



T.C.  
EGE ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü



# SU ALTI YAŞAMININ İNCELENMESİ AMACIYLA KULLANILACAK BİR ROBOT BALIĞIN TASARIMI VE ÜRETİMİ

Yüksek Lisans Tezi

Çiğdem DURU

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir

2022

T.C.  
EGE ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü

**SU ALTI YAŞAMININ İNCELENMESİ AMACIYLA  
KULLANILACAK BİR ROBOT BALIĞIN TASARIMI  
VE ÜRETİMİ**

Çiğdem DURU

Doç. Dr. Utku ŞENTÜRK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İzmir

2022

Çiğdem DURU tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “SU ALTI YAŞAMININ İNCELENMESİ AMACIYLA KULLANILACAK BİR ROBOT BALIĞIN TASARIMI VE ÜRETİMİ” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 12/12/2022 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

**Jüri Üyeleri:**

**İmza**

**Jüri Başkanı**

**: Doç. Dr. Utku ŞENTÜRK**

.....

**Raportör Üye**

**: Dr. Öğr. Üyesi B. Oğuz GÜRSES**

.....

**Üye**

**: Doç. Dr. Sercan ACARER**

.....



# EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

## ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi / Doktora Tezi olarak sunduğum “SU ALTI YAŞAMININ İNCELENMESİ AMACIYLA KULLANILACAK BİR ROBOT BALIĞIN TASARIMI VE ÜRETİMİ” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

12 / 12 / 2022

İmzası

Çiğdem DURU



## ÖZET

# SU ALTI YAŞAMININ İNCELENMESİ AMACIYLA KULLANILACAK BİR ROBOT BALIĞIN TASARIMI VE ÜRETİMİ

DURU, Çiğdem

Yüksek Lisans Tezi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr Utku Şentürk

Aralık 2022, 52 Sayfa

Bu projede, su altı araştırmalarında kullanılmak üzere bir robot balık prototipinin tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu robot balık, karangiform türünde yüzme davranışını taklit eden esnek bir kuyruk yüzgecine sahiptir. Balığın şekli, basitlik amacıyla temel geometrik formlardan ibaret biçimde, özgün olarak tasarlanmıştır. Balığın gövdesi üç boyutlu yazıcıyla, esnek kuyruk ise kalıplama yöntemiyle RTV-2 silikon malzemeden üretilmiştir. Tasarım ve montajı tamamlandıktan sonra sızdırmazlık testleri yapılmıştır. Ardından hidrostatik denge ve stabilite testleri yapılmıştır. Bu projede tasarlanan robot balık, su altında temel fonksiyonlarını yerine getirebilmektedir. İlerde, kullanılacak uygulamaya özgü (ultrasonik mesafe duyargası gibi) ilave duyargalar ile donatılabilecek haldedir.

**Anahtar Sözcükler:** Robotik, balık, hidrodinamik.



## ABSTRACT

### DESIGN AND PRODUCTION OF A ROBOTIC FISH TO BE USED FOR UNDERWATER LIFE RESEARCH

DURU, ığdem

MSc in Mechanical Eng.

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Utku Şentürk

December 2022, 52 pages

In this project, the design and manufacturing of a robotic fish prototype to be used for underwater research were carried out. The robotic fish mimics the flexible motion kinematics of a carangiform swimmer tail found in nature. The unique shape of the fish comprises basic geometric forms due to their simplicity. The body of the fish was produced with RTV-2 silicone by 3D printer, flexible tail molding method. The design and assembly of performed and then tested for leakage. This was followed by hydrostatic balance and stability tests of the full assembly. The robotic fish designed in this project is capable of performing basic swimming underwater. In the future, it is possible to equip the prototype with sensors (such as an ultrasonic proximity sensor) depending on the application.

**Keywords:** Robotic, fish, hydrodynamics.



## ÖNSÖZ

Gelişen ve daima ilerleyen teknoloji konularından biri olan robotik üzerine uygulamalı bir çalışma imkanı bulmuş olmak benim için son derece önemli bir deneyim olmuştur. Robot balık üzerine yapmış olduğum literatür araştırmalar ve deneysel tüm akademik çalışmalardaki su altı araçlarının gelişimi hakkında bilgi sahibi olmanın ışığında ortaya çıkan bu çalışmanın bilime yeni bir katkı olacağını umut ediyorum.

İZMİR  
12/12/2022

Çiğdem DURU



# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	vii
ABSTRACT .....	ix
ÖNSÖZ .....	xi
İÇİNDEKİLER .....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xvii
TABLolar DİZİNİ .....	xxii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xxiv
1. GİRİŞ .....	1
2. BALIK YÜZME HAREKETİ .....	3
2.1. Yüzme Hareketinin Sınıflandırılması .....	3
2.2. Gövde- Kuyruk Yüzgeci ile Hareket (BCF) .....	4
2.3. Medyan- Çift Yüzgeç ile Hareket (MPF) .....	5
3. DÜNYADAKİ ROBOT BALIK ÇALIŞMALARI .....	6
4. HAREKET SİSTEMİNİN BİLEŞENLERİ .....	12
4.1. Servo Motor .....	12
4.2. Arduino .....	13
4.3. Diğer Elektronik Donanımlar .....	15

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
5. KUYRUK KİNEMATİĞİ .....	17
6. ROBOT BALIK KUYRUĞUNUN EĞİLMESİNİN STATİK MODELİ ve ANALİZİ .....	21
7. AKIŞ SİMÜLASYONLARI .....	25
8. ROBOT BALIK PROTOTİPİNİN TASARIMI ve ÜRETİMİ .....	28
8.1. Gövde Tasarımı .....	29
8.2. Kuyruk Kalıbı ve Maça Tasarımı .....	30
8.3. Plaka-Tel Aktarımının Tasarımı .....	30
8.4. Kuyruk Yüzgecinin Tasarımı .....	32
8.5. Karın Yüzgecinin Tasarımı .....	33
8.6. Üretim ve Montaj .....	33
8.6.1. Gövde ve Karın Yüzgecinin Üretimi .....	33
8.6.2. Kuyruk Kalıbı ve Maçanın Üretimi .....	35
8.6.3. Kuyruğun Üretimi .....	37
8.6.4. Çekme Teli ve Plakanın Üretimi .....	39
9. SIZDIRMAZLIK, HİDROSTATİK DENGE VE KARARLILIK (STABİLİTE).....	41
9.1. Sızdırmazlık Testi.....	41

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
9.2. Hidrostatik Denge ve Kararlılık (Stabilite).....	42
9.2.1. Hidrostatik Denge.....	43
9.2.2. Balık Prototipinin Su Altındaki Kararlılığı .....	45
9.2.3. Ön Tasarım Hesapları ve Testler .....	45
9.2.4. Ağırlık Modelinin Döküm İle Üretimi .....	48
10. YÜZME TESTİ.....	53
11. MALİYET ANALİZİ.....	55
12. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	57
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	58
TEŞEKKÜR .....	65



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Bir balığın temel morfolojik yüzgeç yapısı (Bloch, 1801). .....	3
Şekil 2.2. BCF yüzme modları (Sfakiotakis vd., 1999). .....	4
Şekil 2.3. MPF yüzme modları (Lindsey, 1978). .....	5
Şekil 4.1. MG996 Metal servo motor. ....	13
Şekil 4.2. Arduino Uno R3- Klon. ....	14
Şekil 5.1 $c_0 = 0,02$ , $c_1 = -0,08$ , $c_2=0,16$ ve $\lambda = 0.95L$ parametrelerinin Denklem 4'te kullanılmasıyla elde edilen gövde kinematığı. Bir periyotluk zaman dilimi, 8 eşit aralığa bölünmüştür. ....	19
Şekil 6.1. 3B Bilgisayar destekli katı model. ....	22
Şekil 6.2. Kuyruğun gövdeye temas ettiği sabit yüzey. ....	22
Şekil 6.3. Momenti yönü ve değeri .....	23
Şekil 7.1 Problem bölgesi ve burun civarındaki polihedral ağın görünüşleri. ....	25
Şekil 7.2. HAD analizlerinde bulunan ölü direnç karakteristikleri: (a) Direnç kuvvetinin hızla değişimi, (b) Direnç katsayısının Reynolds sayısıyla değişimi. ....	26
Şekil 7.3 HAD analizlerinde bulunan akım çizgileri (üstte) ve en kesitte oluşan boyutsuz hızın ( $ V /U$ ) dağılımı (altta). ....	27
Şekil 8.1. Tez kapsamında tasarlanan robotik balık prototipinin ana ölçüleri. Tüm ölçüler milimetre birimine sahiptir. ....	28
Şekil 8.2. Gövde parçalarının üç boyutlu modellemesi. ....	29

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 8.3. Kuyruk kalıbı ve maça sisteminin üç boyutlu modellemesi.....	30
Şekil 8.4. Yuvarlak plaka.....	31
Şekil 8.5. Servo kolu-plaka aktarım sistemi. ....	32
Şekil 8.6. Yüzgeç formunun tasarımı. ....	32
Şekil 8.7. a) Karın yüzgeci tasarımı b) Karın yüzgecinin gövdeye montajı.....	33
Şekil 8.8. Üç boyutlu yazıcı ile üretilen gövde parçaları.....	34
Şekil 8.9. Üç boyutlu yazıcı ile üretilen karın yüzgeci.....	34
Şekil 8.10. Kuyruk kalıbı.....	35
Şekil 8.11. Maça. ....	36
Şekil 8.12. Maça tutucu. ....	36
Şekil 8.13. Maça, maça tutucu, kalıp görünümü. ....	37
Şekil 8.14. RTV-2 silikonun kürlenmesi. ....	39
Şekil 8.15. Kuyruk içine yerleştirilen plaka. ....	40
Şekil 8.16. Yüzgeç formu. ....	40
Şekil 9.1. Sıvı conta ve epoksi yapıştırıcı enjektör uygulaması. ....	41
Şekil 9.2. Sızdırmazlık testi. ....	42

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
<b>Şekil 9.3.</b> Balıklarda gaz kesesi ile derinlik kontrolü: (a) Bir alabalığa ait gaz kesesi yeşil renkli bölge ile gösterilmiştir (Brown vd., 2009). (b)Gaz kesesinin çalışma prensibi (Lohner, n.d.).....	43
<b>Şekil 9.4.</b> Prototipin tüm bileşenleri dikkate alınmak üzere nihai ağırlığı $W$ 'nin etkime noktası, montajın ağırlık merkezi $c$ iken (üstte); kaldırma kuvvetinin etkime noktası, hacmin işgal ettiği suyun ağırlık merkezi olan $p$ noktasıdır (altta).....	44
<b>Şekil 9.5.</b> Prototipin kararlı denge şartını sağlaması için $c$ noktası $p$ 'nin altında kalmalıdır.....	45
<b>Şekil 9.6.</b> Ön tasarım için kaldırma kuvveti, ağırlık ve bunların etkime noktaları. ....	47
<b>Şekil 9.7.</b> Hidrostatik denge ve kararlılık için eklenen parça, yeşil renkli olarak görülmektedir. ....	48
<b>Şekil 9.8.</b> Ağırlık eklenmesinin ardından kaldırma kuvveti, ağırlık ve bunların etkime noktaları. ....	48
<b>Şekil 9.9.</b> a) Açık kalıba döküm, b) Kapalı kalıba döküm (Mikell P. Groover, 2006).....	49
<b>Şekil 9.10.</b> Kum kalıba döküm aşamaları.....	49
<b>Şekil 9.11.</b> a) Ağırlık modelin kalıp içerisine yerleştirilmesi. b) Kum ile kalıplanmış model. ....	50
<b>Şekil 9.12.</b> a) Modelin kumdan çıkartılması b) Kalıba kurşun dökümü. ....	51
<b>Şekil 9.13.</b> Kalıptan çıkartılan ham model. ....	51
<b>Şekil 9.14.</b> Tel aktarım boşluklarının açıldığı kurşun ağırlık modeli.....	51

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 9.15. Kurşun ağırlığın gövdeye montajı. ....	52
Şekil 9.16. Montajı tamamlanmış robot balık.....	52
Şekil 10.1. Robot balığın su altındaki yüzme hareketi. ....	53
Şekil 10.2. Kinovea'dan alınan konum verileri, a) Başlangıç konumu, b) Bitiş konumu. ....	54



## TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 3.1</b> Dünyadaki robot balık çalışmaları. ....	9
<b>Tablo 4.1.</b> Servo motora ait özellikler. ....	13
<b>Tablo 4.2.</b> Arduino Uno'ya ait teknik özellikler. ....	14
<b>Tablo 6.1.</b> RTV-2 Malzeme değerleri. ....	21
<b>Tablo 6.2.</b> Kuyruk açısının parametrik değişimi. ....	23
<b>Tablo 8.1.</b> 3B Yazıcıya ait baskılama özellikleri. ....	33
<b>Tablo 8.2.</b> RTV 2 E-15 Silikonuna ait mekanik özellikler. ....	38
<b>Tablo 9.1.</b> Prototipin ön tasarım sürecindeki toplam kütlesi. ....	46
<b>Tablo 11.1.</b> Üretim materyalleri ve sarf giderler. ....	55



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$A$	Kuyruk firar kenarının uçtan uca genliği (m),
$c_1$	Dalga zarfının doğrusal kısmının empirik sabiti (-),
$c_2$	Dalga zarfının kuadratik kısmının empirik sabiti (1/m),
$f$	Kuyruk çırpma frekansı (Hz),
$F_L$	Hidrodinamik taşıma kuvveti (N),
$k$	Dalga sayısı (1/m),
$L$	Balık kuyruk uzunluğu (m),
$t$	Zaman (s),
$T$	Periyot (s),
$U$	Yüzme Hızı (m/s),
$y_{gövde}$ genliği (m),	Gövde merkez hattının üzerindeki bir $x$ konumunun anlık genliği (m),
$W$	Balığın ağırlığı (N),
$\nu$	Kinematik viskozite ( $m^2/s$ ),
$St$	Strouhal sayısı (-),
$\omega$	Açısal frekans (1/s),
$\lambda$	Dalga boyu (m).

## Kısaltmalar

BCF	Body-caudal fin- Gövde- kuyruk yüzgeci ile hareket,
CAD	Computer-aided design- Bilgisayar destekli tasarım,
CCD	Charged coupled device- Yük bağlaşımlı aygıt,
DC	Direct current- Doğru akım motoru,
EC	Electrical conductivity- Elektrik iletkenliği,
GPS	Global positioning system- Küresel konumlama sistemi,
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği,
INS	Inertial navigation system- Ataletsel seyrüsefer sistemi,
MPF	Median-paired fin – Orta-ift yzge,
PIC	Peripheral interface controller- evrebirim arayüz denetleyicisi,
PLA	Biopolimer polilaktik asit,
PWM	Pulse-width modulation-Sinyal genişlik modülasyonu,
RF	Radio frequency- Radyo frekansı,
RTV	Room temperature vulcanizing – Oda sıcaklığında sertleşen,
STL	Standard triangle language- Standart genleştirme dili.



## 1. GİRİŞ

Deniz robotiği ve sualtı araçları üzerine yapılan çalışmalar, son yıllarda giderek önem kazanan bir konudur. Yüzen balıkları taklit edebilen sualtı robotlar deniz yüzeyi topografisi, denizaltı madenciliği, arkeolojik incelemeler ve savunma sanayinde araştırma yapabilmeyi mümkün kılmaktadır. Ayrıca deniz kirliliği son elli yıldır Dünya gündemini meşgul eden en önemli çevre kirliliği problemlerinden birisidir. Dünya yüzeyinin yaklaşık %77,6'sını denizlerin ve okyanusların oluşturduğu düşünülürse deniz kirliliğinin, çevre kirliliğinin en büyük payını oluşturduğu görülmektedir (Özdemir, 2012). Deniz kirliliğinin bu denli ciddi bir problem olması ve kirliliğin boyutlarının gözlemlenmesinin gerekliliği, su altında kullanılacak araçların önemini bir kez daha ortaya koymaktadır. Askeri savunma ve deniz koruma gibi çeşitli uygulamalar, özellikle manevra kabiliyeti yüksek performanslı otonom sualtı araçlarının (Autonomous Underwater Vehicles, AUV) kullanımını gerektirir. Su altı araçları için genel olarak istenen temel özellikler hız, manevra kabiliyeti, menzil, güvenilirlik ve dayanıklılıktır. Balıkların da yüzme kabiliyeti en yüksek canlılar olması, sualtı araç tasarımcılarını biyobenzetim yoluyla yani doğadaki canlıları taklit ederek robot balık geliştirmeye yöneltmektedir. Aynı zamanda su altı yaşamının daha iyi anlaşılması hedeflenirken, geliştirilen araçların balık formunda robotlar olması doğal yaşamın etkilenmemesi sağlanmaktadır. Geniş bir yelpazede uygulama alanı olan ve insanın ulaşamayacağı ya da ulaşmakta güçlük çektiği sualtı işlemlerinde kullanılması amaçlanan robot balıkların bize sağladığı pozitif etkiler üzerine robotik mekanizmalar hakkında öncü araştırma kurumların yoğunlaştığı bilinmektedir. Bu hususlardan hareketle, bu çalışmada, sualtında yapılacak çalışmalarda kullanılabilir olan ancak geleneksel (pervaneli) tipte olmayan bir robotik cihazın geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Bu cihaz, doğadaki balıkların karangiform türünde yüzme davranışını taklit eden bir kuyruk yüzgeci ile itki yaratabilen bir robotik balıktır.

Bu çalışmadaki öncelikle güncel literatürün durumu ortaya konarak balık yüzme hareketlerinden bahsedilecek, dünyadaki öncü robotik balık araştırmaları özetlenecek ve özgün olarak tasarlanan robotik balığın tasarım ve test süreçlerine ilişkin detaylara yer verilecektir. Tasarımı ve üretimi tamamlanan balığın montaj

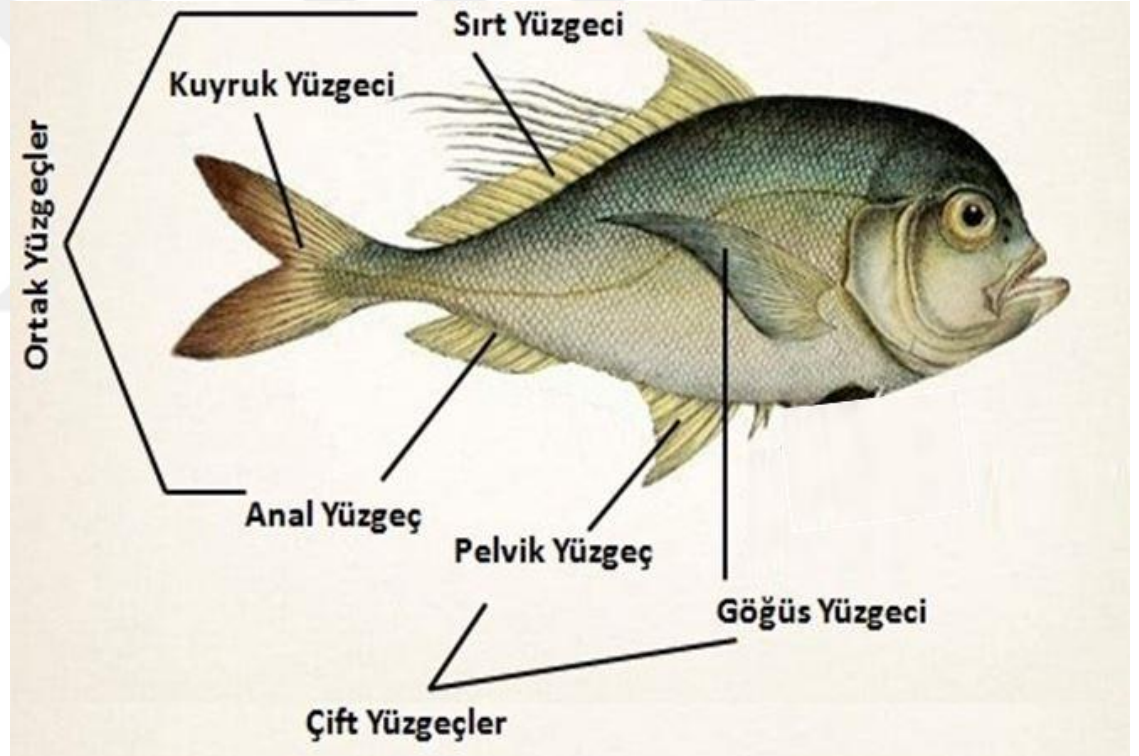
alışmalarının ardından, yzme havuzunda gerçekleştirilen sızdırmazlık ve hidrostatik denge testlerinin sonuçları sunulacaktır.



## 2. BALIK YÜZME HAREKETİ

### 2.1. Yüzme Hareketinin Sınıflandırılması

Suyun temel özellikleri; hareket ortamı olması sebebiyle balıkların evriminde önemli rol oynamaktadır. Bu özelliklerden en temeli suyun yüksek yoğunluğa sahip olmasıdır. Suyun yoğunluğu (havanın yaklaşık 800 katı), yer çekimi kuvvetini dengelemek için deniz hayvanlarının vücut yoğunluğuna yakındır. Bu durum çok çeşitli yüzme iticilerinin geliştirilmesine izin verir (Lindsey, 1978). Yüzgeçler, bir balığın su içerisindeki hareketine yardımcı olan organlardır. Balıklara ait yüzme mekanizmalarının morfolojik yüzgeç yapısı Şekil 2.1'de verilmiştir.



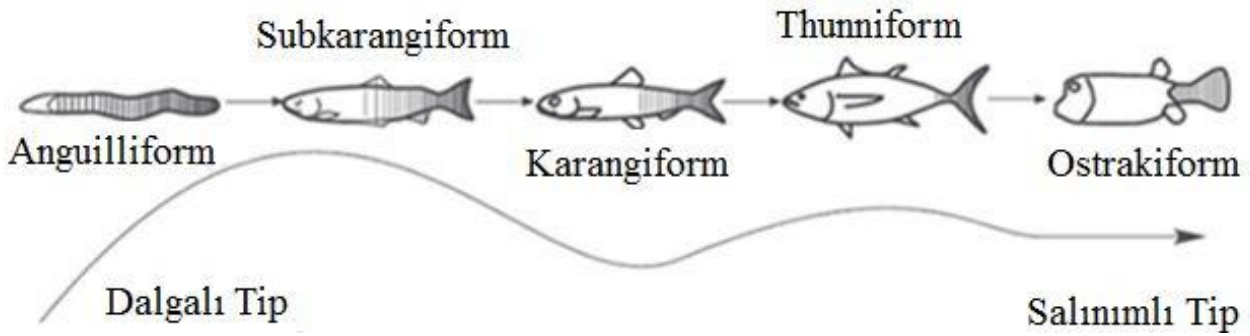
Şekil 2.1. Bir balığın temel morfolojik yüzgeç yapısı (Bloch, 1801).

Balıkların yüzme hareketleri temelde iki sınıfa ayrılmaktadır. Bunlardan biri vücut ve kuyruk yüzgeci hareketi ile sağlanan BCF (body caudal fin) yüzme hareketi, diğeri ise orta ve pelvik-pektoral yüzgeçler ile sağlanan MPF (median pelvic-pectoral fin) yüzme hareketidir (Videler, 1993). BCF hareketinde itme, balık

gövdesinin dalgalanmasıyla üretilirken, MPF hareketinde itme, orta ve çift yüzgeçlerinin salınımı ile üretilir (Niu *vd.*, 2013)

## 2.2. Gövde- Kuyruk Yüzgeci ile Hareket (BCF)

İtme kuvvetinin, balık hareketinin tersi yönde oluşturma durumu BCF tip yüzme hareketi altında sınıflandırılır (H. Wang, 2009). Breder (1926) tarafından vücut ve kuyruk yüzgeçlerini kullanarak yüzen balık türleri anguilliform, karangiform ve ostrakiform olarak üç sınıfa ayrılmıştır. İlerleyen zamanlarda bu sınıflandırma anguilliform, subkarangiform, karangiform, tunniform ve ostrakiform olarak güncellenmiştir (Şekil 2.2)(Sfakiotakis *vd.*, 1999). Bu çalışmada BCF yüzme moduna ait karangiform türünde yüzme davranışı ele alınacaktır.



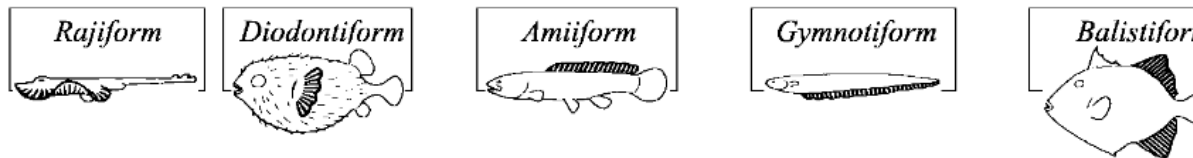
Şekil 2.2. BCF yüzme modları (Sfakiotakis *vd.*, 1999).

Anguilliform; yılan balığı gibi uzun balıkların, tüm vücuboyunca baştan kuyruğa kadar esnek bir dizi kıvrımlı dalga halindeki yüzme hareketidir. İleriye doğru yüzmesindeki başarısı geriye yüzmesi ile eş değer verimliliktedir. Auiliform türlerin birçoğu tüm vücutlarının katıldığı geniş bir dalgalanma hareketi ile yüzdüğü ifade edilebilir. Subkarangiform türler de benzer yüzme şekli gösterebilir de dalgalanma genişlikleri başa yakın bölgesinde daha düşüktür. Subkarangiform yüzme hareketinde ileriye itme kuvvetinin büyük çoğunluğu kuyruk bölümünden sağlanması çok az kısmının ise vücut hareketi ile gerçekleşen yüzme hareketi olarak belirtilebilir. Subkarangiform ile Anguilliform karşılaştırıldığında Anguilliform türünde yüzen canlıların çok daha fazla kas kullanımı gerçekleşmektedir. Karangiform türlerin vücut dalgalanması subkarangiform türlere kıyasla daha sınırlıdır. Karangiform türünde tahrik gücünün vücudun sadece kuyruk bölgesiyle gerçekleştiği ve yüzme hareketinde vücudun sinüzoidal

dalga formunda gerçekleştirir. Subkarangiform ile Anguilliform türüne göre daha hızlı yüzebilmelerine rağmen, dönme ve ani hızlanma yetenekleri vücutlarının bu türlere göre bükülmez olmasından dolayı zayıftır (Özbilgin vd., 2004). Tunniform türlerin vücutları daha kalın ve kaslıdır. Bu vücut türü, balıkların yüksek hızda yüzmeleri için oldukça elverişlidir fakat manevra yapabilmeleri için elverişli değildir. (Özbilgin vd., 2004) Thunniform türünde yüzmeye hareketine, hızlı ve uzun mesafe hareket eğilimindeki ton balıkları ve bazı köpek balıkları bu grup içinde yer alır. Son olarak ostrakiform türlerin hareketleri için vücutlarının bükülmez olmasından dolayı sadece kuyruk yüzgecinin salınımı ile sağlanır. Bu sebeple Ostrakiform tarzı yüzmeye türünde salınım hareketi sadece kuyruk yüzgecinde gerçekleşir (Lindsey, 1978).

### 2.3. Medyan- Çift Yüzgeç ile Hareket (MPF)

Balık anatomisinin orta hattında yer alan bu yüzgeçler, balığın derinliği korumasına destek olurken, besin ararken suda yukarı veya aşağı harekete, keskin biçimde dönmesine ve hızını kısa sürede durdurmasına yardımcı olur. Göğüs (pektoral) ve pelvik (ventral) olarak tanımlanan bu yüzgeç türleri evrimsel süreçlerinde bazı balık türleri için bu yüzgeçlerin kaybolduğu, bazıları için oldukça gelişmiş bir yapı haline geldiği görülmüştür. Rajiform, Diodontiform, Amiiiform, Gymnotiform ve Balistiform beş farklı türe ayrılır (Şekil 2.3). Balıklar çoğunlukla itki kuvveti kuyruk yüzgecinden üretirler, ancak bazı suda yaşayan hayvanlar pektoral yüzgeçlerden salınım hareketleri için kullanırlar (Lindsey, 1978; Sfakiotakis vd., 1999).



Şekil 2.3. MPF yüzme modları (Lindsey, 1978).

### 3. DÜNYADAKİ ROBOT BALIK ÇALIŞMALARI

Karangiform türü balıkların yüzme hareketlerine benzetilmesiyle pek çok robot balık çalışmaları yapılmıştır. Robot balık sistemlerinde ilk araştırmalar 1990'lı yıllarda Triantafyllou (M. S. T. ve G. S. Triantafyllou, 1995) ve Hirata (2016) tarafından başlatılmıştır. İlerleyen yıllarda gerçekleştirilen çalışmalarda giderek robot balık tasarımı üzerine yoğunlaşmış ve hidrodinamik, malzeme ve kontrol teknolojileri ile desteklenmiştir (H. Wang, 2009).

Konu hakkında öncü olarak nitelendirilebilecek çalışma 1994 yılında MIT tarafından geliştirilmiştir (M. S. T. ve G. S. Triantafyllou, 1995). 1,24 m (49 inç) uzunluğunda ve birebir ölçeklendirilmiş mavi yüzgeçli orkinos formunda RoboTuna balık yüzüşündeki hidrodinamiği anlayabilmek ve araştırmak için geliştirilmiştir. RoboTuna alüminyum iskelete sahip 8-eklemlili esnek bir kuyruk ve çeşitli verilerin elde edilmesi için birden fazla algılayıcının tasarımı ile dışarıdan yönlendirilebilen robot balık olarak literatürde yer almaktadır (H. Wang, 2009).

2000 yılında MIT'de RoboPike isimli turna balığı formunda ve 80 cm uzunluğunda, yüksek manevra hareketleri için 5 motora sahip olan ve kablosuz iletişim kuran robot balık geliştirilmiştir (Kumph, 2000).

İlk defa 2002 yılında VCUUV (Vorticiy Control Unmanned Undersea Vehicle) adlı kendi kendini yönlendirebilen robot balık üretilmiştir (Anderson & Chhabra, 2002). Sarı yüzgeçli orkinos formundaki bu robotun kuyruk kısmı yarımay biçimindedir. Daha önce yapılmış RoboTuna adlı cihazın kuyruk kinematiğinden ve optimize edilmiş gövdesinden yararlanılmıştır.

2004 yılında Essex Üniversitesi tarafından yapılan çalışmada karangiform türünde sahip bir robot balık için hızlı, manevra kabiliyeti yüksek, iyi yüzme performansına sahip olan tuna balığı model alınarak üretilen G9 (9. Nesil) isimli bir robot balık geliştirilmiştir. Geliştirilen robot balık Guanda Londra'daki County Hall Akvaryumu'nda sergilenmektedir (Hu, 2006).

National University of Singapore'da yapılan çalışmada anguilliform türünde robotik balıkların gerçek bir prototipi için modelleme, hareket üretme, hareket kitaplığı tasarımı ve yol planlaması sunulmaktadır. Robot balık dört bağlantı ve üç eklemden oluşur ve itici güçler eklemlere uygulanan torklarla sağlanmaktadır. Anguilliform balıklarının ileri hareket, geri hareket ve dönüş hareketini içeren üç ana hareket modeli incelenmiştir (Niu *vd.*, 2013).

2014 yılında Canterbury Üniversitesinde UC-ika 1 isimli robot balık için kararlı, hızlı ve verimli orkinos benzeri robot balık tasarlamak için esnek ve esnek olmayan kuyrukların performansı değerlendirmiştir. UC-ika; kuyruk yüzgecinin esnekliği ve kuyruk yüzgecinin esnek eklemine kuyruk sapının yakın olması durumunda robot balığın performansını iyileştirdiğini vurgulayan bir çalışma olmuştur (Masoomi *vd.*, 2014).

Karangiform balıklarda ileri doğru yüzme ile geriye doğru yüzme özelliklerinin karşılaştırıldığı bir çalışmada, ileriye doğru yüzmenin aksine, geriye doğru yüzme aynı göreceli yüzme hızına ulaşmak için daha yüksek bir frekans veya daha fazla yanıl yer değiştirme gerektirdiği gözlemlenmiştir (Yu *vd.*, 2016).

2015 yılında Yangwei ve arkadaşları tatlı su vatozundan ve onun dalgalı pektoral yüzgeç hareketinden esinlenen bir biyomimetik robotik balık tasarlamak ve geliştirmek için ilk girişimi gerçekleştirmişlerdir. Geliştirilen prototip, benzersiz gövde yapısı ve değişken itici modu nedeniyle yüksek manevra kabiliyetine sahiptir. Vatozların morfolojisi ve pektoral yüzgeç dalgalanmalarının kinematik paternleri ile ilgili çalışma sunulmuştur (Y. Wang *vd.*, 2015).

Deniz ürünleri yetiştiriciliğinin izlenmesinde yeni bir çözüm önerilmek istenmiş ve 2015 yılında Ichthus V5.5 (Ryuh *vd.*, 2015) tasarlanmıştır. GPS, basınç, sıcaklık, elektrik iletkenliği ve pH sensörü, menzil sensörleri ve otonom 3D navigasyon için donatılarak su sıcaklığı, kirlilik seviyesi gibi deniz bilgilerini toplamanın yanı sıra yol planlama, engellerden kaçınma görevlerini de yerine getirebilen bir otonom robotik balık tasarlanarak geliştirilmiştir.

Ülkemizde de benzer çalışmaların gerçekleştirildiği görülmektedir. 2005 yılında İTÜ’de geliştirilen, prototipi 2 m olan bir yunus formundaki cihaz geliştirilmiştir (Dogangil *vd.*, 2005). Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyeleri tarafından karangiform türünde yüzebilen 4-eklemlili bir robot balık tasarımı ele alınmıştır. Bu tasarım modeli kullanılarak, otonom bir şekilde yüzebilen ve karar verme yeteneğine sahip bir ana gövde, iki tane kuyruk ve bir tane de esnek kuyruktan oluşan, i- RoF (Intelligent Robotic Fish) robot balık prototipi oluşturulmuştur (Korkmaz, 2011). Robot balık engellerden sakınarak serbest bir şekilde yüzebilmektedir. Ayrıca kullanıcının komutlarını algılayarak uzaktan kumanda vasıtasıyla da kontrol edilebilmektedir.

Sualtı canlılarıyla aynı ortamda çalışmış ilk robot balık olan SoFi (Soft Robotic Fish) 2018 yılında MIT bünyesindeki CSAIL (Computer Science and Artificial Intelligence Lab) laboratuvarında geliştirilmiştir (Varnava, 2018). SoFi bir motor, bir kamera ve akıllı telefonlarda da kullanılan lityum polimer pile sahip donanımı ile Fiji Adası’ndaki yüzme testlerinde 15,24 metreden daha derinde 40 dakika boyunca denizde yüzebilmekte ve kamerasıyla yüksek kalitede fotoğraflar ve videolar kaydedebilmektedir. Esnek bir kuyruk yapısına sahip olan SoFi serbest bir şekilde yüzebilmesinin yanında su içerisinde belirli bir açıyla dönme, su altın dalabilme ve yukarı çıkabilme hareketlerini de kolaylıkla yapabilmektedir.

Harvard ve Virginia Üniversitelerinin ortaklaşa geliştirdikleri Tunabot; 255,3 mm uzunluğunda, 49,2 mm genişliğinde ve 67,8 mm yüksekliğinde sahip sarı yüzgeçli orkinos balıklarının yüzme dinamiğinin modellenmiş hali olarak tasarlandı. Tunabot saniyede 4,0 vücut uzunluğunda bir yüzme hızına karşılık gelen 15 hertz’lik bir maksimum kuyruk vuruş frekansına ulaşmıştır. Yüksek frekanslı yüzme kabiliyetli Tunabot gerçek balıkların sahip olduğu yüzüş hızında sahip olacak şekilde geliştirilmiştir (Zhu *vd.*, 2019).

Delft Teknik Üniversitesindeki çalışmada, sistemi sürmek için verimli DC motora sahip robot balık tercih edilmiştir. Bu çalışmada bir veya birden fazla servo motor tarafından tahrik edilen diğer uyumlu robotik salınımlı tahrik sistemlerine kıyasla daha az kayıpları olan ve daha yüksek frekanslarda yüzme kabiliyeti olan robot balık geliştirilmiştir. Literatürde en hızlı uyumlu robotik balık 2017 yılında Zhong ve

arkadaşları (Zhong *vd.*, 2017) tarafından tasarlanarak geliştirilmişken, 0,85 m/s'ye hıza ulaşan Delft Teknik Üniversitesindeki bu çalışma robot balığın hızı üzerine hem deneysel hem de teorik araştırmaları sunan güncel çalışmalar arasında yerini almıştır (Van den Berg, 2006). Tablo 3.1'de geçmiş yıllarda prototipi yapılan robot çalışmaları listelenmiştir.

**Tablo 3.1** Dünyadaki robot balık çalışmaları.

Yazar/ Tarih	Başlık	Yüzme Davranışı	Kontrol Türü	Gövde Malzemesi	Hız	Sensör
(M. S. T. and G. S. Triantafyllou, 1995)	An Efficient Swimming Machine	Mavi Yüzgeçli Orkinos	6 DC Servo motor	Alüminyum İskelet	1,2 m/s	Basınç, hız ve kuvvet sensörü
(Kumph, 2000)	Maneuvering Of A Robotic Pike	N/A	RTV Döküm 5 Servo Motor	Fiberglas	0,09 m/s	İletişim İçin Kablosuz Modem
(Anderson & Chhabra, 2002)	Maneuvering And Stability Performance Of A Robotic Tuna	Sarı Yüzgeçli Orkinos	Hidrolik Çoklu Bağlantı	N/A	1,2 m/s	Hız Sensörü
(Alvarado & Youcef-Toumi, 2003)	Modeling and Design Methodology Of An Efficient Underwater Propulsion System	Karangiform	IE-10AH ve IE-70D Poliüretan Karışımı, 1 Servo Motor	Uyumlu Gövde	0,095 m/s	N/A
(Yu <i>vd.</i> , 2004)	Development Of A Biomimetic Robotic Fish And Its Control Algorithm	Karangiform	4 Servo Motor	Alüminyum Dış İskelet	0,32 m/s	Kablosuz Alıcı, PİL
(Mazumdar <i>vd.</i> , 2008)	Maneuverability Of A Robotic Tuna With Compliant Body	Thunniform	N/A	Uyumlu Gövde	0,1 m/s	N/A
(Liu & Hu, 2010)	Biological Inspiration: From Carangiform Fish To Multi-Joint Robotic Fish	Karangiform	Çoklu Bağlantı 4 Adet Servo Motor, 2 Dc Motor	N/A	0,2 m/s	Jiroskop, Basınç Sensörü, Konum Sensörü, Elektrik Akımı Sensörü, Voltaj Ölçer, Kızılötesi Sensör, Eğim Ölçer
(Niu <i>vd.</i> , 2013)	Locomotion Generation And	Anguilliform	N/A	N/A	0,12 m/s	Kablosuz İletişim Modülü

	Motion Library Design For An Anguilliform Robotic Fish					
(Clapham & Hu, 2014)	High Performance Swimming Motion Of A Carangiform Robotic Fish With Full-Body Coordination	Karangiform	Çoklu Bağlantılı Döner Mil, Polipropilen Kuyruk, Elektrik Motoru	N/A	0,87 m/s	N/A
(W. Wang & Xie, 2014)	An Adaptive And Online Underwater Image Processing Algorithm Implemented On Miniature Biometric Robotic Fish	Karangiform	N/A	N/A	0,08 m/s	Coms Camera
(Y. Wang <i>vd.</i> , 2015)	Design And Experiment On A Biomimetic Robotic Fish Inspired By Freshwater Stringray	Tatlı Su Vatozundan	12 Servo Motor 2 Dc Motor	N/A	0,043 m/s	Ana Denetleyici Modülü, Bağımlı Denetleyici Modülü, RF, Doğru Akım Sürücü Modülü, Navigasyon Sensörü, İvmeölçer
(Nguyen <i>vd.</i> , 2016)	Thrust And Swimming Speed Analysis Of Fish Robot With Non-Uniform Flexible Tail	Karangiform	1 Servo Motor Pvc Köpük Levha (Foamex)	N/A	0,7 BL.s <sup>-1</sup>	N/A
(Zhong <i>vd.</i> , 2017)	A Novel Robot Fish With Wire-Driven Active Body And Compliant Tail	Subkarangiform	2 Servo Motor Silikon	Silikon	2.15 BL/s	Konum Sensörü Apc220 Radio Communication Module
(Katzschmann <i>vd.</i> , 2018)	Exploration Of Underwater Life With An Acoustically Controlled Soft Robotic Fish	N/A	N/A	N/A	0,235 m/s	N/A

(Yen & Guo, 2018)	Phase Controller For A Robotic Fish To Follow An Oscillating Source	N/A	Alüminyum Servo Motor	N/A	0,03 m/s	Basınç Sensörü, Konum Sensörü
-------------------	---	-----	-----------------------	-----	----------	-------------------------------



## 4. HAREKET SİSTEMİNİN BİLEŞENLERİ

Bu bölümde balığın yüzme hareketini oluşturup denetleyen mekanik ve elektronik bileşenlere yer verilecektir. Bu çalışmada kullanılan servo motor ve Arduino mikrodenetleyici platformunun teknik özelliklerine ve kullanım amacından bahsedilecektir. Aynı zamanda, bu çalışmada kullanılsa da teknolojinin gelişimi ile farklı ihtiyaçları karşılamak için kullanılan diğer elektronik sistemler açıklanacaktır.

### 4.1. Servo Motor

Servo motor, sistemin yukarı-aşağı veya sağa-sola kontrol edilmesi gereken birçok uygulamada kullanılan geri bildirimli DC tipi motorlardan biridir. Servo motorlar gönderilen sinyalleri belirli bir açısal pozisyonda döndürebilen motor çeşidi olması, servo motorların, hareket kontrolü yapan bir düzenek haline getirmektedir (Ohishi *vd.*, 1987). Bir servo motordan çıkan üç kablo vardır. Bunlar güç, toprak ve motora konum kontrol sinyalinin gönderildiği çıkıştır. Servo motor bir seri darbe (pulse) ile kontrol edilir. Bu darbenin uzunluğu servonun alacağı pozisyonu belirler (Kadir *vd.*, 2012). Servo motorlar, robot teknolojilerinde düşük devirde yüksek tork sağlamaları sebebiyle sıklıkla kullanılan bir motor çeşididir. Su altı çalışmalarda sık kullanılan motorlar, sistemdeki itki kuvvetini sağlanması sebebiyle, motor tercihi oldukça önemli bir konu haline gelmiştir. Özellikle balıkta hız ve verimlilik üzerinde güçlü bir etkiye sahip ana parametrelerden biri olan motor için literatürde pek çok çalışma yapılmıştır. Bunlardan DC motor ile servo motorun robot balık üzerindeki etkileri üzerinde yapılan bir çalışmada her iki motorun da sağladığı avantaj ve dezavantajlar incelenmiştir (Van den Berg, 2006). İncelemeler sonucunda kuyruk vuruşu frekansının servo motorlarda 3 Hz'nin üzerine çıkamaması, DC motora sahip tahrikli tasarımlarda ise daha yüksek frekanslarda çalışma alanının olması daha hızlı robot balıklar için DC motorun tercih edilmesine işaret etmektedir. Ancak DC motor ile sadece hız kontrolünün mümkün olması, açı kontrolü için servo modülü kullanılmasını gerektiği ortaya konmuştur. DC motorların yönlendirme güçlüğü, servo motorların ise düşük frekanslarda sağladığı açı-adım-konum kontrolü sebebiyle bu çalışmada robot balığa istenilen sinüsoidal hareket

kabiliyetini kazandırmasında DC motor yerine servo motor tercih edilmiştir. İtme kuvvetini oluşturan servo motorun kontrolü ile sinüsoidal hareket elde edilmesi hedeflenmiştir. Yumuşak ve elastik kuyruk yüzgecinin salımlı harekete geçebilmesi için itme gücünü karşılayacak 1 adet servo motor sert gövdeye yerleştirilerek robot balığın yüksek bir itme kuvvetine ulaşması hedeflenmiştir (Şekil 4.1.1).



Şekil 4.1. MG996 Metal servo motor.

MG996 Metal Servo Motora ait teknik özellikler Tablo 4.1’de görülmektedir.

Tablo 4.1. Servo motora ait özellikler.

Parametre	Değer
Çalışma Hız	60°/0.17s (4,8 V)
Tork	3,8 kg.cm (4,8 V)
Boyut	40,7 x 19,7 x 42,9 mm
Ağırlık	55 g

## 4.2. Arduino

Arduino, mikrodenetleyici kartlarını ve mikrodenetleyici kitlerini içeren programlama platformudur. Arduino donanım özelliklerine göre, Due, Uno,

Mega, LillyPad, Esplora, Pro Mini, Mini, Nano, BT, Fio olarak çeşitlenmektedir (Badamasi, 2014). Robot balığın kuyruk yüzgeci geliştirilme aşamasında RTV-2 silikondan üretimi gerçekleştirildikten sonra hareket kabiliyeti servo motor ve Arduino ile sağlanmıştır. Bu bölümde kullanılan servo motor ve kontrol kodları incelenecektir.

Bu çalışmada Arduino kart içerisinden Arduino Uno kart kullanılmıştır (Şekil 4.2). Yazılan programın derlenmesi ve yüklenmesi için Arduino 1.8.19 yazılımı kullanılmıştır. Mikrodenetleyici gerçek bir balığın hareketlerinden esinlenerek oluşturulan program ile yüklenmiştir. Bu program yardımı ile kuyruk eklemlerini oluşturan servo motorlara PWM sinyalleri gönderilmiştir. Servo motorlar gönderilen PWM sinyalleri ile istenilen açı değerlerini alarak kuyruk hareketini sağlar. Böylece robot balık gerçek bir balık gibi hareket edebilmektedir.



Şekil 4.2. Arduino Uno R3- Klon.

Tablo 4.2’de kullanılacak olan Arduino kartın teknik özellikleri görülebilir.

Tablo 4.2. Arduino Uno’ya ait teknik özellikler.

Parametre	Değer
Mikrodenetçi	ATmega328P U
Saat Hızı	16 MHz
Çalışma voltajı	5V
Akım	50 mA

Boyutlar	68.6 x 53.4 mm
----------	----------------

### 4.3. Diğer Elektronik Donanımlar

Güncel literatür ele alındığında, su altında görüntü, sıcaklık, derinlik gibi verileri toplayabilen, uzaktaki bir cihaz ile iletişim kurarak bu verileri aktarabilen, otonom hareket edebilen robot balıkların geliştirilmesi hakkında çalışmaların son yıllarda yoğunlaştığı görülmektedir. Aktüatör, kontrol ve sensör gibi bileşenlerin de ucuz ve ulaşılabilir hale gelmesinin de buna katkı sağladığı açıktır. Yapılan çalışmalarda robot balığın yüzme kabiliyetine sahip olması dışında engellerden kaçınan, otonom yüzebilme gibi çoklu görevleri yerine getirebilme özelliğine sahip balıkların gelişmesi elektronik donanım ihtiyacını oluşturmuştur. Kullanılan elektronik sistemler ile hem robot balığa ait performans bilgilerine hem de suya ait verilere ulaşılmıştır.

Zhou (2008) ve arkadaşları da robot balıkların karmaşık su altı ortamlarında bir görevi yerine getirirken çevreyi algılaması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu amaçla; su derinliğini, PH değeri, komşu engelleri tespit etmek gibi birçok veriyi toplamaları için robot balıkların birden fazla sensörle donatmışlardır. Prototipini sundukları karangiform tarzı balık tasarımında; basınç sensörleri, CCD kamera, sıcaklık dönüştürücü, kızılötesi sensörler ve PH sensörü kullanmışlardır.

Liu ve arkadaşlarının (2010) G9 serisi olarak tanımladıkları robotik balık modelinde ondan fazla gömülü sensörle donatarak ve mevcut ayarları ile 3 boyutlu bir ortamda su altında otonom olarak yüzebilen ve yüzme sırasında hiçbir insan müdahalesine gerek duyulmayan bir robot balık sundukları çalışmada; bir jiroskop, bir basınç sensörü, iki konum sensörü, iki elektrik akımı sensörü, bir voltaj ölçer, dört kızılötesi sensör ve bir eğim ölçer kullanılmıştır. Bu gömülü sensörlerle, balığın sudaki derinliği, vücudunun yalpalama/yuvarlanma/eğim açılarını ve önündeki engellerin konumunu algılaması sağlanmıştır. Her bir servo motorun dönüş açısı ve elektrik akımı tüketimi de ölçülmüştür. Ayrıca, Bluetooth ve RS232 seri portları, Gumstix ve PIC kontrolörlerine komut vermek için kullanılan harici bir PC ile iletişim aracı olarak mevcuttur.

Deniz ürünleri yetiştiriciliğinde otonom navigasyon ve suyun kalitesini belirleyecek bilgileri toplayabilmek için çok sayıda sensör yerleştirerek bir robot, Ryuh *vd.* (2015) tarafından tasarlanmıştır. Otonom navigasyon için kullanılan sensörler arasında kızıl ötesi (IR) sensörleri, ultrason menzil sensörleri, Global Konumlandırma Sistemi (GPS) sensörü, su basıncı sensörü, Ataletsel Navigasyon Sistemi (INS) ve Ultra Kısa Taban hattı (USBL) bulunur. Temel olarak, robot su yüzeyindeyken konum belirleme için GPS sensörü kullanılır. Robot balığın su altı ortamında bulunması durumunda GPS verilerine ulaşamamaktadır. Bu nedenle robotun derinlik tespiti için su basıncı sensörü ve lokalizasyon için INS kullanması gerektiği belirtilmiştir. Su kalitesini test etmek için kullanılan sensörlerle, suyun sıcaklığı, elektrik iletkenliği (EC), PH'ı (hidrojen iyon konsantrasyonu) ölçülmüştür (Ryuh *vd.*, 2015).

## 5. KUYRUK KİNEMATİĞİ

Kuyruk kinematığını incelerken, hem biyolojik hem de akışkanlar mekaniği temelleri üzerine yapılan literatür araştırmaları robot balığın vücut hareketlerini kontrol edebilmesine ışık tutmuştur (Barrett, 1996).

Balık kinematığının ilk açık tanımı ise James Gray'in *Studies in Animal Locomotion* (Gray, 1939) adlı çalışmasında ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada Gray; balıkların burunlarından kuyruğa doğru ilerleyen bir dalgayı geçirerek yüzdüklerini, vücuttaki bu dalga ile balığın ileri hareket ettiğini ve yanal dalganın genliğinin balığın her parçası için farklı olduğunu göstermiştir. Bu görüş, balık gövdesinin aldığı şeklin ilerleyen bir dalga formunda olduğunu öne süren Lighthill (1960) ve Wu (1971) tarafından analitik olarak ele alınmış ve yüzme mekanizmasının Denklem 5.1'de görülen dalga formu ile tanımlanabileceği önerilmiştir:

$$h(x, t) = f(x)g\left(t - \frac{x}{c}\right) \quad (5.1)$$

Burada  $h$  herhangi bir  $x$  konumu ve  $t$  anındaki pozisyonu,  $f(x)$  dalganın genlik zarfını,  $g$  ise sinüsoidal salınım fonksiyonunu temsil etmektedir. (Barrett, 1996). Videler ve Wardle ise balıkların gerçekten de bu dalga formunda yüzdüğüne dair doğrudan biyolojik kanıtları raporlamışlardır (Videler, 1993; Videler ve Wardle, 1977). Videler (1993), bu dalganın Denklem 5.2'deki gibi olduğunu ortaya koymuştur.

$$h(x, t) = \sum_{j=1,3,5} \left[ a_j(x) \cos\left(\frac{2j\pi t}{T}\right) + b_j(x) \sin\left(\frac{2j\pi t}{T}\right) \right] \quad (5.2)$$

Bu ifadedeki Fourier katsayıları, dijital görsellerden elde edilen verilerin analizleri ile saptanmıştır. Deneysel gözlemler, balık gövdesi boyunca ilerleyen bir dalga formunun, Denklem 5.2 ile uyumlu şekilde yazılabileceğini göstermiştir (Barrett, 1996). Buna göre,

$$y(x, t) = (c_1x + c_2x^2) \sin(kx + \omega t) \quad (5.3)$$

ifadesi , arzu edilen biçimde, dalga formuna sahip bir çarpma davranışını temsil edebilmektedir. Burada eşitliğin sağ tarafındaki ilk terim, ikinci derece polinom formundaki dalga zarfıdır. Balığın merkez hattını oluşturan  $x$  noktalarının herhangi bir  $t$  anındaki enine yer değiştirmesi  $y$  ile gösterilmektedir. Dalga zarfının doğrusal empirik katsayısı  $c_1$  ve kuadratik katsayısı  $c_2$  olmaktadır. İlerleyen dalga hareketinin dalga sayısı  $k = 2\pi/\lambda$  olup  $\omega = 2\pi f$  dalganın açısal frekansını,  $\lambda$  dalga boyunu göstermektedir. Dalganın periyodu  $T$  ve frekansı  $f$  olmaktadır.

Bu yaklaşımdan hareketle, Videler ve Hess (1984) tarafından gövde kinematiği ifadesi revize edilmiştir. Canlı kömür balığı (*Pollachius virens*) ve uskumru balığının (*Scomber scombrus*) yüzme görüntülerinin işlenmesi ve çarpma hareketinin Fourier serisi ile modellenmesi ile Denklem 5.4'te görülen gövde kinematik denkleminde ulaşılmıştır (Videler ve Hess, 1984).

$$y(x, t) = (c_0 + c_1x + c_2x^2) \sin(kx - \omega t) \quad (5.4)$$

Bu denklemde Fourier katsayıları olan  $c_0$ ,  $c_1$  ve  $c_2$ , kinematik davranışı görüntü işleme tekniği ile ele alınan balığa özgü değerler alır (Borazjani ve Sotiropoulos, 2009; Di Santo vd. 2021). Literatürdeki çeşitli robotik balık uygulamaları, bu kinematiği taklit etmek amacıyla birden çok sayıda servonun uyum içinde çalıştığı tasarımlara sahiptir (Barrett vd., 1999; Yu vd., 2008). Ancak bu yaklaşımın önemli dezavantajları vardır. Örneğin, seçilen serbest parametrelerin, tasarlanan balık formu için optimal olduğuna dair bir garanti yoktur. Kömür balığı ve uskumrunun kinematiğini bir başka gövde formuna doğrudan uygulamak, itki ve Froude verimi karakteristiklerinin en iyi olacağı anlamına gelmez.

Sözü edilen kinematik davranışa ilişkin boyutsuz büyüklükler; boyutsuz dalga boyu  $\lambda^* = \lambda/L$  ve boyutsuz dalga genliği zarfı  $c^* = (c_0 + c_1x + c_2x^2)/L$  olmaktadır. Buna ek olarak yüzme hidrodinamiğine ilişkin diğer kritik boyutsuz parametreler, Reynolds sayısı,

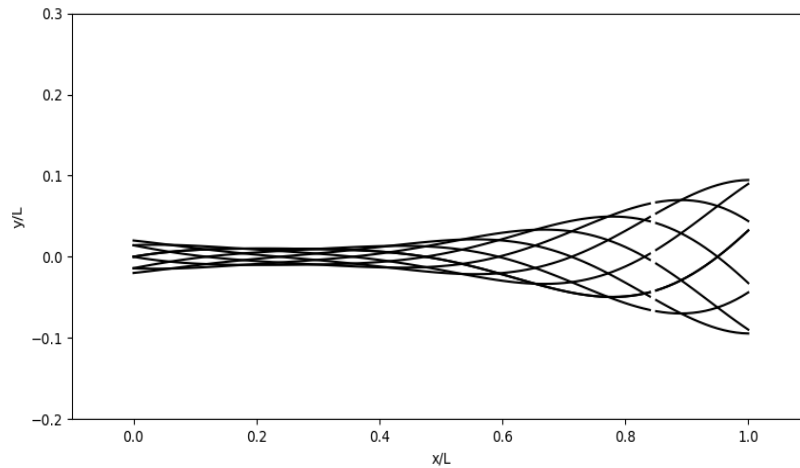
$$Re = UL/\nu \quad (5.5)$$

ve Strouhal sayısıdır:

$$St = fA/U \quad (5.6)$$

Burada balık uzunluğu  $L$ , yüzme hızı  $U$ , sıvı kinematik viskozitesi  $\nu$ , kuyruk firar kenarının uçtan uca genliği  $A$  ve  $f$  kuyruk çırpma frekansıdır. Doğada yüzen canlıların  $0,25 < St < 0,35$  aralığında çırpma davranışı sergiledikleri saptanmıştır (Eloy, 2012).

Videler ve Hess (1984) ile Borazjani ve Sotiropoulos (2009) tarafından önerilen korelasyon katsayıları,  $c_0 = 0,02$ ,  $c_1 = -0,08$  ve  $c_2 = 0,16$ 'dir. Böylece, bu genlik zarfı ile oluşan kuyruktaki maksimum yer değiştirme, ortalama bir uskumruya benzer şekilde gelişir ve  $c_{max} = 0,1$  olur. Çoğu karangiform tür balıkta %89-110 aralığında gözlenen boyutsuz dalga boyu ise  $\lambda^* = 0,95$  civarındadır (Borazjani ve Sotiropoulos, 2009). Bu sayısal değerlere uygun hareket, Şekil 5.1'de örnek olarak görülmektedir. Güncel robotik balık uygulamalarında, rijit uzuvları birbirine bağlayan servo motorlarla bu harekete ulaşmak hedeflenmiştir. Bu çalışmada ise esnek kuyruk modeline bu dalga formunu taklit etmesini hedeflenmiş, servo motor hareket denklemi bu bilgi ışığında oluşturulmuştur.



**Şekil 5.1**  $c_0 = 0,02$ ,  $c_1 = -0,08$ ,  $c_2 = 0,16$  ve  $\lambda = 0,95L$  parametrelerinin Denklem 5.4'te kullanılmasıyla elde edilen gövde kinematiki. Bir periyotluk zaman dilimi, 8 eşit aralığa bölünmüştür.



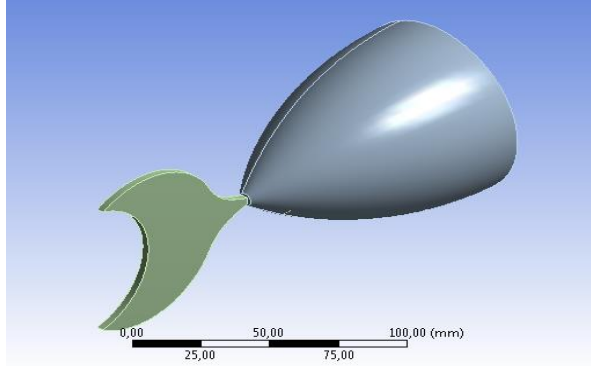
## 6. ROBOT BALIK KUYRUĞUNUN EĞİLMESİNİN STATİK MODELİ ve ANALİZİ

Kuyruğun eğilme deformasyonu için ANSYS 18.2 paket programı kullanılmıştır. Kuyruk geometrileri değiştirilerek arzu edilen yüzme açısına sahip modelin oluşturulması hedeflenmiştir. Bu bölümde verilen yapısal analizler kapsamında, kuyruk açılal genliğinin 15° olduğu durumu sağlayacak kuyruk et kalınlığı ve uzunluğu saptanmıştır. Bu amaç doğrultusunda uzunluğu ve et kalınlığı parametrik olarak değiştirilen tasarımlar oluşturulmuştur. 3 Farklı kuyruk uzunluğuna ve 3 farklı kuyruk kalınlığına sahip değerler için 9 ayrı geometrik model hazırlanmıştır. Hazırlanan tasarımlardaki kuyruk uzunlukları 105 mm, 126 mm ve 147 mm; kuyruk kalınlığı ise 5 mm, 6 mm ve 7 mm olarak belirlenmiştir. Balık geometrileri Ansys programına aktarılmıştır. Toolbox'dan *Linear Elastic Isotropic Elasticity* seçilerek malzeme özellikleri Tablo 6.1'deki gibi belirlenmiştir. Malzeme bilgisi tanımlayabilmek için yazılımın *Engineering Data* düzenlenerek RTV-2 için gerekli malzeme bilgileri için Tablo 6.1'deki veriler girilmiştir.

**Tablo 6.1.** RTV-2 Malzeme değerleri.

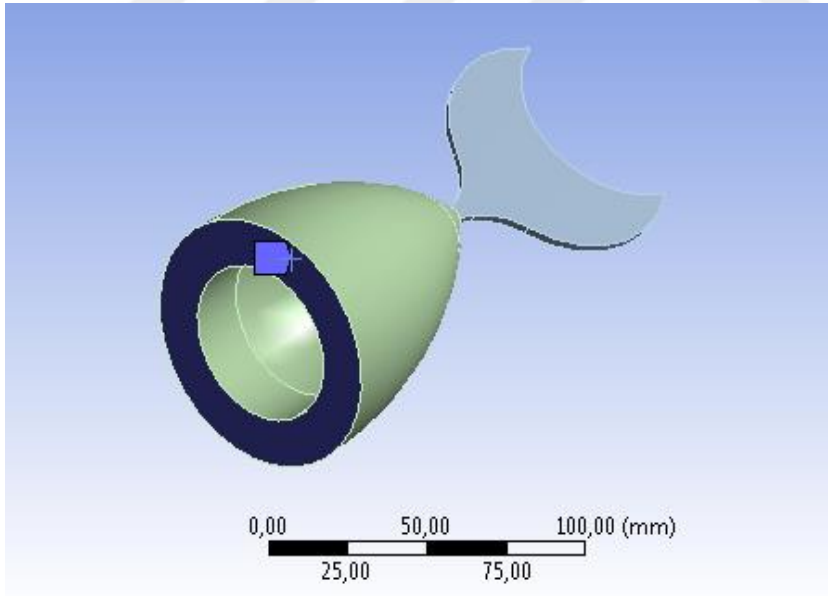
Parametre	Değer
Elastisite Modülü	0,56 mPa
Poisson's Ratio	0,49
ShA	15 A

Oluşturulan geometri, STL formatında kaydedilerek dosya ANSYS yazılımına import edilmiştir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. 3B Bilgisayar destekli katı model.

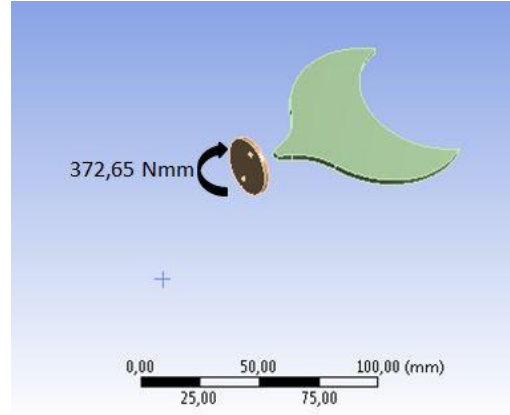
Geometrideki kuyruk için kütüphaneye eklenen RTV-2 silikon, kuyruk yüzgeci ve yuvarlak plaka program içinde halihazırda yer alan *Aluminum Alloy* seçilerek ağ örülmüştür. Robot balığın sınır şartları *Static Structural* bölümünde belirlenmiştir. Bu çalışmada balığın gövde kısmının kuyruğa temas ettiği noktalardan sabitlendiği kabul edilmiştir. Gövde yüzeyleri, sabit yüzeyler olarak seçilmiştir. Yüzeyleri seçmek için *Fixed Support* sekmesi seçilip, Geometry bölümünden sabitlenecek yüzeyler Şekil 6.2’deki gibi belirlenmiştir.



Şekil 6.2. Kuyruğun gövdeye temas ettiği sabit yüzey.

Oluşan momentin etkidiği alan *Static Structural* sekmesi altında *Moment* seçeneği seçilip, *Details of Moment* penceresinden moment oluşacak yüzeyler ve moment büyüklüğü ve yönü belirlenmiştir. Oluşan momentin yönü ve etkisi Şekil 6.3’deki

gibi tanımlanmıştır. Feetech FS5103B servo motorunun kılavuzunda tork değerinin 3,8 kg.cm olduğu belirtilmektedir. Uygun birim dönüşümü ile bu, 372,65 N.mm değerine karşılık gelir. Bu durumda y-yönünde dönme momenti 372,65 N.mm olarak girilmiştir.



Şekil 6.3. Momenti yönü ve değeri

Bu çalışmadaki robot balık modeli RTV-2 silikondan elde edilen kuyruğun içine sabitlenmiş plaka ve kuyruğa bağlı kuyruk yüzgecinden oluşmaktadır. Bu tasarım doğrultusunda plakada üzerinde oluşan momentin kuyruk yüzgecinin uç noktasında etki edecek yer değiştirme miktarına ANSYS paket programıyla ulaşılmıştır.  $L$  kuyruk uzunluğu,  $s$  kuyruk kalınlığını temsil eden 9 farklı tasarım için kuyruğun açı değerleri Tablo 6.2’de verildiği gibidir.

Tablo 6.2. Kuyruk açısının parametrik değişimi

Kuyruk Kalınlığı / Kuyruk Uzunluğu			
$s$ (mm) \ $L$ (mm)	5 mm	6 mm	7 mm
105 mm	12,51 °	9,76°	7,87°
126 mm	13,51°	10,61°	8,58°
147 mm	14,97°	11,87°	9,59°

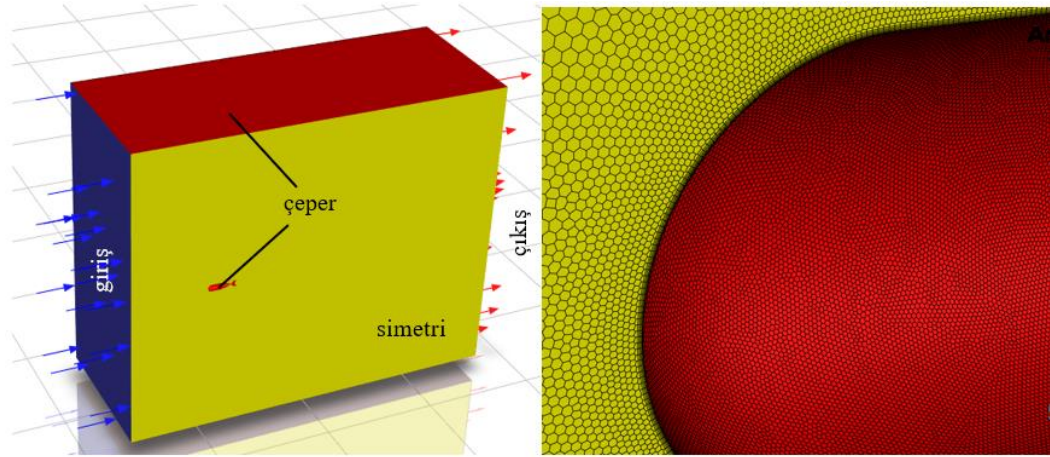
Analiz sonuçlarının ışığında kuyruk uzunluğu arttıkça ve kuyruk kalınlığı azaldıkça istenen kuyruk açısı olan 15° değerine ulaşıldığı görülmüştür. Servo motordan gelecek torkun plakaya gelecek dönme kuvvetinin en iyi

performansın alınacağı ölçülerin kuyruk uzunluğunun 147 mm, kalınlığın ise 5 mm iken kuyruk açısının 14,97°'ye ulaşılan tasarımın olduğu görülmüştür.



## 7. AKIŞ SİMÜLASYONLARI

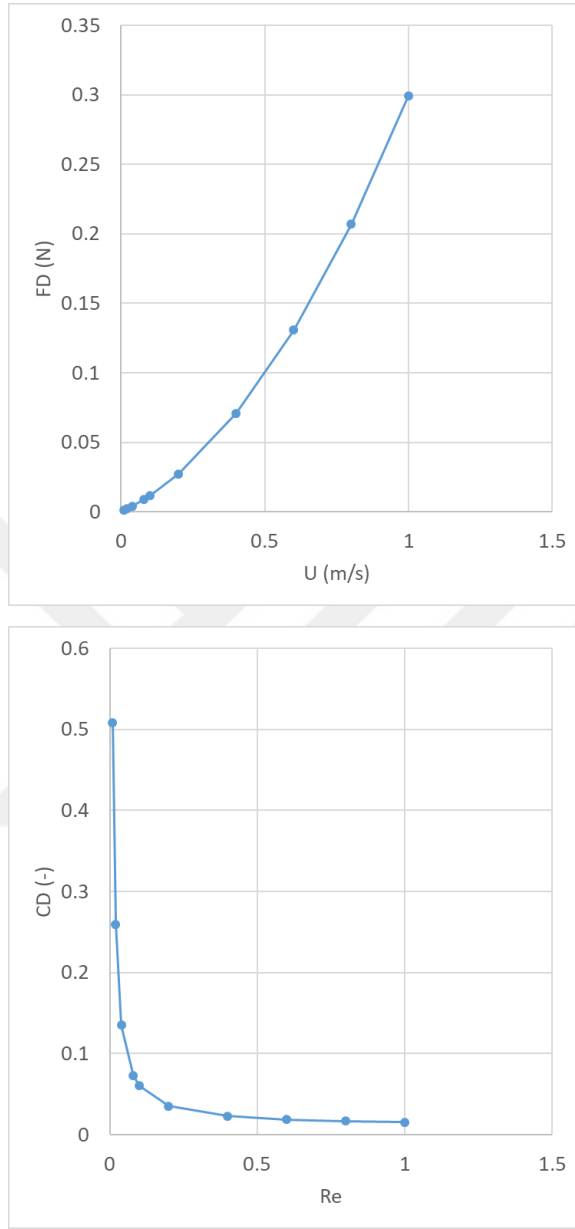
Çalışma kapsamında yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarının temel amacı, tasarımı yapılan balık gövdesinin nötral pozisyondaki ölü direncini saptamaktır. Bu kapsamda, balık gövdesinin çevresinde prizmatik bir akış bölgesi oluşturulmuştur (Şekil 7.1). Bu akış bölgesinin, yukarıakım yüzeyine serbest akım sınır şartı, yanıl yüzeylerine çeper sınır şartı, aşağıakım yüzeyine ise atmosferik basınç sınır şartı tanımlanmıştır. Geometrinin simetrisinden yararlanılarak, ortadüşey düzlem için simetri sınır şartı kullanılmıştır. Sınır tabaka ağı ile birlikte oluşturulan polihedral tipteki ağın hücre sayısı 2.650.427'dir (Şekil 7.1). Ağ oluşturma ve analizlerde sonlu hacimler yöntemine dayalı çalışan ANSYS Fluent yazılımı kullanılmıştır. Üç boyutlu ve zamana bağı akış kabulleri altında yapılan analizlerde, nötral postürdeki balık gövdesinin çevresindeki akış hesaplanmış ve yapının ölü direnci incelenmiştir. Çalışma akışkanı su olmak üzere, serbest yüzme hızının  $U = 0,01 \text{ m/s}$  ila  $1,0 \text{ m/s}$  aralığında değıştiğı değerler için hidrodinamik direnç katsayısının ( $C_D = 2F_D/(\rho S U^2)$ ,  $\rho$  : su yoğunluğu,  $S$ : referans alanı) Reynolds sayısına bağı değışimi saptanmıştır.



Şekil 7.1 Problem bölgesi ve burun civarındaki polihedral ağın görünümüleri.

Bu yöntem izlenerek elde edilen bulgular Şekil 7.2 'de görülmektedir. Direnç katsayısının Reynolds sayısına bağı değışiminin trendi  $C_D \sim Re^{-0.5}$  formunda olup, ele alınan yüzme hızlarında halen laminar akış rejiminin geçerli olduğuna işaret etmektedir (Şentürk ve Smits, 2019). Beklendiğı üzere itki kuvveti, hızın

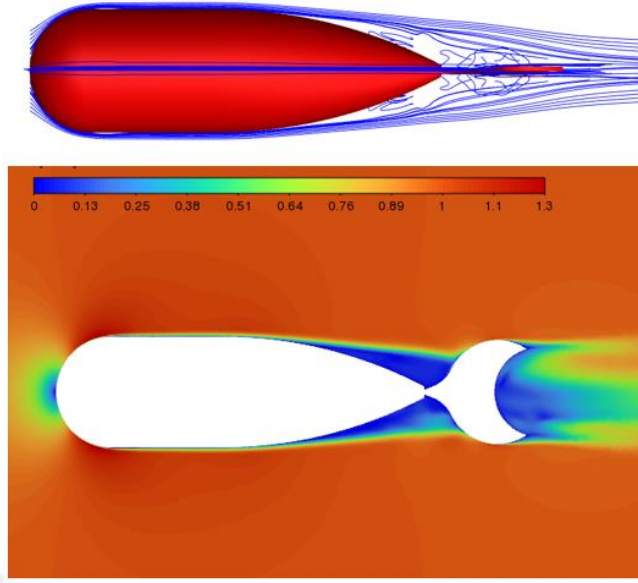
karesi ile büyümektedir. Buna bağlı olarak tasarım hızı olan 0,08 m/s için direnç katsayısı,  $C_D = 0,07$  olarak bulunmaktadır.



**Şekil 7.2.** HAD analizlerinde bulunan ölü direnç karakteristikleri: (a) Direnç kuvvetinin hızla değişimi, (b) Direnç katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi.

Statik akış analizlerinde oluşan akım çizgileri ve hız dağılımları, Şekil 7.3'de verilmiştir. Buna göre, ön gövdenin durma noktasını aştıktan sonra yerel hızlanma bölgeleri oluşmakta ve kuyruk civarında ise akışın ayrıldığı anlaşılmaktadır. Balık gövdesi için aerodinamik kanat profillerinden esinlenilerek elde edilecek formların daha düşük direnç karakteristiklerine sahip olacağı düşünülmektedir. Ancak hem

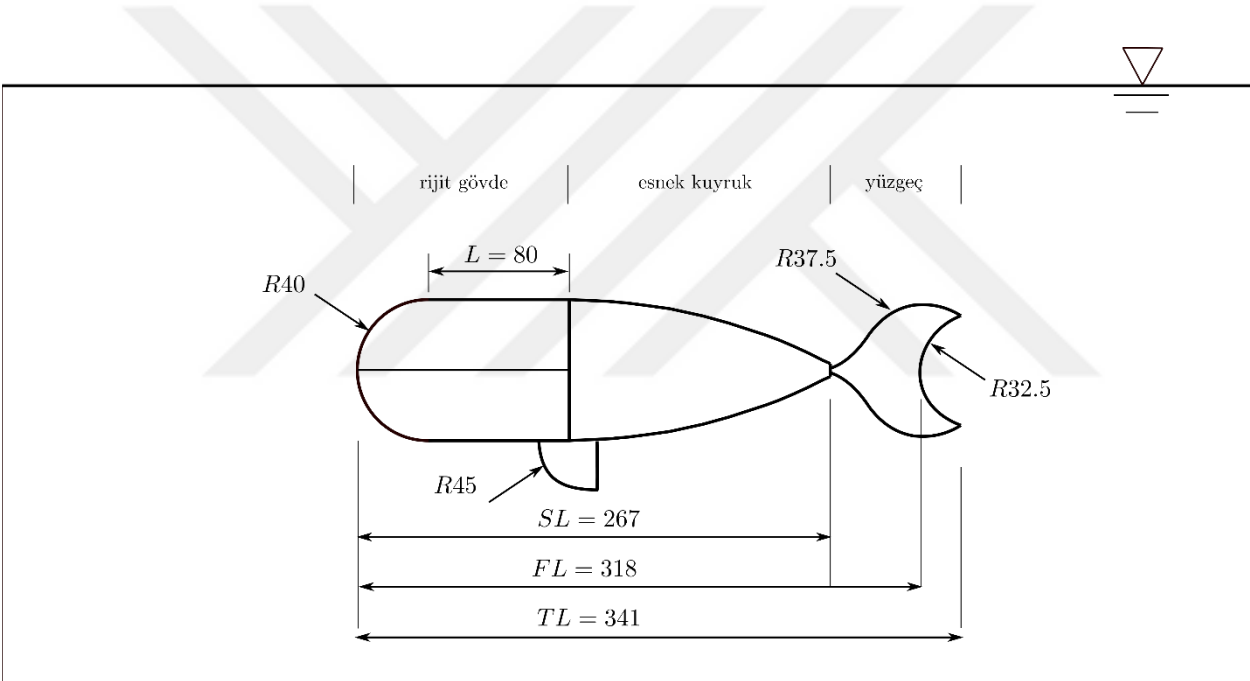
ön hesaplardaki basitliğinden hem de üç boyutlu baskı kısıtlarından dolayı mevcut gövde formu kullanılmıştır.



Şekil 7.3 HAD analizlerinde bulunan akım çizgileri (üstte) ve en kesitte oluşan boyutsuz hızın ( $|V|/U$ ) dağılımı (altta).

## 8. ROBOT BALIK PROTOTİPİNİN TASARIMI ve ÜRETİMİ

Önceki bölümlerde detaylandırılan gerekçelere dayalı olarak, tez kapsamında, karangiform tipinde kuyruk kinematiğine sahip bir robot balığın tasarımı ve üretimi hedeflenmiştir. Prototipin düşük maliyetli olması için, hareketin tek servo ile sağlanması amaçlanmıştır. Servo ve diğer olası elektronik komponentlerin rijit bir ön gövde içinde muhafaza edilmesi hedeflenmiştir. Dolayısıyla bu gövdenin sızdırmazlığı azami önem taşımaktadır. Diğer taraftan, servo milinin açısız harmonik hareketi ile kuyruk yüzgecinin çırpması sağlanmalıdır. Dolayısıyla, gövde-kuyruk bağlantısı içerisinde hareket aktarılırken, sızdırmazlıktan ödün verilmemelidir.



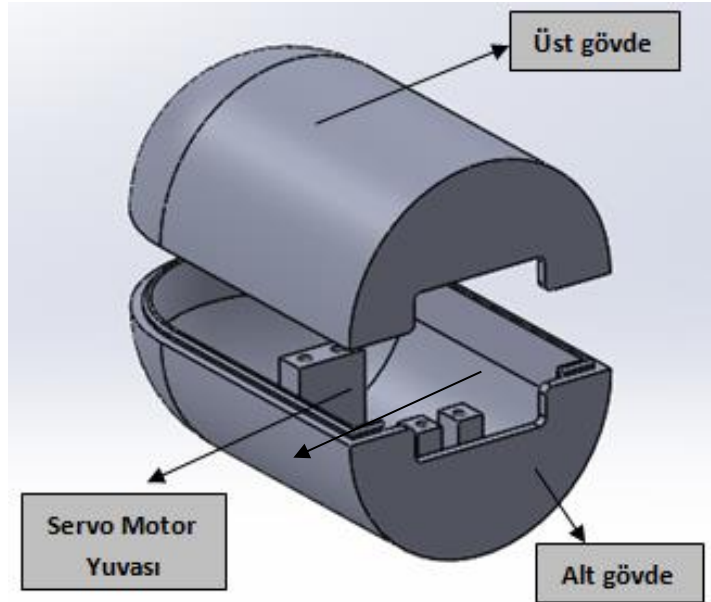
**Şekil 8.1.** Tez kapsamında tasarlanan robotik balık prototipinin ana ölçüleri. Tüm ölçüler milimetre birimine sahiptir.

Bu kısıtlar çerçevesinde, tez kapsamında geliştirilen özgün yapı, Şekil 8.1'de görülmektedir. Buna göre, rijit ön gövdenin arkasında, esnek silikon bazlı bir malzemeden üretilen, içi boş bir kuyruk parçası yer almaktadır. Bu silikon parça, ön gövdeye yapıştırılmalı bağlantı ile sabitlenecektir. Böylece esnek kuyruğun ön gövde ile bağlantı yüzeyi, aynı zamanda bir sızdırmazlık contası görevi de görecektir. Hareketin iletimi, esnek kuyruk üzerine sabitlenen rijit bir plakaya, çelik teller yardımıyla gerçekleştirilecektir. Rijit ön gövde, yarıçapı 40

mm olan bir yarı küre ile yüksekliği  $L = 40$  mm olan bir silindirin birleştirilip iinin boşaltılması ile elde edilmiştir. Prototipin standart boyu  $SL = 267$  mm, çatal boyu  $FL = 318$  mm ve toplam boyu  $TL = 341$  mm'dir. Prototip, 2 adet ön gövde parçası (PLA), 1 adet ölü ağırlık (kurşun), 1 adet esnek kuyruk (RTV-2), 1 adet kuyruk yüzgeci (PLA) ve 1 adet karın yüzgecinden (PLA) oluşmaktadır. Robot balığın parçalarının üretiminde; 3 boyutlu yazıcı, CNC işleme makinası ve kum kalıba kurşun dökümü gibi teknikler kullanılmıştır. Bu sayede düşük maliyetli bir prototipin eldesi hedeflenmiştir. Alt bölümlerde, sözü edilen tasarım ve üretim süreçleri detaylandırılacaktır.

### 8.1. Gövde Tasarımı

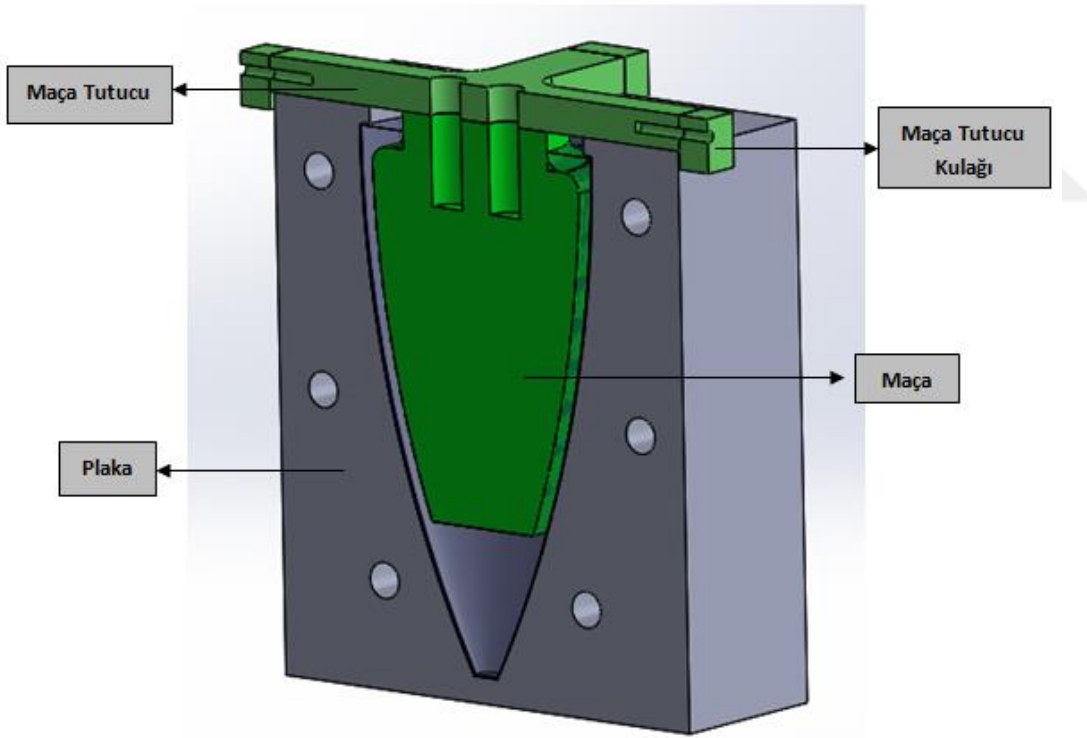
Balığın gövde kısmı 2 parçadan oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Balığın alt kısmına servo motor yerleştirileceği için alt gövdeye motorun ölçülerine uygun yuva çıkıntısı tasarlanmıştır. Üst gövdeye 4 mm çapında delik açılarak uzaktan kontrol sağlayacak servo motor kablolarının bilgisayara bağlı Arduinoya olan uzantısı sağlanmıştır. Bu sayede kontrollerin dışardan yapılması hedeflenmiştir. Üst ve alt gövdeye ait üç boyutlu tasarım Şekil 8.2'de gösterildiği gibidir.



Şekil 8.2. Gövde parçalarının üç boyutlu modellemesi.

## 8.2. Kuyruk Kalıbı ve Maça Tasarımı

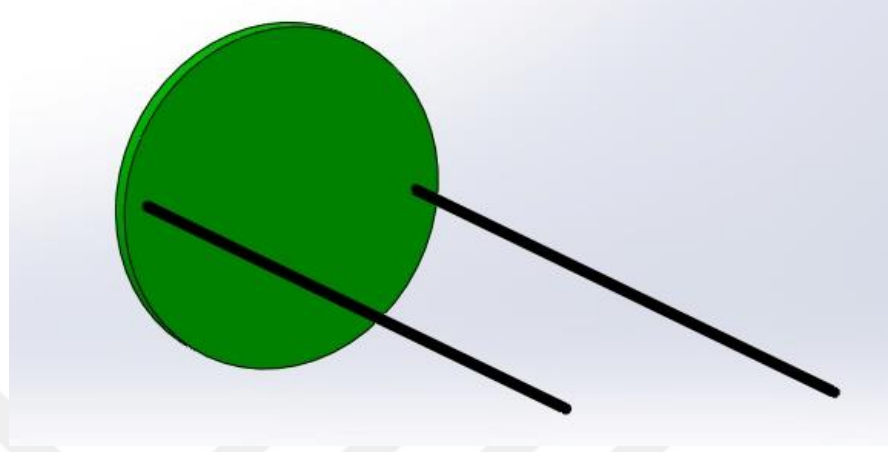
Kuyruğun geometrisi tasarlanırken Robot Balık Kuyruğunun Eğilmesinin Statik Modeli ve Analizi Bölümünde en verimli kuyruk geometrisi sonuçları seçilmiş ve uzunluğunun 147 mm kalınlığının ise 5 mm olacağı kalıp ve maça tasarlanmıştır. Kuyruk malzemesi RTV-2 silikon olarak belirlenmiştir. RTV-2 silikonun döküleceği kalıp ile döküm sonrası kuruma esnasında tasarıma uygun kuyruk formuna ulaşılması için kullanılan maça sistemi Şekil 8.3'te gösterildiği gibidir. Maça kullanarak içinde boş alan bırakılan kuyruğun içine yerleştirilen yuvarlak plaka ile hareket iletimi sağlanmıştır. Aynı zamanda maça kullanımı ile balığın toplam ağırlığını azaltılması ve esnekliğin artırılması amaçlanmıştır. Kuruma esnasında maçanın kalıpta sabit kalması için ilave olarak maça tutucu ve maça tutucu kulağı eklenmiştir.



Şekil 8.3. Kuyruk kalıbı ve maça sisteminin üç boyutlu modellenmesi.

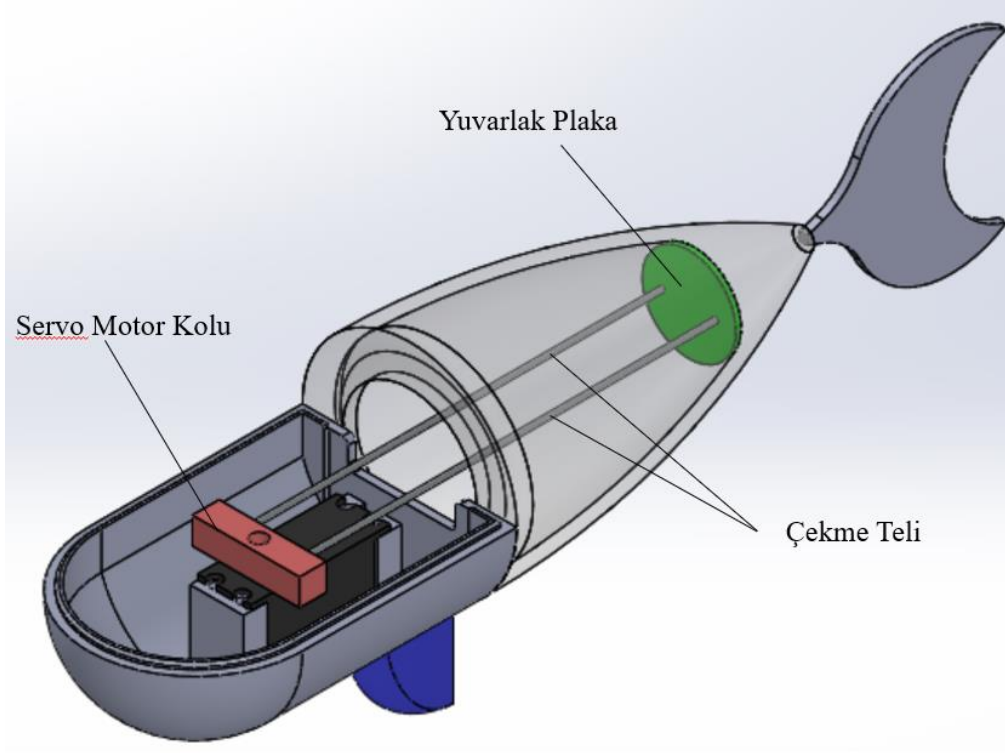
## 8.3. Plaka-Tel Aktarımının Tasarımı

Servo motorda üretilen hareketinin robot balığın kuyruğuna aktarılması plaka-tel bağlantısı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.4’de gösterilen plaka tasarımında açılan 1,5 mm çapındaki delikler ile tel geçişi sağlanması hedeflenmiştir.



Şekil 8.4. Yuvarlak plaka.

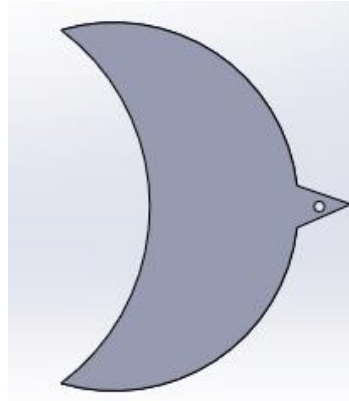
Servo motorun tekerlek kolundan, kuyruk içinde yer alan plakaya tel bağlantısı ile yüzgeç hareketinin iletilmesine amaçlayan aktarım sistemi Şekil 8.5’de gösterilmiştir.



Şekil 8.5. Servo kolu-plaka aktarım sistemi.

#### 8.4. Kuyruk Yüzgecinin Tasarımı

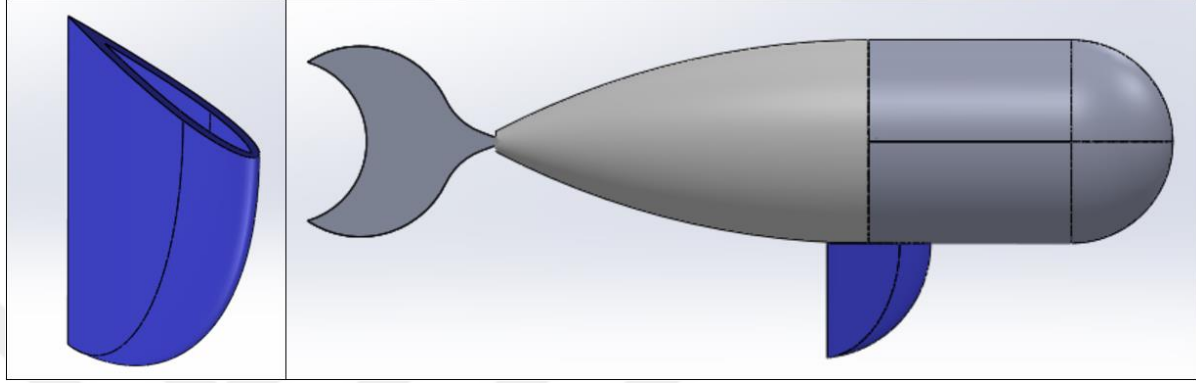
Robot balığın yüzme hareketi esnasında yeterli itki kuvvetini verebilmesi amacıyla esnek kuyruğa bir kuyruk yüzgeci tasarlanmıştır. Yüzgeç formu Şekil 8.6'da görülmektedir.



Şekil 8.6. Yüzgeç formunun tasarımı.

## 8.5. Karın Yüzgecinin Tasarımı

Yüzme esnasında balık gövdesinin yalpalanmasını engel olmak amacıyla hareketin tersi yönünde moment oluşturacak karın yüzgeci tasarıma dahil edilmiştir. Balıklarda denge görevi gören karın yüzgeci tasarımı için sürtünme kaybının en az olacağı NACA 0012 profili seçilmiştir (Şekil 8.7).



Şekil 8.7. a) Karın yüzgeci tasarımı b) Karın yüzgecinin gövdeye montajı.

## 8.6. Üretim ve Montaj

### 8.6.1. Gövde ve Karın Yüzgecinin Üretimi

Gövde kısmının üretiminde, alt ve üst olmak üzere 2 parçadan 3B yazıcı ile baskılama işlemi yapılmıştır. 3B yazıcı ile üretilen gövde ve karın yüzgecinin malzemesi PLA filamentini seçilmiştir. Baskılama esnasında kullanılan parametreler Tablo 8.1’de verilmiştir.

Tablo 8.1. 3B Yazıcıya ait baskılama özellikleri.

Parametre	Değer
Nozzle Çapı	0,35 mm
Basım sıcaklığı	190°C – 220°C
İç Dolgu Yüzdesi	%20
Yoğunluğu	1,25 g/cm <sup>3</sup>

Üç boyutlu yazıcı ile basımı kolay, dayanımı yüksek ve maliyeti düşük çıktılar elde etmek hedeflenmiştir. Üç boyutlu yazıcı ile üretilen 2 adet ön parçalar Şekil 8.8’de gösterildiği gibidir.



Şekil 8.8. Üç boyutlu yazıcı ile üretilen gövde parçaları

Gövdenin alt kısmına montajı yapılacak olan karın yüzgeci Şekil 8.9’da gösterilmektedir.



Şekil 8.9. Üç boyutlu yazıcı ile üretilen karın yüzgeci.

## 8.6.2. Kuyruk Kalıbı ve Maçanın Üretimi

Kuyruk kalıbının üretimi 2 parça halinde üç boyutlu yazıcıdan basılmıştır. 6 ayrı noktadan yuvalar açılmıştır. Açılan yuvalara bijon yerleştirilmiş ve kelebek somun yardımıyla sıkıştırılmıştır. Bu yuvaların amacı, kalıbı 2 parça halinde sabit tutarak silikonun kürleşmeden sonra zarar görmeden kalıptan ayrılmasıdır. Şekil 8.10'da kuyruk kalıbı gösterilmiştir.



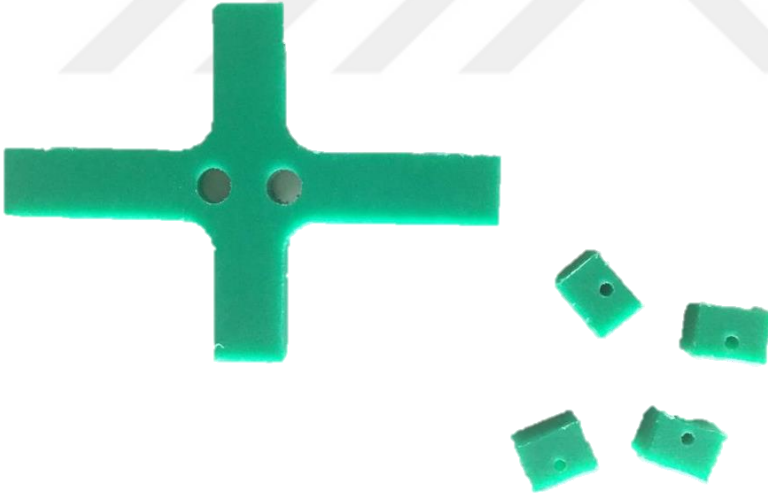
Şekil 8.10. Kuyruk kalıbı.

Maça, alüminyumdan talaşlı imalat yöntemi ile CNC makinada üretilmiştir. Maça üretiminde mukavemet oranı yüksek alüminyum malzeme seçilmiştir. Bu sayede kuruma esnasında malzemenin deforme olma ihtimali ortadan kaldırılmak istenmiştir. Üretimi tamamlanmış maça Şekil 8.11'de gösterildiği gibidir.



**Şekil 8.11.** Maça.

Maça tutucu görevi görecek parçaların üretimi delrin malzeme ile talaşlı imalat yöntemi ile CNC makinasında üretilmiştir (Şekil 8.12). Bu sayede maçanın ortalı ve sabit şekilde durması sağlanarak maçanın eğilmesi engellenerek kuruma sonrasında yüzgecin her bölümünün aynı et kalınlığında olması sağlanmıştır.



**Şekil 8.12.** Maça tutucu.

Maçaya civata ile sabitlenmiş maça tutucuların kalıp içerisindeki görünümü Şekil 8.13'teki gibidir.



Şekil 8.13. Maça, maça tutucu, kalıp görünümü.

### 8.6.3. Kuyruğun Üretimi

Literatüre göre, robot balıkların en yaygın tasarımı, her eklem bir motor tarafından çalıştırıldığı çoklu bağlantı tasarımıdır (Wen *vd.*, 2012; Yu *vd.*, 2016). Bu hareket mekanizması etkili olmasına rağmen, bu tip tasarımlar karmaşık yapısı, çok yönlü kontrolü ve düşük enerji verimliliği ile gölgelenir, çünkü mekanik verimlerin yaklaşık %80'i sürtünme ve aktüatör kayıpları nedeniyle tüketilir (M. S. Triantafyllou *vd.*, 2000). Diğer yaygın tasarım, hareketin sıcaklığın değiştirilmesiyle elde edildiği şekil hafızalı alaşım gibi akıllı malzemeler ( Z. Wang *vd.*, 2008) ve aktivasyonun elektrik tahrik uygulanarak elde edilen iyonik polimer metal kompozit aktüatörler kullanımını içerir (Tan *vd.*, 2006; Zheng Chen *vd.*, 2010). Akıllı malzeme tabanlı tasarım basit ve kompakt boyuttadır, ancak elektrik enerjisini kinetik enerjiye dönüştürürken verimliliği düşmektedir. Açıkçası, basit ve verimli bir tahrik sistemi bulmak son derece değerlidir (Zhong *vd.*, 2017). Doğada balıklar, yılanlar ve bazı solucanlar gibi birçok canlı, yumuşak ve esnek bir vücuda sahiptir. Bu sayede sualtı, ağaçlar ve engebeli araziler gibi karmaşık ortamlara kolayca uyum sağlayabilirler. Bu canlılardan esinlenerek bir dizi uyumlu gövdeli robot balık yapılmıştır. Bu tür robot balıklar, kolay üretim, kolay kontrol ve hareket halinde yüksek stabilite gibi avantajlar sunar. Özellikle,

bu tür uyumlu mekanizma kullanılarak geliştirilmiştir birçok robot balık vardır. (Zhong *vd.*, 2017) Örneğin, Alvarado ve ark. uyumlu gövdeli birkaç robot balık geliştirdi (Epps *vd.*, 2009; Youcef-toumi ve Anand, 2007). Tasarımlarında uyumlu gövdeler yumuşak elastik malzemeler kullanılarak üretilmiştir. Tahrikleri, vücudu doğal frekansında titreştirerek gerçekleştirildiği için tüm vücut salınım hareketi yapmıştır. Kinematikteki önemli hatalara rağmen robot balıklarının performansının gerçek balıkların performansına oldukça benzer olduğunu bildirdiler. Fiazza (Fiazza *vd.*, 2010) benzer bir robot balık geliştirdi ve farklı elastik malzemeleri ve bunların kombinasyonlarını test eden bir çalışma ortaya koyarak (Daou *vd.*, 2014), uyumlu bir gövdeye sahip bir robot balık inşa etti ve uyumlu gövde boyunca malzemenin homojen olmayan dağılımını ve sonunda sert bir kuyruk yüzgeci takmanın etkilerini hesaba katan bir model önerdi. Robot balığın hareket mekanizması kuyruk yüzgecinde dalgalar halinde çırpılması sonucu oluşan itkiyi kullanarak gerçekleşecek olması kuyruk yüzgecinde kullanılacak mekanizma ve malzeme seçimi önemli bir sorun haline getirmektedir. Seçilecek malzemenin esnek, su geçirmez ve kuyruğun hareket etmesine yardımcı olmalıdır. Bu çalışmada doğadaki canlılardan ilham alınarak esnek kuyruk modele sahip robot balık geliştirilmiştir. İstenilen yumuşak elastik malzeme ile balığın dalgalı hareket (yani, "S" şeklinde çırpma) sağlayabilmesi için silikon malzeme kullanılmıştır. Kuyruk yüzgecinin üretimi için kullanılacak elastik malzeme RTV-2 silikon olarak belirlenmiştir. Dünyada, kalıp silikona ortak bir tanım olarak RTV (Room Temperature Vulcanizing) ismi verilmiştir, kalıp silikonlarda (RTV-2) yer alan "2" tabiri ürünün çift karışumlu malzeme olduğunu ifade etmektedir (Kartal *vd.*, 2021). Çift karışım içeriğinde esas malzeme ve katalizörden bulunmaktadır. RTV 2 silikonun tercih edilme sebebi düşük maliyetli, kalıplama yöntemine uygun ve esnek malzeme olmasıdır. Kullanılan RTV 2 E-15 silikonuna ait mekanik özellikler Tablo 8.2'de görülmektedir.

**Tablo 8.2.** RTV 2 E-15 Silikonuna ait mekanik özellikler.

Parametre	Değer
VİZKOZİTE	14500 mPa.s
SERTLİK SHOREA	15 A

GERİLME DİRENCİ	3,81 MPA
YIRTILMA DİRENCİ	26,8 KN/M
UZAMA ESNEME	555 %
ÇEKME ORANI	0,3 %

Üretim esnasında RTV-2 silikon ve katalizör karışımında; katalizör oranı %2-%3 olarak belirlenmiştir. Karışım hızlıca karıştırılarak kürlenmeden homojen yapı oluşturulmuştur. Hazırlanan karışım, kalıp gövdelere dökülmeden önce kalıbın tüm yüzeyleri ve maça vazeline katmanı sürülmüştür. Bu sayede silikonu çıkarırken kalıptan kolay bir şekilde ayrılabilmesi ve sonucunun pürüzsüz olabilmesi hedeflenmiştir. Döküm tamamlandıktan sonra kalıp içerisinde maça yerleştirilerek 12 saat kuruması için beklenmiştir (Şekil 8.14).



Şekil 8.14. RTV-2 silikonun kürlenmesi.

#### 8.6.4. Çekme Teli ve Plakanın Üretimi

Plaka malzemesi olarak pleksiglas, tel malzemesi olarak  $\varnothing$  0,5 mm kalınlığında çelik tel kullanılmıştır. Çekme diski olarak görev yapacak olan plaka lazer kesim ile üretilmiştir. Plakaya açılan 1,5 mm çapındaki 4 ayrı delik ile tel geçişi

sağlanmıştır. Plaka 35 mm çapında 2 mm kalınlığında ve servo motora 95 mm uzaklığında kuyruk içine yerleştirilmiştir. Servo motorda üretilen hareketinin robot balığın kuyruğuna aktarılması Şekil 8.15’de gösterilen plakaya bağlanacak tel ile sağlanmıştır. Plaka, silikon kuyruğun ucuna RTV-2 silikon yapıştırıcı ile sabitlenmiştir.



**Şekil 8.15.** Kuyruk içine yerleştirilen plaka.

Kuyruk yüzgeci yarım ay formunda lazer kesim ile pleksiglas malzemedan üretilmiştir (Şekil 8.16). Silikon kuyruğa takılabilir formda hazırlanan kuyruk yüzgeci RTV-2 silikon yapıştırıcı ile güçlendirilmiştir.

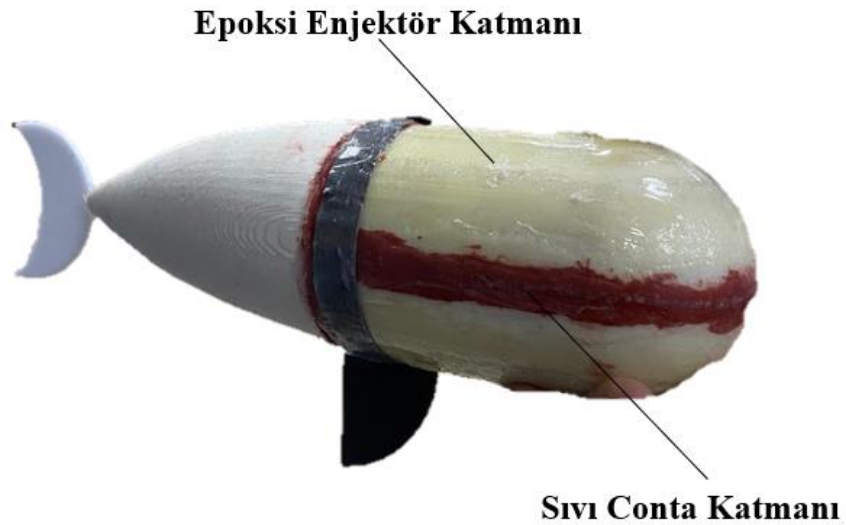


**Şekil 8.16.** Yüzgeç formu.

## 9. SIZDIRMAZLIK, HİDROSTATİK DENGE VE KARARLILIK (STABİLİTE)

### 9.1. Sızdırmazlık Testi

Bu bölümde, montajı tamamlanan balığın su altında testleri yapılırken birleşim yerlerinden sızdırmazlık sorununu ortadan kaldırmak için tercih edilen yöntemler paylaşılmıştır. Balığın yüzme testlerinde içine su alması, balığın su aldıkça dibe batmasını dolayısıyla yüzme davranışını doğrudan etkileyen sorun olması sızdırmazlığı önemli bir konu haline getirmiştir. Montajın ardından, parçaların birleşme yüzeylerinden sızdırmazlık açısından dezavantajlı olduğu düşünülmüştür. En fazla sızdırmazlık sorunun oluşabileceği gövde-gövde ve gövde-kuyruk birleşim yüzeylerine sıvı conta uygulaması ile sızdırmazlık katmanı oluşturulmuştur. Ayrıca katmanlı üretim yöntemi ile üretilen alt ve üst gövdelerin %10 dolulukta yüzeylerin gözenekli bir yapıda olması sebebiyle epoksi yapıştırıcı enjektör ile tek katman sürülerek olası sızıntıların önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Şekil 9.1’de birleşim yerlerine sıvı conta, gövde parçalarına epoksi enjektör katmanı sürülmüş hali görülmektedir. Birleşim yerlerine tek katman halinde uygulanan sıvı conta, sürüldükten sonra 24 saat beklenmiş, böylece tam kurumasa sağlanmıştır. Gövdeye tek katman sürülen epoksi enjektör katmanı 2 saat içinde kurumuştur.



Şekil 9.1. Sıvı conta ve epoksi yapıştırıcı enjektör uygulaması.

Bu uygulamanın ardından balık su altı testlerinin yapıldığı havuza atılmıştır. Şekil 9.2’de test havuzuna bırakılan balığın sızdırmazlık testlerinin başarılı olarak tamamlandığı görülmüştür.

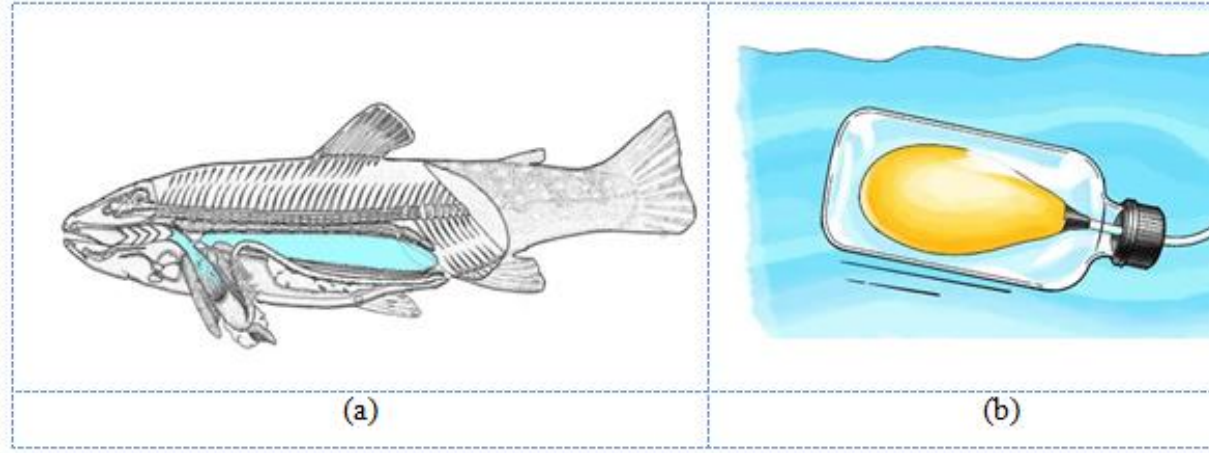


Şekil 9.2. Sızdırmazlık testi.

## 9.2. Hidrostatik Denge ve Kararlılık (Stabilite)

Doğadaki balıkların çoğu, buldukları derinliği kontrol edebilmek için bir gaz kesesi kullanır. Gaz kesesinde, balığı çevreleyen sudan solungaçlar yardımıyla alınan oksijen bulunur (Şekil 9.3). Balık, bu gaz kesesindeki oksijen miktarını (dolayısıyla kesenin hacmini) değiştirerek balığa etkiyen hidrostatik kaldırma kuvveti  $F_B$ ’yi değiştirir. Örneğin gaz kesesi büyüdüğünde, toplam hacim artacağı için  $F_B$  artar. Bu işlem sırasında balık ağırlığı  $W$ ’nin değişimi ihmal edilebilir düzeydedir. Böylece  $F_B > W$  olur ve balık su yüzeyine doğru hareket eder. Bunun tersi olduğunda ise balık daha derine hareket eder. Bazı balıklarda ise, gaz kesesi bulunmaz. Bunlara bir örnek olarak köpekbalığı verilebilir. Köpekbalıkları, derinlik değişimi için, pektoral yüzgeçlerini kullanırlar. Bu yüzgeçler üzerinde hidrodinamik taşıma prensibine dayalı olarak düşey yönde net bir kuvvet oluşur. Dolayısıyla bu tip balıkların derinlik değiştirebilmeleri için hareket halinde olmaları gerekir. Bu hususlardan anlaşılacağı üzere, bir balığın yoğunluğu, içinde yüzdüğü suyun yoğunluğuna çok yakın bir değere sahiptir. 25°C sıcaklık, 1 atm

basınç ve 35 g/kg tuzluluk oranına sahip deniz suyunun yoğunluğu  $1023,6 \text{ kg/m}^3$  değerindedir (Nayar vd., 2016).



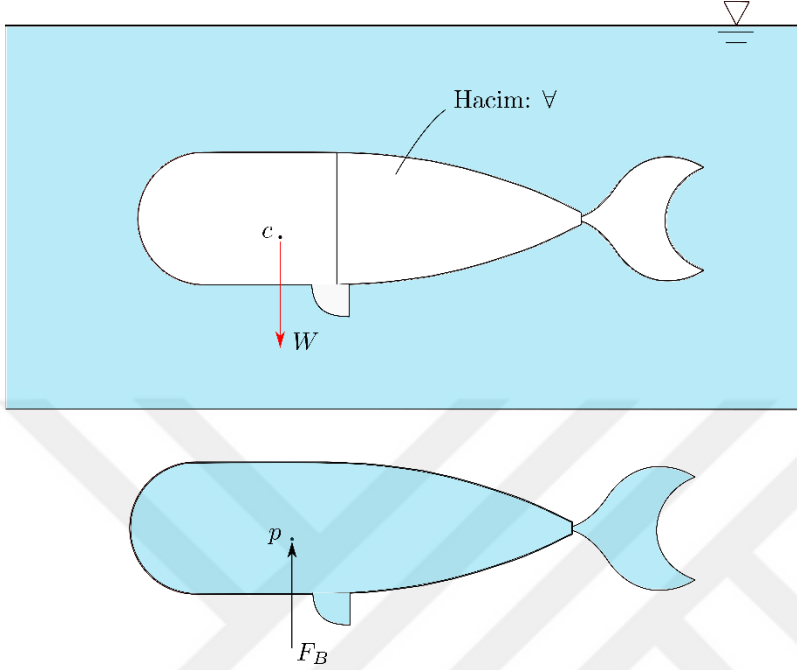
**Şekil 9.3.** Balıklarda gaz kesesi ile derinlik kontrolü: (a) Bir alabalığa ait gaz kesesi yeşil renkli bölge ile gösterilmiştir (Brown vd., 2009). (b) Gaz kesesinin çalışma prensibi (Lohner, n.d.).

Tez kapsamında tasarlanan robot balık, tamamen suya batmış halde çalışacaktır. Tasarıma bir derinlik kontrol sistemi dahil edilmemiştir. Bu sebeple, prototipin hidrostatik açıdan nötral dengede olması ve kararlılık kriterlerini sağlaması şarttır. Tasarımın bu ilkelere dair yapılan ön hesapları ile üretilen prototipin testlerine dair süreçler, bu bölümde verilecektir. Üretimi yapılan prototipin hidrostatik denge ve kararlılık testleri bir yüzme havuzunda gerçekleştirilmiştir.

### 9.2.1. Hidrostatik Denge

Hareketsiz bir cisim bir akışkan ortamına tamamen batırıldığında veya bu ortama kısmen batık halde yüzer durumda iken bu cisme *hidrostatik kaldırma kuvveti* adı verilen bir kuvvet etkir. Bu kuvvetin oluşma sebebi, durgun akışkan içerisinde derinlikle artan hidrostatik basınçtır. Tamamen dalmış bir cismin serbest cisim diyagramı üzerinde, hidrostatik basınç kuvvetleri ve ağırlığın denge hali ele alınırsa, kaldırma kuvvetinin (1) düşey ve yukarı yönde olduğu, (2) dalmış cisimle aynı hacme sahip akışkan ağırlığına eşit bir büyüklüğe sahip olduğu sonuçlarına ulaşılır. Buna, ilgili bilim insanının adına atfen *Archimedes prensibi* adı verilir. Hidrostatik kaldırma kuvvetine dair bir diğer önemli bilgi ise, bu kuvvetin etkiye noktasının konumudur. Bunun için ise moment dengesinden yararlanılır ve dış kuvvetlerin oluşturduğu momentler incelenir. Böylece, kaldırma kuvvetinin

etkime noktasının (Şekil 9.4,  $p$  noktası), balığın işgal ettiği su hacminin ağırlık merkezinden geçtiği sonucuna varılır(Munson B.R., Young D.F., Okiishi T.H., 2012).



**Şekil 9.4.** Prototipin tüm bileşenleri dikkate alınmak üzere nihai ağırlığı  $W$ 'nin etkime noktası, montajın ağırlık merkezi  $c$  iken (üstte); kaldırma kuvvetinin etkime noktası, hacmin işgal ettiği suyun ağırlık merkezi olan  $p$  noktasıdır (altta).

Buna göre, tasarlanan balığın toplam hacmi  $\nabla$ , suyun yoğunluğu  $\rho$  olmak üzere, balığa etkiyen hidrostatik kaldırma kuvveti Denklem 9.7 ile bulunur.

$$F_B = \rho g \nabla \quad (9.7)$$

Bir diğer deyişle, kaldırma kuvveti, balık hacminin taşıdığı suyun ağırlığına eşittir. Prototipin tüm bileşenleri dikkate alınmak üzere nihai ağırlığı  $W$  olan balığın batık halde iken nötral dengede olması için Denklem 9.8'deki,

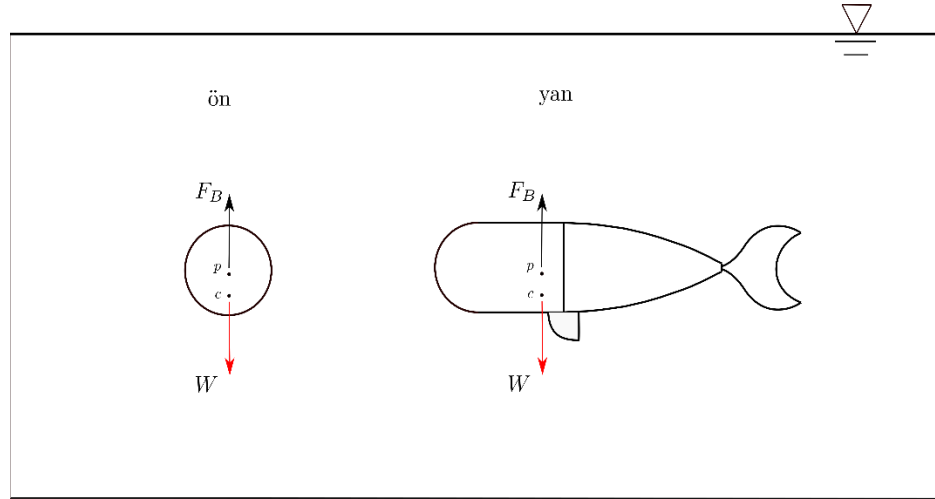
$$F_B = W \quad (9.8)$$

şartının sağlanması gerekir.

## 9.2.2. Balık Prototipinin Su Altındaki Kararlılığı

Dalmış bir cismin hidrostatik açıdan kararlı denge şartını sağlaması için, kasten bozulan denge haline kendiliğinden geri dönebilmesi beklenir. Kararsız denge halinde ise cisim, dış etki sonrasında yeni bir denge konumuna ulaşır. Dalmış cisimler için kararlılık önemli bir husustur ve özünde, hidrostatik kaldırma kuvveti ile ağırlığın etkime noktalarının farklı konumlarda olmasından kaynaklanır.

Tez kapsamında tasarlanan robot balığa dair, balık ağırlığının etkime noktası  $c$  ve kaldırma kuvvetinin etkime noktası  $p$  olsun (Şekil 9.5). Bu noktaların düşey eksendeki konumları açısından,  $c$  noktası  $p$ 'nin altında olduğu sürece kararlı denge sağlanır. Bu sebeple, bu noktaların konumları, tasarım sürecinde, katı modelleme yazılımları yardımıyla saptanmalı ve kararlı denge şartının sağlandığı teyit edilmelidir. Aksi takdirde iç yerleşim, bu şartı sağlayacak biçimde modifiye edilmelidir.



Şekil 9.5. Prototipin kararlı denge şartını sağlaması için c noktası p'nin altında kalmalıdır.

## 9.2.3. Ön Tasarım Hesapları ve Testler

Bölüm 8'de tasarım ve üretim detayları verilen prototipe ait toplam kütle hesabı, Tablo 9.1'de görülmektedir. Bileşenlerin hacimleri, katı modelleme

yazılımı ile hesaplanmıştır. Buna göre, üretim öncesi prototipin toplam kütlesi 349,06 g olarak öngörülmüştür. Robotik balığın bileşenlerinin üretimi ve montajının ardından, Ege Üniversitesi Müh. Fak. Makina Mühendisliği Bölümü'ndeki hassas terazi ile yapılan kütle ölçümleri ile prototipin toplam kütlesinin 354,14 g olduğu saptanmıştır. Ön hesap ve ölçüm arasındaki farkın, PLA ve RTV-2 malzemeleri için kullanılan yoğunluk değerlerinden olası sapmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ölçümler sonucunda prototipin ağırlığı,

$$W = 3,47 \text{ N} \quad (9.9)$$

olmaktadır. Katı modelleme yazılımı yardımıyla, montajın ağırlık merkezi, (0, -4,12, -2,67) mm noktası olarak saptanmıştır (Şekil 9.6).

**Tablo 9.1.** Prototipin ön tasarım sürecindeki toplam kütlesi.

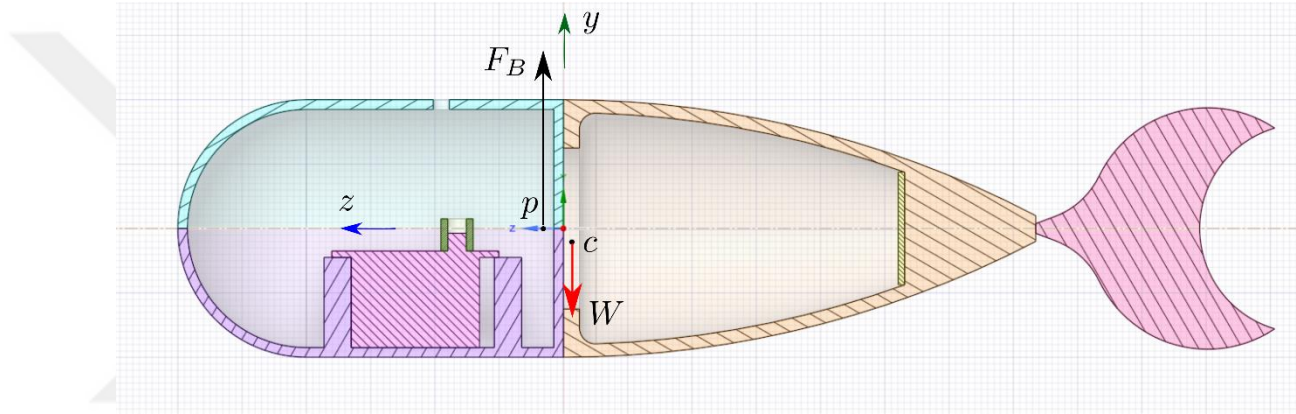
Bileşen	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Kütle (g)
Üst gövde	1,25	49,4	61,75
Alt gövde	1,25	57,9	72,37
Karın yüzgeci	1,25	4,7	3,36
Yuvarlak plaka	1,25	1,9	2,38
Servo kolu	1,25	3,7	4,63
Yüzgeç	1,25	8,4	10,5
Esnek kuyruk	1,1	125	137,50
Çekme teli	7,85	0,2	1,57
Servo			55
<b>Toplam</b>			349,06

Diğer taraftan, prototipin suya batan hacmi, katı modelleme yazılımı ile  $V = 970,4 \text{ cm}^3$  olarak saptanmıştır. Dolayısıyla, su yoğunluğu  $\rho = 0.9982 \text{ g/cm}^3$  alınmak üzere, hidrostatik kaldırma kuvveti,

$$F_B = 9,5 \text{ N} \quad (9.10)$$

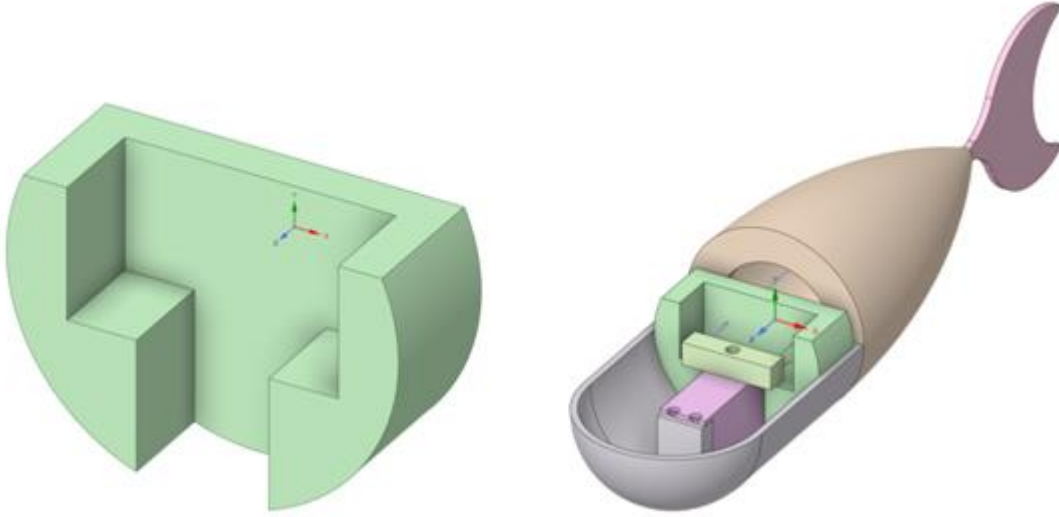
olarak hesaplanır. Bu hacmin ağırlık merkezi ise, (0, 0, 6,86) mm noktası olarak saptanmıştır (Şekil 9.6). Üretilen prototipe etkiyecek kaldırma kuvvetinin ölçümü için su taşıma deneyi gerçekleştirilmiştir. Taşan suyun kütlesi hassas terazi ile ölçülmüştür. Deney sonucunda kaldırma kuvveti, 9,21 N bulunmuştur. Bu değer de beklendiği üzere ön hesaplarla uyumludur.

Bu hesap sonucunda,  $F_B > W$  olması dolayısıyla prototipin nötral dengede olmayacağı ve su üstünde yüzeceği anlaşılmaktadır. Dengenin sağlanması için, prototipe, 617,6 g ölü ağırlığın eklenmesi gerektiği anlaşılmaktadır.



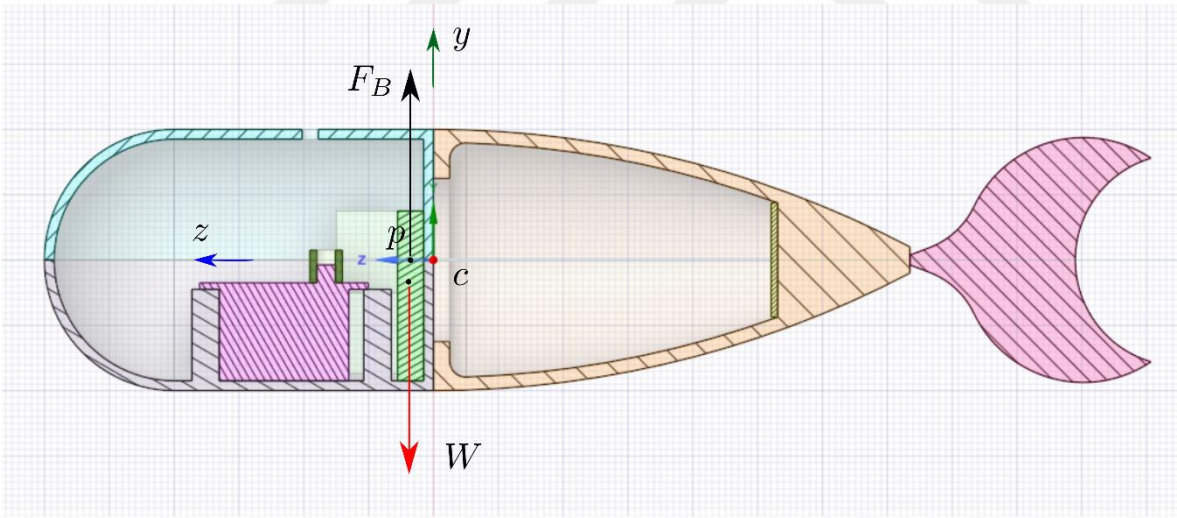
Şekil 9.6. Ön tasarım için kaldırma kuvveti, ağırlık ve bunların etkime noktaları.

Prototipin hidrostatik denge ve kararlılık şartlarını sağlaması için, Şekil 9.7’de görülen ek ağırlık tasarlanmıştır. Bu ağırlık rijit gövde içine yerleşecek olup içinden, hareketi iletecek teller için slotlar açılmıştır. Ağırlığın malzemesi kurşun olup, döküm yoluyla üretilmiştir.



Şekil 9.7. Hidrostatik denge ve kararlılık için eklenen parça, yeşil renkli olarak görülmektedir.

Eklene bu parçanın ardından prototipin toplam ağırlığı  $W = 9,38$  N ve ağırlık merkezi,  $(0, -7,35, 7,44)$  mm noktası olarak saptanmıştır. Güncel durumda ağırlık ve hidrostatik kaldırma kuvvetinin etkiye noktaları, Şekil 9.8’de verilmektedir.

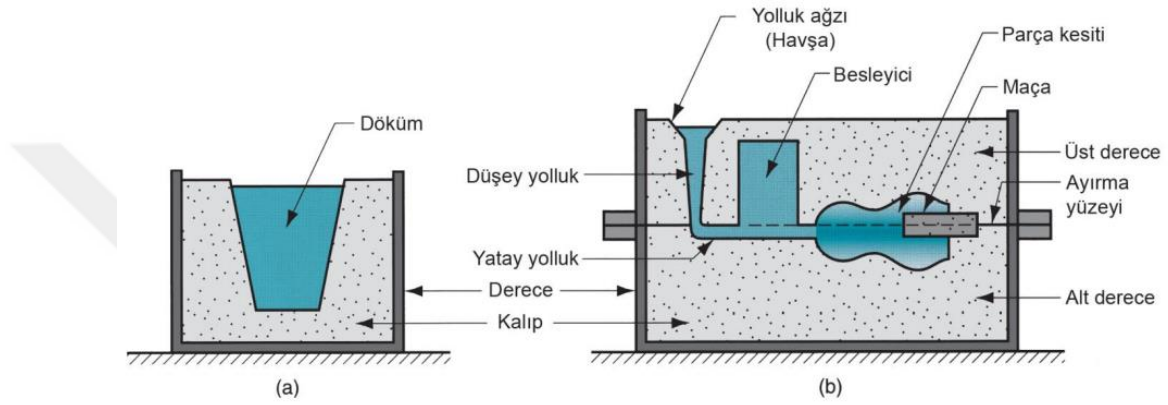


Şekil 9.8. Ağırlık eklenmesinin ardından kaldırma kuvveti, ağırlık ve bunların etkiye noktaları.

#### 9.2.4. Ağırlık Modelinin Döküm İle Üretimi

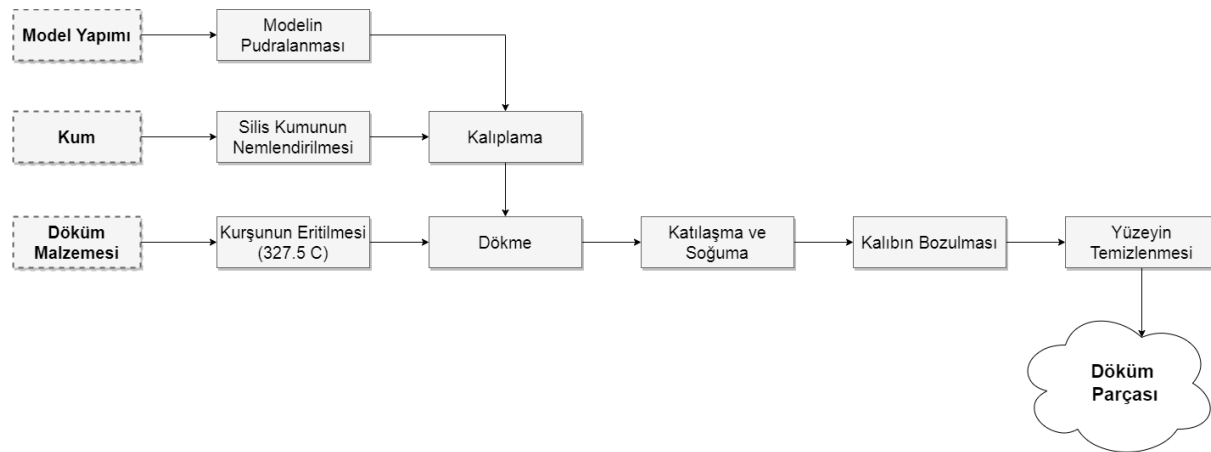
Gövde içerisinde yerleştirilen ek ağırlığın üretimi için kum kalıba döküm yöntemi tercih edilmiştir. Kum kalıba döküm; sıvı metalin kalıba dökülmesi, metalin

katılaşmasıyla döküm parçasının elde edildiği bozulabilir kalıp yöntemi olarak sınıflandırılabilen bir üretim yöntemidir. Açık kalıba döküm ve kapalı kalıba döküm olarak iki tip kum kalıba döküm yöntemi mevcuttur (Mikell P. Groover, 2006) (Şekil 9.9). Kalıplama işlemi kum esaslı bir malzemenin bir model etrafında sıkıştırılması ve ardından modelin kalıptan çıkarılması ile gerçekleştirilir. Döküm kalıbı, işlem sonrasında bozularak tekrar tekrar kullanılabilir. Bu sebeple bozulabilir kalıp yöntemleri oldukça kullanışlı bir prototip üretim yöntemidir (Aran, 2007; Çalık vd., 2022).



Şekil 9.9. a) Açık kalıba döküm, b) Kapalı kalıba döküm (Mikell P. Groover, 2006).

Bir önceki bölümde tasarlanan ek ağırlık geometrisine uygunluğu ve uygulama kolaylığı göz önüne alınarak açık kum kalıba döküm işlemi üretim yöntemi olarak seçilmiştir. Kum kalıp hazırlama ve üretimi Şekil 9.10'daki şemada adım adım gösterilmiştir.



Şekil 9.10. Kum kalıba döküm aşamaları.

Kum kalıpların hazırlanmasında silis kumu ( $\text{SiO}_2$ ), yaklaşık olarak %3,5-4,5 oranında olacak şekilde su ile karıştırılarak nemlendirilir. Bunun sebebi kumun nemli bir yapıya sahip olarak birbirine daha iyi tutunması ve bozulmalara uğramamasıdır. Kalıp çitası düz bir zemine yerleştirilmiştir. Model detayları kalıptan çıkarken zorlanmamak için pudralanır ve detayları kuma temas edecek şekilde kalıp çitası içerisinde konumlandırılır (Şekil 9.11-a). Ardından kalıp çitası içerisine hazırlanan nemlendirilmiş silis kumu doldurulur. Kalıplama esnasında iki tip kum kullanılır. Model yüzeylerine denk gelecek kısımlar için ince taneli (astar kumu), kalıbın kalanını ise kalın taneli kum doldurulur. Her doldurma katmanında kumlar bir aparat yardımı ile dövülerek sıkıştırılır. Böylece model detaylarının tamamı kum kalıba geçer ve kum kalıp sıkışır (Şekil 9.11-b). Model detaylarının ve yüzeyinin daha düzgün çıkarılması için astar kumu ince taneli olarak kullanılmıştır.



Şekil 9.11. a) Ağırlık modelin kalıp içerisine yerleştirilmesi. b) Kum ile kalıplanmış model.

Ardından model kalıp içerisinden dikkatlice çıkartılarak kalıp kumu döküme hazır hale getirilmiştir (Şekil 9.12-a). Hazırlanan kalıba dökülecek olan kurşun döküm potasına konularak ocakta  $327,5\text{ }^\circ\text{C}$  üzerine kadar ısıtılmıştır. Tamamen eriyen kurşun, kalıba dikkatlice dökülmüştür (Şekil 9.12-b). Kalıba dolan kurşun soğumaya başlar ve sıcaklık belirli bir değere düştüğünde katılaşmaya başlamıştır.



**Şekil 9.12.** a) Modelin kumdan çıkartılması b) Kalıba kurşun dökümü.

Katılaştıran kurşun oda sıcaklığına yaklaşık 20 dakika içinde düştükten sonra parça kalıptan çıkartılmıştır (Şekil 9.13). Kalıptan çıkartılan model üzerindeki cürufklar temizlenerek, parçaya ait olmayan kısımlar uzaklaştırılarak kurşun ağırlık modeli elde edilmiştir.



**Şekil 9.13.** Kalıptan çıkartılan ham model.

Kalıptan çıkartılıp, yüzeyi temizlenen kurşun model üzerinde tel aktarım sisteminin geçeceği boşluklar açılmıştır (Şekil 9.14). Bu boşluklar açıldıktan sonra Kurşun model ağırlığının nihai ağırlığı 589,51 gr olarak tespit edilmiştir.



**Şekil 9.14.** Tel aktarım boşluklarının açıldığı kurşun ağırlık modeli.

Kurşun ağırlığın balık modeli içerisinde konumlandırılması Şekil 9.15’de gösterilmiştir. Kurşun ağırlığın yerleştirildiği robot balığın RTV-2 silikon yapıştırıcı ile tekrardan parçalar bir araya getirilerek prototip birleştirilmiştir.



Şekil 9.15. Kurşun ağırlığın gövdeye montajı.

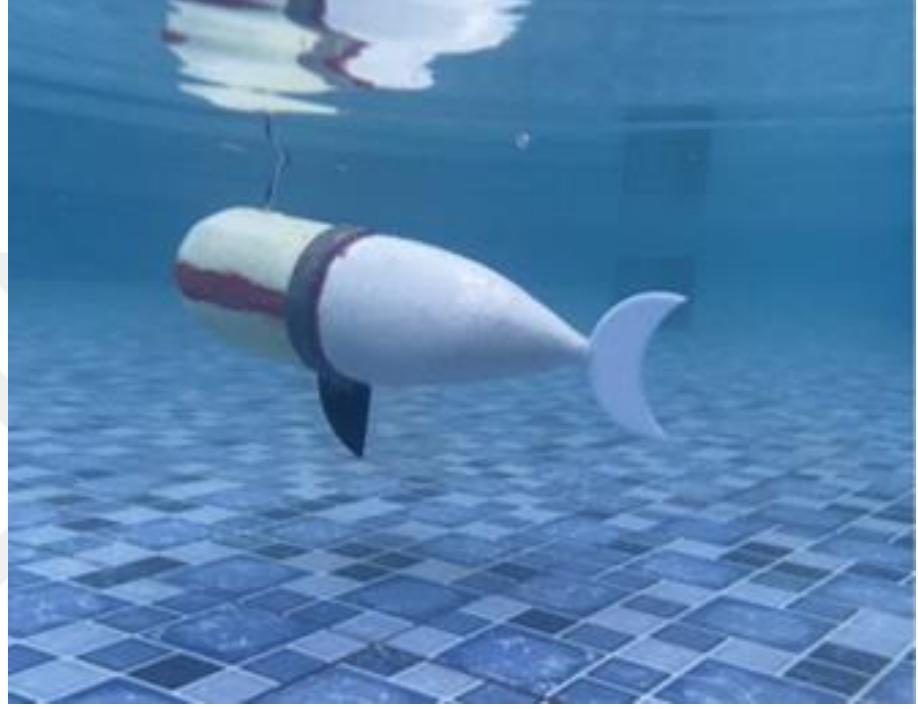
Bölüm 9.2.3’te hesaplanmış olan 617,6 gramlık gerekli ek ağırlığın 589,5 gramı kurşun ağırlık ile balık içerisinde monte edilmiş, kalan 28,09 gram ağırlık ise yaprak kurşun olarak nihai ağırlık merkezinin yerini değiştirmeyecek şekilde, gövde-kuyruk birleşim yerine bağlanmıştır. Balığın montajı tamamlanmış son hali Şekil 9.16’da gösterilmiştir.



Şekil 9.16. Montajı tamamlanmış robot balık.

## 10. YÜZME TESTİ

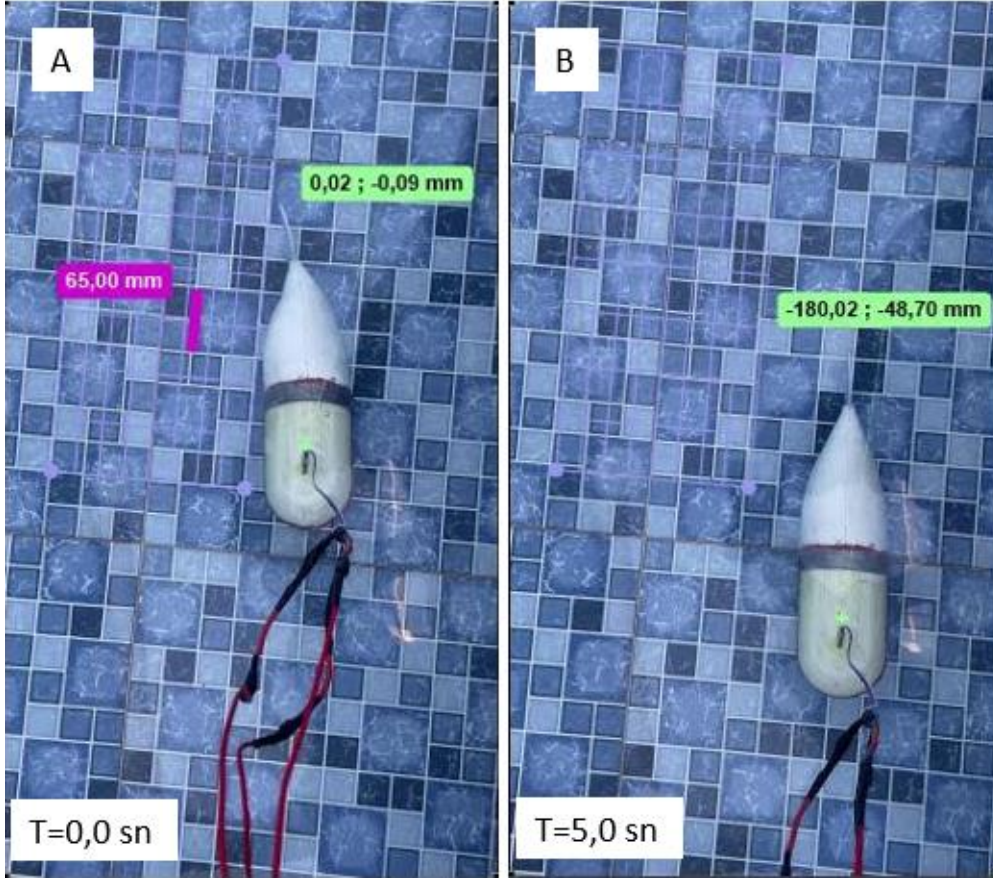
Bu bölümde robot balık prototipinin su altındaki yüzme testleri ve yüzme performansı bilgileri paylaşılacaktır. Robot balığın yüzme davranışı uzaktan kamera kaydı olarak gözlemlenmiştir. Su altındaki yüzme hareketinin görüntüsü Şekil 10.1’de sunulmuştur.



Şekil 10.1. Robot balığın su altındaki yüzme hareketi.

Prototipin konumunun, zamana göre değişiklikleri Kinovea programı kullanılarak elde edilmiştir. Yüzme testlerinde kayıt altına alınan video görüntüleri Kinovea programına aktarılmıştır. Robot balık prototipinin yüzeyinde bir nokta işaretlenmiştir. İşaretlenen bölgenin hareketi izlenmiş ve robot balığın dikey ve yatay eksen boyunca pozisyonundaki değişimler belirlenmiştir. Belirlenen bu değişimler bilinen bir uzunluk referans alınarak hesaplanmıştır. Bu çalışmadaki bilinen referans değeri yüzme havuzundaki kare formundaki fayansların boyutu olarak belirlenmiştir. Balığın ilk ve son konumu Şekil 10.2’de gösterilmiş olup, mor ile gösterilen uzunluğu bilinen referans ölçüsü, yeşil ile gösterilenler ise balık yüzeyinde işaretlenen bir referans noktasının orijine göre koordinatlarıdır. 5 saniye boyunca yüzdürülen balığın hızı balığın yer değiştirme mesafesine göre hesaplanmıştır. Sabit hızda yüzme şartı için yüzgeç çırpma genliği 30° (kuyruk

sıfır pozisyonundan  $+15^\circ$ ,  $-15^\circ$  olacak şekilde), çırpma periyodu ise 0,75 saniye olduğunda, prototipin  $U = 0,034$  m/s hızla ilerlediği görülmüştür.



**Şekil 10.2.** Kinovea'dan alınan konum verileri, a) Başlangıç konumu, b) Bitiş konumu.

## 11. MALİYET ANALİZİ

Bu çalışmada kullanılan üretim materyalleri ve sarf malzemelerinin maliyetleri, Tablo 11.1’de verilmiştir. Buna göre, bir adet üretilen prototipin toplam maliyeti 1627,25 olmuştur.

**Tablo 11.1.** Üretim materyalleri ve sarf giderler.

Parça No	Parça Adı	Birim		Malzeme	Miktar		Birim Fiyat		Tutar		Üretim Yöntemi
1	Gövde Alt	1	Adet	PLA	55,42	gr	150	kg/TL	8,31	TL	Katmanlı Üretim (3d Printer)
2	Gövde Üst	1	Adet	PLA	61,47	gr	150	kg/TL	9,22	TL	Katmanlı Üretim (3d Printer)
3	Kuyruk	1	Adet	RTV-2 Silikon	154,00	gr	237,14	kg/TL	36,52	TL	Kalıba Enjeksiyon
4	Mikro İşlemci	1	Adet	Arduino Uno	1,00	adet	191,51	adet /TL	191,51	TL	Satın Alma
5	Motor	1	Adet	MG 996 Metal Servo Motor	1,00	adet	62,68	adet /TL	62,68	TL	Satın Alma
6	Çekme Teli	1	Adet	Çelik tel Ø 0,5 mm	0,30	m	0,45	m/TL	0,14	TL	Satın Alma
7	Çekme Diski	1	Adet	Pleksiglass	4,00	gr	7	kg/TL	0,03	TL	Lazer Kesim
8	Yapıştırıcı	1	Adet	RTV silikon yapıştırıcısı-Sıvı Conta	40,00	gr	187,37	kg/TL	7,49	TL	Satın Alma
9	Kuyruk Yüzgeci	1	Adet	Pleksiglass	7	gr	7	kg/TL	0,15	TL	Lazer Kesim
10	Karın Yüzgeci	1	Adet	PLA	3,36	gr	150	kg/TL	0,51	TL	Katmanlı Üretim (3d Printer)
11	Sızdırmazlık Kaplaması	2	Adet	Epoksi Yapıştırıcı Enjektör	56,00	gr	1097,25	kg/TL	61,45	TL	Satın Alma
12	Kablo	3	Adet	Kaplamalı bakır kablo Ø2,5 mm	3,70	m	21,81	m/TL	80,70	TL	Satın Alma
		3	Adet	Jumper E-E	3,00	adet	0,62	Pin/TL	1,86	TL	Satın Alma
13	Stabilizasyon Ağırlığı	1	Adet	Olta Kurşun Ağırlık	650,00	gr	67,8	kg/TL	50,85	TL	Satın Alma

14	Kuyruk Kalıbı Part 1	1	Adet	PLA	165,26	gr	150	kg/TL	24,34	TL	Katmanlı Üretim (3d Printer)
15	Kuyruk Kalıbı Part 2	1	Adet	PLA	151,42	gr	150	kg/TL	22,71	TL	Katmanlı Üretim (3d Printer)
16	Maça	1	Adet	Alüminyum	900,10	gr	100,4	kg/TL	90,37	TL	Talaşlı İmalat(CNC Torna)
17	Maça Tutucu	1	Adet	Delrin	38,53	gr	147,5	kg/TL	5,68	TL	Talaşlı İmalat(CNC Router)
18	Maça Sabitleme Kolu	4	Adet	Delrin	11,08	gr	147,5	kg/TL	1,63	TL	Talaşlı İmalat(CNC Router)
19	M10 Altı Köşe Başlı Cıvata	2	Adet	Paslanmaz Çelik	2,00	adet	1,68	adet/TL	3,36	TL	Satın Alma
20	M3 Alyan Baş Cıvata	4	Adet	Paslanmaz Çelik	4,00	adet	2,44	adet/TL	9,76	TL	Satın Alma
21	M8x80 Bijon	6	Adet	Paslanmaz Çelik	6,00	adet	3,48	adet/TL	20,88	TL	Satın Alma
22	M8 Kelebek Somun	12	Adet	Paslanmaz Çelik	12,00	adet	1,05	adet/TL	12,6	TL	Satın Alma
23	Rondela	12	Adet	Paslanmaz Çelik	12,00	adet	0,25	adet/TL	3	TL	Satın Alma
24	Kalıp Ayırıcı Jel	1	Adet	Vaseline	1,00	adet	21,5	adet/TL	21,5	TL	Satın Alma
25	Hizmetımı	5	Adet	7-9-15-16-17 Numaralı malzemelerin işlenmesi	5,00	adet	-	-	900,00	TL	Satın Alma
Toplam Tutar									1627,25	TL	
*Fiyatlar KDV hariçtir.											

## 12. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, balıkları taklit ederek itki yaratan, esnek bir kuyruk yüzgecine sahip, tek bir servo ile tahrik edilen bir robot balığın tasarım ve üretim süreçleri tamamlanmıştır. 0,034 m/sn hızda yüzme performansına sahip olan prototip 32 cm uzunluğuna sahiptir. Balığın dış gövde formuna ait statik akış direnci, HAD simülasyonları ile belirlenmiştir. Üretilen prototipin montajı, sızdırmazlık, hidrostatik testleri de tamamlanmıştır. Bu sürecin içselleştirilmesi yararlı olup gelecekte farklı balık formları için aynı süreçler izlenerek akış analizleri gerçekleştirilebilir.

Robot balık prototipinin itki mekanizması üzerinde halen geliştirmeye açık noktalar olduğu görülmüştür. Bu durum özellikle kuyruk hareket mekanizması ile ilgilidir. Gelecekte, iki veya daha fazla servonun bir arada çalıştığı, gerçek balık kinematiğini taklit eden çok uzuvlu mekanizma tasarımı ile bir kuyruk elde edilebilir. Aynı zamanda gelecekte yapılacak olan çalışmalarda uzaktan kontrolün sağlandığı robot balık gövdesine çeşitli sensörler gömülerek su altı canlıları ve onların yaşam alanları hakkında veri toplayarak pek çok çalışma yürütülebilir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Alvarado, P., & Youcef-Toumi, K.** (2003). Modeling and Design Methodology of an Efficient Underwater Propulsion System.
- Anderson, J. M., & Chhabra, N. K.** (2002). Maneuvering and Stability Performance of a Robotic Tuna. *Integrative and Comparative Biology*, 42(1), pp.118–126.
- Aran, A.** (2007). *Döküm Teknolojisi*. pp.1–107.  
<http://www.kocaelimakine.com/wp-content/uploads/2011/10/dokum-teknolojisi-ahmet-aran.pdf>
- Badamasi, Y. A.** (2014). *The working principle of an Arduino*. 2014 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO), 2014, pp. 1-4
- Barrett, D. S.** (1996). *Propulsive Efficiency of a Flexible Hull Underwater Vehicle*.
- Bloch, M. E.** (1801). Brama Atropus, <https://www.etsy.com/fi-en/listing/123274945/brama-atropus-by-marcus-elieser-bloch> (Erişim TarihiÇ 07.12.2022).
- Borazjani, I., & Sotiropoulos, F.** (2009). Numerical investigation of the hydrodynamics of anguilliform swimming in the transitional and inertial flow regimes. *Journal of Experimental Biology*, 212(4), pp.576–592.
- Breder, C.** (1926). The locomotion of fishes. *Zoologica*, 4, pp.159–297.
- Brown, R. S., Carlson, T. J., Welch, A. E., Stephenson, J. R., Abernethy, C. S., Ebberts, B. D., Langeslay, M. J., Ahmann, M. L., Feil, D. H., Skalski, J. R., & Townsend, R. L.** (2009). Assessment of Barotrauma from Rapid Decompression of Depth Acclimated Juvenile Chinook Salmon Bearing Radiotelemetry Transmitters. *Transactions of the American Fisheries Society*, 138(6), pp.1285–1301.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Çalık, A., Bıçaklı, E. E., & Zerentürk, O.** (2022). Savurma ve Kum Kalıba Döküm Yöntemi ile Üretilen GG-25 Dökme Demirin Mikroyapısal ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması. *Cihannüma Teknoloji Fen ve Mühendislik Bilimleri Akademi Dergisi*, 1(1), pp.1–22.
- Clapham, R. J., & Hu, H.** (2014). ISplash-I: High performance swimming motion of a carangiform robotic fish with full-body coordination. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.322–327.
- Conference, I. I., Science, A., & Shanghai, E.** (2006). *Initial Prototype Design and Investigation of an Undulating Body by SMA K . H . Low , Jie Yang, Anjan P . Pattathil , and Yonghua Zhang School of Mechanical and Aerospace Engineering Nanyang Technological University ( NTU ) Singapore 639798 , Republic.* pp.472–477.
- Daou, H. El, Salumäe, T., Chambers, L. D., Megill, W. M., & Kruusmaa, M.** (2014). Modelling of a biologically inspired robotic fish driven by compliant parts. *Bioinspiration & Biomimetics*, 9(1), 016010.
- Dogangil, G., Ozcicek, E., & Kuzucu, A.** (2005). Design, construction, and control of a robotic dolphin. *2005 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO, 2005*, pp.51–56.
- Eloy, C.,** 2012. Optimal Strouhal number for swimming animals. *Journal of Fluids and Structures*, 30, pp.205-218.
- Epps, B. P., Valdivia y Alvarado, P., Youcef-Toumi, K., & Techet, A. H.** (2009). Swimming performance of a biomimetic compliant fish-like robot. *Experiments in Fluids*, 47(6), pp.927–939.
- Fiazza, C., Salumae, T., Listak, M., Kulikovskis, G., Templeton, R., Akanyeti, O., Megill, W., Fiorini, P., & Kruusmaa, M.** (2010). Biomimetic mechanical design for soft-bodied underwater vehicles. *OCEANS'10 IEEE SYDNEY*, pp.1–7.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- GRAY, J.** (1939). Studies in Animal Locomotion. *Journal of Experimental Biology*, 16(1), pp.9–17.
- Hirata, K.** (2016). Design and Manufacturing of a Small Fish Robot. *Processing of Japan Society for Design Engineering*, 99, pp.29–32.
- Hu, H.** (2006). Biologically inspired design of autonomous robotic fish at Essex. *Proceedings of the IEEE SMC UK-RI Chapter Conference on Advances in Cybernetic Systems*, pp.1-8.
- Kadir, W. M. H. W., Samin, R. E., & Ibrahim, B. S. K.** (2012). Internet Controlled Robotic Arm. *Procedia Engineering*, 41(Iris), pp.1065–1071.
- Kartal, F., Nazlı, C., Yerlikaya, Z., & Kaptan, A.** (2021). 3b Yazıcıda Üretilen Parçaların Çoğaltılması. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 5(1), pp.34–42.
- Katzschmann, R. K., DelPreto, J., MacCurdy, R., & Rus, D.** (2018). Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish. *Science Robotics*, 3(16).
- Ohishi, K., Nakao, M., Ohnishi, K. and Miyachi, K.,** ,(1987). Microprocessor-controlled DC motor for load-insensitive position servo system. *IEEE transactions on industrial electronics*, (1), pp.44-49.
- Korkmaz, D.** (2011). *Uzaktan Kontrollü Bir Robot Balığın Tasarımı ve Gerçeklemesi*. Fırat üniversitesi.
- Kumph, J. M.** (2000). Maneuvering of a Robotic Pike. *PhD Thesis (MIT)*, pp.1–77.
- Lighthill, M. J.** (1960). Note on the swimming of slender fish. *Journal of Fluid Mechanics*, 9(2), pp.305–317.
- Lindsey, C. .** (1978). Form, function and locomotory habits. In *Fish Physiology Vol. VII Locomotion*, pp. 1–100.
- Liu, J., & Hu, H.** (2010). Biological inspiration: From carangiform fish to multi-joint robotic fish. *Journal of Bionic Engineering*, 7(1), pp.35–48.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lohner, S.** (2022). *Floating with a Swim Bladder - Scientific American*. Retrieved October 23, 2022 from <https://www.scientificamerican.com/article/floating-with-a-swim-bladder/>
- Masoomi, S. F., Haunholter, A., Merz, D., Gutschmidt, S., Chen, X., & Sellier, M.** (2014). Design, Fabrication, and Swimming Performance of a Free-Swimming Tuna-Mimetic Robot. *Journal of Robotics*, 2014, pp.1–7.
- Mazumdar, A., Valdivia Y Alvarado, P., & Youcef-Toumi, K.** (2008). Maneuverability of a Robotic Tuna with compliant body. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.683–688.
- Mikell P. Groover.** (2006). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*.
- Munson B.R., Young D.F., Okiishi T.H., H. W. W.** (2012). Fundamentos de mecanica de fluidos. In *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*.
- Nayar, K. G., Sharqawy, M. H., Banchik, L. D., & Lienhard, J. H.** (2016). Thermophysical properties of seawater: A review and new correlations that include pressure dependence. *Desalination*, 390, pp.1–24.
- Nguyen, P. L., Lee, B. R., & Ahn, K. K.** (2016). Thrust and Swimming Speed Analysis of Fish Robot with Non-uniform Flexible Tail. *Journal of Bionic Engineering*, 13(1), pp.73–83.
- Niu, X., Xu, J., Ren, Q., & Wang, Q.** (2013). Locomotion Generation and Motion Library Design for an Anguilliform Robotic Fish. *Journal of Bionic Engineering*, 10, pp.251–264.
- Özbilgin, H., Kınacıgil, Ht., & Doğanılmaz Özbilgin, Y.** (2004). Balıklarda Yüzme Davranışı ve Trol Operasyonu Açısından Önemi. *E.U. Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*, 21(4), pp.355–359.
- Özdemir, Ü.** (2012). TÜRKİYE’DE GEMİLERDEN KAYNAKLI DENİZ KİRLİLİĞİNİN İNCELENMESİ. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 1(2), pp.373–384.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ryuh, Y.-S., Yang, G.-H., Liu, J., & Hu, H.** (2015). A School of Robotic Fish for Mariculture Monitoring in the Sea Coast. *Journal of Bionic Engineering*, 12(1), pp.37–46.
- Senturk, U. and Smits, A.J.**, 2018. Numerical simulations of the flow around a square pitching panel. *Journal of Fluids and Structures*, 76, pp.454-468.
- Sfakiotakis, M., Lane, D. M., & Davies, J. B. C.** (1999). Review of fish swimming modes for aquatic locomotion. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 24(2), pp.237–252.
- Tan, X., Kim, D., Usher, N., Laboy, D., Jackson, J., Kapetanovic, A., Rapai, J., Sabadus, B., & Zhou, X.** (2006). An Autonomous Robotic Fish for Mobile Sensing. *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.5424–5429.
- Triantafyllou, M. S. T. and G. S.** (1995). An Efficient Swimming Machine. *Scientific American*, 272(3), pp.64–70.
- Triantafyllou, M. S., Triantafyllou, G. S., & Yue, D. K. P.** (2000). Hydrodynamics of Fishlike Swimming. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 32(1), pp.33–53.
- Van den Berg, S.** (2006). *Design of a high speed soft robotic fish*. 1999(December), pp.1–6.
- Varnava, C.** (2018). Soft robotics enters uncharted waters. *Nature Electronics* 2018 1:4, 1(4), pp.208–208.
- Videler, J. J.** (1993). Fish Swimming. In *Fish Swimming*. Springer Netherlands.
- VIDELER, J. J., & HESS, F.** (1984). Fast Continuous Swimming of Two Pelagic Predators, Saithe ( *Pollachius Virens* ) and Mackerel ( *Scomber Scombrus* ): a Kinematic Analysis. *Journal of Experimental Biology*, 109(1), pp.209–228.
- Videler, J. J., & Wardle, C. S.** (1977). New Kinematic Data From High Speed Cine Film Recordings of Swimming Cod (*Gadus Morhua*). *Netherlands Journal of Zoology*, 28(3–4), pp.465–484.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Videler, J. J., & Wardle, C. S.** (1991). Fish swimming stride by stride: speed limits and endurance. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 1(1), pp.23–40.
- Wang, H.** (2009). *Design and Implementation of a Biomimetic Robotic Fish*. Concordia University.
- Wang, W., & Xie, G.** (2014). An Adaptive and Online Underwater Image Processing Algorithm Implemented on Miniature Biomimetic Robotic Fish. *Undefined*, 19, pp.7598–7603.
- Wang, Y., Tan, J., & Zhao, D.** (2015). Design and Experiment on a Biomimetic Robotic Fish Inspired by Freshwater Stingray. *Journal of Bionic Engineering*, 12, pp.204–216.
- Wang, Z., Hang, G., Wang, Y., Li, J., & Du, W.** (2008). Embedded SMA wire actuated biomimetic fin: A module for biomimetic underwater propulsion. *Smart Materials and Structures*, 17(2).
- Wen, L., Wang, T., Wu, G., Liang, J., & Wang, C.** (2012). Novel Method for the Modeling and Control Investigation of Efficient Swimming for Robotic Fish. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(8), pp.3176–3188.
- Wu, T.Y.T.**, 1971. Hydromechanics of swimming propulsion. Part 2. Some optimum shape problems. *Journal of Fluid Mechanics*, 46(3), pp.521-544.
- Yen, W. K., & Guo, J.** (2018). Phase controller for a robotic fish to follow an oscillating source. *Ocean Engineering*, 161, pp.77–87.
- Youcef-toumi, K., & Anand, L.** (2007). *Design of biomimetic compliant devices for locomotion in liquid environments*.
- Yu, J., Su, Z., Wu, Z., & Tan, M.** (2016). Development of a Fast-Swimming Dolphin Robot Capable of Leaping. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 21(5), pp.2307–2316.
- Yu, J., Tan, M., Wang, S., & Chen, E.** (2004). Development of a biomimetic robotic fish and its control algorithm. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 34(4), pp.1798–1810.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Zheng Chen, Shatarra, S., & Xiaobo Tan.** (2010). Modeling of Biomimetic Robotic Fish Propelled by An Ionic Polymer–Metal Composite Caudal Fin. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 15(3), pp.448–459.
- Zhong, Y., Li, Z., & Du, R.** (2017). A Novel Robot Fish With Wire-Driven Active Body and Compliant Tail. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(4), pp.1633–1643.
- Zhou, C., Tan, M., Gu, N., Cao, Z., Wang, S., & Wang, L.** (2008). The Design and Implementation of a Biomimetic Robot Fish. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 5(2), pp.17.
- Zhu, J., White, C., Wainwright, D. K., Di Santo, V., Lauder, G. V., & Bart-Smith, H.** (2019). Tuna robotics: A high-frequency experimental platform exploring the performance space of swimming fishes. *Science Robotics*, 4(34).

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında gereken olanakları sağlayan, desteğini, ilgisini ve kıymetli bilgilerini paylaşarak beni yönlendiren değerli tez danışmanım Doç. Dr. Utku ŞENTÜRK'e, tezimin yazım sürecindeki değerli katkıları için tez jüri üyeleri sayın Doç. Dr. Sercan ACARER ve sayın Dr. Öğr. Üyesi B. Oğuz GÜRSES'e teşekkür ederim. Yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen ve daima yanımda olan Gökhan ÖZDEMİR'e, hayatımın her anında beni destekleyen aileme, her an beni motive eden kız kardeşim Gizem DURU'ya, bu süreçte çalışma fırsatı bulduğum ve desteklerini eksik etmeyen Suat ÖZYEŞİLOVA'ya ve Gülşen BACAKSIZ'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu tez kapsamında, Ege Üniversitesi Aliye Üster Vakfı'na sağlamış oldukları maddi ve manevi katkılar için teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

12 / 12 / 2022

İmzası

Çiğdem DURU