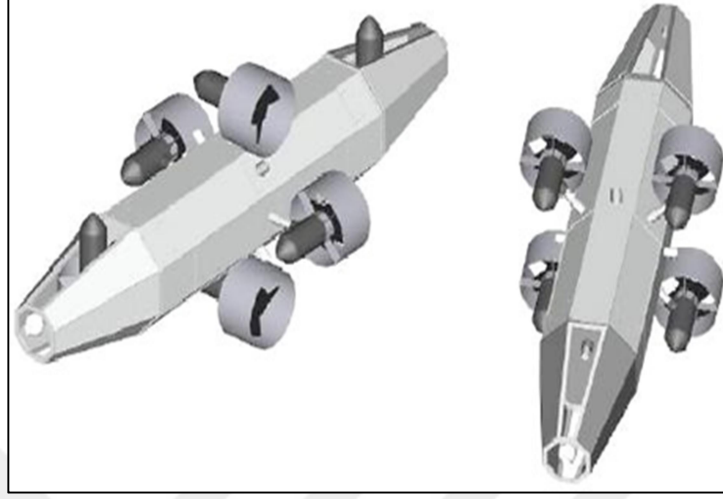
Şekil 1.1. İSAA mekanik tasarımının farklı açılardan görüntüsü [27]

Bazı üniversite ve şirketler tarafından geliştirilmiş birkaç otonom, yarı otonom ve uzaktan kontrollü sualtı araçları, temel özellikleriyle birlikte başlıklarla verilmiştir.

### 1.1. Subjugator İSAA

Florida Üniversitesi SubjuGator'u, farklı konfigürasyonlar oluşturacak şekilde düzenlenmiş altı motorlu bir alüminyum gövdeden oluşur (Şekil 1.2). Bu farklı konfigürasyonlar, farklı görev gereksinimleri için aracın hareket mesafesinin ayarlanmasını sağlarlar. Araçtaki iki kayar raf, parçaların gövdeye monte edilmesini

sağlar. Aracın ağız kısmına yerleştirilen elektrik bağlantıları ise rafların kolayca sökülmesini ve takılmasını sağlar.



Şekil 1.2. Florida Subjugatörünün iki farklı motor yapılanması

## 1.2. Orca

MIT'nin Orca adlı sualtı aracının alüminyum çerçeveye monte edilmiş iki adet PVC borusu vardır (Şekil 1.3). Aküler, kütle merkezini aşağıya indirmek ve aracın dönme momentini arttırmak için alt boruya yerleştirilmiştir. Her tüpün elektronik ekipmana monte edilmiş bir sürgülü kartı vardır. Uç plaka dıştan bağlayıcılara sahiptir. Bu dizayn, kartları tüplerden çıkarırken kabloların sökülmesi gereğini ortadan kaldırır.



Şekil 1.3. ORCA sualtı aracı



### 1.3. Cornell Üniversitesi'nin İSAA

MIT gibi, Cornell Üniversitesi'nin İSAA, alüminyum bir dış iskeletle çevrili, birbirinin üstünde iki gövdeden oluşur (Şekil 1.4). Her iki gövdenin de elektronik bileşenlerini harici konektörlere bağlamak için kör montajlı bir arayüz sistemi vardır. Kayar raflar üzerine monte edilen elektronik parçalar gövdeye yerleştirilir ve uç plaka ile bağlanır. Bu sayede kabloların sökülmesi gereği ortadan kalkar. Üç adet 28 V, 9 Ah akü gerekli gücü sağlar. Araç stabilitesini arttırmak için aküler alt gövdeye yerleştirilmiştir. Araç, iki yatay itici ve iki dikey itici ile 4 serbestlik derecesine (DOF) sahiptir.



Şekil 1.4. Cornell Üniversitesi tarafından geliştirilen sualtı aracı

### 1.4. Nautilus

West Florida Üniversitesi tarafından üretilen Nautilus ana hatlarıyla yan yana dizilmiş iki adet PVC tüpten oluşmaktadır (Şekil 1.5). Her tüp, bakım ve inceleme için kolayca kayan bir elektronik rafa sahiptir. Elektronik raflar, aracın diğer elektronik aksanının suyla temasını engellerler. Boruların üzerine yerleştirilmiş yüksek yüzer bir şamandıra sayesinde araç yuvarlandığında ya da yunuslama yaptığında kolayca dik durabilir. Bu sayede zor sualtı koşullarında bile dengesini muhafaza eder. Her borunun ucundaki bir motor ileri geri öteleme ve sağa sola öteleme hareketini, şamandıranın merkezinde bulunan daha büyük bir motor aşağı doğru öteleme hareketini sağlar.



Şekil 1.5. Naitilus sualtı aracı

### 1.5. Remus

WHOI tarafından üretilen Remus İSAA'nın, MIT'deki bilim insanı Presterio tarafından yapılan akademik çalışma baz alınarak aracın bir benzetim modeli ortaya çıkarmıştır. Şekil 1.6'da Remus'a ait görsele yere verilmiştir.



Şekil 1.6. Remus

## 2. BİR İNSANSIZ SUALTI ARACININ DİNAMİK MODEL ÇIKARIMI

### 2.1. Giriş

Sualtı araçlarının tasarımını tamamlayan bir diğer aşama, aracın matematiksel olarak modellenmesidir. Başarımı yüksek bir model elde etmek için sualtı aracına etki eden tüm kuvvetlerin dahil edilmesi gerekir. Dönme ve ilerleme hareketleri için Newton'un temel kanunu baz alınarak bir matematiksel model çıkartılmıştır.

Araca etkiyen tüm dış kuvvetlerin eksiksiz bir şekilde tanımlanması ve çıkartılması karmaşık hesaplamalar gerektirir. Bu nedenle İSAA'nın yapısal özellikleri ve etkisi çok düşük olan parametreler göz önüne alınarak kuvvetlerin hesaplanması sırasında bazı ihmaller yapılmıştır. Sualtı araçlarının denizde hareket eden sert bir cisim olduğu varsayılmaktadır. Bu sebeple bükülmeler ve ya deformasyonlar göz önüne alınmaz. Bu durum, sualtı aracının ön kısmının arka kısımdan daha hızlı veya daha yavaş hareket edemeyeceği ve aynı şekilde dönemeyeceği anlamına gelir. Modele dahil edilen serbestlik dereceleri,  $x$ ,  $y$  ve  $z$  yönünde ilerleme ve  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenini etrafında dönme; sırasıyla ileri geri öteleme, sağa sola öteleme, aşağı yukarı öteleme, roll, yunuslama ve yalpalamadır.  $u$ ,  $v$  ve  $w$  hızları, rijit cismin  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenini boyunca hızları iken;  $p$ ,  $q$  ve  $r$  hızları,  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenini etrafındaki açısal hızlardır.

Tezin bu bölümünde, altı serbestlik derecesine sahip bir insansız sualtı aracının kinematik durum vektörü gösterimi ve hareket dinamiğinin matematiksel modellenmesi belirtilen bazı ihmal ve sadeleştirmelerle elde edilmiştir. Tam dinamik model elde etmek, bu araçları yüksek başarımla kontrol etmenin ilk adımıdır.

### 2.2. Kinematik Modelleme

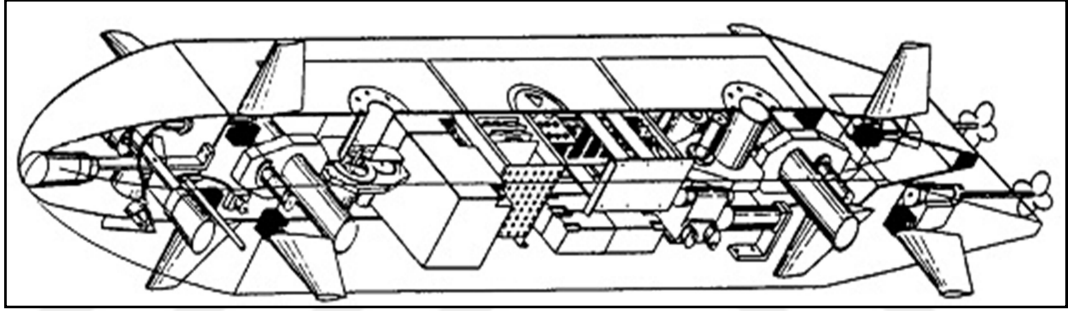
Robotun hareketine neden olan kuvvet ve torklara bakmadan robotun hareketini inceleyen modeldir. Dünya ve robota ait koordinant eksenleri arasındaki doğrusal ve açısal ilişkileri inceler. Kısacası; robotun konum ve yönelimini hesaplamak için kullanılır.

### 2.2.1. Koordinat sistemi Euler açıları

Kontrol ve konumlandırma uygulamalarında en sık kullanılan kinematik denklem dörütlü grup ve Euler açılarıdır. Yerel koordinat sistemi, aracın koordinat sistemini belirtir.

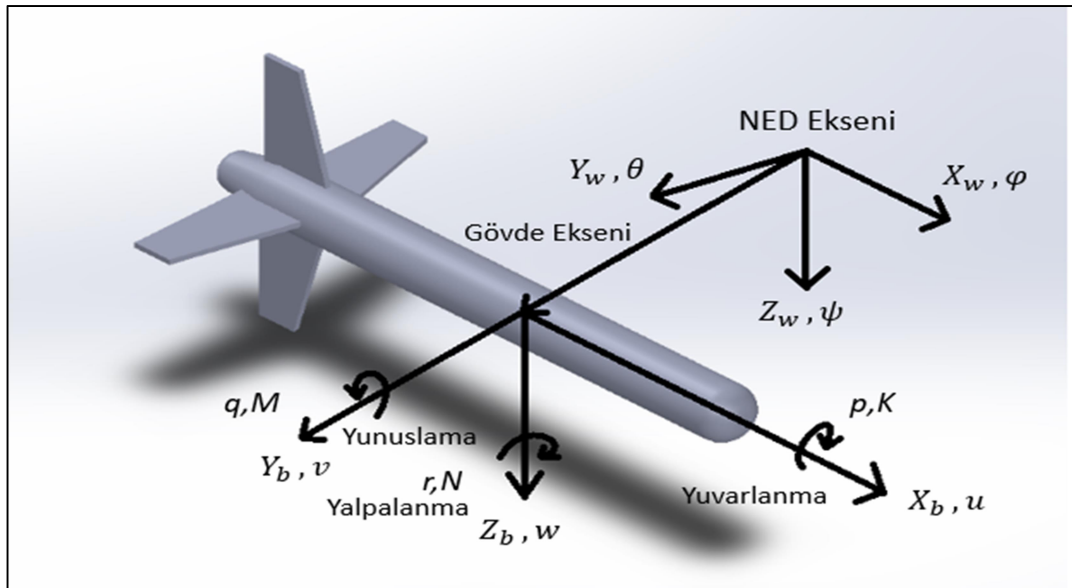
### 2.2.2. Bir sualtı aracının matematiksel modeli ve Euler açıları

NPS AUV-II, Naval Post Graduate School tarafından, sualtı aracı modellemesi ve sualtı dinamiği çalışmaları için test altyapısı oluşturmak üzere tasarlanmış, deneysel bir İSAA'dır. Şekil 2.1'de şematik çizimi verilmiş olan eliptik gövdeye sahip bu İSAA'nın, dört çift akuple çalışan dümeni ve bir çift ikiz pervanesi vardır [28].



Şekil 2.1. NPS AUV II şematik çizimi [29]

Yerel ve dünya koordinat sistemine göre, her bir eksen takımı için Tablo 2.1'deki gibi gösterilir [30].



Şekil 2.2. Kuzey, Doğu, Aşağı (NED) ve gövde ekseninde bir referans sualtı aracı

Denklem (2.1) ve Denklem (2.2) sırasıyla İSAA'nın dünya koordinat sistemine göre ve aracın gövde koordinat sistemine göre konumunu ve yönelimini vermektedir.

Tablo 2.1. SNAME notasyonu için aksenal yol tarifi

Serbestlik Derecesi(DOF)	Hareketin Tanımı	Doğrusal ve açısal hızlar	Konum ve Euler açıları
1	x yönünde doğrusal hareket	u	x
2	y yönünde doğrusal hareket	v	y
3	z yönünde doğrusal hareket	w	z
4	x yönünde açısal hareket	p	$\phi$
5	y yönünde açısal hareket	q	$\theta$
6	z yönünde açısal hareket	r	$\psi$

Pozisyon vektörleri; dünya referans çerçevesine göre pozisyon vektörü Denklem (2.1)'de; araç gövdesine ait pozisyon vektörü Denklem (2.2)'de verilmiştir.

Pozisyon vektörler;

$$\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T \quad (2.1)$$

$$\chi = [x_B, y_B, z_B, \phi_B, \theta_B, \psi_B]^T \quad (2.2)$$

dünya koordinat sistemine göre aracın dönme ve hız matrislerinin elde edilmesi Denklem (2.3) ile Denklem (2.23) arasında verilmiştir;

$${}^w_B R = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi & c\phi \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$${}^W_B R = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi & c\psi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi & s\psi s\theta \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\varphi & -s\varphi \\ 0 & s\varphi & c\varphi \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$${}^W_B R = J_1 = \begin{bmatrix} J_{11}^1 & J_{12}^1 & J_{13}^1 \\ J_{21}^1 & J_{22}^1 & J_{23}^1 \\ J_{31}^1 & J_{32}^1 & J_{33}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta + c\psi s\theta s\varphi & s\psi s\varphi + c\psi s\theta c\varphi \\ s\psi c\theta & c\psi c\varphi + s\psi s\theta s\varphi & -c\psi s\varphi + s\psi s\theta c\varphi \\ -s\theta & c\theta s\varphi & c\theta c\varphi \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

böylece doğrusal hız dönüşüm matrisi elde edilir,

$${}^W_B R_{(\varphi, \theta, \psi)} = R_Z(\psi_B) \cdot R_Y(\theta_B) \cdot R_X(\varphi_B) \quad (2.6)$$

$$\vec{\omega}_B = \vec{e}^{B^T} \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \vec{e}^{B^T} \underline{R}_X(\varphi) \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + \vec{e}^{B^T} \underline{R}_X(\varphi) \underline{R}_Y(\theta) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Rotasyon matrisleri yerine koyarsak;

$$\vec{\omega}_B = \vec{e}^{B^T} \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \vec{e}^{B^T} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\varphi & -s\varphi \\ 0 & s\varphi & c\varphi \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + \vec{e}^{B^T} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\varphi & -s\varphi \\ 0 & s\varphi & c\varphi \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\vec{\omega}_B = \vec{e}^{B^T} \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \vec{e}^{B^T} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\varphi & s\varphi \\ 0 & -s\varphi & c\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + \vec{e}^{B^T} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\varphi & s\varphi \\ 0 & -s\varphi & c\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta & 0 & -s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\vec{\omega}_B = \vec{e}^{B^T} \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \vec{e}^{B^T} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} c\varphi \\ -\dot{\theta} s\varphi \end{bmatrix} + \vec{e}^{B^T} \begin{bmatrix} c\theta & 0 & -s\theta \\ s\varphi s\theta & c\varphi & s\varphi c\theta \\ c\varphi s\theta & -s\varphi & c\varphi c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\vec{\omega}_B = \vec{e}^{B^T} \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \vec{e}^{B^T} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} c\varphi \\ -\dot{\theta} s\varphi \end{bmatrix} + \vec{e}^{B^T} \begin{bmatrix} -\dot{\psi} s\theta \\ \dot{\psi} s\varphi c\theta \\ \dot{\psi} c\varphi c\theta \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\vec{\omega}_B = \vec{e}^{B^T} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s\theta \\ 0 & c\varphi & s\varphi c\theta \\ 0 & -s\varphi & c\varphi c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\vec{\omega}_B = \underline{J}_2^{-1} \vec{\omega}_W \text{ ile } \underline{J}_2^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s\theta \\ 0 & c\varphi & s\varphi c\theta \\ 0 & -s\varphi & c\varphi c\theta \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$\underline{J}_2 = \begin{bmatrix} J_{11}^2 & J_{12}^2 & J_{13}^2 \\ J_{21}^2 & J_{22}^2 & J_{23}^2 \\ J_{31}^2 & J_{32}^2 & J_{33}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & s\varphi c\theta & c\varphi c\theta \\ 0 & c\varphi & -s\theta \\ 0 & s\varphi/c\theta & c\varphi c\theta \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

J; dünya koordinat sistemi ile araç koordinat sistemi arasındaki doğrusal ve açısal hız ilişkisini sağlayan koordinat dönüşüm matrisidir.

$$\dot{\eta} = J\dot{\chi} \quad (2.15)$$

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_2 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11}^1 & J_{12}^1 & J_{13}^1 & 0 & 0 & 0 \\ J_{21}^1 & J_{22}^1 & J_{23}^1 & 0 & 0 & 0 \\ J_{31}^1 & J_{32}^1 & J_{33}^1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{11}^2 & J_{12}^2 & J_{13}^2 \\ 0 & 0 & 0 & J_{21}^2 & J_{22}^2 & J_{23}^2 \\ 0 & 0 & 0 & J_{31}^2 & J_{32}^2 & J_{33}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

İSAA'nın dünya koordinat sistemine göre doğrusal hızının denklemleri;

$$\dot{x} = uJ_{11}^1 + vJ_{12}^1 + wJ_{13}^1 \quad (2.18)$$

$$\dot{y} = uJ_{21}^1 + vJ_{22}^1 + wJ_{23}^1 \quad (2.19)$$

$$\dot{z} = uJ_{31}^1 + vJ_{32}^1 + wJ_{33}^1 \quad (2.20)$$

İSAA'nın dünya koordinat sistemine göre açısal hızının denklemleri;

$$\dot{\phi} = pJ_{11}^2 + qJ_{12}^2 + rJ_{13}^2 \quad (2.21)$$

$$\dot{\theta} = pJ_{21}^2 + qJ_{22}^2 + rJ_{23}^2 \quad (2.22)$$

$$\dot{\psi} = pJ_{31}^2 + qJ_{32}^2 + rJ_{33}^2 \quad (2.23)$$

### 2.3. Dinamik Modelleme

Dinamik modelleme; robotun nihai hareketi ile robota uygulanan kuvvetler arasındaki ilişkiyi inceler. Yani; robotu hareket ettiren motorlar ile robotun hareketi arasındaki ilişkidir. Sualtı ortamında, İSAA'ları rijit olmayan vücut dinamikleri, kavitasyonlar, sualtı dalgaları, itiş gücü, zamanla değişen kütle ve pervane hızı ve hareketli kanatlar üzerindeki sabit olmayan akış gibi doğrusal olmayan etkilere maruz kalırlar [31]. İSAA'nın dinamik modeli, kontrol algoritmalarını formüle edebilmek ve simülasyonlar gerçekleştirebilmek için tanımlanmıştır. İSAA dinamiği sıvıdaki katı gövdenin Newton-Euler eşitliğinden türetilmiştir;

$$\underline{M}\dot{v} + \underline{C}(v)v + \underline{D}(v)v + \underline{g}(\eta) = \tau \quad (2.24)$$

Denklem (2.24)'deki  $\underline{M}$ ;  $\underline{M}_{RB}$  ve  $\underline{M}_A$  yani katı gövde ve ek kütle eylemsizlik matrisi,  $\underline{C}(v)$ ;  $\underline{C}_{RB}(v)$  ve  $\underline{C}_A(v)$  yani katı gövde ve ek kütle Coriolis ve merkezci matrisi,  $\underline{D}(v)$ ;  $\underline{D}_q(v)$  ve  $\underline{D}_1(v)$  yani ikinci dereceden ve doğrusal sürüklenme matrisinden oluşur. Denklemde,  $\underline{g}(\eta)$  yerçekimi ve kaldırma kuvveti matrisidir.  $\tau$  ise itici girişinin kuvvet tork vektörüdür. Okyanus akıntıları hesaplamalarda ihmal edilmiştir.

İSAA'nın karşılaştığı hidrodinamik kuvvet ve momentler; ek kütle ve hidrodinamik sönümlenme olarak ayrılabilir. Ek kütle, araç gövdesinin etkiyle hareketinden meydana gelen basınç kaynaklı bir kuvvet ve momenttir. Ek kütle, sonlu miktarda sıvının İSAA'na bağlanması sonucu araç kütlelerinin daha fazla algılanması olarak da tanımlanabilir. Ek kütle kuvvetleri; hidrodinamik sönümlenme, kütle ve eylemsizlik ile oluşur.

#### 2.3.1. Kütle ve eylemsizlik matrisi

Ek kütle, sualtı aracının gövdesinin ivmelenmesiyle oluşan orantısız yükü denir. Araç suda hareket ederken, aracın hareketinden dolayı araca çarpan su parçacıkları hızlandığında araca doğrudan etkiyen bir kuvvet ortaya çıkar. Bu yüzden ek kütle, sualtı aracının gövdesinin şekline ve boyutuna bağlıdır. Ayrıca ek kütle, aracın



salınım frekansına ve tabii olarak suyun akıntı kuvvetine bağlı olarakta değişir. Sualtı araçları  $d=\lambda/2$  ile tanımlanmış dalga bölgesinden daha derin bölgelerde yapılan çalışmalarda ek kütle ve sönümlenme dalga frekansından bağımsız olarak değerlendirilebilir [32]. Kütle ve eylemsizlik matrisi  $\underline{M}_{RB}$  ve  $\underline{M}_A$  ya bağlı olarak katı cisim kütesinden ve ek kütlelerden oluşur. Denklem (2.25)'den Denklem (2.31)'e kadar kütle ve ona bağlı eşitlikler belirtilmiştir.

$$\underline{M} = \underline{M}_{RB} + \underline{M}_A \quad (2.25)$$

Katı cisim kütle terimi,  $\underline{M}_{RB} \dot{v}$ ;

$$\underline{M}_{RB} \dot{v} = \begin{bmatrix} m\dot{v}_b + m\omega_B \times r_c \\ I_B \dot{\omega}_b + m r_c \times \dot{v}_B \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Gövde referans çerçevesine göre İSAA' nın eylemsizlik tensörü  $I_B$ ;

$$I_B = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

şeklinde verilir ve  $r_c = [x_G \ y_G \ z_G]^T$ , gövde referans çerçevesine göre yerçekimi kuvvetinin merkezinin tanımıdır. Katı gövde kütlesi  $\underline{M}_{RB}$ ;

$$\underline{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zy} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

şeklinde tanımlanır.

İSAA'ları genel olarak, x-z düzleminde simetrik ve y-z düzleminde hemen hemen simetrik. İSAA'lar, x-y düzleminde simetrik olmamasına rağmen simetrik kabul edilebilir çünkü araçların çoğunluğu düşük hızlarda çalışırlar. İSAA, tüm düzlemlerde simetrik olduğunda ve gövde referans çerçevesinin orijini ağırlık

merkezinde konumlandığında, başka bir deyişle  $r_c = [0 \ 0 \ 0]^T$  olduğunda, katı gövde kütlesi  $\underline{M}_{RB}$ :

$$\underline{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Hidrodinamik ek kütlesi;

$$\underline{M}_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

kullanılarak  $X_{\dot{u}} = \frac{\partial X}{\partial \dot{u}}$  olacak şekilde modellenir. Ek kütle matrisinin terimleri İSAA'nın şekline bağlı olarak değişir. İSAA, bütün düzlemlerde simetrik ve gövde referans çerçevesi yerçekimi kuvvetinin merkezinde kabul edildiği sürece, hidrodinamik ek kütle,  $\underline{M}_A$ , sadece köşegen terimler kullanılarak yazılabilir.

$$\underline{M}_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Araç tamamen battığında ek kütle matrisinin bütün parametreleri sabit,  $\underline{M}_A > 0$  ve  $\dot{\underline{M}}_A = 0$  dir.

### 2.3.2. Coriolis ve merkezci matris

Coriolis ve Merkezci Matris,  $\underline{C}_{RB}(v)$  ve  $\underline{C}_A(v)$  ye bağlı olarak katı gövde kütlesi ve ek kütle terimlerinden oluşur. Denklem (2.32)'den Denklem (2.41)'e kadar Coriolis ve ona bağlı eşitlikler belirtilmiştir.

$$\underline{C}(v) = \underline{C}_{RB}(v) + \underline{C}_A(v) \quad (2.32)$$

$\underline{C}_{RB}(v)$  Coriolis katı gövde kütle terimi;  $m$ , İSAA' nın kütlesi,  $I_B$ , İSAA'nın gövde referans çerçevesi göre eylemsizlik tensörü,  $r_c = [x_G \ y_G \ z_G]^T$  İSAA' nın gövde referans çerçevesine göre yerçekimi kuvvetinin merkezi olacak şekilde, aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\underline{C}_{RB}(v)v = \begin{bmatrix} m\omega_B \times v_B + m\omega_B \times (\omega_B \times r_c) \\ \omega_B \times (I_B \times \omega_B) \times m r_c \times (\omega_B \times v_B) \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Katı gövde terimleri aşağıdaki gibidir;

$$\underline{C}_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & mw & -mv \\ 0 & 0 & 0 & -mw & 0 & mu \\ 0 & 0 & 0 & mv & -mu & 0 \\ 0 & mw & -mv & 0 & I_{zz}r & -I_{yy}q \\ -mw & 0 & mu & -I_{zz}r & 0 & I_{xx}p \\ mv & -mu & 0 & I_{yy}q & -I_{xx}p & 0 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Gövde referans çerçevesi yerçekimi kuvvetinin merkezinde olduğu kabul edildiğinde, hidrodinamik ek kütle Coriolis matrisi;

$$\underline{C}_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -\alpha_3(v) & \alpha_2(v) \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_3(v) & 0 & -\alpha_1(v) \\ 0 & 0 & 0 & -\alpha_2(v) & \alpha_1(v) & 0 \\ 0 & -\alpha_3(v) & \alpha_2(v) & 0 & -\beta_3(v) & \beta_2(v) \\ \alpha_3(v) & 0 & -\alpha_1(v) & \beta_3(v) & 0 & -\beta_1(v) \\ -\alpha_2(v) & \alpha_1(v) & 0 & -\beta_2(v) & \beta_1(v) & 0 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

$$\alpha_1(v) = X_{\dot{u}}u + Y_{\dot{v}}v + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{p}}p + X_{\dot{q}}q + X_{\dot{r}}r, \quad (2.36)$$

$$\alpha_2(v) = X_{\dot{v}}u + Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{w}}w + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{q}}q + Y_{\dot{r}}r, \quad (2.37)$$

$$\alpha_3(v) = Y_{\dot{w}}u + Y_{\dot{w}}v + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{p}}p + Z_{\dot{q}}q + Z_{\dot{r}}r, \quad (2.38)$$

$$\beta_1(v) = X_{\dot{p}}u + Y_{\dot{p}}v + Z_{\dot{p}}w + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{q}}q + K_{\dot{r}}r, \quad (2.39)$$

$$\beta_2(v)=X_{\dot{q}}u+Y_{\dot{q}}v+Z_{\dot{q}}w+K_{\dot{q}}p+M_{\dot{q}}q+M_{\dot{r}}r, \quad (2.40)$$

$$\beta_3(v)=X_{\ddot{r}}u+Y_{\ddot{r}}v+Z_{\ddot{r}}w+K_{\ddot{r}}p+M_{\ddot{r}}q+N_{\ddot{r}}r \quad (2.41)$$

### 2.3.3. Hidrodinamik sürüklenme matrisi

Hidrodinamik sürüklenme matrisi, doğrusal terimlerin ( $D_l$ ) ve ikinci dereceden terimlerin ( $D_q$ ) toplamı olarak modellenir. Sürüklenme fonksiyonu  $D_{(v)}$  fiziksel anlam ifade ettiği için kesin olarak pozitif olmalıdır [33]. Sualtı araçlarının hidrodinamik sürüklenmesi; kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerini barındırır. İSAA'nın düşük hızlarda çalışması ve aracın tüm düzlemlerinin simetrik olduğu varsayımı kabul edilince Denklem (2.42), Denklem (2.43) ve Denklem (2.44) sürüklenme fonksiyonu hesaplamaları için kullanılabilir.

$$D_l = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Matris, İSAA'nın doğrusal sürüklenmesini belirtir.

İSAA'nın aksel ikinci dereceden sürüklenme kuvveti ifadesi Denklem (2.43)'de belirtildiği şekilde yazılabilir. Burada  $\rho$  sıvı yoğunluğu,  $C_d$  Rynold değeri,  $A_f$  ise suyun İSAA'na çarptığı yüzey alanıdır.

$$X = \left(-\frac{1}{2}\rho C_d A_f\right) u|u| = X_{u|u}|u| \quad (2.43)$$

İkinci dereceden sürüklenme matrisini veren eşitlik Denklem (2.44)'deki gibi gösterilir:

$$D_q(v) = \begin{bmatrix} X_{u|u}|u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{v|v}|v| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{w|w}|w| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{p|p}|p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{q|q}|q| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{r|r}|r| \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

### 2.3.4. Yerçekimi ve kaldırma kuvveti matrisi

Yerçekimi ve kaldırma kuvveti vektörü,  $\underline{g}(\eta)$ , matris formunda Denklem (2.45)'teki gibi gösterilir;

$$\underline{g}(\eta) = \begin{bmatrix} f_B + f_G \\ r_B \times f_B + r_C \times f_G \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

yerçekimi kuvveti vektörü,  $f_G$ , İSAA' nın ağırlığı ile;

$$f_G = \underline{R}^{BW^{-1}}(v_w)[0 \ 0 \ w]^T, W = mg \quad (2.46)$$

kaldırma kuvveti vektörü,  $f_B$ , kaldırma kuvveti ile;

$$f_B = \underline{R}^{BW^{-1}}(v_w)[0 \ 0 \ -B]^T, B = \rho g \rho \quad (2.47)$$

oluşmaktadır.  $g$  yerçekimi sabiti  $9,81 \text{ m/s}^2$ ,  $\rho$  sıvı yoğunluğu,  $\rho$  İSAA'nın etkisiyle yer değiştiren sıvının hacmi  $[\text{m}^3]$ ,  $r_C = [x_G \ y_G \ z_G]^T$  İSAA'nın yerçekimi kuvvetinin merkezi,  $r_B = [x_B \ y_B \ z_B]^T$  İSAA' nın kaldırma kuvvetinin merkezidir. Denklem (2.47) ile Denklem (2.46)' yı, Denklem (2.45)'de yerine koyunca; Denklem (2.48) elde edilir.

$$\underline{g}(\eta) = \begin{bmatrix} (W-B) \sin(\theta) \\ -(W-B) \cos(\theta) \sin(\phi) \\ -(W-B) \cos(\theta) \cos(\phi) \\ -(y_G W - y_b B) \cos(\theta) \cos(\phi) + (z_G W - z_b B) \cos(\theta) \sin(\phi) \\ (z_G W - z_b B) \sin(\theta) + (x_G W - x_b B) \cos(\theta) \\ -(x_G W - x_b B) \cos(\theta) \sin(\phi) - (y_G W - y_b B) \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

### 3. LUCKY FIN SUALTI ARACININ DİNAMİĞİNİN ÇIKARIMI

İSAA dinamiği alt başlığında altında ifade edilen ve elde edilen İSAA'nın genel dinamik modeli, bazı varsayımlarla matematiksel hesaplama anlamında kolaylaştırılmış olan kompleks bir modeldir.

Bu bölümde, İSAA'nın dinamik modellenmesi için yapılan varsayımlar ve bu varsayımların nasıl ve hangi koşullar altında yapılabileceği belirtilecektir.

#### 3.1. Araç Dinamiğindeki Varsayımlar

Dinamik modelin parametrelerini elde etmek zor ve zaman alıcı bir işlemdir. Bu nedenle İSAA'nın dinamik model varsayımları, bu araçların dinamik modelinin elde edilmesi sürecini kolaylaştırır [34].

- Kaldırma Kuvveti: İSAA düşük hızla ilerliyorsa (0-1 m/sn civarı), kaldırma kuvvetinin araca etkisi ihmal edilebilir. Bu varsayım, düşük hızlarda gerçekleştirilen sualtı deneylerince ispatlanmıştır.
- Simetrik Kabuller: İSAA'ların genel tasarımları; x-z düzleminde paralel ve y-z düzleminde paralele yakındır. İSAA'ları, x-z düzleminde tam anlamıyla simetrik olmasa bile simetrik kabul edilebilir. İSAA'ları düşük hızlarda hareket ettiği sürece bütün düzlemler simetrik kabul edilebilir [34].
- Haritalama matrisi L yok sayılır.
- Aracın Yatay Dengesi: İSAA'nın kaldırma kuvveti merkezi ve yerçekimi kuvveti merkezi düzgün bir sıraya hizalanmışsa (hizalanma momenti), bütün manevralarında yataya yakın durur ve böylece farklı koşullarda dengesini sağlayabilir ve korur.
- Yalpalanma ve Yunuslama Hareketleri İhmalleri: İSAA'nın yalpalama ve yunuslama hareketleri pasif olarak kontrol edilen hareketlerdir. Bu nedenle, İSAA yatay dengesini koruduğu sürece ihmal edilebilirler. Bu sayede kaçışan parametrelerin hesaplanması gerekmez [34].
- Katı gövde referans çerçevesi yerçekimi merkezinde  $r_c=[0 \ 0 \ 0]^T$  bulunur.
- Çevresel Engellerin İhmali: Sualtı akıntıları, İSAA'ların derin dalışlardaki tek çevresel engelidir. Sualtı akıntıları yavaşça değişir [35] ve İSAA'nın sağa sola

öteleme yönündeki hareketinde etkili olabilir. İSAA' nın sağa sola öteleme yönündeki hareketi, okyanus akıntılarını içermeyen modellerde ihmal edilebilir.

• İSAA' nın Serbestlik Dereceleri Ayrılması: İSAA'nın serbestlik derecelerini ayırmak, bir serbestlik derecesinin diğer serbestlik derecelerine etki etmeyeceğini varsayar. İSAA 3 düzlemde de simetrik olduğunda, dinamik modeldeki köşegen dışı elemanların karşılıkları çok küçük olduğunda ve hidrodinamik sönümlenme eşleşmesi düşük hızlarda yok sayıldığı zaman; okyanus ya da güçlü bir sıvı akıntısı içermeyen ortamda, serbestlik dereceleri ayırması gerçekleştirilebilir [34].

Yukarıdaki kabuller sonrasında Lucky Fin'e ait dinamik denklem aşağıda Denklem (3.1)'de verilmiştir:

$$\underline{M}\dot{\underline{v}} + \underline{D}(\underline{v})\underline{v} + \underline{g}(\underline{\eta}) = \underline{\tau} \quad (3.1)$$

Çalışmada kullanılan Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'deki Lucky Fin isimli 4 serbestlik dereceli otonom sualtı aracı, Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nde TÜBİTAK destekli araştırma ve geliştirme çalışmaları kapsamında üretilmiştir. Araç özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Lucky Fin'in genel görünümü

Tablo 3.1. Lucky Fin otonom sualtı aracının başlıca özellikleri

Özellikler	LuckyFin
uzunluk[m]	0,46
genişlik[m]	0,45
köşeden köşeye uzunluk[m]	0,47
bir motorun gerilimi[V]	12
bir motorun akımı[A]	3
pil sayısı	20
bir pilin gerilimi[V]	1,2
bir pilin elektriksel yükü[Ah]	3,7

Lucky Fin, su altında hareketlerini dört adet motoru sayesinde gerçekleştirmektedir. Motorlardan iki tanesi dikey konumda, diğer ikisi yatay konumdadır. Lucky Fin otonom sualtı aracı dört serbestlik derecesine sahiptir. Araç motorlarının konumlarından da anlaşılacağı üzere ileri geri öteleme (x koordinat düzleminde doğrusal hareket), aşağı yukarı öteleme (z koordinat düzleminde doğrusal hareket), yuvarlanma (x koordinat düzleminde açısal hareket) ve yalpalama (z koordinat düzleminde açısal hareket) yapabilirken; sağa sola öteleme (y koordinat düzleminde doğrusal hareket) ile yunuslama (y koordinat düzleminde açısal hareket) yapamamaktadır.



Şekil 3.2. Lucky Fin'in motorlarının konumu

Şekil 3.3'deki gibi araç ön kısmında, bir adet kamera ile aracın iki yanında kameranın görüş açısını aydınlatmak üzere her biri 15 watt değerinde iki adet LED aydınlatmaya sahiptir. Aracın gövde kısmını oluşturan su geçirmez haznede, aracın kontrol kartı bulunmaktadır.





Şekil 3.3. Lucky Fin'in ön kısmı

Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nde TÜBİTAK destekli araştırma ve geliştirme çalışmaları kapsamında üretilip geliştirilen Lucky Fin adlı otonom sualtı aracının derinlik kontrolü testlerinin gerçekleştirildiği platform Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Tablo 3.2'de bu platforma ait bazı özellikler verilmiştir.



Şekil 3.4. Kocaeli Üniversitesi Lucky Fin test platformu [27]

Tablo 3.2. Silindir test platformunun özellikleri

uzunluk[m]	2
çap[m]	0,8
hacim[m <sup>3</sup> ]	4,01
malzeme	Pleksiglas
taban bölgesi	PVC
suyu tahliye eden motor	Dalgıç Pompası

Modelleme, kontrol ve benzetimin temelini ve aynı zamanda ilk basamağını oluşturur. Genel olarak sistem modellemeleri; temel prensiplerden, fiziksel içgöründen ve girdi-çıkı verilerinden türetilir. Model doğrulama ya da başka bir deyişle gerçekleştirme; gözlemlenen girdi-çıkı verilerinden dinamik sistemlerin matematiksel modellerini oluşturma bilimi olarak, 1965 yılından günümüze kadar uzanmaktadır. Bununla beraber doğrusal olmayan sistem gerçekleştirme ve kapalı döngü sistem tanımlama gibi pek çok problem barındırır [36].

Bir sistemin modelinin doğrulamasının elde edilmesinde; deneysel yöntemler ve teorik yöntemler büyük öneme sahiptirler. 4 serbestlik derecesine sahip olan Lucky Fin adlı otonom sualtı aracının model doğrulaması, bölümün devamında belirtilen metotlarla gerçekleştirilebilir.

### 3.2. Araç Dinamik Modelinin Parametrelerinin Belirlenmesi

Ek kütle katsayıları; teorik olarak katı cismin geometrisinden yararlanarak ve strip (dilim) teorisi kullanılarak türetilir. Silindirik bir katı cismin  $\bar{m}$  kütlesi,  $\bar{L}$  uzunluğu,  $\bar{r}$  dairesel kısmın yarıçapı ile aşağıdaki ek kütle katsayıları elde edilebilir [30]. Denklem (3.2)'den Denklem (3.7)'ye kadar ek kütle matrisinin köşegen katsayılarını elde eden eşitlikler verilmiştir.

$$X_{\dot{u}} = -0,1\bar{m} \quad (3.2)$$

$$Y_{\dot{v}} = \pi\rho\bar{r}^2\bar{L} \quad (3.3)$$

$$Z_{\dot{\omega}} = -\pi\rho\bar{r}^2\bar{L} \quad (3.4)$$

$$K_p=0 \quad (3.5)$$

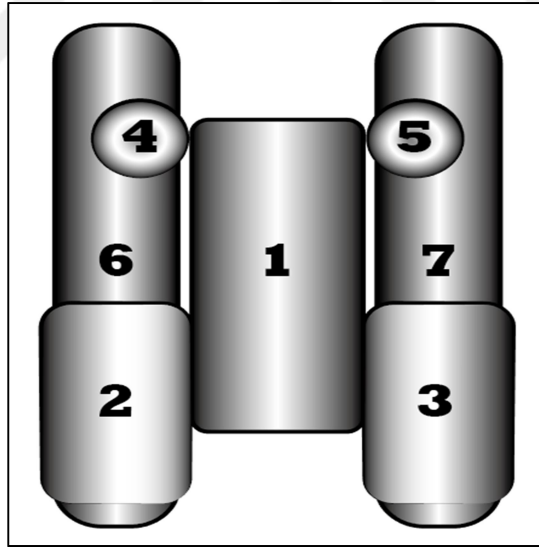
$$M_q = -\frac{1}{12}\pi\rho\bar{r}^2\bar{L}^3 \quad (3.6)$$

$$N_i = -\frac{1}{12}\pi\rho\bar{r}^2\bar{L}^3 \quad (3.7)$$

### 3.2.1. Lucky Fin sualtı aracına ait bilinmeyen parametrelerinin bulunması

Şekil 3.5'te gösterildiği üzere Lucky Fin otonom sualtı aracı kaba hatları ile 5 silindirik parçadan oluşmaktadır. 1 ile belirtilen kısım sualtı aracının gövdesi, 2, 3, 4 ve 5 aracın motorları iken 6 ve 7 ile gösterilen kısım silindirik pillerdir. 4 ve 5 ile 2 ve 3 özdeşdir. Lucky Fin, x eksenine göre simetriktir.

Aracın Şekil 3.5'te belirtilen her bir parçasına ait parametrik hesaplamalar Ek-A'da verilmiştir.



Şekil 3.5. Lucky Fin'in ana parçalarının vektörel çizimi

### 3.3. Aracın Parametrelerinin Bilgisayar Destekli Tasarım Programı Kullanarak Elde Edilmesi

İSAA'nın 6 serbestlik dereceli davranışı belirlenmek istenirse, Denklem (2.24)'ün tüm parametreleri bilinmelidir. Giriş tork ve gücü  $\tau_x$  bilindiği varsayılmalı böylece görev döngüsü/voltaj ölçümlerinden direkt hesaplanabilmelidir. İSAA'nın kendi

gövde ağırlığı  $m$ , sıvı yoğunluğu  $\rho$ , İSAA'nın etkisiyle yer değiştiren sıvının hacmi  $\rho$ , ağırlık merkezi ile yatay motor arasındaki uzaklık  $l_1$ , kaldırma kuvveti merkezlerinin konumları  $x_b, y_b, z_b$  ve ağırlık merkezi konum  $x_g, y_g, z_g$  parametreleri, oluşan hidrodinamik kuvvetlerin hesaplanmasında kullanılırlar [30]. Bütün bu parametreler bir CAD programı ile kolayca ölçülebilir veya belirlenebilir.

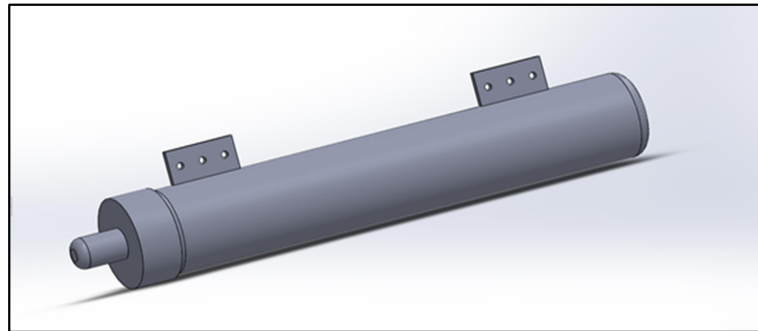
Geriye kalan eylemsizlik ve sürtünme parametreleri  $m_{\dot{x}}, d_{\dot{x}}$  ve  $d_{\dot{x}|\dot{x}|}$ ; statik ve dinamik deneylerle elde edilebilen bilinmeyen parametrelerdir [36]. Denklem (3.8)'de parametreler genel dinamik denklemde gösterilmiştir. İvmenin sıfır olduğu koşulda statik deney, sönümlenme elemanlarını; ivmenin sabit olduğu koşullarda dinamik deney ise kütle elemanlarını verir. En küçük kareler yöntemi, statik ve dinamik deneylerden elde edilen bilgiler ile bilinmeyen parametrelerin tahmin edilmesinde kullanılır [36].

$$m_{\dot{x}}\ddot{x} + d_{\dot{x}}\dot{x} + d_{\dot{x}|\dot{x}|}\dot{x}|\dot{x}| + g_{\dot{x}} = \tau_{\dot{x}} \quad (3.8)$$

Bu başlıkta Lucky Fin isimli 4 serbestlik dereceli otonom sualtı aracının SolidWorks çizimleri ve sistem gerçekleştirilmesi için bu çizim üzerinden çıkarılan  $I_{\bar{x}}, I_{\bar{y}},$  ve  $I_{\bar{z}}$  parametrelerin yanı sıra otonom sualtı aracının dinamik model hesaplamaları için gerek olan ek kütle ( $M_A$ ), katı cisim kütlesi ( $M_{RB}$ ), Coriolis etkisi ( $\underline{C}(v)$ ) ve hidrodinamik sönümlenme ( $D_{(v)}$ ) matrislerinin Lucky Fin'e göre elde edilmesi ve hesaplanmalarını içermektedir.

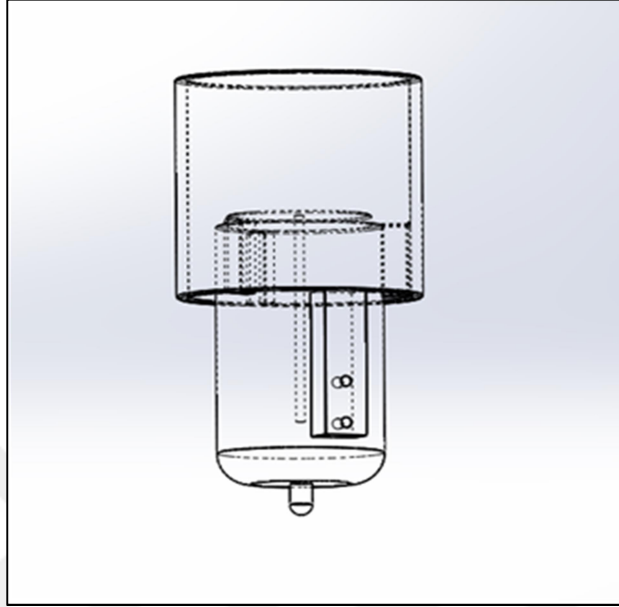
### 3.3.1. Lucky Fin aracına ait SolidWorks çizimleri ve parametre hesabı

Lucky Fin otonom sualtı aracının gerçek ölçümleri yapıldıktan sonra SolidWorks ile aracın dinamik davranışını etkileyen her bir parçası çizilmiştir.

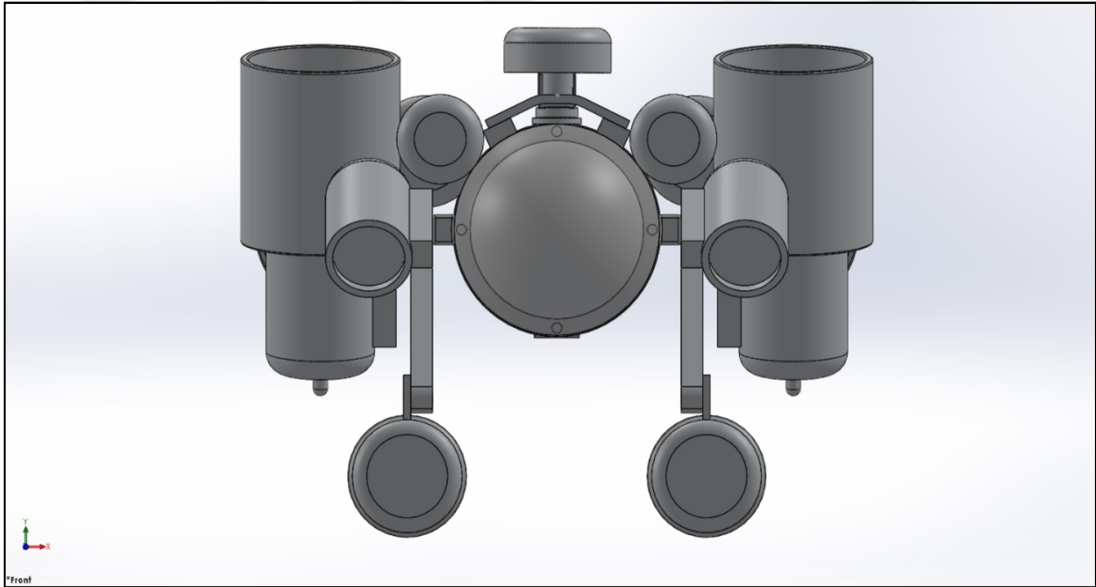


Şekil 3.6. Lucky Fin'in özdeş pilinin çizimi

Şekil 3.6’ da Lucky Fin’e ait alüminyum kaplı iki adet pilden birinin SolidWorks çizimi gösterilmiştir. Şekil 3.7 ve Şekil 3.8 ise sırasıyla araca ait ön motor ve aracın çiziminin ön açI görüntüsü verilmiştir.

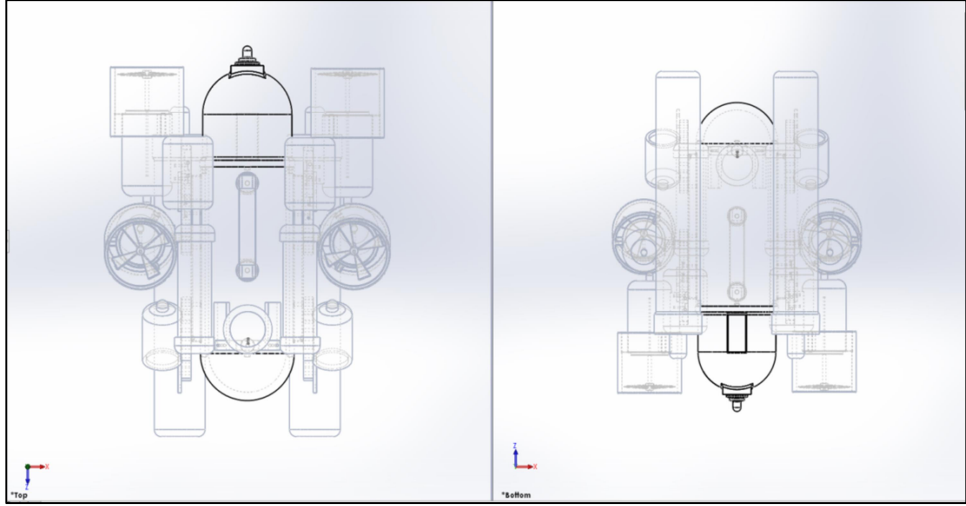


Şekil 3.7. Lucky Fin’in bir ön motorunun çizimi

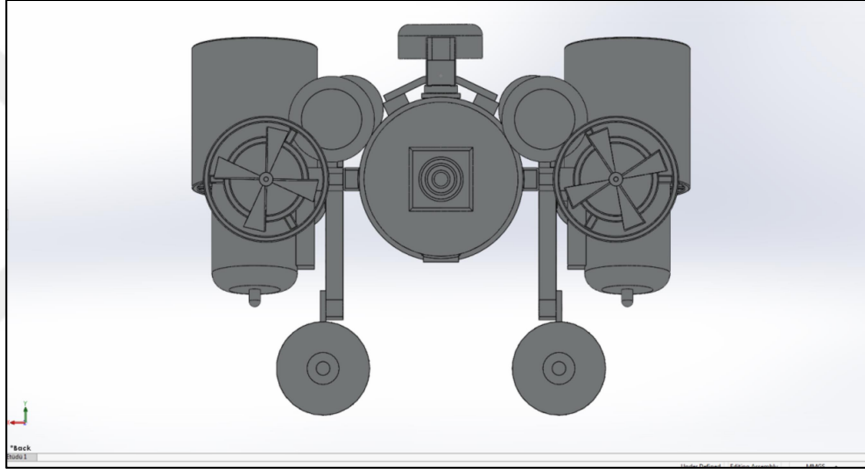


Şekil 3.8. Lucky Fin’in SolidWorks çiziminin ön görüntüsü

Şekil 3.9’da ise 4 serbestlik derecesine sahip Lucky Fin otonom sualtı aracının alttan ve üstten SolidWorks çizimi verilirken Şekil 3.10’da ise Lucky Fin’e ait itme ve manevra motorlarının çizimi verilmiştir.

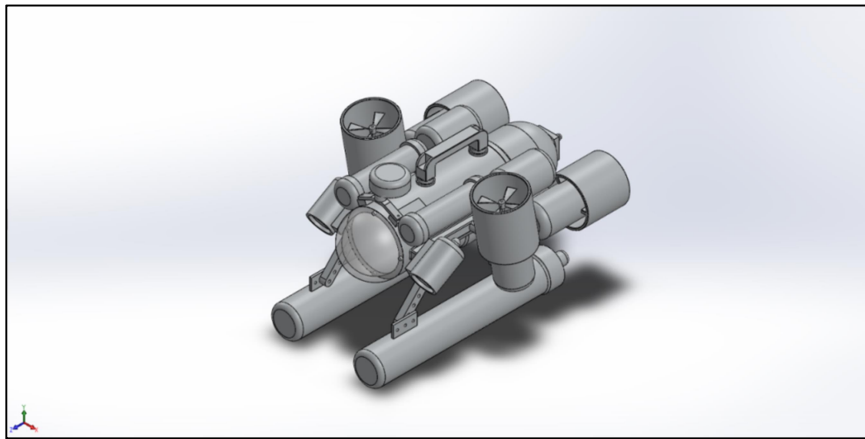


Şekil 3.9. Lucky Fin otonom sualtı aracının üst ve alt açıdan çizimi



Şekil 3.10. SolidWorks çizimi Lucky Fin'in arka motorları

Şekil 3.11'de ise robotun çizilen tüm parçaları birleştirilmiş bütün hali şeklinde gösterimine yer verilmiştir.



Şekil 3.11. Lucky Fin'in SolidWorks çizimi

Kütle ve eylemsizlik parametreleri SolidWorks ile elde edilmiştir. Tablo 3.3 ve Tablo 3.4’de elde edilen parametreler verilmiştir.

Tablo 3.3 SolidWorks ile elde edilen Lucky Fin’e ait bazı parametreler

Parametreler	Birim	LuckyFin
m	kg	34,32
$I_x$	$\text{kgm}^2$	[6,17 , -0,30 , 0,96]
$I_y$	$\text{kgm}^2$	[1 , 0 , 0]
$I_z$	$\text{kgm}^2$	[0 , 0,96 , 0,30]
$x_g$	m	0,01
$y_g$	m	-0,05
$z_g$	m	0,39
Hacim	$\text{m}^3$	0,01
Yüzey Alanı	$\text{m}^2$	1,52
$P_x$	$\text{kgm}^2$	0,64
$P_y$	$\text{kgm}^2$	0,91
$P_z$	$\text{kgm}^2$	1,06

Tablo 3.4. SolidWorks ile elde edilen atalet tensörü parametreleri

Parametreler	Birim	LuckyFin
$I_{xx}$	$\text{kgm}^2$	6,17
$I_{xy}$	$\text{kgm}^2$	-0,01
$I_{xz}$	$\text{kgm}^2$	0,08
$I_{yx}$	$\text{kgm}^2$	-0,01
$I_{yy}$	$\text{kgm}^2$	6,20
$I_{yz}$	$\text{kgm}^2$	-0,78
$I_{zx}$	$\text{kgm}^2$	0,08
$I_{zy}$	$\text{kgm}^2$	-0,78
$I_{zz}$	$\text{kgm}^2$	0,76

Bu parametreler ışığında Lucky Fin için;

$$m = 34,3 \text{ kg}$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3 \text{ (su)}$$

Atalet tensörü ise aracın elde edilen hesaplamaları ve ihmallerine göre; Denklem (3.9)'dan Denklem (3.16)'ya kadar araca ait dinamik eşitliklere yer verilmiştir;

$$I = \begin{bmatrix} 6,17 & 0 & 0 \\ 0 & 6,20 & 0 \\ 0 & 0 & 0,76 \end{bmatrix} \text{ olur.} \quad (3.9)$$

Aracın  $M_{RB}$  ve  $C_{RB}$  ise;

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} 34,342 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 34,342 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 34,342 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6,17 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6,20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,76 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Tensör ve kütle değerleri Denklem (2.34)'te yerine konursa ;

$$C_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 34,342w & -34,342v \\ 0 & 0 & 0 & -34,342w & 0 & 34,342u \\ 0 & 0 & 0 & 34,342v & -34,342u & 0 \\ 0 & 34,342w & -34,342v & 0 & 0,76r & -6,2q \\ -34,342w & 0 & 34,342u & -0,76r & 0 & 6,17p \\ 34,342v & -34,342u & 0 & 6,2q & -6,17p & 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

4 serbestlik derecesine sahip Lucky Fin otonom sualtı aracının motorlarının konum ve pozisyonları gereği sağa sola öteleme ve yunuslama hareketlerini yapamamaktadır. Dolayısıyla bu hareketlerin hız parametreleri ( $v$ ,  $q$ ) sıfırdır. Lucky Fin  $C_{RB}$  ;

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 34,342w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -34,342w & 0 & 34,342u \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -34,342u & 0 \\ 0 & 34,342w & 0 & 0 & 0,76r & 0 \\ -34,342w & 0 & 34,342u & -0,76r & 0 & 6,17p \\ 0 & -34,342u & 0 & 0 & -6,17p & 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Coriolis etkisi, Lucky Fin gibi hızı yavaş (1 m/sn altında) araçlar için oldukça



küçüktür. Bu yüzden ihmal edilmesi dinamik modelleme için yüksek oranda hatalı sonuç oluşturmaz. Lucky Fin otonom sualtı aracında yerçekimi ve yüzdürme merkezleri x ve y eksenleri boyunca hizalanır ve dolayısıyla yerçekimi ve kaldırma kuvvetleri sadece z ekseninde etkilidir bir başka ifadeyle dikey harekete etki eder. Buradan genel denklem Lucky Fin için Denklem (3.13) şeklinde sadeleştirilebilir,

$$\mathbf{g}(\eta) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -(W-B) \cos(\theta) \cos(\phi) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Hidrodinamik sönümlenme matrisi,  $D_1$  ve  $D_q$  matrislerinin toplamıdır.  $D_q$ , denklem 2.44'den anlaşılacağı gibi hızı düşük İSAA'lar için oldukça küçük değerdedir. Bu yüzden Lucky Fin için  $D_q$  ikincil sürüklenme matrisi sıfır kabul edilebilir.  $D_1$  doğrusal sürüklenme matrisi, Lucky Fin gibi hızı 1 m/sn nin altında İSAA'ların davranışlarını etkileyebilir.  $D_q$  için Denklem (2.44)'deki matrisin her köşegen değerinin hesaplanmasında  $-0,5\rho C_d A_f$  formülü geçerlidir.  $C_d$  Rymond sabiti her köşegen değeri hesabı için 0,37 alınabilirken,  $A_f$  ise aracın x, y ve z eksenlerine göre geometrisine bağlı değişir. Lucky Fin otonom sualtı aracında;

İleri geri öteleme için ikinci derece sönümlenme;

$$X_{u|u}|u|u| = -0,5 \times 1000 \times 0,37 \times 0,24 \times |u|u| \quad (3.14)$$

Aşağı yukarı öteleme için ikinci derece sönümlenme;

$$Z_{w|w}|w|w| = -0,5 \times 1000 \times 0,37 \times 0,34 \times |w|w| \quad (3.15)$$

Lucky Fin, sağa sola öteleme ve yunuslama yapamadığı için v ve q parametreleri sıfırdır. Lucky Fin'in maksimum aşağı yukarı öteleme hızı ve ileri geri öteleme hızı sırasıyla 0,25 ve 0,14 m/sn 'dir.

Aracın hız değerleri Denklem (2.44)'te yazılınca  $D_q$ ;

$$D_q = \begin{bmatrix} 6,216 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 15,725 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6,216 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 15,725 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Deneysel ölçümlerin detayları Bölüm 3.4'te verilmiştir.

### 3.4. Deneysel Verilerin Elde Edilmesi

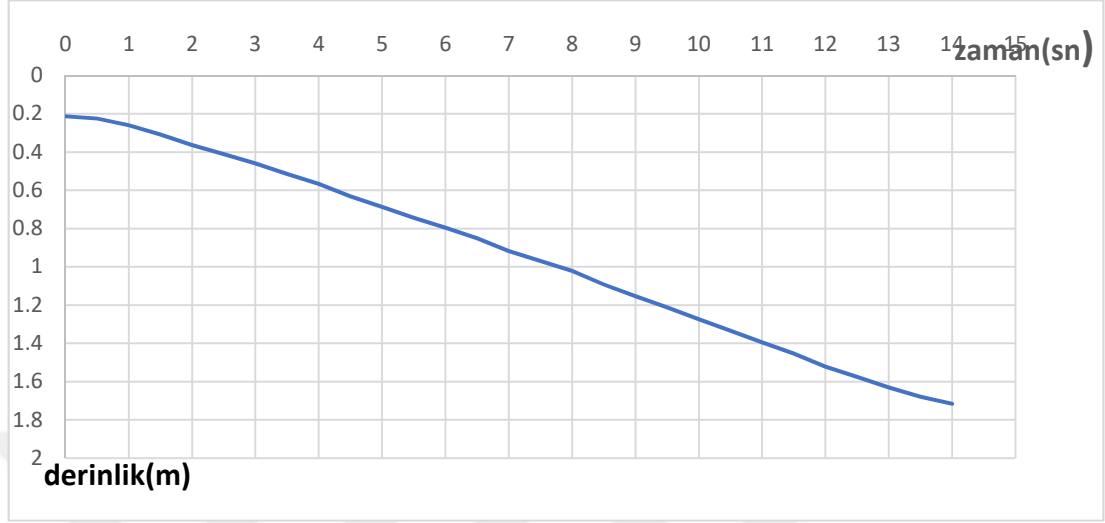
4 serbestlik derecesine sahip Lucky Fin adlı otonom sualtı aracının, Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünde bulunan sualtı aracı deney platformları ile bazı testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.12 ve Şekil 3.19). Test sonuçları ve araca ait bazı çıkarımlar bu başlık altında yazılıp yorumlanmıştır.



Şekil 3.12. Lucky Fin'in aşağı yukarı öteleme testleri

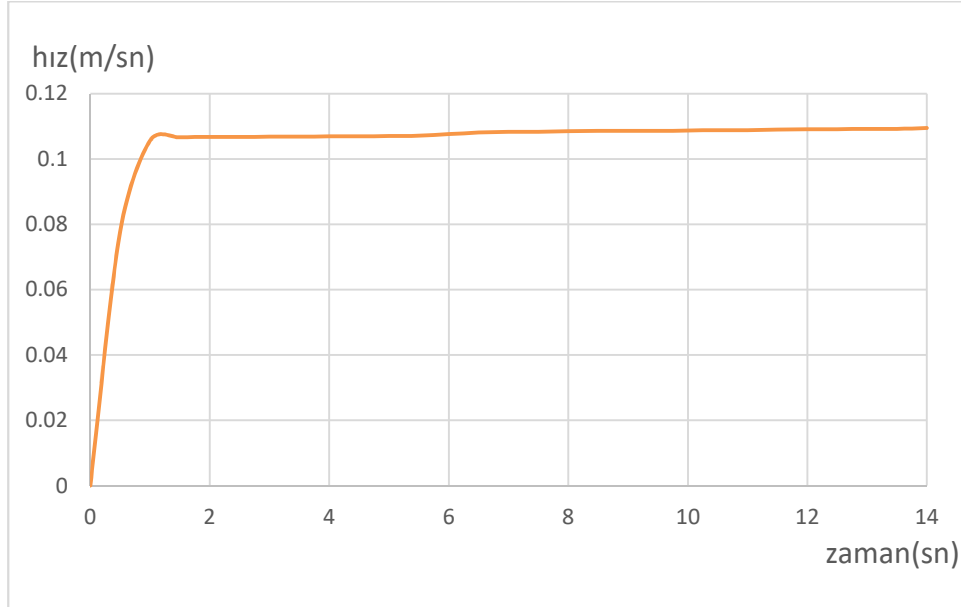
Sualtı aracı deney platformunda öncelikle Lucky Fin otonom sualtı aracının aşağı yukarı öteleme hareketi deneyi yapılmıştır. Burada otonom sualtı aracının yaklaşık olarak 1,8 metre içi su dolu deney tüpünün içine serbest bırakılmıştır.

Motorlar kapalı olarak yapılan bu ilk deneyde aracın sudaki serbest aşağı yukarı öteleme hareketi Şekil 3.13'deki grafikte gösterilmiştir.



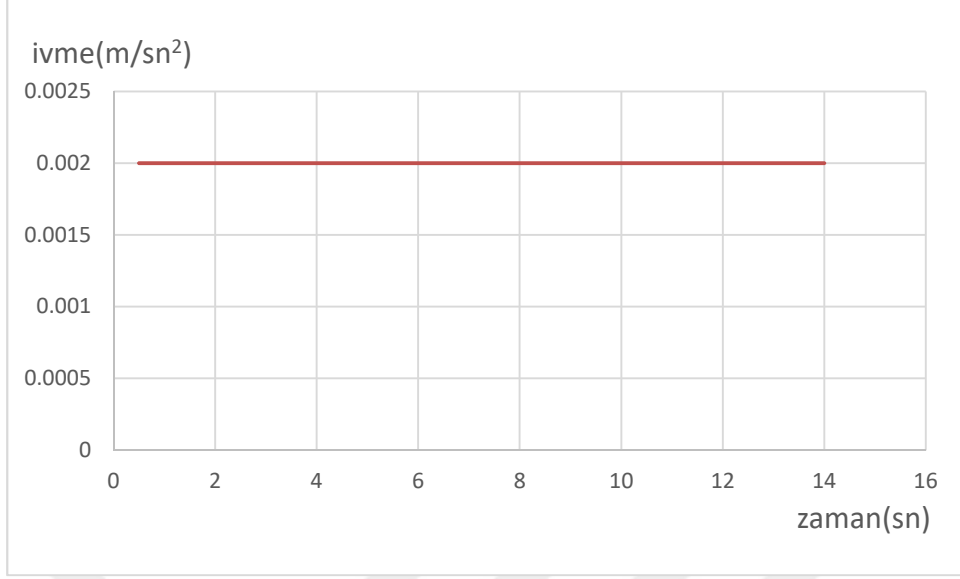
Şekil 3.13. Lucky Fin'in sıfır PWM aşağı yukarı ötelemesi

Grafikten anlaşılacağı üzere sualtı aracı serbest aşağı yukarı ötelemesini yaklaşık 1,8 metre deney tüpü için 14 saniye civarında tamamlamıştır. Şekil 3.13'deki Lucky Fin'e ait aşağı yukarı ötelemeden yola çıkarak Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te sırasıyla aracın hızı ve ivmesi verilmiştir.



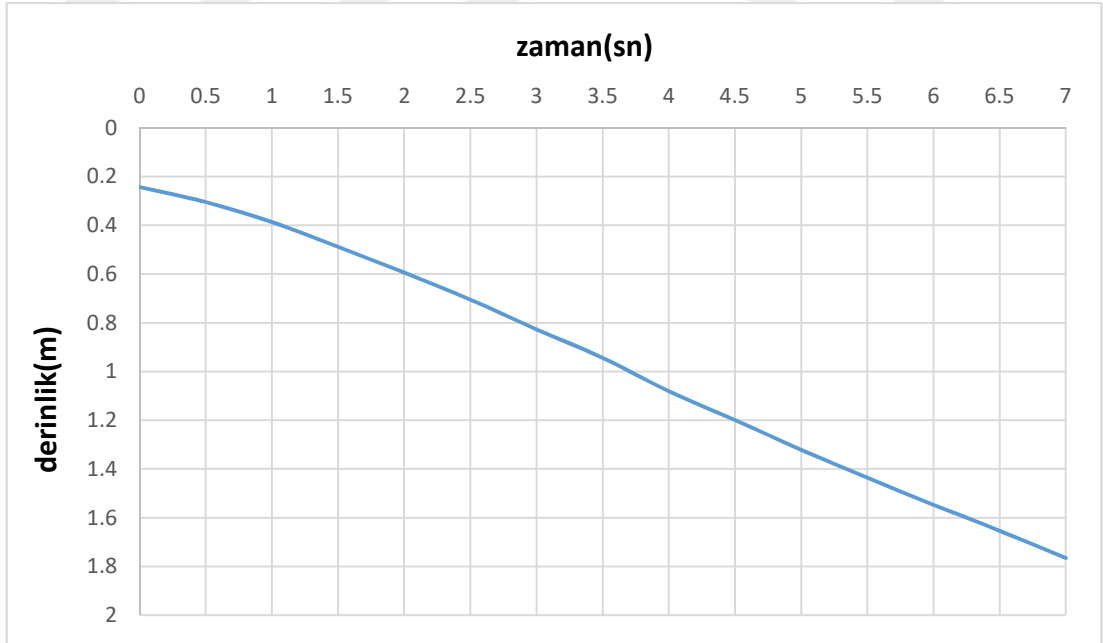
Şekil 3.14. Aracın aşağı yukarı öteleme hızının zamana göre değişimi

Aracın sudaki ağırlığı sürtünme kuvvetine eşit olana kadar ani bir hızlanma göstermiştir. Daha sonra yavaşlayarak belli hız civarına oturmuştur.



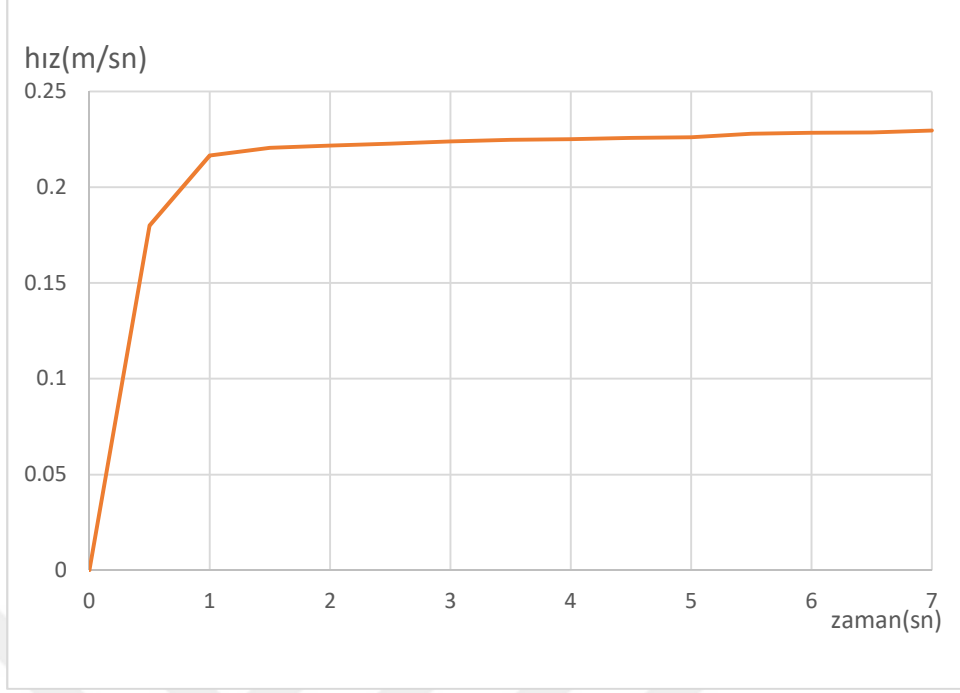
Şekil 3.15. Lucky Fin'in sıfır PWM aşağı yukarı öteleme hareketi ivmesi

Lucky Fin sualtı aracına uygulanan diğer bir deneyde aracı suda aşağı yukarı ötelemesini sağlayan motorları tam PWM ile çalıştırılıp diğer arka motorları çalıştırılmayarak, aracın aşağı yukarı ötelemesi sonucu yer değişmesi, hızı ve ivmesi grafikler halinde belirtilmiştir.

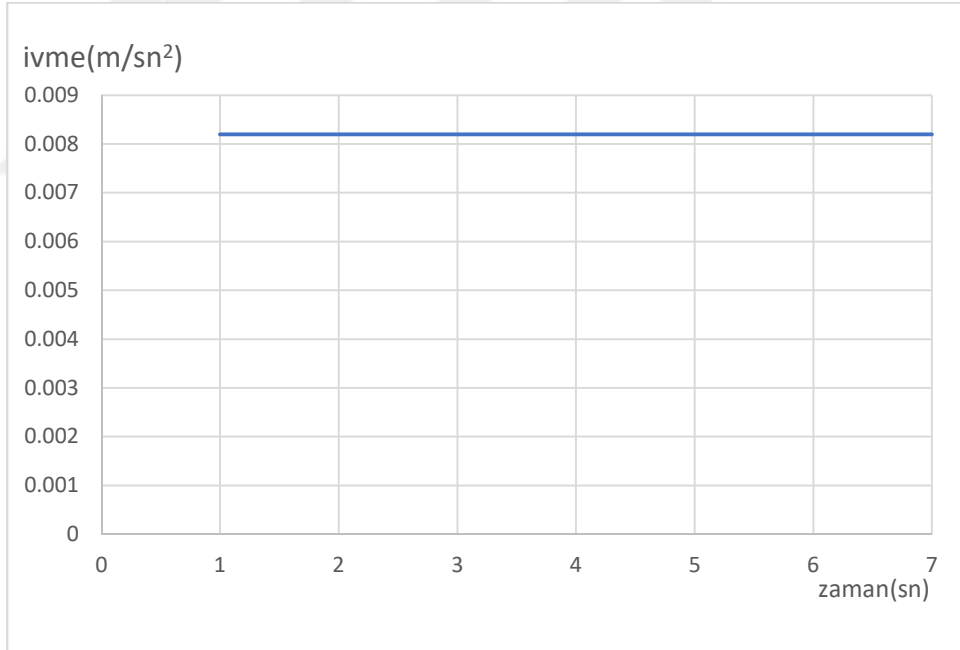


Şekil 3.16. Lucky Fin'in tam PWM aşağı yukarı öteleme hareketi

Şekil 3.16.'taki otonom sualtı aracının aşağı yukarı ötelemesinin deney sonucu baz alınarak çizdirilen hız ve ivme grafikleri Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 3.17. Lucky Fin'in tam PWM aşağı yukarı öteleme hızı (w)

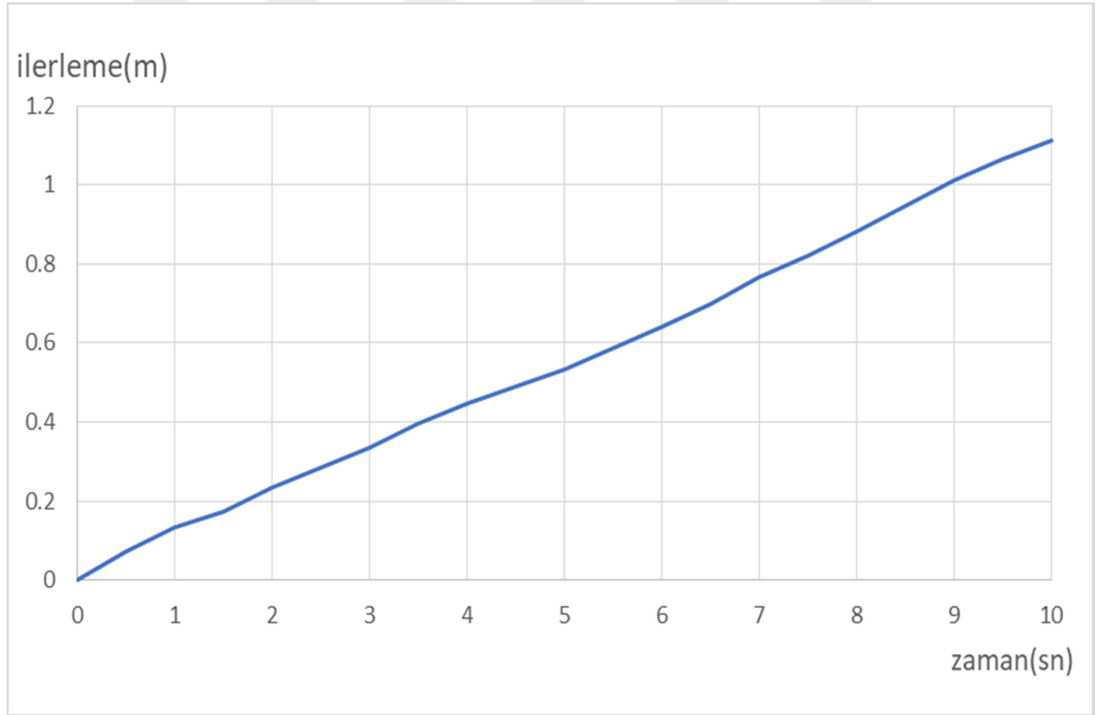


Şekil 3.18. Lucky Fin'in tam PWM aşağı yukarı öteleme ivmesi

Sualtı aracına uygulanan bir diğer deneyde aracın ileri geri öteleme hareketi, buna bağlı o yöndeki doğrusal ve açısal hızı ( $u$ ,  $p$ ) ile aracın deney havuzundaki yerdeğiştirmesi ölçülmüştür. Deney havuzunun derinliği 0,6 metre olduğu için hareket esnasında aracın serbest batma hareketinden kaynaklı dibe batmayı ve aynı zamanda yunuslama hareketini engellemek için araca köpük yüzdürücü eklenmiştir.

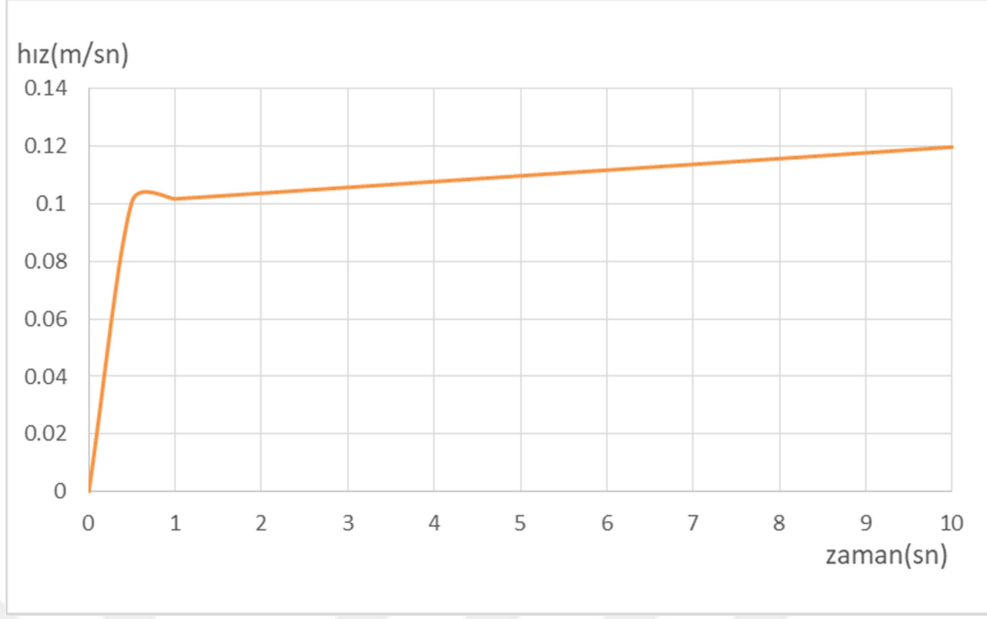


Şekil 3.19. Lucky Fin'in ileri geri öteleme testi



Şekil 3.20. Lucky Fin'in ileri geri öteleme yerdeğiştirme

Lucky Fin sualtı aracının test videosu alındığı sırada hız bilgisi edinilmiştir.



Şekil 3.21. Lucky Fin'in ileri geri öteleme hızı (u)

Yukarıda sualtı aracının ileri-geri öteleme hareketi deneyine ait yerdeğiştirme ve hız verileri sırasıyla Şekil 3.20 ve Şekil 3.21'de verilmiştir.

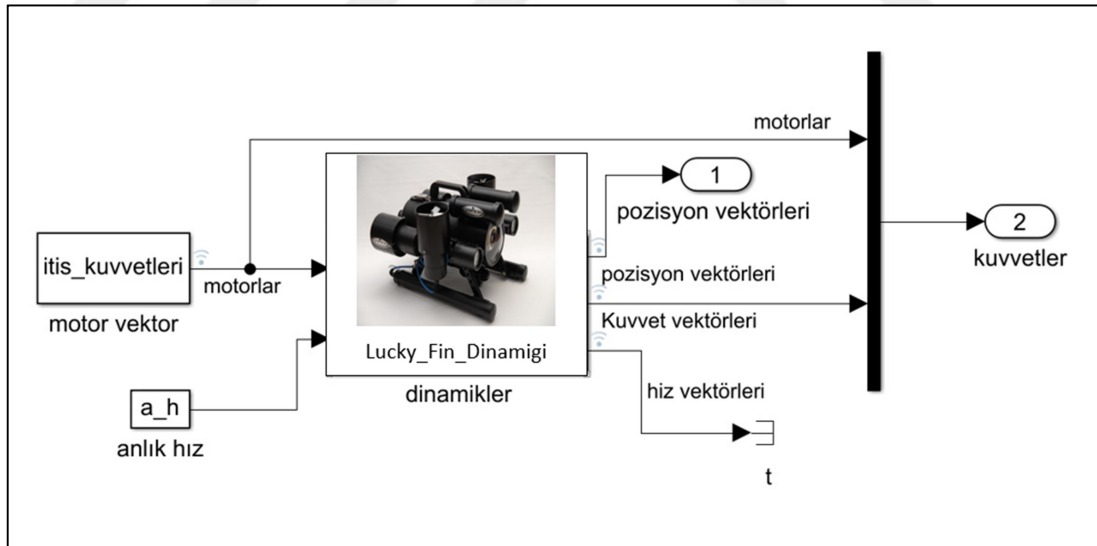
## 4. SUALTI ARACI BENZETİMİ

### 4.1. Simulink Gösterimi

Lineer ve açısal dönüşüm matrisi içeren Jacobian hız dönüşüm matrisi Denklem (4.1)'de verilmiştir.

$$J = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta + c\psi s\theta s\varphi & s\psi s\varphi + c\psi s\theta c\varphi & 0 & 0 & 0 \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta + s\psi s\theta s\varphi & -c\psi s\varphi + s\psi s\theta c\varphi & 0 & 0 & 0 \\ -s\theta & c\theta s\varphi & c\theta c\varphi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & s\varphi t\theta & c\varphi t\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c\varphi & -s\varphi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s\varphi/c\theta & c\varphi c\theta \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Bu doğrultuda yazılım üzerinde sualtı aracının modellenmesini sağlamak amacıyla matrisin simülink modeli gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1).



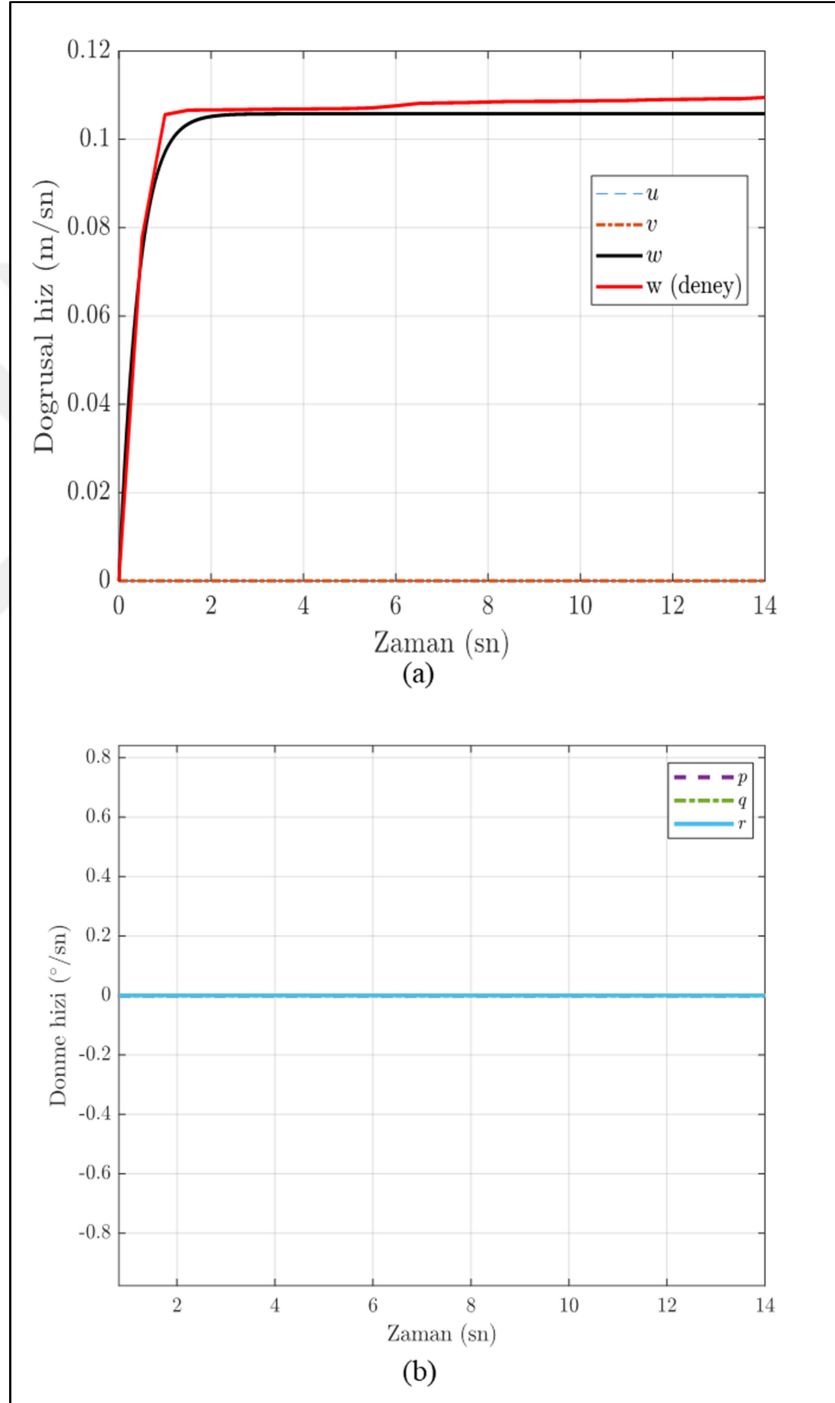
Şekil 4.1. Lucky Fin Simülink dinamik model

### 4.2. Benzetim Modelinin Doğrulanması

Otonom sualtı aracı için gerçekleştirilen Solidworks çiziminden alınan dinamik parametreler ve bunlardan elde edilen hidrodinamik etkilerin denklem değerleri, sualtı aracı için oluşturulan Matlab kodunda çalıştırıldı. Matlab kodu çalışma

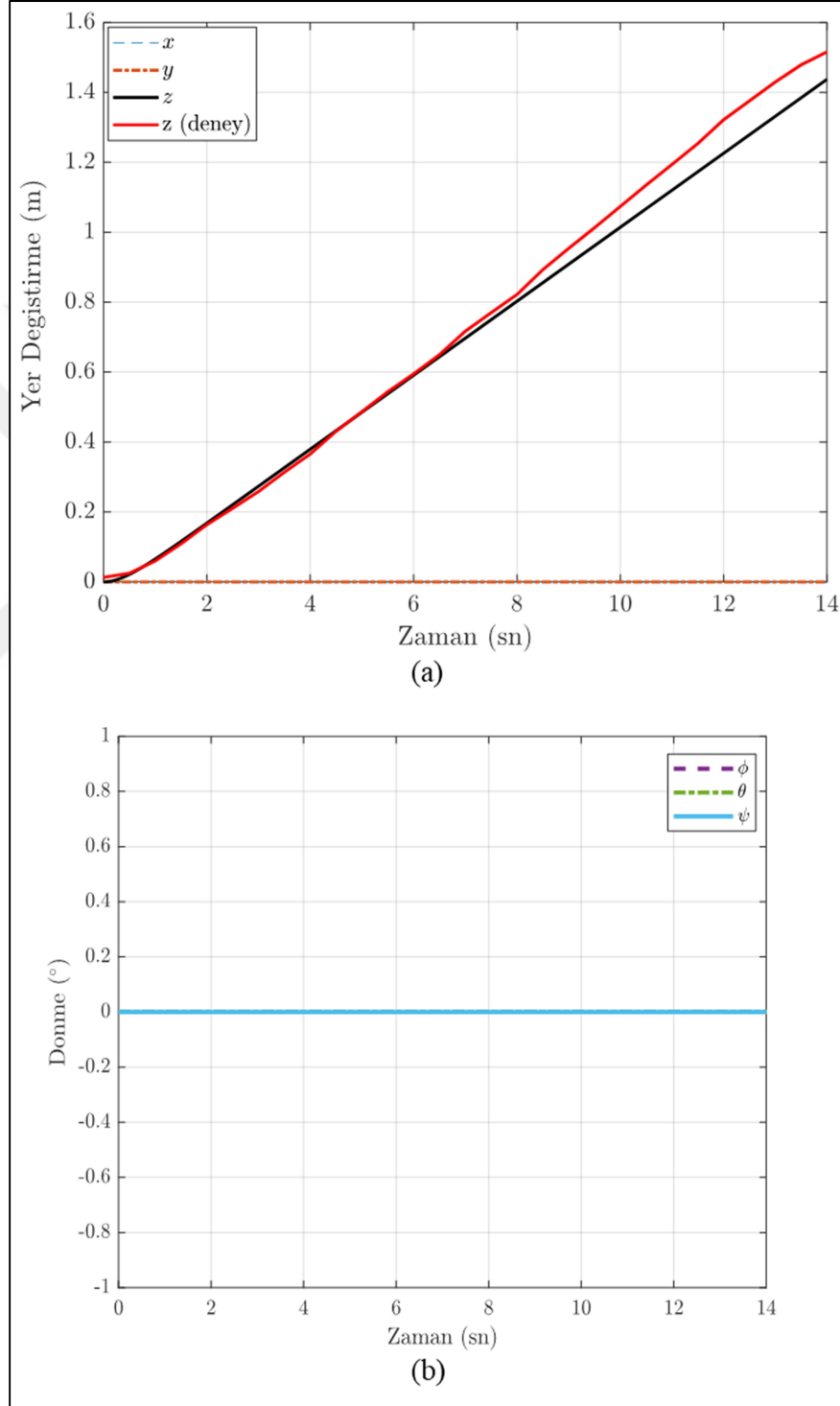


adımlarını gösteren akış şeması Ek-B’de verilmiştir. Alınan sonuçlar; ilk olarak Lucky Fin’in serbest aşağı yukarı ötelemesi için gerçekleştirilen deney sonuçlarıyla karşılaştırıldı. Daha sonra sırasıyla tam PWM aşağı yukarı öteleme ve tam pwm ileri geri öteleme deneylerinin sonuçları ile Matlab benzetim sonuçları karşılaştırılıp yorumlandı.



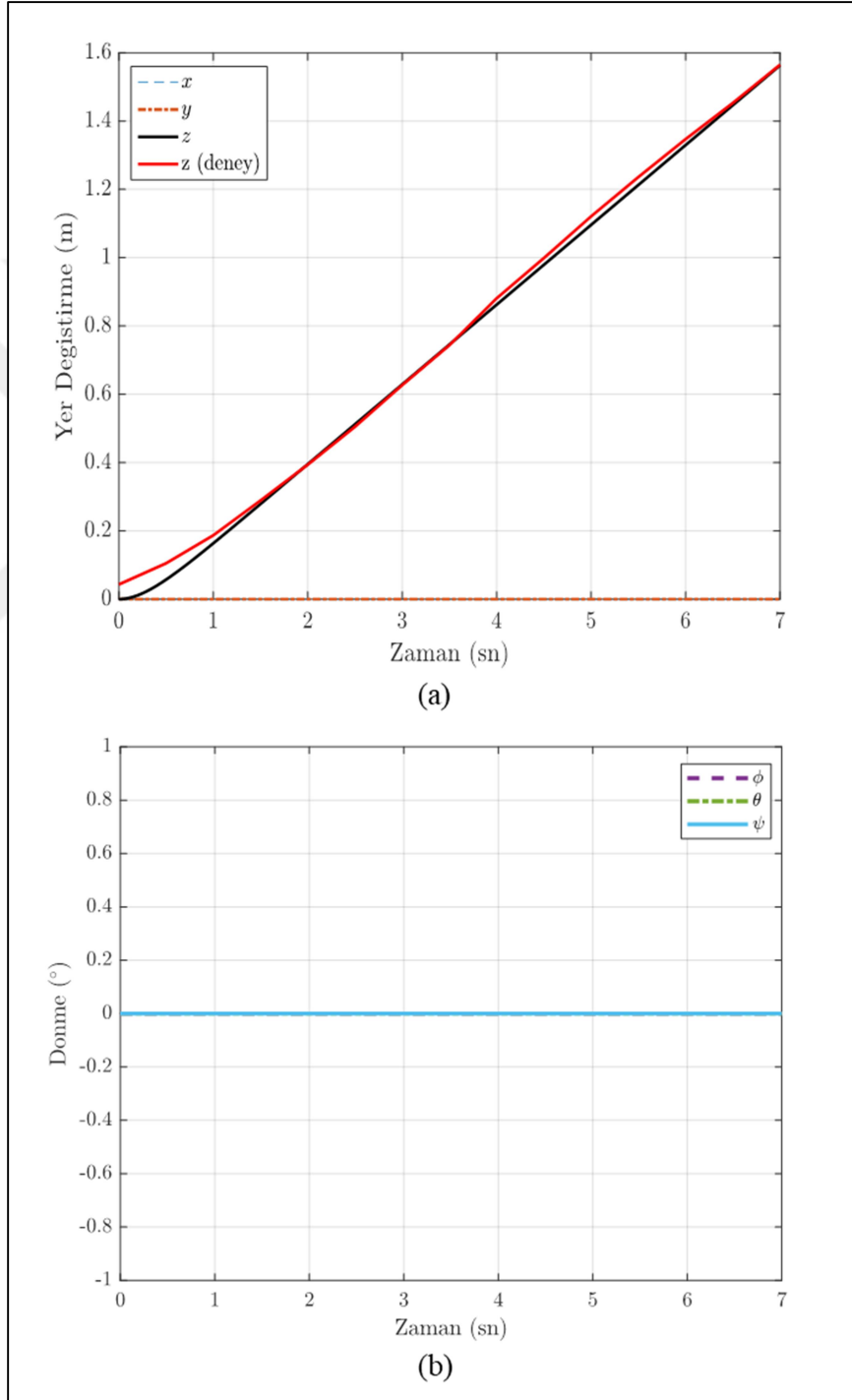
Şekil 4.2. Benzetim sonucu Lucky Fin’in doğrusal (a) ve dönme hızları (b)

Şekil 4.2'deki benzetim sonucundan da anlaşılacağı üzere; serbest batma hareketi yapan Lucky Fin' in motorlar kapalı iken kendi maksimum batma hızına ulaştığı ve bunun 0,1 m/sn biraz üstü olduğu görülmektedir. Serbest batma hareketi için test sonuçlarında elde edilen hız bilgisine oldukça yakın bir benzetim elde edilmiştir.



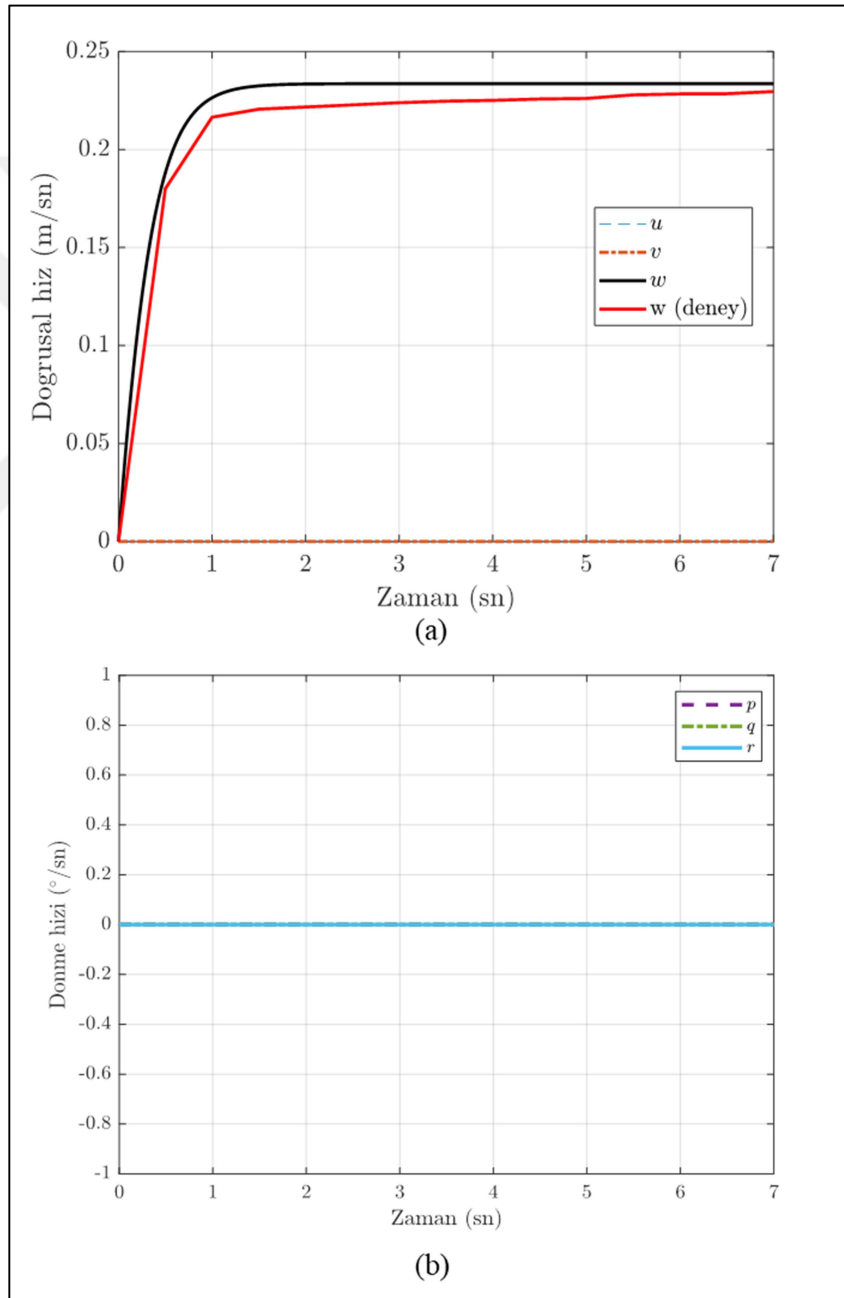
Şekil 4.3. Benzetim sonucu Lucky Fin'in serbest doğrusal (a) ve dönme hareketleri (b)

Lucky Fin tüm motorları kapalı iken yaptığı serbest batma hareketini deneyde 14 saniyede tamamlamıştır ve 1,5 metrenin biraz üstünde konum değiştirmiştir. Bu konum değişikliğinin benzetim sonucu deney sonucuna yakındır. Batma hareketi süresince Lucky Fin aşağı yukarı öteleme dışında herhangi bir doğrusal ya da açılal harekette bulunmamıştır (Şekil 4.3).



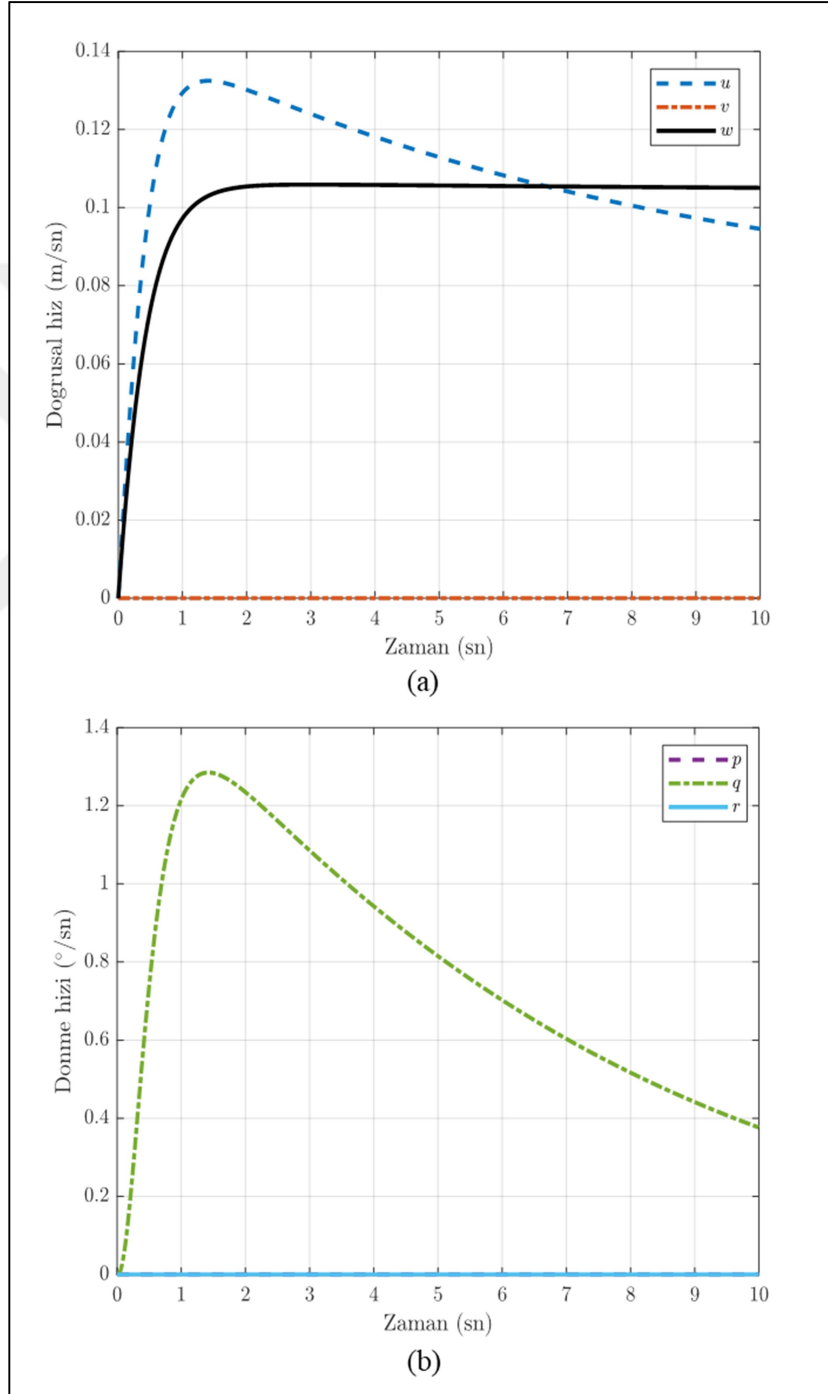
Şekil 4.4. Benzetim sonucu Lucky Fin'in ön motorlarının tam PWM'de doğrusal (a) ve dönme hareketleri (b)

Sualtı aracının deneyi esnasında ön motorlarının tam PWM ile çalışması sonucunda 7 saniyede yaklaşık 1,5 metre z yönünde konum değişikliği yapmış yani başka bir ifadeyle batmıştı. Matlab benzetim sonucunda bu değere yaklaşıldığı görülmektedir (Şekil 4.4). Aynı deneyde hızın 0,25 m/sn'in biraz üstüne çıktığı gözlemlenmiştir. Matlabta bu aşağı yukarı öteleme hız değeri 0,2 ile 0,25 m/sn arasında hesaplanmıştır. Lucky Fin aşağı yukarı öteleme dışında açısız yada doğrusal harekette bulunmamıştır (Şekil 4.5).



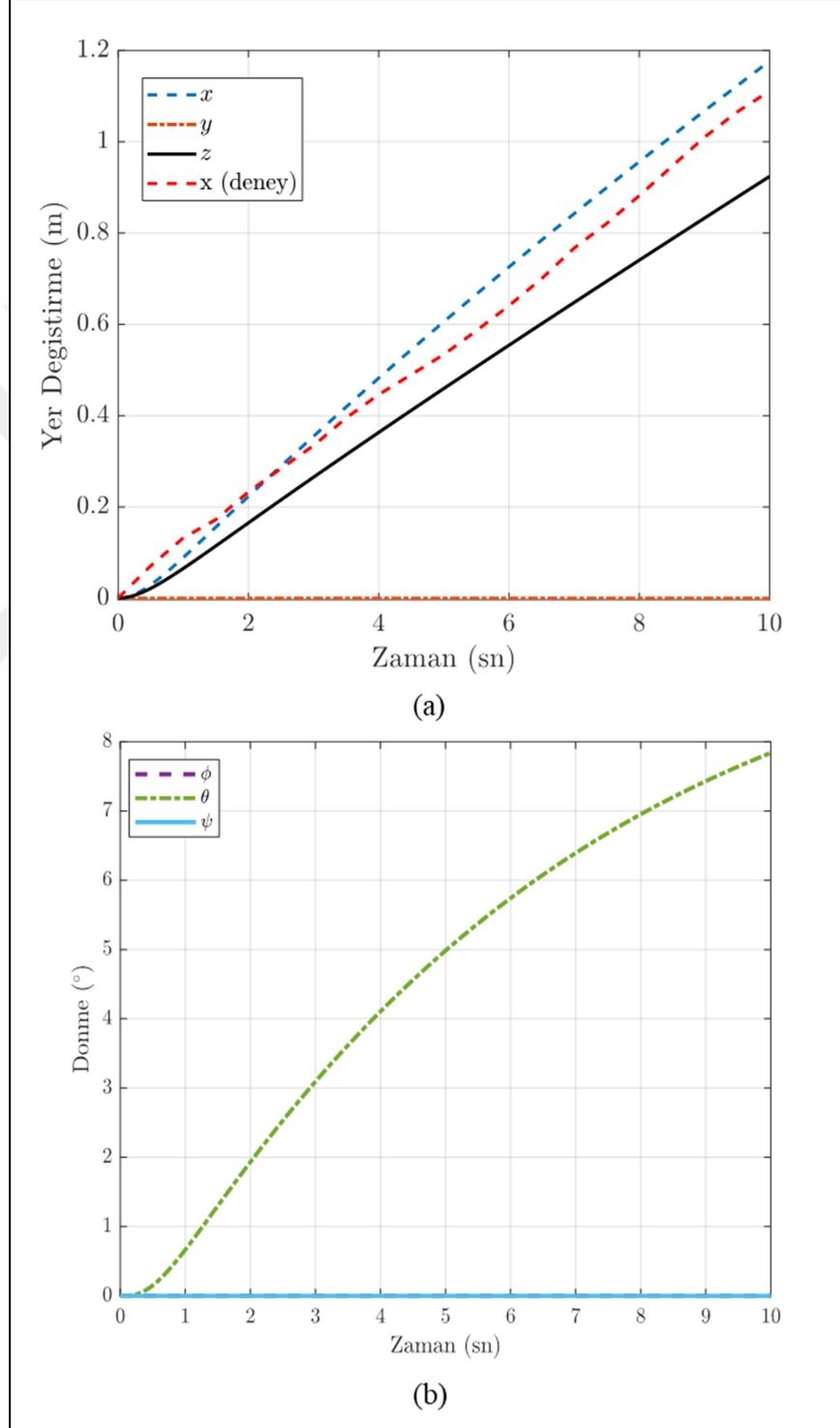
Şekil 4.5. Benzetim sonucu Lucky Fin'in ön motorları tam PWM'de doğrusal (a) ve dönme hızları (b)

Matlab benzetim sonuçları ile sualtı aracının deneysel sonuçları tam PWM'de de serbest aşağı yukarı ötelemesinde olduğu gibi büyük oranda örtüşmektedir. Deneyleerde aracın x yönündeki konum-pozisyon ve hız değerlerini gözlemlemek, ölçmek ve yorumlamak için Lucky Fin'in arka motorları tam PWM ile çalıştırılmış ve aracın hareketi gözlemlenilmişti.



Şekil 4.6. Benzetim sonucu Lucky Fin'in itiş motorlarının tam PWM'de doğrusal (a) ve dönme hızları (b)

İleri geri öteleme deneyi sırasında aracın hızı 0,1 m/sn biraz üzerinde seyretmiş ve bu yavaş hızla ilerlerken araç ön motorları kapalı olduğu için bir yandan serbest batma hareketine devam etmiştir. Üstelik serbest batma ve ileri geri öteleme hareketinin birleşmesinden dolayı yunuslama açısız hızı doğmuştur.



Şekil 4.7. Benzetim sonucu Lucky Fin'in itiş motorlarının tam PWM'de doğrusal (a) ve dönme hareketleri (b)

Şekil 4.6’da görüldüğü üzere sualtı aracının deney sonuçları ile Matlab benzetim modeli yunuslama açısız hızı dışında büyük oranda örtüşmektedir. İleri geri öteleme deneyi için kullanılan deney platformunun derinliğı az olduğı için aracın dibe oturmasını önlemek için ekstra yzdzürücüler kullanılmıştır. Bu durum, yunuslama hareketinin deneysel olarak gözlemlenmesini engellemiştir.

Lucky Fin’in ileri geri öteleme hareketi sonucunda konum değıştirmesi x yönünde doğrusal olarak 1,1 metre olarak gözlemlenmiştir. Ama Matlab benzetim sonucunda da görüldüğü gibi; aracın serbest batma ve yunuslama hareketlerinin getireceğı konum ve pozisyon değışiklikleri beklenilmiştir (Şekil 4.7).



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında; Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliğinde tasarlanan Lucky Fin isimli 4 serbestlik derecesine sahip otonom insansız sualtı aracının tam dinamik denklemleri elde edildi. Aracın geometrik olarak kompleks bir yapıda olması ve nispeten düşük hızlarda çalışması sebebiyle dinamik denklemlerin çıkarımında bir takım varsayımlar kabul edildi. Sualtı aracının 6 serbestlik dereceli davranışı genel olarak; aracın hidrodinamiğinin, hangi şartlarda ne şekilde değiştiğine bağlıdır. Buna göre, Lucky Fin'in sualtındaki hareketi boyunca maruz kalacağı mevcut hidrodinamik kuvvetler ve bu kuvvetlerin araç üzerindeki etkileri saptandı. Lucky Fin'in katı cisim gövdesine göre kütle ve atalet parametrelerinin belirlenmesi için araca ait SolidWorks çizimi yapılarak değerler hesaplanmıştır. Araca ait sönümlenme, ek Coriolis ve ek kütle deneysel çalışmalar yapılarak bunlara ait değerlerin kestirimi yapılmıştır.

SolidWorks çiziminden elde edilen dinamik parametreler kullanılarak oluşturulan dinamik modelin Matlab/Simulink ortamında benzetimi yapılmıştır. Bu benzetim modelinin doğruluğu Lucky Fin fiziksel model üzerinde deneysel çalışmalar yapılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve benzetim sonuçları incelendiğinde elde edilen tam dinamik modelin davranışı gerçek sistemin davranışı ile düşük hata oranıyla örtüştüğü gözlenmiştir.

İlerideki akademik çalışmalar için insansız sualtı aracı tasarımı ve sensör ekipmanı hakkında bir kaç öneri yapılabilir. İlk olarak, sualtı aracının tasarımı kompleks yapıdan daha sade ve geometrik hesaplamalara uygun bir hale getirilebilir. Böylece, sualtı aracının teorik hesaplamalar için daha uygun olmasının yanı sıra araç dinamik parametrelerinin tahmin ve yaklaşımı basitleşir. Dahası, aracın gövde kısmı daha geniş ve manyetik alan korumalı halde tasarlanabilir. Bu kablolar için daha sağlıklı bir durum oluşturulursa, manyetik alan ya da birçok kablodan geçen akımların aracın sürücü kartı, sensör işlemcisi gibi testlerde doğru sonuç elde etme açısından çok önemli olan cihazların bozucu etkilerden korunması sağlar. Lucky Fin'in konumunu ve hızını belirlemek için yeni bir sensör ekipmanı kurulabilir.



## KAYNAKLAR

- [1] Craven P. J., Sutton R., Burns R. S., Control Strategies for Unmanned Underwater Vehicles, *Journal of Navigation*, 1998, **51**(1), 79-105.
- [2] Richard B. D., The Development of Autonomous Underwater Vehicles (AUV); A Brief Summary, Autonomous Undersea Systems Institute [http://wpressutexas.net/cs378h/images/d/de/ICRA\\_01paper.pdf](http://wpressutexas.net/cs378h/images/d/de/ICRA_01paper.pdf) (Ziyaret tarihi: 18 Aralık 2019)
- [3] Farrell J. A., Pang S., Li W., Arrieta R., Biologically Inspired Chemical Plume Tracing Demonstrated On An Autonomous Underwater Vehicle, *Man, and Cybernetics Conference*, Netherlands, 10-13 October 2004.
- [4] Yildiz O., Gokalp R. B., Yilmaz A. E., A Review On Motion Control Of The Underwater Vehicles, *International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Bursa, Turkey, 5-8 November 2009.
- [5] Guo S., Mao S., Shi L., Li M., Design and Kinematic Analysis of An Amphibious Spherical Robot, *IEEE International Conference On Mechatronics And Automation*, China, 5-8 August 2012.
- [6] Herman P., .Decoupled PD Set-Point Controller For Underwater Vehicles, *Journal of Ocean Engineering*, 2009, **36**(6–7), 529–534.
- [7] Wadoo S., Kachroo P., *Autonomous Underwater Vehicles: Modeling, Control Design and Simulation*, 1st ed., CRC Press, USA, 2010.
- [8] Yang C., Modular Modeling and Control For Autonomous Underwater Vehicle (AUV), Master Thesis, National University of Singapore, Department of Mechanical Engineering, Singapore, 2007.
- [9] Buckham B. J., Podhorodeski R. P., Soyly S., A Chattering-Free Sliding-Mode Controller For Underwater Vehicles With Fault Tolerant Infinity Norm Thrust Allocation, *Journal of Ocean Engineering*, 2008, **35**(16), 1647–1659.
- [10] Zeinali M., Notash L., Adaptive Sliding Mode Control With Uncertainty Estimator For Robot Manipulators, *Mechanism and Machine Theory*, 2010, **45**(1), 80–90.
- [11] Qi X., Adaptive Coordinated Tracking Control Of Multiple Autonomous Underwater Vehicles, *Ocean Engineering Elsevier*, 2014, **91**, 84–90.
- [12] Mohan S., Kim J., Indirect Adaptive Control of An Autonomous Underwater Vehicle-Manipulator System For Underwater Manipulation Tasks, *Ocean Engineering*, 2012, **54**, 233–243.

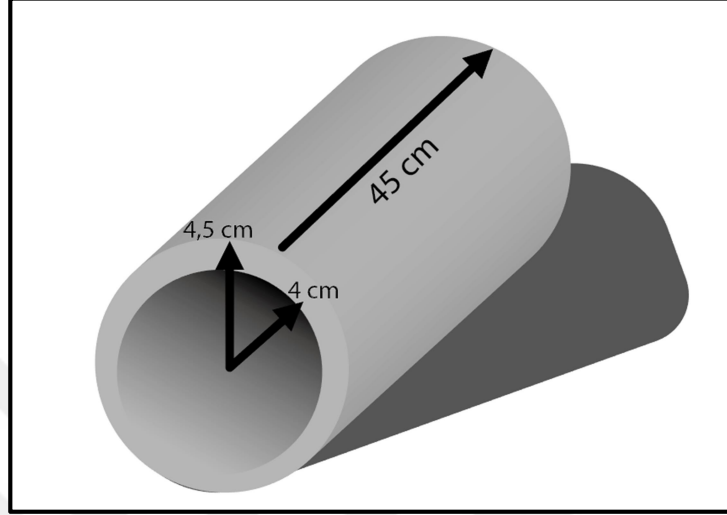
- [13] Jun S. W., Kim D. W., Lee H. J., Design Of T-S Fuzzy-Model Based Controller For Depth Control Of Autonomous Underwater Vehicles With Parametric Uncertainties, *11th International Conference On Control, Automation and Systems (ICCAS)*, Gyeonggi-do, Korea, 26-29 October 2011.
- [14] Medagoda L., Williams S. B., Model Predictive Control Of An Autonomous Underwater Vehicle In An In Situ Estimated Water Current Profile, *Ocean-Yeosu*, South Korea, 21-24 May 2012.
- [15] Steenson L. V., Phillips A. B., Turnock S. R., Furlong M.E., Rogers E., Effect Of Measurement Noise On The Performance of A Depth and Pitch Controller Using The Model Predictive Control Method. Autonomous Underwater Vehicles (AUV), *IEEE / OES*, 2012, **1**(8), 24-27.
- [16] Subudhi B., Mukherjee K., Ghosh S., A Static Output Feedback Control Design For Path Following of Autonomous Underwater Vehicle In Vertical Plane, *Ocean Engineering*, 2013, **63**, 72–76.
- [17] Kumar N., Panwar V., Sukavanam N., Sharma S. P., Borm J. H., Neural Network-Based Nonlinear Tracking Control of Kinematically Redundant Robot Manipulators, *Math Compute Model*, 2011, **53**(9–10), 1889–1901.
- [18] Fossen T. I., *Marine Control System*, 1st ed., Marine Cybernetics, Trondheim, Norway, 2002.
- [19] Xu B., Pandian S. R., Sakagami N., Petry F., Neuro-Fuzzy Control Of Underwater Vehicle-Manipulator Systems, *J. Franklin Institute*, 2012, **349**(3), 1125–1138.
- [20] Prestero T., Verification of A Six Degree of Freedom Simulation Model For the REMUS Autonomous Underwater Vehicle, MSc/ME Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Ocean Engineering, Boston, 2001.
- [21] Geisbert J. S., Hydrodynamic Modeling For Autonomous Underwater Vehicles Using Computational And Semi-Empirical Methods, MSc/ME Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Ocean Engineering, Virginia, 2007.
- [22] Yue C., Guo S., Li M., ANSYS Fluent-Based Modeling and Hydrodynamic Analysis For A Spherical Underwater Robot, *IEEE International Conference On Mechatronics And Automation*, China, 5-8 August 2012.
- [23] Indiveri G., Modelling and Identification of Underwater Robotics Systems, PhD thesis, University of Genova, Electronic Engineering and Computer Science, Genova, 1998.
- [24] Inzartsev A. V., *Underwater Vehicles*, 1st ed., In-Tech, Rijeka, Croatia, 2009.
- [25] Gonzalez L. A., Design, Modeling and Control of an Autonomous Underwater Vehicle, Bachelor of Engineering Honours Thesis, The University of Western Australia, Electronic and Computer Engineering, West Australia, 2004.

- [26] Yuh J., Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey, *Autonomous Robots*, 2000, **8**, 7-24.
- [27] Yakut M., Yılmaz S., İnce S., Otçu M., Aygün E., Derinlik ve Yön Kontrol Uygulamaları için Sualtı Aracı Tasarımı, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C*, 2015, **3**, 343-355.
- [28] Healey A. J., Lienard D., Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles, *IEEE Journal of Ocean Engineering*, 1993, **18**(3), 327-339.
- [29] Brutzman D. P., A Virtual World for an Autonomous Underwater Vehicle, PhD Thesis, Naval Postgraduate School, California, 1994.
- [30] Antonelli G., *Underwater Robots*, 3rd ed., Springer International Publishing, Switzerland, 2014.
- [31] Dinç M., Hajiyeve C., Integration of Navigation Systems for Autonomous Underwater Vehicles, *Journal of Marine Engineering & Technology, Department of Aeronautical Engineering*, 2015, **14**, 32-43.
- [32] Sørensen A. J., Marine Control Systems: Propulsion and Motion Control of Ships and Ocean Structures, *Department of Marine Technology Norwegian University of Science and Technology*, UK-13-76., 175-225, 2013.
- [33] Dukan, F., ROV Motion Control Systems, Phd Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Department of Marine Technology, Trondheim, 2014.
- [34] Vervoort J. H. A. M., Modeling and Control of an Unmanned Underwater Vehicle, Master Thesis, University of Canterbury, Department of Mechanical Engineering Mechatronics, Canterbury, 2009.
- [35] Patel N., M., Gano S. E., Renaud J. E., Martin F. D., Michael A. Y., Simulation Model of an Autonomous Underwater Vehicle for Design Optimization, *Structural Dynamics & Materials Conference*, California, USA, 19-22 April 2011.
- [36] Gevers M., A Personal View Of The Development of System Identification, *IEEE Control Systems Magazine*, 2006, **26**, 93- 105.



## Ek-A

6 ve 7 ile Şekil A.1 de gösterilen alüminyum kaplı pillerin boyu 45 cm iken çapı 9 cm'dir.



Şekil A.1. Aracın bir pilinin vektörel çizimi

Silindirin içi boş hacminin hesaplaması ise;

$$V = \pi \cdot (r_1^2 - r_2^2) h$$

$$V = 3,14(4,5^2 - 4^2)45 = 600,525 \text{ cm}^3$$

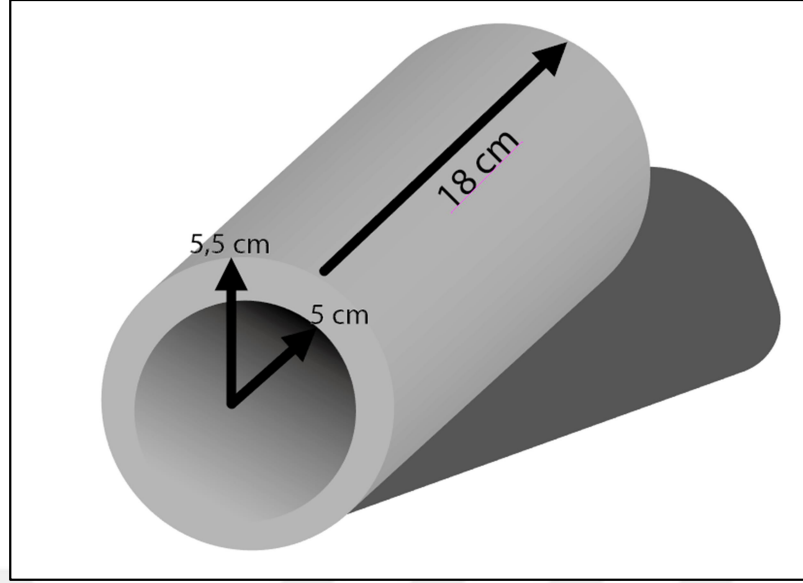
Malzeme alüminyumdur. Alüminyum özkütlesi :  $2,7 \text{ g/cm}^3$  'tür. Parçanın kütlesi ise  $600,525 \times 2,7 = 1621,41 \text{ gram} = 1,6 \text{ kg}$ . Buradan parametreleri ;

$$m_S = 1,6 \text{ kg}$$

$$V_{\text{cgs}} = 4,5 \text{ cm}$$

$$l_{\text{cgs}} = 22,5 \text{ cm} \text{ şeklinde yazabiliriz.}$$

2 ve 3 numaralı parçalarının boyu 18 cm iken çapı 11cm'dir (Şekil A.2).



Şekil A.2. Lucky Fin'in bir arka motorunun vektörel çizimi

Malzeme bakır ,  $\rho = 8,96 \text{ gr/cm}^3$  'dir.

$$\text{Hacim} = \pi(5,5^2 - 5^2)h$$

$$= 3,14(5,5^2 - 5^2)18 = 296,73 \text{ cm}^3$$

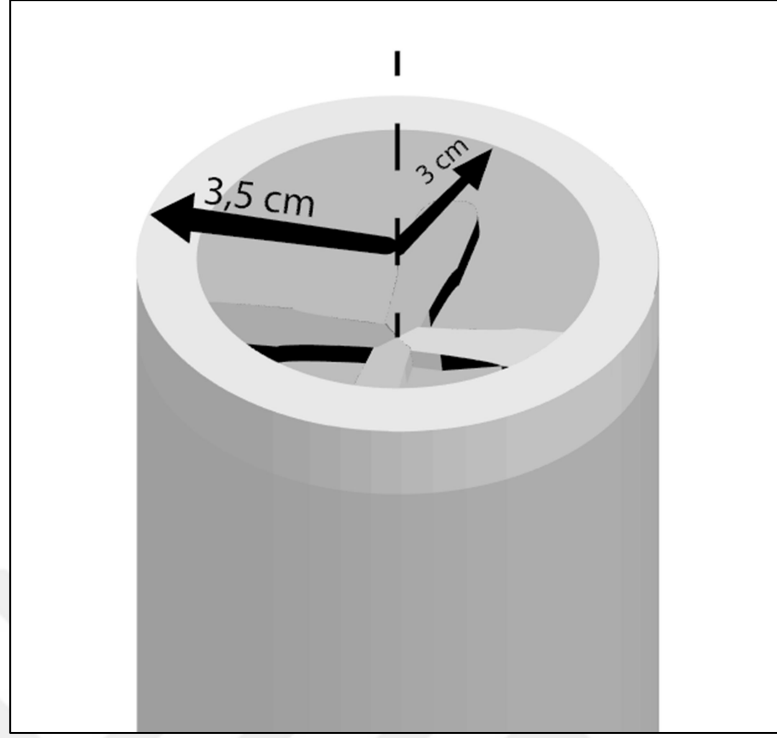
$m_s = \rho \cdot V = 2658,7 \text{ gram} = 2,65 \text{ kg}$ . Buradan bir arka motor için parametreleri;

$$m_s = 2,65 \text{ kg}$$

$$V_{\text{cgs}} = 25 \text{ cm}$$

$l_{\text{cgs}} = 9 \text{ cm}$  şeklinde yazabiliriz.

4 ve 5 numarayla belirtilen ön motorları için boy 20 cm iken çap 7 cm'dir (Şekil A.3). Malzeme arka motorlarda olduğu gibi bakırdır.



Şekil A.3. Lucky Fin'in bir ön motorunun vektörel çizimi

$$\text{Hacim} = \pi(3,5^2 - 3^2)h = 3,14(3,5^2 - 3^2)20 = 204,1 \text{ cm}^3$$

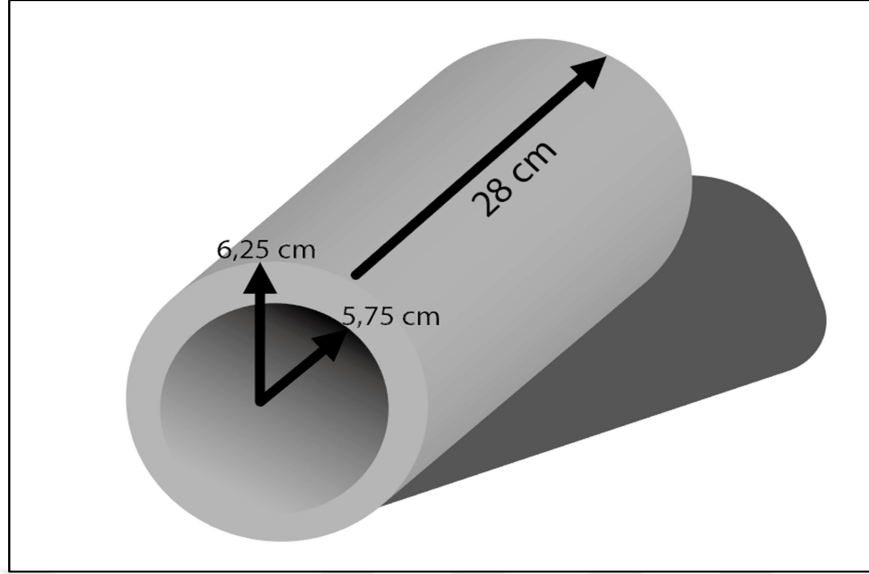
$m_S = \rho \cdot V = 8,96 \times 204,1 = 1828 \text{ gram} = 1,82 \text{ kg}$ . Buradan bir ön motor için parametreler;

$$l_{\text{cgs}} = 22 \text{ cm}$$

$$m_S = 1,82 \text{ kg}$$

$V_{\text{cgs}} = 20 \text{ cm}$  şeklinde yazılabilir.

Otonom sualtı aracının 1 numara ile belirtilen gövde kısmı ise 28 cm uzunluğunda ve 12,5 cm çapındadır (Şekil A.4). Gövdenin malzemesi ise PVC'dir.



Şekil A.4. Lucky Fin'in gövde kısmının vektörel çizimi

$$\text{Hacim} = \pi(3,5^2 - 3^2)28 = \pi(3,5^2 - 3^2)28 \text{ cm} = \pi(3,5^2 - 3^2)28 \text{ buradan};$$

$$V = 527,69 \text{ cm}^3$$

$m_S = \rho \cdot V = 738,77 \text{ gr} = 0,738 \text{ kg}$ . Yani Lucky Fin otonom sualtı aracının gövde parametrelerini ;

$$m_S = 0,738 \text{ kg}$$

$$V_{\text{cgs}} = 15 \text{ cm}$$

$l_{\text{cgs}} = 24 \text{ cm}$  şeklinde yazabiliriz.

$K_B$  ve LCB'nin tahmininde aracın yüzdürme ve ağırlık merkezleri çakışık kabul edildiğinde;

$$x_B = x_G, y_G = y_B = 0 \text{ olur.}$$

Kütle atalet momentlerinin tahmini 6 ve 7 nolu parçaları için;

$$m_S = 1,6 \text{ kg}$$

$$I_{\bar{x}} = 0,5m_S(r_0^2 - r_1^2) = 29 = I_{\bar{x}}$$

$$I_{\bar{y}} = I_{\bar{z}} = 0,25m_S(4^2 + 4,5^2 + 1012,5)$$



$$I_{\bar{y}} = 0,4(36,25 + 675) = 325 = I_{\bar{y}} = I_{\bar{z}}$$

2 ve 3 numaralı parçalar için;

$$m_s = 2,65 \text{ kg}$$

$$I_{\bar{x}} = 0,5m_s(r_0^2 - r_f^2) = 1,325(5,5^2 + 5^2) = 73,20 = I_{\bar{x}}$$

$$I_{\bar{y}} = I_{\bar{z}} = 0,25m_s(5^2 + 5,5^2 + 108) = 0,6625(55,25 + 108)$$

$$I_{\bar{y}} = I_{\bar{z}} = 108 \text{ bulunur.}$$

4 ve 5 numaralı gösterilen ön motorların her biri için  $m_s = 1,82 \text{ kg}$  olarak hesaplanmıştır. Buradan  $I_{\bar{x}}$ ,  $I_{\bar{y}}$ , ve  $I_{\bar{z}}$  hesaplamaları;

$$I_{\bar{x}} = 0,91(3,5^2 + 3^2) = 19,4225$$

$$I_{\bar{y}} = I_{\bar{z}} = 0,455(3,5^2 + 3^2 + 133,7) = I_{\bar{y}} = I_{\bar{z}} = 70,62 \text{ bulunur.}$$

1 numara ile gösterilen gövde için yapılan  $I_{\bar{x}}$ ,  $I_{\bar{y}}$ , ve  $I_{\bar{z}}$  hesaplamaları;

$$I_{\bar{x}} = 0,369(39,06 + 33,06) = 26,6 = I_{\bar{x}}$$

$$I_{\bar{y}} = I_{\bar{z}} = 0,1845(39,06^2 + 33,06 + 261,3) = 61,52 = I_{\bar{y}} = I_{\bar{z}} \text{ olarak bulunur.}$$

Buradan;

$$I_{xx} = I_{\bar{x}} + m_s(y_s^2 + z_s^2)$$

$I_{\bar{x}}$ ,  $I_{\bar{y}}$  ve  $I_{\bar{z}}$  komponent eksenlerine göre atalet momentleridir. Aracın, toplamda aracın ağırlık merkezinin tabana göre uzaklığı ( $K_G$ ) ve aracın ağırlık merkezinin aracın uzunluğuna boyuna göre uzaklığı ( $L_{CG}$ ) değerlerinin bulunması için literatürde bazı yöntemler kullanılır. Bu bağlamda Antonelli'nin hesaplamaları baz alınarak;

$$K_G = \frac{\sum (m_s \times V_{cgs})}{\sum m_s}$$

$$KG = \frac{2(7,2)+2(64,25)+2(36,56)+(11,07)}{12,838}$$

$$\frac{14,4+132,5+73,12+11,07}{12,838} = 18 \text{ cm}$$

$$LCG = \frac{\sum (ms \times l_{cgs})}{\sum ms}$$

$$\frac{72+7,47+12,54+17,712}{12,838} = 16,96 \text{ cm}$$

Geometrik orjine göre farklar;

$$x_G = 22,5 - 18 = 4,5 \text{ cm.}$$

$$z_G = 15 - 16,96 = -1,96 \text{ cm}$$

Silindirin eklenmiş kütlesi;

$m_{11}$  = Toplam kütlenin %5'i ve ya %10' u kadardır.

$$m_{11} = \frac{12,838}{10} = 1,28 \text{ kg}$$

$$m_{33} = m_{22} = \int_{-L/2}^{L/222,5} \rho \cdot \pi \cdot r^2 dx = \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot L = \rho \cdot \bar{V}$$

Ortadaki silindire  $m_{33} = m_{22} = 527,69 \text{ cm}^3 \times 1 \text{ gr/cm}^3$

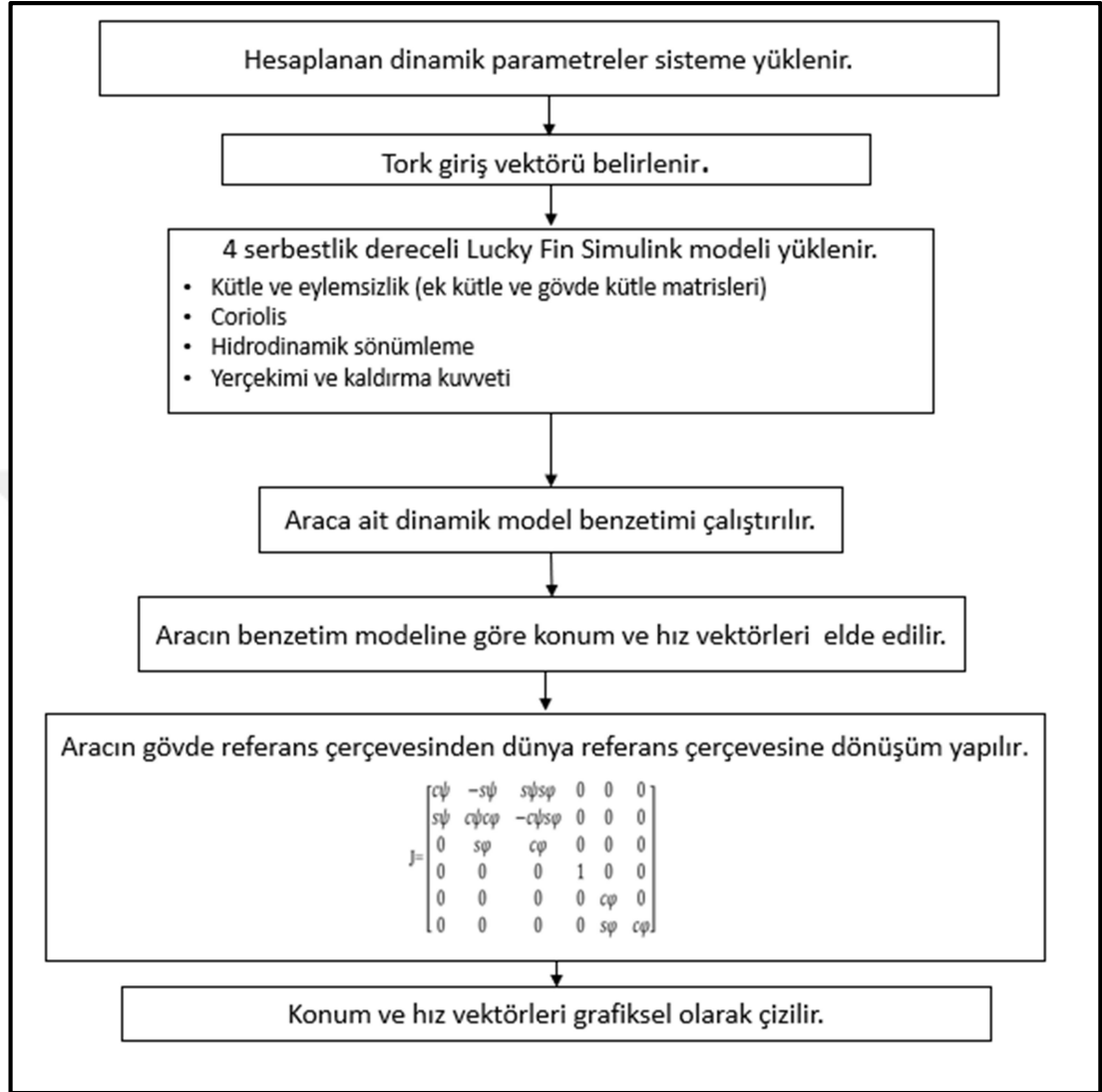
$$m_{33} = m_{22} = 5,27 \text{ kg}$$

$$m_{33} = m_{22} = \int_{-L/2}^{L/2} x^2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^2 dx = \frac{L^3}{12} \rho \cdot \pi \cdot r^2 = \frac{L^2}{12} \rho \cdot \bar{V}$$

$$0,527 \times \frac{28^2}{12} = 34,43 \text{ kg.}$$

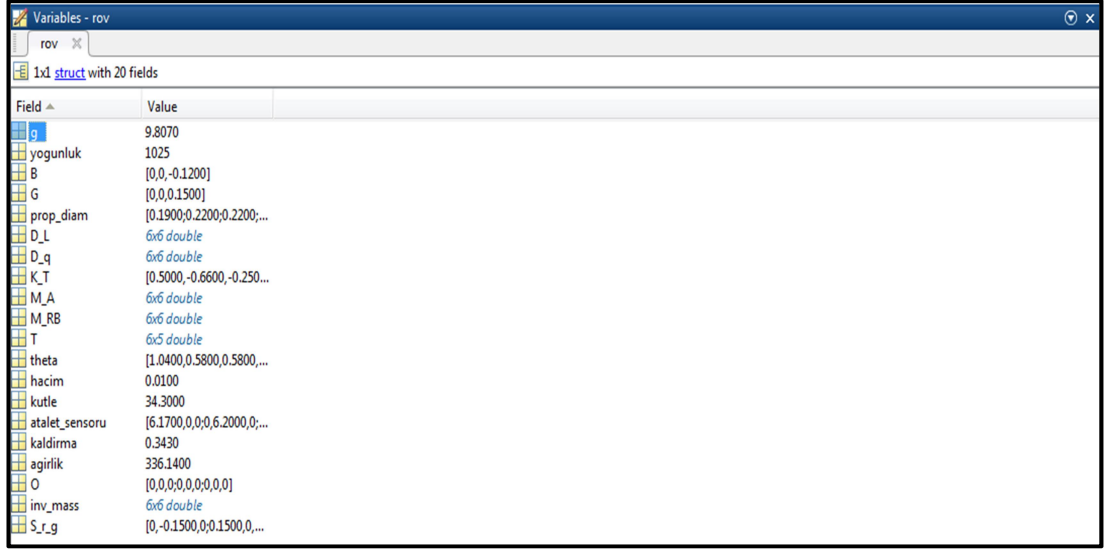
$m_{44} = 0$  ve diğer elemanlar sıfırdır.

## Ek-B



Şekil B.1. Lucky Fin dinamik benzetim modeli akış şeması

4 serbestlik dereceli Lucky Fin otonom sualtı aracına sahip dinamik model benzetim modelinin akış şeması Şekil B.1’de verilmiştir. Şekil B.2’de ise araca ait dinamik parametrelerin bulunduğu Matlab dosyası verilmiştir.



Variables - rov

rov

1x1 struct with 20 fields

Field	Value
g	9.8070
yogunluk	1025
B	[0,0,-0.1200]
G	[0,0,0.1500]
prop_diam	[0.1900;0.2200;0.2200;...
D_L	6x6 double
D_q	6x6 double
K_T	[0.5000,-0.6600,-0.250...
M_A	6x6 double
M_RB	6x6 double
T	6x5 double
theta	[1.0400,0.5800,0.5800,...
hacim	0.0100
kutle	34.3000
atalet_sensuru	[6.1700,0,0,0,6.2000,0,...
kaldirma	0.3430
agirlik	336.1400
O	[0,0,0,0,0,0,0,0]
inv_mass	6x6 double
S_r_g	[0,-0.1500,0,0.1500,0,...

Şekil B.2. Lucky Fin'in dinamik parametrelerini içeren Matlab dosyası

## KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] Yılmaz S., **Kılıç S. B.**, İnsansız Sualtı Araçlarının Kinematik Modellenmesi, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi*, Kartepe, Kocaeli, 1-3 Kasım 2019.
- [2] Yılmaz S., **Kılıç S. B.**, Modeling and Simulation of a Fuzzy Heat Distribution Controlled High-Voltage DC Resistive Divider, *Measurement and Control Journal*, DOI: 10.1177/0020294019895301.



## ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında Aydın'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Aydın Cumhuriyet İlköğretim Okulunda tamamladı. 2006 yılında Aydın Adnan Menderes Anadolu Lisesine başlayıp 2010 senesinde liseden mezun oldu. 2011 yılında Kocaeli Üniversitesi'nin Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünde öğrenim almaya hak kazandı. 2017 yılında Elektronik ve Haberleşme Mühendisi ünvanını almaya hak kazandı. Takip eden dönem Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği tezli yüksek lisans programına kayıt oldu. Yüksek lisans öğreniminde, lisans tezinde üzerinde çalıştığı Lucky Fin otonom sualtı aracı için daha ileri çalışmalar yürütmektedir.