

**T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**VATOZ BALIĞI HAREKETLERİ İNCELENEREK BİYOİLHAM İLE
GELİŞTİRİLEN SUALTI ROBOTUNUN MEKATRONİK SİSTEM
TASARIMI VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali Rıza SAPMAZ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

OCAK 2021

**T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**VATOZ BALIĞI HAREKETLERİ İNCELENEREK BİYOİLHAM İLE
GELİŞTİRİLEN SUALTI ROBOTUNUN MEKATRONİK SİSTEM
TASARIMI VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ali Rıza SAPMAZ
181203002**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Savaş DİLİBAL

OCAK 2021



T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

Yüksek Lisans Tez Onay Belgesi

Enstitümüz, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programı 181203002 numaralı öğrencisi Ali Rıza Sapmaz'ın “Vatoz Balığı Hareketleri İncelenerek Biyoilham ile Geliştirilen Sualtı Robotunun Mekatronik Sistem Tasarımı ve Analizi” adlı tez çalışması Enstitümüz Yönetim Kurulunun 12.01.2021 tarih ve 2021/02 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından Oy Birliği ile Yüksek Lisans tezi olarak Kabul edilmiştir.

Öğretim Üyesi Adı Soyadı

İmzası

Tez Savunma Tarihi :26/01/2021

1)Tez Danışmanı:

.....

2) Jüri Üyesi :

.....

3) Jüri Üyesi :

.....

Not: Öğrencinin Tez savunmasında **Başarılı** olması halinde bu form **imzalanacaktır**. Aksi halde geçersizdir.

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “Vatoz Balığı Hareketleri İncelenerek Biyoilham ile Geliştirilen Sualtı Robotunun Mekatronik Sistem Tasarımı ve Analizi” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim.
(07/01/2021)

Ali Rıza SAPMAZ





“Her Fabrika Bir Kaledir.”

M. Kemal ATATÜRK

ÖNSÖZ

Tezimi hazırlarken yol gösteren, akademik alanda gelişimimi sağlayıp ilgilenen ve tez danışmanlığımı yapan İstanbul Gedik Üniversitesi öğretim üyesi Sayın Doç. Dr. Savaş Dilibal hocama, kanat tasarımı çizimi konusunda yardımını esirgemeyen Yük. Müh. Can Özbaran'a , sonlu elemanlar analizlerini gerçekleştirmek için desteklerini esirgemeyen Mert Gerçek'e , yüksek lisans yapmam için beni cesaretlendiren ve her konuda yardımını esirgemeyen eşim Songül Sapmaz'a, atölye imkanlarını kullandığım Cfcontrol firmasının sahibi Sebahattin Çakı beye, tezimi hazırlarken ihmal ettiğim halde bana anlayış gösteren ve destek veren anneme, babama ve kardeşlerim Yavuz Sapmaz ve Esmâ Sultan Sapmaz'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ocak 2021

Ali Rıza Sapmaz

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışma Konusu	1
1.2 Tezin Amacı	2
2. BİYO-İLHAM ÇALIŞMALARI LİTERATÜR TARAMASI	3
2.1 Şekil Bellekli Alaşım Aktüatörlü Robotik Vatoz Balığı	3
2.2 Pnömatik Kauçuk Tahrikli Robotik Vatoz Balığı	4
2.3 Elektro Aktif Polimer Tahrikli Robotik Vatoz Balığı	5
2.4 Virginia Üniversitesi Tarafından Geliştirilen Vatoz Balığı	6
2.5 Singapur Ulusal Üniversitesi Tarafından Geliştirilen Vatoz Balığı	8
2.6 Evologics Boss Firmasının Tasarladığı Manta Ray Vatoz Balığı	9
2.7 Aqua Ray	10
2.8 Manta Ray Robot.....	12
2.9 Vatoz Balığının Anatomisi ve Kanat Yapısının İncelenmesi	14
3. GELİŞTİRİLEN SU ALTI ROBOTUN MEKATRONİK SİSTEM TASARIMI	20
3.1 Robotun Katı Modellemesi	20
3.1.1 Katı modelin RTV-2 silikon dökümü için kalıp yapma	21
3.1.2 Katı model mekatronik sistemin taşıyıcı şasesinin oluşturulması	23
Kaynak:(Değirmenci, Yılmaz, Kaplan, 2015).....	25
3.1.3 Katı model mekatronik sistemin hacminin bulunması	25
3.1.4 Kablolü radyal makas sisteminin tasarımı ve eklemeli imalatı	26
3.1.5 Mekatronik sistem içerisinde kanatların tasarımı ve montajı	38
3.2 Robotun Elektronik Alt Sistem Tasarımı ve Uygulaması	40
3.2.1 Robot ve uzaktan kumandanın elektronik alt sisteminde kullanılan komponentler	42
3.2.2 Robot ve uzaktan kumandanın elektronik alt sistem yerleşimi	42
4. ROBOT ALT SİSTEMLERİNE AİT ANALİZ VE TESTLER	44
4.1 Prototipi Geliştirilen Robotun Kanat İlk Tasarımının Sonlu Elemanlar ve Analitik Analizleri	44

4.2 Prototipi Geliştirilen Robotun Kanat İlk Tasarımından Elde Edilen Prototip Üzerinde Kuvvet Testi.....	47
4.3 Prototipi Geliştirilen Robotun Kanat ve Kuyruk Alt Sistem Kuvveti.....	48
4.4 Prototipi Geliştirilen Robotun İskelet Sisteminin RTV-2 Silikonu ile Kaplanması ve Sızdırmazlık Testleri.....	51
4.5 Prototipi Geliştirilen Robotun Suda Yüzdürülme Testleri	53
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	56
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ.....	65



KISALTMALAR

İSAR	: İnsansız Su Altı Aracı
ŞBA	: Şekil Bellekli Alaşım
IPCM	: İyonik Polimer Metal Kompozit
3B	: Üç Boyutlu
RF	: Radyo Frekansı
NACA	: Ulusal Havacılık Danışma Komitesi
ICR	: Anlık Rotasyon Merkezi
PLA	: Mekatronik Sistem Tasarımı
MST	: Mekatronik Sistem Tasarımı
CNC	: Sayısal Kontrollü Bilgisayar
Hz	: Herz

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1: Kimyasal yapıştırıcının teknik özellikleri	24
Çizelge 3.2: Kullanılan kimyasal yapıştırıcının mekanik özellikleri.....	25
Çizelge 3.3: Epoksi deney sonuçları.....	25
Çizelge 3.4: Geliştirilen açısız makas mekanizmasının maksimum radyal hareket parametre değerleri.....	35
Çizelge 3.5: B yazıcının katmanlı imalat ayar parametreleri	36
Çizelge 3.6: Robot ve uzaktan kumandanın elektronik alt sisteminde kullanılan komponentler	42
Çizelge 4.1: Mekanik ağı özellikleri.....	46
Çizelge 4.2: Literatür taramaları ve üretilen prototip karşılaştırılması	54

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Şekil bellekli alaşım ile kontrolü sağlanan robot	4
Şekil 2.2: Pnömatik sistemle çalışan robotun kanat hareketleri	5
Şekil 2.3: Robotun ölçülerini gösteren yumuşak kanat tasarım	5
Şekil 2.4: IPCM malzeme kullanılarak üretilen robot	6
Şekil 2.5: Vatoz balığı Mantaray	7
Şekil 2.6: Vatoz balığı kanat mekanizması.....	8
Şekil 2.7: Singapur Üniversitesi tarafından geliştirilen kanat tasarımı	8
Şekil 2.8: Singapur Üniversitesi tarafından geliştirilen I. ve II. su altı robotu tasarımı arasındaki farklar	9
Şekil 2.9: Robotun tasarımının iskelet sistemi	10
Şekil 2.10: Robotun Tasarımının 3B görünümü.....	10
Şekil 2.11: Aqua Ray iskelet sisteminin görünümü	11
Şekil 2.12: Aquaray' ın X-Ray ile çekilmiş bir fotoğrafı	11
Şekil 2.13: Pnömatik sistem kullanılarak yapılan tasarım	12
Şekil 2.14: Kanatlarının hareketi için pnömatik sistem tasarımı	13
Şekil 2.15: Silikon kanat içerisindeki hava kanalları.....	13
Şekil 2.16: Silikon kanat içerisindeki hava kanallarının simülasyon gösterimi	14
Şekil 2. 17: Vatoz balığının gövdesinin elmas şeklindeki taslağı	14
Şekil 2.18: Sırt görünümündeki gövdenin geometrik yapısı	15
Şekil 2.19: Gövdenin yan görünümünden geometrik gösterimi	15
Şekil 2.20: Vatoz balığını yüzgecinin geometrik şekli	16
Şekil 2.21: Vatoz balığı yüzgeç tasarım oranları.....	17
Şekil 2.22: Perspektif görünümde üç boyutlu çizilmiş vatoz balık modelinin pektoral yüzgeçlerinin ardışık hareketleri	18
Şekil 2.23: Vatoz balığının kanat çırpma hareketinin yandan görünüşü	19
Şekil 3.1: Su altı robotunun mekatronik sistem tasarımı (MTS).....	20
Şekil 3.2: Biyo-ilham su altı robotun üç boyutlu gövde tasarımı	21
Şekil 3.3: Strafor üzerine 3D çizimin CNC makinası ile işlenmesi	22
Şekil 3.4: Tasarlanan vatoz balığının CNC makinası ile stratora işlenmiş modeli ...	22
Şekil 3.5: Strafor üzerinden çıkartılan kalıp	22
Şekil 3.6: Fiber kalıp içine dökülen alçı ile üretilen model	23
Şekil 3.7: Alçı kalıp ile elde edilen gövdenin görünümü	24
Şekil 3.8: STL programı ile otomatik hacim hesaplama sonuçları.....	26
Şekil 3.9: Uçak Kanat profilleri çeşitleri	27
Şekil 3.10: Metal teller ve kablo telleri ile oluşturulan uygulama.....	28
Şekil 3.11: Düzlemsel hareket makas mekanizması ve açısal hareket kabiliyetine sahip makas mekanizması	29
Şekil 3.12: Birincil makas elemanları ile üretilen iki makas yapısının konfigürasyon geometrileri	29
Şekil 3.13: a) Yay tahrikli makas mekanizması, b) Yay tahrikli kablolu makas mekanizması.....	30

Şekil 3.14: a) Açısal makas mekanizma hücresi b) Açısal makas mekanizmasının üç hücreli tekrarlayan konfigürasyonu.....	31
Şekil 3.15: Deltoid geometrili açısal makas mekanizması ve tasarlanan mekanizma karşılaştırması.....	32
Şekil 3.16: Açısal makas mekanizmasındaki iplere uygulanan F kuvvetlerine göre hareketleri.....	33
Şekil 3.17: Vatoz balığını kanat mekanizmasının airfoil formundaki tasarımı.....	35
Şekil 3.18: Geliştirilen mekanizmanın hareket kabiliyetlerinin üç boyutlu çizimi (I) ve üretilmiş prototip görüntüsü (II).....	36
Şekil 3.19: Açısal makas mekanizması tekniği ile tasarlanan kanatın üç boyutlu görünümü	37
Şekil 3.20: Tüm parçaların ve motorun montajının yapılmış görünümü.....	37
Şekil 3.21: Dört hücreli açısal makas mekanizmalı kanat tasarımı	38
Şekil 3.22: Biyo-ilhan su altı robotu kanat mekanizmasının yerleşimi	39
Şekil 3.23: Sağ kanattın yukarı, başlangıç ve aşağı doğru bükülme hareketleri	39
Şekil 3.24: Kanattın ve kuyruğun gövdeye bağlanmış ve tellerin gerilmiş hali	40
Şekil 3.25: Robotun elektronik komponentlerinin bağlantı şeması	41
Şekil 3.26: Elektronik malzemelerin yerleşim yerleri ve uzaktan kumanda	43
Şekil 3.27: Robot, uzaktan kumandası ve şarj aleti	43
Şekil 4.1: Dikey yer değiştirme/eksenel konum (%) grafiği	45
Şekil 4.2: Kanat üzerindeki hücrelerin toplam yer değiştirme analizi.....	45
Şekil 4.3: Von Mises gerilme dağılım analizi	47
Şekil 4.4: Von Mises gerilme dağılım analizi ve lokal maksimum gerilme dağılımı	47
Şekil 4.5: Kanata uygulanan kuvveti ölçmek için hazırlanan düzenek	48
Şekil 4.6: Kanatın uyguladığı kuvvet-zaman grafiği	48
Şekil 4.7: Kanatın uyguladığı kuvvet-zaman grafiği	49
Şekil 4.8: Kuyruğun uyguladığı kuvvet-zaman grafiği	49
Şekil 4.9: Ansys'de hesaplanan kanat bükülme yer değiştirme grafiği.....	50
Şekil 4.10: Biyo-ilham robot kanadının dikey ekseninde çalışma uzayı	50
Şekil 4.11: Biyo-ilham robotun silikon kaplama aşamaları.....	51
Şekil 4.12: Biyo-ilham robotun silikon kaplandıktan sonraki son hali	51
Şekil 4.13: Robotun silikon kaplandıktan sonra X-Ray görüntüsü	52
Şekil 4.14: Prototipi üretilen vatoz balık modelinin pektoral yüzgeçlerinin ardışık hareketleri.....	52
Şekil 4.15: Robotun havuzda dönüş hareketi denemeleri sırasında görünümü	53
Şekil 4.16: Robotun havuz içinde denemelerinin görünümü.....	54
Şekil 4.17: Üretilen prototipin literatürdeki diğer su altı biyo-ilham robotları ile karşılaştırılması	55

VATOZ BALIĞI HAREKETLERİ İNCELENEREK BİYOİLHAM İLE GELİŞTİRİLEN SUALTI ROBOTUN MEKATRONİK SİSTEM TASARIMI VE ANALİZİ

ÖZET

Su altı robot teknolojileri enerji kaynağı arama, su altı bilimsel araştırma yapma ve savunma alanlarında önemli bir yer almaya başlamıştır. Tez çalışmasında vatoz balığı ile ilgili incelenen literatür çalışmaları ışığında vatoz balığına benzeyen biyo-ilham su altı robotu sistem tasarımı ve analizi yapılmıştır. Vatoz balığının manevra kabiliyetini sağlayan kuyruğu ve kanatlarının sistematik hareketleridir. Başarılı bir biyo-ilham vatoz balığı benzeri su altı robotu geliştirmede kanat tasarımı önemli alt sistemlerden biridir. Kuyruk ve kanat hareketleri için biyo-ilham olarak vatoz balığını taklit edebilecek mekatronik sistem tasarımı geliştirilmiş ve üretilmiştir. Geliştirilen kanatlar ve kuyruk hareketlerinde açılma mekanizma sistemleri ile hedeflenen beceriler elde edilmiştir. Kanatların ve kuyruğun iskeletini bu mekatronik sistem oluşturmaktadır. İskeletin üretimi eklemeli imalat yöntemi ile yapılmıştır. Kanatlar ve kuyruk dikey radyal hareket kabiliyetini servo motorlar yardımıyla mekatronik sistemdeki kabloların gerdirilmesi ile gerçekleştirmektedir. Kanatlar ve kuyruk alt sistemleri sayısal analiz ve testler yapıldıktan sonra gövdeye montaj edilmiştir. Kuyruk ve kanatlara bağlı motorları kontrol etmek için mikro denetleyici kullanılmıştır. Robot su içerisinde kablosuz olarak uzaktan kumanda ile kontrol edilmektedir. Kablo bağlantısı olmadığı için 10400 mA gücündeki robot-üstü lityum-İyon batarya ile beslenmektedir. Prototipi geliştirilen biyo-ilham robotun bataryaları kablosuz 5 V, 1 A gücünde şarj modülü yardımı ile şarj edilmektedir. Kanatların hareketi sırasında uygulayabildiği kuvvet yük hücresi ile ölçülerek kuvvet-zaman grafiği elde edilmiştir. Prototipi geliştirilen biyo-ilham robota ait kanatlar ortalama 9.6 N kuvvet, kuyruk ise 16N kuvvet uygulayabilmektedir. Prototipi geliştirilen biyo-ilham robotun gövdesi, kuyruğu ve kanatları RTV-2 silikonu ile kaplanıp görünüş olarak vatoz balığına benzemesi sağlanmıştır. Robotun boyutları 35x60x10 cm (en-boy-yükseklik) ve ağırlığı 3,5 kg olarak ölçülmüştür. Prototipi geliştirilen biyo-ilham robotun kanatlarının dikey hareket salınımları 0.37 Hz. ile 1.42 Hz. arasında uzaktan kumanda ile ayarlanabilmektedir. Üretilen biyo-ilham sualtı robotu 0.125 m/s hızında yüzmektedir.

Anahtar Kelimeler: *İnsansız Su Altı Aracı, Vatoz, Mantaray, Mantabot, Biyo-ilham*

THE MECHATRONICS SYSTEM DESIGN AND ANALYSIS OF THE DEVELOPED UNDERWATER ROBOT BIO-INSPIRED BY MANTA RAY MOTIONS

ABSTRACT

Underwater robotics technologies have started to gain prominence in the fields of energy resource search, underwater scientific research and defence industry. In this study, a bio-inspired underwater robot system design and analysis were made in the light of the literature studies on manta ray. The systematic movements of the tail and wings provide the manoeuvrability of the manta ray. Wing design is one of the important subsystems in developing a successful bio-inspired manta ray-like underwater robot. A mechatronic system design that can imitate the motion of manta ray with bio-inspiration for tail and wing movements has been developed. Targeted motion skills were acquired with the angular scissors mechanism systems in the developed wings and tail movements. The mechatronic system integrates the skeleton of the wings and tail. The skeleton is produced via additive manufacturing method. The wings and tail realize its vertical radial movement capability via tensioning the cables in the mechatronic system with the help of servo motors. The wings and tail subsystems were mounted on the body after numerical analysis and tests. A microcontroller is used to control the servo motors integrated to the tail and wings. The robot is controlled wirelessly in the water with a remote control. Since there is no cable connection, the robot is powered by a 10400-mA on-board lithium-ion battery. The developed bio-inspired robot prototype is charged with the help of a wireless 5 V, 1 A charging module. The force-time plots were obtained with the load cell by measuring the applied force of the wings during their movement. The wings of the developed bio-inspired robot prototype can apply an average of 9.6 N and the tail can apply 16N. The body, tail and wings of the developed bio-inspired robot prototype were coated with RTV-2 silicone to resemble a manta ray in appearance. The dimensions of the robot are 35x60x10 cm (width-height-height) and its weight is 3.5 kg. The vertical movement oscillation of the wings of the developed bio-inspired robot prototype is between 0.37 Hz with 1.42 Hz. It can be adjusted by remote control. The developed bio-inspired underwater robot prototype floats at a speed of 0.125 m/s.

Keywords: *Unmanned underwater vehicle, Stingray, Mantaray, Mantabot, Bio-inspired*

1. GİRİŞ

1.1 Çalışma Konusu

Dünyada su altı robotları ile yapılan çalışmalar birçok alanda önem kazanmış ve teknolojik gelişmeler yaşanmıştır. Yaşanan teknolojik gelişmeler robotların farklı sınıflara ayrılmasını sağlamıştır. Robotik sistemlere ait farklılıklar kontrol, verimlilik ve dış görünüş parametreleri dikkate alınarak kategorilere ayrılmaktadır. Bu kategorilerin tümünde biyo-ilham tasarım yöntemleri kullanılmıştır [1]. Robotik balıklar, penguenler, vatoz balıkları, denizanaları vb. projelerin tasarlanıp üretildiğini görmektedir. Bu çalışmada biyo-ilham yöntemi kullanılarak vatoz balığı prototipinin mekatronik sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Vatoz balığının kanat ve kuyruk kısımları robotun su içerisindeki ilerleme ve manevra kabiliyetini sağlamaktadır. Bu nedenle çalışmada kanat ve kuyruk tasarımına önem verilmiştir. Literatür çalışmaları ışığında en verimli ve kullanılabilir kanat tasarımının yapılması için açılma mekanizması kullanılmıştır. Mekanizma parçaları eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiştir. Robotun görünüşünün biyo-ilham yöntemi ile vatoz balığına benzeyecek şekilde katı modeli gerçekleştirilerek mekatronik sistem tasarımı fiziksel alt sistemi içine yerleştirilmiştir. Gerçekleştirilen prototip üretim robot savunma sanayisinde, gemicilik ve marina alanında ve istihbarat alanı gibi birçok alanda görevler verilerek kullanılabilir. Çalışmada dünya üzerinde gerçekleştirilen farklı biyo-ilham robot örneklerinin literatür taraması yapılmış ve yeni bir tasarım oluşturulmuştur. Çalışmada biyo-ilhan yöntemi ile yapılan literatür çalışmaları, geliştirilen su altı robotunun mekatronik sistem tasarımı, robot alt sistemlerine ait analiz ve testler tez içeriğine aktarılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Literatür araştırmalarından elde edilen bilgiler ışığında uzaktan kumandalı bir su altı robotunun biyo-ilham yöntemi ile vatoz balığına benzetilip prototipinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Biyo-ilham tekniği ile üretilmesi planlanan robotun hareket kabiliyetini sağlayan alt sistemleri kuyruk ve kanatlar oluşturmuştur. Robotunun su içerisindeki pektoral kanat hareketlerini taklit edebilmek için gerekli mekatronik sistem tasarlanmıştır. Prototipi üretilen biyo-ilham su altı robotun kanat formuna uygun tasarlanan mekanizmanın hareket analizi ve analitik analizi elde edilerek çalışmalar teze aktarılmıştır.

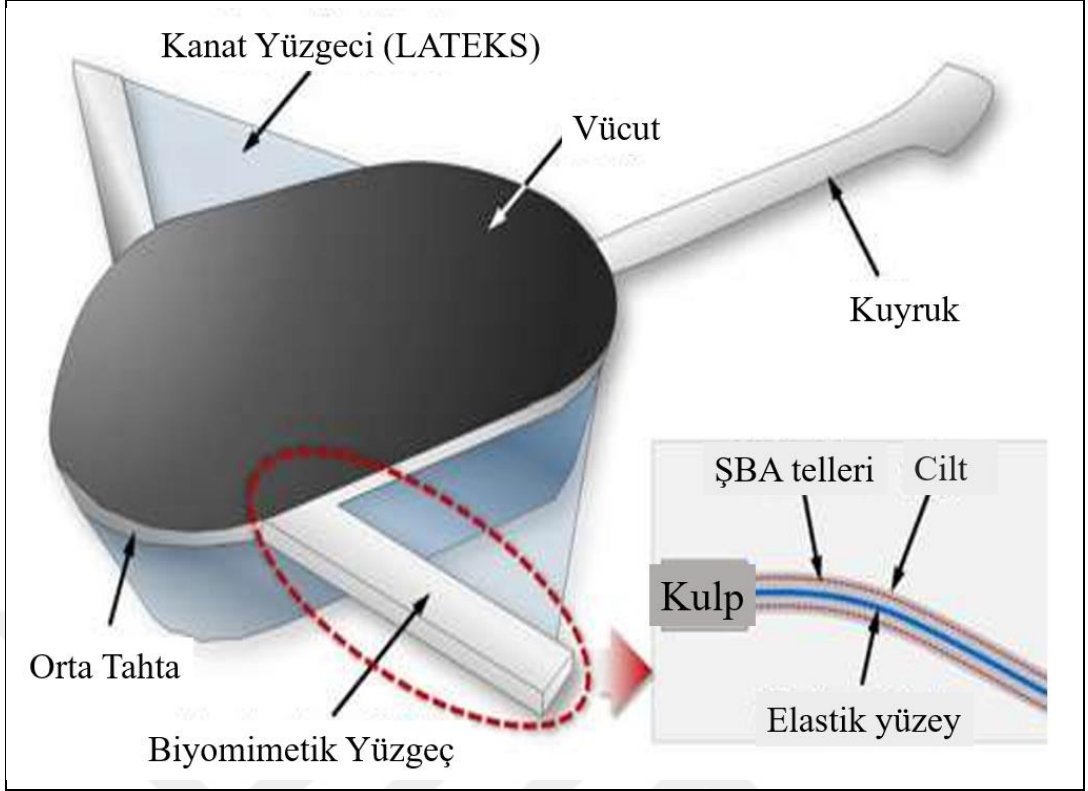


2. BİYO-İLHAM ÇALIŞMALARI LİTERATÜR TARAMASI

Bir su altı robotunun biyo-ilham yöntemiyle vatoz balığına benzetilerek üretilmesi ile ilgili literatür taraması yapılmıştır. Literatür taramaları biyo-ilham tekniği uygulamalarında robotların alt sistemlerinden kanat ve kuyruğun tasarımı incelenmiştir. Kanat hareketleri ve üretildiği mekanizma teknikleri, elde edilen analiz ve sonuçlar incelenmiştir. Araştırmalarda robotların boyutu, tasarımların başarısı, avantaj ve dezavantaj gibi konuları incelenmiş ve teze aktarılmıştır. Çalışmada tasarlanan mekatronik kanat tasarımı bu araştırmaların ışığında geliştirilerek ortaya çıkarılmıştır.

2.1 Şekil Bellekli Alaşım Aktüatörlü Robotik Vatoz Balığı

Birçok mühendislik alanında daha hafif, daha dayanıklı ve daha az yer kaplayan, yüksek hareket kabiliyetine sahip mekanizmalara ihtiyaç artmıştır [44-45]. Bu çalışmada şekil bellekli alaşım (ŞBA) malzeme teknolojisi aktüatör olarak kullanılmıştır [46-47]. Elastik kauçuk kanatlara yerleştirilen şekil bellekli alaşım malzemesi sıcaklığa göre şekil belleği olarak hareket sağlamıştır. Önceden kazandırılan şekil belleği özelliği sayesinde ısıtma ve soğutma uygulanarak şekil belleği geçişleri yaparak ve mekanizmanın hareket etmesi sağlanmıştır. Robotun hızı ayarlanabilir ve yön değiştirebilmektedir. Boyut olarak küçük bir tasarıma sahip olduğu görülmektedir. Robot başarılı bir şekilde yüzebilmektedir. Robot maksimum 40 mm genişliğe ve maksimum 57 mm/s yüzme hızına sahip olduğu bilinmektedir [2].

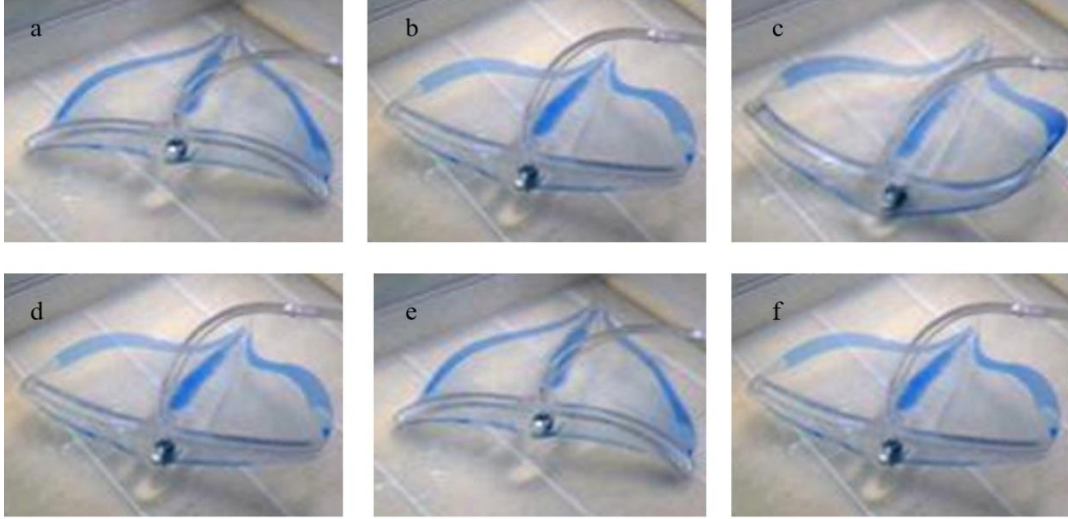


Şekil 2.1: Şekil bellekli alaşım ile kontrolü sağlanan robot

Kaynak: (Wang, Li, Hang 2019)

2.2 Pnömatik Kauçuk Tahrikli Robotik Vatoz Balığı

Basit bir çalışma prensibi olan sistemin tasarımı da basitleştirilmiştir. Sadece kanatların bulunduğu bölgelere alt ve üst olmak üzere hava odacıkları bulunmaktadır. Bir kompresör yardımıyla bu odacıklara hava uygulandığında bir yöne doğru eğilme yaparak kanat, aşağı ve yukarı bükülme hareketleri oluşturabilmektedir. Bu sayede kanattaki hava dolmayan perdeli kısımlar suyu iterek bir ilerleme kat edilmiş olunmaktadır. Robotun sadece ileri yönde hareket kabiliyeti bulunmaktadır. Yön ve batma-çıkma gibi hareket kabiliyetlerinin bulunmadığı belirtilmiştir. Robotun genişliği 170 mm, uzunluğu 150 mm ve yüzme hızı 100 mm/s olarak belirtilmiştir [3].

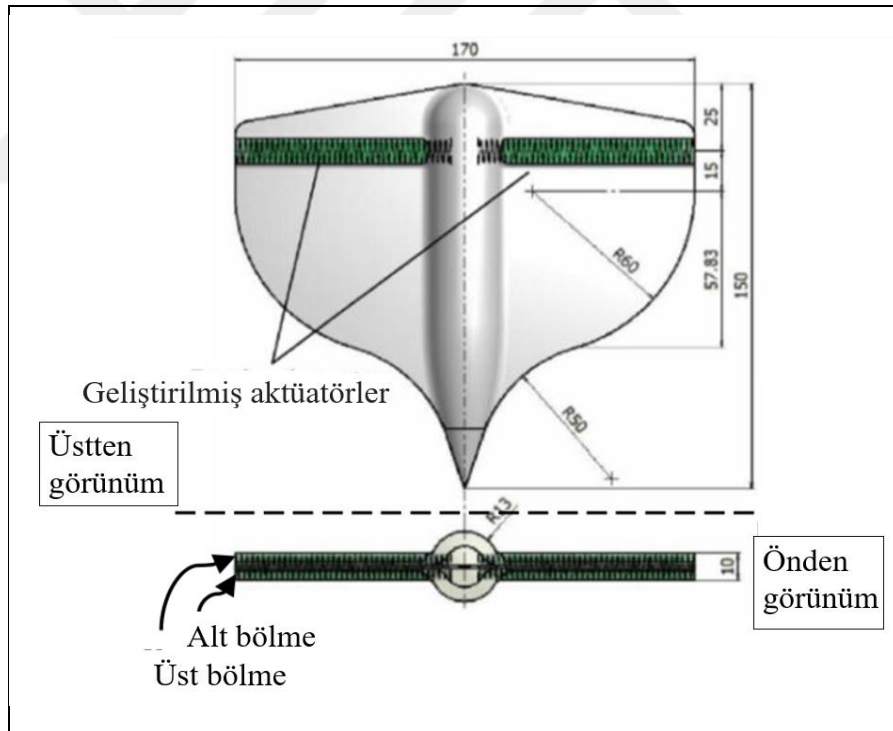


- a. Kanatlar alt bölgeye kıvrılmış
 b. Kanatlar hareketsiz düz
 c. Kanatlar üst bölgeye kıvrılmış

- d. Kanatlar tekrar hareketsiz düz
 e. Kanatlar alt bölgeye kıvrılmış
 f. Kanatlar üst bölgeye kıvrılmış

Şekil 2.2: Pnömatik sistemle çalışan robotun kanat hareketleri

Kaynak: (Suzumori, Endo, Kanda, Kato, Suzuki 2007)



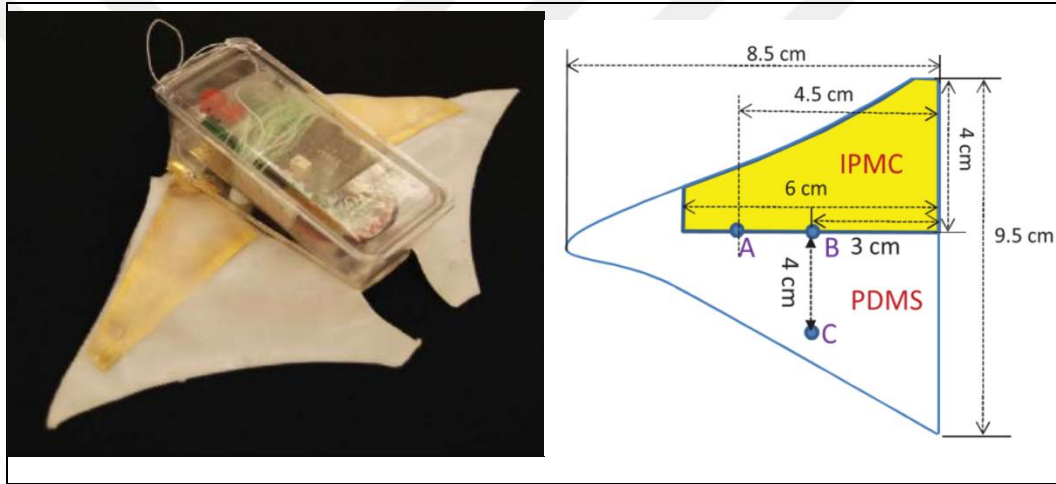
Şekil 2.3: Robotun ölçülerini gösteren yumuşak kanat tasarım

Kaynak: (Suzumori, Endo, Kanda, Kato, Suzuki 2007)

2.3 Elektro Aktif Polimer Tahrikli Robotik Vatoz Balığı

Vatoz balığının yüzme davranışını taklit etmek için yapay kaslar olarak iyonik polimer-metal kompozit (IPMC) kullanan biyo-ilhamlı bir robotik tasarım

gerçekleştirilmiştir. Elektriksel uyarın nedeniyle iyonik polimer – metal kompozitler (IPMC'ler) önde gelen türlerdir. Elektro Aktif polimer. IPMC, Nafion adı verilen değişim zarından oluşmuştur. İki metal elektrot arasında Nafion'daki pozitif iyonlar elektrik olduğunda katoda yönelir. Alan uygulanır, negatif iyonlar kalıcı olarak karbon zincirine sabitlenmiştir. İyonik polimer – metal kompozitler kısaltılması IPCM olarak yazılır. IPMC' ye 555 entegre zamanlayıcı yardımıyla genliği 4V olan 0.05 Hz ve 0.5 Hz arasında kare dalga frekans uygulanmıştır. Robot bir su tankında test edilmiştir (1,5 m genişlik, 4,7 m uzunluk ve 0,9 m derinlik) [4]. Robotun yüzme hızı 0,74 cm/s olduğ u bildirilmiştir. Robot Şekil 2.4'de görölmektedir. Kanat ölçüleri Şekil 2.4'de görölmektedir. Robotun uzunluğu 11 cm genişliği 21 cm ve toplam ağırlık 55 g olarak verilmiştir. Projenin toplam maliyeti 200 \$ olarak verilmiştir.



Şekil 2.4: IPCM malzeme kullanılarak üretilen robot

Kaynak: (Chen, Um, Bart-Smith 2012)

2.4 Virginia Üniversitesi Tarafından Geliştirilen Vatoz Balığı

Virginia Üniversitesi, West Chester Üniversitesi ve Princeton'dan disiplinler arası araştırmacılarından oluşan bir ekip, 2012 yılında Vatoz balığına benzeyen bir versiyon tasarlamıştır. Mantabot ismini verdikleri robot otonom olarak kontrol etmektedir. Mantabot iki bölümden oluşmaktadır. Gerçek vatoz balığını 3B tarayarak sert bir gövde ve yumuşak kanat bölümlerinden oluşmaktadır. Robotun uzunluğu 43 cm genişliği 67 cm yüzme hızı 0,35 m/s ve kanatlarının salınım frekansı 2 Hz olarak verilmiştir [5]. Bu silikon kanatları bir kalıp sayesinde dökülerek elde edilmiştir. Kanat hareketlerini motorlara bağlı telleri gerdirerek oluşturmaktadır. Şekil 2.5'de robotun yapısı ve tasarımı görölmektedir. Projeye sonradan bir kuyruk tasarımı da

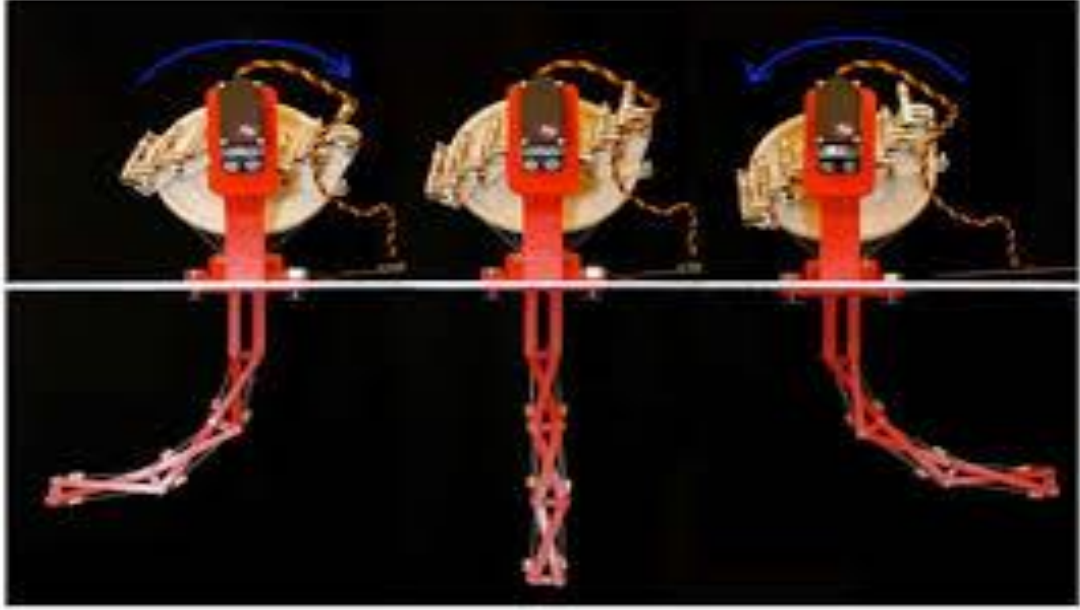
eklenmiş ve hareket manevrası arttırılmıştır. Yapılan çalışma su içerisinde başarılı bir şekilde yüzdürülmüştür.



Şekil 2.5: Vatoz balığı Mantaray

Kaynak: (Liu, Ren, Zhu, Bart-Smith, 2012)

Şekil 2.6’da görüldüğü üzere robotta iki adet kanat hareketini sağlamak amacıyla çapraz bağlantılı tel mekanizma kullanılmıştır. Mekanizmanın içerisinde geçen teller motorların ucundaki kasnaklara bağlanmıştır. Bir motor sayesinde kanatlar dikey radyal hareketi sağlamıştır. Sistemin üretim ve kullanımı basit ve hareket kabiliyeti yeterli seviyede görüşmüştür.

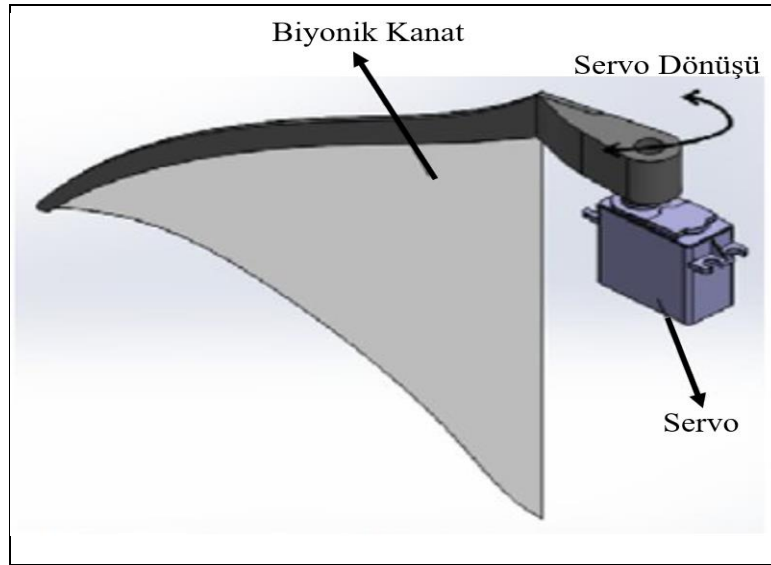


Şekil 2.6: Vatoz balığı kanat mekanizması

Kaynak: (Liu, Ren, Zhu, Bart-Smith, 2012)

2.5 Singapur Ulusal Üniversitesi Tarafından Geliştirilen Vatoz Balığı

Singapur Üniversitesinin tasarımı kanatları ve çift kuyruğuyla diğer tasarımlardan biraz daha fark yaratmak amaçlamıştır. İki adet servo motorun ucuna resimde görüldüğü gibi bir mekanizma tasarlanmış ve 3B yazıcıdan bu tasarım üretilmiştir. Yazıcıda oluşturulan mekanizma parçasına ince elastik bir plastik malzeme yapıştırılmıştır.



Şekil 2.7: Singapur Üniversitesi tarafından geliştirilen kanat tasarımı

Kaynak: (Sun, Arastehfar, Meng, Hao, 2015)



Şekil 2.8: Singapur Üniversitesi tarafından geliştirilen I. ve II. su altı robotu tasarımı arasındaki farklar

Kaynak: (Sun, Arastehfar, Meng, Hao, 2015)

Şekil 2.8’de görüldüğü üzere ilk tasarımlarında kuyruk mekanizması tek parça olarak tasarlanmıştır. İkinci tasarımda hareket manevrasını arttıra bilemek için kuyruk tasarımında farklılığa gidilerek çiftli kuyruk tasarımı şeklinde üretilmiştir. Robot 35 cm uzunluğunda ve 63 cm genişliğinde ve 1 kg ağırlığında üretilmiştir. Robotu tasarlamak için geçen iki yıl boyunca, üniversite araştırmacıları akışkan dinamikleri ve su altı hareketlerini incelemek için çok zaman harcamıştır. Araştırmaları, su altında çevresini daha iyi asimile etmek için denizde kolayca gizlenebilecek bir deniz robotu yaratmanın en iyi yolunu belirlemelerine yardımcı olmuştur. 10 saat boyunca 0,7 m/s hızda su içinde hareket edebilmektedir [6].

2.6 Evologics Boss Firmasının Tasarladığı Manta Ray Vatoz Balığı

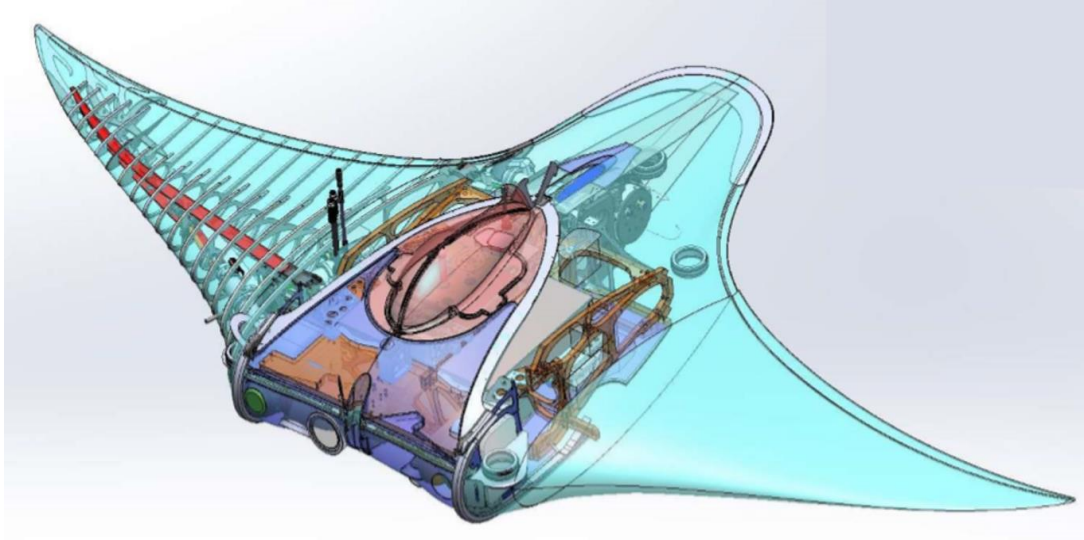
Büyük yatırımlar ile tasarlanan bir robot oluşturulmuştur. Evologics ’in ürettiği bu robotun kanat yapısı için "Fin Ray Effects" olarak patenti alınmıştır. Robotun tasarımını Boss firması tarafından yapılmıştır. Mantabot ’un esnek gövdesini taklit ederek robota benzersiz hareketlilik özellikleri sağlanmıştır. Büyük kanat yüzeyi, robota mükemmel dinamik derinlik kontrol yetenekleri sağlamıştır. Son derece dinamik dalışlar ve tırmanışlar gerçekleştirebilmiştir. Evologics Boss firmasının bir Mantabot filosu var ve bu filo ile görevler gerçekleştirmiştir [7]. Ek olarak, biyonyik Manta aracı iki adet jet iticilere sahip ve yaygın olarak kullanılan standart su altı araçlarına benzer şekilde yüksek hızlı mod da hareket kabiliyeti sağlamıştır. Kablosuz şarj özelliği, sonar, internet ve akustik modemi ve video kamerası

bulunmaktadır. Bu alanda araştırılan en gelişmiş ve gerçekçi robot tasarımı olarak tanıtılmıştır. Bir düzüne üretilmiştir ve göletlerde ekip olarak denemeler yapılmıştır. Modem yardımıyla iletişim kurarak kontrol edilmektedir.



Şekil 2.9: Robotun tasarımının iskelet sistemi

Kaynak: (Glushko, Olenew, Komar, Kniese, Sokolovskyi, Kebkal 2018)



Şekil 2.10: Robotun Tasarımının 3B görünümü

Kaynak: (Glushko, Olenew, Komar, Kniese, Sokolovskyi, Kebkal 2018)

2.7 Aqua Ray

Festo su ve havada giden Mantabot tasarımı ortaya koymuştur. Bu proje oluşturulurken partner olarak Evologics ile çalışılmıştır. Dört adet akışkan kas ismini verdikleri bir aktüatör ile kanat hareketlerini oluşturmuştur [8]. Robotta kullanılan aktüatörler hava yardımı ile çalışmaktadır. Bu aktüatörler bir kas gibi kısalıp

uzayabilmektedir. Şekil 2.12’de X-Ray ile çekilmiş bir resmi gösterilmiştir. Robotun içeriği ve aktüatörlerin nasıl yerleştirildiği rahatça görülmektedir.



Şekil 2.11: Aqua Ray iskelet sisteminin görünümü

Kaynak: (Stoll, Bannasch, Kniese, Prietzel, Drews, 2012)



Şekil 2.12: Aquaray’ ın X-Ray ile çekilmiş bir fotoğrafı

Kaynak: (Stoll, Bannasch, Kniese, Prietzel, Drews, 2012)

Bu tasarımda kanat hareketlerini piston ileri ve geri gitme hareketiyle makaralara bağlı ipler sayesinde yapılmıştır. Aquaray isimli robotu Festo’nun su içinde hareketi sağlaması için tasarlamıştır. Tasarladığı pistonlu ve makaralı sistemle kanat hareketlerini gerçekleştirmiştir [8]. Fakat gerçekçi bir kanat hareketi sağlamamaktadır. Yine de su içerisinde başarılı bir şekilde yüzme işlemi sağlamıştır. Robotun kontrolü RF uzaktan kumanda ile yapılmıştır.

2.8 Manta Ray Robot

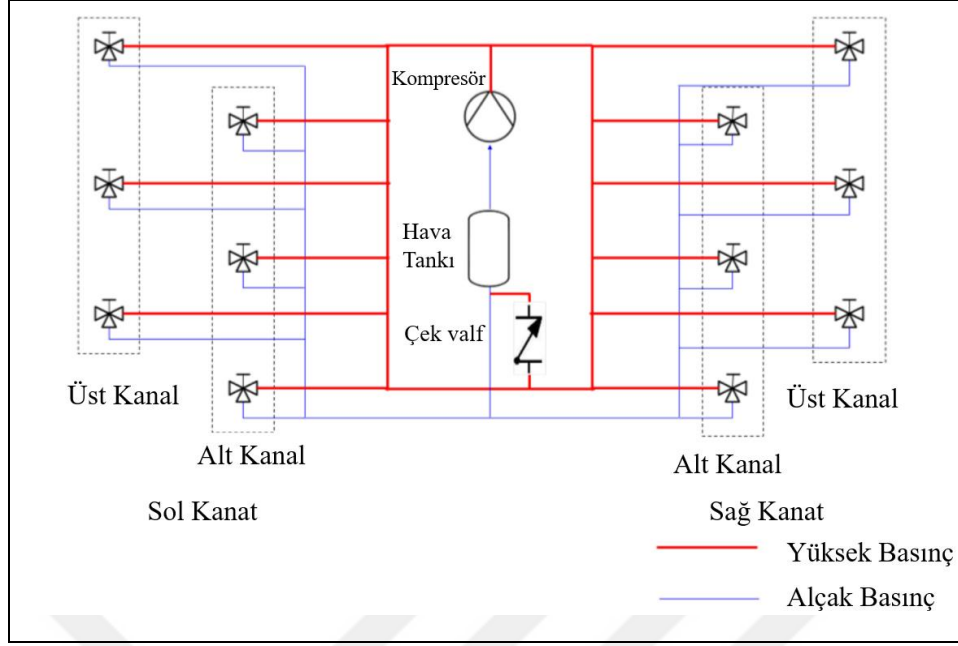
Bu çalışma Worcester Politeknik Enstitüsü tarafından çalışılmıştır. Kanat hareketlerini sağlamak için pnömatik sistem kullanılmış. Kanatlar silikondan 240 Psi gerilme mukavemeti ve kopmada %250 uzama özelliklerine sahip bir malzemeden üretilmiştir. Kanatlarda hava kanalları bulunmaktadır. Bu hava kanatları oluşturulmak için Solid Works'de kanatın hava kanalları için kalıplar tasarlanmıştır ve 3B yazıcıdan bu kanat kalıpları üretilmiştir. Kalıplar sayesinde silikondan kanatlar üretilmiştir.



Şekil 2.13: Pnömatik sistem kullanılarak yapılan tasarım

Kaynak: (Schmidt, Franzini, Fuller, Price, 2016)

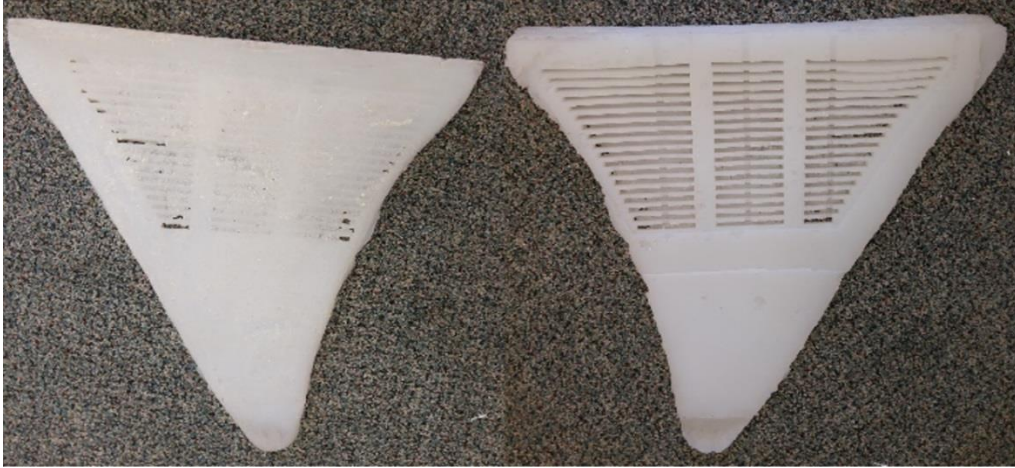
Gövdenin içinde kompresör bulunmaktadır. Bu kompresör basınçlı hava üretmektedir. Üretilen bu hava selenoid valfler sayesinde kanatlara belirli bir sıralama ile yönlendirilerek kanatların yukarı ve aşağı hareketi oluşmaktadır [9]. Projede kanatların bükülme 30° hedeflenmiştir fakat kanatlar daha yüksek performans göstererek 60° ulaşmıştır.



Şekil 2.14: Kanatlarının hareketi için pnömatik sistem tasarımı

Kaynak: (Schmidt, Franzini, Fuller, Price, 2016)

Pnömatik kontrol sistemi yan tarafta görülmektedir. Yukarı hareket için selenoid valfler ve aşağı hareket için selenoid valfler vardır. Bunların kontrolü sayesinde kanatlar aşağı ve yukarı doğru hareket ettirilmiştir.

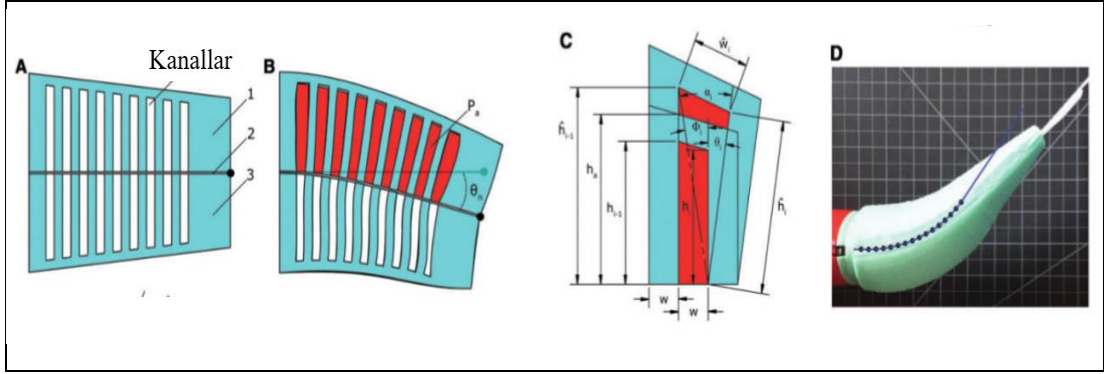


Şekil 2.15: Silikon kanat içerisindeki hava kanalları

Kaynak: (Schmidt, Franzini, Fuller, Price, 2016)

Altta şekilde görüldüğü gibi kanadın içerisindeki hava kanalları görülmektedir. Bu hava kanatlarından bir kanatta üstte ve altta olmak üzere iki adet bulunmaktadır. Şekil 2.15’de görüldüğü gibi hava kanalları üç bölmeye ayrılmıştır [9]. Bunun amacı da kanat hareketinin önce ilk kısmının sonra orta ve en son arka kısmını hareketi ile

sağa ve sola dönüşü sağlayabilmek için olduğu söylenmiştir. Proje maliyeti 1500 \$ olarak belirtilmiştir. Su yalıtımı sebebi ile robotun yüzebildiği test edilememiştir.



Şekil 2.16: Silikon kanat içerisindeki hava kanallarının simülasyon gösterimi

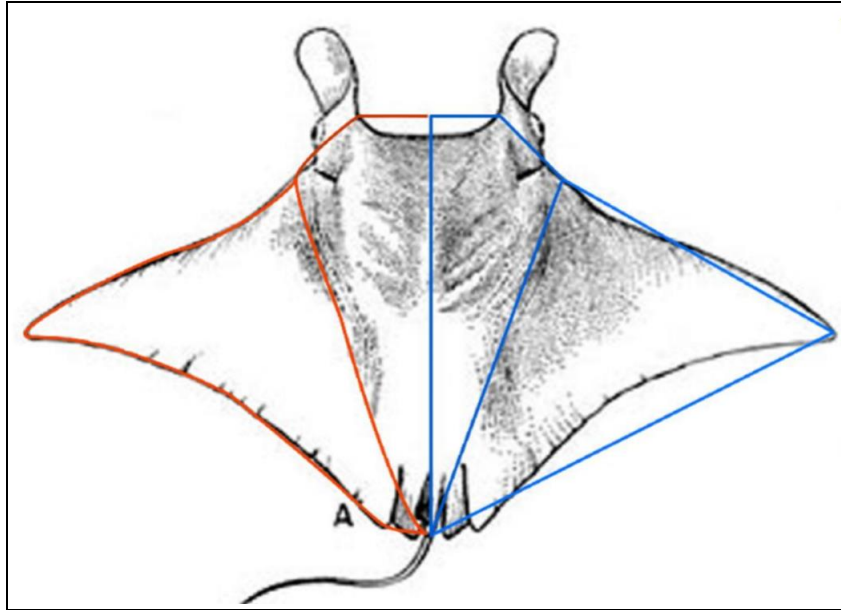
Kaynak: (Schmidt, Franzini, Fuller, Price, 2016)

2.9 Vatoz Balığının Anatomisi ve Kanat Yapısının İncelenmesi

Vatoz balığının vücudu yüzme performansını iki şekilde etkiler.

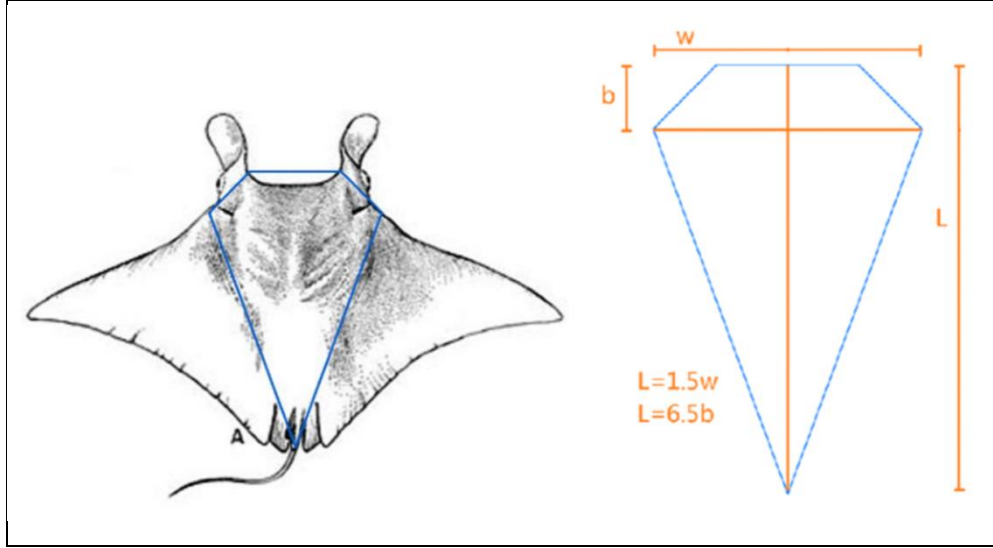
- 1) Su direncinin azalması
- 2) Yüzmenin kararlılığı

Yanal görünümünden gözlemlenebilecek akış çizgisi şekli ile su direnci en aza indirgenmektedir. Düzleştirilmiş elmas şeklindeki gövde, yüzme dengesinin korunmasına katkıda bulunmuştur [10]. Şekil 2.17’de Vatoz balığının ve gövdesinin elmas şeklindeki taslağı görülmektedir.



Şekil 2. 17: Vatoz balığının gövdesinin elmas şeklindeki taslağı

Kaynak: (Du, Li, Toumi, Alvarado, 2015)

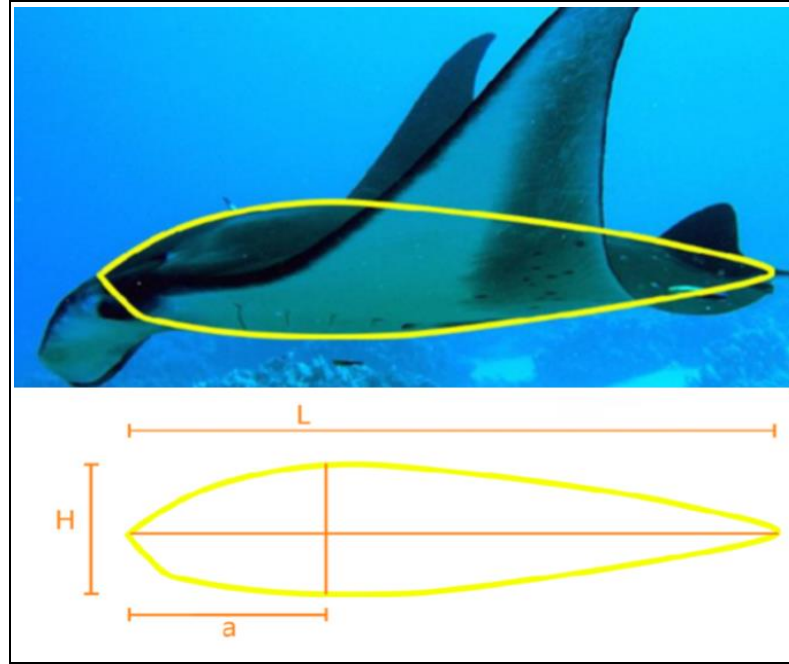


Şekil 2.18: Sırt görünümündeki gövdenin geometrik yapısı

Kaynak: (Du, Li, Toumi, Alvarado, 2015)

Gövdenin sırt ve karın görünüşleri elmas şeklindedir. Gövdenin sırttan görünüşünden geometrik soyutlaması Şekil 2.18'de gösterilmektedir [11]. Boyuna uzunluk (L), yapının tanımlanmasında bir kriter olarak benimsenmiştir. Elmas şeklinin maksimum genişliği (w) ve gövdenin başından maksimum genişliğe (b) ölçülen mesafe aşağıdaki denklemler ile genelleştirilmiştir:

$$W = 2/3L \quad b = 2/13L \quad H = 2/9L \quad a = 1/3L$$



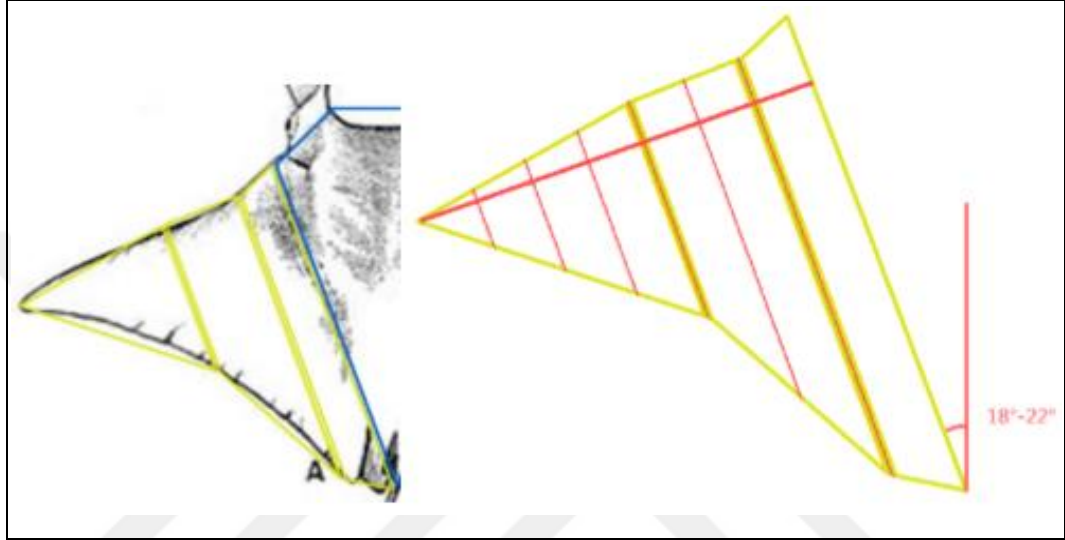
Şekil 2.19: Gövdenin yan görünüşünden geometrik gösterimi

Kaynak: (Deng, 2014)

H: Gövdenin yüksekliği

a: Gövdenin maksimum yüksek olduğu noktanın baş kısma olan uzaklığı

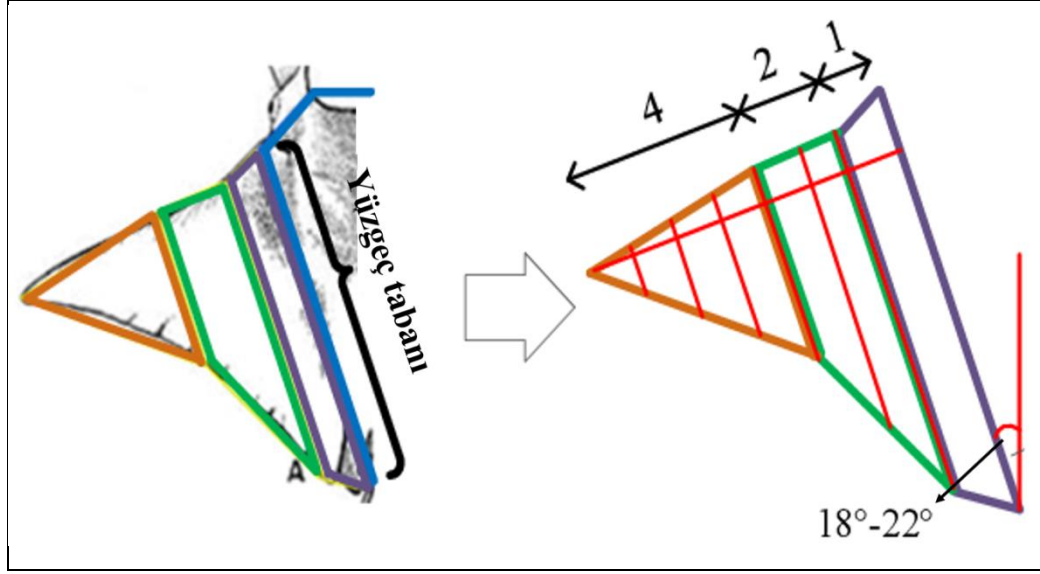
Gövde yapısının analizi esas olarak Şekil 2.19'daki gibi sırt ve yan görünümlere odaklanmıştır [12]. İki görünümdeki çevresel şekil, gövdenin şeklini tanımlamak için yeterli görülmüştür. Böylelikle bu bölümde genelleştirilen gövde şekli doğrudan CAD programları ile 3B modellemede kullanılmıştır.



Şekil 2.20: Vatoz balığının yüzgecinin geometrik şekli

Kaynak: (Deng, 2014)

Vatoz balığının yüzgeçleri gövdeye belli bir açıda bağlanmıştır [11]. Bu açığı tanımlamak gerekirse elmas geometrisindeki gövdenin merkezinden yüzgecin yaklaşık Şekil 2.20'de görüldüğü gibi $18-22^\circ$ açıyla bağlı olması anatomik olarak en yakın biçimdir. Kanadın gövdeye yakın olan kısmından en uca kadar olan kısımları Şekil 2.21'deki gibi bölündüğünde uzunluk oranı 4:2:1 olarak verilmiştir. Vatoz balığının kanat kısmını oluştururken gerçek hacmi vermek için en uygun mekatronik sistemi tasarlanabilmesi gerekmektedir. Kanat hacminin gerçeğe yakın olması canlının su içinde ilerleyebilmesi ve performanslı manevralara sahip olması için önemi belirtilmiştir.

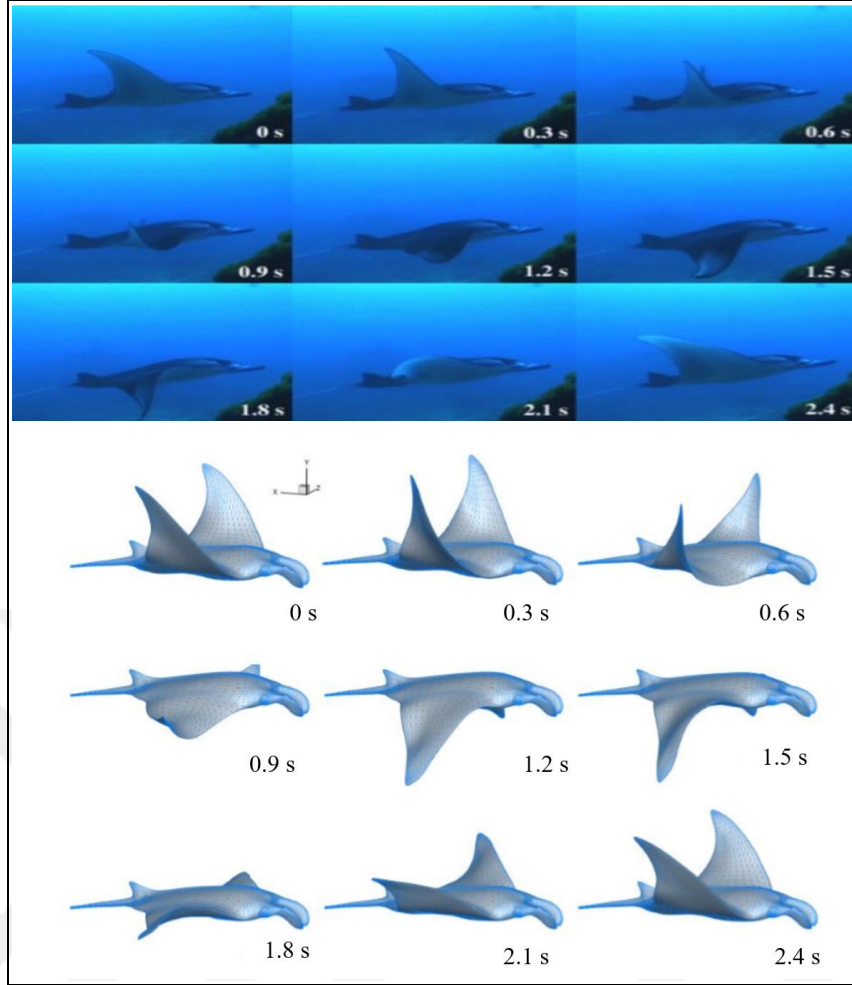


Şekil 2.21: Vatoz balığı yüzgeç tasarım oranları

Kaynak: (Deng, 2014)

Vatoz balığı kanatlarını çırptığı sırada kıkırdak yapıda bir bükülme olmaktadır. Bu bükülme Şekil 2.21’de oransal olarak gösterilmiştir. Bu bükülmenin oranı suyun itme gücüne karşı oluşan deformasyonu azaltmakta, aynı zamanda da suyun kanatlara karşı koyduğu kuvveti azaltmaktadır. Tasarlanan mekatronik sistemde bu bükülme oranları robotun kanatlarının sağlam kalabilmesi için önem taşımaktadır.

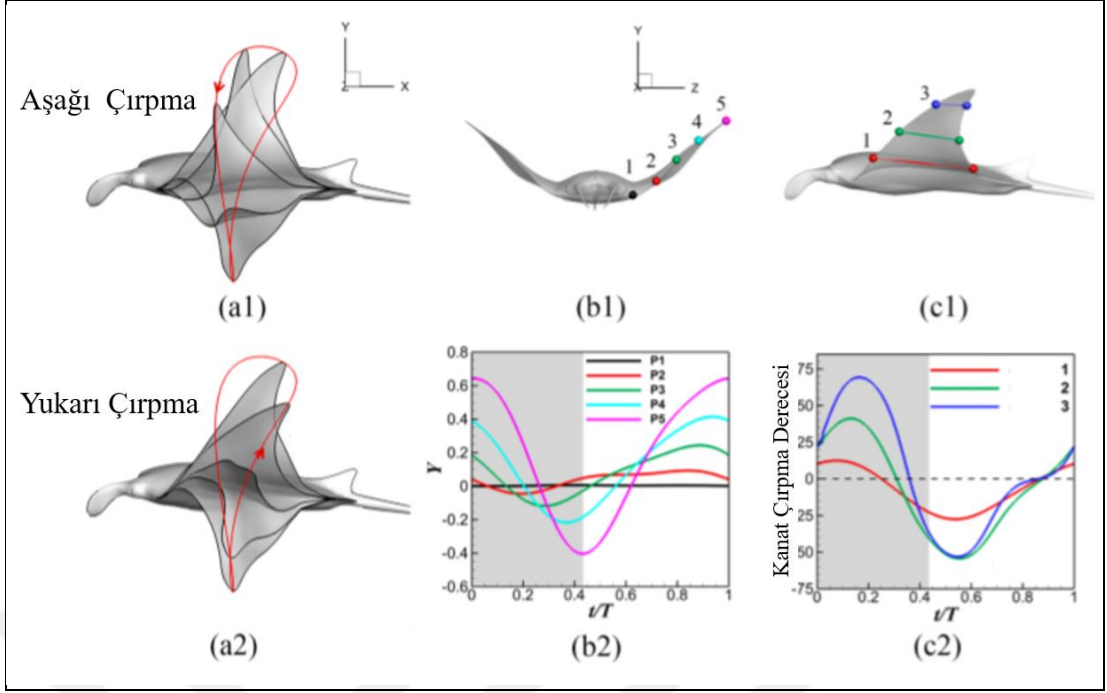
Vatoz balığı su içerisinde hareket sağlayabilmek için bir kuş gibi kanatlarını aşağıya ve yukarıya doğru sallayarak hareket etmektedir. Balığın sağa ve sola dönüşleri gerçekleştirebilmesi için dönme yapacağı yöndeki kanatın daha az dikey radyal salınım yapması gerekmektedir [13]. Yukarı ve aşağıya (batma ve çıkma) hareketini sağlamak için ise ileri yönde hareket ederken kuyruğunu yukarıya doğru kaldırırsa yukarı hareket, kuyruğunu aşağı doğru indirirse aşağı yönde bir hareket sağlamış olmaktadır [14,15]. Yani üç ekseninde de hareket etmesi mümkündür x, y ve z ekseninde hareketleri sağlayabilmektedir.



Şekil 2.22: Perspektif görünümde üç boyutlu çizilmiş vatoz balık modelinin pektoral yüzgeçlerinin ardışık hareketleri

Kaynak: (Daniel, Jordan, Grunbaum, 1992)

Şekil 2.22’de vatoz balığı gözlemlenerek analiz edilerek çizilmiş üç boyutlu modellerdir [17]. Bu analizde kanatların zamana göre aşağı ve yukarı hareketleri çizilmiştir. Kanat aşağıya çırpma sırasında yukarı çırpmaya göre daha hızlı olduğu izlenmiştir [16]. Kanat uçlarının eğimleri aşağı ve yukarı çırpmalarda birbirine ters açılarda izlenmektedir. Şekil 2.23 inceleyecek olursak aşağı çırpma ve yukarı çırpma sırasında (a1 ve a2) kırmızı oklu yolu izleyerek hareket etmektedir [18]. Kanatın uzunlamasına ön kısmına işaretlenmiş beş nokta sayesinde kanatın hangi (b1 ve b2) bölgesinin y ekseninde ne kadar hareket ettiğini görmekteyiz. Yandan kanata bakıldığında gövdeye göre kaç derecelik bir eğilme yaşandığını (c1 ve c2) üç farklı noktada detaylı olarak gösterilmiştir.



(a1) Aşağı çırpma

(a2) Yukarı çırpma

(b1) Önden görünüşün kanattaki beş noktası

(b2) Beş işaret noktasının kanat çırpma

sırasındaki yer değişimi

(c1) Yandan kanatın işaretlenmiş üç noktası

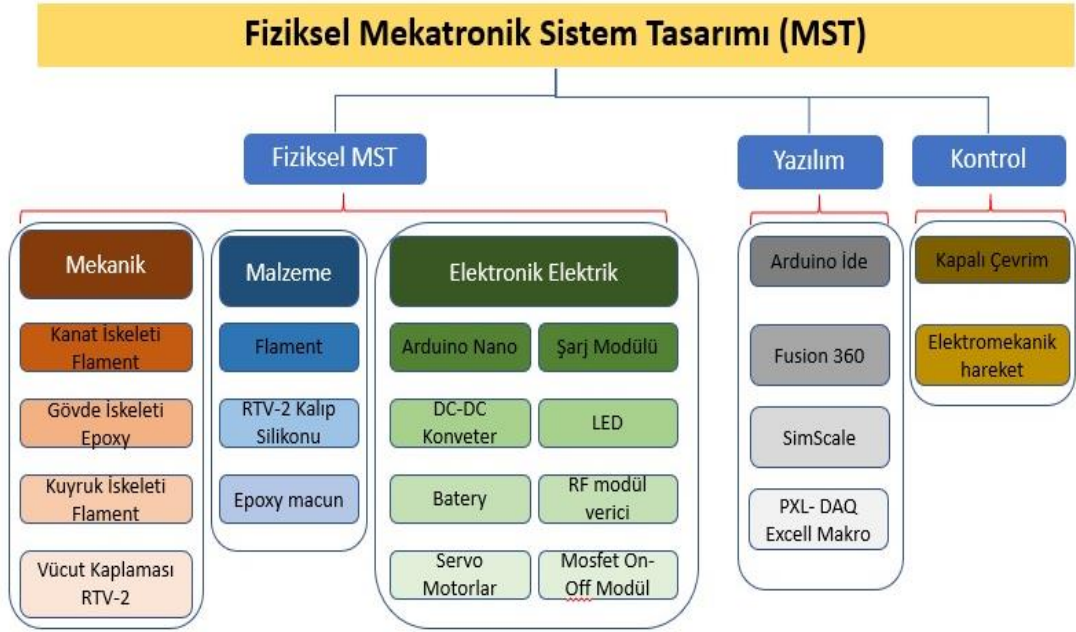
(c2) kanatın aşağı ve yukarı çırpma açısı [16]

Şekil 2.23: Vatoz balığının kanat çırpma hareketinin yandan görünüşü

Kaynak: (Heine, 1992)

3. GELİŞTİRİLEN SU ALTI ROBOTUN MEKATRONİK SİSTEM TASARIMI

İnsansız su altı robotunun gövde tasarımının gerçeğe uygun, üretimi kolay ve güvenilirlik seviyesi yüksek kontrol edilebilmesi için robotun mekatronik sistem tasarımının uygulanması sistematik ve pratik olarak tasarım ve üretim yapılabilmesi için önemli bir faktördür. Çalışmanın her aşamasındaki plan ve proje görevini üstlenmektedir. Şekil 3.1’de vatoz balığının üretimi için gerekli MTS gösterilmiştir. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi tasarım üç ana başlıkta incelenmektedir.

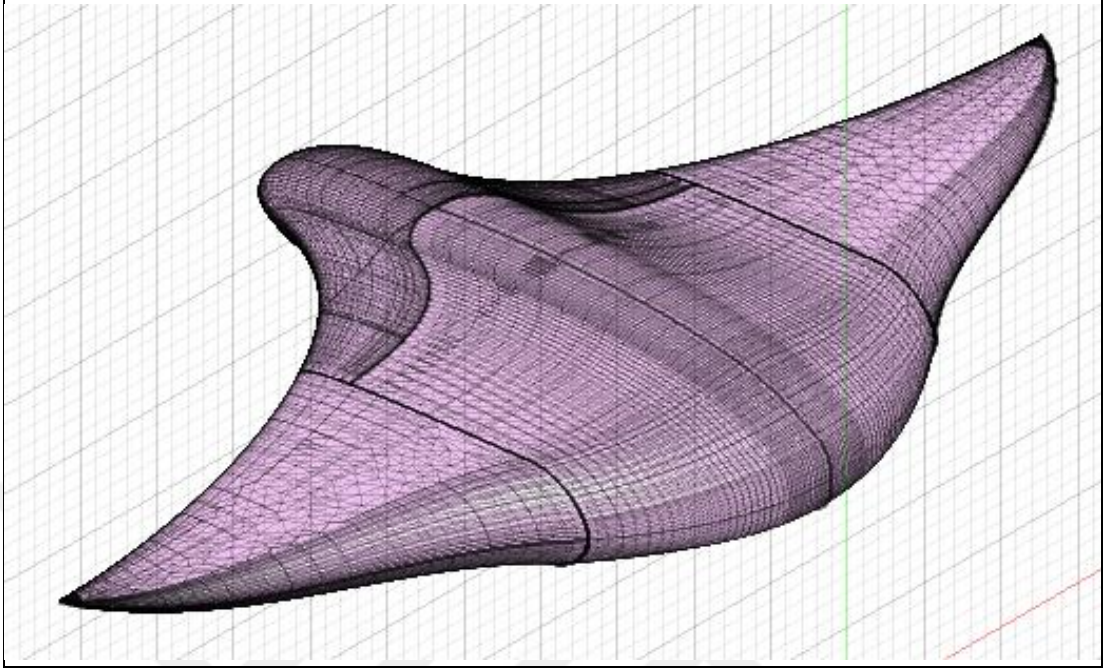


Şekil 3.1: Su altı robotunun mekatronik sistem tasarımı (MTS)

3.1 Robotun Katı Modellemesi

Robot tasarım olarak dış tasarım ve iç tasarım olarak iki bölümden oluşmaktadır. Dış tasarım robotun görüntüsünün tamamen biyolojik canlıya benzeyecek biçimde olması için dizayn edilen görsel tasarımıdır. İç tasarım ise dış tasarımın sınırları içerisinde görülmeyecek ama robotun hareket etme kabiliyetini sağlayacak mekatronik sistem tasarımıdır. Şekil 3.2’de üç boyutlu bilgisayar program çiziminde

vatoz balığı görünümündeki kalıp tasarımının içerisine yerleştirilmiş mekanik tasarımı görülmektedir.



Şekil 3.2: Biyo-ilham su altı robotun üç boyutlu gövde tasarımı

3.1.1 Katı modelin RTV-2 silikon dökümü için kalıp yapma

RTV-2 kalıp silikonu biyo-ilhan su altı robotunun vatoz balığına benzetilecek kısmı olan gövde kalıbını oluşturmuştur. Robotun dış kısmına yumuşak bir yüzey sağlayacak aynı zamanda kanatların hareketlerinin elastik olması için en uygun malzeme olduğu araştırılmıştır. Kullanılacak silikonun sertlik derecesi Shore-5A olarak seçilmiştir. RTV-2 silikonunu robotun iskeletine kaplamak için bir kalıp gerekmektedir. Kaplanacak robot üç boyutlu olduğu için tek parça kalıpla silikon kaplamak mümkün olmadığından kalıp iki parça olarak üretilmiştir. Kalıbın birinci parçası için öncelikle CNC’de strafor üzerine 3B çizimin %50 oranındaki kısmı işlenmiştir. Şekil 3.3’de CNC makinası %50 oranındaki kısmı işlerken görülmektedir. Biyo-ilham sualtı robotunun alt ve üst kısmı simetrik olarak çizildiği bir adet strafor parça üretilmiştir. CNC’de işlenen strafor parçanın görüntüsü Şekil 3.4’de görülmektedir.



Şekil 3.3: Strafor üzerine 3D çizimin CNC makinası ile işlenmesi



Şekil 3.4: Tasarlanan vatoz balığının CNC makinası ile strafora işlenmiş modeli

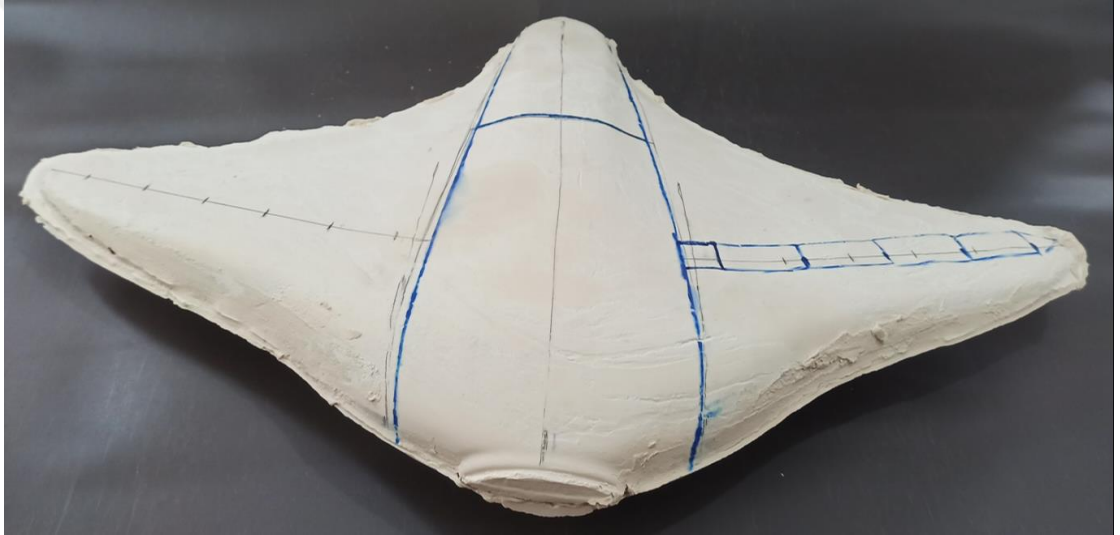


Şekil 3.5: Strafor üzerinden çıkartılan kalıp

Tasarlanan vatoz balığının üç boyutlu çıktısının %50 oranındaki kısmı CNC’de işlendikten sonra strafor üzerine fiberden kalıp alma işlemi uygulanarak robotun iki adet kalıbı üretilmiştir [38]. Elde edilen kalıp Şekil 3.5’de görülmektedir.

3.1.2 Katı model mekatronik sistemin taşıyıcı şasesinin oluşturulması

Robotun taşıyıcı kısmı oluşturulurken taşıyıcı parçanın gövdenin şekline uyumlu bir biçimde olması sağlanmıştır. Bu sayede kalıbın içine konumlandırıp döküm yapılırken daha kolay bir yöntem sağlanmıştır. Dökülecek olan silikon gövdede her alana eşit kalınlıkta kaplanması sağlanmıştır. Taşıyıcı şaseyi robotun kalıbının formunda oluşması için kalıba alçı döküm yapılmıştır. Kalıptan alınan alçı döküm model Şekil 3.6’da görülmektedir.



Şekil 3.6: Fiber kalıp içine dökülen alçı ile üretilen model

Şekil 3.6’da alçının üzerinde çizilmiş sınır çizgileri görülmektedir. Dökülen alçı bu çizgilerden parçalara ayrılmıştır. Çizgilerden parçalara ayrılan alçı iki kanat, gövde ve kuyruk olmak üzere dört parçadan oluşmaktadır. Gövde şeklinde bir taşıyıcı şase elde etmek için kesilen alçı parçası kalıp olarak kullanılmıştır.

Alçı döküm gövdenin üzeri çift karışımlı epoksi ile kaplanmıştır. Tam kuruma sağlayan epoksinin üzeri mukavemet arttırmak ve pürüzsüz bir yüzey elde etmek için oto kaporta tamirinde kullanılan çelik macunu kaplanmıştır. Çelik macunu kurduktan sonra zımpara ile şekil bozukluğu olan yerler düzeltilmiştir. Son olarak da tam kuruma sağlanan kaplama orta noktadan simetrik bir şekilde kesilerek içerisindeki alçı çıkartılmıştır. Ortaya çıkan taşıyıcı şasenin ağırlığını ölçüldüğünde ise 400 g gelmektedir. Şekil 3.7’de oluşturulan şase görülmektedir. Gövdenin epoksi kimyasal

dübelden üretilmesinin sebebi daha sağlam ve esnek yapıda olmasının planlandığındandır. Çünkü hareketli kanat mekanizmasındaki bağlanacağı noktalar esnemelere ve baskıya dayanıklı olması gerekmektedir. Kimyasal dübel yapıştırıcı olarak isimlendirilen maddenin mekanik özellikleri esneme ve kırılmayı doğrudan etkilemektedir. Vatoz balığının üretiminde Duratek firmasının üç bileşenli, solventsiz epoksi esaslı kimyasal dübel kullanılmıştır. Üretici firmanın verdiği teknik özellikler Çizelge 3.1’te, mekanik özelliklerde Çizelge 3.2’de verilmiştir. Üretici firma kimyasal dübel için çekme ve basınç deneyleri yapmıştır. Çekme ve basınç deneyinin sonuçları Çizelge 3.3’da verilmiştir [39].



Şekil 3.7: Alçı kalıp ile elde edilen gövdenin görünümü

Çizelge 3.1: Kimyasal yapıştırıcının teknik özellikleri

Bileşen Sayısı	Karışım Oranı A/B/C	Karışım Yoğunluğu (g/cm ² , 20 °C)	Karışım Ömrü (dak., 23 °C)	Tam Sertleşme (gün)
3	(Ağırlıkça)30/20/50 (Hacimsel)40/25/35	1.70 – 1.90	50- 70	7

Kaynak: (Değirmenci, Yılmaz, Kaplan, 2015)

Çizelge 3.2: Kullanılan kimyasal yapıştırıcının mekanik özellikleri

Çekme Mukavemeti (N/mm ²) (TS 1964, DIN 53504)	Çekme Uzaması (%) (TS 1964, DIN 53504)	Elastikide Modülü (N/mm ²) (DIN 52371, TS 985)	Eğilme Mukavemeti (N/mm ²) (DIN 52371, TS 985)
~20	~0.7	~4500	~44

Kaynak: (Değirmenci, Yılmaz, Kaplan, 2015)

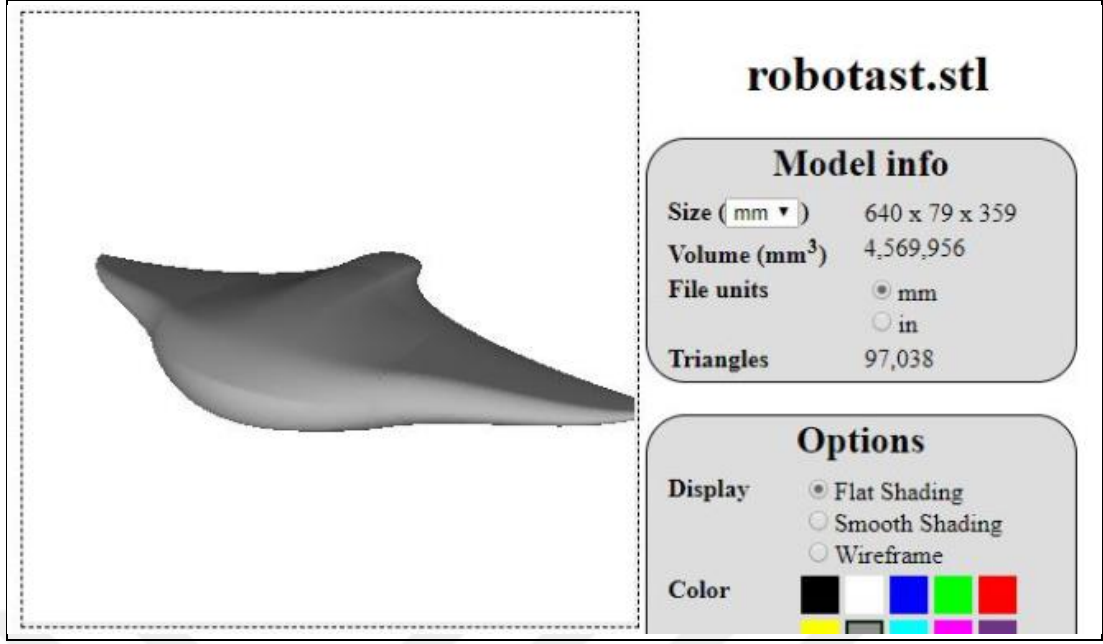
Çizelge 3.3: Epoksi deney sonuçları

Numune No	Çekme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)
1	19.0	70.1
2	14.9	70.5
3	19.3	70.3
4	15.2	69.7
5	14.6	70.1
6	18.5	66.5

Kaynak: (Değirmenci, Yılmaz, Kaplan, 2015)

3.1.3 Katı model mekatronik sistemin hacminin bulunması

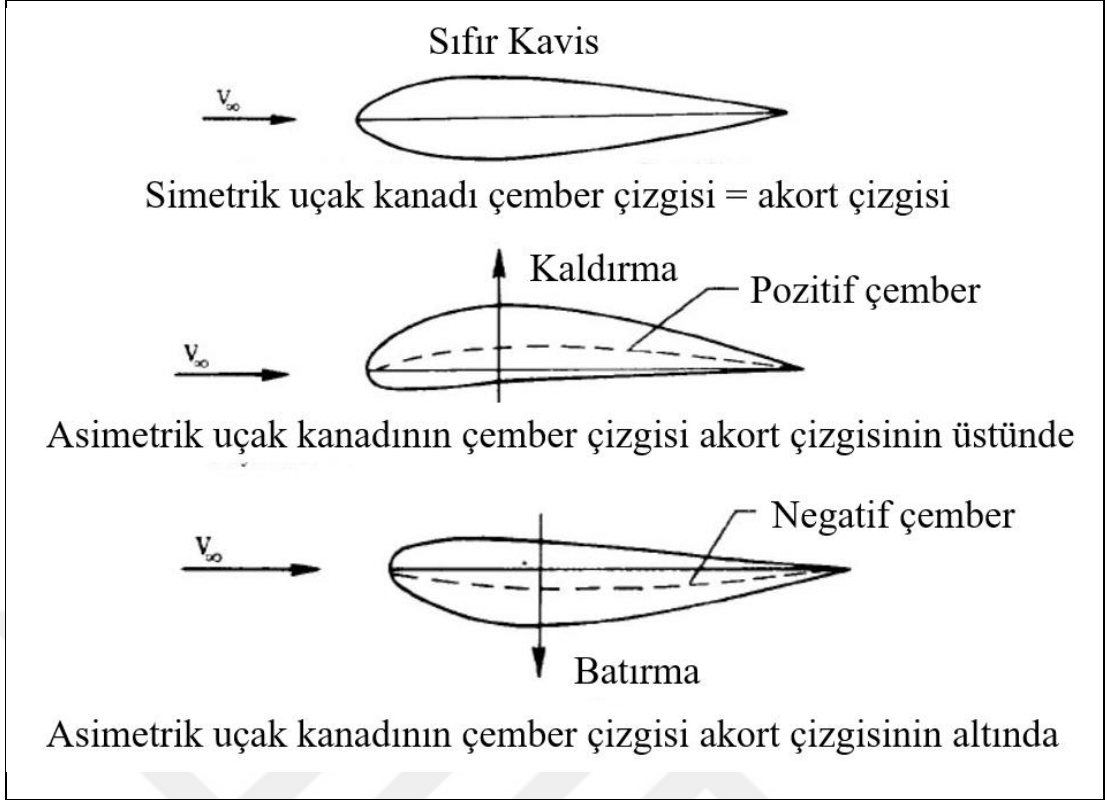
Robotun su içerisinde yüzebilmesi için su ile aynı öz kütlede olması gerekmektedir. Bu yüzden robotun hacminin bulunması gerekmektedir. Biyo-ilhan tekniği ile tasarlanan su altı robotunun 3B çizim dosyasını online STL dosyalarını açmak için kullanılan programa yükleyerek hacim hesabı yapılmıştır. Şekil 3.8’de robotun ölçüleri ve hacmi görülmektedir. Hacim ve özkütlesi bilinen cismin maksimum ne kadar ağırlıkta olacağını hesaplandığında robotun maksimum 4,5 kg olması gerekmektedir.



Şekil 3.8: STL programı ile otomatik hacim hesaplama sonuçları

3.1.4 Kablolu radyal makas sisteminin tasarımı ve eklemeli imalatı

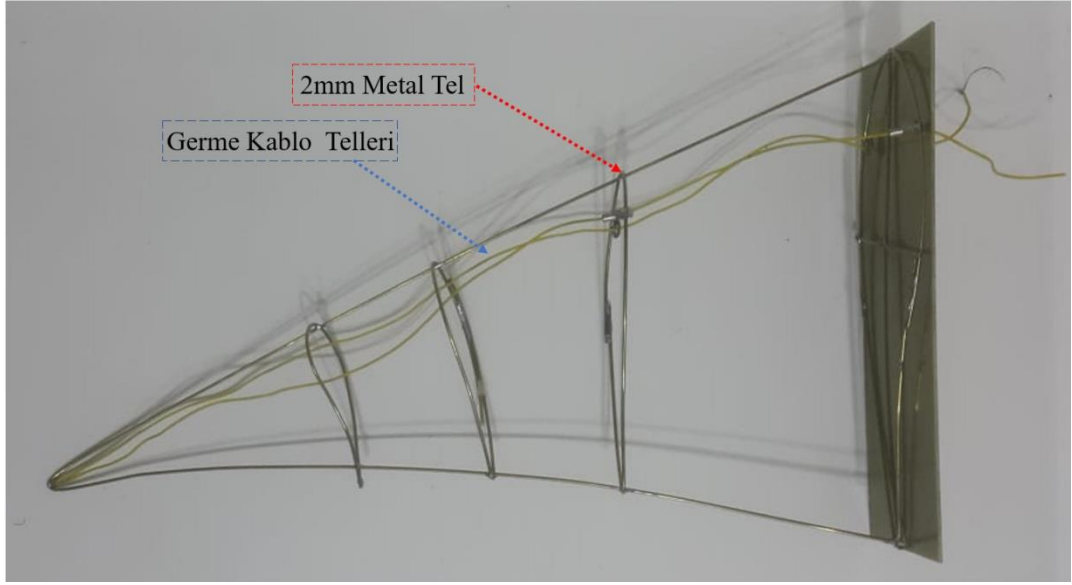
Vatoz balığı kanatları şekli ve gövde şekli olarak iki bölümde incelenirse uçaklara benzemektedir. Bu yüzden su içerisinde en düşük sürtünme ile hareket sağlayabilmesi için uçakların kanat ve gövde yapısından kopya çekilmiştir [19, 20]. Uçaklar hareket ederken hava da bir türbülans oluşturduğu gibi vatoz balığı da su içerisinde hareket sağlarken türbülans oluşturmaktadır. Su içerisinde akışkanlığı sağlaması için en uygun kanat şekli simetrik kanat şekli olduğuna karar kılınmıştır. Çünkü su içerisinde akış yaparken kendiliğinden aşağı veya yukarı bir hareket oluşmaması gerekmektedir. Tüm uçak kanat profilleri, Ulusal Havacılık Danışma Komitesi (NACA) tarafından geliştirilen şekillerdir. Klasik ve değiştirilmiş NACA 4 haneli profillerini içerirler. NACA standartlarından simetrik kanat şekli su altında kullanıma en uygundur [21]. Şekil 3.9'de simetrik ve asimetric kanat şekilleri ve verdiği yönleri görmekteyiz.



Şekil 3.9: Uçak Kanat profilleri çeşitleri

Kaynak: (Sunada, Sakaguchi, Kawachi, 1997)

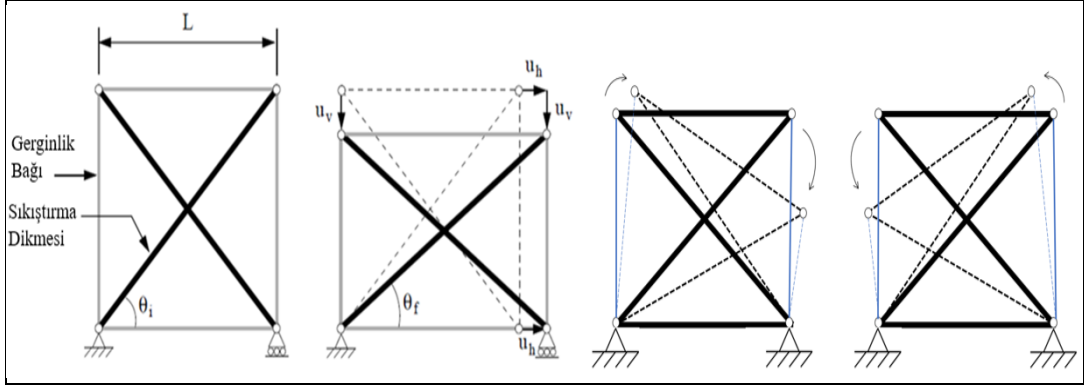
Geliştirilen tasarımlarda literatür çalışmalarının ışığında ilerlenmiştir. Kanadın su içinde elastik bir yapıda istenilen salınımları yapacak şekilde yukarı ve aşağı kıvrılmaları ayarlanabilir hızda olmalıdır [22]. İlk aşamadaki denemeleri basit uygulamalar ile yapılmış adım adım geliştirilerek en verimli ve uygun mekatronik sistem tasarımı ortaya çıkarılmıştır. İlk denemeler herhangi bir ölçü ve orana dayanmaksızın 2 mm kalınlığındaki metal tellerle yapılmıştır. Şekil 3.10'de görülmektedir. Şekil 3.10'de uygulamada kanadın uç noktalarından bağlanan kablolar gerilerek kanat hareketleri dikey radyal hareketini sağlamıştır. Vatoz balığının su içindeki manevra hareketini istenilen düzeyde sağlamadığı için geliştirilmesi gerekmektedir [23].



Şekil 3.10: Metal teller ve kablo telleri ile oluşturulan uygulama

Vatoz balığının kanat şekline uygun bir eyleyici tasarımı oluşturmak için kanat formuna uygun bir iskelet tasarlamak gerekmektedir. Vatoz balığının kanadı gövdenin uca doğru gradyan bir formda incelmektedir. Bu tarz alan kısıtlaması olan tasarımlarda katlanabilir makas mekanizmaları önemli çözümler üretebilmektedir. Özellikle, üretim teknolojileri içerisinde eklemeli imalat yöntemi ile ilgili gelişmeler inovatif mekanizmaların geliştirilmesinin önünü açmıştır [41-42]. Bu nedenle, farklı serbestlik dereceli makas mekanizmaları incelenmiş ve eklemeli imalat yöntemi ile üretimi planlanmıştır.

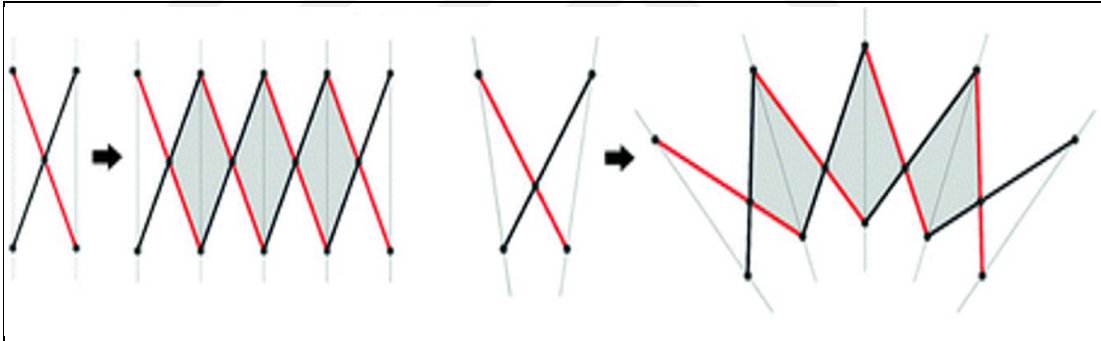
Makas mekanizmaları ötelenebilir ve açısız makas mekanizmaları olarak iki ana grupta incelenmiştir. Açısız makas yapılarının da literatüründe, bilinen üç konfigürasyon tipi vardır. Döngüler paralelkenar, eşkenar dörtgen ve deltoid geometrik yapısına göre incelenir. Üzerinde çalışma yapılacak olan açılı makas sistemi, bir dizi gerilmiş bileşen içinde bir dizi sıkıştırılmış bileşen içeren kararlı, kablo ve yaylar sayesinde dengelenmiş durumdaki sistemlerdir. Bu sistemler genelde makas mekanizmaları ve paralelkenar mekanizmalarından oluşur. Paralelkenar veya çapraz paralelkenar olarak da bilinen paralelkenar, eşit uzunlukta iki kısa ve iki kesişen uzun kenara sahiptir. Paralelkenar konfigürasyon oluşturan bir bağlantı, hareketin her iki yönünde düz olarak katlanabilir. Konfigürasyonun dikey bir eksen etrafındaki ayna simetrisi, yerleştirme sırasında korunur. Simetri eksenini, uzun kenarların kesişme noktasından geçmektedir [23,24].



Şekil 3.11: Düzlemsel hareket makas mekanizması ve açısal hareket kabiliyetine sahip makas mekanizması

Kaynak: (Willy, Low, 2015)

Makas mekanizmalarını incelediğimizde hareket kabiliyetine göre iki çeşit bulunmaktadır. Şekil 3.11’de düzlemsel hareket makas ve açısal hareket kabiliyetine sahip makas mekanizmaları görülmektedir. Düzlemsel hareket mekanizmanın boyunun uzayıp kısılmasına etki eden bir mekanizmadır. Açısal hareket mekanizmanın içbükey ve dışbükey yönde eğilmesine etki eden bir mekanizmadır.

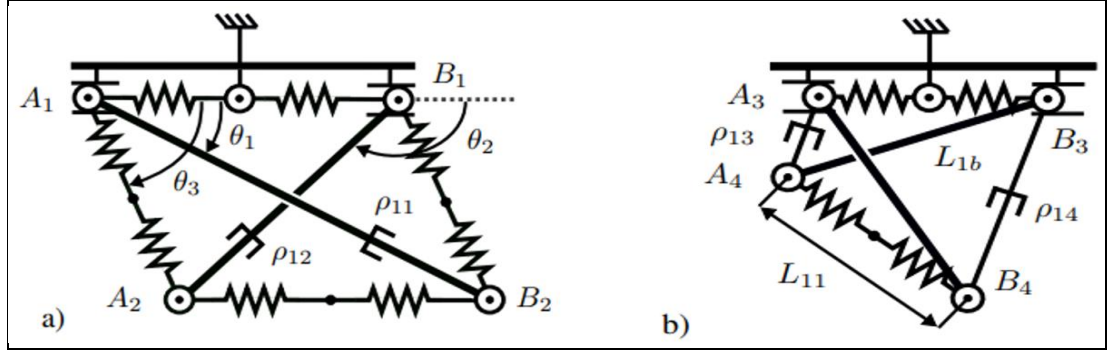


Şekil 3.12: Birincil makas elemanları ile üretilen iki makas yapısının konfigürasyon geometrileri

Kaynak: (Gür, Karagöz, Kiper, Korkmaz, 2019)

Düzlemsel hareket kabiliyetine sahip makas mekanizmalarının oluşturduğu geometrik şekil eşkenar kenar dörtgendir [26]. Açısal hareket kabiliyetine sahip makas mekanizmasının oluşturduğu geometrik şekil deltoid bir dörtgendir. Şekil 3.12’de makas mekanizmasının devreleri birleştirilerek oluşturulan mekanizmaların geometrik şekilleri görülmektedir. Makas mekanizmaları ile piston, kablolar veya yaylarla gerginlik ayarı yaparak dengede tutmak veya tutmayarak istenilen hareketler elde edilebilir. Nasıl bir makas mekanizmasında piston yardımıyla mekanizmanın boyunu uzatmak ve kısaltmak mümkünse, açısal makas mekanizması ile de açıs

yön verme hareketi sağlanabilir. Bunun için birçok tasarım düşünülebilir. Örnek vermek gerekirse kablo ve yaylarla dengelenmiş bir makas mekanizmasını gerginlik sağlayarak kontrol edebilen bir tasarım Şekil 3.13’de gösterilmiştir [27].

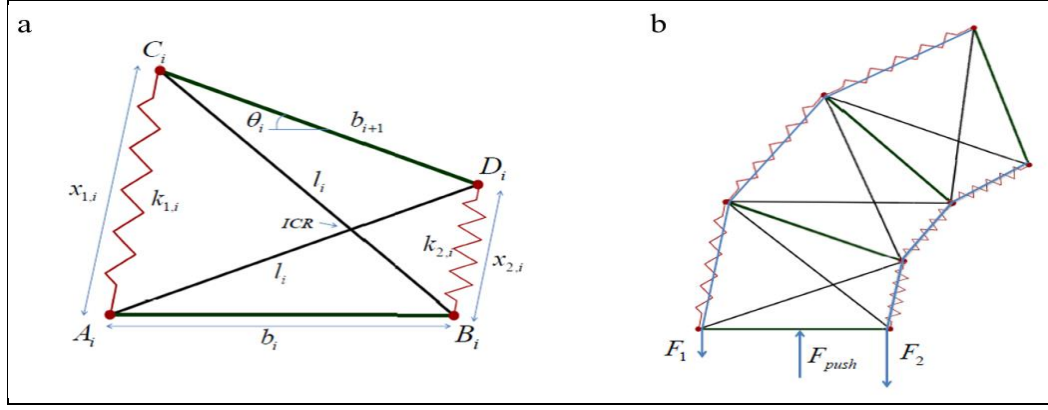


Şekil 3.13: a) Yay tahrikli makas mekanizması, b) Yay tahrikli kablolu makas mekanizması

Kaynak: (Dos Santo, Rodrigue, Micheletti, 2015)

Şekil 3.13a’da A1, A2, B1, B2 mafsalları bulunmaktadır. ρ_{11} ve ρ_{12} çubukları boyları ayarlanarak şekildeki gibi pozisyon elde edilmektedir [43]. Çubukların boyları ayarlanarak elde edilen bu mekanizma büyük ve güçlü, kaba sistemlerde kullanılmaktadır. Çünkü boyları ayarlanabilen çubuklar genelde pistonlardır. Pistonlar her alanda kullanışlı olamamaktadır. Şekil 3.13b’deki mekanizma gerginlik mekanizmaları içerisinde en çok tercih edilenlerdendir. Çünkü sabit çubukları ρ_{13} ve ρ_{14} kabloları boylarını ayarlayarak pozisyon elde edilebilir. Kablolar her alanda kullanılabilir yapıya sahip olmaktadır. Elde edilen hareketler ise daha ergonomik ve işlevseldir. Şekil 3.13b’deki mekanizma konfigürasyonel halinde çoğaltılarak uzatılabilmektedir. Her iki mekanizmadaki ortak özellik diğer mekanizmalar gibi ötelenemez sadece radyal hareket oluşturabilirler [28].

Deltoid geometrili açısal makas mekanizmalarındaki hareketi etkileyen eyleyicileri en aza indirgenmiş bir mekanizmayı incelediğimizde sadece kablolarla kontrol edilebilen mekanizmalar ortaya çıkmıştır. Şekil 3.14’de kablolarla radyal hareketin yönelimini gerçekleştiren mekanizma görülmektedir. Şekildeki sistemde yaylar mekanizmanın dengede kalmasını sağlamaktadır [29].



Şekil 3.14: a) Açısal makas mekanizma hücresi b) Açısal makas mekanizmasının üç hücreli tekrarlayan konfigürasyonu

Kaynak: (Bakker, Matsuura, Takeda, Herder, 2015)

Tendonların yaptığı enerji, belirli tendon kuvvetinin kat ettiği mesafenin tendon kuvvetine eşittir Eş. (3.1).

$$U_{tendon} = F_{x1} \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_{1,0} - x_{1,i} \right) + F_{x2} \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_{2,0} - x_{2,i} \right) \quad (3.1)$$

Mekanizma çevre ile temas halindedir. Çevresel yaylar tarafından yapılan enerji denklemi Eş.(3.2)'de tanımlanmıştır. Mekanizmanın j temas noktasında çevre üzerinde yaptığı sıkışma U_j olarak tanımlanmıştır. θ_i makas mekanizmasının rotasyonuna göre açısıdır. Dört ayrı döner mafsal isimleri sırası ile A, B, C, D' dir. ICR anlık rotasyon merkezidir. Tendon sabiti k olarak gösterilmiştir. Çapraz çubukların uzunluğu l ile gösterilmiştir. Çapraz çubuklara bağlı çubukların uzunluğu b ile gösterilmiştir.

$$U_{temas} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m (U_j)^2 \quad (3.2)$$

Tüm potansiyel enerji denklemlerinin toplamı Eş. (3.3);

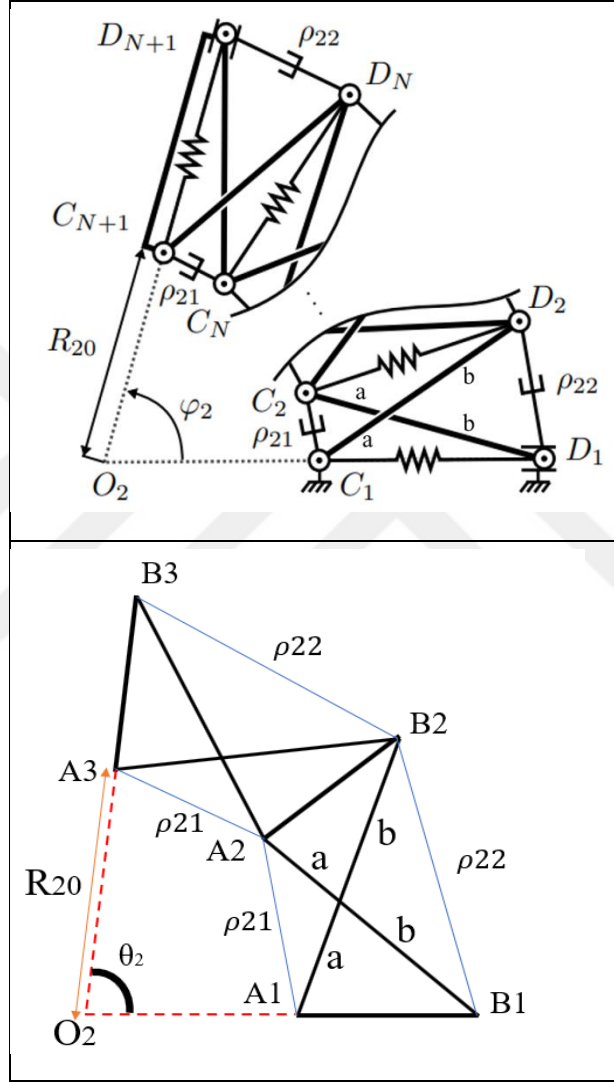
$$U_{toplam} = U_{tendon} + U_{temas} \quad (3.3)$$

j noktasındaki temas kuvveti F_{temas} ' dir. F toplam aşağıdaki denklem Eş. (3.4) ile hesaplanmaktadır.

$$F_{\text{temas}} = U_j \quad (3.4)$$

$$F_{\text{toplam}} = F_{\text{temas}} + F_{x1} + F_{x2}$$

Tasarlanan iki serbestlik dereceli anti-paralel kenar makas mekanizmasında radyal bir pozisyon elde etmek için kablolarla gerdirme kuvveti uygulanmalıdır.



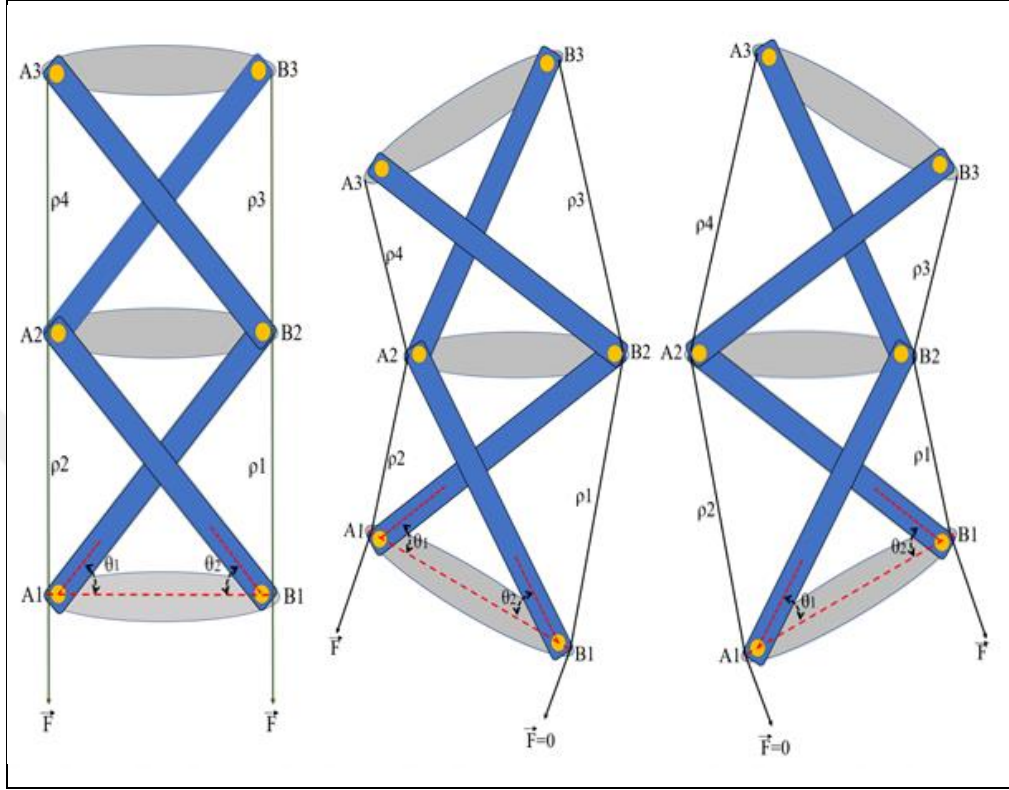
Şekil 3.15: Deltoid geometrili açılmal makas mekanizması ve tasarlanan mekanizma karşılaştırması

Kaynak: (Dos Santo, Rodrigue, Micheletti, 2015)

Rotasyonel makas yapıları, makas benzeri elemanların kullanımına dayanır. Çubukların toplam uzunluğu $a + b = L2b$ 'ye eşittir [30]. Makas benzeri elemanlar tasarımına benzetilerek oluşturulan bir Snelson Cross kullanımı kablo kuvvetiyle çalışmaktadır [31]. Basit geometrik materyalleri kullanarak Thales teoremi ile

Snelson çaprazı teoremi ile makas benzeri elemanların aynı konfigürasyona sahip olduğunda yani sistem dengede ise Eş. (3.5)'de gösterilebilir.

$$\frac{a}{b} = \frac{\rho_{21}}{\rho_{23}} \quad (3.5)$$



Şekil 3.16: Açısal makas mekanizmasındaki iplere uygulanan F kuvvetlerine göre hareketleri

Her makas mekanizması bir hücre olarak kabul edilir. Tasarlanan makas mekanizması iki hücreli döngüden oluşmaktadır [32]. İki serbestlik dereceli makas mekanizmamızın makas kısmını oluşturan kirişler aynı ölçüdedir. Kirişlerin monte edildiği mafsalların bulunduğu eklem yerleri de aynı ölçüdedir [33]. Mafsalların merkezinden açılan deliklerden kablolar geçmektedir. Kablolar aynı anda bir kuvvet uygulandığında mafsallarda bir gerginlik oluşmaktadır. Bu uygulanan kuvvetler birbirine eş değerde olduğu zaman mekanizma dengededir. Kablolardan herhangi birindeki kuvvet azaldığı veya sıfır olduğunda mekanizma kuvvetin fazla olduğu yöne doğru hareket etmektedir [34].

Sistem denge durumunda mekanizma herhangi bir radyal hareket yapmaz ve bu yüzden parçaların tamamı simetrik yani eşittir. Bu sebeple ölçüler $a = 22,5 \text{ mm}$, $b = 22,5 \text{ mm}$ ve $L2b = 55 \text{ mm}$ 'dir. Eş. (3.5) formülündeki gibi $a/b = 1$ 'dir.

Snelson çaprazı teorisinin geometrisi olduğu zaman makas mekanizmalarının ileri kinematik modelinin Eş. (3.6) formülü yazılabilir.

$$R_{20} = \frac{\rho_{21}\sqrt{L_{2b}^2 - \rho_{21}\rho_{22}}}{\rho_{22} - \rho_{21}} , \quad \Phi_2 = N \cdot \arccos\left(\frac{2R_{20}^2 - \rho_{21}^2}{2R_{20}^2}\right) \quad (3.6)$$

Formülde tasarımın parametrelerini yerlerine koyarak sonuçları elde edilmiştir.

$$R_{20} = \frac{35\sqrt{55^2 - (35 \times 65)}}{65 - 35} , \quad R_{20} = 31,95 \text{ mm olarak bulunmuştur.}$$

$$\Phi_2 = 2 \cdot \arccos\left(\frac{2x(31,95)^2 - 35^2}{2x(31,95)^2}\right) , \quad \Phi_2 = 132,96^\circ \text{ dir.}$$

Ters kinematik model formülü Eş.(3.7) olarak türetilebilir.

$$\rho_{21} = R_{20}\sqrt{2\left(1 - \cos\left(\frac{\Phi_2}{N}\right)\right)}$$

$$\rho_{22} = \rho_{21}\left(\cos\left(\frac{\Phi_2}{N}\right) + \sqrt{\cos\left(\frac{\Phi_2}{N}\right)^2 + \frac{L_{2b}^2}{R_{20}^2} - 1}\right) \quad (3.7)$$

Ters kinematik formülü ile çözümlerin doğruluğunu kontrol etmek için;

$$\rho_{21} = 31,95\sqrt{2\left(1 - \cos\left(\frac{132,96}{2}\right)\right)} , \quad \rho_{21} = 35,02 \text{ mm olarak bulunur.}$$

$$\rho_{22} = 35,02\left(\cos\left(\frac{132,96}{2}\right) + \sqrt{\cos\left(\frac{132,96}{2}\right)^2 + \frac{55^2}{31,95^2} - 1}\right) , \quad \rho_{22} = 65,08 \text{ mm' dir.}$$

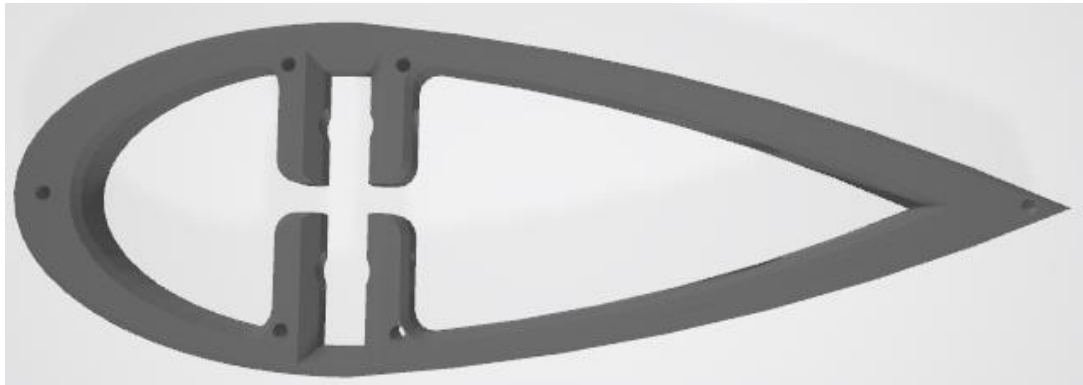
Eş.(3.3) kullanılarak ρ_{21}/ρ_{22} oranı ile uzak hareket merkezi bulunabilir.

Uzaklık hareket merkezi $35/65 = 0,538$ olarak bulunmaktadır.

Çizelge 3.4: Geliştirilen açısız makas mekanizmasının maksimum radyal hareket parametre değerleri

a	b	L _{2b}	$\rho_{21_{min}}$	$\rho_{22_{max}}$	R ₂₀	N	ϕ_2
22.5 mm	22.5mm	55 mm	35 mm	65 mm	31,95 mm	2	132,96

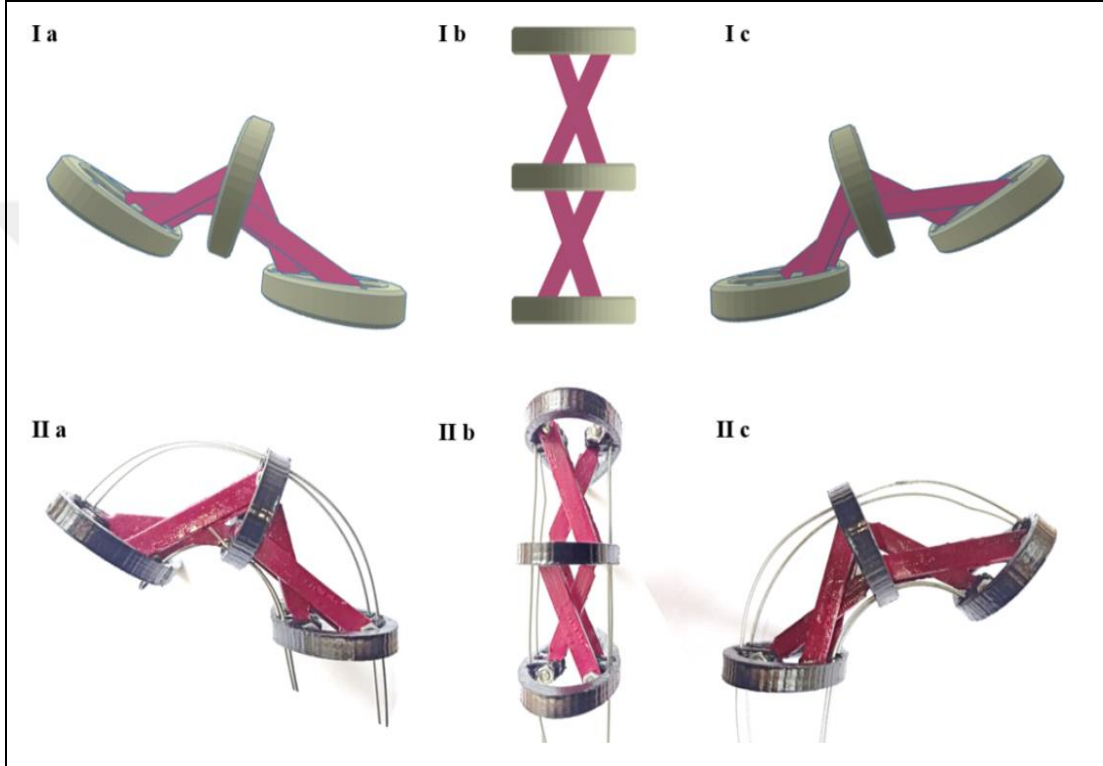
Tasarlanan mekanizmanın bilgisayar destekli çizim programı ile parçalarını çizilmiştir. Mekanizma vatoz balığı kanadının gerçeğine yakın airfoil formunda tasarlanmıştır. Tasarımın Şekil 3.17’de üç boyutlu çizimi gösterilmiştir. Çizilen tasarımların STL uzantılı dosyalarını 3B yazıcı programına yüklenmiştir. Aynı şekilde sahip parçalar toplu olarak üretilmiştir. Katman kalınlığı 0.15 mm normal yüzey kalitesinde ayarlanmıştır. Doluluk oranı yani yoğunluğunu ise %60 olarak ayarlanmıştır. Bu sayede hem orta kalitede bir yüzey ve mukavemet olarak da sağlam bir ürün üretilmiştir. Üretimde kullanılan ürün PLA filament malzemesidir. Yazıcının baskı hızı normalden biraz fazla 60 mm/s olarak ayarlanmıştır. Nozul sıcaklığı normal şartlar altında 200 °C yeterli görülmüştür [35]. Fakat yazdırma hızı normalin biraz üstünde olduğu için nozul sıcaklığını da 220 °C olarak ayarlanmıştır. Çünkü flamentin erime hızı yazıcı hızına yetişemeyebilir. Yazıcı parametreleri Çizelge 3.5’de yer almaktadır. Parçaların üretim hızı üretim kalitesi ile doğru orantı olmaktadır. Yoğunluğu azaltırsak veya katman kalınlığını artırırsak ürün daha hızlı bir şekilde üretilebilirdi fakat bu durum sağlamlık ve yüzey kalitesinin düşürmektedir. Parçaların yaklaşık üretim süresi toplamda 380 dk. sürmüştür. Üretimden sonra parçalar birleştirilerek makas mekanizması oluşturulmuştur. Kabloları yuvalarından geçirerek sistem hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.17: Vatoz balığının kanat mekanizmasının airfoil formundaki tasarımı

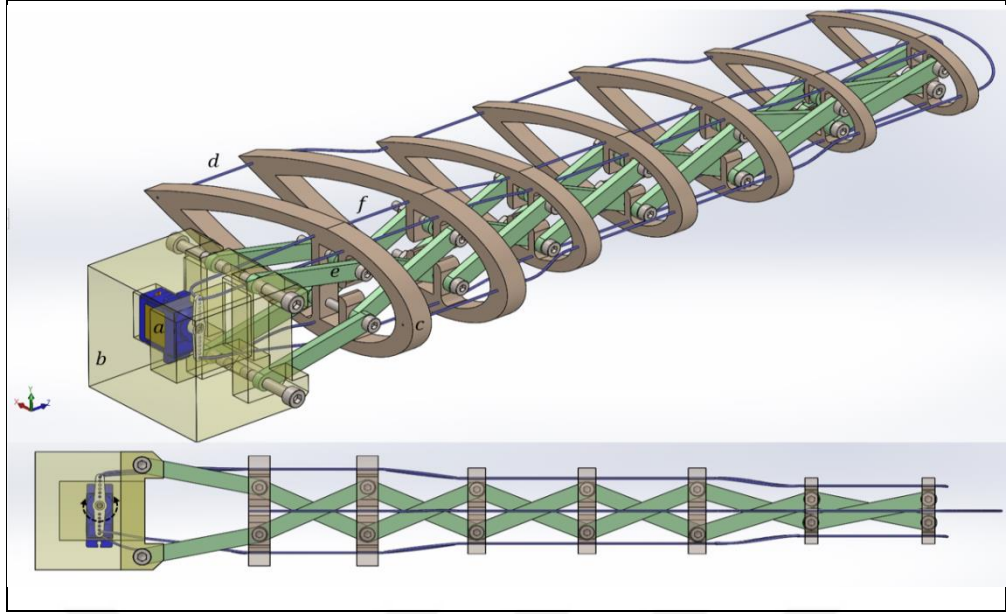
Çizelge 3.5: B yazıcının katmanlı imalat ayar parametreleri

Katman Yüksekliği	İç Dolgu Oranı	Dış Duvar Kalınlığı	İç Dolgu Deseni	Baskı Hız Ayarı	Nozul Sıcaklığı
0,15 mm	%60	0,8 mm	Izgara	60 mm/s	220 °C



Şekil 3.18: Geliştirilen mekanizmanın hareket kabiliyetlerinin üç boyutlu çizimi (I) ve üretilmiş prototip görüntüsü (II)

Üretilen prototip istenilen hareket kabiliyetlerini yerine getirmiştir [48]. Makas mekanizmaları istenilen kadar uzatılabilme özelliğine sahip oldukları için kanat tasarımında kullanıma uygundur [36]. Çalışma için kanat iskeleti açısallı makas mekanizması tekniği ile devam edilmiştir.



Şekil 3.19: Açısal makas mekanizması tekniği ile tasarlanan kanatın üç boyutlu görünümü

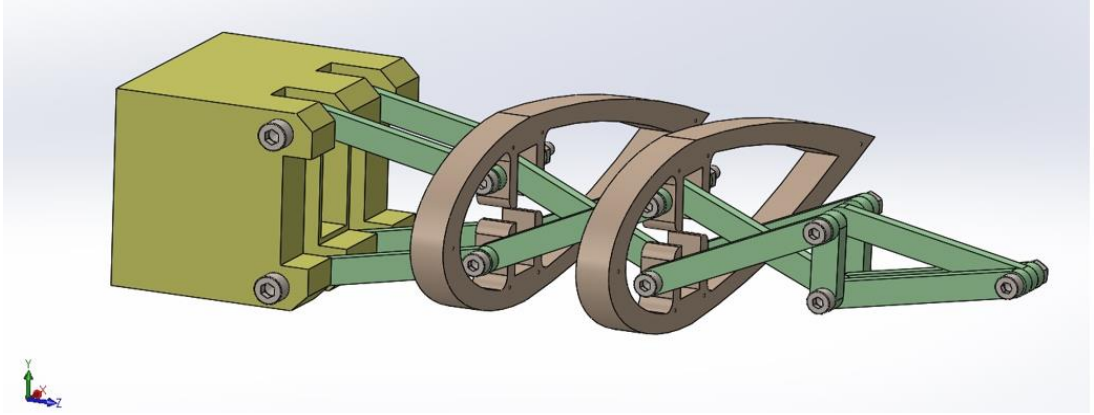
Açısal makas mekanizma konfigürasyonları çoğaltılarak Şekil 3.19'daki gibi kanat tasarımı oluşturulmuştur. 3B yazıcıdan filament malzemesi ile basılan parçalar birleştirilmiştir. İçerisinden 1 mm çelik esnek spiral teller geçirilmiştir. Şekil 3.20'de birleştirilen kanat görülmektedir. Bu kanatın tellerini gerdirmek için servo motor kullanılmıştır. Servo motorların yerleştirilmesi ve kanatın sabitleneceği bir tutucu tasarlanıp kanatlar bu tutucuya sabitlenmiştir. Tutucudan iki parça üst üste konularak vidalanmıştır. Servo motor iki parça arasında sıkıştırılarak birleştirme oluşturulmuştur. Bu sayede servo motorda parçaya sabitlenmiştir.



Şekil 3.20: Tüm parçaların ve motorun montajının yapılmış görünümü

Spiral çelik kablolar servo motorun milindeki kola bağlanarak gerginlikleri ayarlanmıştır. Kanat prototipi test etmek için bir yüzeye sabitlenmiştir. Test için gerekli servo kontrol cihazlarını bağlayarak Şekil 3.20'de gösterildiği gibi denemeler yapılmıştır. Testler kablo gerilmeleri tekrar ayarlanarak denenmiştir. Kanadın gerilme kuvvetini uygulayan servo motor 5V ile çalışabilen 180° kontrol edilebilen

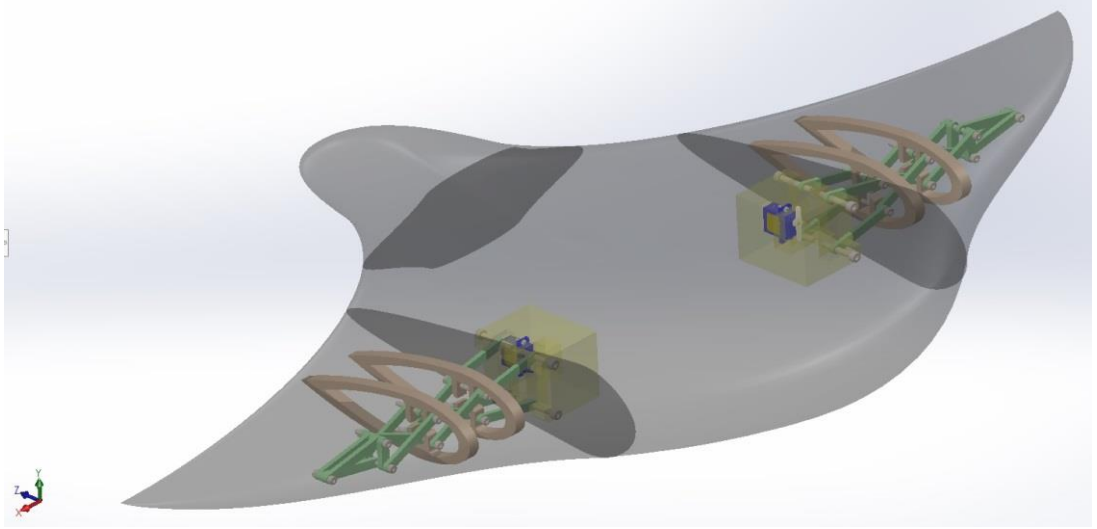
yaklaşık 1,5 N/m tork değerine sahip bir motordur. Üretilen kanatların hareketleri yukarı ve aşağı kanat çırpma sırasında kanatların bükümünün geometrik biçimi gerçeğe uygun bir hareket göstermiştir. Kanatın uç noktalara uygulayabildiği kuvvet yük hücresi ile 2,4 N ölçülmüştür. Kanatın iskeletini oluşturan mekanizma üzerine silikon kaplandığında, silikonun yüzeyinin temas ettiği ve esnekliğinin oluşturduğu sürtünme ile birlikte kuvvet oluşabilmektedir. Su içindeki basıncın, kanatların yüzey alanına uygulayacağı karşı kuvvet için yeterli olmayacağı düşünülmüştür. Bu veriler sonucunda sorunun sebebini ve sorunu giderebilmek için yapılabilecek iyileştirmeler kanat boyutunu küçültülmüş (kuvvet kolunu) ve kanattaki makas mekanizması hücresi dörde düşürülmüştür. Kanat Şekil 3.21'deki gibi yeniden tasarlanmıştır. Kullanılan motor seçilebilecek en yüksek tork ile seçilmiştir. Robotun boyutu kanatla doğru orantılı olarak küçültülmüştür.



Şekil 3.21: Dört hücreli açısallı makas mekanizmalı kanat tasarımı

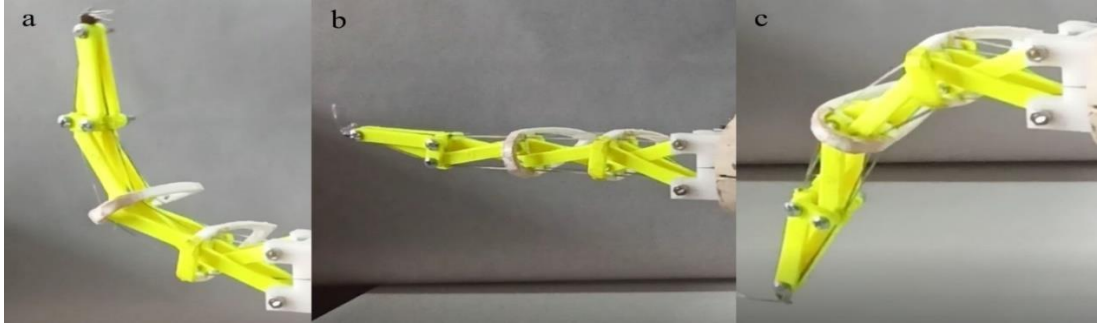
3.1.5 Mekatronik sistem içerisinde kanatların tasarımı ve montajı

Biyo-ilham tekniği ile tasarlanan robotun kanatları için tasarlanan açısallı makas mekanizması Şekil 3.22'deki gibi konumlandırılmıştır. Robotun kanadı gövdeden uca doğru gradyan olarak incelendiği için tasarlanan mekanizma kanat formunu bozmayacak şekilde kanat içine yerleştirilmiştir.



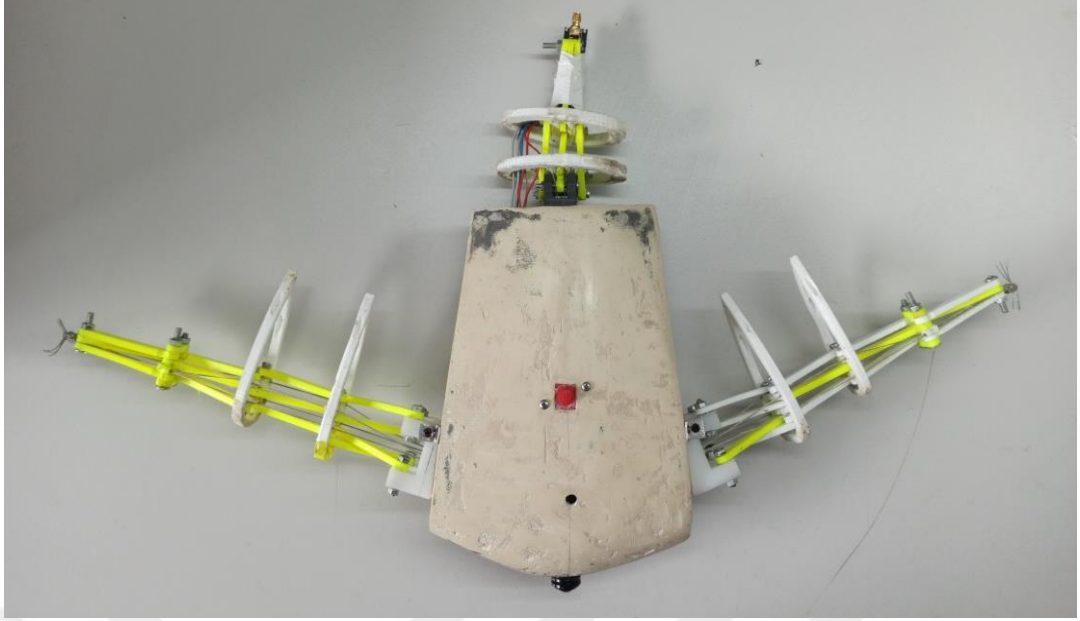
Şekil 3.22: Biyo-ilhan su altı robotu kanat mekanizmasının yerleşimi

Şekil 3.23’de görülen kanat önceki tasarımda üretilen parçalar kullanılarak yeniden toplanarak oluşturulmuştur. Servo motorlara verdiğimiz açı komutları sayesinde sırasıyla ileri-geri olarak belli bir frekansta çalıştırılan kanatlar vatoz balığının kanatları gibi çırpma hareket kabiliyetine sahip olmaktadır. Şekil 3.23’de bu dikey radyal hareketleri sırasıyla göstermektedir. Robotun batma ve çıkma işlevini sağlayan kuyruk mekanizması da aynı açısız makas mekanizmasının ikili konfigürasyonu ile tasarlanıp kullanılmıştır.



Şekil 3.23: Sağ kanattın yukarı, başlangıç ve aşağı doğru bükülme hareketleri

Kanatların gövdeye yaklaşık 18-22° açıda olması biyolojik olarak önemli olduğu literatür taramasında verilmiştir. Bu yüzden kanatların gövdeye bağlantı aparatları yaklaşık 20° olarak ayarlanmıştır. Bu aparatlar gövdeye civatalar ile sabitlenmiştir. Kuyruk ise gövdeye 90° açıyla bağlanmıştır. Kanat ve kuyruğun eklem yerlerinden çelik teller geçirilip servo motorlara bağlanmış ve gerililiği alınmıştır. Dörtlü makas mekanizmasındaki gerginlik çelik telleri 0.35 mm çapında kullanılmıştır.



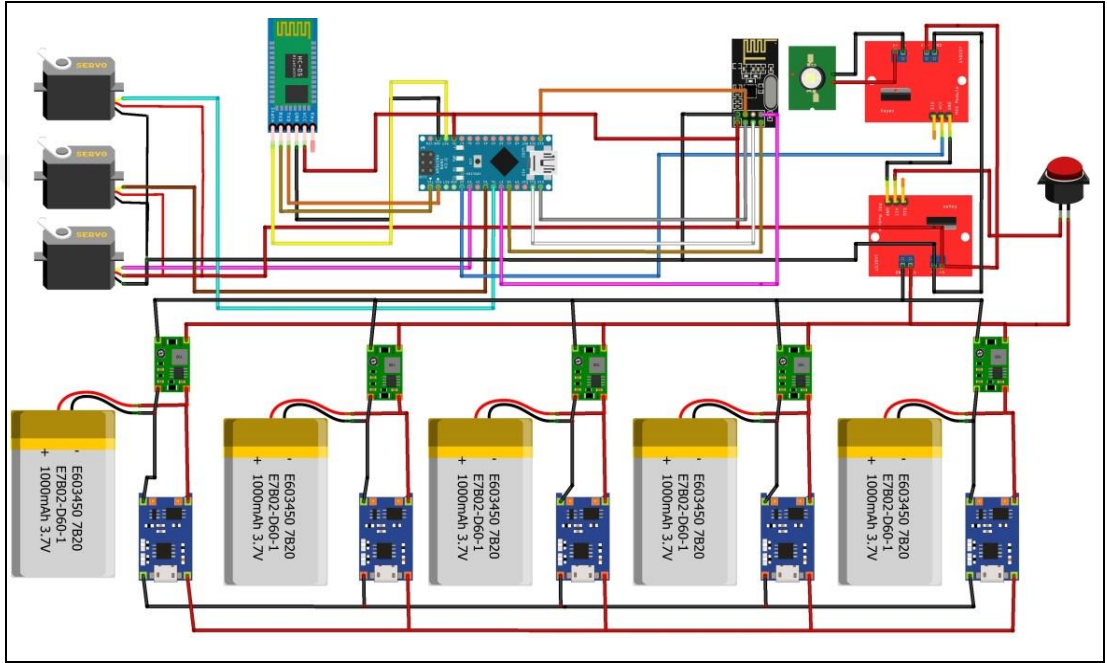
Şekil 3.24: Kanattın ve kuyruğun gövdeye bağlanmış ve tellerin gerilmiş hali

Kuyruk ve kanatların bağlantısının yapıldığı iskelet sistemi Şekil 3.24'de görülmektedir.

3.2 Robotun Elektronik Alt Sistem Tasarımı ve Uygulaması

Sistemin elektronik ihtiyaçları robotun kabiliyetlerine göre seçilip en uygun tasarımın oluşturularak kurulması gerekmektedir. Sistem uzaktan kumanda ile kontrol edileceği için su içinde çalışacak haberleşme modülü gerekmektedir. RF sistemler su içerisinde zayıflasa da kullanılabilir mesafelere ulaşabilmektedir. Alıcı ve verici nrf24I01 modülü kullanılmıştır. Programlanabilir bir I/O kartı olarak Arduino Nano serisi kullanılmıştır. Motorların açılarını kolay kontrol edebilmesi ve güçlü olması için servo motor kullanılmıştır. Robotun elektronik malzemeleri ve devre şeması aşağıdaki Şekil 3.25'de Fritzing programı ile çizilmiştir. Devrenin çalışma prensibi; Uzaktan kumanda ile servo motor ve haberleşme kontrolü sağlayan bir tasarım oluşturulmuştur. Sistemin enerjisi robot kablosuz çalıştığı için bataryalı olarak beslenmektedir. Batarya şarjı su içerisinde yalıtım sorunu sebebinden dolayı akıllı telefon kablosuz şarjı cihazları kullanılarak yapılmıştır. İçerisinde 3.7 V beş adet pil paralel bağlanmıştır. Her bir pil için ayrı bir lityum pil şarj aleti bağlanmıştır. Bataryaların voltajı maksimum şarjda 4 V çıkmakta, deşarj oldukça 3,5 V kadar düşüşler yaşanmaktadır. Devrenin sağlıklı çalışması için 5 V ihtiyaç duyulmuştur. Bu sebepten dolayı DC-DC çevirici kullanılarak voltaj 5 V yükseltilmiştir. Voltajın düşmesi servo motorların gücünün düşmesine sebep olabilmektedir. DC-DC çevirici

sayesinde besleme voltajında düşmelerin yaşanmaması sağlanmış ve voltaj sabit tutmuştur. Kumanda ile robot haberleşmesi nrf24I01 RF modülü ile yapılmıştır. İki adet kanat ve bir adet kuyruk için toplamda üç adet servo motor kullanılmıştır. Besleme voltajının açıp kapatılması için ve LED aydınlatmanın açılıp kapatılması için iki adet mosfet anahtarlama elemanı kullanılmıştır. Uzaktan kumandada konum kontrolü için bir adet joystick ve hız ayarı için lineer potansiyometre kullanılmıştır. Bu değerler RF modülü ile robota analog bilgi olarak gönderilmektedir. LED açmak için kullanılan anahtar ise dijital bilgi olarak gönderilmektedir.



Şekil 3.25: Robotun elektronik komponentlerinin bağlantı şeması

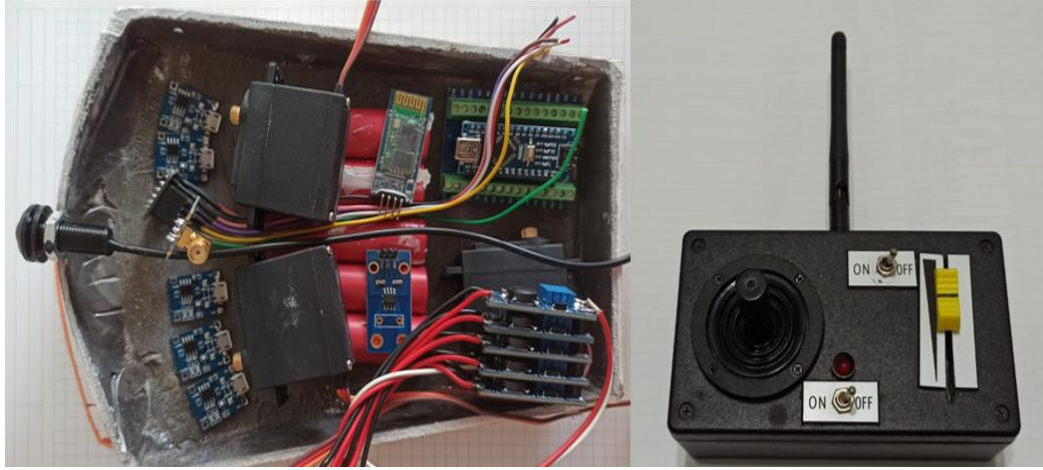
3.2.1 Robot ve uzaktan kumandanın elektronik alt sisteminde kullanılan komponentler

Çizelge 3.6: Robot ve uzaktan kumandanın elektronik alt sisteminde kullanılan komponentler

Komponent Adı	Adet	Özellik
Arduino Nano	2	Besleme: 5V, Dijital I/O :14, Analog I: 8
nrf24l01 RF Modül	2	Besleme: 3.3V, 2.4 GHz, Verici Gücü: +7dB (antenli)
Lityum-İyon Batarya	6	3.7V, 2A, kod:18650
Lityum Şarj Modülü TP4056	6	Şarj akımı: 1A, Giriş:4,5V-5V, Full Şarj: 4,2V
DC-DC Konvertör MT3608	6	Giriş:2V-24V, Maksimum Çıkış: 28V, 2A
Mosfet Anahtarlama Modülü	2	15A. 400w, PWM Kontrollü
Joystick X-Y konumlu	1	2x5K Ω Analog, IP67
Lineer Potansiyometre	1	5K Ω Analog
On-Off Buton	3	Maksimum Akım: 6A
Kablosuz Şarj Modülü	2	Alıcı-Verici 5V, 2A
Servo Motor Mg945	3	Hız:0.22/60°, tork:14kg.cm, Besleme 4.8V-6.7V

3.2.2 Robot ve uzaktan kumandanın elektronik alt sistem yerleşimi

Robotun taşıyıcı şasesinin içerisinde kullanılan gerekli elektronik malzemeler ağırlık ve boyutlarına uygun olarak araştırılmış özenle seçilmiştir. Ağırlık olarak düşük ve boyutları minimum olan gerekli gücü ve donanımı sağlayabilecek malzemeler kullanılmıştır. Malzemelerin yerleşim yerleri Şekil 3.26'da görülmektedir. Robotun uzaktan kontrolünü sağlayan kumanda robota özel tasarlanmıştır. Kumanda robota özel tasarlanırken, modülasyon kanal frekansının başka kumandaların frekansıyla karışmaması amaçlanmıştır. Tasarlanan kumanda Şekil 3.26'da görülmektedir.



Şekil 3.26: Elektronik malzemelerin yerleşim yerleri ve uzaktan kumanda

Kumanda üzerinde bir adet joystick yukarı-aşağı, sağ-sol hareketlerini sağlamak için kullanılmıştır. Kumanda üzerinde İki adet on/off anahtar kullanılmıştır. Anahtarlardan üzerinde LED bulunan kumandanın beslemesini açmak için kullanılmıştır. Diğer anahtar ise robot üzerindeki Power LED'i açmak için kullanılmıştır. Lineer potansiyometre ise robotun hızını ayarlamak için kullanılmıştır. Robotun mekanik ve elektronik olarak tüm parçaları birleştirilmiştir. Silikon kaplama işlemine geçilmeden önce kumanda denemeleri, kanatlar ile ilgili test ve denemeler yapılmıştır. Robot silikon kaplamadan önceki son halini Şekil 3.27'de gösterilmiştir.



Şekil 3.27: Robot, uzaktan kumandası ve şarj aleti

4. ROBOT ALT SİSTEMLERİNE AİT ANALİZ VE TESTLER

4.1 Prototipi Geliştirilen Robotun Kanat İlk Tasarımının Sonlu Elemanlar ve Analitik Analizleri

Kanadın dikey yer değiştirmeye ilgili analitik analizi, Moored ve diğerleri tarafından kullanılan N hücreli kiriş yapısı hesaplaması denklemine dayanarak yapılmıştır [37]. Eş (4.1) formülü robotik yüzgecin ucunun y ekseninde maksimum yer değiştirmesinin hesaplanması için kullanılmıştır. A, robotik pektoral yüzgeç ucu yer değiştirmesi, N birim hücre sayısı, L yüzgeç uzunluğu, h yüzgeç yüksekliği ve δ denklemdaki dikey yer değiştirmiştir.

$$A = \frac{L}{N} \sum_{j=1}^N \sin \left[\sum_{i=1}^j (2\delta_a^i/h + \delta_a^i/h) \right] \quad (4.1)$$

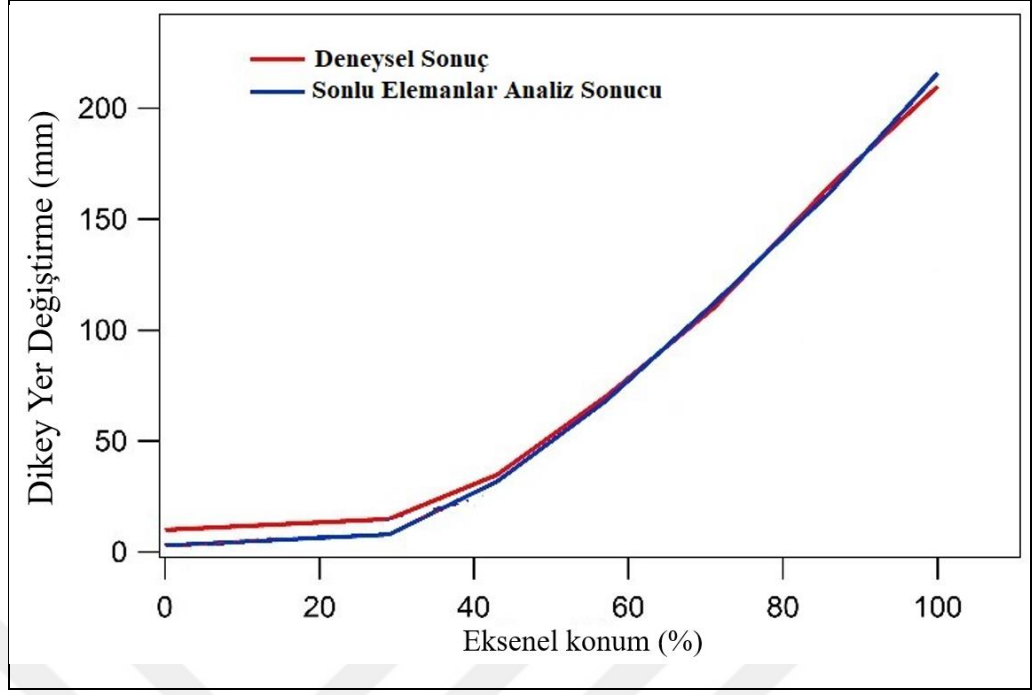
Altı hücreli makas mekanizmasının yer değiştirmesi şu şekilde hesaplanmıştır;

$$A = \frac{300}{7} \sin (\delta_a^i/h) + \frac{300}{7} \sin (2\delta_a^i/h + \delta_a^i/h) + \frac{300}{7} \sin (2\delta_a^i/h + 2\delta_a^i/h + \delta_a^i/h) + \dots$$

olarak hesaplandığında;

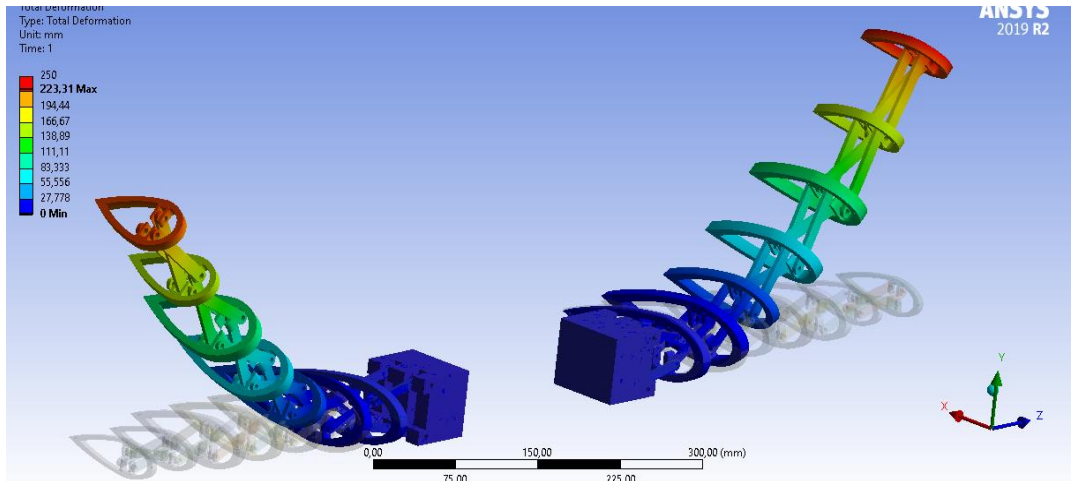
$$A = 42.85(0.2 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1) = 265.5 \text{ mm}$$

$$A - h = 265.5 - 60 = 205.5 \text{ mm}$$



Şekil 4.1: Dikey yer değiştirme/eksenel konum (%) grafiği

Dikey yer değiştirme/eksenel konum, deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre karşılaştırmasının Şekil 4.1 grafiği çizilmiştir. Biyo-ilham su altı robotunun kanat yer değiştirmesi ile sonlu elemanlar analizindeki yer değiştirme çok yakın çıkmıştır. Toplam yer değiştirme değerlerinin y ekseni yer değiştirme değerlerine çok yakın olduğu görülmüştür. Dikey yer değiştirme değerlerinin önemli ölçüde kanat mekanizmasının uzunluğuna bağlı olduğu da unutulmamalıdır. Altı hücreli makas mekanizmasının deformasyonu 223,3 mm olarak görülmektedir.



Şekil 4.2: Kanat üzerindeki hücrelerin toplam yer değiştirme analizi

Altı hücreli makas mekanizmasına dayalı robotik pektoral yüzgeç modeli için ölçülen pektoral yüzgeç ucu sapması, ayrıntılı sonlu elemanlar analizi kullanılarak yapılmıştır.

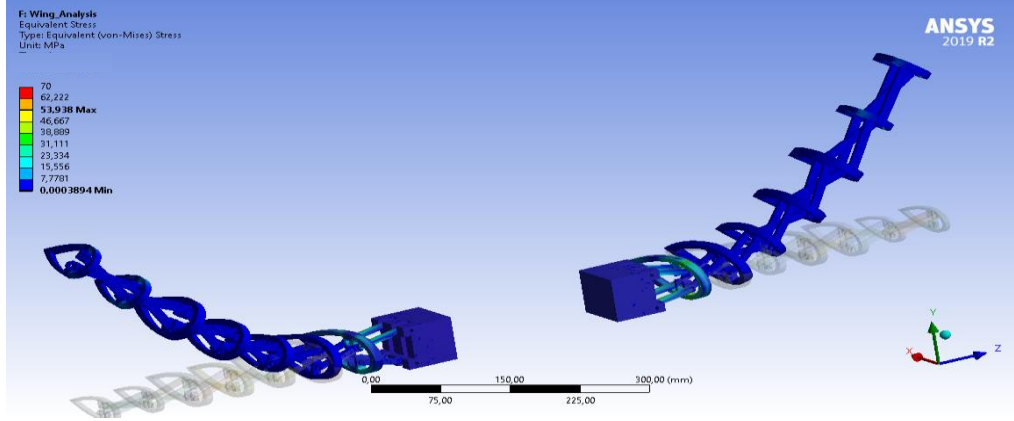
Düğüm sayısı, eleman sayısı ve yöntem olan temel mekanik ağ özellikleri sonlu elemanlar analizi ile hesaplanmış çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1: Mekanik ağ özellikleri

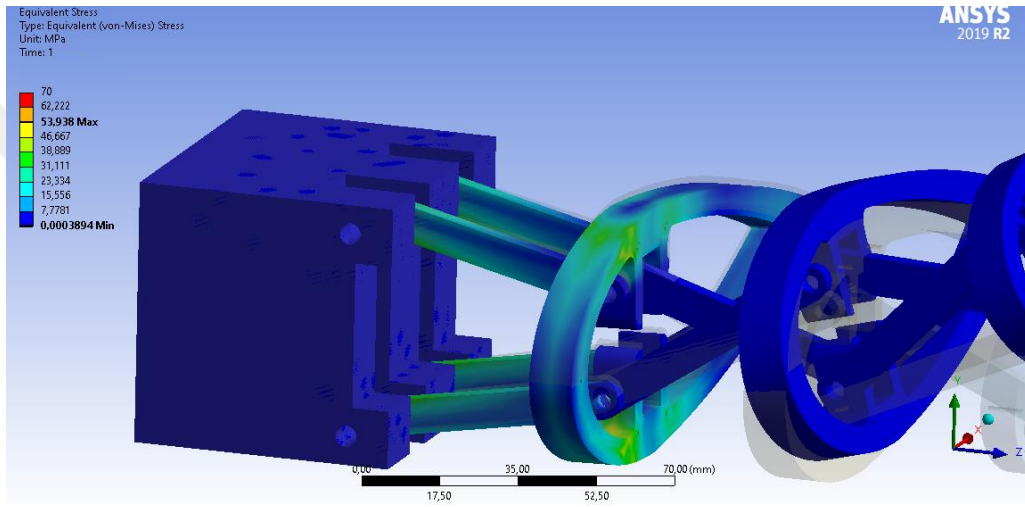
Düğüm Sayısı	Eleman Sayısı	Metot
408908	236132	Tetrahedrons

Sonlu eleman analizi için sınır koşulu olarak deneysel ağırlık değerleri kullanılmıştır. Deneysel ağırlık değerlerinin temsili olarak kuvvet değerleri kanatçık ucu bölgesine + y yönünde uygulanmıştır. Pektoral kanat mekanizmasını ana gövdeye bağlayan montaj kısmında sabit destek kullanılmaktadır. Makas kolları ve kanatçıklar arasında döner eklemler tanımlanmıştır. Pektoral yüzgeçlerin dikey olarak yer değiştirmesi yakalanmış ve sonlu eleman modeli bu prosedürle doğrulanmıştır. Deneysel aşamada 30 N olarak hesaplanan kuvvet ile gerilim analizi yapılmıştır. Bu kuvvet değeri, deneysel sonuçlardan elde edilen tutarlı deformasyon değerleri incelenerek deformasyon analizi ve sonlu elemanlar analizi ile de doğrulanmıştır. Von Mises gerilme analiz sonuçları Şekil 4.3'de sunulmuştur.

Maksimum Von Mises gerilmesinin, kanat kirişinin deformasyon yeteneğinin olmaması nedeniyle ana gövdeye en yakın kanat kirişinde meydana geldiği görülmüştür. Yapı, güvenilir bölgeye karşılık gelen 1,7 güvenlik faktörü olarak çıkmıştır. Dönme ekseninden kuvvetin uygulama noktasına kadar olan daha uzun yarıçap nedeniyle gerilmeler tasarım 59 MPa olarak analiz edilmiştir. Tasarımlarda kullanılan malzemenin 70 MPa akma dayanımına sahip PLA olduğu düşünüldüğünde her iki tasarım da güvenli ve sağlam tasarımlar değerlerine sahip çıkmıştır.



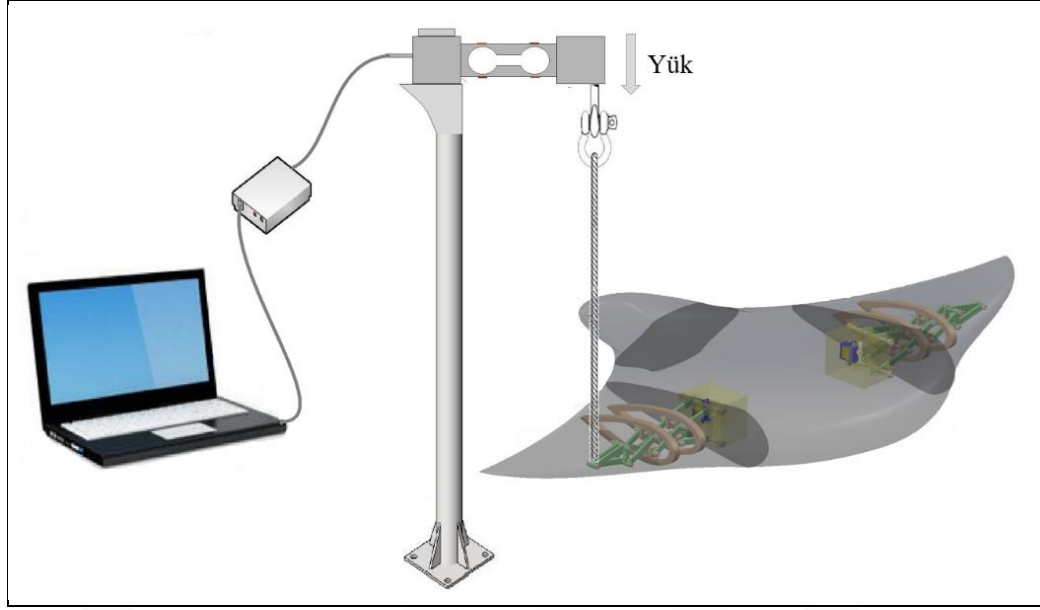
Şekil 4.3: Von Mises gerilme dağılım analizi



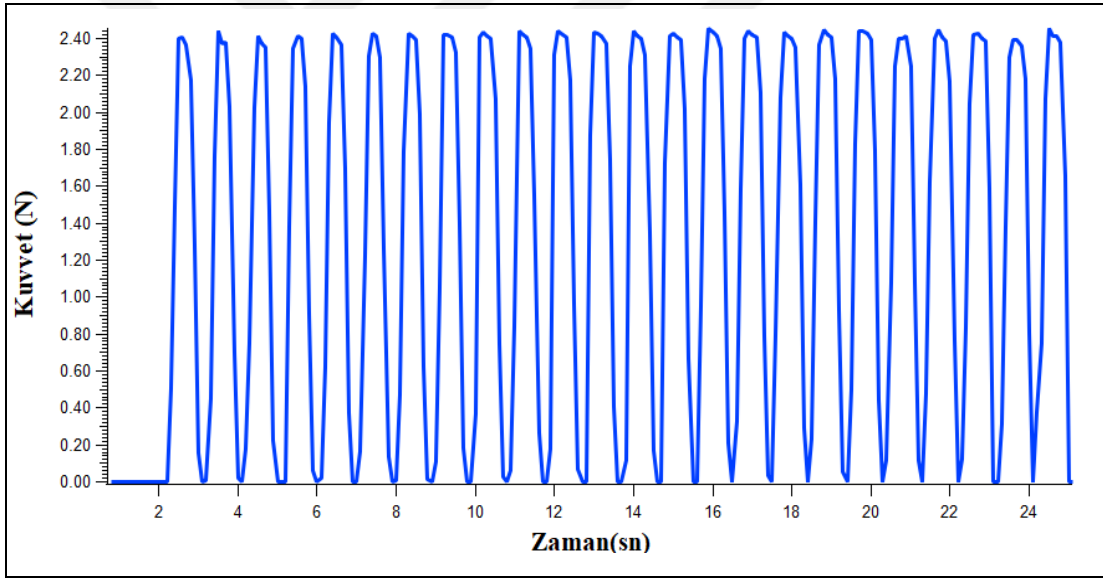
Şekil 4.4: Von Mises gerilme dağılım analizi ve lokal maksimum gerilme dağılımı

4.2 Prototipi Geliştirilen Robotun Kanat İlk Tasarımından Elde Edilen Prototip Üzerinde Kuvvet Testi

Robotun kanadının suya karşı uygulayabileceği kuvveti ölçmek için Şekil 4.5'deki test düzeneği kurulmuştur. Test düzeneğinde loadcell yani yük hücresi sensörü kullanarak kanat ucundaki kuvvet ölçülmüştür. Kanadın uyguladığı ortalama kuvvet 2.4 N. olarak görülmektedir. Veriler alınırken kanat aşağı doğru hareketi sırasında oluşan gerginlik kuvveti sayesinde veriler alınmıştır. Alınan veriler Şekil 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.5: Kanata uygulanan kuvveti ölçmek için hazırlanan düzenek

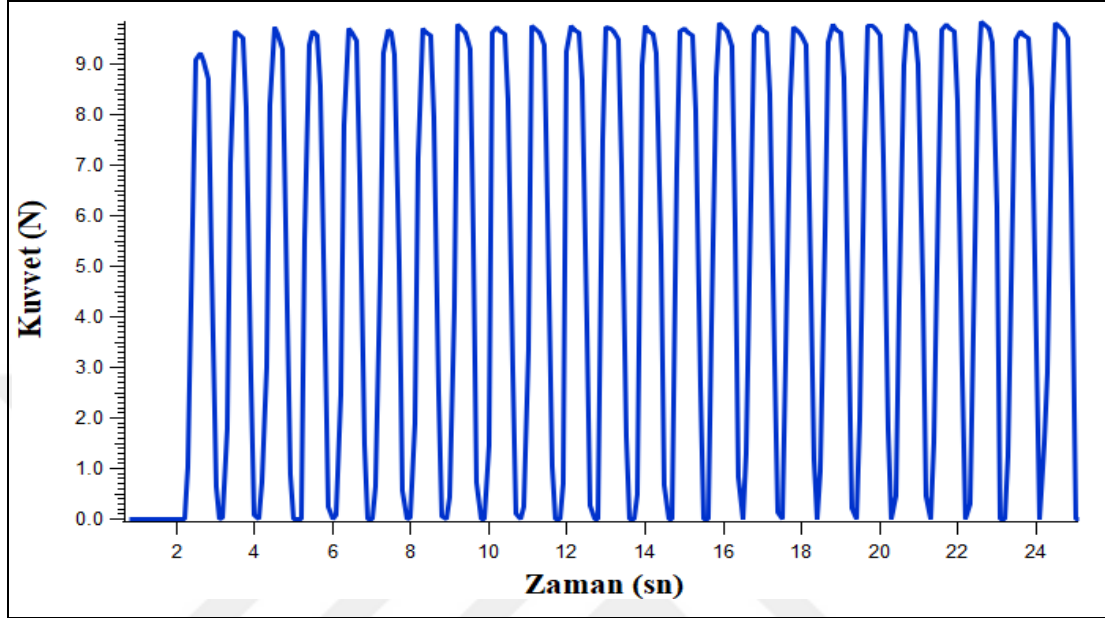


Şekil 4.6: Kanatın uyguladığı kuvvet-zaman grafiği

4.3 Prototipi Geliştirilen Robotun Kanat ve Kuyruk Alt Sistem Kuvveti

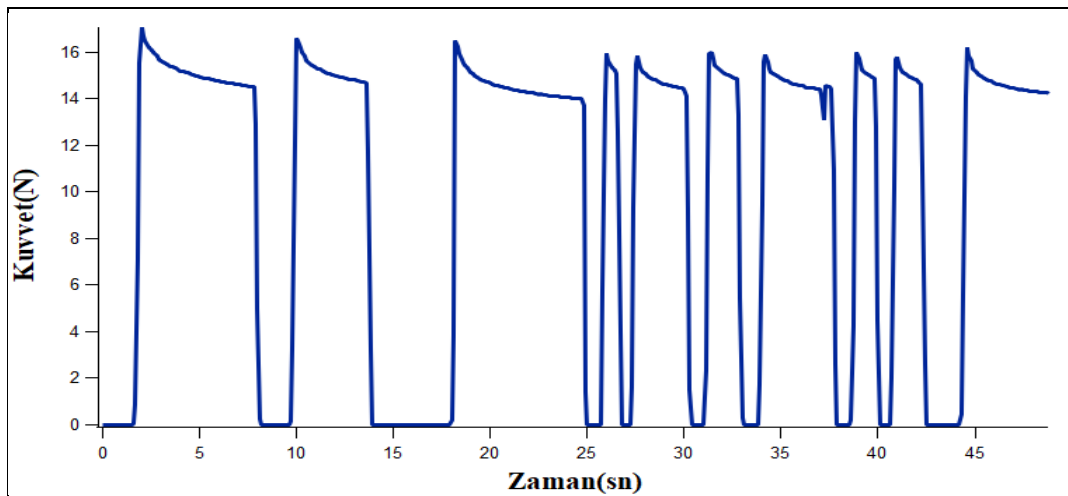
Robotun kanadının suya karşı uygulayabileceği kuvveti ölçmek için test düzeneği tekrar kurulmuştur. Test düzeneğinde yük hücresi sensörü kullanarak kanat ucundaki kuvvet ölçülmüştür. Kanadın uyguladığı ortalama kuvvet 9,6 N. olarak görülmektedir. Veriler alınırken kanat aşağı doğru hareketi sırasında oluşan gerginlik sayesinde veriler alınmıştır. Yani kanat her aşağı inmede bir maksimum gerilme oluşmaktadır. Kanatın aşağıdan yukarı çıkıp sonrada tekrar aşağı indiği nokta bir

periyottur. Bu periyodun Hz. cinsinden hızını da bulabiliriz. $F = 1/ T$ frekans formülüdür. Yukarıda periyot süreleri 1200 milisaniye olduğu okunmaktadır. $F =1/ 1200$ ise $F=0,83$ Hz. olarak kanat çırpma frekansı bulunur. Yük hücresinden 'den alınan veriler Şekil 4.7'de görülmektedir.



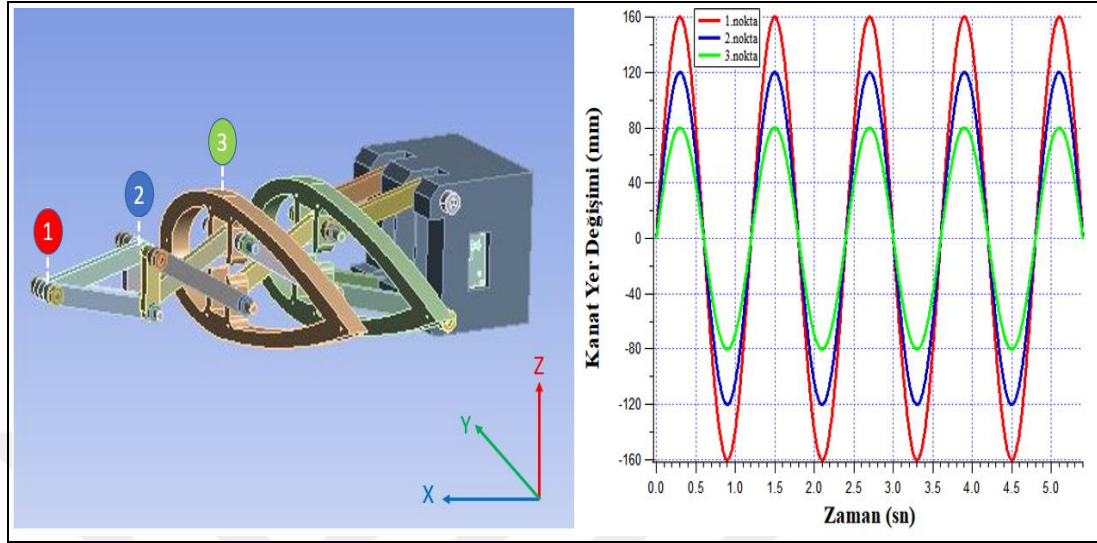
Şekil 4.7: Kanatın uyguladığı kuvvet-zaman grafiği

Kuyruk hareketi belirli periyotlarda değil sadece istenildiği zamanlarda hareket ettirildiği için alınan verilerdeki süreler değişiklik göstermektedir. Yük hücresi yardımı ile alınan veriler de maksimum gerilme kuvveti 16 N.'dur. Verilerin grafiksel görünüşü Şekil 4.8'de görülmektedir. Grafikte görüldüğü gibi uygulanan kuvvetin süresi isteğe bağlıdır. Periyotların genişliklerini farklı boylarda olması bu sebeptendir.



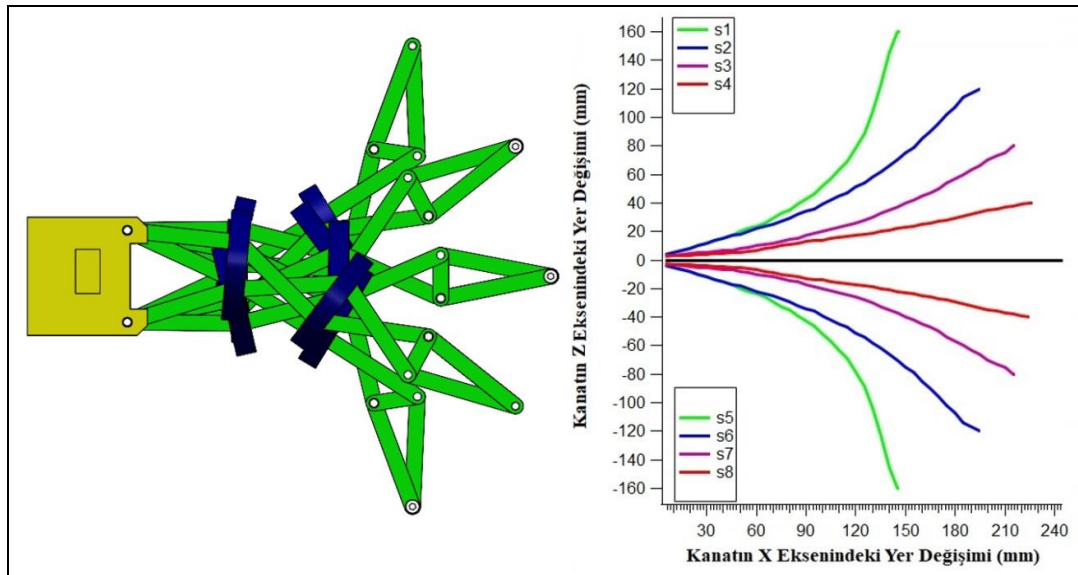
Şekil 4.8: Kuyruğun uyguladığı kuvvet-zaman grafiği

Kanatların ve kuyruğun uygulayabildiği kuvvetler robotun su içerisinde hareketini sağlayabilecek güçtedir. Yük hücresi verileri alındıktan sonra silikon kaplama işlemine geçilmiştir.



Şekil 4.9: Ansys'de hesaplanan kanat bükülme yer değiştirme grafiği

Şekil 4.9'da kanadın gövdeye doğru olan uzantısında üç nokta belirlenmiştir. Bu noktaların yukarı ve aşağı bükülme sırasındaki zamana karşı oluşturduğu yer değiştirme salınımlarının grafiği çıkarılmıştır.

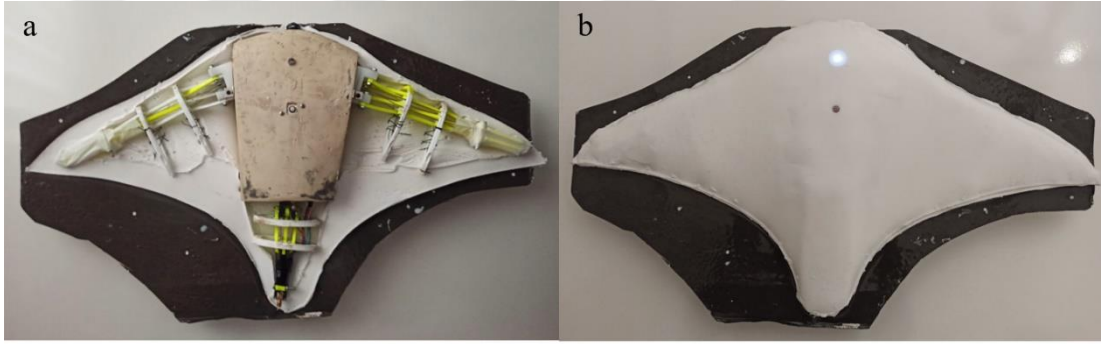


Şekil 4.10: Biyo-ilham robot kanadının dikey ekseninde çalışma uzayı

Şekil 4.10'da balığın yukarı ve aşağı kanat çırpma sırasında servo motorların belli açılarda kanatın oluşturduğu bükülme görüntüleri verilmiştir. Grafikteki s1:180°, s2:157,5°, s3:135°, s4:112,5°, s8:67,5°, s7:45°, s8:22,5° noktaların dereceleri verilmiştir. Bu dereceler kanatların servo motorların derecelerini temsil etmektedir.

4.4 Prototipi Geliştirilen Robotun İskelet Sisteminin RTV-2 Silikonu ile Kaplanması ve Sızdırmazlık Testleri

RTV-2 (Room temperature vulcanisation, Oda sıcaklığında tepkimeye giren) silikon oda sıcaklığında reaksiyona giren ve istenilen sertlikte oluşturulabilen kauçuk malzemelerdir. Robot fiberden üretilen kalıbın formunu alması için RTV-2 kalıp silikonu ile kaplanmıştır. 1 kg silikona %2 katalizör eklenerek kimyasal tepkime hızını artırmaktadır. Uygulama iki aşamalı kaplama işlemi ile gerçekleştirilmiştir. Önce robotun alt tarafı için silikon kalıp çıkartılmıştır [40]. Daha sonra üst tarafı için ayrı bir silikon kalıp çıkartılmıştır. Robot iki silikon kalıp içerisine yerleştirilmiştir. İki kalıp ek yerlerinden aynı tür silikon ile birleştirilerek kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan silikon 2 kg ağırlığındadır. Şekil 4.11'de silikon kaplama aşamaları verilmiştir.



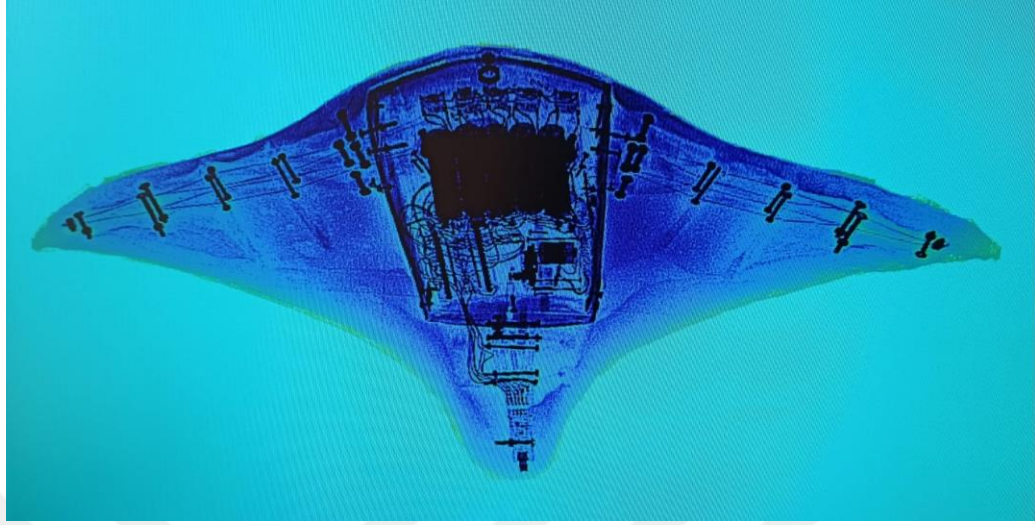
Şekil 4.11: Biyo-ilham robotun silikon kaplama aşamaları



Şekil 4.12: Biyo-ilham robotun silikon kaplandıktan sonraki son hali

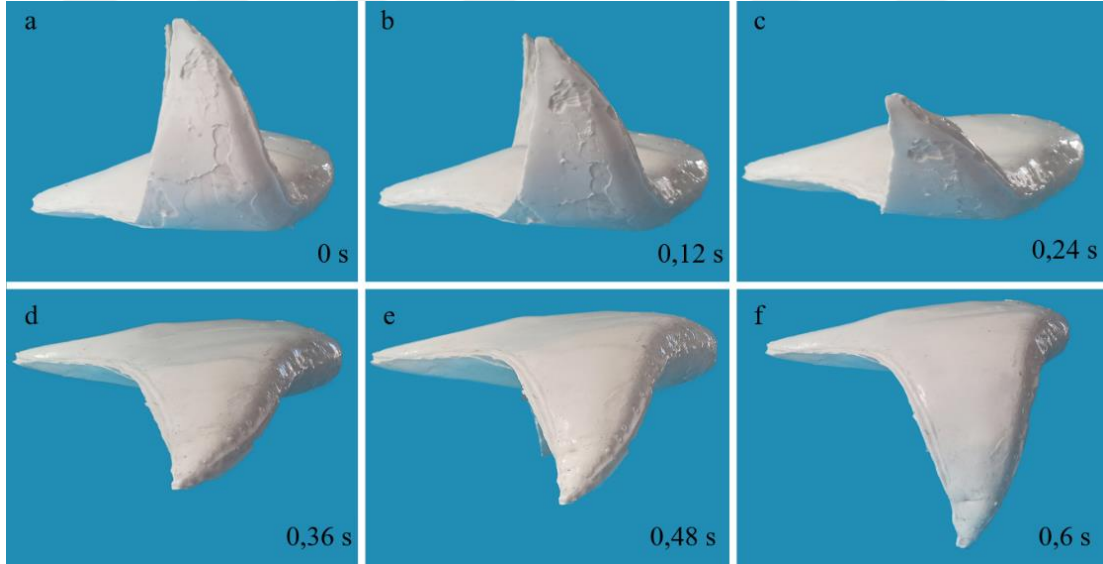
Biyo-ilham tekniği ile üretilen robotun görünüşü çizim programında tasarlandığı gibi vatoz balığına benzer şekilde üretilmiştir. Üretilen biyo-ilham robotu Şekil 4.12'de gösterilmiştir. RTV-2 silikonu ile kaplanan su altı robotunun sızdırmazlık testleri 24

saat boyunca su içerisinde bekletilmesi ile yapılmıştır. Sızdırmazlık testi sonrası robota enerji verildiğinde robot sorunsuz bir şekilde çalışmıştır.



Şekil 4.13: Robotun silikon kaplandıktan sonra X-Ray görüntüsü

Şekil 4.13’de robotun X-ray altında silikon kaplamasının içerisinde mekatronik sistemin nasıl yerleştiği görüntülenmiştir. Metal parçalar plastik parçalara göre daha belirgin olarak görülmüştür. RTV-2 silikonunun yoğunluğunun fazla olduğu yerler daha koyu mavi olarak görülmüştür.



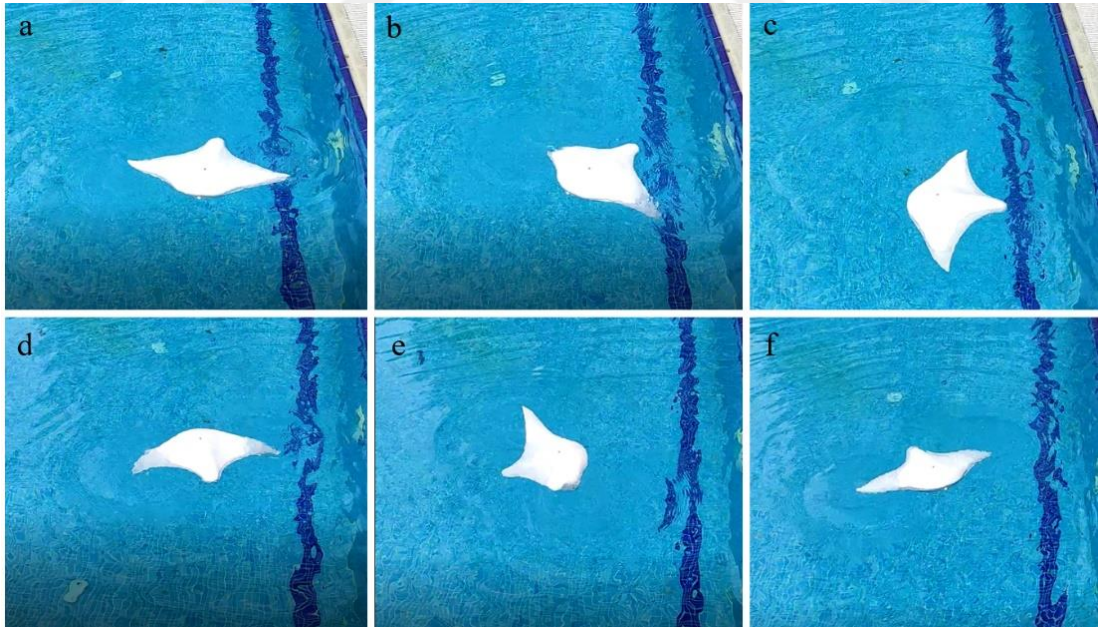
Şekil 4.14: Prototipi üretilen vatoz balık modelinin pektoral yüzgeçlerinin ardışık hareketleri

Biyo-ilham su altı robotu denemeleri sırasında pektoral yüzgeçlerin ardışık hareketleri incelenmiştir. Robotun kanat çırpma süresi ayarlanabilmektedir. Şekil 4.14’de biyo-ilham robotun bir periyotluk kanat çırpma işlemi sırası ile verilmiştir.

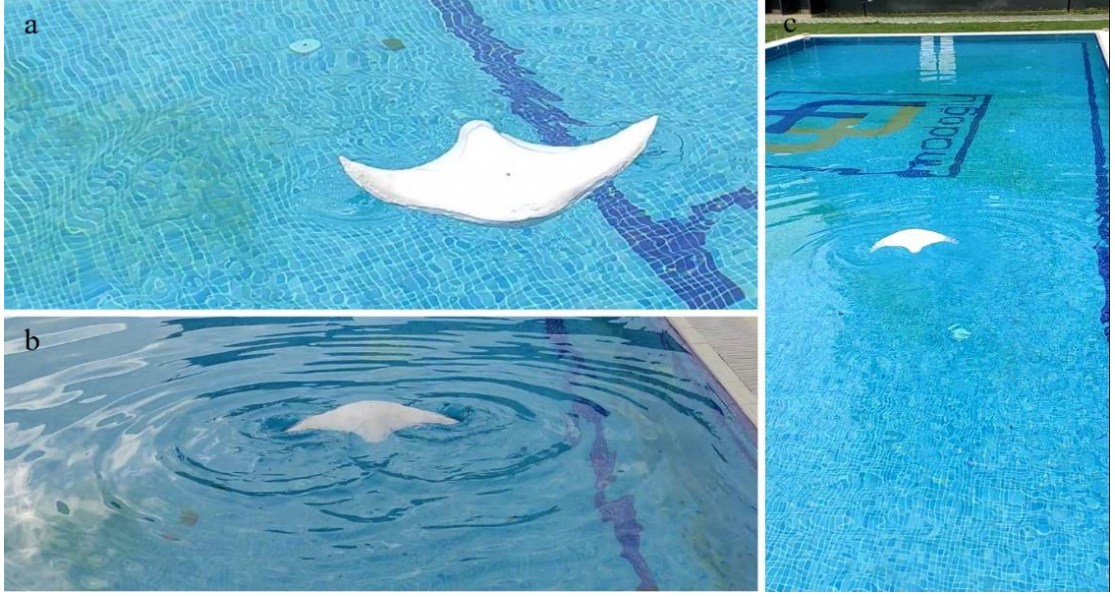
Kanat çırpma hızının ayarlanabilir yapılmıştır. Ayarlanabilir yapılmasındaki amaç robot su içerisindeki en iyi ilerleme frekansının bulunabilmesidir. Robotun bir periyotluk kanat çırpma süresi 0,7 s ile 2,7 s arasında ayarlanabilmektedir. Yapılan testlerin tümünde frekans 0,83 Hz olarak ayarlanmıştır. Bu frekans süreye çevrildiğinde 1,2 s olarak hesaplanmıştır.

4.5 Prototipi Geliştirilen Robotun Suda Yüzdürölme Testleri

Vatoz balığı sızdırmazlık testleri sonrasında su içine batmaması için suyun yüzeyinde durabildiği test edilmiştir. İpler yardımıyla suya indirilerek su içine batmadığı gözlemlenmiştir. Suya batma riski olmadığı tespit edildikten sonra havuz içinde denemelere geçilmiştir. Öncelikle kıyıya yakın alanda dönme manevraları denenmiştir. Denemeler süresince dönüş manevralarını istenilen düzeyde gerçekleştirebilmiştir. Şekil 4.15 'de havuzda dönüş hareketi denemeleri sırasında görüntüler alınıp teze aktarılmıştır. Uzun mesafeli ilerleme denemelerine geçilmiştir. Robot su içerisinde ilerlerken sağa veya sola yönlendirmeler yapılabilmiş ve Şekil 4.16'da paylaşılmıştır. Robotun 10 m mesafeyi 80 saniye içerisinde geçmiştir. Bu hesaplamalara göre robotun hızı 0,125 m/s olarak bulunmuştur.



Şekil 4.15: Robotun havuzda dönüş hareketi denemeleri sırasında görünümü



Şekil 4.16: Robotun havuz içinde denemelerinin görünümü

Çizelge 4.2: Literatür taramaları ve üretilen prototip karşılaştırılması

Robot Adı	Boyut (mm)	Hız
Şekil Bellekli Alaşım Aktüatörlü Robotik Vatoz Balığı	40x-x-	57 mm/s
Pnömatik Kauçuk Tahrikli Robotik Vatoz Balığı	170x150x-	100 mm/s
Elektro Aktif Polimer Tahrikli Robotik Vatoz Balığı	11x21x-	0,74 cm/s
Virginia Üniversitesi Tarafından Geliştirilen Vatoz Balığı	43x63x-	0,35 m/s
Singapur Ulusal Üniversitesi Tarafından Geliştirilen Vatoz Balığı	35x63x-	0,7 m/s
Evologics Boss Firmasının Tasarladığı Manta Ray Vatoz Balığı	-	-
Aqua Ray	-	-
Manta Ray Robot	-	-
Prototipi geliştirilen Biyo-ilham sualtı robotu	640x350x80	0,125 m/s

	Kanat Tahriki ŞBA malzemeli Yılı 2019		Kanat Tahriki Pnömatik Kauçuklu Yılı 2007		Kanat Tahriki IPCM elektrotlu Yılı 2012												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Boyut</th> <th>Hız</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>40x-x-</td> <td>57 mm/sn</td> </tr> </tbody> </table>	Boyut	Hız	40x-x-	57 mm/sn		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Boyut</th> <th>Hız</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>170x150x-</td> <td>1 cm/sn</td> </tr> </tbody> </table>	Boyut	Hız	170x150x-	1 cm/sn		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Boyut</th> <th>Hız</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11x21x-</td> <td>0,74 cm/sn</td> </tr> </tbody> </table>	Boyut	Hız	11x21x-	0,74 cm/sn	
Boyut	Hız																
40x-x-	57 mm/sn																
Boyut	Hız																
170x150x-	1 cm/sn																
Boyut	Hız																
11x21x-	0,74 cm/sn																
	Kanat Tahriki Açısal Makaslı Yılı 2012		Kanat Tahriki Servo motor Yılı 2015		Kanat Tahriki Fin Effects Ray Yılı 2018												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Boyut</th> <th>Hız</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>43x63x-</td> <td>0,35 m/sn</td> </tr> </tbody> </table>	Boyut	Hız	43x63x-	0,35 m/sn		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Boyut</th> <th>Hız</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>35x63x-</td> <td>0,7 m/sn</td> </tr> </tbody> </table>	Boyut	Hız	35x63x-	0,7 m/sn		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Boyut</th> <th>Hız</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>	Boyut	Hız	-	-	
Boyut	Hız																
43x63x-	0,35 m/sn																
Boyut	Hız																
35x63x-	0,7 m/sn																
Boyut	Hız																
-	-																
	Kanat Tahriki Yapay Kas Makaralı Yılı 2008		Kanat Tahriki Hava odacıklı Yılı 2016		Kanat Tahriki Açısal Makaslı Yılı 2020												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Boyut</th> <th>Hız</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>61x96x14</td> <td>0,5 m/sn</td> </tr> </tbody> </table>	Boyut	Hız	61x96x14	0,5 m/sn		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Boyut</th> <th>Hız</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>	Boyut	Hız	-	-		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Boyut</th> <th>Hız</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>640x350x80</td> <td>0,125 m/sn</td> </tr> </tbody> </table>	Boyut	Hız	640x350x80	0,125 m/sn	
Boyut	Hız																
61x96x14	0,5 m/sn																
Boyut	Hız																
-	-																
Boyut	Hız																
640x350x80	0,125 m/sn																

Şekil 4.17: Üretilen prototipin literatürdeki diğer su altı biyo-ilham robotları ile karşılaştırılması

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Vatoz balığı hareketleri incelenerek biyoilham ile geliştirilen sualtı robotun mekatronik sistem tasarımı ve analizi başlığı altında yaptığımız bu çalışma, su canlılarının en iyi şekilde görünüşü ve hareket kabiliyeti açısından teorik, analiz ve uygulama olarak kapsamlı bir içeriğe sahiptir. Bu alanda çalışma yapacak kişi ve kurumlara faydalı olabilecek çok yönlü bir kaynak üretilmiştir. Çalışmada içerik olarak vatoz balığı robotunun biyo-ilham tekniği ile tasarlanıp üretilmesi için gerekli en iyi mekatronik tasarımı oluşturmak ve bu tasarımı üretilen simülasyon ve alınan veriler ile desteklenmesidir. Çalışmaya başlanılmadan önce bu alanda yapılan tüm çalışmalar incelenmeye çalışılmıştır. İncelenen çalışmalardan yararlanılan ve çalışmaya ışık tutabilecek olanlar tez içeriğine eklenmiştir. Literatür araştırmaları sonucunda vatoz balığının hareket kabiliyetini sağlayan faktörlerin kanatlar ve kuyruk olduğu anlaşılmıştır. Vatoz balıkları da kanatlarını aynı uçaklardaki gibi reaksiyon kuvvetini oluşturmak için kullandıkları görülmüştür. Kanatlar hareket kabiliyetini kuyruk ise batma ve çıkma görevini üstlenmiştir. Bu nedenle kanat ve kuyruk tasarımı çalışmada önem kazanmıştır. Biyolojik olarak vatoz balığı kanadı ve gövdesi incelenmiştir. Vatoz balığı gövde hatları oranları ve kanadın gövdeye olan açışı gibi bilgiler tasarım için örnek alınmıştır. Kanatların şekil hatları gövdeden uca doğru gradyan bir şekilde incelenmektedir. Uçak kanatlarının airfoil tasarımına benzediği için kanat tasarımında NACA protokolü baz alınarak tasarım yapılmıştır. Vatoz balığı pektoral kanat hareketleri incelendiğinde kanat salınımları ve ardışık hareketleri bir uyum içindeki görülmüştür. Kanat dikey radyal salınımlar yaparken oluşturduğu hareketlerin elastikliğini yakalayabilmek için yapılan ilk çalışmada 2 mm kalınlığında bir tel ile yapılan uygulama istenilen hareketi tam sağlayamasa da kullanılabilir bir hareket kabiliyeti sağlamıştır. Fakat kanatın her noktasında aynı bükülme lineer şekilde oluşmuştur. Bu yüzden kanat hareketlerini daha hassas biçimde taklit edilebilecek bir mekatronik tasarım düşünülmüştür. Araştırmalar içerisinde serbestlik dereceli katlanabilir açılabilir mekanizmaları dikkat çekmiştir. Açılabilir mekanizmaları eklenebilir ve rotasyonel modüler sistemlerdir. Kablolar yardımıyla açılabilir mekanizmaları içbükey ve dışbükey

olarak yöneltilebilmektedir. Makas mekanizmasını rotasyonel özelliği kullanılarak kanat tasarımı oluşturulmuştur. Tasarımlar Autodesk Fusion 360 programı ile çizilmiştir. İki modüllü konfigürasyon oluşturularak denemeler yapılmıştır. İlk denemelerde mekanizmada kasmalar ve makas kirişlerinde sürtünmeler yaşanmıştır. Bu konu çapraz kirişlerin airfoil mafsallara bağlantı noktasındaki değişiklik sayesinde giderilmiştir. Tekrarlanan denemeler istenildiği gibi sonuçlanmış ve tasarım altılı modül kullanılarak tekrar dizayn edilmiştir. Bir servo motor sayesinde mekanizmanın kabloları gerdirilerek istenildiği yönde rotasyonel hareket ettirilebilmiştir. Makas mekanizmalarında kullanılan servo motorların sahip olduğu tork 1,5 N/m seçilmiştir. Tasarımın Ansys programı ile Von Mises gerilme dağılımı ve toplam yer değiştirme analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları 59 MPa akma dayanımına, 1,7 güvenlik faktörüne sahip çıkmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar parçaların üç boyutlu yazıcıda üretilmesi için kabul edilebilir seviyede olduğu görülmüştür. Kanat mekanizmasındaki parçalar üç boyutlu yazıcı sayesinde PLA filament malzemesinden üretilmiştir. Parçalar daha sonra cıvatalar yardımıyla birleştirilerek denemelere hazırlanmıştır. Üretilen kanatın yer değiştirmesi ile Ansys programındaki simülasyonunun yer değiştirmesi neredeyse aynı çıkmıştır. Kanatın en uç noktaya uygulayacağı kuvvet bir yük hücresi yardımıyla ölçülmüştür. Kanatın maksimum 2,4 N kuvvet uyguladığı görülmüştür. Ölçülen bu kuvvetin çok düşük olduğu ve mekanizmanın su içerisinde yeterli olmayacağı kanısına varılarak mekanizmada değişikliğe gidilmesi planlanmıştır. Servo motorun kabloyu gerdirme gücü yetmediği için servo motorun daha güçlü bir versiyonu ile değiştirilmesi gerekmiştir fakat aynı ölçülerde torku daha yüksek motor bulunmadığı için kanadın uzunluğu kısaltılarak kuvvet ihtiyacı azaltılmıştır. Yedili makas mekanizması dördü makas mekanizmasına indirgenmiştir.

Kanadın boyu kısaldığı için robotun boyutları da doğru orantılı olarak değişmiştir. Vatoz balığının gövdesinin elastik bir yapıda olması ve kanat çırpabilmesi için silikon bir gövde oluşturulması düşünülmüştür. Vatoz balığının mekatronik sistemi silikon ile kaplanacağından bir kalıba ihtiyaç duyulmuştur. Vatoz balığının tasarlanan şekli CNC'de strafora işlenmiş ve model alınmıştır. İşlenen strafor üzerinden iki adet fiber kalıp alınmıştır. Fiber kalıbın içerisine alçı döküm yapılarak robotun alçıdan bir prototipi oluşturulmuştur. Bu prototip kanat, kuyruk ve gövde olmak üzere üç parçaya ayrılmıştır. Balığın kanat ve kuyruklarının bağlanacağı

gövde alçıdan dökülen prototipin parçalara ayrılmasıyla ortaya çıkan parçalardaki gövdenin üzerine epoksi kimyasal maddesi kaplamasıyla üretilmiştir. Alçıdan üretilen gövdenin üzerine tek kat sargı bezi sarılarak epoksi kimyasal macun ile kaplanmıştır. Macun kurduktan sonra üç kat daha aynı işlem uygulanmıştır. Daha sonra yüzey çelik macunu ile üzeri tekrardan kaplanmıştır. Tam kuruma elde edildikten sonra yüzey zımparalanarak pürüzsüz hale getirilmiştir. Kaplama yatay olarak tam ortadan kesilip kalıbın içindeki alçı parça çıkartılmıştır. Ortaya çıkan bu kalıp robotun gövdesinin taşıyıcı şasesini oluşturmuştur. İki parçadan oluşan kalıbın içine kanatları ve kuyruğu hareket ettirecek servo motorların kalıba montajı yapılmıştır. Diğer elektronik malzemeler nrf24I01 (2,4 Ghz.) RF modülü, Arduino Nano modülü, Batarya ve şarj modülü, Power LED yerleştirilmiştir. Robotun tamamı silikon ile kaplanacağı için bataryayı şarj etmek büyük bir sorun çıkartmıştır. Bu sebeple 2 A kablosuz şarj modülleri kullanılarak cihaza kablosuz şarj olabilmeye özelliği eklenmiştir. Batarya 10800 mA kapasiteye sahip seçilmiştir. Cihaz maksimum güç tüketiminde yaklaşık 2300 mA akım çektiği ölçülmüştür. Cihazın tüm elektronik sistemi 5 V besleme ile çalışacak şekilde ayarlanmıştır. Kullanılan piller 3,7 V 18600 serisi Lityum-İyon pil olarak seçilmiştir. Pillerin 3,7 V' dan 5 V' ta yükseltilebilmesi için DC-DC çeviriciler kullanılmıştır. DC-DC çeviricilerin bir tanesi maksimum 2 A akım geçirebildiği için beş adet paralel DC-DC çevirici bağlandı bu sayede devreye 10 A akım akıtılabilme imkânı sağlanmıştır. Çünkü 3,7 V ile beslenen servo motorlar güç kaybına uğrayacağı düşünülmüştür. Piller deşarj oldukça 3 V seviyesine düşeceği için elektronik cihazlarında çalışmasını etkileyebilmektedir. DC-DC çeviriciler sayesinde piller deşarj olsa bile devre beslemesi 5 V stabil olmuştur. Cihazın elektronik devreleri tam kararlı olarak çalışmıştır. Vatoz balığı elektronik sistemleri sürekli voltaj altında tutulmaması için açma-kapama düğmesi eklenmiştir. RF modülü motorlardan yayılan manyetik gürültülerden dolayı düzgün çalışmamıştır. Modüller ve motorların arasındaki kablolar koaksiyel kablolarla değiştirilerek ve RF modülü gövdenin dışında kuyruğa yerleştirilerek sorun giderilmiştir. Arduino İDE programında balığın yazılımı yazılıp işlemciye yüklenmiştir. Kontrol kumandası robota özel olarak tasarlanmıştır. Kumanda üzerinde joystick, aç-kapat anahtarı, lineer potansiyometre ve LED aç-kapat anahtarı yerleştirilmiştir. Joystick batma-çıkma, sağ-sol dönme işleminde kullanılmıştır. Aç-kapat anahtarlarından birisi kumandayı açıp kapatmak için diğeri ise LED'i açıp kapatmak için kullanılmıştır. Lineer potansiyometre ise kanat çırpma

hızını ayarlamak için kullanılmıştır. Kumanda ve Vatoz balığı arasındaki RF haberleşme modülleri SPI protokolü ile haberleşmiştir. Haberleşme hızı 2,4 GHz frekansa sahiptir. Nrf24l01 modülünün antenli ve güçlendirilmiş modeli kullanılmıştır. Modülün yaydığı RF sinyalleri hava ortamında 1 km mesafe haberleşme sağlayabilmektedir. Elektronik elemanların gövdeye yerleştirilme işlemi bittikten sonra herhangi bir su sızması yaşanıp elektronik cihazlara zarar vermemesi için elektrik izolasyon spreyi ile tüm elektronik elemanların üzeri kaplanarak koruma altına alınmıştır. Gövde içerisinde herhangi bir nemlenme oluşmaması için nem alıcı tablet yerleştirilmiştir. Dört hücreli kanat tasarımı gövdeye yaklaşık 20° bir açıyla bağlanmıştır. Kuyruk mekanizması ise iki hücreli makas mekanizması kullanılarak gövdeye 90° açı ile bağlanmıştır. Servo motorun miline bağlı yarıçapı 17 mm ölçülerinde olan kasnağa bağlı 0,35 mm kalınlığındaki çelik tel kanatın en uç noktasına sabitlenmiştir. Kanatlar ve kuyruk motorlarının miline bağlı kasnakların telleri gerdirmeleriyle kanatlarda yukarı ve aşağı çırpma hareketi oluşmaktadır. Kanat hareketleri sırasında kablolarda maksimum yer değiştirme mesafesi 25 mm uzunluğundadır.

Kanatların bağlantı işlemi tamamlandıktan sonra gövde üst kapağı da kapatılarak civatarla sabitlenmiştir. Robotun gövde üzerindeki tüm montaj işlemleri bitmiştir. Robot silikon kaplamadan önce toplam 1,5 kg olarak ölçülmüştür. Dört hücreli kanat mekanizması ve iki hücreli kuyruk mekanizmasının uygulayabildiği kuvvetler bir yük hücresi yardımıyla ölçülerek veriler elde edilmiştir. Elde edilen veriler grafiklere işlenmiştir. Kanatın son tasarımından sonra uyguladığı kuvvet 9,6 N kuyruğun ise 16 N olarak yükselmiştir. Bu kuvvet robotun su içerisinde hareket edebilmesi için yeterli bir kuvvet olduğu düşünülmüştür. Ansys programında kanadın en uç noktası, orta noktası ve kök noktasından zamana bağlı kanat yer değiştirme grafiği çizilmiştir. Aynı zamanda kanadın x ve z eksenleri arasındaki yer değiştirme grafiği de çizilmiştir. Kanat z ekseninin hem +z hem de -z ekseninde yer değiştirme sağlamıştır. Bu yer değiştirme servo motorlarının ucuna bağlı kasnaklarının açılarına göre değişmektedir. Kanatlar sabitken servo motor açısı 90° bulunmaktadır. Servo motor açısı 180° iken kanat maksimum +z yönünde olduğu görülmüştür. Servo motor 0° iken kanat maksimum -z yönünde olduğu görülmüştür. Servo motor açısı 0-180° arasında konumlandırıldığında robot kanat çırpma hareketini gerçekleştirmiştir. Kanatın maksimum bükülme z yönünde +160mm ve -160mm olduğu grafiklerde ve

denemelerde gözlemlenmiştir. Gerekli veriler alındıktan sonra robotun üzerine silikon kaplama işlemine geçilmiştir. Silikon kaplama işlemi iki aşamalı olarak yapılmıştır. Silikonun kalıba yapışmaması için kalıp ayırıcı sprey kullanılmıştır. RTV-2 silikonu çift karışımlı bir maddedir. Silikona karıştırılan katalizör hızlı kimyasal tepkimesini sağlamıştır. Katalizör madde %2 oranında karıştırılmıştır. Önce robotun fiber kalıp yardımıyla alt tarafı silikonla kaplanmıştır. Silikonun toplamda kuruma süresi 8 saat sürmüştür. Silikon kuruyunca üst taraf da kaplanmıştır. Alt ve üst silikonların ek yerleri yine aynı silikon yardımıyla birleştirilmiştir. Birleştirme işleminden önce yapışacak yüzeyler zımpara ile pürüzlü hale getirilmiştir. Bu işlem yapışan parçaların daha kuvvetli birleşmesini sağlamıştır. Robotun üzerinin kaplanması için 2 kg silikon harcanmıştır. Robotun son halinin ağırlığı toplam olarak 3,5 kg olarak ölçülmüştür. Robot tekrar çalıştırılarak su dışında hareketleri incelenmiştir. Herhangi bir sorun görülmemiştir. Robotun sızdırmazlığı su içerisinde 24 saat tutularak test edilmiştir. Robotun üst kısmındaki kırmızı renkli düğme robotu açıp kapatmak için kullanılmıştır. Şarj aleti ile şarj denemeleri tekrarlanmış cihazın pillerinin sorunsuz şarj olduğu görülmüştür. Robotun üst kısmındaki LED üç renkli olarak seçilmiştir. Mavi ışık yandığında cihaz kullanıma hazır, kırmızı ışık yandığında cihazın şarj olduğu, yeşil ışık yandığında şarjın dolu olduğu anlamı verilmiştir. Robotun X-Ray cihazı ile görüntüleri alınmıştır. Bu sayede silikon kalıp içerisine mekatronik sistemin nasıl yerleştiği detaylı bir şekilde görülebilme imkânı sağlanmıştır. Robot denemelerde havuzun dibine batmaması için iplerle bağlanarak su içerisine bırakılmıştır. Robotun su içine batmadığı görüldüğünde ipler çıkartılarak tekrar su içerisine bırakılmıştır. İlk denemeler sağa ve sola dönme manevralarını gerçekleştirebilmiştir. Denemeler sırasında alınan resimler teze aktarılmıştır. Robot dönme hareketlerini sağlıklı bir şekilde gerçekleştirildiği görüldüğü için ileri yönde ilerleme hareketlerine geçilmiştir. Biyo-ilham su altı robotu 10 m mesafeyi 80 saniye içinde yol almıştır. Robotun yüzme hızı 0,125 m/s olarak hesaplanmıştır. Gelecek çalışmada, geliştirilen biyo-ilham su altı robotunun haberleşme hızı ve mesafesinin artırılması, su içerisindeki pektoral kanat çırpma tahriki sayesinde yüzme hızının artırılması hedeflenmektedir. Silikon kaplama işlemlerinin daha pratik yollarla uygulanması, su içerisinde akış analizlerinin yapılması ve kanat makas-mafsals mekanizmasının ömür hesaplamalarının yapılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] **Cai W.H., Zhan J.M., Luo Y.Y.,** (2020). “A study on the hydrodynamic performance of manta ray biomimetic glider under unconstrained six-dof motion.” PLOS One 15(11): e0241677.
- [2] **Wang, Z., Wang, Y., Li, J. & Hang, G.,** (2019). “A micro biomimetic manta ray robot fish actuated by SMA”, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), IEEE, pp. 1809–1813.
- [3] **Suzumori K., Endo, S., Kanda, T., Kato, N., & Suzuki, H.,** (2007). “A bending pneumatic rubber actuator realizing soft-bodied manta swimming robot”. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4975-4980.
- [4] **Chen Z., Um T. I., Bart-Smith H.,** (2012).” Bio-inspired robotic manta ray powered bionics polymer–metal composite artificial muscles”, International Journal of Smart and Nano Materials, vol. 3, no. 4, pp. 296-308, 2012/12/01.
- [5] **Liu G., Ren Y., Zhu J., Bart-Smith H., Dong H.,** (2012). “Thrust producing mechanisms in ray inspired underwater vehicle propulsion.” University of Virginia, Charlottesville, VA 22904, USA.
- [6] **Sun G., Arastehfar S., Meng C. C., Hao L.,** (2015). “Development of Propulsion Mechanism for Robot Manta Ray National Universty of Singapore.
- [7] **Glushko I., Olenew E., Komar M., Kniese L., Sokolovskyi R., Kebkal O., Bannasch R., Kebkal K.,** (2018). “Software Control Architecture for the BOSS Manta Ray AUV Actuation System “ IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV) pp. 4-9.
- [8] **Stoll W., Bannasch R., Kniese L., Prietzel F., Drews J.,** (2012). Evologics GmbH, Berlin, Germany Hartmut Schwenk, Faculty of Bionics and Evolution Technology, Technical University of Berlin, Germany.
- [9] **Schmidt N., Franzini G., Fuller J., Price J.,** (2016). “A Major Qualifying Project Submitted to the Faculty of Worcester Polytechnic Institute in Partial Fulfillment of the Requiremen. Ts for the Degree in Bachelor of Science in Robotics & Mechanical Engineering.
- [10] **Du R., Li Z., Toumi K.Y., Alvarado P.V.Y.,** (2015). Robot fish: bio-inspired fish like underwater robots, Springer.
- [11] **Deng Y.,** (2014). “A Bio-inspired Swimming Robot Concept Design for Marine Aquaculture Applications” Aalesund University College -Aalesund.
- [12] **Bigelow, H.B., Schroeder, W.C.,** (1953). “Sawfishes, guitarfishes, skates and rays.” In Fishes of the Western North Atlantic, New Haven: Sears Foundation for Marine Research.

- [13] **Daniel T., Jordan C., Grunbaum, D.,** (1992). “Hydromechanics of swimming.” In *Advances in Comparative and Environmental Physiology*, vol. 11, *Mechanics of Animal Locomotion*, pp. 17- 49, Berlin: Springer-Verlag.
- [14] **Fish F.E., Schreiber C.M., Moored K.W.,** (2016). “Hydrodynamic performance of aquatic Flapping: efficiency of underwater flight in the manta.” *Aerospace*, 3(3): 20.
- [15] **Yang S., Han X., Qiu J.,** (2009). “Kinematics Modeling and Simulation of Pectoral Locomotion in Batoid Fish.” *Journal of National University of Defense Technology*.
- [16] **Frank E., Christian M., Keith W., Liu G., Dong H., Bart-Smith H.,** (2016). “Hydrodynamic Performance Of Aquatic Flapping: Efficiency Of Underwater Flight In The Manta.”
- [17] **Heine C.,** (1992), “Mechanics of flapping fin locomotion in the cownose ray, *Rhinoptera bonasus* (Elasmobranchii: Myliobatidae).” PhD dissertation, Duke University, Durham, NC, USA.
- [18] **Zhan J.M., Gong Y.J., Li T.Z.,** (2017). “Gliding locomotion of manta rays, killer whales and Word fish near the water surface.” *Sci Rep-UK*; 7(1): 406. pmid:28341854.
- [19] **Zhou C., Low K.H.,** (2010). “Better endurance and load capacity: An improved design of manta ray robot (RoMan-II),” *J. Bionic Eng.*, vol. 7, pp. S137–S144.
- [20] **Drucker E.G., Jensen J. S.,** (1996). “Pectoral fin locomotion in the striped surfperch.” I. Kinematic effects of swimming speed and body size. *J. Exp. Biol.* 199, 2235–2242.
- [21] **Sunada S., Sakaguchi A., and Kawachi K.,** (1997). “Airfoil Section Characteristics at a Low Reynolds Number” *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 119, pp.129-135, March.
- [22] **Dewar H., Mous P., Domeier M.,** (2008). “Movements and site fidelity of the giant manta ray, *Manta birostris*, in the Komodo Marine Park, Indonesia.” *Marine Biology*, 155(2): 121-133.
- [23] **Willy A., Low K.H.,** (2005). "Development and initial experiment of modular undulating fin for untethered biorobotic auvs," in 2005 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics.
- [24] **Dos Santo F. A., Rodrigue A., Micheletti A.,** (2015). “Design and experimental testing of an adaptive shape-morphing tensegrity structure, with frequency self-tuning capabilities, using shape-memory alloys”, *Smart Materials and Structures*, 7.
- [25] **Skelton R. E., De Oliveira M. C.,** (2009). *Tensegrity systems*, Springer.
- [26] **Gür Ş., Karagöz C., Kiper G., Korkmaz K.,** (2019). “Synthesis of Scalable Planar Scissor Linkages with Anti-Parallelogram Loops”, *Proceedings of the 7th European Conference on Mechanism Science*, pp. 3.

- [27] **Begey J., Vedrines M., Renaud P.,** (2020). “Design of Tensegrity-based Manipulators: Comparison of Two Approaches to Respect a Remote Center of Motion Constraint”, *IEEE Robotics And Automation Letters.*, pp. 2-7.
- [28] **Renate S., Manfred B.,** (2020). “A variational formulation for motion design of adaptivecompliant structures”, Submitted to *International Journal for Numerical Methods in Engineering (IJNME)*.
- [29] **Bakker D. L., Matsuura D., Takeda Y., Herder J. L.,** (2015). “Design of an Environmentally Interactive Continuum Manipulator”, *The 14th IFToMM World Congress, Taipei, Taiwan*, pp. 5-6.
- [30] **Arsenault M. and Gosselin C. M.,** (2006). “Kinematic and static analysis of a planar modular 2-DoF tensegrity mechanism,” in *IEEE Int. Conf. on Rob. and Autom.*, pp. 4193–4198.
- [31] **Li S., Xu X., Tu J.,** (2020). “Research on a New Class of Planar Tensegrity Trusses Consistin of Repetitive Units.” *Int J Steel Struct* 20, 1582–1595.
- [32] **Moored K.W., Kemp T.H., Houle N.E., Bart-Smith H.,** (2011). “Analytical predictions, optimization, and design of a tensegrity-based artificial pectoral fin.” *International Journal of Solids and Structures*, 48, 3142-3159.
- [33] **Furuya, H.,** (1992). “Concept of deployable tensegrity structures in space applications.” *International Journal of Space Structures* 7 (2), 143–151.
- [34] **De Jager, B., Skelton, R.E.,** (2006). “Stiffness of planar tensegrity truss topologies.” *International Journal of Solids and Structures* 43 (5), 1308–1330.
- [35] **Yu W., Wang X., Ferraris E., Zhang J.,** (2019). Melt crystallization of PLA/Talc in fused filament fabrication, *Materials and Design*.
- [36] **Clark R. P., Smith A J.,** (2006). “Thrust production and wake structure of a batoid-inspired oscillating fin.”, *Journal of fluid mechanics*, 562(415-29).
- [37] **Moored K.W., Kemp T.H., Houle N.E., Bart-Smith H.,** (2011.). “Analytical predictions, optimization, and design of a tensegrity-based artificial pectoral fin”, *International Journal of Solids and Structures*, 48, 22–23, pp. 3142-3159.
- [38] **Demircan A., Kayran A., Kurtuluş D.F.,** (2012). “Kompozit Yapılı Mini İha'lar İçin Kalıp Üretim Teknikleri ve Aerodinamik Yüzeylerin Üretimi”, *IV. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı*.
- [39] **Değirmenci Ö.Ç., Yılmaz S., Kaplan H.,** (2015). “Kimyasal Ankraj Bulonlarının Kesme Davranışı.” *Shear Behavior of Chemical Anchor Bolts. ISBS 28-30 May. 2.International Sustainable Buildings Symposium.*
- [40] **Alvarado P. V. Y.** (2007). “Design of Biomimetic Compliant Devices for Locomotion in Liquid Environments.” PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.

- [41] **Peduk, G., Dilibal, S., Harrysson, O., Ozbek, S., West, H.,** (2018). “Characterization of Ni–Ti alloy powders for use in additive manufacturing.”, *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 59(4), pp.433-439, 2018.
- [42] **Ozbaran, C., Dilibal, S.,** (2020). “Parallel jaw robotic gripper design and production with additive manufacturing method by using horizontal and vertical rack and pinion gear mechanism”, *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 4(2), pp. 139-151, 2020.
- [43] **Dilibal, S., Sahin, H., Dursun, E., Engeberg, E.D.,** (2017). “Nickel–titanium shape memory alloy-actuated thermal overload relay system design.”, *Electrical Engineering*, 99(3), 2017.
- [44] **Dilibal, S.,** (2018). “Stabilized actuation of a novel NiTi shape memory alloy actuated flexible structure under thermal loading.”, *Materiali in Tehnologije*, 52(5), pp. 599-605, 2018.
- [45] **Dilibal, S.,** (2016). “The effect of long-term heat treatment on the thermomechanical behavior of NiTi shape memory alloys in defense and aerospace applications.”, *Defense Science Journal*, 15(2), pp. 1-23, 2016.
- [46] **Dilibal, S., Sahin, H., Çelik Y.,** (2018). “Experimental and numerical analysis on the bending response of the geometrically gradient soft robotics actuator.” *Archives of Mechanics*, 70(5), pp. 391-404, 2018.
- [47] **Dilibal S.,** (2005). “Nikel-titanyum şekil bellekli alaşım üretimi ve şekil bellek eğitimi”, *Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.*
- [48] **Sapmaz A.R., Dilibal S.,** (2020). “Makas-Mafsalsal Mekanizma Tekniği Kullanılarak İki Serbestlik Dereceli Kablolu Radyal Makas Sistemi Tasarımı ve Eklemeli İmalat Yöntemi İle Üretimi” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 4(3): 253-263, (2020).

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyadı : Ali Rıza Sapmaz

ÖĞRENİM DURUMU :

• **Lisans** : 2016, Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi
Elektronik ve Haberleşme Öğretmenliği

MESLEKİ DENEYİM:

- Satış ve Teknik Destek (2012-2013), Enda Otomasyon
- Elektrik- Elektronik Bakım-Onarım (2013-), İstanbul Tersane Komutanlığı

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Sapmaz, A.R. ve Dilibal, S. (2020). “Makas-Mafsal Mekanizma Tekniği Kullanılarak İki Serbestlik Dereceli Kablolü Radyal Makas Sistemi Tasarımı ve Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretimi”, Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind., 4(3): 253-263, (2020).