



**MERKEZİ ÖRÜNTÜ ÜRETECİ İLE ROBOT BALIĞIN
ÜÇ BOYUTLU HAREKETİNİN AKILLI DENETİMİ**

Deniz KORKMAZ

Doktora Tezi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Teknolojileri Programı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Cafer BAL

MAYIS-2018

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MERKEZİ ÖRÜNTÜ ÜRETECİ İLE ROBOT BALIĞIN ÜÇ BOYUTLU HAREKETİNİN
AKILLI DENETİMİ

DOKTORA TEZİ

Deniz KORKMAZ

(132138203)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 3 Nisan 2018

Tezin Savunulduğu Tarih: 4 Mayıs 2018

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Cafer BAL (F.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Muammer GÖKBULUT (F.Ü.)

Doç Dr. Celaleddin YEROĞLU (İ.Ü.)

Dr. Öğr. Üyesi Gonca ÖZMEN KOCA (F.Ü.)

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÜSTÜNDAĞ (B.Ü.)

MAYIS-2018

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması boyunca engin bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, üstün bakış açısına sahip, değerli fikirleriyle bana her zaman yol gösteren ve destek olan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Cafer BAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Her konuda bana destek olan ve yol gösteren değerli hocam Sayın Prof. Dr. Z. Hakan AKPOLAT'a teşekkürü borç bilirim.

Bu tez çalışmasının şekillenmesini sağlayan, hiçbir zaman üstün bilgi ve tecrübesini benden esirgemeyen, her karamsarlığa düştüğümde bana destek olan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Gonca ÖZMEN KOCA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Sıra dışı çözümler üreterek her zaman yanımda olan ve robot balık prototipinin ortaya çıkmasında önemli bir rol oynayan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mustafa AY'a teşekkürü borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübesinden faydalandığım, hiçbir zaman bıkmadan bana destek olan Sayın Arş. Gör. Mustafa Can BİNGÖL'e teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışmaların yapılmasında bana destek olan ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Halil İbrahim YAMAÇ'a teşekkürü borç bilirim.

Her yönde ve her an desteklerini hissettiğim, her zaman birlikte fikir alışverişinde bulunduğum ve bu süreçte ihmal etmiş olduğum en büyük hazinem olan aileme ve Sayın Deniz YÜCEL'e, ayrıca tüm arkadaşlarıma gösterdikleri sabır ve anlayıştan dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 114E652 Nolu 1001 projesi ile desteklenmiştir. TÜBİTAK'a katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Deniz KORKMAZ

ELAZIĞ - 2018

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ	X
TABLOLAR LİSTESİ	XVI
SEMBOLLER LİSTESİ	XVII
KISALTMALAR LİSTESİ	XXI
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Taraması	3
1.2. Tezin Amacı	13
1.3. Tezin Bölümleri.....	14
2. ROBOT BALIK PROTOTİPİNİN ÜÇ BOYUTLU MATEMATİKSEL MODELİNİN ELDE EDİLMESİ	15
2.1. Balıkların Morfolojik Yapısı	15
2.1.1. Balıklarda Vücut ve Kuyruk Şekilleri	16
2.1.2. Balıklarda Yüzme Hareketlerinin Sınıflandırılması.....	17
2.1.2.1. Vücut ve/veya Kuyruk Yüzgeci ile Hareket.....	19
2.1.2.2. Orta ve/veya Çift Yüzgeç ile Hareket	20
2.2. İki Eklemlili Kuyruk Yapısına Sahip Robot Balık Prototipinin Doğrusal Olmayan Matematiksel Modeli	20
2.2.1. Robot Balık Prototipinin Hareket Denklemleri.....	21
2.2.2. Kuyruğa Etki Eden Hidrodinamik Kuvvetler.....	26
2.2.3. Robot Balığın Ağırlık Merkezi Denetim Mekanizması	30
2.2.4. Robot Balığın Su İçerisinde Altı Serbestlik Dereceli Hareketi	31
3. MERKEZİ ÖRÜNTÜ ÜRETEÇLERİ.....	40
3.1. Merkezi Örüntü Üreteçlerinin Sınıflandırılması	42
3.1.1. Matsuoka Osilatörü	43
3.1.2. Genlik Denetimli Faz Osilatörü	44
3.1.3. Hopf Osilatörü.....	45

3.1.4.	Ekeberg Osilatörü.....	46
3.1.5.	Herrero-Carron Osilatörü	47
3.1.6.	Osilatör Modellerinin Karşılaştırılması.....	49
3.2.	Merkezi Örüntü Üreteci Modelinin Belirlenmesi	50
3.3.	Lamprey Türü Omurilik Sinir Hücresi Modeli	51
3.3.1.	Sinir Hücresi Osilatör Modeli	51
3.3.2.	Sinirsel Motor Denetim Merkezi Modeli	57
3.4.	Osilatör Dizilerinin Oluşturulması	59
3.5.	Tek Yönlü Zincir Bağlantılı Merkezi Örüntü Üreteci Devresi	61
3.5.1.	A Parametresinin Değişimi.....	62
3.5.2.	τ Parametresinin Değişimi.....	63
3.5.3.	β Parametresinin Değişimi	64
3.5.4.	α Parametresinin Değişimi	66
4.	BULANIK MANTIK DENETLEYİCİLER.....	72
4.1.	Bulanık Mantık ve Uygulama Alanları	72
4.2.	Bulanık Mantık Denetleyicilerin Yapısı.....	73
4.2.1.	Bulandırıcı.....	74
4.2.2.	Kural Tabanı ve Çıkarım Mekanizması	75
4.2.3.	Durultucu.....	77
5.	CARANGIFORM TÜRÜ BİYOMİMETİK ROBOT BALIK PROTOTİPİNİN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ.....	79
5.1.	Yazarın Dahil Olduğu Çalışma Ekibi Tarafından Geçmişte Yapılan Robot Balık Çalışmaları	79
5.1.1.	Fırat Robotic Fish Prototipi.....	79
5.1.2.	Tek Eklemlili Robot Balık Prototipi.....	80
5.2.	Carangiform Türü İki Eklemlili Robot Balık Prototipi	81
5.2.1.	Tasarım Hedefleri.....	82
5.2.2.	Mekaniksel Tasarım	83
5.2.2.1.	İki Eklemlili Kuyruk Mekanizması	88
5.2.2.2.	Ağırlık Merkezi Denetim Mekanizması.....	92
5.2.2.3.	Robot Balığın Burun Tasarımı	94
5.2.3.	Elektronik Sistemlerin Tasarımı.....	96

6.	ROBOT BALIK PROTOTİPİNİN BENZETİM VE DENEYSEL	
	ÇALIŞMALARI	99
6.1.	Robot Balık Prototipi için Tasarlanan Merkezi Örüntü Üretici Modeli	101
6.2.	Robot Balık Prototipinin SimMechanics Ortamında Hareket Analizi	106
6.3.	Robot Balığın Açık Çevrim Performansı	110
6.3.1.	Robot Balığın İleri Yön Düz Yüzüş için Açık Çevrim Performansı.....	112
6.3.2.	Robot Balığın Dönüş Hareketi için Açık Çevrim Performansı	119
6.4.	Robot Balığın Duyusal Geri Beslemeli Kapalı Çevrim Denetim	
	Performansı	127
6.4.1.	Robot Balığın Sapma Açısının Kapalı Çevrim Denetimi	132
6.4.2.	Robot Balığın Otonom Kapalı Çevrim Denetimi.....	140
6.4.3.	Robot Balığın Engellerden Sakınarak Kapalı Çevrim Sapma Denetimi.....	149
6.4.4.	Robot Balığın Üçüncü Boyut Hareketinin Kapalı Çevrim Denetimi.....	153
7.	SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER	163
7.1.	Yapılan Tez Çalışmasının Sonuçları ve Öneriler	163
7.2.	Tez Kapsamında Gerçekleştirilen Bilimsel Çalışmalar.....	167
7.2.1.	SCI ve SCI-E Kapsamındaki Uluslararası Hakemli Dergi Yayınları.....	168
7.2.2.	Diğer Uluslararası Hakemli Dergi Yayınları.....	168
7.2.3.	Uluslararası Konferanslar	168
7.2.4.	Yurtiçi Projeler	169
	KAYNAKLAR.....	170
	ÖZGEÇMİŞ.....	186

ÖZET

Balıklar hızlı yüzebilme, ani ivmelenme ve üstün hareket kabiliyeti gibi özellikleri ile doğadaki en iyi yüzücülerdir. Balık türü bir sualtı robotu ürettiği tahrik kuvveti ile klasik pervaneli bir sualtı aracına göre daha hızlı, sessiz ve düşük güç tüketimi ile yüzebilmektedir. Bahse konu olan özellikler göstermektedir ki, çok eklemlı kuyruk mekanizmasına sahip bir sualtı robot tasarımı için balıklar uygun bir biyolojik örnek olarak kullanılabilir.

Bu tez çalışmasında, iki eklemlı esnek kuyruk mekanizmasına sahip, üç boyutlu olarak otonom bir şekilde yüzeabilen, Carangiform türü biyomimetik bir robot balık prototipi geliştirilmiş ve önerilen biyomimetik denetim yapısıyla robot balığın üç boyutlu hareketlerinin akıllı denetimi gerçekleştirilmiştir. Prototipin benzetim çalışmalarını yapmak ve denetim algoritmalarını tasarlamak amacıyla robot balığın üç boyutlu 6 Serbestlik Dereceli (SD) doğrusal olmayan matematiksel modeli elde edilmiştir. 6-SD model, robot balığın üç boyutlu uzayda hareketini tanımlamaktadır. Matematiksel modeli elde etmek için Lagrange yöntemi kullanılmış ve suyun etkilerini gerçekçi bir şekilde modellemek için kuyruğa etki eden hidrodinamik kuvvetler bulunmuştur.

Robot balık prototipi gerçek bir Carangiform türü sazan balığının morfolojik özellikleri dikkate alınarak tasarlanmıştır. Prototipin hareket denetimi için Lamprey türü balıkların omurilik sinir hücrelerinden esinlenilerek tasarlanan Merkezi Örüntü Üretici (MÖÜ) modeli kullanılmıştır. Sinirsel Lamprey MÖÜ modeli tek yönlü zincir bağılı osilatör dizilerinden oluşturulmuştur. Bu model ile robot balığın eklemlerindeki servo motorlar için gereken sürekli salınımlı, ritmik, sinüzoidal sinyaller elde edilmiştir. Robot balığın kapalı çevrim denetim yapısını oluşturmak için Lamprey duyuşal sinir hücresi modeli kullanılmış ve tasarlanan iki farklı bulanık denetleyici ile prototipin Merkezi Sinir Sistemi (MSS) modeli geliştirilmiştir.

Önerilen yöntemlerin doğruluğunu sınamak için robot balık prototipinin hem benzetim ortamında hem de deneysel bir havuzda açık ve kapalı çevrim analizleri yapılmıştır. Açık çevrim deneylerde, prototipin ileri yön ve dönüş hareketleri analiz edilerek robot balığın karakteristik özellikleri belirlenmiştir. Kapalı çevrim denetim yapısı ile sapma açısı, engellerden sakınarak otonom yüzüş ve engellerden sakınarak sapma açısı denetimleri için deneyler gerçekleştirilmiştir. Böylece, robot balık prototipinin karakteristik özelliklerine bağılı ileri yön ve dönüş hareketlerinin duyuşal geri beslemeli kapalı çevrim denetimleri

sağlanmıştır. Ayrıca, robot balığın ağırlık merkezi denetim mekanizması ile yukarı/aşağı hareketlerini sağlayan yunuslama açısının denetimi gerçekleştirilmiştir.

Yapılan benzetim ve deneysel çalışmalar ile tasarlanan robot balık prototipinin üç boyutlu hareket denetimlerinin etkinliği ve başarımı gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Robot Balık, Merkezi Örüntü Üretici (MÖÜ), Duyusal Geri Besleme, Bulanık Mantık, Mekatronik Tasarım, Biyomimetik Robot, Akıllı Hareket Denetimi.



SUMMARY

Intelligent Control of Three-Dimensional Motion of the Robotic Fish with Central Pattern Generator

In nature, fish are the best swimmers with their fast swimming, instantaneous acceleration and high motion abilities. A fish-like underwater robot can swim faster, quieter and lower power consumption than a conventional propeller underwater vehicle with generated thrust force. When these features are considered, it is seen that fish have very suitable biological structure for underwater robot design with multi-link tail mechanism.

In this thesis, a Carangiform type biomimetic robotic fish prototype with two-link flexible tail mechanism, which has three dimensional autonomous swimming ability, was developed and intelligent control of three-dimensional motion of the robotic fish was performed with the proposed biomimetic control structure. In order to carry out simulation studies and design control algorithms, three-dimensional 6 Degrees of Freedom (DoF) nonlinear mathematical model of the robotic fish was obtained. 6-DoF model describes the three-dimensional motion of the robotic fish. Lagrange method was used to obtain this model and hydrodynamic forces acting on the tail were calculated to derive the realistic effects of water.

For the design procedure of the robotic fish prototype, morphological characteristics of a real Carangiform carp fish was adapted. Central Pattern Generator (CPG) model inspired by the spinal cord neurons of Lamprey was applied to perform locomotion control of the robotic fish. The neural Lamprey CPG model was composed of unidirectional and chain linked oscillator series. Rhythmic, oscillatory and sinusoidal output signals were obtained with this model to drive servo motors of the tail. A sensory feedback mechanism based on Lamprey neuron and two different fuzzy controllers were established to achieve the closed loop control structure of the robotic fish and Central Nervous System (CNS) was developed.

In order to validate the proposed methods, open and closed loop analyzes of robotic fish prototype were performed both in the simulation environment and experimental pool. In the open loop experiments, forward and turning motions of the prototype were analyzed and characteristic features of the robotic fish were determined. In the closed loop experiments, controls of the yaw angle, autonomous swimming avoiding the obstacles and yaw angle avoiding the obstacles were performed. Thus, sensory feedback closed loop forward and turning motion controls were achieved depending on the characteristic features of the robotic

fish. In addition, pitch angle was controlled to provide up/down motions with center of gravity control mechanism of the robotic fish.

The effectiveness and performance of the three dimensional motions of the designed robotic fish prototype were shown with the simulation and experimental studies.

Key Words: Robotic Fish, Central Pattern Generator (CPG), Sensory Feedback, Fuzzy Logic, Mechatronic Design, Biomimetic Robot, Intelligent Locomotion Control.



ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Bir balığın morfolojik yapısı.....	15
Şekil 2.2. Farklı balık türlerine ait genel vücut şekilleri	16
Şekil 2.3. Farklı balık türlerine ait genel kuyruk şekilleri.....	17
Şekil 2.4. Yüzme türlerinin sınıflandırılması	18
Şekil 2.5. BCF ve MPF hareketlerine göre yüzme modelleri	18
Şekil 2.6. BCF yüzme hareketlerinin sınıflandırılması	19
Şekil 2.7. Carangiform türü bir balığın çok eklemli kinematik zincir yapısı.....	21
Şekil 2.8. Robot balığın dört eklemli zincir yapısı.....	22
Şekil 2.9. Robot balığa ait bir eklem yapısı	22
Şekil 2.10. Kuyruk yüzgecine etki eden hidrodinamik kuvvetler	26
Şekil 2.11. Carangiform türü bir balığın kuyruk yüzgeci uzunluğu ve yüksekliği	27
Şekil 2.12. Kuyruk yüzgeci üzerinde oluşan hidrodinamik bileşke kuvvetler.....	28
Şekil 2.13. Kuyruk yüzgeci üzerinde oluşan atak açısı.....	29
Şekil 2.14. Carangiform türü bir balığın dalış anı.....	30
Şekil 2.15. Matematiksel model için tasarlanan ağırlık merkezi denetim mekanizması	30
Şekil 2.16. İki eklemli robot balığın üç boyutlu uzayda 6-SD gösterimi ve eksen takımlarının yerleşimi	32
Şekil 2.17. İki eklemli robot balığın kesiti ile ağırlık ve kaldırma kuvvetlerinin gösterimi	38
Şekil 2.18. İki eklemli robot balığın 6-SD doğrusal olmayan matematiksel modeli için oluşturulan blok diyagram	39
Şekil 3.1. Nörobiyolojik MÖÜ model gösterimi.....	41
Şekil 3.2. Matsuoka osilatör modeli.....	43
Şekil 3.3. GDF osilatör modeli.....	44
Şekil 3.4. Hopf osilatör modeli	46
Şekil 3.5. Ekeberg osilatör modeli	46
Şekil 3.6. Herrero-Carron osilatör modeli.....	48
Şekil 3.7. Sinirsel Lamprey osilatör modeli	52
Şekil 3.8. STA modelinin paralel R–C eş değer devresi	53
Şekil 3.9. Bir osilatör hücresinin basitleştirilmiş gösterimi	55

Şekil 3.10. Osilatör modeli çıkışı	56
Şekil 3.11. MDM modeli.....	57
Şekil 3.12. α ve γ parametrelerinin iki osilatör arasındaki faz farkına olan etkisi	58
Şekil 3.13. Osilatörler arasındaki tek ve çift yönlü bağlantılar	59
Şekil 3.14. Osilatörler arasındaki zincir ve halka bağlantılar	60
Şekil 3.15. Osilatörlerin karmaşık olarak birbirine bağlanması.....	60
Şekil 3.16. N adet osilatörden oluşan tek yönlü zincir bağlı MÖÜ devresi	61
Şekil 3.17. A parametresinin incelenmesi	62
Şekil 3.18. τ parametresinin incelenmesi	63
Şekil 3.19. β ve A parametrelerinin değişimine göre bağlı ofset.....	65
Şekil 3.20. β parametresinin incelenmesi.....	65
Şekil 3.21. α parametresinin incelenmesi.....	67
Şekil 3.22. Genliğin α ve A ile değişimi.....	68
Şekil 3.23. Genlik kazancı.....	68
Şekil 3.24. Düzeltilmiş genliğin değişimi	69
Şekil 3.25. Periyodun α ve τ ile değişimi	69
Şekil 3.26. Periyot kazancı	70
Şekil 3.27. Düzeltilmiş periyodun değişimi	71
Şekil 4.1. Sıkça kullanılan üyelik fonksiyonları.....	73
Şekil 4.2. Bulanık denetleyici yapısı ve denetlenen sistem.....	74
Şekil 4.3. Hata ve hatanın türevi için bulanıklaştırma işlemi.....	75
Şekil 4.4. Çıkış değişkenine ait üyelik fonksiyonları.....	75
Şekil 4.5. İlgili kuralların ima işlemi ile uygulanması	77
Şekil 4.6. Toparlama işlemi sonucunda oluşan çıkış bulanık kümesi.....	77
Şekil 5.1. Fırat Robotic Fish prototipi.....	79
Şekil 5.2. Fırat Robotic Fish prototipinin otonom yüzme hareketleri.....	80
Şekil 5.3. Tek eklemlı robot balık prototipi	80
Şekil 5.4. Tek eklemlı robot balığın ileri yön hareketleri	81
Şekil 5.5. Carangiform türü koi sazan balığı.....	83
Şekil 5.6. Tasarlanan iki eklemlı Carangiform türü robot balık prototipi.....	84
Şekil 5.7. Bileşenlerin üretim aşamaları.....	85
Şekil 5.8. Robot balık prototipinin bileşenleri	86
Şekil 5.9. Geliştirilen robot balık prototipinin görünümü	88

Şekil 5.10. İkinci eklem mekaniksel yapısı.....	88
Şekil 5.11. İkinci eklem montaj yapısı.....	89
Şekil 5.12. Birinci eklem montajı.....	90
Şekil 5.13. Montajı tamamlanan iki eklemli kuyruk mekanizması.....	90
Şekil 5.14. İki eklemli kuyruk mekanizmasının su içerisinde çalışma testi.....	91
Şekil 5.15. Esnek kuyruk yüzgecinin üretimi	91
Şekil 5.16. Ağırlık merkezi denetim mekanizmasının mekaniksel yapısı	92
Şekil 5.17. Geliştirilen ağırlık merkezi denetim mekanizmasının görünümü.....	93
Şekil 5.18. Robot balığın tasarlanan burun yapısı.....	95
Şekil 5.19. Mesafe sensörlerinin görüş açıları	95
Şekil 5.20. Elektronik sistemin blok diyagramı	96
Şekil 5.21. Robot balığın tasarlanan elektronik sistemi	98
Şekil 6.1. Deneysel çalışma ortamının temsili gösterimi	99
Şekil 6.2. Deneysel çalışma ortamının görüntüleri	100
Şekil 6.3. Kinovea 0.8.26 programı ile robot balık prototipinde işaretli bölgenin takip edilmesi	101
Şekil 6.4. Geliştirilen tek yönlü zincir bağlı MÖÜ modeli	102
Şekil 6.5. Osilatör çıkışlarına bağlı eklemler arasındaki faz geçişleri	102
Şekil 6.6. Birinci eklem senaryosu.....	104
Şekil 6.7. İkinci eklem senaryosu.....	104
Şekil 6.8. Açık çevrim deneyler için örnek parametre değişimleri ve osilatör çıkışları ...	105
Şekil 6.9. Robot balık prototipinin SimMechanics görünümü.....	106
Şekil 6.10. Sazan balığının ileri yön düz yüzüş hareketinin bir periyodu.....	108
Şekil 6.11. Robot balığın ileri yön düz yüzüş hareketinin SimMechanics ortamında bir periyodu.....	108
Şekil 6.12. Sazan balığının dönüş hareketinin bir periyodu.....	109
Şekil 6.13. Robot balığın dönüş hareketinin SimMechanics ortamında bir periyodu.....	109
Şekil 6.14. Robot balığın açık çevrim performans analizleri için kullanılan blok şeması	110
Şekil 6.15. $A_1=10$ ve $A_2=20$ genlik değerleri için ARM Cortex M4 mikrodenetleyici ile elde edilen osilatör çıkışları	111
Şekil 6.16. $A_1=20$ ve $A_2=20$ genlik değerleri için ARM Cortex M4 mikrodenetleyici ile elde edilen osilatör çıkışları	111

Şekil 6.17. $A_1=20$ ve $A_2=30$ genlik değerleri için ARM Cortex M4 mikrodenetleyici ile elde edilen osilatör çıkışları	112
Şekil 6.18. Robot balığının deneysel ortamda çırpınma frekansı değişimine göre farklı genlik değerlerinde ileri yön hız değişimi.....	113
Şekil 6.19. Robot balığının deneysel ortamda çırpınma frekansı değişimine göre farklı faz değerlerinde ileri yön hız değişimi.....	114
Şekil 6.20. $f=2\text{Hz}$, $A_1=20$, $A_2=20$, $\beta=0$ ve $\alpha=0.5$ için robot balığının ileri yön hareketinin benzetim sonuçları	116
Şekil 6.21. Robot balığının deneysel ortamda $f=2\text{Hz}$, $A_1=20$, $A_2=20$, $\beta=0$ ve $\alpha=0.5$ için ileri yön düz yüzüş hareketi	117
Şekil 6.22. İleri yön deneysel yüzüş görüntüleri için robot balığının hız-zaman grafiği	118
Şekil 6.23. İleri yön deneysel yüzüş görüntüleri için robot balığının ivme-zaman grafiği ..	118
Şekil 6.24. İleri yön deneysel yüzüş görüntüleri için robot balığının yer değişim-zaman grafiği.....	119
Şekil 6.25. Robot balığının deneysel ortamda ofset değişimine göre farklı çırpınma frekanslarında dönüş yarıçapı değişimi	120
Şekil 6.26. Robot balığının deneysel ortamda farklı ofset değişimine göre farklı çırpınma frekanslarında çizgisel dönüş hızı değişimi.....	121
Şekil 6.27. Robot balığının deneysel ortamda ofset değişimine göre farklı çırpınma frekanslarında açısal dönüş hızı değişimi.....	121
Şekil 6.28. β değişimine bağlı robot balığının dönüş hareketinin benzetim sonuçları.....	123
Şekil 6.29. Robot balığının $f=2\text{Hz}$, $A_1=10$, $A_2=20$, $\beta=0.8$ ve $\alpha=0.8$ için deneysel ortamda dönüş hareketi.....	124
Şekil 6.30. Robot balığının Şekil 6.29’da görüntüleri verilen deneye ait çizgisel dönüş hızının zamana bağlı değişim grafiği	125
Şekil 6.31. Robot balığının Şekil 6.29’da görüntüleri verilen deneye ait çizgisel dönüş ivmesinin zamana bağlı değişim grafiği	125
Şekil 6.32. Robot balığının Şekil 6.29’da görüntüleri verilen deneye ait yer değişiminin zamana bağlı grafiği.....	126
Şekil 6.33. Robot balığının $f=1.5\text{Hz}$, $A_1=20$, $A_2=20$, $\beta=0.85$, $\alpha=0.8$ ve $\gamma=0.2$ için deneysel ortamda dönüş hareketi.....	127
Şekil 6.34. Duyusal geri beslemeli kapalı çevrim denetim sistemi blok şeması.....	129
Şekil 6.35. Robot balığının su içerisindeki dengesi	129

Şekil 6.36. Refleks yayı modeli gösterimi	130
Şekil 6.37. MSS modeli gösterimi	130
Şekil 6.38. Kapalı çevrim MSS modeli ve veri akışının gerçekleştirilmesi.....	131
Şekil 6.39. Duyusal geri beslemeli MÖÜ modeli	132
Şekil 6.40. Bulanık denetleyici ile sapma açısının kapalı çevrim denetimi	133
Şekil 6.41. Sapma açısı denetimi için belirlenen giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları.....	134
Şekil 6.42. $\psi_{ref}=[15, 30, 45]^\circ$ için robot balığın sapma açısı denetiminin benzetim sonuçları	135
Şekil 6.43. 15° sapma açısı referansı için kapalı çevrim denetimin deneysel görüntüleri.....	136
Şekil 6.44. 30° sapma açısı referansı için kapalı çevrim denetimin deneysel görüntüleri.....	137
Şekil 6.45. 45° sapma açısı referansı için kapalı çevrim denetimin deneysel görüntüleri.....	138
Şekil 6.46. Sapma açılarının zamana bağlı değişimi.....	139
Şekil 6.47. Bulanık denetleyici ile robot balığın otonom kapalı çevrim denetimi.....	140
Şekil 6.48. Otonom yüzüş denetimi için belirlenen giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları....	141
Şekil 6.49. Rasgele üretilen engeller için mesafe sensörlerinden elde edilen yüzdelik mesafe verileri.....	143
Şekil 6.50. Rasgele üretilen engeller için bulanık denetleyicinin çıkışı.....	144
Şekil 6.51. Rastgele üretilen engeller için duysal sinir hücresinin zar potansiyeli	144
Şekil 6.52. Rastgele üretilen engeller için osilatör çıkışları	145
Şekil 6.53. Birinci senaryoya ait otonom yüzüş deney görüntüleri.....	146
Şekil 6.54. İkinci senaryoya ait otonom yüzüş deney görüntüleri	147
Şekil 6.55. Üçüncü senaryoya ait otonom yüzüş deney görüntüleri	148
Şekil 6.56. Geliştirilen SDM yapısı	150
Şekil 6.57. Birinci senaryoya ait engellerden sakınarak sapma denetimi deney görüntüleri	151
Şekil 6.58. Birinci senaryo için elde edilen sapma açısının zamana bağlı değişimi	151
Şekil 6.59. İkinci senaryoya ait engellerden sakınarak sapma denetimi deney görüntüleri	152
Şekil 6.60. İkinci senaryo için elde edilen sapma açısının zamana bağlı değişimi.....	153
Şekil 6.61. Oransal denetleyici ile yunuslama açısının kapalı çevrim denetimi	154

Şekil 6.62. $\theta_{ref}=[-15, -30, -45]^\circ$ için robot balığın yunuslama açısı denetiminin benzetim sonuçları.....	155
Şekil 6.63. -30° 'lik yunuslama açısı referansı için robot balığın kapalı çevrim deneysel görüntüleri.....	156
Şekil 6.64. -45° 'lik yunuslama açısı referansı için robot balığın kapalı çevrim deneysel görüntüleri.....	157
Şekil 6.65. Yüzeye yakın seviyede derinlik denetimi	158
Şekil 6.66. Orta seviyede derinlik denetimi	159
Şekil 6.67. Tabana yakın seviyede derinlik denetimi.....	160
Şekil 6.68. Basamak yunuslama açısı referansı için robot balığın kapalı çevrim deneysel görüntüleri.....	161
Şekil 6.69. Basamak yunuslama açısı referansı için robot balığın kapalı çevrim cevabı	162

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Robot balığın eksen takımları ve eksen takımlarında gerçekleşen davranışlar .	33
Tablo 3.1. MÖÜ modellerinin karşılaştırılması	49
Tablo 3.2. Osilatör modeline ait içsel sinaptik ağırlıklar.....	56
Tablo 3.3. Osilatör için belirlenen başlangıç şartları	56
Tablo 4.1. Örnek olarak verilen girişler için üyelik dereceleri ve üyelik fonksiyonları	74
Tablo 4.2. Örnek olarak verilen girişler için etkin kurallar	76
Tablo 5.1. Robot balık prototipinin teknik özellikleri	87
Tablo 6.1. MÖÜ modeli ve sinüzoidal fonksiyonlar için oluşturulan senaryo	103
Tablo 6.2. Örnek davranışlar için zamana bağlı parametre değişimleri	106
Tablo 6.3. Robot balığın çarpınma frekansı değişimine göre farklı genlik değerlerinde ileri yön hız değişimi	113
Tablo 6.4. Robot balığın çarpınma frekansı değişimine göre farklı faz değerlerinde ileri yön hız değişimi	115
Tablo 6.5. Robot balığın ofset değişimine göre farklı çarpınma frekanslarında çizgisel dönüş hızı değişimi	122
Tablo 6.6. Sapma açısı denetimi için oluşturulan bulanık denetleyici kural tablosu.....	135
Tablo 6.7. Engellerden sakınarak otonom yüzüş denetimi için oluşturulan bulanık denetleyici kural tablosu	142

SEMBOLLER LİSTESİ

ψ	: Euler Sapma açısı
λ	: DS eşik değeri
Δ_i	: Momentin fazı
Δ_f	: Robot balığın hacmi
A_{max}	: Momentin genliği
A_1, A_2	: Birinci ve ikinci eklem açılarının genlik değerleri
$C_A(v)$	: Ek kütle Coriolis matrisi
C_D	: Sürtünme katsayısı
$C_{RB}(v)$	: Coriolis matrisi
D_L	: Doğrusal sönümleme matrisi
$D_{NL}(v)$	: Doğrusal olmayan sönümleme matrisi
E_{syn}	: Herrero-Carron osilatörü için sinaptik sonrası hücre potansiyeli
F_D	: Sürüklenme kuvveti
F_F, F_C	: x ve y eksenlerindeki bileşke kuvvetler
F_J	: Kaldırma kuvveti
F_V	: İvmelenme kuvveti
I_C	: Kondansatör akımı
I_R	: Direnç akımı
I_i	: Eklem atalet momenti
I_n	: Herrero-Carron osilatörü için diğer hücrelerden gelen akım miktarı
I_0	: Eylemsizlik momentlerini içeren matris
K_A	: Genlik kazancı
K_T	: Periyot kazancı
M_A	: Ek kütle matrisi
M_{RB}	: Kütle matrisi
Q_i	: Genelleştirilmiş parametrelere etki eden kuvvetlerin toplamı
R_i	: GDF osilatörü içsel genliği
S_u	: Islak yüzey alanı
S_1	: Sol bölümdeki mesafe sensörü
S_2	: Ön bölümdeki mesafe sensörü
S_3	: Sağ bölümdeki mesafe sensörü
T_D, T_A	: Ekeberg osilatörü zaman sabitleri
T_{OSC}	: Osilatör çıkış periyodu
T_r, T_a	: Matsuoka osilatörü adaptasyon zaman sabitleri
T_1^u, T_2^u	: Aktif eklem motorlarının ürettiği moment değerleri
U_m	: Akış sabiti
V_C	: Kondansatör gerilimi
V_f	: Robot balığın bağıl hızı
X_i	: GDF osilatörü içsel ofseti
X_p	: Herrero-Carron osilatörü için zar potansiyeli
a_i	: Eklem ağırlık merkezine göre uzunluğu
a_{ij}	: Matsuoka osilatörü için sinapslar
a_r, a_x	: GDF osilatörü yakınsama hızı sabitleri
b_i	: Matsuoka osilatörü adaptasyon ateşleme hızı oranı

c_i	: Matsuoka osilatörü harici tonik oranı
c_j	: Diğer osilatördeki sinaptik öncesi sinir hücresi potansiyelleri
d_i	: Dikey ekseninde olan öteleme
f_T	: Momentin frekansı
$f r_i$	: GDF osilatörü içsel frekansı
$g_{osc}^t(A, \alpha)$	: A'nın değişimine bağlı ve α etkisinden kurtulmuş genlik
$g_{osc}(A, \alpha)$	: Bozucu etki altında kalan genlik
$g^t(\tau, \alpha)$	: τ 'nın değişimine bağlı ve α etkisinden kurtulmuş periyot
h_x	: x gövde ekseninde bulunan kütlenin bağlı olduğu eksene olan uzaklığı
h_y	: y gövde ekseninde bulunan kütlenin bağlı olduğu eksene olan uzaklığı
k_i	: Eklemlerde oluşan yay sabiti
l_i	: Eklem uzunlukları
l_x, l_y	: Kütlelerin denge noktasına olan uzaklıkları
m_i	: Eklemlerin kütleleri
m_x	: x gövde ekseninde hareket eden kütle
m_y	: y gövde ekseninde hareket eden kütle
r_B	: Robot balığın kaldırma merkezi vektörü
r_B^G	: Kaldırma merkezi ve ağırlık merkezi vektörlerinin farkı
r_G	: Robot balığın ağırlık merkezi vektörü
r_i	: GDF osilatör genliği
s_i	: Aynı osilatördeki sinaptik öncesi sinir hücresi potansiyelleri
u_f	: y eksenine göre kuyruk yüzgeci merkezinin göreceli hızı
$w^{(L)}, w^{(R)}$	: Tek yönlü sol ve sağ sinaptik bağlantılar
$w_{L,R}$	: Sağ UAS'dan soldaki YAS'a giden uyarıcı sinaps
$w_{R,L}$	: Sol UAS'dan sağdaki YAS'a giden engelleyici sinaps
$w_{i,k}, w_{i,j}$	: Sinir hücreleri ve osilatörler arasındaki sinaptik ağırlıklar
w_i	: Sinir hücreleri arasındaki sinapslar
$x_{(DS)i}$	: DS hücresinin zar potansiyeli
x_B, y_B, z_B	: Eklem ağırlıklarının merkezi
x_i	: MÖÜ sinir hücrelerinin zar potansiyeli
x_i^g	: Eklem ağırlık merkezine göre yatay eksenindeki koordinatı
x_n	: Herrero-Carron osilatörü için μ 'ye bağlı hızlı zar gerilimi
x_{oi}	: GDF osilatör ofseti
y_{BO}	: Bağlı ofset
y_i^g	: Eklem ağırlık merkezine göre dikey eksenindeki koordinatı
y_j	: Osilatör çıkışı
y_n	: Herrero-Carron osilatörü için μ 'ye bağlı yavaş zar gerilimi
y_{offset}	: Osilatör çıkış genliğinin ofset değeri
θ_i	: Eklem açıları
μ_{ef}	: Matsuoka osilatöründeki hücreler arası sinapslar
ρ_f	: Robot balığın öz kütlesi
τ_{REC}	: DS için uyarıcıya karşılık üretilen tepkinin düşme zaman sabiti
τ_{RES}	: DS için uyarıcıya karşılık üretilen tepkinin yükselme zaman sabiti
τ_f	: Hidrodinamik kuvvet ve momentleri içeren kuvvet vektörü
τ_i	: Kinematik ve hidrodinamik kuvvetleri içeren kuvvet matrisi
φ_{ij}	: Osilatörler arasındaki faz farkı

ϕ_{ti}	: Eklemin yatay eksene göre yaptığı açı
$[T]$	: Herrero-Carron osilatörü için hücreler arası kimyasal konsantrasyon
$B(\theta_i)$	: Sönüm matrisi
C	: Yanal kuyruk uzunluğunun yarısı
g	: Yerçekimi ivmesi
$g(\eta)$	: Akışkan içerisindeki hidrostatik etkileri içeren vektör
$g(\tau, \alpha)$	: Bozucu etki altında kalan periyot
$K(\theta_i)$	: Yay sabitleri
L	: Dikey kuyruk uzunluğu
Q	: Sensörün görüş mesafesindeki engeli algılama açısı
Γ	: Ekeberg osilatörü için adaptasyon oranı sabiti
ζ_-	: Engelleyici gecikmiş sinaps değeri
ζ_+	: Uyarıcı gecikmiş sinaps değeri
η	: Dünya merkezli eksene göre genelleştirilmiş konumlar
λ	: DS'ye gelen uyarıcı miktarı
ϕ	: Euler yalpalanma açısı
ϕ_i	: GDF osilatör fazı
ψ_+, ψ_-	: Diğer osilatörlerden gelen uyarıcı ve engelleyici sinaps değerleri
A	: Osilatör çıkış genliği katsayısı
B	: Robot balığa etki eden kaldırma kuvveti
$C(\theta_i, \dot{\theta}_i)$	: Coriolis matrisi
D	: Rayleigh disipasyon fonksiyonu
IR	: Engel ile olan mesafenin vektörel büyüklüğü
L	: Lagrange fonksiyonu
$M(\theta_i)$	: Kütle ve atalet momenti matrisi
N	: Eklem sayısı
N	: Osilatör sayısı
R	: Hücre zarı direnci
T	: Kinetik enerji
U	: Bağlı akış hızı
V	: Potansiyel enerji
W	: Robot balığa etki eden yerçekimi kuvveti
$c()$	: cos() fonksiyonu
de	: Hatanın türevi
e	: İstenilen çıkış değişkeninin hatası
f	: Kuyruk çırpınma frekansı
m	: Toplam kütle
p	: Yalpalanma hızı
p	: DS uyarıcı düzeltme katsayısı
q	: Yunuslama hızı
q	: Matsuoka osilatörü adaptasyon etkisi
r	: Sapma hızı
$s()$	: sin() fonksiyonu
$t()$	: tan() fonksiyonu
u	: Dalgalanma hızı
v	: Sallanma hızı
v	: Gövde eksen takımına göre genelleştirilmiş hızlar
w	: Kaldırma hızı

α, γ	: Faz farkı değişimini ayarlayan parametreler
β	: Osilatör çıkış ofseti
θ	: Euler yunuslama açısı
ρ	: Akışkanın yoğunluğu
τ	: Osilatör çıkış periyodu



KISALTMALAR LİSTESİ

ADD	: Analog Dijital Dönüştürücü
APKD	: Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri
BCF	: Vücut ve/veya Kuyruk Yüzgeci
BSağ	: Büyük Sağ
BSol	: Büyük Sol
ÇAS	: Çapraz Ara Sinir Hücresi
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
D-H	: Denavit-Hartenberg
DS	: Duyusal Sinir Hücresi
GA	: Genetik Algoritma
GDF	: Genlik Denetimli Faz
GU	: Gövde Uzunluğu
H-H	: Hodgkin Huxley
I²C	: Inter Integrated Circuit
KS	: Kenar Sinir Hücresi
KSağ	: Küçük Sağ
KSol	: Küçük Sol
Li-Po	: Lityum Polimer
MDM	: Motor Denetim Merkezi
MH	: Motor Hücre
MÖÜ	: Merkezi Örüntü Üretici
MPF	: Orta ve/veya Çift Yüzgeçler
MS	: Motor Sinir Hücresi
MSS	: Merkezi Sinir Sistemi
NB	: Negatif Büyük
NED	: Kuzey-Doğu-Aşağı
NK	: Negatif Küçük
O	: Orta
P	: Oransal
PB	: Pozitif Büyük
PD	: Oransal Türev
PID	: Oransal İntegral Türev
PK	: Pozitif Küçük
PLA	: Polilaktik Asit Termoplastik Polyester
PM	: ProMotor
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
RC	: Radio Control/Radyo Kontrol
R-C	: Direnç-Kondansatör
RM	: ReMotor
RX	: ReceiveX
S	: Sıfır
SCL	: Serial Clock
SD	: Serbestlik Derecesi
SDA	: Serial Data
SDM	: Sonlu Durum Makinesi

SMN	: Sıfır Moment Noktası
STA	: Sızdıran Topla ve Ateşle
TX	: TansmitX
U	: Uzak
UAS	: Uyarıcı Ara Sinir Hücresi
USB	: Evrensel Seri Veriyolu
Y	: Yakın
YAS	: Yanal Ara Sinir Hücresi
YSA	: Yapay Sinir Ağı



1. GİRİŞ

Biyomimetik tasarım, doğadan esinlenerek geliştirilen teknolojiler ile oldukça popüler bir hale gelmiştir. Doğada var olan sistemlerin incelenmesi ve yapılarının mühendislik alanlarına aktarılması biyomimetik olarak isimlendirilir. Biyomimetik tasarımın temel amacı, canlı formlarını taklit ederek mühendislik problemlerine yenilikçi çözümler getirmek ve var olan mühendislik sistemlerinin performanslarını iyileştirmektir. Günümüzde özellikle robotik, yapay zeka, optimizasyon, nano teknoloji, savunma sistemleri ve sağlık gibi birçok farklı alanda bu bilgilerden faydalanılmaktadır [1–4].

Sualtı canlıları incelendiğinde, biyomimetik bir yaklaşımın insansız sualtı araçları tasarımı için oldukça uygun olduğu görülmektedir. Balıklar, 600 milyon yıldır süren evrimsel süreçlerinde üstün hareket kabiliyeti, hızlı yüzebilme ve ani ivmelenme gibi özellikleri ile doğadaki en iyi yüzücülerdir. Balık türü esnek kuyruk mekanizmasına sahip bir sualtı robotu, klasik pervaneli bir sualtı aracının ulaşamadığı yerlerde hareket ederek daha sessiz, hızlı ve yüksek manevra kabiliyeti ile yüzebilmektedir [5–9]. Ayrıca, balık türü bir robot pervaneli bir sualtı aracına göre daha düşük güç tüketimi ile yüzebilir. Pervaneli sualtı araçları kendi uzunluklarının yaklaşık üç katında bir yarıçap ile dönerken bir balık kendi uzunluğunun yaklaşık yüzde 10 ile 30’u arasında bir yarıçap ile rahatça dönebilir. Pervaneli sualtı araçlarında üretilen tahrik kuvvetinin verimliliği yüzde 70’in altındadır. Ancak, gerçek bir balıkta üretilen bu kuvvetin verimi esnek kuyruk yapısı ile pervaneli araçlardan yüzde 20 daha fazla olmaktadır. Bu doğal özellikler dikkate alındığında, insansız bir sualtı robotu tasarımında balıkların oldukça uygun bir yapıya sahip olduğu görülmektedir [10,11]. Balıklardan esinlenerek geliştirilen sualtı araçları robot balık olarak isimlendirilirler. Robot balıklar sualtı kaynaklarının araştırılması, kirliliğinin belirlenmesi, doğal canlıların gözlemlenmesi, batık bölge ve araçların incelenmesi, elektrik ve petrol boru hattı gibi kritik bölgelerde arıza tespiti ile kıyı şeritlerinin güvenliği gibi birçok sualtı uygulamalarında keşif, gözlem, araştırma ve askeri amaçlı kullanılabilirler [12–15].

Robot balıkların biyomimetik tasarımı kadar kullanılan denetim yapısı da robotun etkinliğinde oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, özellikle analitik yöntemler ve Merkezi Örüntü Üreteçleri (MÖÜ, Central Pattern Generators, CPGs) üzerine yoğunlaşıldığı görülmüştür. Analitik yöntemlerde, robot tasarımı için referans alınan canlının hareket denklemleri kullanılır [15–18]. Bu denklemler

balıklarda enine hareket sinyali olarak isimlendirilir. Balığın basit fiziksel hareketlerinin matematiksel karşılığı olan enine hareket sinyali ile yapılan hareket denetimi oldukça sınırlıdır. Çünkü bu ifade balığın sadece temel hareketlerini içerir ve dış ortama karşı gerekli tepkileri içermez. Ayrıca, enine hareket sinyali ile elde edilen eklem açıları sabit değerlerdir ve robotun çalışması esnasında bu açıların genlik, ofset ve frekans gibi parametre değişimlerini sağlamak oldukça zordur [17,19,20]. Bu dezavantajlar, araştırmacıları MÖÜ'ler gibi farklı hareket denetimi yöntemlerine yöneltmiştir. MÖÜ'ler biyomimetik hareket denetimi yaklaşımını içermektedir.

Vücudun gerçekleştirdiği lokomotor hareketler, yüksek beyin merkezinden veya duyuşsal alıcılardan herhangi bir uyarıcı gelmeden omurilikte bulunan sinir hücreleri ile oluşturulabilir. Bu sinir hücreleri literatürde MÖÜ olarak tanımlanmıştır. MÖÜ hücreleri herhangi bir geri besleme sinyali olmadan canlıların temel hareketlerini üretmek için ritmik, kararlı ve salınımlı çıktılar oluşturan biyolojik sinirsel yapılardır [18,21–29].

MÖÜ'nün canlılar üzerindeki temel görevleri uçma, yüzme, atlama, yürüme, koşma, emekleme ve sürünme gibi temel fonksiyonlar olan gövdenin ve/veya uzuvların hareketlerini sağlamaktır. Ayrıca, solunumu, emmeyi, yalamayı ve çiğnemeyi gerçekleştirmek veya gerçekleşmesine yardımcı olmak da MÖÜ hücreleri ile sağlanabilir [18,21,30]. MÖÜ'lerin en önemli özelliklerinden birisi de canlının hareketi esnasında dış ortamdan gelen bozucu etkilere karşı belirgin şekilde tepkiler vererek ritmik davranışın kaldığı yerden istenilen şekilde devam etmesini sağlayabilmektir [18,24,31,32]. Mühendislik alanlarındaki araştırmacılar bu zengin ritmik ve davranış tabanlı hareketleri üretebilen ve kontrol edebilen biyolojik MÖÜ devrelerinden esinlenerek, yapay MÖÜ modelleri geliştirmeye ve sürekli durumdaki hareketin performansını iyileştirmeye yönelik birçok çalışma yapmaya başlamıştır [1,33–39]. Özellikle, robotik alanında birden fazla eklem sahip bir robotun her bir eklemine canlının kaslarında gözlemlenen eşzamanlı ve doğrusal olmayan hareket özelliklerini eklemek her zaman önemli bir problem olmuştur [18]. Bunun üstesinden gelmek ve etkin bir hareket kabiliyeti sağlayabilmek için bir MÖÜ modeli konum, kuvvet, moment, kas uzunluğu, hareket hızı ve frekansı gibi farklı fiziksel özelliklere bağlı davranışları kolayca üretebilmekte ve dış bozuculara karşı bu dinamik davranışların sürekliliğini koruyabilmektedir. Böylece, MÖÜ tabanlı denetim yöntemleri özellikle değişken dinamiğe sahip ortamlarda salınımlı lokomotor davranışlar için tek başına veya diğer denetim yöntemleri ile birlikte sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca, yukarıda bahsedilen bu özellikler çeşitli robot ve mühendislik sistemleri için kararlı, uygulanabilir,

uyarlanabilir ve hiyerarşik denetim sistemleri haline gelebilen yeni nesil denetim sistemleri için sinirsel bir MÖÜ devresini oldukça popüler bir hale getirmiştir [2,13,21,36,39–43].

1.1. Literatür Taraması

Balıklar, sahip oldukları üstün yüzme yetenekleri sayesinde sualtında oldukça rahat şekilde yüzebilmektedirler. Bu özellikler, araştırmacıları sualtı robotu tasarımında balıkların yüzme yeteneklerinden faydalanmaya doğru yöneltmiştir. 1990'lı yılların başında, Triantafyllou [44–46] sualtı robotlarının hidrodinamiğini inceleyerek bu alanda yapılan ilk çalışmaları başlatmıştır. 1994 yılında, sualtı canlılarının hidrodinamik yapısını araştırmak için MIT tarafından sekiz eklemlili RoboTuna isimli ilk robot balık geliştirilmiştir [47,48]. Bu çalışmanın devamında, Draper Laboratuvarı tarafından üç boyutlu yüzme kabiliyetine sahip, 173kg ağırlığında, 2.4m uzunluğunda, Thunniform türü balıklardan esinlenerek VCUUV isimli robot balık üretilmiştir. Hidrolik tahrik mekanizmasına sahip bu robot istenilen derinlik seviyesine dalma özelliğine sahip ilk robot balık olarak bilinmektedir [12,49]. 2000 yılında ise Hirata tarafından küçük boyutlu ve farklı kuyruk modellerine sahip üç eklemlili bir robot balık geliştirilmiştir. Bu robot balık ile farklı kuyruk yapılarının etkileri araştırılmıştır [44]. 1994-2000 yılları arasında yapılan bu çalışmalar ile robot balık olarak isimlendirilen sualtı robotlarına olan ilgi de giderek artmaya başlamıştır.

Bu çalışmaların devamında araştırmacılar tarafından farklı tahrik mekanizmasına sahip birçok robot balık geliştirilmiştir [12,50–54]. Tasarlanan Nanyang Awana isimli robot balık ile maksimum tahrik kuvvetinin robota ait hangi denetim parametreleri ile elde edildiği araştırılmıştır [55]. Yu ve arkadaşları, Amphibious türü hem karada hem de suda hareket edebilen göğüs yüzgeçlerine sahip üç eklemlili ve üç tekerlekli bir robot balık geliştirmişlerdir [27]. Aynı zamanda, bu araştırmacılar tarafından bir, üç ve dört eklemlili olmak üzere birçok robot balık ve yunus geliştirilerek bu robotların yüzme performansları incelenmiştir. Bu çalışmaların bazılarında göğüs yüzgeçlerinin yüzme performansına olan etkileri üzerine yoğunlaşmıştır [2,7,15,41,52,53,56]. Zhao ve arkadaşları, tek eklemlili ve çift göğüs yüzgeçli, üzerinde bulunan kamera ile nesne takibi yapabilen bir robot balık üretmişlerdir [57]. Wang ve arkadaşları ise torpido görünümüne ve tek eklemlili kuyruk yüzgeciye sahip 1.6m uzunluğunda SPC isimli bir robot balık geliştirmişlerdir. Bu balık üzerinde sualtı araçlarının kuyruk yüzgeci ile yönelim etkinliği araştırılmıştır [58]. Bir başka çalışmada, yüksek hızlarda yüzme yeteneğine sahip Ichthus isimli iki eklemlili bir robot balık

geliştirilmiştir. Ichthus, üzerinde bulunan çeşitli sensörler ile otonom yüzme kabiliyetine sahiptir [10,14]. Wang ve arkadaşları, tek eklemlili ve çift göğüs yüzgeçli üç boyutlu olarak yüzebilen bir robot balık üretmişlerdir. Üzerinde bulunan basınç sensörü ile hız analizleri ve kablosuz kamera ile nesne takibi üzerine çalışmalar yapmışlardır [59]. Aynı zamanda, bu çalışmalardan farklı olarak North-Western ve Tokai Üniversiteleri'nde şekil hafızalı alaşımlar kullanarak tek eklemlili ve küçük boyutlu robot balıklar üretilmiştir. Bu robotlar tahrik mekanizmasının titreşim özelliğine sahip olmasından dolayı düşük manevra kabiliyetine sahiplerdir [60]. Hu ve Liu ise Carangiform özelliklerine sahip, yüksek hızlı ve manevra kabiliyeti ile üç boyutlu hareket edebilen, G9 isimli biyomimetik bir robot balık geliştirmişlerdir. Londra County Hall Akvaryumu'nda sergilenen bu robot su içerisinde otonom olarak yüzebilmektedir [12,17,61].

Robot balıkların tahrik mekanizmaları incelendiğinde, hareket denetiminde çeşitli MÖÜ modelleri üzerine yoğunlaşıldığı görülmüştür. Araştırmacılar, ritmik, salınımlı ve davranış tabanlı hareketleri üretme yeteneklerinden dolayı biyolojik MÖÜ hücrelerinden esinlenerek geliştirilen MÖÜ modelleri ile robotların hareket denetimine yönelik birçok çalışma yapmaya başlamıştır [1,33–39].

Tasarım ve modelleme yapılarındaki farklılıklar dikkate alınarak MÖÜ modelleri biyofiziksel, ilişkisel ve soyut model olmak üzere üç temel sınıflandırma altında toplanabilir [18,21,28]. Bazı çalışmalarda ise tasarlanan MÖÜ modelleri bir canlı vücudunun biyomimetik benzetim veya deneysel modeli ile birleştirilerek nöromekanik model adıyla tanımlanmıştır [21]. Bir nöromekanik MÖÜ modeli biyofiziksel ve ilişkisel modeli de içerebilmektedir. Aynı zamanda, soyut modelin de kuplaj bağlantılarını kullanabilir [21,42,62,63]. Bu yüzden, MÖÜ modellerini yukarıda anlatılan temel üç sınıf altında toplamak daha doğru olmaktadır [18,24,28].

Biyofiziksel modeller genel olarak Hodgkin-Huxley (H-H) tipi sinir hücresi modellerine dayanarak oluşturulmuştur ve bunların birçoğu küçük sinirsel yapılar ile ritmik aktivite çıktılarını araştırmaktadır [21,32,64]. Bazı çalışmalarda ise bu tür sinirsel modellerin zar potansiyellerinin ateşleme hızları incelenmiştir. Ancak bu tür model çalışmaları genellikle karmaşık olmayan sinir hücresi grupları üzerine yoğunlaşmıştır [65,66]. Biyofiziksel MÖÜ modellerinin robotik sistemlere uygunlamasına örnek ise son yıllarda Rigatos [67] ve Wen'nin [68] yaptığı çalışmalar olarak verilebilir. Rigatos, geliştirilmiş H-H tür MÖÜ modeli olan FitzHugh-Nagumo modeline gürültülerin azaltılması için Kalman filtresi uygulayarak robotik sistemlerde uygulanabilirliğini göstermiştir [67]. Wen ve arkadaşları, 8

adet H-H modellenli MÖÜ devresinin parametrelerini Genetik Algoritma (GA) kullanarak belirlemişler ve geliştirdikleri model ile yılanı bir robotun hareketlerini benzetim ortamında gerçekleştirmişlerdir [68]. Herrero-Carron ve arkadaşları ise Rulkov sinir hücresi modeli kullanarak solucan türü bir robotun sinüzoidal hareketlerini modellemişlerdir [69,70].

İlişkisel MÖÜ devreleri genel olarak Sızdıran Topla ve Ateşle (STA) hücrelerinden oluşturulmuştur [21,36,40,71,72]. Bu tür MÖÜ modellerinin odak noktası, ritmik salınımlı hareketlerin ara sinir hücreleri ile nasıl üretildiği ve nasıl uygulanabilir hale geldiği üzerine olmuştur [21,36,72–74]. Bu modellere örnek olarak, Ekeberg, basitleştirilmiş bir ilişkisel MÖÜ yapısı geliştirmiş ve 100 adet MÖÜ hücresi ile Lamprey balıklarının yüzüş hareketlerini modellemiştir [71]. Li ve arkadaşları, tırtıl model alınarak geliştirilen çok eklemlili bir robotun hareketlerini Lamprey tabanlı MÖÜ devresi kullanarak denetlemiştir [36]. Chowdhury ve Panda ise iki eklemlili bir robotun orta ve/veya çift yüzgeçler (Median and/or Paired Fin, MPF) türünde hareketlerini elde etmek için Matsuoka tabanlı doğrusal olmayan osilatör modeli tasarlamışlardır. Robotun hareketleri de deneysel olarak gözlemlenmiştir [75].

Soyut modeller ise birbirine sinapslar ile bağlanan (kuplajlanmış) ağ yapısına sahip sinirsel MÖÜ devreleridir. Soyut modeller, doğrusal veya doğrusal olmayan osilatörlerin matematiksel modellerine dayanarak tasarlanır ve bu sinirsel ağların içsel dinamikleri incelenir [21,42,76–78]. Bu tasarımda asıl amaç farklı sinaptik bağlantılar ile farklı topolojiler oluşturmak ve böylece salınım çıkışının frekansını, genliğini ve faz farkını istenilen şekilde belirlemektir [21,79]. Buna örnek olarak Ijspeert ve arkadaşları, Kuramoto osilatörü tabanlı Genlik Denetimli Faz (GDF) osilatörünü kullanarak yılanı ve semender robotların hareket denetimlerini yapmışlardır [4,79,80]. Yu ve arkadaşları, GDF osilatörleri ile çok eklemlili bir robot balığın ileri, geri ve dönüş hareketlerini oluşturmuşlardır [2,18]. Aynı zamanda içsel frekans bileşenlerinin ayrıklaştırılabildiği ve genliğin denetlenebildiği Hopf osilatörler de literatürde sıklıkla kullanılmıştır [5,7,18,21,31,52,81]. Yu ve arkadaşları, Hopf osilatörler ile çok eklemlili bir robot balığın hem vücut ve/veya kuyruk yüzgeci (Body and/or Caudal Fin, BCF) hem de MPF türü hareketlerini incelemişlerdir [1,2,33]. Wang ve arkadaşları, Carangiform türü bir balığın enine hareket sinyalini Hopf osilatörler ile elde etmişlerdir [6]. Hu ve arkadaşları ise Thunniform türü bir robot balığın yüzme hızını Hopf osilatör ile deneysel olarak denetlemişlerdir [5]. Bazı çalışmalarda da bir soyut model türü olan Wilson-Cowan osilatörlerin kuplajlama yöntemleri değiştirilmiş ve eş zamanlı çalışmasına yönelik araştırmalar yapılmıştır [18,82].

Günümüzde, yukarıda bahsedilen birbirinden farklı birçok MÖÜ modeli yüzen robotlarda (Anguilliform, Carangiform, Ostraciiform, Thunniform, vatoz, kaplumbağa, yılan, tek yüzgeçli, tek eklemli ve yunus benzeri), birden fazla bacaklı veya uzuvlu robotlarda (insansı robot, dörtlü, altılı, sekizli veya daha farklı şekilde yapılandırılabilir bacaklı/uzuvlu/eklemli robot), emekleyen, sürünen ve tırmanan robotlarda (yılan, semender, kertenkele, tırtıl, solucan ve benzeri), kanat çırparak uçan robotlarda ve diğer ritmik hareketler ile çalışan robotlarda (robot kolu ve endüstriyel robotlar) sıklıkla kullanılmaktadır [5,7,16,18,21,24,39,83]. Ancak bu MÖÜ modelleri de kendi içerisinde duysal geri beslemeye sahip kapalı çevrim denetimli ve duysal geri beslemeye sahip olmayan açık çevrim denetimli olarak iki sınıfa ayrılabilir. Bu sebeple, öncelikle robot türlerine göre yapılan literatür araştırması verilmiş ve ilerleyen kısımlarda duysal geri beslemeye sahip kapalı çevrim denetimli robotlar ve MÖÜ modellerinden bahsedilmiştir.

Literatürdeki yüzen robotlar incelendiğinde, birbirinden farklı birçok MÖÜ modelinin kullanıldığı görülmektedir. Zhang ve arkadaşları, altı eklemli bir robot balık modelinin ileri, geri ve dönüş yüzme hareketlerini doğrusal olmayan Zhang osilatörleri ile benzetim ortamında gerçekleştirmişlerdir [84]. Wang ve arkadaşları, halka bağlı doğrusallaştırılmış GDF osilatörlerini kullanarak üç eklemli robot balığın ileri yön ve dönüş hareketlerini üretmişlerdir [85]. Daha sonra, Carangiform türü bir balığın aynı osilatör modeli ile enine hareket sinyallerini elde ederek robot balık ile tasarımın etkinliğini ileri ve geri yön hareketler için deneysel olarak test etmişlerdir [86]. Aynı zamanda, MÖÜ tabanlı denetleyicinin mikrodenetleyici ile programlanması üzerine bazı çalışmaları da mevcuttur [38,87]. Başka bir çalışmada ise GDF osilatörlerine genlik, ofset ve frekans denetim fonksiyonları ekleyerek tek eklemli ve çift göğüs yüzgeçine sahip Ostraciiform türü bir robot balığın yörünge takip denetimi gerçekleştirilmiştir. Yörünge takibinin başarımını arttırmak için, robot balığın sapma, yunuslama ve yalpalanma açılarının denetimi de ayrıca yapılmıştır [39,50]. Bu çalışmalarının devamında, geliştirdikleri robot balığın aynı osilatör modeli ile frekans ve atak açısı değişimine bağlı ileri yön performansları incelenmiştir [59]. Ayrıca, bu robotun bir noktadan başka bir noktaya en kısa yoldan daha hızlı bir şekilde gitmesini sağlamak için Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile MÖÜ osilatörü parametrelerinin en uygun değerleri elde edilmiştir [88]. Ijspeert ise MÖÜ modellerinin incelenmesinde önemli bir yeri olan Lamprey balıklarının osilatör modelini STA ile elde ederek semender türü bir robotun yüzme hareketlerini üretmiştir [80]. Crespi ve Ijspeert, GDF osilatörleri ile tek eklemli ve çift göğüs yüzgeçli Ostraciiform türü bir robot balığın ileri ve dönüş yüzme

hareketlerini, düz bir zeminde göğüs yüzgeçleri ile ilerlemesini ve foto diyot ile ışığa yönelmesini sağlamışlardır [3,4]. Zhang ve arkadaşları, çift kuyruk ve göğüs yüzgeçli küçük boyutlu bir robot balık prototipi geliştirmişlerdir. Bu robot ile Hopf osilatörler kullanarak hem BCF hem de MPF hareket türlerini incelemişler ve engellerden sakınarak üç boyutlu hareketlerin denetimini gerçekleştirmişlerdir [89]. Hu ve arkadaşları, tek eklemli bir robot balığın ileri yön hareketini Hopf osilatörü ile elde etmişler ve frekans değişimine bağlı hız performansını incelemişlerdir [90]. Zhu ve arkadaşları ise 24 Serbestlik Dereceli (SD) bir robot vatoz balığının hareketlerini MÖÜ osilatörleri ile denetlemişlerdir [91]. Hu ve arkadaşları, Hopf osilatörlerinde bir öğrenme algoritması geliştirerek bu osilatörlerin istenilen genlik ve faz değerlerini üretmesini sağlamışlardır. Bu sonuçlar, çok eklemli bir robot balık modelinde ileri yön hareketler için sınanmıştır [9,31]. Niu ve arkadaşları, Anguilliform türü bir balığın dört eklemli olduğunu kabul ederek ileri ve geri yön hareketler için robotun eklem açılarını elde etmişlerdir. Bu açıları, üç boyutlu halka bağlı Andronov-Hopf osilatörleri ile üreterek robot balık prototipine uygulamışlardır. Aynı zamanda, eklem açılarının daha doğru elde edilmesi için osilatör çıkışlarında ileri beslemeli Yapay Sinir Ağı (YSA) modeli kullanılmıştır [92,93]. Zhou ve arkadaşları, vatoz balığından esinlenerek geliştirdikleri sekiz eklemli bir robotun kendi geliştirdikleri MÖÜ osilatörleri ile sinüzoidal hareketlerini incelemişlerdir. GA ile MÖÜ osilatörlerinin en uygun parametreleri de elde edilmiştir [94]. Sfakiotakis ve arkadaşları ise sekiz eklemli bir robot vatoz balık için GDF osilatörleri ve geleneksel Oransal Integral Türev (PID) denetleyici kullanarak Euler açılarının denetimini gerçekleştirmişlerdir [95]. Sinüzoidal eklem açılarının sinyal yapısı çok uygun olmamasına rağmen Matsuoka osilatörler kullanılarak da robot balığın hareketleri incelenmiştir. Wang ve arkadaşları, tek eklemli bir robot balığın kuyruk hareketlerini Matsuoka osilatörleri ile üreterek, kuyruk üzerine etki eden kuvvetlerin analizini gerçekleştirmişlerdir [51]. Hu ve arkadaşları ise Matsuoka osilatörler ile robotun ileri, geri ve dönüş hareketlerini test etmiştir [96]. Matsuoka osilatörler ile yapılan bu çalışmalar incelendiğinde, osilatör yapısının eşzamanlı çalışmasının oldukça karmaşık olduğu görülmüştür.

Yu ve arkadaşları, geliştirdikleri MÖÜ osilatörler ile iki, üç ve dört eklemli robot balıklarda yüzüş hareketlerinin gerçekleştirilmesi üzerine birçok çalışma yapmışlardır [1,18,41,97]. Doğrusal olmayan bir MÖÜ osilatörü ile iki ve dört eklemli robot balıkların enine hareket sinyallerini üreterek, PID denetleyici ile derinlik denetimini gerçekleştirmişlerdir [52,97]. Ayrıca bazı çalışmalarda, üç ve dört eklemli robot balıkların

iki ve üç boyutlu BCF ve MPF hareketlerinin denetimini yapmışlardır. Bu çalışmalarda, Hopf ve GDF osilatörleri ile farklı kuplajlı bağlantılar kurulmuştur. Ayrıca, robot balıkların matematiksel modelleri türetilerek benzetim ortamında da önerilen yöntemler sınanmıştır. Osilatörlerin çıkış frekansı, genliği ve faz farklarının değişimine göre yüzme hızları ile dönüş yarıçapı gibi hareketin etkinliğini veren karakteristik özellikler de bu çalışmalarda deneysel olarak test edilmiştir [2,7,8,53,56,62,98,99]. Yu ve arkadaşları bazı çalışmalarda ise hem BCF hem de MPF tür yüzme modlarında en uygun hız değerlerini elde etmek için MÖÜ osilatör parametrelerinin PSO analizini yapmışlardır [33,100]. Başka bir çalışmada ise bir nesneyi istenilen bir noktaya götürmek için robot balık sürüleri kullanılmış ve robotların hareketi GDF osilatörleri ile üretilmiştir [41].

Araştırmacılar çok eklemlili robotların MÖÜ modelleri ile hareketlerinin gerçekleştirilmesi üzerine de yoğunlaşmışlardır. Wörgötter ve Manoonpong eklem bacaklı canlıların hareketlerini üretmek için YSA tabanlı sinirsel bir MÖÜ devresi tasarlamışlardır. Ayrıca, AMOS-WD06 ve AMOS-WD08 isimli altı ve sekiz bacaklı iki robot geliştirmişler ve bu robotların taşlı, kumlu, karlı ve kaygan olmak üzere farklı ortamlarda lokomotor hareketlerinin denetimini gerçekleştirmişlerdir [101–105]. Geliştirdikleri MÖÜ devresi filtre, hız ve faz denetim gibi birçok alt katmandan oluştuğu için oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir ve ilişkisel bir model sınıflandırması içerisinde yer almaktadır [43,101]. Yu ve arkadaşları, Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri (APKD, Field Programmable Gate Array, FPGA) kullanarak geliştirdikleri altı bacaklı bir robotun Van der Pol osilatörü ile ileri yön hareketindeki hız değişimini incelemişlerdir [105]. Zhong ve arkadaşları ise altı bacaklı örümcek robotun Matsuoka osilatörü kullanarak farklı hareket örnekleri için denetimini gerçekleştirmişlerdir [106].

Eklem bacaklılar dışında, dört bacaklı omurgalılarından esinlenerek geliştirilen birçok robot mevcuttur. Ijspeert [107–109] ve Wang [110], dört bacaklı bir robotun eklem hareket fazlarının değişimini adaptif Hopf osilatörü kullanarak üretmişlerdir. Ijspeert, adaptif Hopf osilatörün istenilen genlik ve frekans bileşenlerine ulaşmasını sağlamak için bir öğrenme yöntemi önermiştir [108]. Wang ise geliştirdiği robotun hem koşma hem de yürüme hareket geçişlerinin denetimini sağlamış ve duyuşsal geri besleme ile ayağın temas ettiği yüzeylere göre robotun tepkisini incelemiştir [111,112]. Zhang ve arkadaşları ise AIBO robotun hareketlerini GA ile belirleyerek Hopf osilatör ile gerçekleştirmişlerdir [113].

İnsansı robotlarda ise hareketi sağlayan bacaklardaki serbestlik derecesinin artması robotun denetimini zorlaştırmaktadır. Literatürde bunun için geliştirilen bazı MÖÜ devreleri

ile yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Liu ve arkadaşları, bir NAO robotun eğimli ve düzensiz arazilerdeki yürüme hareketlerini Sıfır Moment Noktası (SMN, Zero Moment Point, ZMP) ile üreterek Matsuoka osilatörü ile denetlemişlerdir [42]. Zhang ve arkadaşları da bir NAO robotun bacak hareket yörüngelerini üreterek Hopf osilatörü ile deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir [114]. Ryu ve arkadaşları, HOAP-3 insansı robotun alt ve üst bacaklarının eş zamanlı koordinasyonunu Matsuoka osilatörleri ile denetlemişlerdir. Ayakların yere temas ettiği zaman değeri ise geri besleme ile osilatörlere iletilmiştir [115]. Avrin ve arkadaşları, insansı bir robotun bacaklarının eş zamanlı hareketini gerçekleştirmek için kullandıkları Matsuoka osilatörün parametrelerini PSO ile elde etmişlerdir [116]. Liu ve arkadaşları, 12 adet Matsuoka osilatörü kullanarak bir insanın kalça merkezli hareketlerini üretmişlerdir [76]. Yapılan bu çalışmalar incelendiğinde, insansı robotların hareket denetimi için ağırlıklı olarak Matsuoka osilatör modelinin daha uygun bir yapıda olduğu görülmektedir. Ancak, Matsuoka osilatörlerin karmaşık yapısı uygun parametre değerlerinin belirlenmesini zorlaştırmaktadır.

Literatürde, doğadaki çeşitli sürüngen türlerinin de robotik alanında sıklıkla modellendiği ve prototip çalışmalarının gerçekleştirildiği görülmektedir. Ijspeert ve arkadaşları, sürüngenlerin hareketlerinden esinlenerek geliştirdikleri eklem parçalarının hareketleri ile modüler birçok robot geliştirmişlerdir [117]. Yamor isimli eklemler birbirleri ile Bluetooth kablosuz haberleşme özelliklerini kullanarak birleştirilmiş ve yılanı bir robot modeli oluşturulmuştur. Yamor eklemleri ile oluşan bu robot, GDF osilatörleri ile hem yılan hem de tırtıl hareketlerini taklit edebilmiştir. Robotun hareketleri bir kamera aracılığı ile gözlemlenerek doğru hareketlerin üretilebilmesi için GDF parametreleri de eşzamanlı olarak belirlenmiştir [118]. Ijspeert ve arkadaşları, AmphiBot isimli bir robot geliştirerek GDF osilatörleri ile robotun hareketlerini Lamprey türü MÖÜ yapısı ile sağlamışlardır. Ancak bu yapı tam olarak biyofiziksel bir MÖÜ modeli özelliklerini içermemektedir [79,119]. Li ve arkadaşları, geliştirdikleri çok eklemlili bir robotun yılan ve tırtıl hareketlerini yapabilmesi için Lamprey türü MÖÜ modeli kullanmışlardır [36,37]. Zhang ve arkadaşları, Hopf osilatörlerinin farklı kuplajlı bağlatıları ile çok eklemlili bir yılanı robotun hareketlerini test etmişler ve frekans değişimine bağlı olarak hız performansını incelemişlerdir [120]. Bing ve arkadaşları, tasarladıkları bir MÖÜ osilatörü ile yılanı bir robotun hareketini gerçekleştirmişler ve bu robot için hareketli bir nesnenin takip algoritmasını geliştirmişlerdir [53].

Bazı çalışmalarda ise MÖÜ modelleri farklı robot türleri için kullanılmıştır. Chung ve arkadaşları, yarasadan esinlenerek geliştirdikleri kanat çırparak uçan bir robotun Hopf osilatörleri ile hareketlerini oluşturmuşlardır. Ayrıca, kanat çırpınma frekansının denetimini de gerçekleştirmişlerdir [121]. Kwon ve arkadaşları da Matsuoka osilatörleri kullanarak çok eklemlili bir robot kolun tutucu ucunun bir nesneyi bulunduğu yerden tutarak kaldırmasını sağlamışlardır [122,123].

Duyusal geri beslemeli ve kapalı çevrim bir MÖÜ modeli ise hem vücut hareketlerinin daha doğru ve denetimli üretilebilmesi hem de robotun çevresel faktörlere göre hareketini belirlemesi için oldukça önemlidir. Ayrıca, biyolojik MÖÜ hücreleri duyusal sinir hücrelerinden aldıkları bilgilere göre motor çıktıların modülasyonunu da kolayca sağlayabilmektedir. Böylece, MÖÜ modeline eklenen duyusal geri besleme yeteneği biyolojik bir MÖÜ modeline daha yakın olmaktadır [18,21].

Literatürde, yüzen robotlar incelendiğinde bazı kapalı çevrim denetimli çalışmalar bulunmaktadır. Wang ve arkadaşları, otonom olarak hareket edebilen tek eklemlili Ostraciiform türü bir robot balık geliştirmişlerdir. Robotun hareketi halka bağlı GDF osilatörleri ile sağlanmıştır. Duyusal işlemci merkezi olarak tanımladıkları geri beslemeli yapı ile robotun osilatör parametreleri gideceği yörünge ve en uygun hız değerleri için eşzamanlı olarak belirlenmiştir. Duyusal işlemci merkezinde PSO algoritması kullanılmıştır [88]. Wang ve arkadaşlarının başka bir çalışmasında, tek eklemlili robot balıktan ivmeölçer ve jiroskop sensörlerinin birlikte bulunduğu ataletsel ölçüm birimi (Inertial Measurement Unit, IMU) sensörü aracılığı ile sapma ve yalpalanma açıları geri besleme olarak alınmıştır ve PID denetleyici aracılığıyla bu açıların denetimi gerçekleştirilmiştir. PID denetleyicinin çıkışında kullanılan GDF osilatörlerinin parametreleri belirlenen geçiş fonksiyonları ile belirlenmiştir [39]. Ayrıca, robot balığın üzerinde bulunan kamera modülü geri besleme olarak kullanılarak hareketli bir nesnenin robot balık ile takip edilmesi sağlanmıştır. Bu kapalı çevrim denetimde, PID ve GDF osilatörleri ile sapma açısı denetlenmiştir [50]. Ijspeert ve arkadaşları, Ostraciiform türü tek eklemlili bir robot balığın halka bağlı GDF osilatörleri ile hareketlerini gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, hareketli bir ışık yayan nesnenin takip edilmesi için kapalı çevrim denetim sistemi oluşturulmuş ve geri besleme yapısı iki adet foto diyot ile sağlanmıştır. Hareket eden nesnenin takibi Oransal Türev (PD) denetleyicinin osilatör genlik, frekans ve ofset parametrelerini belirlemesi ile sağlanmıştır [3]. Takip ortamı hem su içerisinde hem de düz bir zeminde gerçekleştirilmiştir. Robotun düz zeminde hareketleri ise çift göğüs yüzgeçleri ile sağlanmıştır [4]. Ijspeert ve

arkadaşlarının çok bacaklı robotlarda da kapalı çevrim geri beslemeli bazı çalışmaları mevcuttur. Engebeli bir arazide, dört bacaklı bir robotun hareketini Hopf osilatörleri ile sağlamışlardır. Hopf osilatörün çıkışını belirleyen eşitliğe matematiksel bir fonksiyon ekleyerek bacak hareketlerinin faz geçişleri denetlenmiştir [81,109]. Yu ve arkadaşları, iki eklemlili Carangiform türü bir robotun hareketlerini Hopf osilatörleri ile sağlamışlardır. Robotun derinlik seviyesinin denetimini ölçmek için basınç sensörü geri besleme olarak kullanılmıştır. Basınç sensöründen gelen bilgi referans giriş değeri ile karşılaştırılarak bulanık denetleyiciye uygulanmıştır. Bulanık denetleyici ile robot balığın çift göğüs yüzgeçlerinin hareketini sağlayan osilatörlerin ofset değerleri belirlenmiştir [52]. Yu ve arkadaşları ayrıca dört eklemlili bir robot balığın iki boyutlu yüzüşünün engellerden sakınarak gerçekleşmesini sağlamışlardır. Robotun hareketleri Hopf osilatörler ile üretilmiştir. Engellerin belirlenmesi için robotun üzerinde bir kamera modülü kullanılmıştır. Ancak, osilatör ofset ve genlik parametrelerini belirleyen denetleyici basit bir geçiş fonksiyonu ile oluşturulmuştur [62]. Wang ve arkadaşları, dört eklemlili ve çift göğüs yüzgeçli bir robot balığın Hopf osilatörleri ve bir geçiş fonksiyonu ile kızılötesi mesafe sensörlerinden gelen bilgilere göre engellerden sakınmasını denetlemişlerdir. Geçiş fonksiyonu osilatörlerin ofset değerlerini değiştirmek için kullanılmıştır. Ayrıca, bir kamera ile ölçülen robot balığın hızı bulanık denetleyici yardımıyla osilatörlerin frekans ve genlik parametreleri ayarlanarak denetlenmiştir [1,56]. Wu ve arkadaşları ise dört eklemlili bir robotun iki boyutlu yüzüş hareketlerini Hopf osilatörler ile üretmişlerdir. Osilatör ofset parametresi ise Oransal (P) denetleyici ile belirlenmiş ve robotun sapma açısı denetlenmiştir [7]. Yu ve arkadaşlarının bir başka çalışmasında ise üç eklemlili robot balık sürüşünün iki boyutlu ortamda bir nesneyi iterek istenilen bir noktaya götürmesi sağlanmıştır. Robotların kuyruk hareketleri GDF osilatörleri ile sağlanmıştır. Nesnenin anlık konumu deneysel ortamın üzerinde bulunan sabit bir kamera ile belirlenmiş ve robotların sapma açısı denetlenmiştir [41]. Hu ve arkadaşları, Thunniform türü tek eklemlili ve çift göğüs yüzgeçleri bulunan bir robot balık geliştirmişlerdir. Robot balığın kuyruk yapısı dört kol mekanizmasına göre tasarlanmış ve iki adet Hopf osilatörü ile hareketi sağlanmıştır. Üzerinde bulunan IMU sensörü ile yalpalanma ve yunuslama açıları geri besleme olarak alınarak PID denetleyiciye uygulanmıştır. PID denetleyici ise çift göğüs yüzgeçlerininin açılarını üreterek referans hareketlerin üretilmesini sağlamıştır. Ancak bu çalışmada bulunan geri besleme yapısı osilatör modeli ile ilişkili değildir [5]. Kim ve arkadaşları ise, geliştirdikleri üç eklemlili robot balığın Matsuoka osilatörleri ile hareketini sağlamışlar ve PD denetleyici ile osilatör ofset

parametrelerini kullanarak robotun sapma açısının denetimini gerçekleştirmişlerdir [77]. Seo ve arkadaşları ise robot balıktan farklı olarak yüzen bir robot kaplumbağa geliştirmişlerdir. Robotun üç boyutlu hareketini Hopf osilatörler ile üzerinde bulunan dört adet kuyruk sağlamaktadır. Osilatörlerin ürettiği sinüzoidal sinyaller PD denetleyiciye uygulanarak robotun sapma, yunuslama ve yalpalanma hareketleri denetlenmiştir [124]. Başka bir çalışmada ise Sfakiotakis ve arkadaşları altı eklemlili vatoz türü bir robot geliştirmişler ve robotun enine hareket sinyallerini üretmek için GDF osilatörleri kullanılmıştır. Robotun PD denetleyici ile sapma açısı denetlenmiştir [95].

Yüzen robotlar ve özellikle bu tez çalışmasında üretilen robot balık benzeri robotlar ile yapılan geri beslemeli kapalı çevrim denetim çalışmaları bu bahsedilenler ile sınırlıdır. Ancak, aşağıda bazı farklı tür robotlar ile yapılan kapalı çevrim çalışmalara da örnekler verilmiştir.

Li ve arkadaşları, biyofiziksel model özelliklerine sahip Lamprey türü canlılardan esinlenerek geliştirdiği MÖÜ osilatörleri ile çok eklemlili hem yılan hem de tırtıl gibi hareket edebilen bir robot geliştirmişlerdir. Robotun engellerden sakınarak engebeli ortamlarda hareket edebilmesi için MÖÜ osilatörlere ayrıca duyuşal geri besleme özelliğine sahip ara sinir hücreleri eklenmiştir. Böylece, robot karşısına çıkan engellere göre duyuşal yapı ile hareketinin yönünü kolayca değiştirebilmektedir. Ayrıca, GA ile MÖÜ parametrelerinin en uygun değerleri belirlenerek engebeli ortamlarda robotun hareketi sağlanmıştır [36]. Wang ve arkadaşları, Matsuoka osilatörler ile insansı bir robotun bacaklarının faz geçişlerini üretmişlerdir. Osilatör çıkışında bulunan PD denetleyici ile istenilen hareket fazları için eklem motorlarının açıları denetlenmiştir [125]. Liu ve arkadaşları ise insansı bir robotun yürüme fazındaki hareketlerini Matsuoka osilatörler ile sağlamışlar ve osilatörlerin genliği P denetleyici ile belirlenmiştir [42]. Hong ve Lee ise insansı bir robotun bacaklarını benzetim ortamında modelleyerek Matsuoka osilatörler ile hareketini üretmişlerdir. SMN yöntemi ile hareketlerinin denetimi sağlanmış ve osilatör parametrelerinin uygunluğu evrimsel bir algoritma ile belirlenmiştir [126].

Literatürde bulunan bu çalışmalar detaylı bir şekilde incelendiğinde, sinirsel MÖÜ modelleri çok eklemlili bir robot balığın hareketlerini üretmek için oldukça uygun bir yapıya sahiptir. Ancak, var olan çalışmaların büyük çoğunluğu açık çevrim yapıya sahip MÖÜ modelleridir. Böylece, duyuşal geri beslemeli ve kapalı çevrim denetim yapısına sahip bir MÖÜ modelinin de hala gelişmeye açık bir konu olduğu görülmektedir. Aynı zamanda robot balıkların tasarımı ve geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, birçok

robotun üç boyutlu yüzme yeteneğine sahip olmadığı ve su yüzeyinde yüzebildiği görülmüştür. Biyomimetik tasarım yapısına sahip ve üç boyutlu yüzme kabiliyeti ile otonom bir şekilde yüzebilen robot balık prototipi üzerine yapılan çalışmalar da yoğun bir şekilde devam etmektedir.

1.2. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, üç boyutlu olarak otonom yüzebilen, Carangiform türü biyomimetik bir robot balık prototipi üretmek ve geliştirilen biyomimetik denetim yapısıyla prototipin üç boyutlu hareketlerinin akıllı denetimini gerçekleştirmektir.

Sualtı araçlarının birçok farklı alanda kullanılması, biyomimetik tasarım/denetim yapısına sahip balık türü yeni nesil sualtı robotlarının ortaya çıkmasına yol açmıştır. Literatürde robot balıkların tasarımı ve geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, birçoğunun biyolojik özelliklere göre tasarlanmadığı veya üç boyutlu yüzme yeteneğine sahip olmadığı görülmektedir. Ayrıca balık türü çok eklemli robotların hareket denetiminin gerçekleştirildiği çalışmaların çoğunda, robotun yüzme hareketleri MÖÜ osilatör modelleri ile üretilmektedir. Ancak bu MÖÜ modellerinde biyomimetik tasarım yapısına sahip, robot balığın otonom olarak hareket etmesini sağlayan, yüksek performanslı ve duyuşal geri beslemeli kapalı çevrim MÖÜ modelinin eksikliği görülmektedir.

Bu amaçlar doğrultusunda, biyomimetik bir tasarım için Carangiform türü gerçek bir balığın fiziksel özellikleri ve hareket karakteristikleri deneysel havuz ortamında incelenerek robot balık prototipine adapte edilmiştir. Aynı zamanda, SimMechanics ortamına aktarılan prototip modeli ile gerçek balık analizlerinden elde edilen fiziksel özelliklerin ve hareket karakteristiklerinin uyumluluğu irdelenmiş ve biyomimetik denetim yapısının sınırlarının belirlenmesinde bu karakteristikler kullanılmıştır.

Robot balık prototipinin akıllı hareket denetimi için Lamprey balığının omurilik sinir hücrelerini örnek alan tek yönlü zincir bağlı bir MÖÜ modeli oluşturulmuş ve bulanık mantık kullanılarak duyuşal geri beslemeli kapalı çevrim hiyerarşik bir denetim yapısı geliştirilmiştir. Bu hiyerarşik yapıda, MÖÜ ile robot balığın beyin sapı ve omurilik modeli, bulanık denetleyiciler ile de üst beyin merkezi modeli geliştirilerek prototipin hareket denetimini gerçekleştiren Merkezi Sinir Sistemi'nin (MSS) tam modeli elde edilmiştir.

Ayrıca, prototipin benzetim çalışmalarını gerçekleştirmek ve denetim algoritmalarını tasarlamak amacıyla robot balığın üç boyutlu ve 6-SD doğrusal olmayan matematiksel modeli hidrodinamik kuvvetler de dikkate alınarak Lagrange yaklaşımı ile türetilmiştir.

Biyomimetik olarak tasarlanan ve üretimi gerçekleştirilen robot balık prototipinin hem benzetim hem de deneysel havuz ortamında yüksek performanslı akıllı denetimi açık ve kapalı çevrim analizler gerçekleştirilerek sınanmıştır.

1.3. Tezin Bölümleri

Bu tez çalışması yedi bölüm olarak düzenlenmiştir. Tezin birinci bölümünde, robot balık türü insansız sualtı robotları ve akıllı hareket denetiminde kullanılan MÖÜ yapılarının öneminden ve literatürde yapılan benzer çalışmalardan bahsedilmiştir.

Bölüm 2’de, balıkların morfolojik özellikleri incelenmiştir. Genel gövde ve kuyruk yüzgeci yapılarından bahsedilmiş, balıkların hareket türlerine göre sınıflandırılması verilmiştir. Ayrıca, bu tez çalışmasında üretimi gerçekleştirilen iki eklemlili, Carangiform türü biyomimetik bir robot balığın 6-SD doğrusal olmayan matematiksel modeli elde edilmiştir.

Bölüm 3’te, genel MÖÜ modelleri incelenerek önerilen Lamprey türü sinirsel MÖÜ modelinden bahsedilmiştir. Ayrıca, önerilen modele ait parametre değişimleri ile MÖÜ modelinin analizi yapılmıştır.

Bölüm 4’te, kapalı çevrim denetimde kullanılan bulanık denetleyici yapısı bir örnek ile detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Bölüm 5’te, robot balık prototipinin tasarım, üretim ve gerçekleştirme süreçlerinden bahsedilmiş, prototipe ait mekaniksel ve elektronik sistemler detaylı olarak sunulmuştur.

Bölüm 6’da, bu tez çalışması kapsamında üretimi tamamlanan robot balık prototipinin önerilen MÖÜ modeli ve bulanık denetleyiciler için açık ve kapalı çevrim analizleri hem benzetim ortamında hem de deneysel olarak gerçekleştirilmiştir.

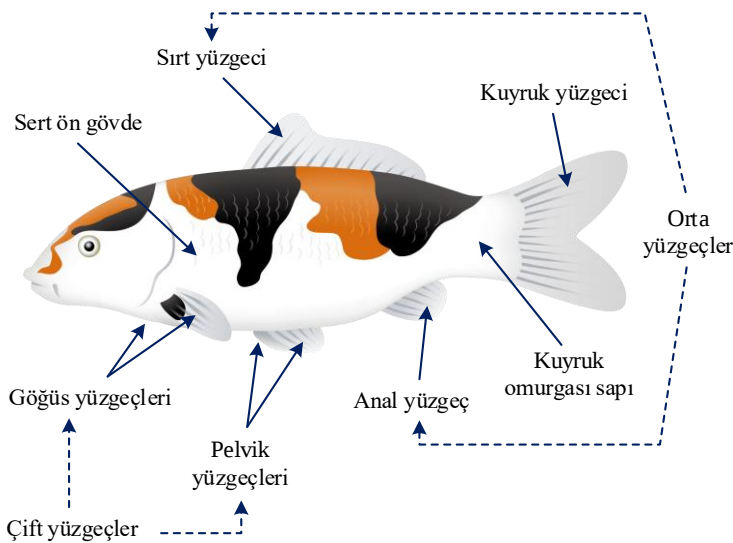
Bölüm 7’de, elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve önerilen yöntemlerin uygunluğu tartışılmıştır. Ayrıca, gelecekte yapılabilecek çalışmalar için bazı öneriler sunulmuş ve bu tez kapsamında üretilen yayınlar verilmiştir.

2. ROBOT BALIK PROTOTİPİNİN ÜÇ BOYUTLU MATEMATİKSEL MODELİNİN ELDE EDİLMESİ

Tasarlanan robot balık prototipi için türetilen matematiksel model, robot balığın dinamiklerini etkileyen faktörler ve bu modeli oluştururken kullanılan çok sayıdaki alt bileşenlerden kaynaklanan denklem yoğunluğundan dolayı burada ayrı bir bölüm olarak ele alınmıştır. Bu bölümde, balıklar hakkında genel bilgiler verilmiş ve balıkların morfolojik yapıları incelenerek tasarlanan iki eklemli Carangiform türü biyomimetik robot balık prototipinin üç boyutlu doğrusal olmayan matematiksel modeli elde edilmiştir. Böylece, tasarlanan prototipin uygun şekilde üretimi için bir zemin hazırlanmıştır.

2.1. Balıkların Morfolojik Yapısı

Balıklar su içerisinde yaşayan, soğukkanlı, solungaçlı ve derisi genellikle pullarla kaplı omurgalı hayvanlardır. Balıkların vücut ağırlıklarına karşı oluşan yerçekimi, suyun kaldırma kuvveti ile neredeyse dengelenmektedir. Böylece, hareket ortamı olan suyun sıkışmazlık ve yüksek yoğunluk gibi özellikleri, balıkların gelişiminde önemli bir rol oynamaktadır. Bir balığın su içerisindeki hareketini yüzgeçler ve vücut kasları sağlamaktadır. Yüzgeçlerin her biri yüzme hareketleri anında farklı görevlere sahiptir [44,127–129]. Balıklara ait genel yüzme mekanizmalarının morfolojik yapısı Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Bir balığın morfolojik yapısı

Kuyruk yüzgeci balığın su içerisindeki tahrik kuvvetinin büyük bir kısmını üretir ve hangi yönde hareket edeceğini kontrol eder. Göğüs yüzgeçleri simetrik olarak balığın gövdesinin her iki tarafında bulunmaktadır ve kuyruk yüzgeciyle beraber dikey ve yatay eksenlerde hareketleri gerçekleştirirler. Ayrıca, tahrik kuvvetinin şiddetini belirleyerek hızlanma ve yavaşlamayı sağlarlar. Pelvik yüzgeçleri dikey hareketin oluşmasına yardımcı olan organlardır. Balığın yalpalanma hareketlerini ise sırt ve anal yüzgeçler sağlarlar ve göğüs yüzgeçleri de bu hareketin oluşmasına yardımcı olurlar [128].

2.1.1. Balıklarda Vücut ve Kuyruk Şekilleri

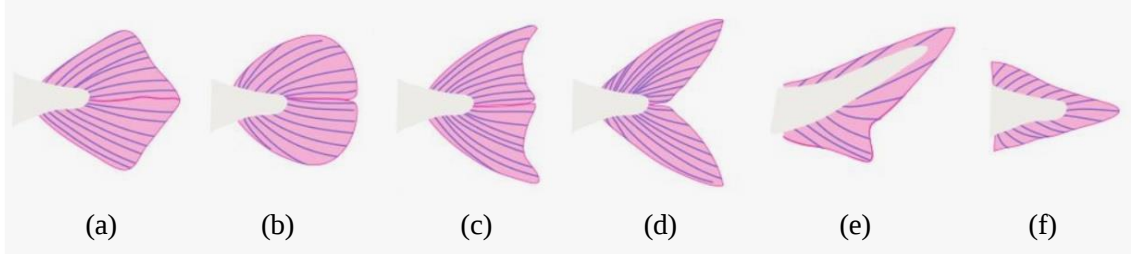
Balıkların vücutları, su içerisindeki hareketlerini kolayca gerçekleştirebilmek için farklı şekiller almışlardır. Bu şekiller farklı türler için değişiklik gösterdiği gibi farklı ortamlarda yaşayan aynı türler için de değişiklik gösterebilir. Şekil 2.2’de, balıklarda en çok görülen vücut şekilleri verilmiştir.

Yandan Görünüş							
Enine Kesit							
Şekil	Torpedo (Torpediform)	Yanal Yassılaştırmış (Laterally Flattened)	Ventral Yassılaştırmış (Ventral Flattened)	Yılan Tipi (Eel-like)	Şeritleştirmiş (Ribbon-like)	Küre (Spheroid)	Kutu (Box)

Şekil 2.2. Farklı balık türlerine ait genel vücut şekilleri

Füze olarak da bilinen torpedo tipi vücut şekli sürekli hareket halinde olan balıklarda görülür ve vücutları iki uca doğru daralan bir şekil alır. Bu vücut şekli balığın ileri yön hareketinde suyun direncini kolaylıkla azaltabilmektedir. Bu özelliğinden dolayı uçak ve sualtı araçları tasarımında sıklıkla kullanılmaktadır. Oval bir şekil alan yanal yassılaştırmış vücut şekli ani hızlanma ve yüksek manevra kabiliyetine sahiptir. Suyun derinlerinde hareket etmeyi sağlayan vücut şekli ventral yassılaştırmış tiptir. Yılan tipi ve şeritleştirmiş vücut şekilleri ise su direncini azaltabildikleri için diğer türlere göre daha hızlı yüzme yeteneğine sahiptir. Küre tipi vücut şekli yüksek manevra kabiliyetine sahip iken kutu tip vücut şekline sahip balıklar daha derinlerde ve sabit hızlarda düşük manevra kabiliyeti ile hareket ederler [128–131].

Bir balığın tahrik kuvvetinin oluşmasını sağlayan kuyruk yüzgeçleri ise genel olarak yedi farklı şekilde incelenebilir ve Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Farklı balık türlerine ait genel kuyruk şekilleri: (a) Kürek tipi (Spade), (b) Yuvarlanmış (Rounded), (c) Girintili (Indented), (d) Çatalı (Forked), (e) Dengesiz çatalı (Unevenly Forked), (f) Sivri (Pointed)

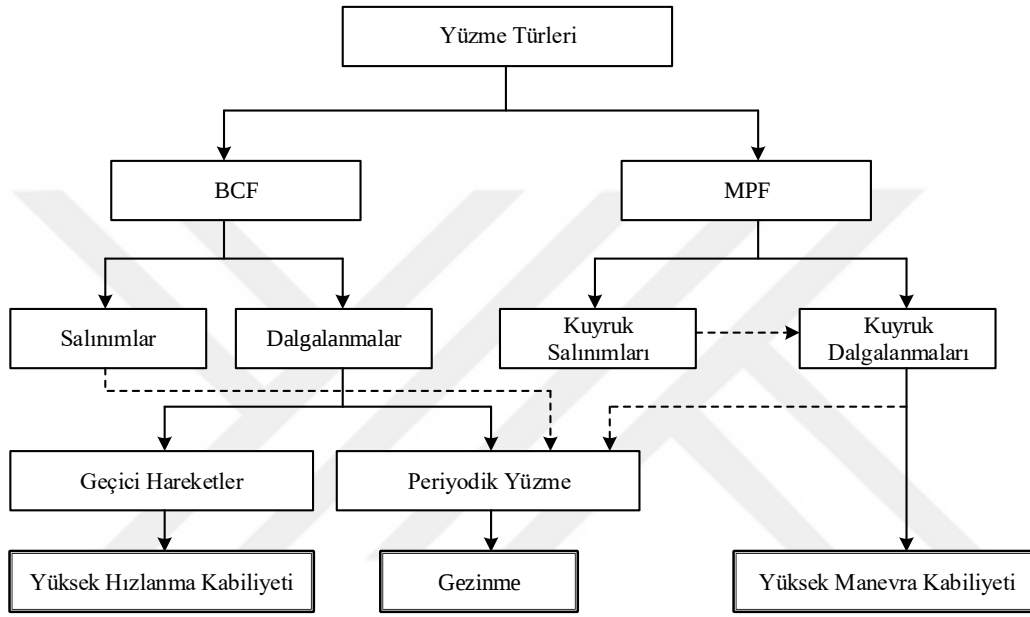
Kürek, yuvarlanmış, girintili ve çatalı tip kuyruk yüzgeçleri geniş miktarda yüzey alanına sahip oldukları için ani hızlanma ve yüksek manevra kabiliyeti sağlarlar. Ancak, kürek ve yuvarlanmış tip yüzgeçlerde balıklar sürüklenme kuvvetinden daha fazla etkilenirler. Girintili ve çatalı kuyruk yüzgeçlerinde ise balığa etki eden sürüklenme kuvvetinin etkisi daha azdır. Dengesiz çatalı tip kuyruk yüzgecine sahip balıklarda ani hızlanma özellikleri görülürken manevra kabiliyetleri düşüktür. Sivri tip kuyruk yüzgeci ise yüksek hızlarda balığın yüzebilmesine yardımcı olmaktadır [128–131].

2.1.2. Balıklarda Yüzme Hareketlerinin Sınıflandırılması

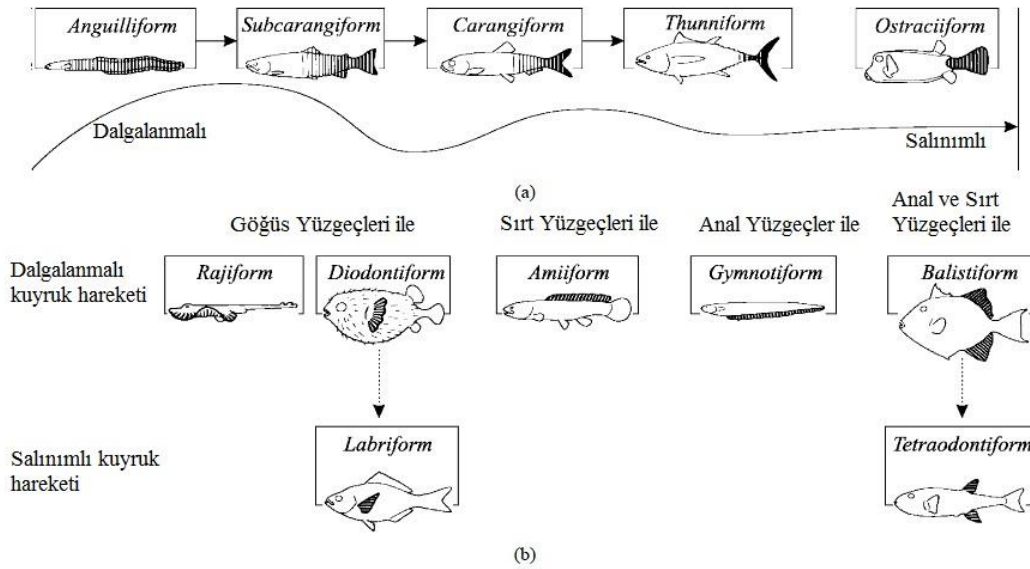
Balıkların sudaki hareketi vücutlarının ve/veya kuyruklarının kıvrılmasıyla (Body and/or Caudal Fin, BCF) gerçekleşir. Bazı balıklar ise bu hareket türünden farklı olarak sudaki hareketlerini orta ve/veya çift yüzgeçleri (Median and/or Paired Fin, MPF) ile sağlarlar [128,132]. Balıkların su içerisindeki hareketleri tek bir yüzme türüne bağlı olmamasına rağmen BCF tür yüzme yanıl yüzgeçlerin kullanıldığı MPF türüne göre birçok balıkta sıklıkla görülen yüzme şeklidir. Balıkların büyük çoğunluğu tahrik kuvvetlerini üretirken BCF tür yüzme şeklini kullanırken mevcut konumunu korumak ve manevra yapmak için MPF tür ile hareket ederler.

Sfakiotakis’e göre BCF ve MPF tür yüzme hareketleri kendi içerisinde dalgalanma ve salınım olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Dalgalanma hareketleri, balığın hareketli kuyruk yapısı boyunca bir dalga geçişini içerirken, salınım hareketlerinde kuyruk yapısı dönme hareketleri

üretmektedir. Dalgalanma hareketinde, balıkların vücutları genliği burundan başlayarak kuyruğa kadar artan bir sinüzoidal şekil alır. Salınım hareketinde bu dalgalanma miktarı giderek artmaktadır [128]. Ayrıca Webb [133] hızlanma, gezinme ve manevra kabiliyetine göre üç temel yüzme hareketi türetmiştir. Bu yüzme hareketleri ve aralarındaki ilişki Şekil 2.4’de verilmiştir. Hem BCF hem de MPF hareketlerine ait terminolojik yüzme modellerinin sınıflandırılması ise Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Yüzme türlerinin sınıflandırılması [128].

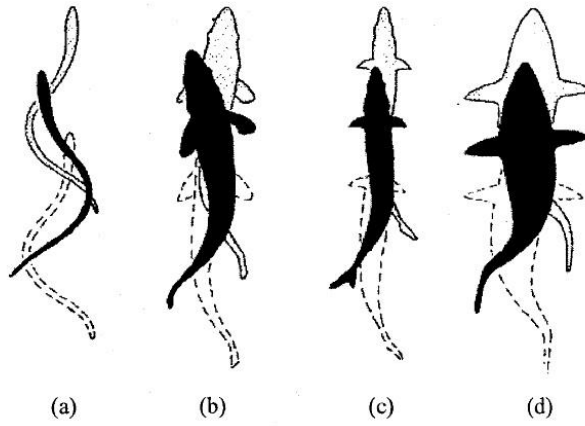


Şekil 2.5. BCF ve MPF hareketlerine göre yüzme modelleri: (a) BCF, (b) MPF [128].

Aynı zamanda, benzer morfolojik özellikler içeren balıklar su içerisinde benzer hareket türlerini kullanarak yüzerler.

2.1.2.1. Vücut ve/veya Kuyruk Yüzgeci ile Hareket

BCF hareketinde tahrik kuvveti balık hareketinin tersi yönünde genliği giderek artan sinüzoidal bir şekil alır. Tahrik kuvvetinin farklı dalga boyu ve genliğine göre dört farklı türde sınıflandırılan BCF yüzme hareketleri Şekil 2.6’da verilmiştir.



Şekil 2.6. BCF yüzme hareketlerinin sınıflandırılması: (a) Anguilliform, (b) Subcarangiform, (c) Carangiform, (d) Thunniform [44].

Anguilliform yüzücülerde vücut kasları, burundan kuyruğa kadar genliği giderek artan bir sinüzoidal dalga şeklini alır. Genel olarak yılan balıkları bu yüzme hareketini kullanırlar. Subcarangiform türü balıklarda Anguilliform hareketine göre daha az sayıda kas kullanılmaktadır. Dalgalanma hareketleri vücut kaslarının $1/2$ 'si ile $2/3$ 'ü arasında kaslar ile üretilmektedir. Alabalıklar bu yüzme hareketini kullanan balıklara bir örnektir. Sazan, koi ve somon gibi balık türleri Carangiform türü yüzen balıklardır. Carangiform türü balıklar vücut yapılarından dolayı dalga boylarının kısa olmasına rağmen yüksek manevra kabiliyeti ve hızlı yüzebilme özelliğine sahiptirler. Thunniform türü yüzücüler diğer türlere göre yüzme hızı, dönüş manevraları ve hızlanma açısından daha az verimli bir yapıya sahiptir. Köpek balıkları ve orkinoslar bu yüzme türü ile hareket ederler [44,128].

2.1.2.2. Orta ve/veya Çift Yüzgeç ile Hareket

Balıklar, MPF hareket türü ile daha iyi manevra kabiliyeti sağladığı için genellikle yiyecek ararken bu hareket türünü kullanırlar. Hareketi sağlayan çift yüzgeçler göğüs ve pelvik yüzgeçlerini tanımlamaktadır. Ayrıca, su içerisindeki dengenin sağlanması pelvik yüzgeçleri ile gerçekleştirilir. Bu hareket türünde yüzgeç titreşimleri orta ve çift yüzgeçler ile sağlanırken dalgalanma hareketi ise kuyruk yüzgeci tarafından üretilir. Orta veya kuyruk yüzgeçleri ile dalgalanma hareketini sağlayan türler Amiiform, Gymnotiform, Balistiform, Rajiform ve Diodontiform olmak üzere beşe ayrılır. Salınım hareketleri ise genellikle Tetraodontiform ve Labriform türü balıklarda görülür [8,128,129].

2.2. İki Eklemlili Kuyruk Yapısına Sahip Robot Balık Prototipinin Doğrusal Olmayan Matematiksel Modeli

Matematiksel modelin elde edilmesi, benzetim ortamı, denetleyici tasarımı ve prototipin gerçekleştirilmesi gibi birçok alt bileşen, donanımsal gerçeklemenin süreçlerini oluşturmaktadır. Matematiksel model, robot balığın su içerisinde yüzmesi olarak tanımlanan üç boyutlu hareketlerini tanımlar ve prototipin gerçekleştirilmesinden önce robotun kendine özgü karakteristiklerini belirler. Robot balığa hidrodinamik sürtünmeler, Coriolis ve merkezci kuvvetler, yer çekimi ve kaldırma kuvveti ile çevresel bozucu girişler gibi birçok karmaşık ve doğrusal olmayan kuvvet etki etmektedir. Bu kuvvetlerin varlığı prototip tasarımını ve denetimini zorlaştıracığı için tasarım aşamasından önce robot balığın matematiksel modelinin elde edilmesi gerekir.

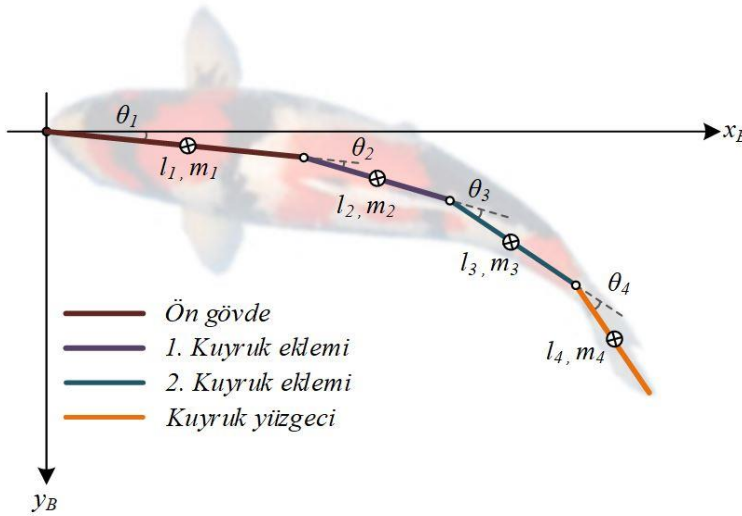
Robot balığın matematiksel olarak modellenmesi için Newton'un ikinci kanunu ve Lagrange yöntemi gibi çeşitli yöntemler kullanılabilir. Newton'un ikinci kanununa göre, bir cismin momentumunun zamana göre değişimi cisme etki eden kuvvet bileşenleri ile orantılıdır. Ancak, doğrudan kuvvet ve momentleri hesaplamak yerine sistemi ifade eden kinetik ve potansiyel enerjileri kullanmak da mümkündür. Bulunan bu kinetik ve potansiyel enerjilerin farkına Lagrange fonksiyonu (L) denir. Buna göre, Lagrange yöntemi özellikle doğrusal olmayan karmaşık sistemlerin matematiksel ifadelerini elde etmek için daha uygun bir yöntemdir. Newton yönteminde sistemin kuvvet ve momentleri hesaplanırken Lagrange yönteminde bu ifadeler dikkate alınmadan sistemin sadece kinetik ve potansiyel enerjileri

kullanılabilir. Böylece Lagrange yöntemi kullanılarak sistemin matematiksel ifadeleri daha kolay elde edilmektedir [98,134].

Bu bölümde, bir önceki alt bölümde verilen morfolojik özellikler dikkate alınarak tasarlanan BCF yüzme hareketlerine sahip, Carangiform türü, iki eklemlilik, biyomimetik robot balık prototipinin üç boyutlu doğrusal olmayan matematiksel modeli Lagrange eşitlikleri kullanılarak elde edilmiştir.

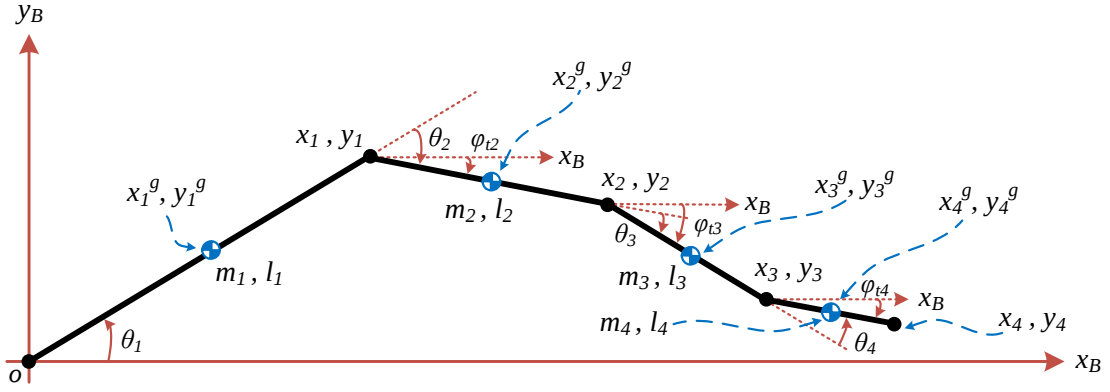
2.2.1. Robot Balık Prototipinin Hareket Denklemleri

Tasarlanan robot balık katı bir ön gövde ve esnek bir kuyruk mekanizması olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Esnek kuyruk mekanizması ise iki adet aktif eklemlilik ve bir adet pasif kuyruk yüzgeci içerir. Eğer ön gövde birinci eklemlilik olarak düşünülürse, robot balık Şekil 2.7’de görüldüğü gibi birbirine seri bağılı dört eklemlilik içeren kinematik bir zincir yapısına dönüştürülebilir.



Şekil 2.7. Carangiform türü bir balığın çok eklemlilik kinematik zincir yapısı

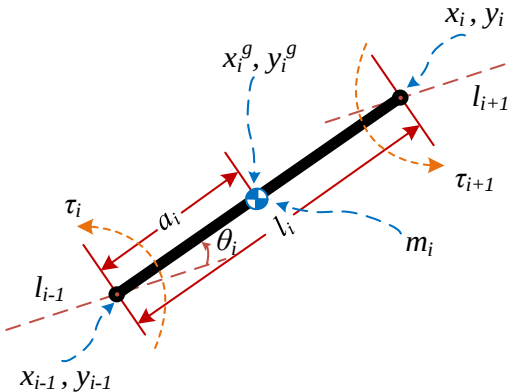
Burada i eklemlilik indisi olmak üzere, m_i eklemliliklerin kütlelerini, l_i eklemlilik uzunluklarını ve θ_i eklemliliklerin bir önceki eklemlilik göre oluşturdukları açıları belirtir. Böylece robot balık Şekil 2.8’de verilen ön gövde, iki adet aktif kuyruk eklemlilik ve bir adet pasif kuyruk yüzgeci olmak üzere birbirine seri bağılı dört eklemlilik ve üç mafsallılık zincir yapısı ile temsil edilebilir.



Şekil 2.8. Robot balığın dört eklemlili zincir yapısı

Burada m_1 ön gövdenin kütlesi, m_2 ve m_3 kuyruk eklemlerinin kütleleri, m_4 ise kuyruk yüzgecinin kütlesidir. θ_1 ön gövdenin yatay eksen ile yaptığı açısı, θ_2 birinci kuyruk ekleminin ön gövdeye göre yaptığı açısı, θ_3 ikinci kuyruk ekleminin birinci kuyruk eklemine göre yaptığı açısı ve θ_4 kuyruk yüzgecinin ikinci kuyruk eklemine göre yaptığı açısı temsil eder. $\varphi_{ti} = \theta_i + \theta_{i-1}$ olmak üzere i . eklemin yatay eksene göre yaptığı açısı belirtir.

Şekil 2.9’da, kinematik zincir yapısındaki bir ekleme ait parametreler ve üzerinde oluşan kuvvetler gösterilmiştir. Robot balığın her bir eklemi homojen olarak kabul edildiğinden dolayı ağırlık merkezi eklemlerin orta noktası olarak belirlenmiştir. Böylece, bir eklemin uzunluğu l_i ile temsil edilmek üzere o eklemin ağırlık merkezine göre uzunluğu a_i olur. τ_i ekleme uygulanan moment değerini, (x_i^g, y_i^g) ve (x_i, y_i) ise sırasıyla bir eklemin ağırlık merkezi ve uç noktasına göre yatay ve dikey eksenlerde koordinat çiftlerini tanımlar.



Şekil 2.9. Robot balığa ait bir eklemin yapısı

Denklem (2.1), her bir eklemin (x_i^g, y_i^g) ve (x_i, y_i) koordinat çiftlerini bulmak için kullanılan Denavit–Hartenberg (D-H) dönüşüm matrisini vermektedir [134]:

$${}^0T_N = \prod_{i=1}^N \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\cos(\alpha_{i,i+1}) & \sin(\theta_i)\sin(\alpha_{i,i+1}) & (A_{i,i+1})\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_{i,i+1}) & -\cos(\theta_i)\sin(\alpha_{i,i+1}) & (A_{i,i+1})\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_{i,i+1}) & \cos(\alpha_{i,i+1}) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Burada d_i dikey ekseninde ötelemeyi, α_i ve A_i ise sırasıyla yatay ekseninde olan dönme ve ötelemeyi simgeler. $i=1,2,\dots,N$ olmak üzere toplam eklem sayısı N ile tanımlanmıştır. D-H dönüşüm matrisinin en sağ sütununda yukarıdan aşağı doğru ilk üç parametre sırasıyla i . eklemin ağırlık merkezinin (x_B, y_B, z_B) gövde eksenlerindeki konumlarını hesaplamaktadır. Denklem (2.2) – (2.5)'de her bir ekleme ait ağırlık merkezinin konumları ve zamana göre birinci türevleri elde edilmiştir. Buna göre birinci eklemin konum ve hızları aşağıdaki gibi bulunur:

$$x_1^g = a_1 \cos(\theta_1) \quad (2.2a)$$

$$\dot{x}_1^g = -a_1 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) \quad (2.2b)$$

$$y_1^g = a_1 \sin(\theta_1) \quad (2.2c)$$

$$\dot{y}_1^g = a_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) \quad (2.2d)$$

İkinci eklemin konum ve hızları,

$$x_2^g = l_1 \cos(\theta_1) + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.3a)$$

$$\dot{x}_2^g = -l_1 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) - a_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.3b)$$

$$y_2^g = l_1 \sin(\theta_1) + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.3c)$$

$$\dot{y}_2^g = l_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) + a_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.3d)$$

şeklinde olur. Üçüncü eklemin konum ve hız ifadeleri ise,

$$x_3^g = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (2.4a)$$

$$\dot{x}_3^g = -l_1 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) - l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 + \theta_2) - a_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (2.4b)$$

$$y_3^g = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + a_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (2.4c)$$

$$\dot{y}_3^g = l_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) + l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (2.4d)$$

olur. Son olarak dördüncü eklem olan kuyruk yüzgecinin konum ve hızları aşağıdaki ifadeler ile elde edilir:

$$x_4^g = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + a_4 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad (2.5a)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_4^g = & -l_1 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) - l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 + \theta_2) - l_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ & - a_4 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \end{aligned} \quad (2.5b)$$

$$y_4^g = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + a_4 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad (2.5c)$$

$$\begin{aligned} \dot{y}_4^g = & l_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) + l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ & + a_4 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \end{aligned} \quad (2.5d)$$

Elde edilen konumların birinci türevleri eklem merkezlerinin hızlarını vermektedir. Bu hızların oluşturacağı kinetik enerjilerin toplamı,

$$T = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m_i v_i^2 + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} I_i \omega_i^2 \quad (2.6)$$

şeklinde elde edilir. Denklem (2.6) daha açık bir şekilde yazılırsa;

$$T = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m_i ((\dot{x}_i^g)^2 + (\dot{y}_i^g)^2) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} I_i (\dot{\theta}_i)^2 \quad (2.7)$$

olur. Burada I_i ve $\dot{\theta}_i$ sırasıyla i . eklemin atalet momenti ve açısal hızıdır. T sistemin kinetik ve V potansiyel enerjisi olmak üzere L fonksiyonu;

$$L = T - V \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (2.7)'de bulunan kinetik enerjilerin toplamı Denklem (2.8)'de yerine yazılırsa L fonksiyonu;

$$L = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m_i \left((\dot{x}_i^g)^2 + (\dot{y}_i^g)^2 \right) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} I_i (\dot{\theta}_i)^2 - V \quad (2.9)$$

şeklinde olur. Tasarlanan robot balık modelinde, eklemler gövde eksenine göre yerleştirildiği için sistemin potansiyel enerji içermediği kabul edilmiştir. Böylece L fonksiyonu sistemin net enerjisine eşittir ve açık halde aşağıdaki gibi olur:

$$L = \frac{1}{2} \left[\begin{aligned} & \left(m_1 \left((\dot{x}_1^g)^2 + (\dot{y}_1^g)^2 \right) \right) + \left(m_2 \left((\dot{x}_2^g)^2 + (\dot{y}_2^g)^2 \right) \right) + \left(m_3 \left((\dot{x}_3^g)^2 + (\dot{y}_3^g)^2 \right) \right) \\ & + \left(m_4 \left((\dot{x}_4^g)^2 + (\dot{y}_4^g)^2 \right) \right) + \left(I_1 \dot{\theta}_1^2 \right) + \left(I_2 \left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \right)^2 \right) + \left(I_3 \left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 \right)^2 \right) \\ & + \left(I_4 \left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4 \right)^2 \right) - \left(k_1 \theta_1^2 \right) - \left(k_2 \left(\theta_2 - \theta_1 \right)^2 \right) - \left(k_3 \left(\theta_3 - \theta_2 \right)^2 \right) \\ & - \left(k_4 \left(\theta_4 - \theta_3 \right)^2 \right) \end{aligned} \right] \quad (2.10)$$

Burada k_i eklemlerde oluşan yay sabitidir. Bulunan L fonksiyonu robot balığın dinamik davranışını içerir. Lagrange eşitliğinin genel ifadesi açık halde yazılırsa [135],

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} \right) - \left(\frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} \right) = Q_i \quad (2.11)$$

olur. Denklem (2.11) robot balığın hareketini içeren Lagrange denklemidir. Burada, q_i sistemin genelleştirilmiş parametrelerini ve Q_i bu parametrelere etki eden kuvvetlerin toplamını ifade eder. Eklemlerin dönme hareketlerinde oluşan sürtünme etkilerinden dolayı tasarlanan sistemde sönümlleme etkisinin de dikkate alınması gerekir. Böylece, D Rayleigh disipasyon fonksiyonu olmak üzere [136];

$$D = \frac{1}{2} c_1 (\dot{\theta}_1)^2 + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{2} c_{i+1} (\dot{\theta}_{i+1} - \dot{\theta}_i)^2 \quad (2.12)$$

olur. Burada, c_i i . eklemin sönüm katsayısıdır. Denklem (2.12) daha açık bir halde yazılırsa,

$$D = \frac{1}{2} \left(c_1 \dot{\theta}_1^2 + c_2 (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1)^2 + c_3 (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2)^2 + c_4 (\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_3)^2 \right) \quad (2.13)$$

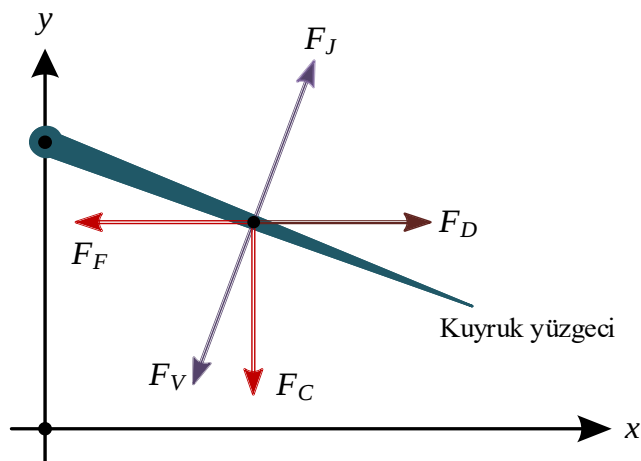
şeklinde ifade edilir. Böylece, iki eklemlili esnek kuyruk yapısına sahip robot balığın L fonksiyonu ile elde edilen hareket denklemi matris formunda aşağıdaki gibi olur:

$$M(\theta_i)\ddot{\theta}_i + C(\theta_i, \dot{\theta}_i)\dot{\theta}_i + B(\dot{\theta}_i) + K(\theta_i) = \tau_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2.14)$$

Burada $\theta_i = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]^T$ ve türevleri de benzer şekilde olmak üzere, $M(\theta_i)$ kütle ve atalet momenti matrisini, $C(\theta_i, \dot{\theta}_i)$ coriolis matrisini, $B(\dot{\theta}_i)$ sönüm matrisini, $K(\theta_i)$ yay sabitlerini içeren direngenlik matrisini ve τ_i kinematik ve hidrodinamik kuvvetleri içeren kuvvet matrisini belirtir.

2.2.2. Kuyruğa Etki Eden Hidrodinamik Kuvvetler

Bir balığın su içerisinde rahatça hareket edebilmesi için güçlü bir omurga yapısına ve omurlara sahip olması gerekir. Balığın omurga yapısı yanal sinüzoidal dalgalanmalar üretirken ön gövde yapısı nispeten daha serttir ve genellikle bu dalgalanmalara bağlı olarak yüzme yönünü belirler. Tasarlanan robot balık dikkate alındığında omurga yapısı servo motorların bulunduğu iki adet aktif kuyruk ekleminden oluşur. Pasif kuyruk eklemi ise esnek kuyruk yüzgeci olarak düşünülmektedir ve ikinci aktif kuyruk eklemine sabitlenmiştir. Ayrıca kuyruk yüzgecinin sürekli bir akış içerisinde çırpındığı düşünülürse, itici tahrik kuvveti ile hidrodinamik kuvvetlerin kuyruk yüzgecine etki ettiği ve onun etrafında oluştuğu kabul edilir. Böylece, esnek kuyruk yüzgecine etki eden beş temel kuvvet olur. Bu kuvvetler Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Kuyruk yüzgecine etki eden hidrodinamik kuvvetler

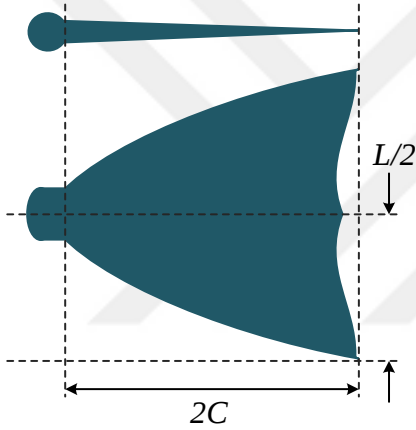
Bu kuvvetlerden F_D sürükleme kuvvetini, F_V ve F_J sırasıyla ivmelenme ve kaldırma kuvvetlerini, F_F ve F_C ise sırasıyla x ve y eksenlerindeki bileşke kuvvetlerini temsil eder.

Kuyruk yüzgecinin kendi merkezine etki eden U bağıl akış hızı ile bir akış içerisinde çarpındığı düşünülürse, iki temel kuvvet olan F_V ivmelenme ve F_J kaldırma kuvvetleri Denklem (2.15) ve (2.16) ile aşağıdaki gibi hesaplanır [137]:

$$F_V = \pi\rho LC^2\dot{U} \sin(\alpha) + \pi\rho LC^2U\dot{\alpha} \cos(\alpha) \quad (2.15)$$

$$F_J = 2\pi\rho LCU^2 \sin(\alpha) \cos(\alpha) \quad (2.16)$$

Bu denklemlerde ρ ve α sırasıyla akışkanın yoğunluğu ve kuyruğun atak açısını belirtir. L ve C ise kuyruk yüzgecinin dikey uzunluğu ile yanal uzunluğun yarısıdır ve Şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2.11. Carangiform türü bir balığın kuyruk yüzgeci uzunluğu ve yüksekliği

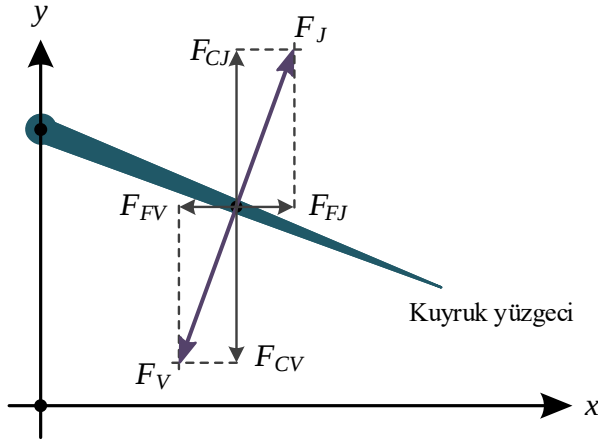
Aynı zamanda tahrik kuvveti olan F_F ve sapma açısına etkisi olan F_C kuvvetlerini hesaplamak için F_V ve F_J kuvvetleri Şekil 2.12’deki gibi bileşke vektörlerine ayrılmalıdır. Böylece, bu kuvvetler aşağıdaki gibi elde edilir:

$$F_F = F_{FV} + F_{FJ} \quad (2.17a)$$

$$F_F = (F_V - F_J) \sin(360 - \sum_{i=1}^N \theta_i) \quad (2.17b)$$

$$F_C = F_{CV} + F_{CJ} \quad (2.18a)$$

$$F_C = (F_V - F_J) \cos(360 - \sum_{i=1}^N \theta_i) \quad (2.18b)$$



Şekil 2.12. Kuyruk yüzgeci üzerinde oluşan hidrodinamik bileşke kuvvetler

F_F kuvveti ile robot balık gövde eksenini boyunca ivme kazanır ve hareket eder. F_C kuvveti ise robot balığın gövde dikey eksenini etrafında dönme etkisi oluşturmaktadır. Sürüklenme kuvveti F_D ise tahrik kuvvetine zıt yönde olur ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D V_f^2 S_u \quad (2.19)$$

Burada C_D şekil sürtünme katsayısı, V_f robot balığın bağıl hızı ve S_u ıslak yüzey alanıdır. Bu kuvvetlerin oluşmasını sağlayan bağıl akış hızı U ise Denklem (2.20) ile aşağıdaki gibi elde edilir:

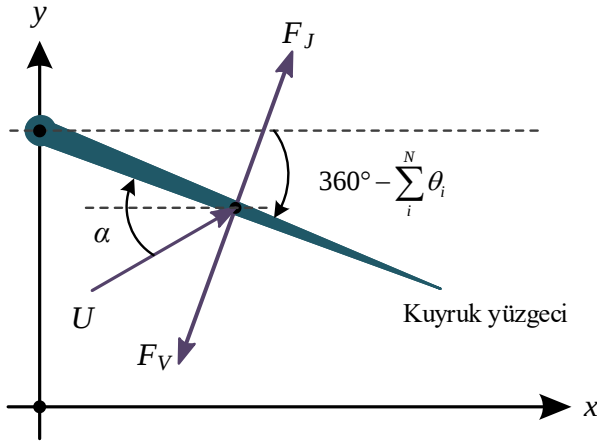
$$U = \sqrt{U_m^2 + u_f^2} \quad (2.20)$$

Bu denklemde U_m akış sabiti, u_f ise y eksenine göre kuyruk yüzgeci merkezinin göreceli hızıdır ve Denklem (2.21) ile bulunur:

$$u_f = l_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) + l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + a_4 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad (2.21)$$

Aynı zamanda bu kuvvetlerin hesaplanabilmesi için Şekil 2.13’de gösterilen atak açısı α Denklem (2.22) ile elde edilir:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{u_f}{U_m} \right) + 360 - \sum_{i=1}^N \theta_i \quad (2.22)$$



Şekil 2.13. Kuyruk yüzgeci üzerinde oluşan atak açısı

Robot balığa etki eden hidrodinamik kuvvetlerin bulunması ile kuvvet matrisi aşağıdaki gibi olur:

$$\tau = \begin{bmatrix} F_{C1}l_1 \cos(\theta_1) - F_{F1}l_1 \sin(\theta_1) \\ F_{C2}l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) - F_{F2}l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + T_1^u \\ F_{C3}l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - F_{F3}l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + T_2^u \\ F_{C4}a_4 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - F_{F4}a_4 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Burada T_1^u ve T_2^u sırasıyla aktif eklem motorlarının ürettiği moment değeridir ve aşağıdaki gibi bulunur:

$$T_i^u = A_{\max} \sin(2\pi f_T t \pm \Delta_i) \quad (2.24)$$

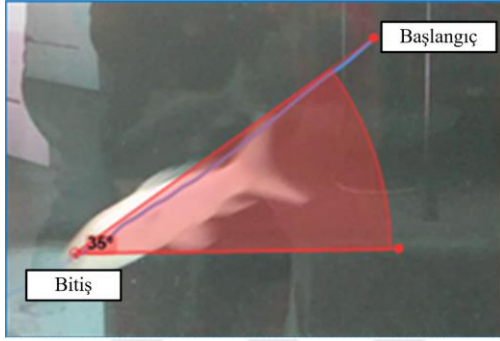
Burada $A_{\max}$ momentin genliği f_T frekansı ve Δ_i fazını temsil eder. Böylece, elde edilen matematiksel ifadeler yerine yazılır ve tekrar düzenlenirse, iki eklemlili robot balığa ait hareket denklemi en genel ifade ile matris formunda aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Burada M kütle ve atalet momenti matrisini, N ise kuvvet, coriolis, sönüm ve yay sabiti ifadelerini içeren matrisi tanımlamaktadır.

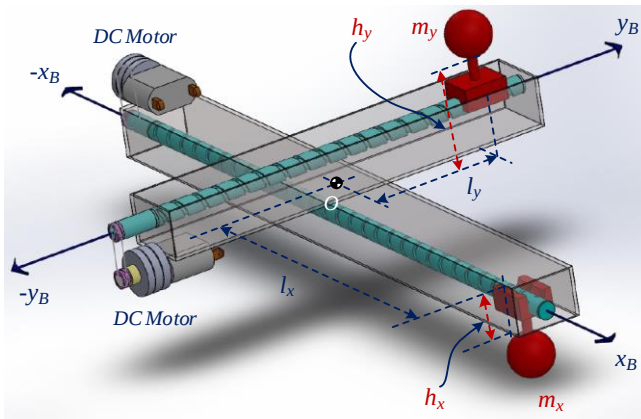
2.2.3. Robot Balığın Ağırlık Merkezi Denetim Mekanizması

Balıkların su içerisinde en önemli hareket kabiliyetlerinden biri de dikey hareket olan yukarı/aşağı harekettir. Şekil 2.14’de, 1050ms içerisinde Carangiform türü bir balığın dalmak için 35° ’lik bir açıya kolayca ulaşabildiği gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Carangiform türü bir balığın dalış anı

Birçok balık dikey hareketlerin gerçekleştirilmesi için kaldırma kuvveti merkezini kullanırlar. Kaldırma kuvveti merkezi genel olarak balıkların ağırlık merkezinin altında bulunmaktadır ve hava kesesi olarak isimlendirilir. Balıklar su içerisinde istedikleri bir seviyede kalabilmek için bu hava kesesinin içerisinde hava ile doldurur veya boşaltırlar. Ancak bu kesenin hava ile dolması balığın vücudunun kararsız bir denge noktasına sahip olmasına neden olur [128,138]. Tasarlanan robot balık modelinde bu problemi ortadan kaldırmak için ağırlık merkezi kaldırma kuvveti merkezinin altında ve aynı ekseninde belirlenmiştir. Şekil 2.15’de robot balık modeli için tasarlanan ağırlık merkezi denetim mekanizması verilmiştir.



Şekil 2.15. Matematiksel model için tasarlanan ağırlık merkezi denetim mekanizması

Tasarlanan mekanizmada, x ekseninde bulunan kütlenin hareket etmesiyle y ekseninde dönme ve dikey hareket, y ekseninde bulunan kütlenin hareketi ile x ekseninde dönme ve yalpalanma hareketi gerçekleşmektedir. m_x ve m_y sırasıyla x ve y gövde eksenlerinde hareket eden kütleler, h_x ve h_y , x ve y gövde eksenlerinde bulunan kütlelerin bağlı oldukları eksene olan uzaklıkları, l_x ve l_y ise kütlelerin denge noktasına olan uzaklıklarıdır. Böylece, kütlelerin hareketi ile oluşan doğrusal olmayan moment ifadeleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

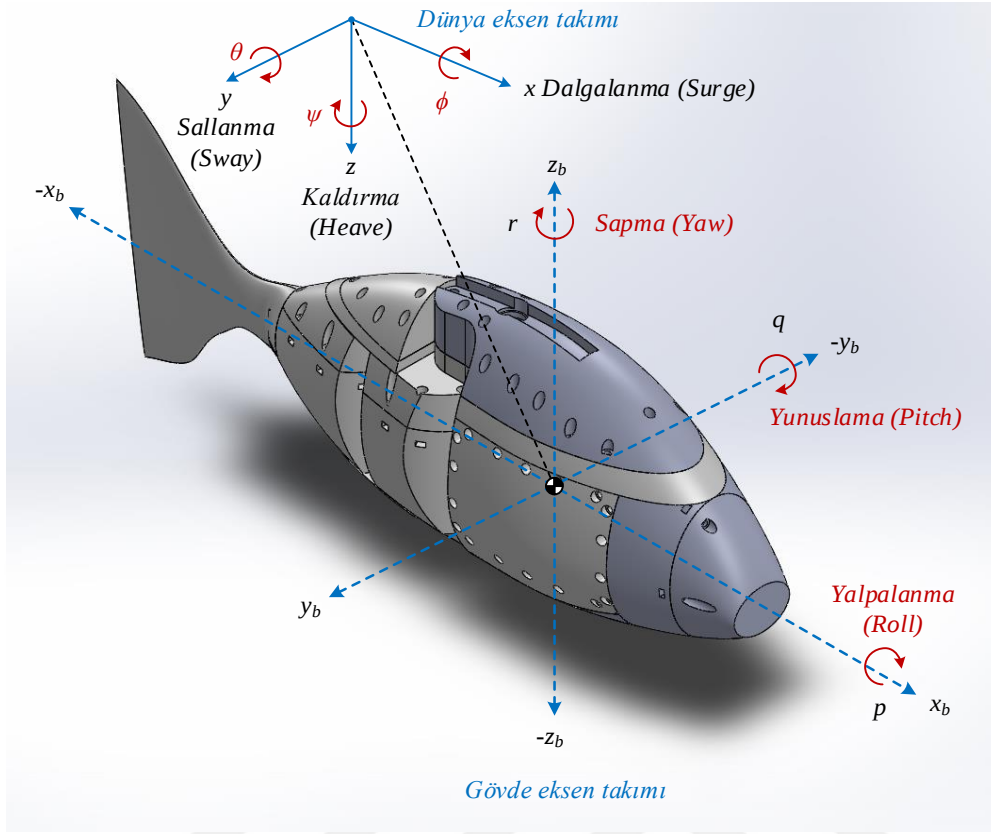
$$\tau_x = g((l_x \sin(\phi) \sin(\theta) - h_x \sin(\phi) \cos(\theta))m_x + (l_y \cos(\phi) - h_y \sin(\phi) \cos(\theta))m_y) \quad (2.26)$$

$$\tau_y = g((l_x \cos(\theta) - h_x \sin(\theta))m_x + (h_y \sin(\theta))m_y) \quad (2.27)$$

Bu denklemlerde g yerçekimi ivmesi, θ dikey hareketi gerçekleştiren dalma (yunuslama) açısını ve ϕ yalpalanma açısını temsil etmektedir.

2.2.4. Robot Balığın Su İçerisinde Altı Serbestlik Dereceli Hareketi

Tasarlanan robot balık modelinin konum ve hız gibi fiziksel davranışlarının üç boyutlu uzayda analizinin yapılabilmesi için 6-SD hareket denklemlerinin elde edilmesi gerekir. Bu eşitlikler robot balığın gövdesi üzerinde etkili olan kinematik ve hidrodinamik kuvvetler ile momentleri içeren doğrusal olmayan dinamik davranışlarını tanımlamaktadır [139]. Hareketli eksen takımı üç boyutlu uzayda robot balığın ağırlık merkezine sabitlenmiş ve sabit gövde eksen takımı olarak isimlendirilmiştir. Gövde eksen takımı robot balığın hareketine bağlı olarak hareket eder ve hareketsiz dünya eksen takımına bağlıdır. Sabit eksenleri içeren dünya eksen takımı dünya merkezinin Kuzey-Doğu-Aşağı (North-East-Down, NED) yönlerini referans almaktadır. Gövde eksen takımı (x_B, y_B, z_B) ve dünya eksen takımı (x, y, z) sembolleri ile temsil edilmiştir. Tasarlanan iki eklemlili robot balığın eksen takımlarına göre 6-SD hareketini içeren model gösterimi Şekil 2.16'da verilmiştir. Tablo 2.1'de ise robot balığın eksen takımları açıklanmıştır ve bu eksen takımlarında gerçekleşen hareketler verilmiştir.



Şekil 2.16. İki eklemli robot balığın üç boyutlu uzayda 6-SD gösterimi ve eksen takımlarının yerleşimi

Tasarlanan iki eklemli robot balığın gövdesi homojen dağılımlı olarak düşünüldüğünde, geliştirilmiş hız ve konum vektörü aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$y = [u \ v \ w \ p \ q \ r \ x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T \quad (2.28)$$

Burada (u,v,w) gövde eksen takımındaki dalgalanma (surge), sallanma (sway) ve kaldırma (heave) hareketlerinin doğrusal hızlarını, (p,q,r) ise yalpalanma (roll), yunuslama (pitch) ve sapma (yaw) dönmelerinin açısal hızlarını ifade eder. Dalgalanma, sallanma ve kaldırmadaki konumlar dünya eksen takımında (x,y,z) ile gösterilmiştir. Robot balığın yalpalanma, yunuslama ve sapma açıları (ϕ,θ,ψ) dairesel dönme hareketlerini belirtir ve Euler açıları olarak bilinir. Bu açılar robot balığın üç boyutlu uzaydaki oryantasyonunu tanımlamaktadır.

Tablo 2.1. Robot balığın eksen takımları ve eksen takımlarında gerçekleşen davranışlar

Eksenler	Hareket	Sembol	Adı	Açıklama	Birim
Dünya	Öteleme	x	X	Kuzey yönündeki konum	metre (m)
		y	Y	Doğu yönündeki konum	
		z	Z	Aşağı yöndeki konum, derinlik	
	Dönme	ϕ	Euler Yalpalanma Açısı	x ekseninde dönme	Derece (°)
		θ	Euler Yunuslama Açısı	y ekseninde dönme	
		ψ	Euler Sapma/Dönme Açısı	z ekseninde dönme	
Gövde	Doğrusal Hız	u	Dalgalanma Hızı	Uzunlama ekseninde doğrusal hız	m/sn
		v	Sallanma Hızı	Yanal eksende doğrusal hız	
		w	Kaldırma Hızı	Dikey eksende açısal hız	
	Açısal Hız	p	Yalpalanma Hızı	Uzunlama ekseninde açısal hız	°/sn
		q	Yunuslama Hızı	Yanal eksende açısal hız	
		r	Sapma/Dönme Hızı	Dikey eksende açısal hız	

Robot balığın hareketini tanımlamak için gerekli eksen takımları arasındaki kinematik dönüşüm Denklem (2.29) ile ifade edilebilir:

$$\dot{\eta} = J_{\Theta}(\eta)v \quad (2.29)$$

Bu denklemde $\eta = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T$ olan vektör dünya merkezli eksene göre genelleştirilmiş konumları ve $v = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$ vektörü gövde eksen takımına göre genelleştirilmiş hızları verir. $\Theta = [\phi \ \theta \ \psi]^T$ robot balığın pozisyonları olmak üzere J Jacobian dönüşüm matrisi [135];

$$J_{\Theta}(\eta) = \begin{bmatrix} R_{\Theta}(\eta) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & T_{\Theta}(\eta) \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

şeklinde olur. Burada R ve T sırasıyla dönme ve öteleme matrisleridir ve Denklem (2.31) ile (2.32)'de verilmiştir:

$$R_{\Theta}(\eta) = \begin{bmatrix} c(\psi)c(\theta) & -s(\psi)c(\phi) + c(\psi)s(\theta)s(\phi) & s(\psi)s(\phi) + c(\psi)c(\phi)s(\theta) \\ s(\psi)c(\theta) & c(\psi)c(\phi) + s(\phi)s(\psi)s(\theta) & -c(\psi)s(\phi) + s(\psi)s(\theta)c(\phi) \\ -s(\theta) & c(\theta)s(\phi) & c(\theta)c(\phi) \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$T_{\Theta}(\eta) = \begin{bmatrix} 1 & s(\phi)t(\theta) & c(\phi)t(\theta) \\ 0 & c(\phi) & -s(\phi) \\ 0 & s(\phi)/c(\theta) & c(\phi)/c(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Yukarıdaki ifadelerde $s()$, $c()$, $t()$ terimleri sırasıyla $\sin()$, $\cos()$, $\tan()$ fonksiyonlarını simgeler. Aynı zamanda, Jacobian matrisi elde edilirken aşağıdaki sınır şartları dikkate alınmıştır:

$$\left\{ -\pi < \phi \leq \pi, \quad -\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}, \quad 0 \leq \psi < 2\pi \right\} \quad (2.33)$$

Böylece, suyun içerisinde hareket eden robot balığın 6-SD doğrusal olmayan matematiksel modeli aşağıdaki gibi olur:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau_f \quad (2.34)$$

Bu denklemde $M=M_{RB}+M_A$ robot balığın şekline bağlı kütle ve atalet momenti matrisini, M_{RB} gövde kütle matrisini ve M_A ek kütle matrisini temsil eder. $C(v)=C_{RB}(v)+C_A(v)$ Coriolis ve merkezci matris olmak üzere, $C_{RB}(v)$ gövde Coriolis matrisini ve $C_A(v)$ akışkanın hidrodinamik etkisi olan ek kütle Coriolis matrisini tanımlar. $D_L(v)$ doğrusal ve $D_{NL}(v)$ doğrusal olmayan sönümlenme etkileri olmak üzere $D(v)$ bu etkilerin toplamını içeren hidrodinamik sönümlenme matrisidir. $g(\eta)$ robot balığın akışkan içerisindeki hidrostatik etkileri içeren vektördür. τ_f ise hidrodinamik kuvvet ve momentleri içeren kuvvet vektörüdür. Denklem (2.34) için katı gövde kütle matrisi aşağıdaki ifade ile elde edilir [140]:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} M_{RB11} & M_{RB12} \\ M_{RB21} & M_{RB22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & -mS(r_G) \\ mS(r_G) & I_0 \end{bmatrix} \quad (2.35a)$$

Burada m robot balığın toplam kütesini ve I_0 eylemsizlik momentlerini içeren matrisi temsil eder. $r_G = [x_G \ y_G \ z_G]^T$ olmak üzere robot balığın ağırlık merkezinin konumudur. $S()$ asimetrik bir matris olup trigonometrik işlem karmaşıklığını azaltmak için kullanılan bir tanımlamadır. Böylece, herhangi bir $\lambda = [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \lambda_3]^T$ vektörü için $S(\lambda)$ aşağıdaki gibi olur:

$$S(\lambda) = \begin{bmatrix} 0 & -\lambda_3 & \lambda_2 \\ \lambda_3 & 0 & -\lambda_1 \\ -\lambda_2 & \lambda_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.35b)$$

Denklem (2.35.a) içerisinde $S(\lambda)$ tekrar yazılırsa,

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & 0 \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & 0 & -mz_G & 0 \\ 0 & -mz_G & 0 & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ 0 & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.35c)$$

şeklinde ifade edilir. $C_{RB}(v)$ matrisi ise,

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(v_1 m I_{3 \times 3} - v_2 m S(r_G)) \\ -S(v_1 m I_{3 \times 3} + v_2 m S(r_G)) & -S(v_1 m S(r_G) + v_2 I_0) \end{bmatrix} \quad (2.36a)$$

ile bulunur. Burada hız terimi $v = [v_1 \ v_2]^T$ şeklinde ayrıştırılarak $v_1 = [u \ v \ w]^T$ ve $v_2 = [p \ q \ r]^T$ ile temsil edilirse, Denklem (2.35b) kullanılarak Denklem (2.36a) aşağıdaki gibi düzenlenir:

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & mw & -mv \\ 0 & 0 & 0 & -mw & 0 & mu \\ 0 & 0 & 0 & mv & -mu & 0 \\ 0 & mw & -mv & 0 & I_{zz}r & -I_{yy}q \\ -mw & 0 & mu & -I_{zz}r & 0 & I_{xx}p \\ mv & -mu & 0 & I_{yy}q & -I_{xx}p & 0 \end{bmatrix} \quad (2.36b)$$

Ek kütle matrisleri ise robot balığın su içerisindeki hareketi sırasında kendisiyle birlikte hareket ettirdiği akışkanın sisteme etki eden eklenmiş kütle ve ataletleri olarak tanımlanır.

Bu matrisler, robot balığın suyu itmesi ve etrafındaki akışkanın yer değiştirmesiyle oluşan akışkan hacminin birleşerek sistemde mevcut kütleden daha büyük yeni bir kütle miktarı oluşması şeklinde modellenebilir. Böylece sistemde kütle, atalet ve Coriolis ifadelerine eklenen ataletsel ek su kütlesi ve ek Coriolis kütlesi oluşur. Su içerisinde yüzen robot balık, durağan haldeki akışkanı iter ve yer değiştirmesine neden olur. Akışkan ise hareket eden robot balığın ardında bıraktığı boş hacmi doldurur. Böylece, hareket eden akışkan da kinetik enerjiye sahip olur. Robot balığın su yüzeyinin altında yüzdüğü düşünülürse, ek kütle matrislerinin sabit terimler içerdiği kabul edilebilir ve Denklem (2.37) ile bulunur [140]:

$$M_A = \begin{bmatrix} M_{A11} & M_{A12} \\ M_{A21} & M_{A22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{\ddot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\ddot{v}} & 0 & 0 & 0 & Y_{\ddot{r}} \\ 0 & 0 & Z_{\ddot{w}} & 0 & Z_{\ddot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{\ddot{w}} & 0 & M_{\ddot{q}} & 0 \\ 0 & N_{\ddot{v}} & 0 & 0 & 0 & N_{\ddot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Bu matris için bulunan her terim sıfır frekanstaki ek kütle katsayısıdır ve birbirine benzer şekilde aşağıdaki gibi hesaplanır [140]:

$$X_{\ddot{u}} = \frac{\partial X}{\partial u_x} \quad (2.38)$$

Bir sualtı robotu için ek kütle matrisi her zaman pozitif olmaktadır ve matrisin köşegen olmayan terimleri köşegen terimlerine göre daha küçük olur. Ayrıca, robot balık gövdesinin geometrik özellikleri dikkate alındığında, x-y ve x-z eksenlerinde gövdenin simetrik bir yapıda tasarlandığı düşünülebilir. Bu tanımlamalar ile $C_A(v)$ matrisi M_A ifadesine bağlı olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir [140]:

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(M_{A11}v_1 + M_{A12}v_2) \\ -S(M_{A11}v_1 + M_{A12}v_2) & -S(M_{A12}v_1 + M_{A22}v_2) \end{bmatrix} \quad (2.39a)$$

Burada Denklem (2.35.b), (2.39.a) için kullanılır ve yerine yazılırsa,

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v & 0 & -N_{\dot{r}}r & M_{\dot{q}}q \\ Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u & N_{\dot{r}}r & 0 & -K_{\dot{p}}p \\ -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 & -M_{\dot{q}}q & K_{\dot{p}}p & 0 \end{bmatrix} \quad (2.39b)$$

olur. Genel olarak su içerisinde bir cisim düşük hızlarda hareket ediyorsa, ek kütle terimleri ihmal edilebilir. Ancak, bu tez çalışmasında bütün etkileri içeren doğrusal olmayan bir model elde edebilmek için bu etkiler de hesaplamalara katılmıştır.

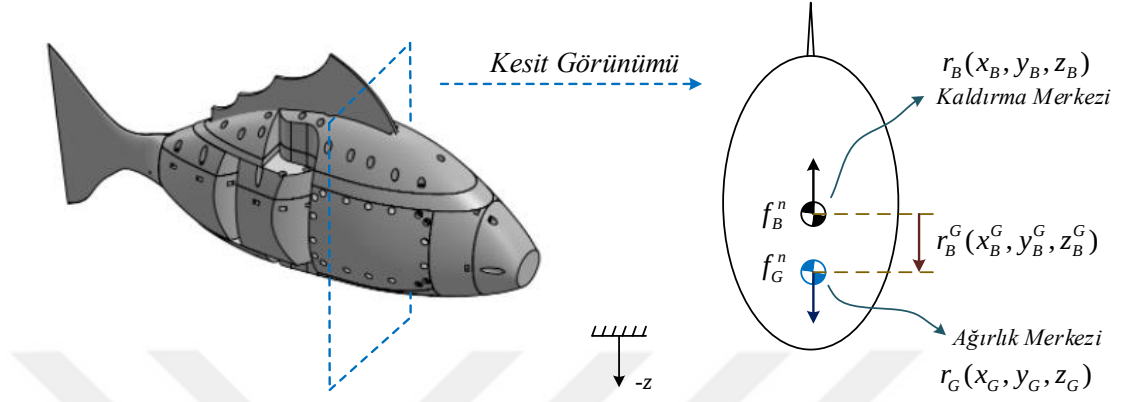
Hidrodinamik sönümlleme matrisi, robot balığın su içerisinde hareket ettiği sırada akışkanın oluşturduğu doğrusal ve açısal hareketlerine karşı gelen kuvvet ve momentlerdir. Bu matrisin elde edilmesi için robotun gövde şekline etkiyen basınç ile oluşan şekil sürüklemesi ve yüzey alanına bağlı yüzey viskoz sürüklemesi kullanılır. Bu tanımlama kullanılarak doğrusal olmayan sönümlleme kuvvet ve momentlerini veren matris aşağıdaki gibi bulunur.

$$D_{NL}(v) = \begin{bmatrix} X_{|u|u} |u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{|v|v} |v| & 0 & 0 & 0 & -Y_{|v|r} |v| \\ 0 & 0 & Z_{|w|w} |w| & 0 & Y_{|w|q} |w| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{|p|p} |p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{|q|w} |q| & 0 & M_{|q|q} |q| & 0 \\ 0 & -N_{|r|v} |r| & 0 & 0 & 0 & N_{|r|r} |r| \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Doğrusal olmayan sönümlleme terimleri sistemin eksenlerindeki hızlara bağlıdır. Doğrusal sönümlleme matrisi ise sistemin şekli ve akışkan etkisi ile elde edilir ve Denklem (2.41) ile hesaplanır:

$$D_L = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 & 0 & -Y_r \\ 0 & 0 & Z_w & 0 & Z_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_w & 0 & M_q & 0 \\ 0 & -N_v & 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

Yerçekimi ve kaldırma kuvvetlerinin arasında oluşan farktan dolayı robot balığın su içerisindeki hareketi sırasında hidrostatik etkiler oluşur. Bu durum Şekil 2.17’de açıklanmıştır.



Şekil 2.17. İki eklemlili robot balığın kesiti ile ağırlık ve kaldırma kuvvetlerinin gösterimi

Burada $r_B = [x_B \ y_B \ z_B]^T$ kaldırma merkezi ve $r_G = [x_G \ y_G \ z_G]^T$ ağırlık merkezi olmak üzere, bu vektörlerin farkı $r_B^G = [x_B^G \ y_B^G \ z_B^G]^T$ vektörü ile temsil edilir. Bu ifadelerle bağlı olarak robot balığa etki eden yerçekimi kuvveti $W = mg$ ve kaldırma kuvveti $B = \rho_f g \Delta_f$ şeklinde tanımlanır. ρ_f robot balığın öz kütlesi, g yerçekimi ivmesi ve Δ_f hacmi olmak üzere, robot balığa etki eden $g(\eta)$ vektörü Denklem (2.42) ile elde edilir:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B)s(\theta) \\ -(W - B)c(\theta)s(\phi) \\ -(W - B)c(\theta)c(\phi) \\ -(y_G W - y_B B)c(\theta)c(\phi) + (z_G W - z_B B)c(\theta)s(\phi) \\ -(z_G W - z_B B)s(\theta) + (x_G W - x_B B)c(\theta)c(\phi) \\ -(x_G W - x_B B)c(\theta)s(\phi) - (y_G W - y_B B)s(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

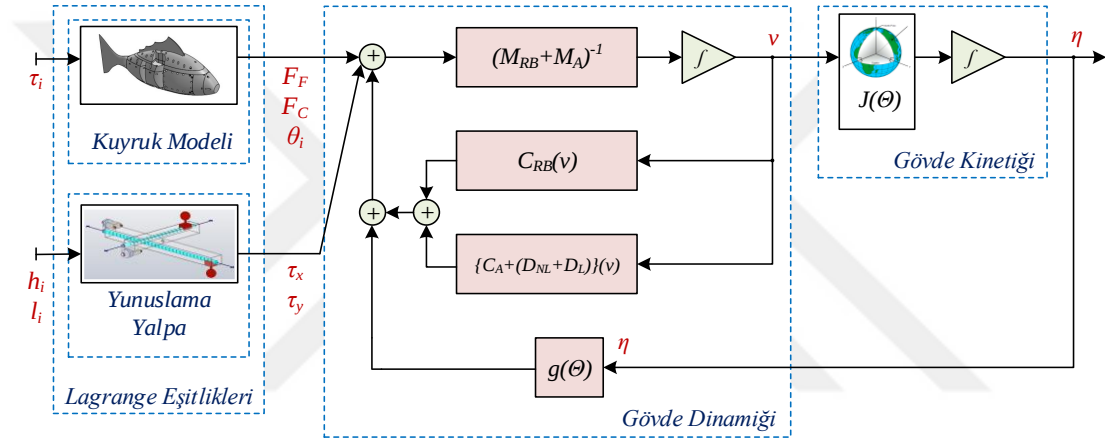
Robot balığın hareketini sağlayan ve hidrodinamik etkileri içeren tahrik kuvveti vektörü üç adet kuvvet ve üç adet moment terimlerini içerir ve aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\tau_f = \begin{bmatrix} F_x & F_y & F_z & \tau_x & \tau_y & \tau_z \end{bmatrix}^T \quad (2.43)$$

Bu kuvvetler sırasıyla x , y ve z eksenlerinde ötelemeyi ve dönmeyi oluşturan kuvvetler ve momentlerdir. Böylece Denklem (2.45) tekrar düzenlenirse,

$$\tau_f = \begin{bmatrix} F_F c\left(\sum_{i=2}^3 \theta_i\right) \\ 0 \\ 0 \\ \tau_x \\ \tau_y \\ F_F \left((l_1 + l_2 c(\theta_2) + l_3 c(\theta_2 + \theta_3)) s(\theta_2 + \theta_3) \right) \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

şeklinde yazılabilir. Böylece, robot balığın 6-SD doğrusal olmayan matematiksel modeli Şekil 2.18’de verilen blok diyagram ile gösterilebilir.



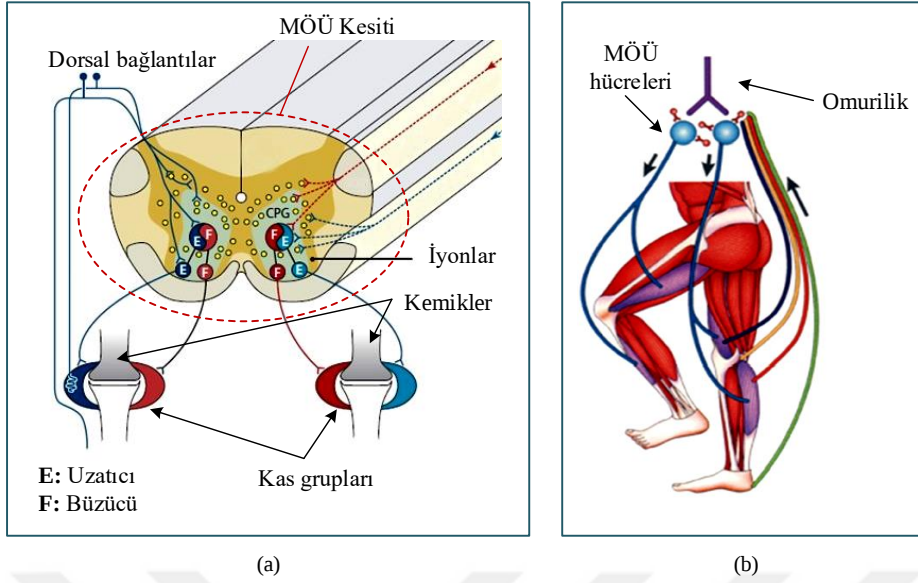
Şekil 2.18. İki eklemlı robot balığın 6-SD doğrusal olmayan matematiksel modeli için oluşturulan blok diyagram

Sonuç olarak, iki eklemlı Carangiform türü biyomimetik bir robot balığın üç boyutlu uzayda 6-SD doğrusal olmayan matematiksel modeli olarak elde edilmiştir.

3. MERKEZİ ÖRÜNTÜ ÜRETEÇLERİ

Nörobiyologlar için önemli olan sorulardan birisi, sürekli salınımlı hareketlerin vücudumuzun neresinde üretildiği olmuştur. Yaklaşık 1900'lü yıllara kadar, canlıların hareketlerinin vücudun herhangi bir noktasının uyarılmasına karşı omuriliğin refleks bağlarının verdiği cevaplar ile oluşturulduğu düşünülmüştür. Örneğin; yürüyen bir insanda, bir ayak yere basarken o ayağın yere teması ile bir dizi hareket döngüsünün başlatıldığı ve aynı ayak tekrar yere temas ettiğinde yeni bir dizi ardışıl hareketin tekrar ettiği kabul edilmiştir. Bu durum, zemin ile temas sonucu oluşan basıncın duyuşal uyarıcıları tetiklediği ve bu uyarıcılara göre oluşturulan hareketler anlamına gelmiştir [26]. Ancak 1900'lü yılların başında bu yaklaşım değişmiştir [22,26,29]. Yapılan ilk gözlem, bir köpeğin havada asılı durduğu anda bacaklarını yürümeyi andıran şekilde hareket ettirmesi olmuştur [26]. Ayrıca, Sherrington [26] kedi ve köpeklerin tüm duyu sinirlerinin uzuvlarından kopmasına rağmen yürüyebildiklerini gözlemlemiştir. Brown [26] ise kedilerin hareketlerinin derilerindeki uyarıcılara karşı bir tepki olmadığını ispat etmiştir. Ayrıca, Shik ve arkadaşları [29] bir kedi üzerinde yürüyüş hareketlerini gözlemleyerek, yürüme hareketindeki sürekliliğin beyin sapının elektriksel uyarıcılar ile tetiklenmesi sayesinde olduğunu bulmuşlardır. Yapılan bu deneyler, lokomotor hareketlerin yüksek beyin merkezinden gelen girdiler olmadan gerçekleşebileceğini, yüksek beyin merkezinden sadece basit uyarıcıların geldiğini ve hareket aktivitelerinin omurilik veya beyin sapı ile oluştuğunu göstermiştir [22,26–29]. Bu durum ilerleyen yıllarda diğer canlıların çoğu için de geçerli kılınmıştır [18]. Böylece, lokomotor hareketlerin yüksek beyin merkezinden veya duyuşal alıcılardan herhangi bir uyarı gelmeden omuriliğin sinir hücreleri ile oluşturulabileceği ispat edilmiştir. Bu sinir hücreleri literatürde MÖÜ olarak tanımlanmıştır. Sinirsel MÖÜ devreleri herhangi bir geri besleme sinyaline ihtiyaç duymadan canlıların temel hareketlerini üretebilen, ritmik ve salınımlı sinyaller oluşturan biyolojik sinirsel yapılardır [18,21–29]. Şekil 3.1'de canlı vücudunda bulunan nörobiyolojik bir MÖÜ yapısının kesiti ve kaslarla olan ilişkisi verilmiştir.

MÖÜ'leri oluşturan sinir hücreleri omurilik ile beraber beyin sapında da bulunabilir ve birbirleriyle olan bağlantılar farklı türlerdeki canlılarda farklılık gösterebilir [18,21,26]. Ayrıca, MÖÜ devresi ıstakoz gibi bazı omurgasız canlıların da stomatogastrik gangliyonlarında bulunmaktadır.



Şekil 3.1. Nörobiyolojik MÖÜ model gösterimi: (a) MÖÜ model kesiti, (b) MÖÜ'nün kaslarla olan ilişkisi

Keçilerin uzuvlarında bulunan bazı kaslar MÖÜ hücreleri dışında kalan ayrı sinirsel yapılar ile birlikte çalışırken, bazı canlı türlerinde ise bütün kaslar sinirsel MÖÜ devrelerince paylaşılmaktadır. Bu duruma en iyi örnek bu tez çalışmasında kullanılan Lamprey balığında bulunan sinirsel MÖÜ devreleridir [18,22,26,27,141,142]. Lamprey balıklarındaki MÖÜ devreleri balığın tüm omuriliği boyunca orantılı bir dağılım göstermektedir ve omurga boyunca yaklaşık 100 adet MÖÜ devresi içermektedir [22,29]. Bu balıkların lokomotor sistemi duysal ağlar, komut sistemi ve kasları kontrol eden MÖÜ devreleri olmak üzere üç temel yapıdan oluşur. Lampreylerin beyni ise hareketin yönlendirilmesi için duysal bilgilerin işlenmesini ve aktarımını sağlar [22,26].

Çenesiz bir omurgalı olan Lamprey balıkları sinirsel MÖÜ yapısını anlamak için oldukça uygun bir biyolojik yapıya sahiptir. Bu balıkların en az 400 milyon yıldır var olduğu düşünülmektedir. Böylece, bu sinir yapısı en eski, sade ve değişmeyen sinir yapılarından biridir. Aynı zamanda, MÖÜ devrelerinde sinapslar ile birbirine farklı yapıda bağlanmış ara, motor ve duysal sinir hücreleri mevcuttur. Lamprey balıkları burundan başlayarak kuyruğa kadar devam eden sinüzoidal bir dalgalanma hareketiyle yüzerler. Bu yüzme hareketi vücudun sağ ve sol tarafını koordine eden MÖÜ devreleri ile sağlanır ve her iki bölümdaki kaslar değişen bir biçimde MÖÜ'ler aracılığıyla koordine edilir [21,22,26,27,142].

MÖÜ devreleri beyinde bulunan motor korteksten gelen birden fazla bağlantılar ile kontrol edilmektedir. Bu bağlantılar doğrudan veya beyin sapı aracılığı ile gerçekleşmektedir [29]. En basit haliyle, sinirsel bir MÖÜ yapısı birbirine bağlanan en az iki adet ara sinir

hücrelerinden oluşur. Hücreler arasındaki bu bağlantılar sinaps adı verilen elektriksel iletimler ile gerçekleşir. Sinapslar ile oluşan etkileşimler sinir hücresinin potansiyelinde değişikliğe sebep olarak aksiyon potansiyeli olarak isimlendirilen elektriksel geçiş akımlarını oluşturmaktadır. Sinir hücreleri arasındaki bu karşılıklı etkileşimler hem çıkışlar arasındaki faz farkını belirler hem de sürekli salınımlı çıktılarının oluşmasını sağlar. Bu sürekli salınım çıktılarından dolayı, sinirsel bir MÖÜ devresi bir MÖÜ osilatörü olarak da adlandırılmıştır [22,26,27,29,36]. Bir MÖÜ devresinin en önemli özelliği canlının anatomik yapısı ne olursa olsun herhangi bir dış uyarıcı olmadan veya çok basit giriş sinyalleri ile davranış tabanlı hareketleri içeren ritmik ve sürekli salınımlı çıkışlar üretebilmesidir. Aynı zamanda, sinapslar ile sağlanan etkileşimler sayesinde farklı fazlarda ve genliklerde çıkışlar oluşturabilirler. Birden fazla MÖÜ'nün bir araya gelmesiyle hiyerarşik bir bütün haline gelen MÖÜ yapısı canlının hareket etme fonksiyonlarını oluşturabilmektedir. Ayrıca, uygun yapıya sahip bir MÖÜ devresi üst beyin merkezinden gelen bilgiler ile nöromodülasyon ve duysal geri besleme özelliğine de sahip olur [18,21,22,26,27].

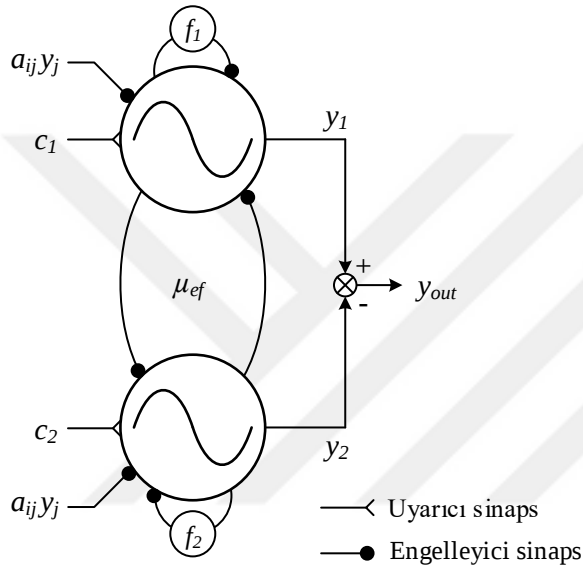
3.1. Merkezi Örüntü Üreteçlerinin Sınıflandırılması

Çok eklemlili robotların hareket denetimi için geliştirilen MÖÜ modelleri, genel olarak nörobiyolojik ve tasarım yapıları dikkate alınarak biyofiziksel, ilişkisel ve soyut model olmak üzere üç temel seviyede sınıflandırılabilirler. Biyofiziksel modellerin birçoğu iyon yüklerini taşıyarak ve hücre zar potansiyellerini taklit ederek ritmik çıkışlar üretirler. İlişkisel modellerde ise çıkış sinyalinin üretilmesi ara sinir hücreleri ve bu hücreler arasındaki uyarıcı ve engelleyici sinaptik etkileşimler ile sağlanmaktadır. Soyut modeller diğer MÖÜ yapılarına göre daha farklı olarak, temel osilatör modellerinin matematiksel ifadeleri ile tanımlanır ve bu modellerin birbiriyle kuplajlanması ile oluşturulur [18,21,28].

Bu bölümün devamında, sınıflandırılan modellere örnek olarak literatürde en çok tercih edilen MÖÜ modellerinden Matsuoka, Genlik Denetimli Faz (GDF), Hopf, Ekeberg ve Herrero-Carron osilatörlerinden bahsedilmiştir ve osilatörler arasındaki temel özelliklere göre genel bir karşılaştırma yapılmıştır.

3.1.1. Matsuoka Osilatörü

1985 yılında Matsuoka tarafından geliştirilen bu osilatör yapısı iki adet yarım merkezli sinir hücresinden oluşmaktadır. Bu yarım merkezli osilatör hücreleri karşılıklı olarak birbirlerinin davranışını durdurmaya yönelik etkileşimler içindedir. Engelleyici sinaps olarak adlandırılan bu etkileşimler sayesinde osilatör çıkışında salınımlı sinyaller oluşur [42]. Şekil 3.2’de bir Matsuoka osilatör modeli verilmiştir.



Şekil 3.2. Matsuoka osilatör modeli

Bu osilatör modelinde bulunan yarım merkezli sinir hücreleri uzatıcı ve büzücü kas hücreleri olarak tanımlanmaktadır ve her hücrenin zar potansiyeli yorgunluk etkisi olarak da bilinen ve kendi kendine engelleyici bir etkiye sahip adaptasyon derecesine bağlıdır. En genel haliyle bir Matsuoka osilatör modeli aşağıdaki ifadeler ile tanımlanır:

$$Tr \frac{dx_i}{dt} = -x_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} y_j - \mu_{ef} y_i - b_i f_i + c_i \quad (3.1)$$

$$Ta \frac{df_i}{dt} = -f_i + y_i^q \quad (3.2)$$

$$y_i(t) = \max(0, x_i) \quad (3.3)$$

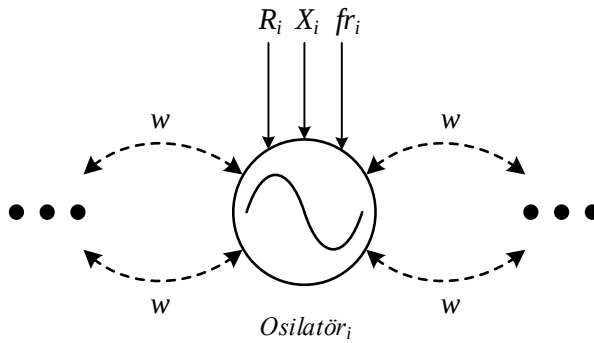
$$y_{out} = y_i - y_{i-1} \quad (3.4)$$

Burada i osilatörde bulunan sinir hücresi indisi olmak üzere, Tr ve Ta adaptasyon zaman sabitlerini, x_i sinir hücresinin zar potansiyeli olarak da bilinen hücre çıkışını, f_i adaptasyon derecesini, c_i harici tonik oranını, b_i adaptasyon ateşleme hızı oranını, μ_{ef} sinir hücreleri arasındaki sinapsları, q adaptasyon etkisini, a_{ij} diğer osilatörler arasındaki bağlantıları ve j ise osilatör indisini temsil eder.

Bu osilatör modelinde değeri belirlenmesi gereken birçok parametre mevcuttur. Tonik oranı genellikle her hücre için eşit seçilir. Tonik oranının artması hücre zar potansiyelinin de adaptasyon zaman sabitlerine bağlı olarak büyük oranda artmasına sebep olur. Osilatör çıkışının frekansı adaptasyon ateşleme hızı ile doğru orantılı ve adaptasyon zaman sabitleri ile ters orantılıdır. Osilatörler arasındaki faz farkları ise birbirleri ile etkileşimi sağlayan sinapslar ile belirlenir. Bu osilatör modelinin en önemli dezavantajlarından birisi çıkış sinyalinin saf bir sinüzoidale tam olarak benzememesidir [78].

3.1.2. Genlik Denetimli Faz Osilatörü

Şekil 3.3’de verilen GDF osilatörleri, 1975 yılında Yoshiki Kuramoto tarafından geliştirilen, kuplajlarla birbirine bağlanmış ve birinci dereceden diferansiyel denklemler ile tanımlanan Kuramoto osilatörlerden esinlenerek oluşturulmuştur [4].



Şekil 3.3. GDF osilatör modeli

Kuramoto’ya [143] göre $i=1,2,...,N$ olmak üzere N adet osilatör kuplajsız olarak $\dot{\theta}_i = \omega_i^{osc}$ ile ifade edilirse, birbirine kuplajlar ile bağlanarak istenen faz farkında eş zamanlı sinüzoidal salınımlı çıkışlar üretebilen GDF osilatörleri aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\dot{\phi}_i = 2\pi f_i + \sum_j w_{ij} \sin(\phi_j - \phi_i - \varphi_{ij}) \quad (3.5)$$

$$\ddot{r}_i = a_r \left(\frac{a_r}{4} (R_i - r_i) - \dot{r}_i \right) \quad (3.6)$$

$$\ddot{x}_i = a_x \left(\frac{a_x}{4} (X_i - x_i) - \dot{x}_i \right) \quad (3.7)$$

$$\theta_i = x_i + r_i \cos(\phi_i) \quad (3.8)$$

Burada i ve j osilatör indisleri olmak üzere, ϕ_i osilatörün fazını, r_i genliğini, x_i ofsetini, θ_i çıkışını ve ϕ_{ij} osilatörler arasındaki faz farkını temsil eder. Osilatörün giriş parametreleri olan R_i , X_i ve f_i ise sırasıyla içsel genlik, ofset ve frekansdır. a_r ve a_x osilatör çıkışlarının istenen parametre değerlerine yakınsama hızı sabitleridir.

Ancak soyut bir osilatör modeli olan GDF osilatörleri biyofiziksel özellikleri içermedikleri için duyuşal geri beslemeli hücrelere sahip değillerdir.

3.1.3. Hopf Osilatörü

Literatürdeki robotik çalışmaların çoğunda görülen osilatör modellerinden birisi de Hopf türü osilatörlerdir. Soyut model özelliklerine sahip bu osilatörler limit çevrim özellikleri ile dışarıdan gelen harici bozuculara karşı salınımlı çıkışlarına devam ederler [7]. Şekil 3.4’de verilen Hopf osilatör yapısı kartezyen koordinat düzleminde iki adet yarım merkezli hücreden oluşmaktadır.

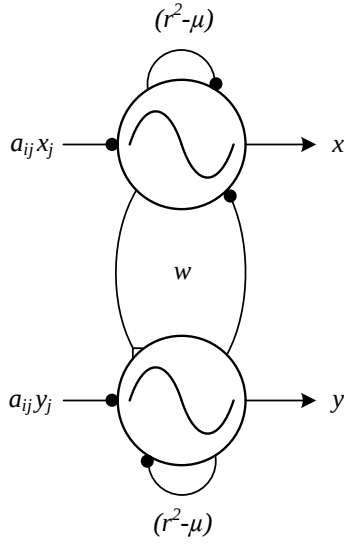
Sürekli salınımlı sinüzoidal çıkışlar üretebilen bu osilatörler, istenilen genlik ve frekans değerine ulaşabilirler. Hopf türü bir osilatör yapısı kartezyen koordinat düzleminde aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\dot{x}_i = \gamma(\mu - r^2)x_i - w_i y_i - a_{ij} x_j \quad (3.9)$$

$$\dot{y}_i = \gamma(\mu - r^2)y_i + w_i x_i - a_{ij} y_j \quad (3.10)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.11)$$

Burada i ve j osilatör indisleri olmak üzere, x_i ve y_i osilatörde bulunan hücre çıkışlarını, w_i çıkışın açısal frekansını, μ çıkış genliğini, r çıkışların vektörel büyüklüğünü, a_{ij} osilatörler arasındaki kuplaj bağlantılarını ve γ ise yakınsama hızı sabitini temsil eder.

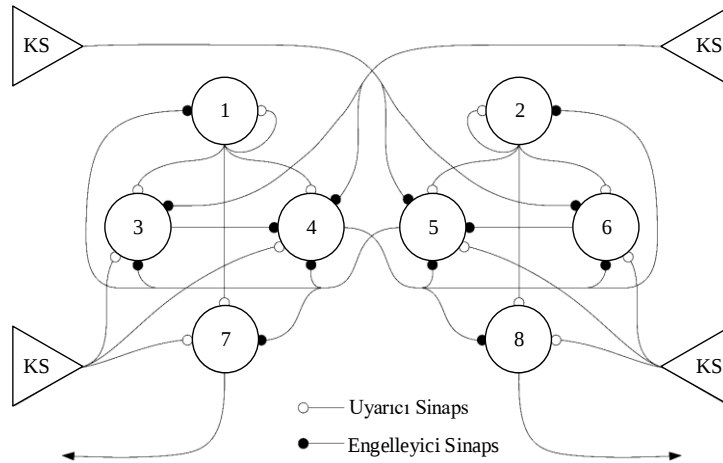


Şekil 3.4. Hopf osilatör modeli

Ancak osilatörler arası kuplaj bağlantıları osilatör modelinde harici bozucu etkiler göstermektedir. Bu durum osilatör faz dinamiklerini etkiler ve osilatörler arasındaki faz farkının sabit kalmamasına sebep olur. Bu istenmeyen durumun etkisini ortadan kaldırmak için osilatörlere pertürbasyon etkisi olarak tanımlanan öğrenme ifadeleri eklenmektedir. Bu pertürbasyon ifadelerinden en sık kullanılanı Hebbian türü öğrenmedir [32].

3.1.4. Ekeberg Osilatörü

Şekil 3.5’de gösterilen Ekeberg modeli, lamprey türü balıkların MÖÜ yapısından esinlenerek geliştirilmiş ve ilişkisel model özelliklerine sahip bir osilatördür.



Şekil 3.5. Ekeberg osilatör modeli

Bu osilatör davranışı temel olarak sinir hücre modelleri arasındaki uyarıcı ve engelleyici sinaptik bağlantılara bağlıdır [71]. Osilatör modelinde geri beslemeli duyuşal sinir hücreleri olarak kullanılan 4 adet Kenar Sinir Hücresi (KS) ve 8 adet ara sinir hücresi bulunmaktadır. Her sinir hücresi bir STA modeli ile aşğıdaki gibi tanımlanır:

$$\dot{\zeta}_+ = \frac{1}{T_D} \left(\sum_{i \in \psi_+} u_i w_i - \zeta_+ \right) \quad (3.12)$$

$$\dot{\zeta}_- = \frac{1}{T_D} \left(\sum_{i \in \psi_-} u_i w_i - \zeta_- \right) \quad (3.13)$$

$$\dot{g} = \frac{1}{T_A} (u - g) \quad (3.14)$$

$$u = \begin{cases} 1 - e^{\{(\Theta - \zeta_+) \Gamma\} - \zeta_- - \mu g} & u > 0 \\ 0 & u \leq 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

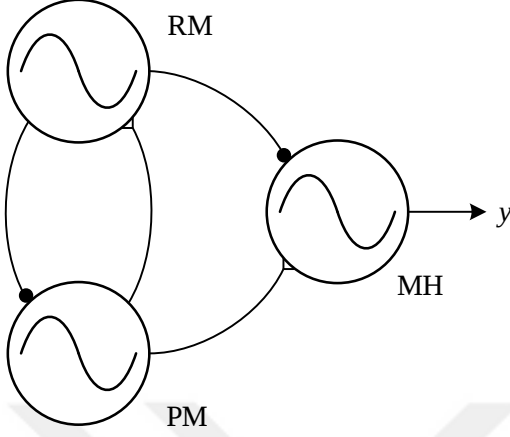
Burada i ara sinir hücresi indisi olmak üzere, ζ_+ ve ζ_- sırasıyla uyarıcı ve engelleyici gecikmiş sinaps değerlerini, T_D ve T_A zaman sabitlerini, ψ_+ ve ψ_- sırasıyla diğer osilatörlerden gelen uyarıcı ve engelleyici sinaps değerlerini, u_i hücre çıkışını, w_i sinir hücreleri arasındaki sinapsları, g osilatör çıkışını temsil eder. Θ , μ ve Γ ise sırasıyla osilatöre ait eşik, kazanç ve adaptasyon oranı sabitleridir.

Ekeberg osilatörü sahip olduğı KS'ler ile duyuşal geri besleme özelliğini içermektedir. Ancak modeldeki her sinir hücresinin dinamik davranışını tanımlamak için kullanılan diferansiyel denklemler osilatör modelini yapısal olarak karmaşık bir hale getirmektedir.

3.1.5. Herrero-Carron Osilatörü

Herrero-Carron osilatörü, Rulkov osilatör modelinin geliştirilerek robotik uygulamalarda kullanılabilir hale getirildiğı osilatör modelidir. Şekil 3.6'da verilen osilatör yapısında, ProMotor (PM), ReMotor (RM) ve Motor Hücre (MH) olarak isimlendirilen hücreler yarım merkezli sinir hücrelerinden oluşmaktadır. Bu osilatör modelinde her hücre sinapslar ile birbirine bağlanarak ritmik sinüzoidal çıkışlar üretebilen bir MÖÜ yapısı oluşturulmuştur.

Biyofiziksel model özelliklerini taşıyan Herrero-Carron osilatörünün hücre davranışları, biyolojik sinirsel aktiviteleri olan ani darbe sinyallerini içermektedir [28].



Şekil 3.6. Herrero-Carron osilatör modeli

Hücreler arası iyon akışının özelliklerini içeren bu osilatör modelinde MH hariç diğer hücreler aşağıdaki ifadeler ile tanımlanmaktadır:

$$f(x, y) = \begin{cases} \frac{\alpha}{1-x} + y & x \leq 0 \\ \alpha + y & 0 \leq x < \alpha + y \\ -1 & \text{diğer} \end{cases} \quad (3.16)$$

$$x_{n+1} = f(x_n, y_n) \quad (3.17)$$

$$y_{n+1} = y_n - \mu(x_n + 1) + \mu\sigma + \mu I_n \quad (3.18)$$

$$I = gr(X_p - E_{syn}) \quad (3.19)$$

$$\dot{r} = \begin{cases} \lambda[T](1-r) - \beta r & t_f < t < t_f + t_r \\ -\beta r & \text{diğer} \end{cases} \quad (3.20)$$

Burada n hücre indisi ve μ patlama sabiti olmak üzere x_n ve y_n sırasıyla μ 'ye bağlı hızlı ve yavaş zar gerilimlerini, α ve σ patlama süresi katsayısı ve periyodunu, I_n ise diğer hücrelerden gelen akım miktarını temsil eder. λ , β ve g hücreler arasındaki sinaps bağlantılarını, $[T]$ hücreler arası kimyasal konsantrasyonu, t_f ve t_r ateşleme ve durma zaman

sabitlerini, X_p ve E_{syn} ise sırasıyla zar potansiyeli ile sinaptik sonrası hücre potansiyelini tanımlamaktadır. Bu ifadeler ile oluşturulan osilatör yapısında MH hücre çıkışı için aşağıdaki eşik fonksiyonu kullanılmaktadır:

$$s(x, v) = \begin{cases} 1 & x > v \\ 0 & x \leq v \end{cases} \quad (3.21)$$

Burada s eşik fonksiyonu olmak üzere v eşik değerini tanımlamaktadır. Böylece, MH çıkışı;

$$\tau \dot{m} = -m + \gamma (s(x, v) - s(x, v)) \quad (3.22)$$

şeklinde tanımlanır. Burada m motor hücrenin zar potansiyelini, γ içsel genliği ve τ zar potansiyeli zaman sabitini vermektedir.

Herrero-Carron osilatörü zengin içsel dinamiklere sahiptir ve biyolojik MÖÜ'lerin birçok özelliğini içermektedir. Ancak bu modelin oldukça karmaşık olması, osilatör tasarımını ve uygulanabilirliğini de zorlaştırmaktadır.

3.1.6. Osilatör Modellerinin Karşılaştırılması

Tablo 3.1'de, yukarıda bahsedilen MÖÜ modelleri için hesaplama karmaşıklığı, parametrelerin modülasyonu ve duysal geri besleme yeteneği olmak üzere üç farklı kriter belirlenerek bu modellerin genel bir karşılaştırılması yapılmıştır. MÖÜ modellerinin avantaj ve dezavantajlarını gösteren bu kriterlerin özellik seviyeleri için hesaplama karmaşıklığında düşük, orta ve fazla; parametrelerin modülasyonunda kolay, orta ve zor; duysal geri besleme yeteneğinde ise zayıf, orta ve iyi tanımlanmıştır.

Tablo 3.1. MÖÜ modellerinin karşılaştırılması

Osilatör Modeli	Sınıf	Hesaplama Karmaşıklığı	Parametrelerin Modülasyonu	Duyusal Geri Besleme Yeteneği
Matsuoka	İlişkisel	Orta	Zor	Zayıf
GDF	Soyut	Düşük	Kolay	Zayıf
Hopf	Soyut	Orta	Orta	Zayıf
Ekeberg	İlişkisel	Orta	Orta	Orta
Herrero-Carron	Biyofiziksel	Fazla	Zor	İyi

Biyofiziksel MÖÜ modelleri bir canlının biyolojik MÖÜ yapısının temel özelliklerini korurlar ve sinirsel faaliyetlerin zengin dinamiğine sahiptirler. Ancak, yüksek hesaplama karmaşıklığı ve parametre modülasyonlarının zor olması bu modellerin dezavantajıdır. İlişkisel MÖÜ modelleri biyofiziksel modellere göre bir alt seviyede bulunmaktadır. Bu modeller canlıların sinirsel MÖÜ yapısına sahiptir ancak sinirsel hücre aktiviteleri biyofiziksel modeller kadar detaylı değildir. İlişkisel modellerde duysal geri besleme yapısını eklemek mümkündür. Ancak, kuplajsız bir yapıda bazı parametrelerin ayarlanması zordur. Soyut seviyedeki MÖÜ modellerinde ise hesaplama karmaşıklığı düşüktür ve parametre modülasyonu kolaydır. Ancak, duysal geri besleme hücrelerinin eklenmesi mümkün değildir. Bu tür modellerde duysal sinir hücreleri yerine sabit parametreler veya fonksiyonlar tanımlanmaktadır [28].

Yapılan karşılaştırma sonucunda, farklı MÖÜ modellerinin avantajlarını birleştiren, düşük hesaplama karmaşıklığına, kolay parametre modülasyonuna ve duysal geri besleme özelliğine sahip bir MÖÜ modeli tam olarak bulunmamaktadır. Yapılan karşılaştırmadaki özellikler ise birbiri ile ilişkilidir. Örneğin, daha basit bir MÖÜ modeli daha düşük hesaplama karmaşıklığına ve daha kolay parametre modülasyonuna sahiptir. Ancak, biyolojik bir modelin bütün özelliklerini içermez. Ayrıca duysal geri besleme özelliği zayıftır. MÖÜ modelinin avantajları arttıkça benzer olarak bazı dezavantajları da içermektedir.

Doğru bir MÖÜ modeli kullanmak için en önemli etken ise uygulamadaki robot prototipinin nasıl bir modele ihtiyacı olduğuna karar verilmesidir. Aynı zamanda, uygulamadaki kullanılabilirliğin artırılması da belirlenecek MÖÜ modeli için önemli bir etkidir.

3.2. Merkezi Örüntü Üretici Modelinin Belirlenmesi

Bu tez çalışması için tasarlanan MÖÜ modeli hiyerarşik bir denetim mekanizmasına uygun olarak belirlenmiştir ve aşağıda belirtilen koşulları sağlaması hedeflenmiştir.

İlk olarak, robot balık prototipinin ortamdaki koşullara uyum sağlayarak yüzebilmesi gerekir. Bunun için tasarlanan MÖÜ modelinin farklı çıkış sinyallerini üretebilmesi ve değişim anlarında çıkışın bozulmaması temel işlevi olmalıdır. Bu nedenle, MÖÜ modelinin zengin dinamik özelliklere sahip olması gerekir.

İkinci olarak, robot balık prototipinin sensörlerinden gelen bilgilere göre denetim yapısı kolayca uygun tepkiyi üretebilmelidir. Bunun için kullanılan MÖÜ modelinin biyolojik özelliklere uygun olarak duyuşal geri besleme özelliğine sahip olması gerekir.

Son olarak, MÖÜ modelinin parametre modülasyonunun bir üst seviye denetleyici ile gerçekleştirilebilmesi gerekir. Parametre modülasyonunun belirli bir öğrenme algoritması ile yapılması, ortamdaki bozuculara karşı MÖÜ modelinin doğru tepkiyi verme olasılığını azalmaktadır.

Yukarıdaki kriterler dikkate alınarak, hem biyofiziksel özelliklere yakın hem de ilişkisel bir model olan Lamprey türü balıkların sinirsel omurilik yapısından esinlenerek geliştirilen MÖÜ modelinin kullanılmasına karar verilmiştir [28,36,37]. Kullanılan MÖÜ modeli ilişkisel seviyenin özelliklerini taşıdığı için hem basit bir yapıdadır hem de uygulamadaki kullanımı kolaydır. Modelin biyofiziksel özelliklere benzerliği ise zengin sinirsel bir dinamik yapının olmasını sağlar ve soyut model kadar sınırlı özelliklere sahip olmaz. Kullanılan bu model biyofiziksel modele göre daha az hesaplama karmaşıklığına sahiptir. Soyut model ile karşılaştırıldığında duyuşal geri besleme özelliği bulunmaktadır ve bir üst seviye denetleyici ile işlevselliği arttırılabilmektedir.

3.3. Lamprey Türü Omurilik Sinir Hücresi Modeli

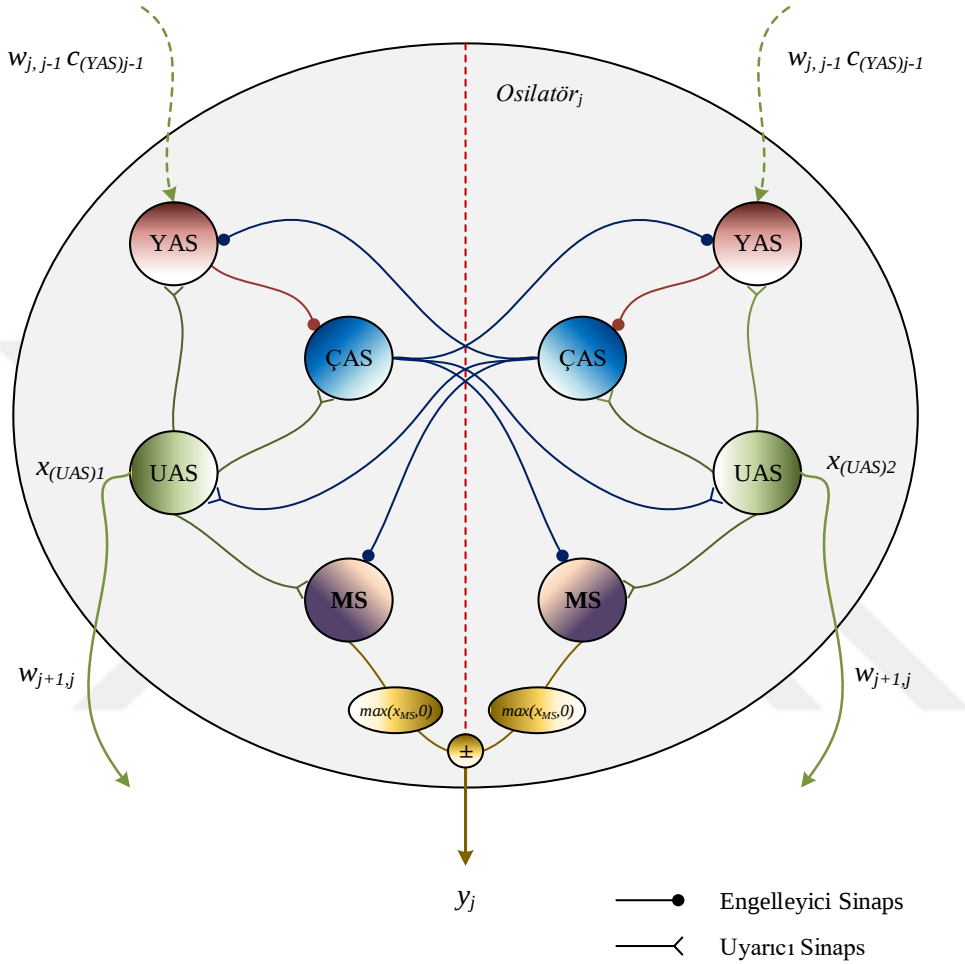
Bu bölümün devamında, bu tez çalışmasında kullanılan Lamprey türü MÖÜ modeli ve özellikleri detaylı olarak verilmiştir. Tasarlanan bu model sürekli salınımlı ritmik çıkışlar üretebilen, duyuşal geri besleme hücrelerine sahiptir ve parametrelerin belirlenmesi ile çıkış sinyallerinin genliği, periyodu, faz farkı ve ofseti kolayca değişebilen özellikler içerir.

3.3.1. Sinir Hücresi Osilatör Modeli

Tasarlanan sinirsel Lamprey türü MÖÜ modeli bir Motor Denetim Merkezi (MDM) birimi ve salınımlı ritmik çıkışlar üreten bir dizi osilatörden oluşmaktadır. MDM birimi MÖÜ devresinin beyin sapı gibi davranır ve osilatörlerin çıkış sinyallerinin faz farkını ayarlamak için bu osilatörlere sinapşlar ile komutlar gönderir [37].

Şekil 3.7’de verilen Lamprey osilatör modeli birbirine simetrik sol ve sağ bölüm olmak üzere iki temel yapıdan oluşmaktadır. Her iki bölümde üçer adet ara sinir hücresi (internöron) ve bir adet Motor Sinir Hücresi (MS, Motor Neuron) bulunur. Ara sinir hücreleri

Çapraz Ara Sinir Hücresi (ÇAS, Crossed InterNeuron), Yanal Ara Sinir Hücresi (YAS, Lateral InterNeuron) ve Uyarıcı Ara Sinir Hücresi'nden (UAS, Excitatory InterNeuron) oluşmaktadır.



Şekil 3.7. Sinirsel Lamprey osilatör modeli

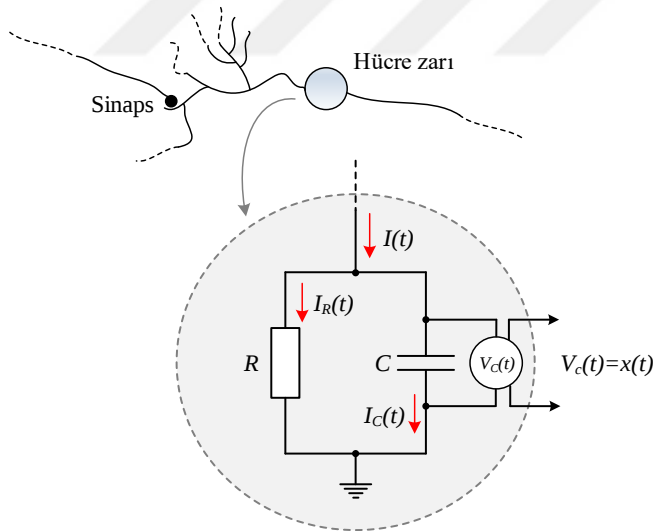
Osilatörleri oluşturan sinir hücreleri aşağıda belirtilen özelliklere sahip içsel sinapslar ile birbirine bağlıdır:

- Her ÇAS, aynı tarafa ait zar (aksiyon) potansiyelinin artması ile karşı taraftaki UAS hariç tüm ara sinir hücrelerine engelleyici sinapslar yayar.
- Her UAS, aynı taraftaki diğer iki ara sinir hücresi ile MS'ye uyarıcı sinapslar yayar.
- Her YAS, aynı taraftaki ÇAS'a engelleyici sinapslar gönderir.
- Her iki tarafta bulunan MS, gelen sinyalleri birleştirerek osilatör çıkışını üretir.

Aynı zamanda, her osilatör aşağıda belirtilen özelliklere sahip dışsal sinapslar ile birbirine bağlıdır:

- Bir osilatör UAS hücreleri yoluyla diğer osilatörlere engelleyici sipaslar gönderir.
- Her YAS hücresi diğer osilatörlerden gelen sinapsları alır.
- Simetrik bağlantı gerçekleştirilirse, bir osilatördeki presinaptik ve başka bir osilatördeki postsinaptik sinir hücreleri sol veya sağ bölüm olmak üzere aynı taraftadır.
- Bir osilatör ile başka bir osilatör bağlantı kurarsa, çift sayıda sinaps gerekir.

Osilatör modelinde, ara sinir hücreleri bir dizi Sızdıran Topla ve Ateşle (STA, Leaky Integrate and Fire) hücresinden oluşur [144]. Birinci dereceden diferansiyel denklem ile ifade edilen STA sinir hücresi modeli, bir hücrenin az miktarda zar potansiyelinin zamanla değişimini belirtir ve en basit sıçrayan (spiking) hücre modellerinden biridir. Basit ve kolay kullanım yapısına sahip bir STA modeli, sızıntı olayının dirençten kaynaklandığı ve toplamının akım ile sağlandığı düşünülürse, Şekil 3.8’de verilen paralel direnç-kondansatör (R-C) devresinin eşitliği gibi tanımlanır.



Şekil 3.8. STA modelinin paralel R-C eş değer devresi

Şekil 3.8’e göre, direnç akımı I_R ve kondansatör akımı I_C olmak üzere,

$$I = I_R + I_C \quad (3.23a)$$

olur. Kondansatör akımında, kondansatör gerilimi V_C yerine yazılırsa Denklem (3.23a) aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir:

$$I = \frac{V_C}{R} + C \frac{dV_C}{dt} \quad (3.23b)$$

Eşitliğin her iki tarafı R ile çarpılır, $V_C=x$ ve başlangıç şartı x_0 olarak seçilirse STA modeli,

$$\tau \frac{dx}{dt} = -x + x_0 + RI \quad (3.24)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, x hücrenin zar potansiyelini, τ hücre zarının zaman sabitini, R zar direncini ve I hücreye akan giriş akımının miktarını belirtir. Bu ifadede, eşitliğin sağ tarafı hücrenin ortalama ateşleme miktarını verir. Zar potansiyeli belirli bir eşik değerine ulaştığında, anlık olarak daha düşük bir değere çekilir ve sızıntı toplama işlemi başlangıç değeri ile yeniden başlar. Kalıcı durumda, hücrenin çıkışı monoton artan ve azalan bir hal almış olur.

Tasarlanan sinirsel Lamprey MÖÜ osilatöründe, ara sinir hücresi dinamikleri STA hücre modeline göre tanımlandığında her ÇAS aşağıdaki denklem ile tanımlanır:

$$\tau \frac{dx_{(\text{ÇAS})i}}{dt} = -x_{(\text{ÇAS})i} + \sum_{k=1}^n w_{i,k} s_{(\text{ÇAS})i,k} \quad (3.25)$$

YAS modeli ise,

$$\tau \frac{dx_{(\text{YAS})i}}{dt} = -x_{(\text{YAS})i} + \sum_{k=1}^n w_{i,k} s_{(\text{YAS})i,k} + \sum_{j=1}^N \left(w_{j,j-1} c_{(\text{YAS})j-1} + w_{j,j+1} c_{(\text{YAS})j+1} \right) \quad (3.26)$$

olur. UAS ara sinir hücresi modeli için

$$x_{(\text{UAS})i} = \frac{A}{1 + e^{x_{(\text{ÇAS})i}}} - \frac{A}{2} \quad (3.27)$$

ifadesi kullanılır. Motor sinir hücresi MS ise,

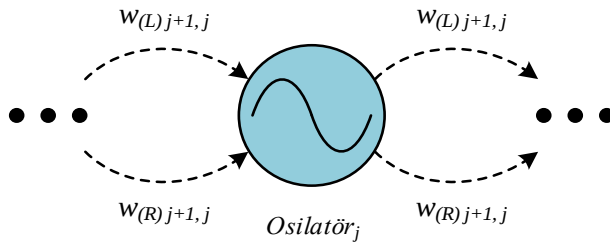
$$\tau \frac{dx_{(\text{MS})i}}{dt} = -x_{(\text{MS})i} + \beta A + \sum_{k=1}^n w_{i,k} s_{(\text{MS})i,k} \quad (3.28)$$

şeklinde ifade edilir. Böylece, osilatör çıkışı Denklem (3.29) ile elde edilir:

$$y_j = \max(x_{(MS)1}, 0) - \max(x_{(MS)2}, 0) \quad (3.29)$$

Bu ifadelerde $i=1,2$ olmak üzere osilatörlere ait sol ve sağ bölümü, $j=1,2,...,N$ osilatör sayısını, $k=1,2,...,n$ her osilatörde bulunan sinir hücresi sayısını ve alt indilere ait üst çizgi ise aynı osilatörde bulunan karşı tarafı simgeler. x_i sinir hücrelerinin zar potansiyelleri ve y_j osilatörlerin çıkışı olmak üzere, τ , β ve A sırasıyla osilatör çıkışlarının periyodu, ofseti ve genliğini belirleyen parametrelerdir. $w_{i,k}$ ve $w_{i,j}$ sinir hücreleri ve osilatörler arasındaki sinaptik ağırlıkları tanımlayan bağlantılardır. s_i aynı osilatördeki sinaptik öncesi (presinaptik) sinir hücresi potansiyellerini, $w_{i,k}$ ile birlikte s_i çarpımı sinaptik sonrası (postsinaptik) sinir hücresine iletilen sinirsel tepki (nörotransmitter) miktarını, c_j diğer osilatördeki sinaptik öncesi sinir hücresi potansiyellerini, $w_{i,j}$ ile birlikte c_j çarpımı ise diğer osilatördeki sinaptik sonrası sinir hücresine iletilen sinirsel tepki miktarını verir.

Denklem 3.27 incelendiğinde, UAS türü sinir hücresi eşitliğinin STA hücre modelinden farklı olduğu görülmektedir. Burada, UAS sinir hücresi modeli için A eşik değerine sahip bir sigmoid fonksiyonu kullanılmıştır. Bir osilatördeki UAS hücresi, aynı taraftaki diğer ara sinir hücrelerine uyarıcı sinapslar yayar ve sigmoid fonksiyonu bu hücrelerin zar potansiyellerinin sürekli değişmesini sağlar. Böylece, STA modeli ile birlikte kullanılan sigmoid fonksiyonu osilatörlerin kalıcı durumdaki salınımlarına yardımcı olur. Şekil 3.9'da bir osilatörün basitleştirilmiş gösterimi verilmiştir. Şekil içerisinde bulunan sinüzoidal sembol osilatörün kalıcı durumda periyodik çıkış sinyalleri ürettiğini ifade etmektedir.



Şekil 3.9. Bir osilatör hücresinin basitleştirilmiş gösterimi

Bir osilatörde kullanılan sabit içsel sinaptik ağırlıklar Tablo 3.2'de verilmiştir. Ritmik ve daha saf bir sinüzoidal osilatör çıkışı elde etmek için bütün içsel ağırlıklar 1 değerini, UAS'dan MS'ye olanlar ise 0.1 değerini almıştır. Aynı zamanda, sinaptik ağırlıklar ile birlikte bir sinir hücresinin başlangıç değeri de ritmik salınımların oluşmasında önemli bir rol oynamaktadır. Sinaps türü olarak engelleyici seçilmiştir. UAS hariç diğer sinir

hücrelerine engelleyici sinapslar yayan sol ve sağ ÇAS'lar arasında oldukça küçük bir farkla başlangıç şartı belirlendiğinde kendi kendini devam ettiren salınımlı bir osilatör çıkışı elde edilmektedir. Tablo 3.3'de, bir osilatörde kullanılan sinir hücrelerine ait başlangıç şartları verilmiştir.

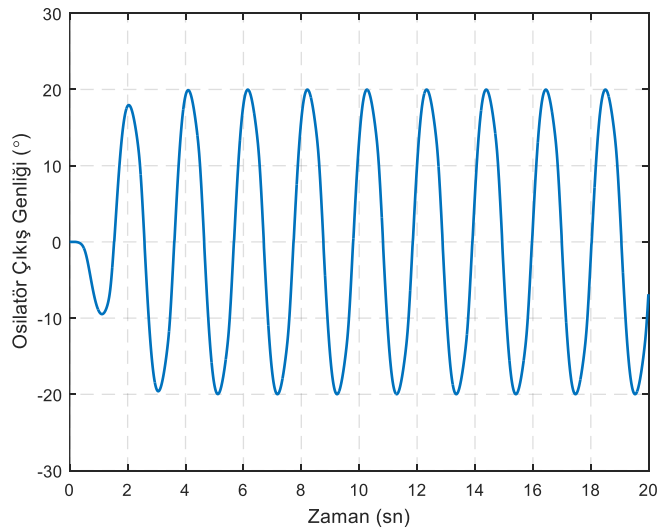
Tablo 3.2. Osilatör modeline ait içsel sinaptik ağırlıklar

$w_{i,k}$		Sinaptik Sonrası			
		ÇAS	YAS	UAS	MS
Sinaptik Öncesi	ÇAS	-1	-1	1	-1
	YAS	-1	0	0	0
	UAS	1	1	0	0.1
	MS	0	0	0	0

Tablo 3.3. Osilatör için belirlenen başlangıç şartları

Ara Sinir Hücresi	SOL	SAĞ
ÇAS	0.1	0.10001
UAS	0.01	0.01001
YAS	0	0
MS	0	0

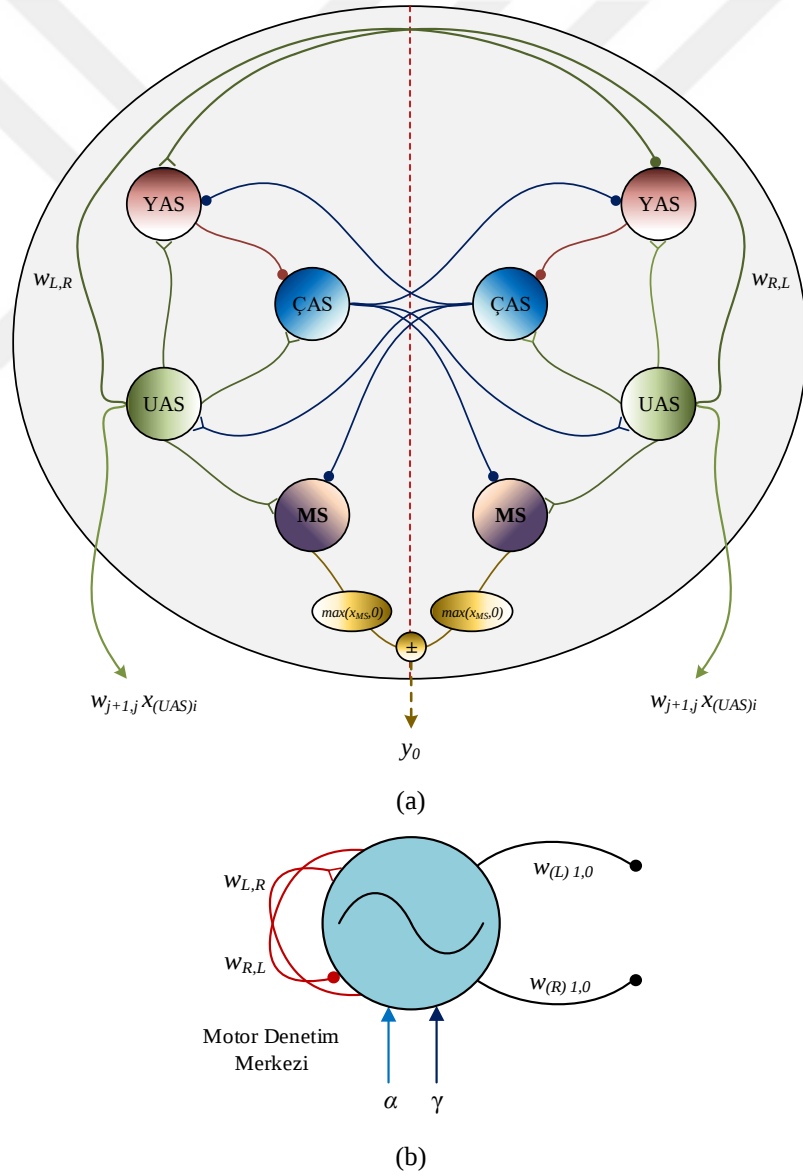
Şekil 3.10'da, tasarlanan Lamprey sinirsel osilatör modelinin çıkışı verilmektedir. Osilatör modeli için $\tau=0.2$, $A=20$ ve $\beta=0$ olarak seçilmiştir.



Şekil 3.10. Osilatör modeli çıkışı

3.3.2. Sinirsel Motor Denetim Merkezi Modeli

Sinirsel MDM birimi, osilatör dizisinde beyin sapı görevi görür ve belirlenen bağlantı topolojisine göre osilatörlere engelleyici veya uyarıcı sinapslar yayar. MDM, bir osilatör hücresinde ek iki adet sinapsın daha kullanılmasıyla oluşur. Bu sinaptik ağırlıklardan $w_{R,L}$ sol UAS'dan sağdaki YAS'a giden engelleyici sinapsı, $w_{L,R}$ ise sağ UAS'dan soldaki YAS'a giden uyarıcı sinapsı belirtir. Bu eklenen iki sinaps ile osilatör dizisi çıkışları arasındaki faz farkı ayarlanmaktadır. Şekil 3.11'de, tasarlanan MDM modeli ve basitleştirilmiş gösterimi verilmiştir.



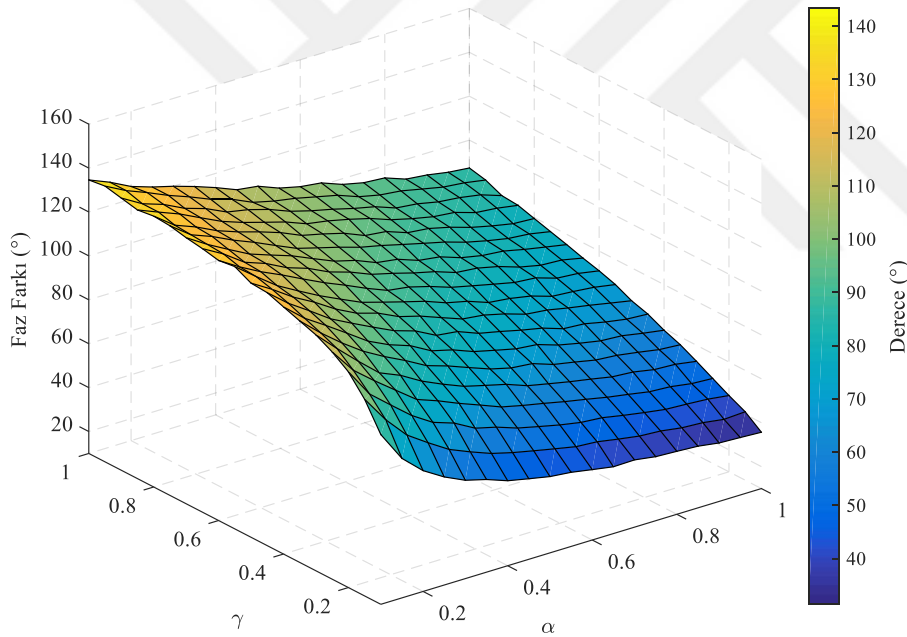
Şekil 3.11. MDM modeli: (a) Detaylı gösterim, (b) Basitleştirilmiş gösterim

Osilatörler arasındaki faz farklarının hassas bir şekilde ayarlanabilmesi için $w_{L,R}$ ve $w_{R,L}$ ağırlıklarının sırasıyla $(0,1]$ ve $[-1,0)$ aralıklarında olması gerekmektedir. Buna göre $w_{L,R}$ ve $w_{R,L}$ sırasıyla aşağıdaki ifadeler ile belirlenir:

$$w_{L,R} = \frac{\alpha}{\alpha + \gamma} \quad (3.30)$$

$$w_{R,L} = \frac{-\gamma}{\alpha + \gamma} \quad (3.31)$$

Bu ifadelerde, α ve γ faz farkı değişimini ayarlayan parametreler olup $(0,1]$ aralığında değişmektedir. Şekil 3.12’de, α ve γ parametrelerinin iki osilatör arasındaki faz farkına olan etkisi verilmiştir.

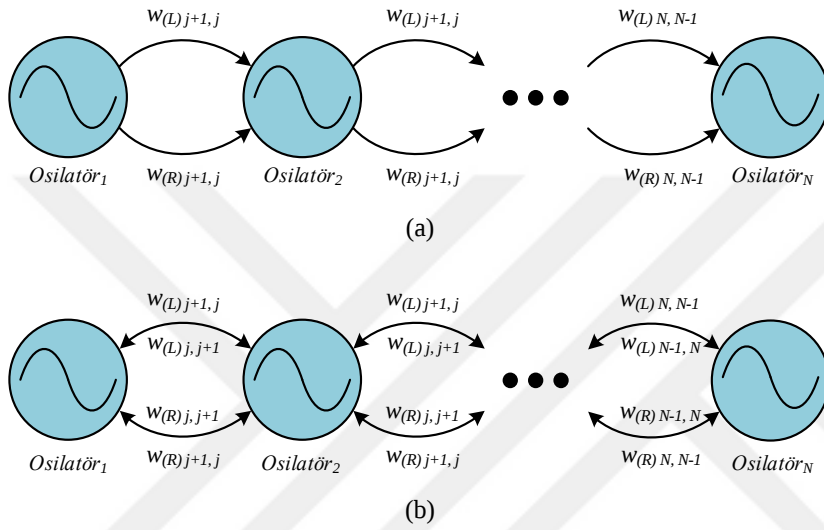


Şekil 3.12. α ve γ parametrelerinin iki osilatör arasındaki faz farkına olan etkisi

Osilatör modeli için $\tau=0.2$, $A=20$ ve $\beta=0$ olarak belirlenmiştir. Şekilde 3.12’de görüldüğü gibi, sonuçlar yaklaşık 35° ile 140° aralığında değişken, monoton ve yumuşak eğimli bir yüzeye sahiptir. α değerinin artması faz farkını azaltırken, γ değerinin artması ile faz farkı da artmaktadır. Böylece α ve γ parametrelerinin faz farkı değişiminde uygun değere ayarlanması ile iki osilatör arasında istenen faz farkı kolayca elde edilebilmektedir.

3.4. Osilatör Dizilerinin Oluşturulması

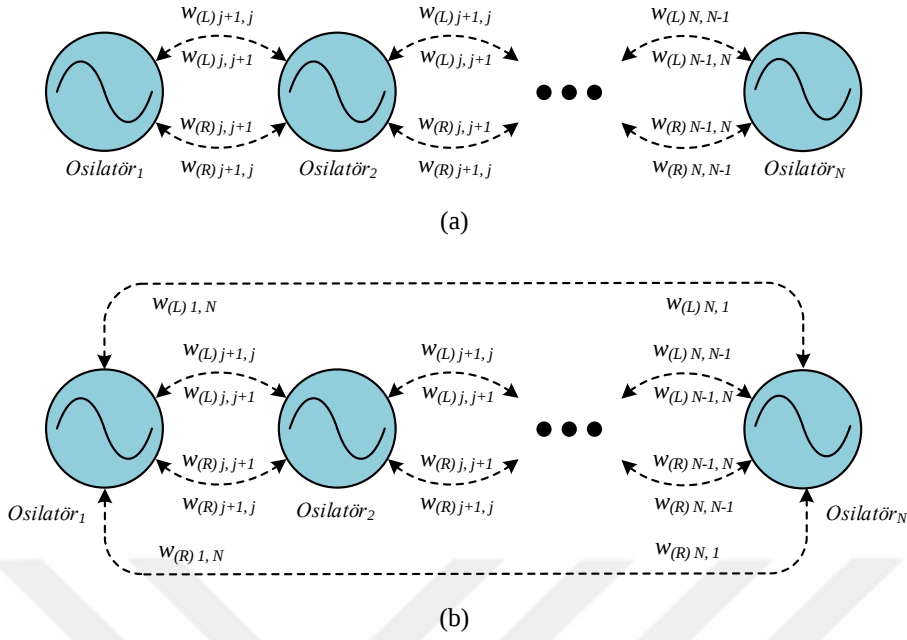
Tasarlanan Lamprey sinirsel osilatör modelleri birbirlerine farklı topolojiler ile bağlanarak osilatör dizilerini oluşturmaktadır. Bu bağlantılar sinaptik ağırlıklar ile gerçekleştirilir ve MÖÜ dizisindeki osilatörlerin davranışları belirlenir [120]. Bir osilatör dizisinde olan tek ve çift yönlü bağlantılar Şekil 3.13’de verilmiştir.



Şekil 3.13. Osilatörler arasındaki tek ve çift yönlü bağlantılar: (a) Tek yönlü bağlantı, (b) Çift yönlü bağlantı

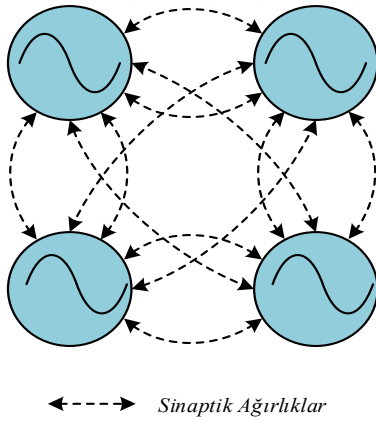
Şekil 3.13.a’da, j . osilatörden $j+1$. osilatöre doğru yapılan bağlantı tek yönlü sinaptik bağlantı olarak isimlendirilir. Tek yönlü sinaptik bağlantılar ile sırasıyla birbirine bağlı osilatörler arasında istenen faz farkları oluşturulur. Şekil 3.13.b’de ise her iki osilatör birbirine çift yönlü sinaptik bağlantılar göndermektedir. Çift yönlü bağlantıda faz farkları oluşurken osilatör çıkışlarının yerleşme zamanları daha uzun olur ve bazı durumlarda çıkış şekli bozulur.

Osilatörlerin tek ve çift yönlü bağlantıları, Şekil 3.14’de gösterildiği gibi zincir veya halka bağlı şekilde yapılmaktadır. Kesik çizgili ve çift yönlü ok sembolleri sinaptik ağırlıkların tek veya çift yönde olabileceğini göstermektedir. Zincir bağlı osilatörler yukarıda belirtildiği gibi faz farklı çıkış sinyalleri üretirken, halka bağlı osilatör aynı fazda çıkış sinyalleri üretmektedir. Aynı zamanda, osilatörlerin sabit bir çıkış değeri üretebilmesi için çift yönlü halka bağlantı kullanılır ve büyük değerde sinaptik ağırlıklar seçilir.



Şekil 3.14. Osilatörler arasındaki zincir ve halka bağlantılar: (a) Zincir bağlantı, (b) Halka bağlantı

Eğer sıralı olmayan bazı osilatör çıkışları arasında farklı faz davranışları istenirse, Şekil 3.15’de gösterildiği gibi osilatörler karmaşık olarak da birbirine bağlanabilmektedir.

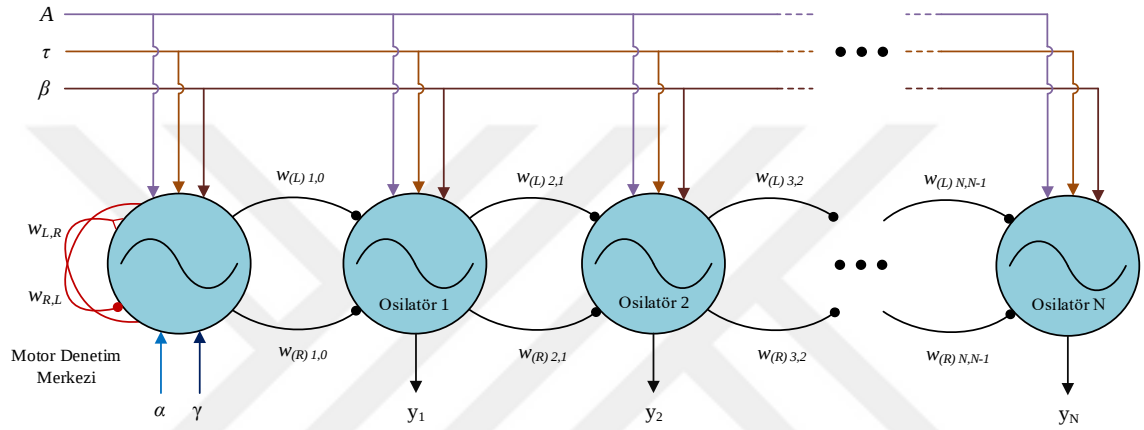


Şekil 3.15. Osilatörlerin karmaşık olarak birbirine bağlanması

Bu tez çalışmasında, robot balık prototipinin eklemleri arasındaki faz farkının istenilen şekilde sağlanabilmesi ve osilatör çıkışlarının sinüzoidal bir formda olabilmesi için tek yönlü zincir bağlı yapı kullanılmıştır.

3.5. Tek Yönlü Zincir Bağlantılı Merkezi Örüntü Üretici Devresi

Bir önceki bölümde bahsedildiği gibi, osilatörler arasındaki bağlantılar UAS'dan YAS'a sinaptik ağırlıklar vasıtasıyla gerçekleştirilir. Şekil 3.16'da, bir MDM ve N adet özdeş osilatör kullanılarak oluşturulan tek yönlü zincir bağlı sinirsel bir MÖÜ devresi verilmiştir. Burada, bir çift UAS hücresinden bir sonraki YAS hücrelerine tek yönlü engelleyici sinaptik bağlantılar gerçekleştirilir.



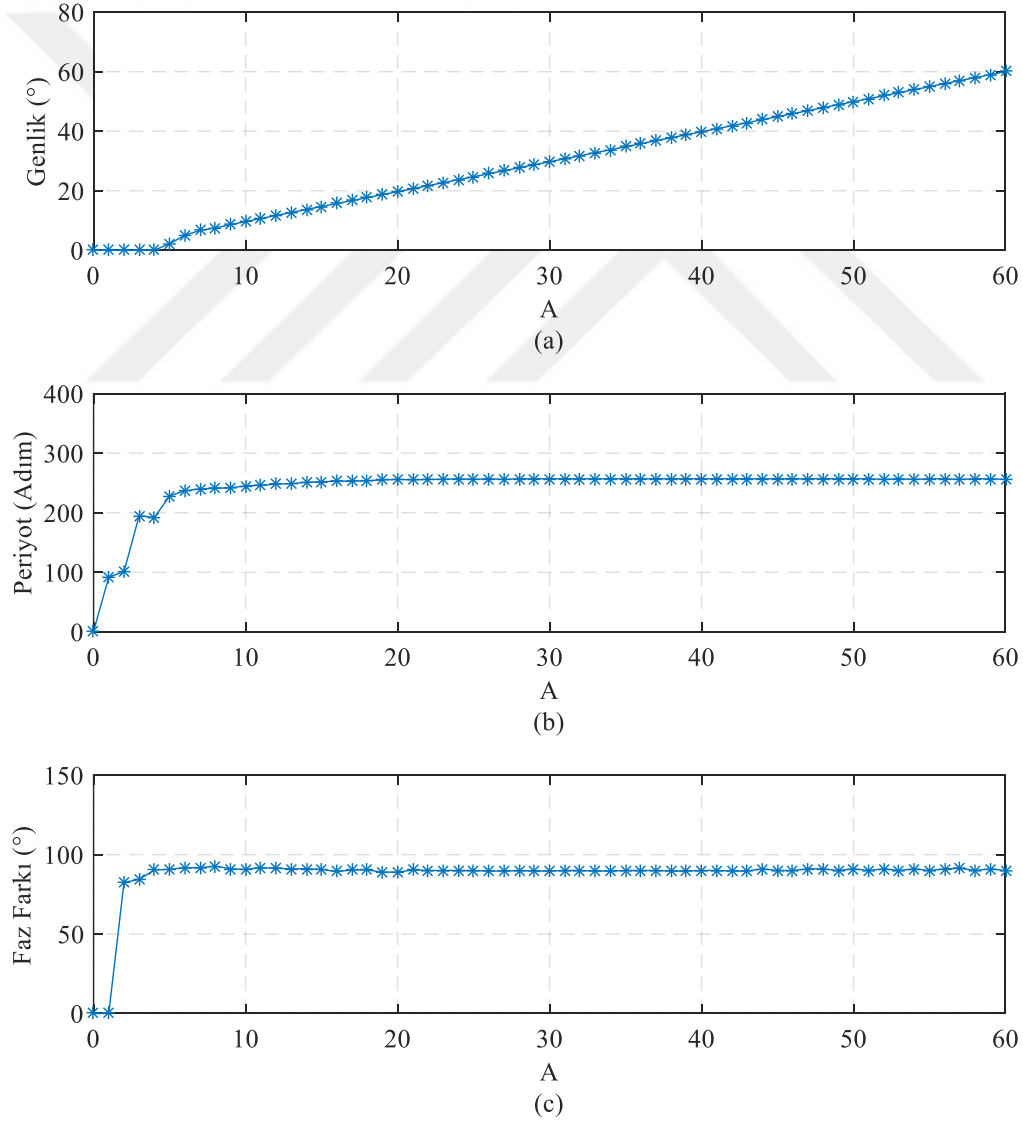
Şekil 3.16. N adet osilatörden oluşan tek yönlü zincir bağlı MÖÜ devresi

Tek yönlü zincir bağlı ve engelleyici sinaptik ağırlıklara sahip bir MÖÜ devresinin davranışlarını incelemek için sinir hücrelerinin dinamiklerini belirleyen parametrelerin benzetim ortamında sayısal analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bu parametreler sırasıyla osilatörlerin çıkış genliğini ve periyodunu belirleyen A ve τ , MDM ile osilatörler arasındaki faz farkı değişimini ayarlayan (α, γ) parametreleri ve osilatör çıkışlarının ofset değişimini belirleyen β değeridir. Her bir denetim parametresinin çıkış üzerindeki etkisini sayısal olarak analiz etmek için benzetim çalışmalarında diğer parametreler sabitlenmiş ve doğru bir aralıkta sadece bir parametre değiştirilmiştir. Böylece, gerekli denetim parametresinin etkisi daha doğru görülmüştür.

Bir sonraki alt bölümlerde, her bir parametre değişimine göre osilatörün çıkışı ve diğer dinamik davranışlara olan etkileri incelenmiştir. Osilatörler arasındaki engelleyici ağırlıkların hepsi birbirine eşit ve -1 değerinde seçilmiştir. Böylece bütün osilatörler arasında eşit ve sabit bir faz farkı davranışı oluşturulmuştur. Osilatör dizisinde ise robot balığın eklem yapısına bağlı olarak iki adet osilatör kullanılmıştır.

3.5.1. A Parametresinin Değişimi

Bir MÖÜ devresinde, A parametresi osilatörlerin çıkış genliğini belirlemektedir. Bu parametrenin osilatör dinamiklerini nasıl etkilediğini görmek için τ , α , γ ve β sırasıyla 0.4, 0.8, 0.2 ve 0 olarak sabitlenmiş ve $A=0,1,2,\dots,60$ aralığında değiştirilmiştir. Şekil 3.17.a’da görüldüğü gibi, 7 ve daha büyük derecede değerler için osilatör çıkış genliği katsayısı 1 olan doğrusal bir ilişki ile A ’ya bağlıdır. Böylece, osilatör çıkış genliği belirlenen A değerine gitmektedir. Aynı zamanda A ’nın 10 ve daha büyük değerlerinde osilatör çıkış periyodunu etkilemediği de görülmektedir.

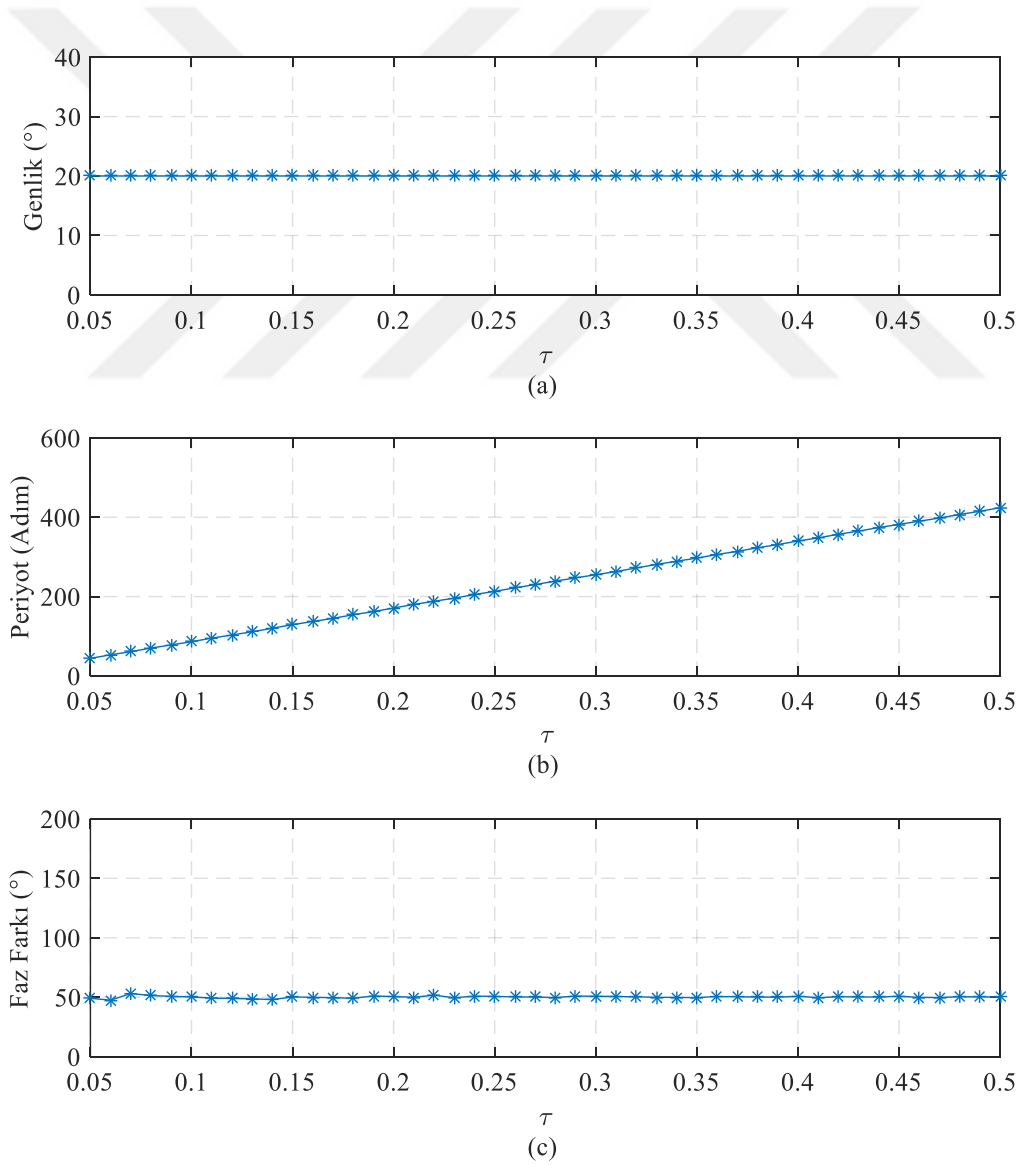


Şekil 3.17. A parametresinin incelenmesi: (a) Genlik, (b) Periyot, (c) Faz farkına olan etkisi

Şekil 3.17.c’de ise A ’nın osilatörler arasındaki faz farkına olan etkisi görülmektedir. A ’nın 5 ve daha büyük değerleri için osilatör çıkışları arasındaki faz farkına olan etkisi oldukça küçüktür ve bu tez çalışması için bu etki ihmal edilmiştir.

3.5.2. τ Parametresinin Değişimi

Sinirsel Lamprey MÖÜ devresinde, τ parametresi osilatörlerin periyodunu belirlemek için kullanılmaktadır. Şekil 3.18’de, τ ’nın genlik, periyot ve faz farkına olan etkisi verilmiştir. Burada A , α , γ ve β sırasıyla 20, 0.8, 0.2 ve 0 olarak belirlenmiş ve τ değişim aralığı $[0.05, 0.5]$ olarak seçilmiştir.



Şekil 3.18. τ parametresinin incelenmesi: (a) Genlik, (b) Periyot, (c) Faz farkına olan etkisi

Şekil 3.18’de görüldüğü gibi, τ ’nın değişiminin osilatör çıkış genliği üzerinde herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. Faz farkında ise $\tau=0.07$ değerinde oldukça küçük bir değişim bulunmaktadır ve bu durum ihmal edilmiştir. τ ’nın artması ile osilatör çıkış periyodu da doğrusal bir şekilde artmaktadır. Yapılan benzetim çalışmalarından osilatör çıkış periyodunun zamana bağlı olarak aşağıdaki ifade ile belirlenebildiği görülmüştür.

$$T_{osc} = 8.5475\tau \quad (3.32)$$

Böylece, osilatör çıkış frekansı da istenildiği gibi değiştirilebilir ve robot balığın kuyruk çırpınma frekansı ayarlanabilir.

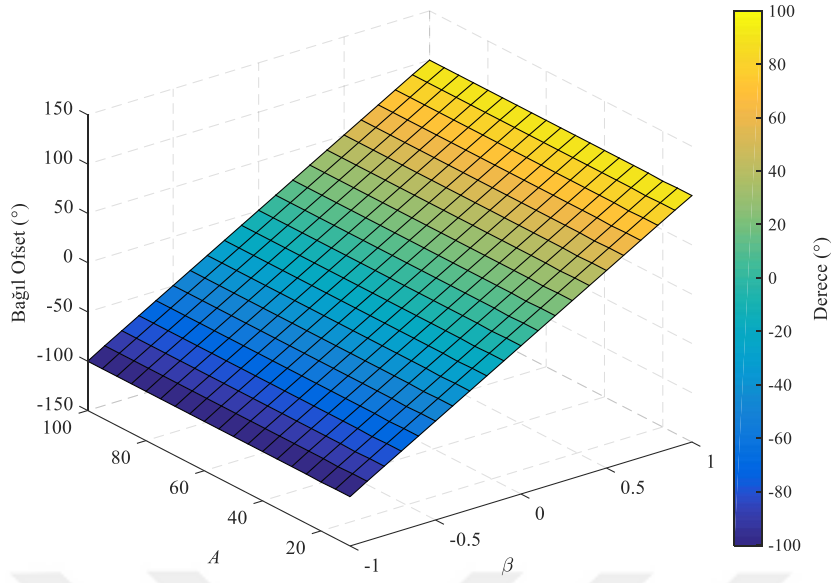
3.5.3. β Parametresinin Değişimi

Denklem (3.28)’e göre, β parametresi MS vasıtasıyla osilatör çıkışlarına ait ofset değerlerinin ayarlanması için kullanılır ve miktarı βA ifadesi ile belirlenmektedir. Şekil 3.19’da, A parametresi [10,100] aralığında değiştirilmiş ve β ’nın [-1,1] aralığındaki değişimine göre bağlı ofset değerleri y_{BO} verilmiştir. Bağlı ofset, osilatör çıkış genliğinin ofset yüzdesi olup aşağıdaki ifade ile tanımlanabilir:

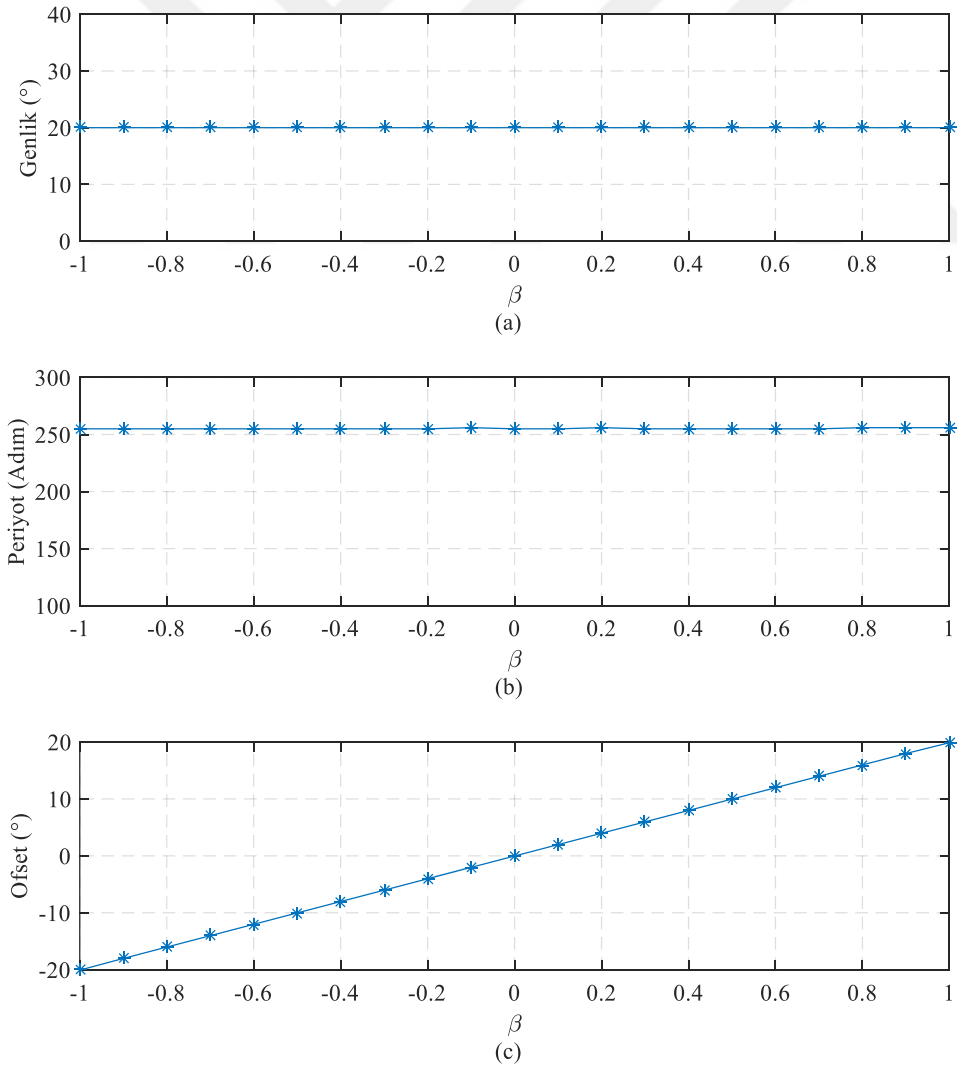
$$\%y_{BO} = \frac{y_{offset}}{A} 100 \quad (3.33)$$

Burada, y_{offset} osilatör çıkış genliğinin ofset değeridir. Şekil 3.19’da görüldüğü gibi, β parametresinin değişimi osilatör genliğine bağlı olarak bağlı offset değeri kadar osilatör çıkışına etki etmektedir. Aynı zamanda, bir osilatör çıkışında ofset değeri üretebilmek için her iki MS hücresinde birbirine zıt işaretli β değerleri olmalıdır.

Şekil 3.20’de ise τ , α , γ ve A sırasıyla 0.3, 0.8, 0.2 ve 20 olarak belirlenmiş ve β ’nın [-1,1] aralığındaki değişiminde osilatör çıkış genliği, periyodu ve ofseti üzerine olan etkileri verilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi β değişiminin osilatör çıkış genliğine ve periyoduna herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. Aynı zamanda, osilatör çıkışında $\%y_{BO}$ miktarı kadar ofset eklenir.



Şekil 3.19. β ve A parametrelerinin değişimine göre bağıl ofset



Şekil 3.20. β parametresinin incelenmesi: (a) Genlik, (b) Periyot, (c) Ofset değerlerine olan etkisi

Deneyisel çalışmalarda çıkış ofset değerlerinin robot balık prototipinin mekanik yapısına bağlı olarak sınırlandırılması gerekir. Bu tez çalışmasına göre, β 'nın multak değeri robot balık prototipinin çalışma uzayı içerisinde kalabilmesi için aşağıdaki ifade ile belirlenmesi gerekmektedir:

$$|\beta| \leq \frac{45^\circ - A}{A} \quad (3.34)$$

Ayrıca, ofset değeri osilatör çıkış genliğini belirleyen A parametresine bağlı olduğu için bu genliğin tepe değeri de robot balık prototipinin çalışma uzayına göre $A_{\max} < 45^\circ$ ile sınırlandırılmalıdır.

3.5.4. α Parametresinin Değişimi

Bu tez çalışmasının devamında, α parametresinin değişimi ile uygun faz farkı değerleri elde edilebildiği için $\gamma=0.2$ değerinde sabit olarak belirlenmiştir. Şekil 3.21'de τ , A ve β sırasıyla 0.23, 20 ve 0 olarak belirlenmiş ve α parametresinin genlik periyot ve faz farkına olan etkisi verilmiştir. Burada, α 'nın $[0,1]$ aralığındaki değişimine göre osilatör çıkışları arasındaki faz farkının 44° 'den 145° 'ye kadar değişebildiği görülmektedir. Ancak, α 'nın faz farkı ile birlikte osilatör çıkış genliği ve periyodu üzerinde de istenmeyen bir etkisi vardır. α 'nın 0'dan 0.2'ye kadar artmasıyla osilatör çıkış genliği de 14° 'den 20° 'ye ulaşmaktadır. Bu parametrenin diğer değerleri için ise genlik 20° 'nin etrafında $\pm 0.5^\circ$ ile değişmektedir. Osilatör periyodu ise oldukça büyük aralıklarda bozulmaktadır.

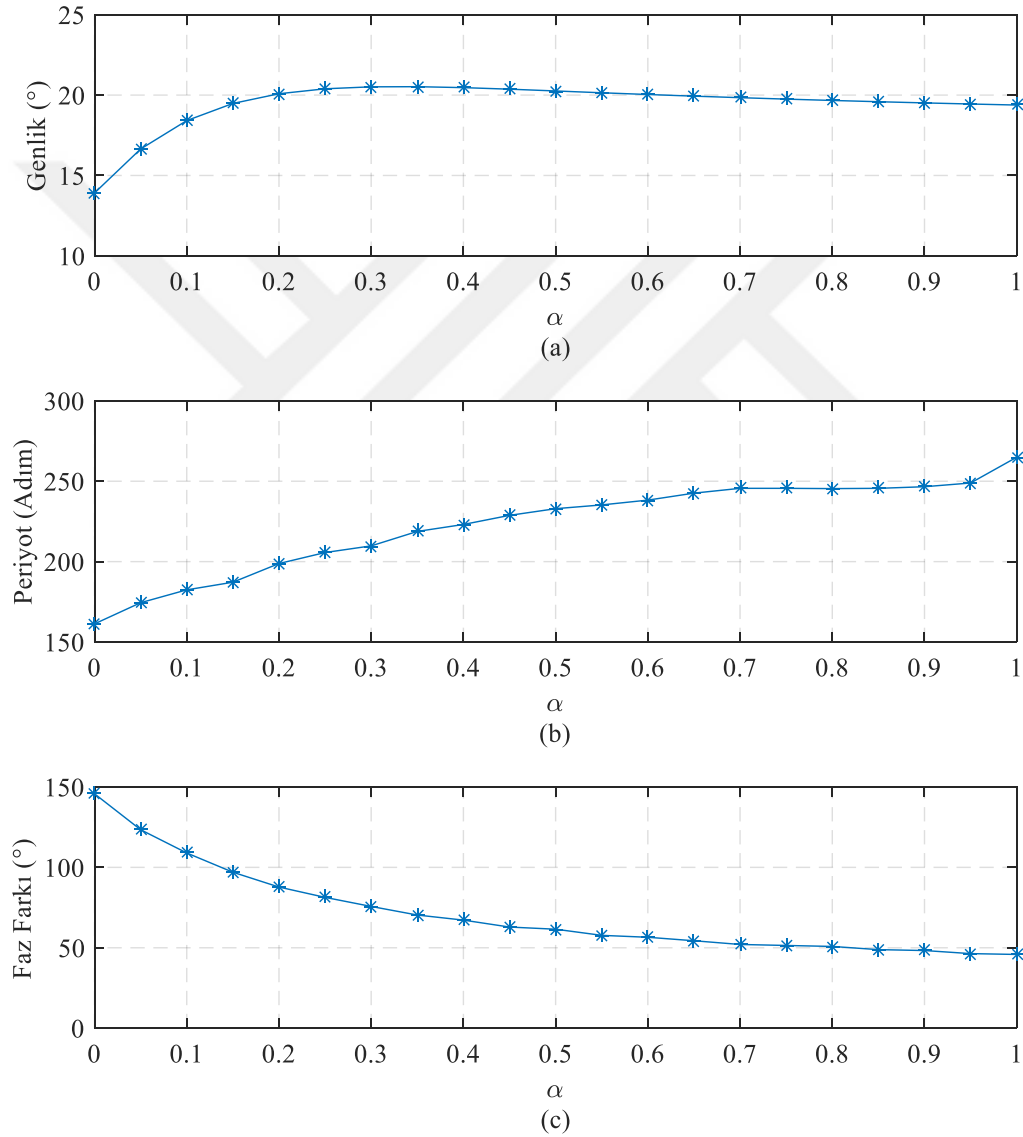
Şekil 3.22'de, genliğin α ve A 'nın değişimine bağlı olarak bozulduğu görülmektedir. Belirlenen aralıklarla ortaya çıkan genlik bir düzlem yerine eğimli bir yüzey oluşturmıştır. Bu bozucu etki altında kalan genlik $g_{osc}(A, \alpha)$ olarak isimlendirilir. α 'nın osilatör çıkış genliği üzerindeki etkisini kaldırmak için $g_{osc}(A, \alpha)$ 'nın α eksenine paralel bir düzleme gelmesi gerekir. Bunun için, α 'nın değişimine bağlı A parametresine ilave bir genlik kazancı K_A eklenmelidir. Eğer $g'_{osc}(A, \alpha)$, A 'nın değişimine bağlı ve α etkisinden kurtulmuş genlik olarak belirlenirse, $g'_{osc}(A, \alpha) = A$ olmalıdır. Böylece, genlik kazancı aşağıdaki ifade ile bulunur:

$$K_A = \frac{g_{osc}(A, \alpha)}{A} \quad (3.35)$$

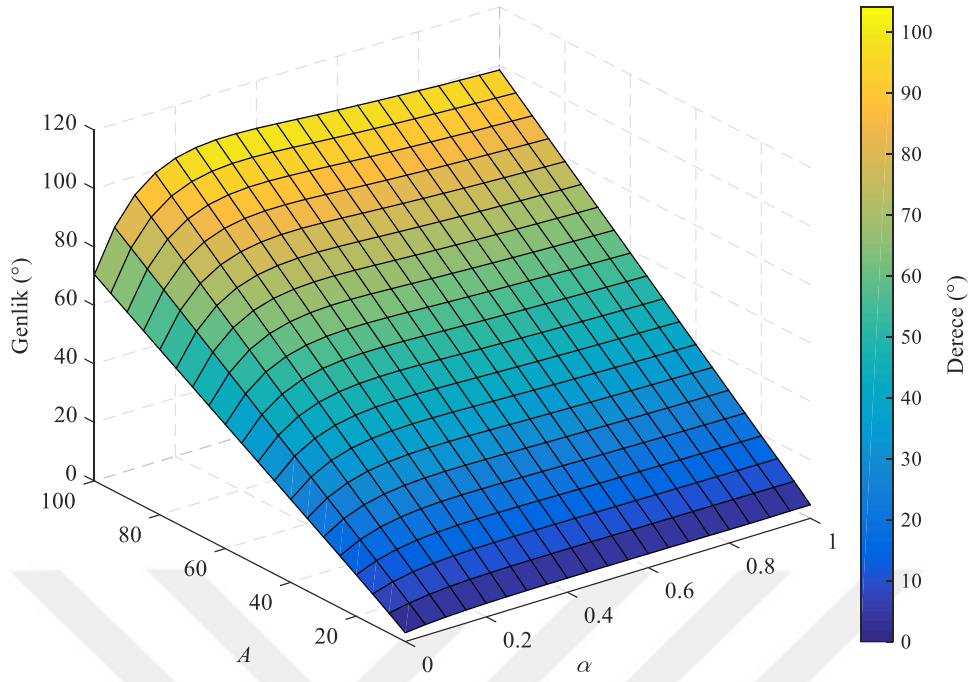
Şekil 3.23’de, Denklem (3.35) ile elde edilmiş K_A yüzeyi verilmiştir. Sonuç olarak, α etkisinden kurtulmuş genlik değerleri $g'_{osc}(A, \alpha)$ aşağıdaki gibi bulunur:

$$g'_{osc}(A, \alpha) = \frac{g_{osc}(A, \alpha)}{K_A} \quad (3.36)$$

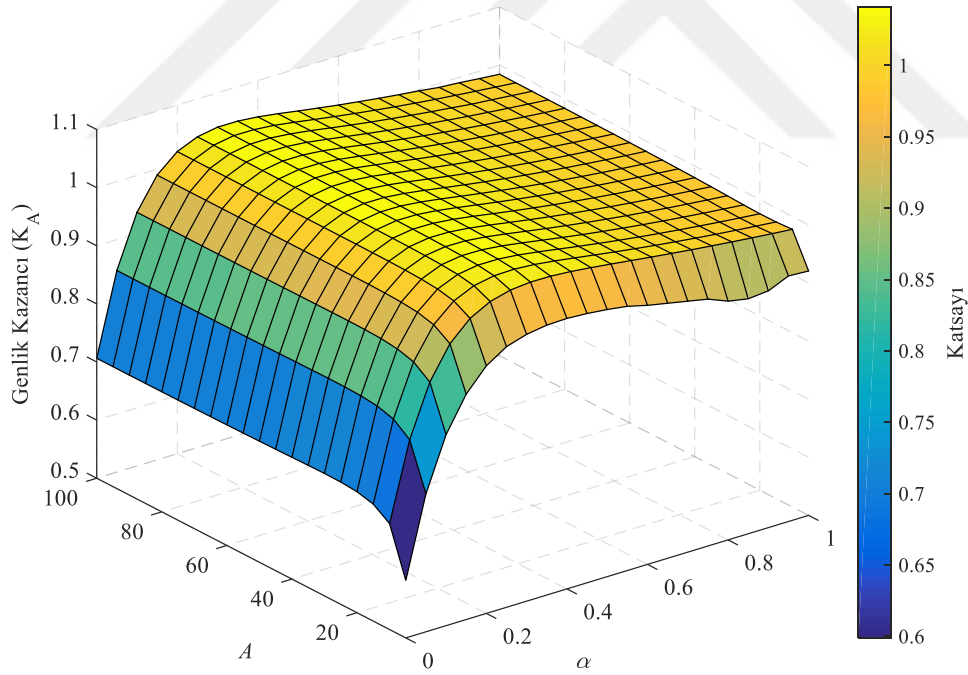
Böylece, α ’nın değişimi A ’ya bağlı olan osilatör çıkış genliklerini etkilemeyecektir.



Şekil 3.21. α parametresinin incelenmesi: (a) Genlik, (b) Periyot, (c) Faz farkına olan etkisi

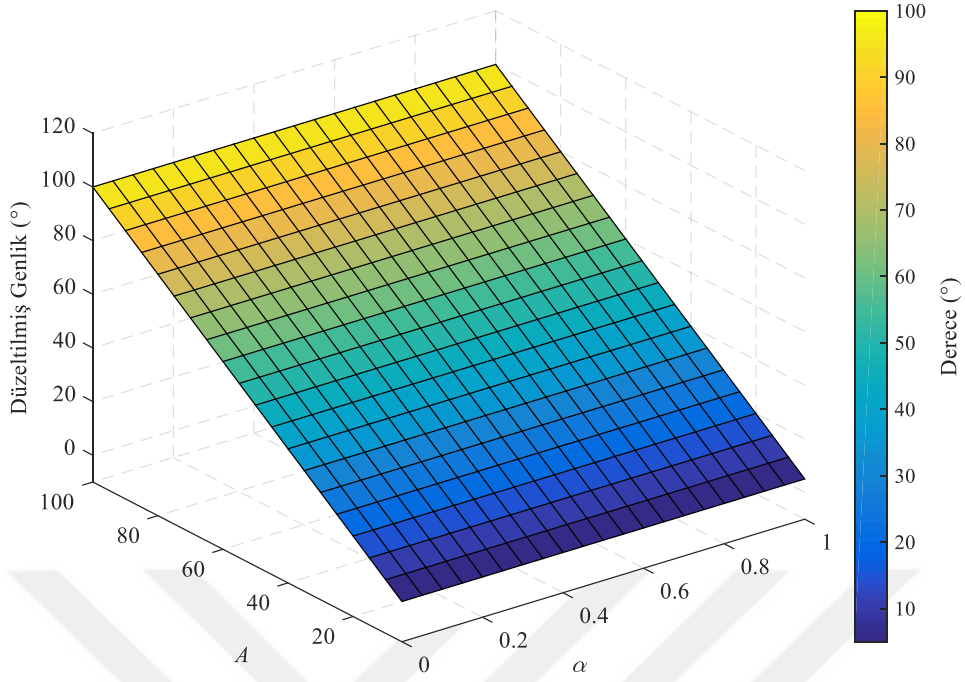


Şekil 3.22. Genliğin α ve A ile değişimi



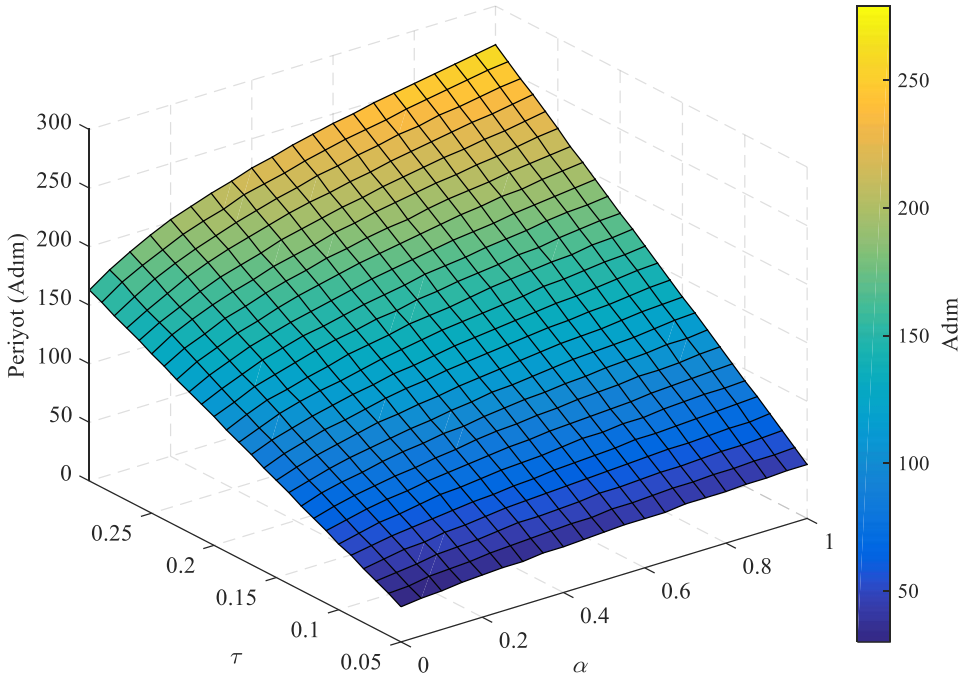
Şekil 3.23. Genlik kazancı

Düzeltilmiş genlik değerleri Şekil 3.24’de verilmiştir. Burada, genliğin sadece A ’ya bağlı hale geldiği görülmektedir.



Şekil 3.24. Düzeltilmiş genliğin değişimi

Benzer şekilde, α 'nın değişken aralığı boyunca periyot da hemen hemen doğrusal bir şekilde artarak bozulmaktadır. Şekil 3.25'de, τ 'ya bağlı periyodun α 'nın değişimine göre eğimli ve bozuk bir yüzey oluşturduğu görülmektedir.



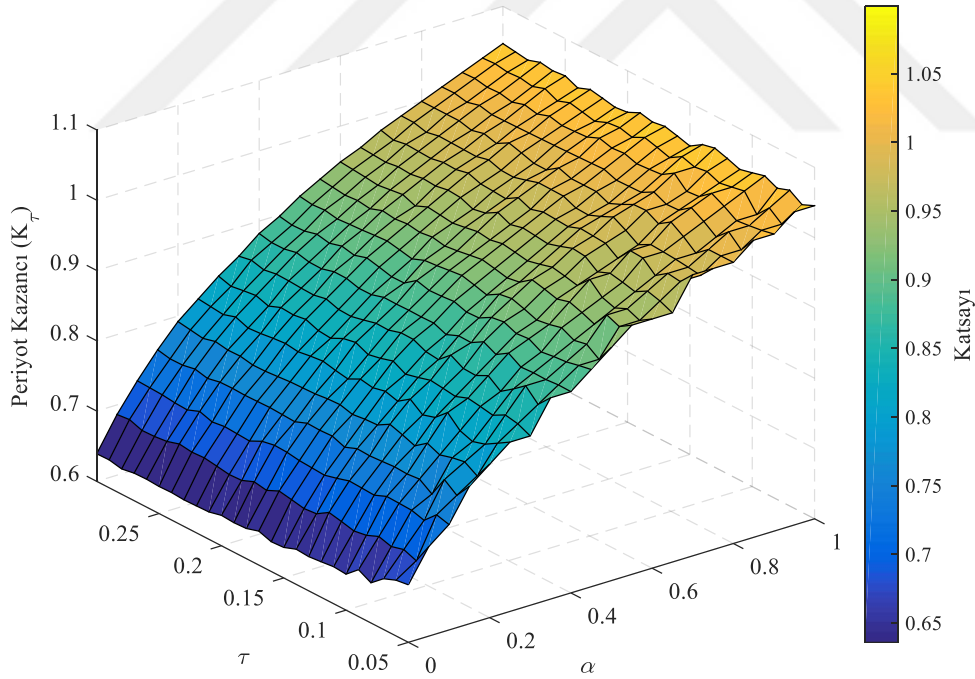
Şekil 3.25. Periyodun α ve τ ile değişimi

Bozucu etki altında kalan periyot $g(\tau, \alpha)$ olarak isimlendirilirse, $g(\tau, \alpha)$ 'nın düzeltilmiş yüzeyinin α eksenine paralel bir düzleme gelmesi gerekir. Bunun için, α 'nın değişimine bağlı τ parametresine ilave bir periyot kazancı K_T eklenmelidir. $g'(\tau, \alpha)$, τ 'nın değişimine bağlı ve α etkisinden kurtulmuş periyot olarak belirlenirse periyot kazancı aşağıdaki ifade ile bulunur:

$$K_T = \frac{g(\tau, \alpha)}{T_{osc}} \quad (3.37)$$

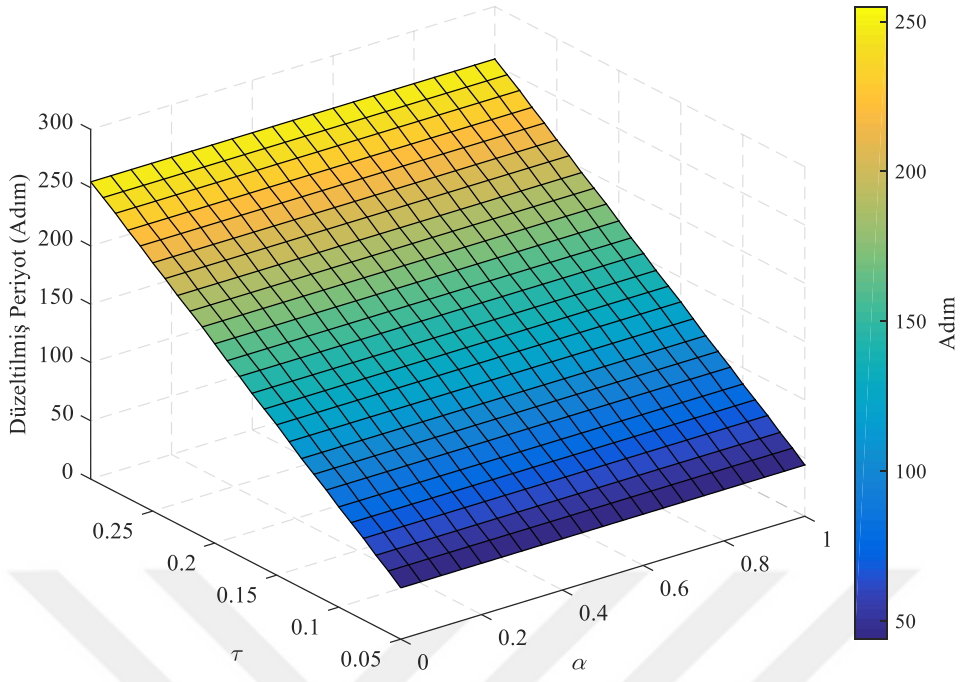
Şekil 3.26'da, Denklem (3.37) ile elde edilmiş K_T yüzeyi verilmiştir. Sonuç olarak, α etkisinden kurtulmuş periyot değerleri $g'(\tau, \alpha)$ aşağıdaki gibi bulunur:

$$g'(\tau, \alpha) = \frac{g(\tau, \alpha)}{K_T} \quad (3.38)$$



Şekil 3.26. Periyot kazancı

Düzeltilmiş genlik değerleri Şekil 3.27'de verilmiştir. Burada, periyodun sadece τ 'ya bağlı hale geldiği görülmektedir.



Şekil 3.27. Düzeltilmiş periyodun değişimi

Böylece, α 'nın değişimi τ 'ya bağlı olan osilatör çıkış periyodunu etkilememiş olur.

4. BULANIK MANTIK DENETLEYİCİLER

Gerçek hayatta karşılaşılan birçok sistem doğrusal olmayan bileşenler içerir ve geleneksel denetim yöntemleri için gerekli matematiksel modellerin elde edilmesi oldukça zordur. Ancak, bulanık mantık denetleyici tasarımı için denetlenecek sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duyulmaz. Bunun yerine, uzman bir kişi tarafından belirlenen dilsel ifadeler ve mantıksal ilişkiler ile denetim gerçekleştirilir. Bulanık mantık denetleyiciler, insan sezgisine ve düşünce yapısına bağlı davranışlara benzer şekilde sistemin denetimini gerçekleştirirler. Bu bölümde, bulanık mantık kavramı ve bulanık denetleyicilerin bileşenlerinden bahsedilmiştir.

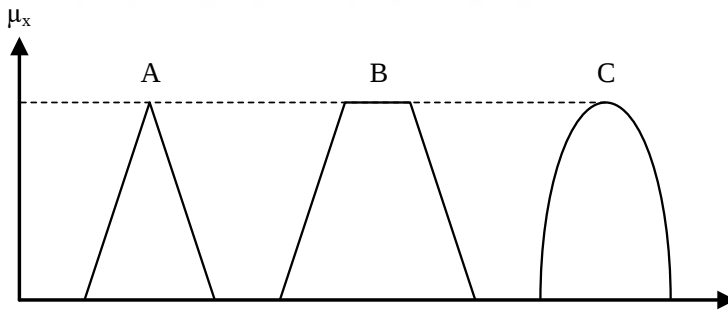
4.1. Bulanık Mantık ve Uygulama Alanları

Bulanık ifadesi, niteliği tam olarak anlaşılamayan ve net olmayan anlamına gelir. İlk kez 1965 yılında Kaliforniya Üniversitesi'nden Azeri asıllı ve Amerikalı Prof. Dr. Lotfi A. Zadeh tarafından bulunan bulanık mantık ve bulanık küme teorisi, hızla gelişerek birçok bilim adamının dikkatini çeken yeni bir konu haline gelmiştir [145]. Bulanık kümelere dayalı olan bulanık mantıkta, gerçek dünyada meydana gelen olaylara bağlı üyelik dereceleri belirlenerek insan düşüncesine özdeş işlemlerin gerçekleşmesi sağlanır. Böylece belirsiz ve kesin olmayan verilerle karmaşık sistemlerin denetimi kolayca sağlanabilir [146–148].

Bulanık mantığın insan düşüncesine benzer bir yapıda olması ve karar verebilmesi geniş bir uygulama alanına sahip olmasını sağlamıştır. Bulanık mantık; matematik, istatistik, borsa, ekonomi, bulanık karar verme ve tahmin, bulanık denetim ve yapay zeka gibi birçok araştırma alanlarında kullanılmaktadır. Özellikle matematik ve denetim alanlarının birbirinden bağımsız olmaması ile bulanık denetim oluşmuştur [145–148]. Günümüzde, denetimi bulanık mantığa dayalı olarak gerçekleştirilen sistemler çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bulanık mantık denetimin ilk uygulama alanları 1980 yılında Hollandalı bir firmanın çimento fırınlarında gerçekleştirilmiştir. 1983 yılında su arıtma sistemleri, 1988 yılında Hitachi firmasının Japonyadaki metro sistemleri için geliştirdiği bulanık denetim sistemi ve 1990 yılından sonra çamaşır makineleri gibi günlük hayatta sıkça kullanılan elektronik sistemlere dahil edilmesi ile bulanık denetim yaygın olarak kullanılmaya

başlanmıştır. Böylece, evimizdeki elektronik cihazlardan otomobillere kadar akıllı olarak isimlendirilen birçok teknolojik sistemde bulanık mantık kullanılmaktadır [146,149].

Bulanık mantığın temeli bulanık kümelerdir. Bulanık kümeler ise üyelik fonksiyonlarından oluşur ve her değişkenin durumu ifade edilirken bu üyelik fonksiyonlarına ait üyelik dereceleri kullanılır. Bu üyelik dereceleri [0-1] aralığında olur. Bulanık kümelerde bir değişken birden fazla üyelik derecesine sahip olabilir. Örneğin 90km/s hızda giden bir aracın hızı “hızlı” olarak ifade edilirse, 90km/s hızın altı “yavaş” olarak tanımlanacaktır. Bu ifadelerin böyle kabul edilmesi doğru olmadığı gibi yanlış da değildir. Çünkü bu değerler birbirine çok yakındır ve kesin olarak hızlı veya yavaş ayrımı yapmak zordur. Bu sebeple önermelerde doğru (1) ve yanlış (0) gibi kesin değerler yerine ara değerlere sahip bulanık değerleri içermesi daha doğru sonuç verecektir. Bu yaklaşım az, küçük, düşük, sık, orta, büyük ve çok gibi dilsel etiketleri kullanarak dereceli bulanık küme kavramını oluşturur. Böylece insan düşünce yapısına daha yakın sonuçlar elde edilebilir [146]. Şekil 4.1’de sırasıyla üçgen, yamuk ve çan eğrisi gibi sıkça kullanılan üyelik fonksiyonları verilmiştir. Ancak, gerek olması halinde daha farklı türde üyelik fonksiyonları da kullanılabilir.

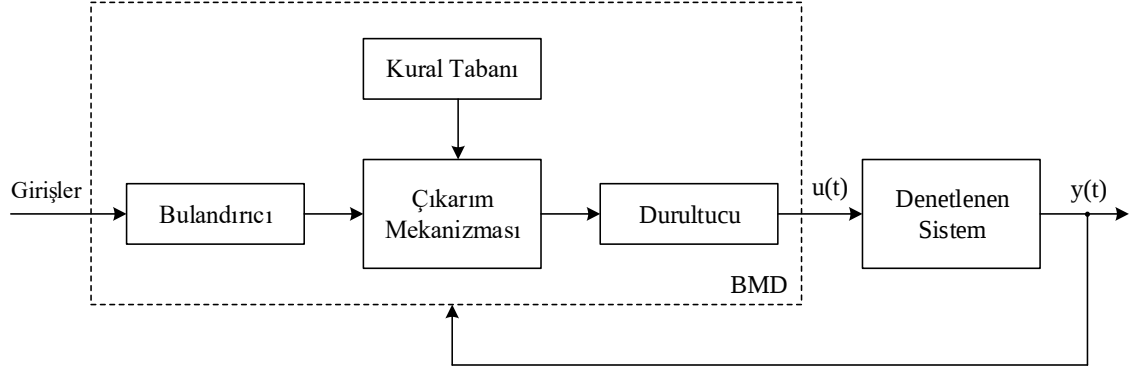


Şekil 4.1. Sıkça kullanılan üyelik fonksiyonları

Şekil 4.1’de, bir x değişkeni için X uzayında tanımlı A bulanık kümesine ait üyelik fonksiyonu, $x \in X$ için $\mu_A(x)$ şeklinde tanımlanmaktadır.

4.2. Bulanık Mantık Denetleyicilerin Yapısı

Bir bulanık mantık denetleyici yapısı bulandırıcı olan giriş birimi, kural tabanı, çıkarım mekanizması ve durultucu olan çıkış birimi olmak üzere dört temel bölümden oluşur [148]. Bu bölümleri içeren bulanık denetleyici yapısı Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Bulanık denetleyici yapısı ve denetlenen sistem

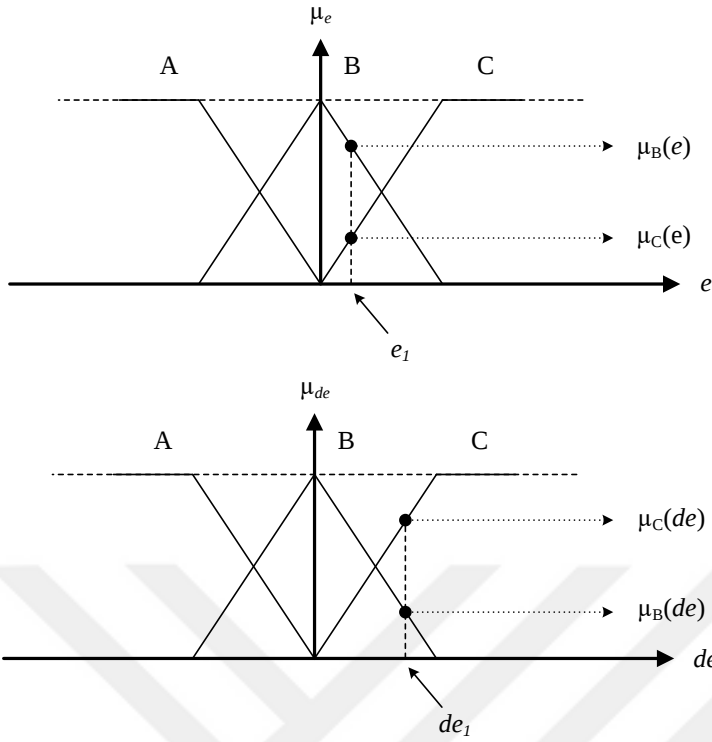
Bir bulanık mantık denetleyicinin temel amacı, sistemden istenilen referans giriş sinyali $r(t)$ için durum değişkenleri ile uygun denetim sinyallerini $u(t)$ üretmek ve bu değerleri denetlenen sisteme uygulayarak sistem çıkışını $y(t)$ referans girişe göre ayarlamaktır. Bu nedenle, bir sistemin bulanık denetleyici ile denetiminde sistemin uygun durum değişkenlerinden yararlanılarak giriş ve çıkışları belirlenir. Bir bulanık denetleyicinin giriş değişkenleri için durum değişkenlerinin hataları, türevleri ve integralleri kullanılabilir.

4.2.1. Bulandırıcı

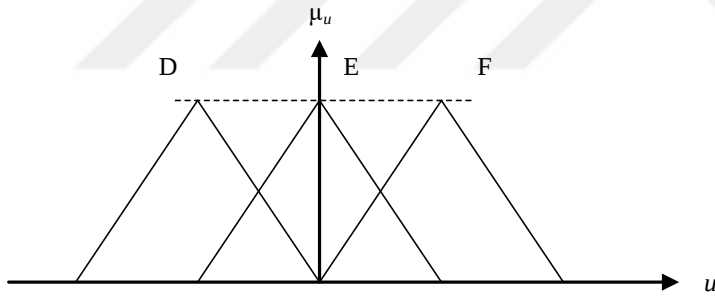
Bir bulanık denetleyicinin giriş birimi olan bulandırıcı, çıkarım mekanizmasında kullanılması için giriş değişkenlerinin ilgili bulanık kümelerdeki üyelik derecelerini hesaplar [146,149]. Örnek olarak bulanık denetleyicinin giriş değişkenleri istenilen çıkış değişkeninin hatası (e) ve hatanın türevi (de) olsun. Bu girişler için Şekil 4.3’de verilen üçgen üyelik fonksiyonları ile tanımlanan A, B ve C bulanık kümelerinin tanımlandığını varsayalım. Şekil 4.4’de ise çıkış değişkenine ait üyelik fonksiyonları verilmiş olsun. Denetleyici girişlerinin (e , de) bu üçgen üyelik fonksiyonlarındaki üyelik dereceleri Tablo 4.1’deki gibi olur:

Tablo 4.1. Örnek olarak verilen girişler için üyelik dereceleri ve üyelik fonksiyonları

Hata (e)		Hatanın türevi (de)	
Üyelik Derecesi	Bulanık Küme	Üyelik Derecesi	Bulanık Küme
$\mu_B(e)$	B	$\mu_B(de)$	B
$\mu_C(e)$	C	$\mu_C(de)$	C



Şekil 4.3. Hata ve hatanın türevi için bulanıklaştırma işlemi



Şekil 4.4. Çıkış değişkenine ait üyelik fonksiyonları

Böylece, verilen giriş değerleri ile ilgili her üyelik fonksiyonu için bir üyelik derecesi hesaplanır.

4.2.2. Kural Tabanı ve Çıkarım Mekanizması

Kural tabanı uzman kişiler tarafından denetlenen sistem hakkındaki IF-THEN şeklindeki dilsel ifadelerden oluşur. Bulanık denetleyicinin insan düşüncesine benzer şekilde çıkışlar üretmesi kural tabanı ile gerçekleşir. Kural tabanı oluşturulurken sisteme ait bütün ihtimaller dikkate alınmalıdır [147]. Tablo 4.2’de, örnek olarak verilen girişlere ait etkin kural tabanı

verilmiştir. Verilen örnek için oluşan bütün ihtimallerin sayısı dokuzdur. Bu ihtimaller aşağıda örnek olarak verilen IF-THEN yapılarından oluşur:

$$\text{IF } (e_1 \text{ is } B_e \text{ AND } de_1 \text{ is } C_{de}) \text{ THEN } (u \text{ is } D_u) \quad (4.1)$$

Burada AND operatörü çıkarım mekanizmasına ait ima işlemini temsil eder. Bu operatör yerine denetlenen sistem davranışına göre OR veya NOT operatörleri de kullanılabilir.

Tablo 4.2. Örnek olarak verilen girişler için etkin kurallar

$e \backslash de$	A	B	C
A	-	-	-
B	-	E	E
C	-	E	F

Bulanık çıkarım mekanizması insanın karar verme ve çıkarım yapma yeteneklerinin modellendiği birimdir ve burada üç temel işlem gerçekleştirilir. İlk olarak, giriş değişkenlerinin üyelik dereceleri arasında AND, OR veya NOT işlemlerinden birinin kullanılması ile her kurala ait kuralın kesinlik derecesi bulunur. Daha sonra, kuralın kesinlik derecesi ile ilgili kuralın bulanık çıkış kümesi arasındaki ima işlemi yapılır. Son olarak ima edilen bulanık çıkış kümelerinin toparlanması ile sonuca ait bulanık çıkış kümesi elde edilir. Genel olarak, AND ifadesi için minimum veya çarpma, OR ifadesi için maksimum ya da olasılık işlemi VEYA kullanılır. İma ifadesi için de minimum veya çarpma işlemleri yapılabilir. Tablo 4.2’de belirtilen dört kural için kuralların kesinlik dereceleri minimum operatörü kullanılarak aşağıda gibi elde edilir:

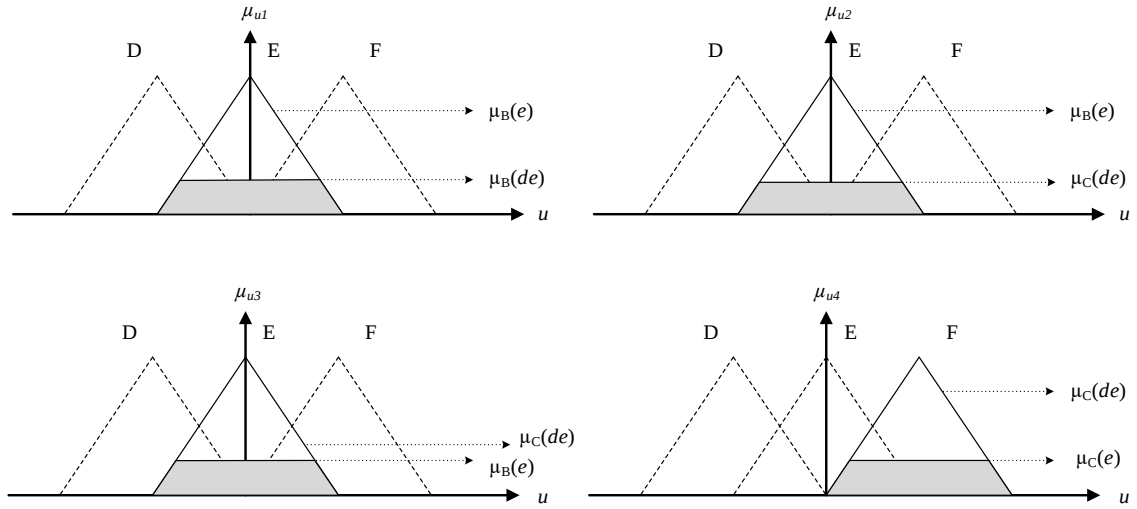
$$\text{IF } (e_1 \text{ is } B_e \text{ AND } de_1 \text{ is } B_{de}) \text{ THEN } (u \text{ is } E_u) \rightarrow \mu_{u1} = \min(\mu_B(e), \mu_B(de)) \quad (4.2a)$$

$$\text{IF } (e_1 \text{ is } B_e \text{ AND } de_1 \text{ is } C_{de}) \text{ THEN } (u \text{ is } E_u) \rightarrow \mu_{u2} = \min(\mu_B(e), \mu_C(de)) \quad (4.2b)$$

$$\text{IF } (e_1 \text{ is } C_e \text{ AND } de_1 \text{ is } B_{de}) \text{ THEN } (u \text{ is } E_u) \rightarrow \mu_{u3} = \min(\mu_C(e), \mu_B(de)) \quad (4.2c)$$

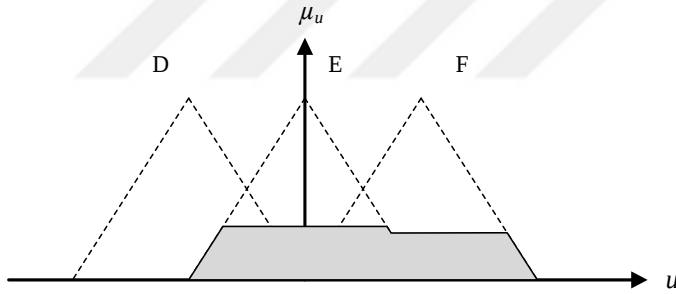
$$\text{IF } (e_1 \text{ is } C_e \text{ AND } de_1 \text{ is } C_{de}) \text{ THEN } (u \text{ is } F_u) \rightarrow \mu_{u4} = \min(\mu_C(e), \mu_C(de)) \quad (4.2d)$$

Şekil 4.5’de ise ilgili kuralların kesinlik derecelerini kullanarak ima işleminin minimum operatörü ile gerçekleştirilmesi verilmiştir.



Şekil 4.5. İlgili kuralların ima işlemi ile uygulanması

İma işleminden sonra elde edilen bulanık çıkış kümeleri için maksimum operatörü kullanılarak gerçekleştirilen toparlama işlemi sonucunda elde edilen çıkış bulanık kümesi Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6. Toparlama işlemi sonucunda oluşan çıkış bulanık kümesi

Ayrıca, toparlama işlemi için maksimum yerine toplama işlemi de kullanılabilir.

4.2.3. Durultucu

Durultucu, çıkarım mekanizmasında elde edilen sonuç bulanık kümesini kullanarak denetleyicinin sayısal çıkış değerini bulan birimdir. Durultucuda, her kural için üyelik dereceleri ile elde edilen değerler ve sonuç kuralları belirlenir ve uygun hesaplama yöntemlerinden birisi kullanılarak sayısal denetim sinyali hesaplanır. Farklı durultma yöntemleri olmasına rağmen uygulamalarda en yaygın ağırlık merkezleri yöntemi kullanılır ve aşağıdaki gibi bulunur [145,149]:

$$u^* = \frac{\int u \mu_{out}(u) du}{\int \mu_{out}(u) du} \quad (4.3)$$

Bu denklemdeki çıkış bulanık kümesi olan $\mu_{out}(u)$ fonksiyonunun integralini hesaplamak zor veya uzun zaman alabilir. Bu gibi durumlarda, ağırlık merkezleri yöntemi yerine merkezlerin ağırlıklı ortalaması yöntemi de kullanılabilir. Bu yöntemle göre denetim sinyalinin normalize edilmiş değeri aşağıdaki gibi hesaplanır [146]:

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{ui} u_i}{\sum_{i=1}^n \mu_{ui}} \quad (4.4)$$

Burada μ_{ui} i . kuralın kesinlik derecesini, u_i ise i . kuralın bulanık çıkış kümesinin merkezini verir. Bu yöntemde, doğrudan ima edilen bulanık çıkış kümeleri kullandığından toplama işlemine ihtiyaç duyulmamaktadır.

Buraya kadar anlatılan bulanık denetleyiciler standart Mamdani tipi bulanık denetleyiciler olarak tanımlanır. Bulanık denetleyicilerde sıkça kullanılan diğer bir tür ise Sugeno tipi denetleyicilerdir. Sugeno tipi bir bulanık denetleyicinin çıkışı, giriş değişkenlerinin fonksiyonları türünden ifade edilir ve kurallar aşağıdaki gibi tanımlanır [149,150]:

$$\text{IF } (x_1 \text{ is } A \text{ AND } x_2 \text{ is } B) \text{ THEN } u = f(x_1, x_2) \quad (4.5)$$

Bu denetleyicilerde durultucu birimine gerek yoktur ve çıkış doğrudan bir fonksiyon ile tanımlanır. Böylece, denetleyici çıkışı her kuralın oluşturacağı çıkışların ağırlıklı ortalaması bulunarak hesaplanabilir.

5. CARANGIFORM TÜRÜ BİYOMİMETİK ROBOT BALIK PROTOTİPİNİN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

“Üç Boyutlu Hareket Kabiliyetine Sahip Carangiform Türünde Bir Biyomimetik Robot Balığın Tasarımı ve Gerçeklemesi” başlıklı ve 114E652 nolu Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 1001 projesi kapsamında oluşturulan bu tez çalışmasında, üç boyutlu hareket kabiliyetine sahip, Carangiform türü balıklardan esinlenilerek geliştirilen, iki eklemlili biyomimetik bir robot balık prototipi üretilmiştir. Bu bölümde robot balık prototipinin tasarımı, üretimi ve gerçekleştirilmesi detaylı olarak anlatılmıştır.

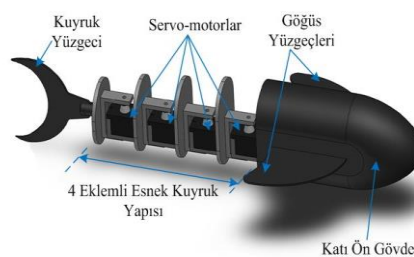
5.1. Yazarın Dahil Olduğu Çalışma Ekibi Tarafından Geçmişte Yapılan Robot Balık Çalışmaları

5.1.1. Fırat Robotic Fish Prototipi

Çalışma ekibi tarafından, 2010-2012 yılları arasında Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP), 2095 nolu proje ile desteklenen, yazarın Yüksek Lisans Tezi kapsamında Fırat Robotic Fish isimli dört eklemlili bir robot balık prototipi geliştirilmiştir [129,151,152]. Fırat Robotic Fish prototipi ile yapılan deneysel çalışmalar sonucunda robot balığın iki boyutlu ekseninde hareket kabiliyeti incelenmiştir. Bu prototip derine dalma ve suyun istenilen seviyesinde kalarak yüzmeye yeteneğine sahip değildir ve su yüzeyinde iki boyutlu ekseninde yüzebilmektedir. Yapılan bu çalışma Şekil 5.1’de verilmiştir. Şekil 5.2’de ise robot balık prototipine ait otonom yüzüş hareketleri sunulmuştur.

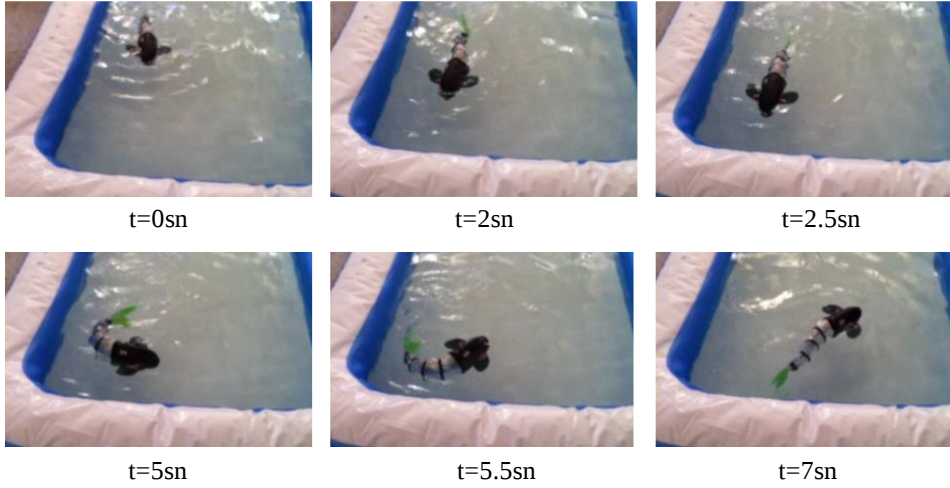


(a)



(b)

Şekil 5.1. Fırat Robotic Fish prototipi: (a) Deney ortamı, (b) Katı model görüntüsü [151].

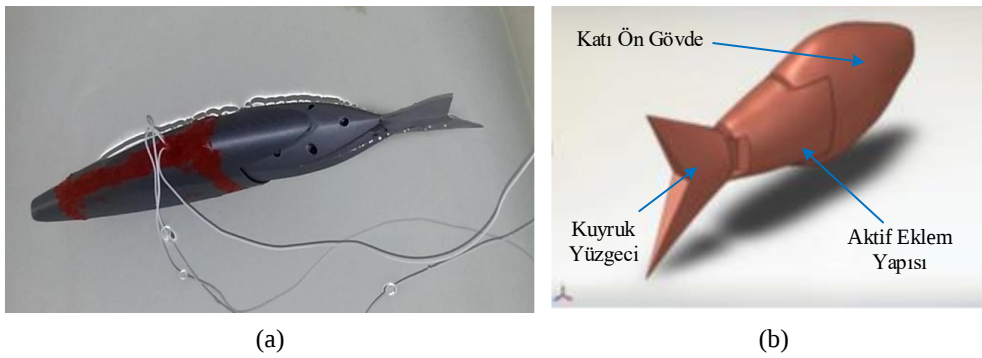


Şekil 5.2. Fırat Robotic Fish prototipinin otonom yüzme hareketleri [151].

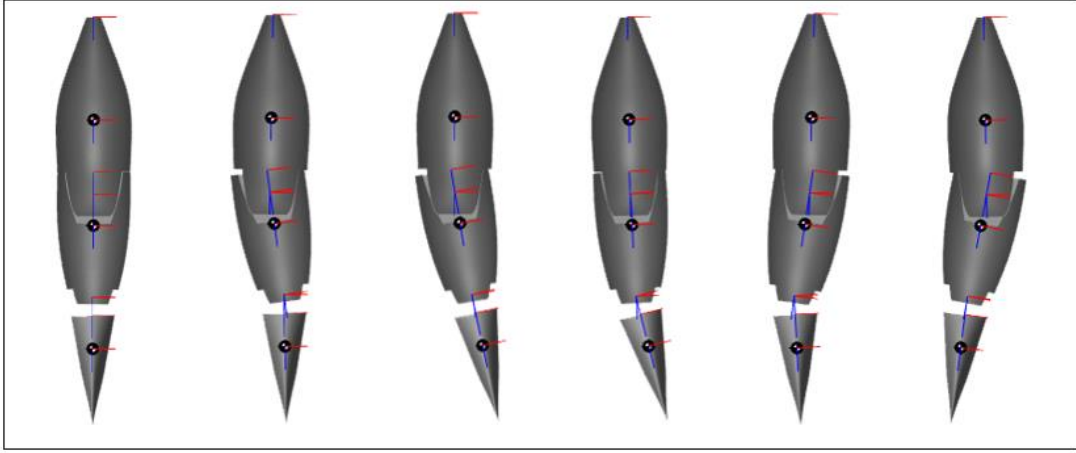
Geçmişte yapılan bu çalışma ile deneysel gözlemlere dayanarak yeni bir robot balık tasarımı ve üretimi konusunda bilimsel bir zemin oluşturulmuştur.

5.1.2. Tek Eklemli Robot Balık Prototipi

114E652 nolu TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında, çalışma ekibi tarafından, projenin birinci döneminde tek eklemli Carangiform türü biyomimetik bir robot balığın prototipi oluşturulmuştur [153]. Yapılan bu çalışma Şekil 5.3’de verilmiştir. Şekil 5.4’de ise robot balık prototipinin SimMechanics ortamında ileri yön yüzüş hareketleri sunulmuştur.



Şekil 5.3. Tek eklemli robot balık prototipi: (a) Deney ortamı, (b) Katı model görüntüsü [153].



Şekil 5.4. Tek eklemlili robot balığın ileri yön hareketleri [153].

Projenin birinci döneminde yapılan bu çalışma ile geliştirilen Carangiform türü iki eklemlili biyomimetik robot balığın üretim süreci, tahrikli kuyruk yapısı tasarımı, esnek kuyruk yapısının üretimi ve su geçirmezlik testleri gibi önemli süreçlere bir ön hazırlık oluşturulmuştur.

5.2. Carangiform Türü İki Eklemlili Robot Balık Prototipi

Gerçek balıkların biyolojik özelliklerinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi, bir robot balığın biyomimetik yaklaşımının temel kriterlerini belirlemek için oldukça önemlidir. Böylece, tasarlanan robot balığın yapısal kısıtlamaları ve sahip olması gereken biyomimetik özellikler belirlenebilir.

Balıkların birçoğu itici tahrik kuvvetlerini vücutlarını bükerek oluşan ve burundan başlayarak kuyruğa doğru genliği giderek artan yanal dalgalanma hareketleri ile sağlarlar. Bu yüzüş şekli BCF yüzme türü altında sınıflandırılır. BCF yüzüş türünde, dalgalanmalı ve salınımlı tahrik kuvvetleri oluşmaktadır. Bu kuvvetlerin dalga boyu ve genliğinin değişimine bağlı olarak BCF yüzme türü Anguilliform, Subcarangiform, Carangiform ve Thunniform olmak üzere dört alt kategoriye ayrılır. BCF türü Carangiform yüzücüler dalgalı yüzme hareketleri, yüksek hız performansı, düşük gürültü, hızlı ivmelenme ve ani dönüş yeteneği gibi önemli özelliklere sahiplerdir [128]. Bu önemli özellikler ve doğada var olan birçok balığın bu yüzme türünde hareket edebilmesi, insansız sualtı robotu olan robot balık tasarımında Carangiform türü balıkları oldukça uygun bir model haline getirir [154].

Bu bölümün devamında, 2015 yılından bu yana üzerinde çalışılarak geliştirilen “i-RoF” (Intelligent Robotic Fish, Akıllı Robot Balık) isimli biyomimetik Carangiform türü robot balık prototipinin tasarımı, üretimi ve gerçekleştirilmesi verilmiştir.

5.2.1. Tasarım Hedefleri

Tasarlanan biyomimetik robot balık prototipi için aşağıda belirtilen temel karakteristik özellikler dikkate alınmıştır:

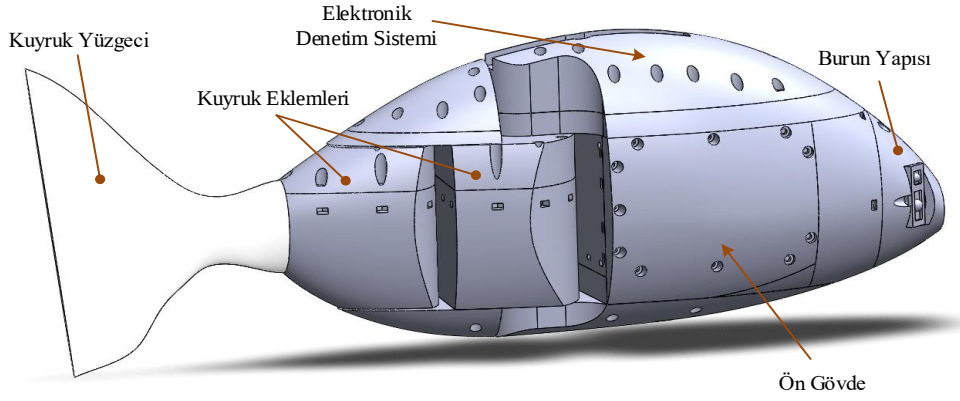
- Robot balığın Carangiform türü balıklardan esinlenilerek biyomimetik bir tasarıma sahip olması ve gerçek bir balığın yüzme hareketlerini taklit ederek yüzebilmesi gerekir.
- Robot balığın gövde yapısının hidrodinamik sürtünme kuvvetlerini azaltacak şekilde tasarlanması ve her bileşenin dış yüzeyinin suyun girdap etkisini azaltacak malzemeler ile kaplanması gerekir.
- Robot balığın birden çok öğeden oluşan bileşenlerinin modüler olması gerekir. Böylece, montajın ve arıza anında gerekli müdahalelerin oldukça kolay olması sağlanabilir.
- Mekanik bileşenlerin tamamının su geçirmez bir yapıda olması gerekmektedir. Böylece, prototipin deneysel çalışmaları su içerisinde kolayca gerçekleştirilebilir.
- Ağırlık merkezinin kaldırma merkeziyle aynı doğrultuda ve biraz aşağıda olacak şekilde belirlenmesi gerekir. Böylece, robot balığın su içerisindeki yalpalanma hareketleri 0° civarında dengelenmiş olur.
- Robot balık, su içerisinde üç boyutlu hareket etme kabiliyetine sahip olmalıdır. Bunun için robot balığın özkütlesinin 1000kg/m^3 olan suyun özkütlesine oldukça yakın olması gerekir. Böylece, robot balığın hem su içerisinde üç boyutlu hareketleri gerçekleşir hem de tahrik kuvveti uygulanmadığında robotun su yüzeyinde kalması sağlanabilir.
- Robot balık, MÖÜ ve bulanık mantık yaklaşımlarını kullanarak tasarlanan hiyerarşik ve biyomimetik bir denetim yapısına sahip olmalıdır.
- Robot balığın su içerisinde engellerden sakınarak otonom bir şekilde yüzebilmesi gerekmektedir.

5.2.2. Mekaniksel Tasarım

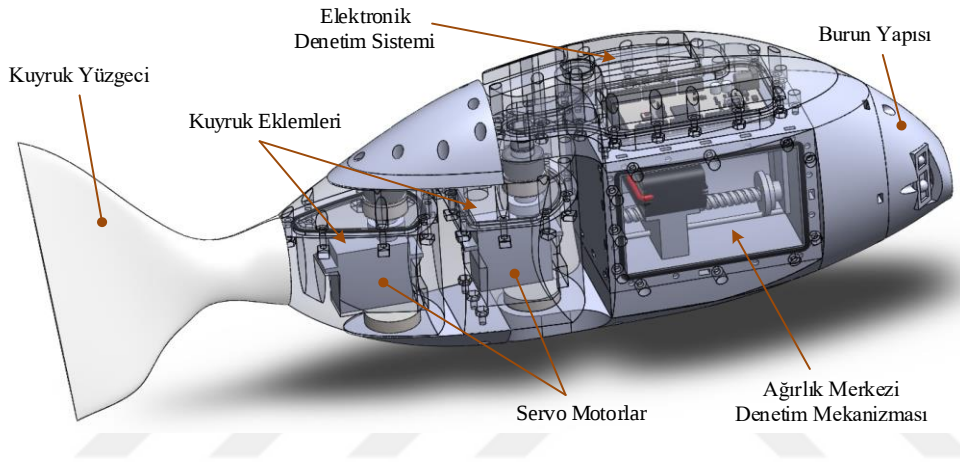
Bu tez çalışmasında, iki eklemlı kuyruk mekanizmasına sahip, BCF yüzme hareketleri ile üç boyutlu olarak otonom yüzebilen, Carangiform türü biyomimetik bir robot balık prototipi geliştirilmiştir. Robot balık prototipi baş kısmı olarak isimlendirilen sert bir ön gövde ve iki eklemlı kuyruk mekanizması olmak üzere iki bölümden oluşturulmuştur. Robot balığın sert ön gövdesi içerisinde çevresel verilerin alınabilmesi için sensörler, elektronik denetim sistemi ve su içerisindeki üç boyutlu yüzme hareketlerini sağlayan ağırlık merkezi denetim mekanizması bulunmaktadır. İki eklemlı kuyruk mekanizması robot balığın esnek kuyruk yapısını oluşturmaktadır. Birbirine seri bir zincir yapısı şeklinde bağılı olan eklemler ile hareket için gerekli tahrik kuvveti üretilir. Kuyruk mekanizmasındaki her eklem için yüksek güçlü birer servo motor kullanılmıştır. İkinci eklemin sonunda ise esnek bir kuyruk yüzgeci sabit olarak mesnetlenmiştir. Robot balığın mümkün olduğunca çok sayıda eklem yapısına sahip olması, gerçek balık hareketlerinin daha kolay elde edilebilmesini sağlar. Ancak, geliştirilen iki eklemlı kuyruk mekanizması ile daha basit ve uygulanabilirliği yüksek bir tasarım sağlanmıştır. Suyun kaldırma kuvveti ile robot balığın ağırlığı arasındaki dengenin istenilen şekilde sağlanabilmesi için bütün bileşenlerin prototip üzerindeki dağılımı dikkatli bir şekilde ve simetrik olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, robot balığa ait her bir bileşen ve montaj yapısı Şekil 5.5’de verilen Carangiform türü gerçek bir sazan balığının biyolojik yapısı dikkate alınarak tasarlanmıştır. Şekil 5.6’da ise geliştirilen robot balık prototipinin mekaniksel yapısı verilmiştir.



Şekil 5.5. Carangiform türü koi sazan balığı



(a)



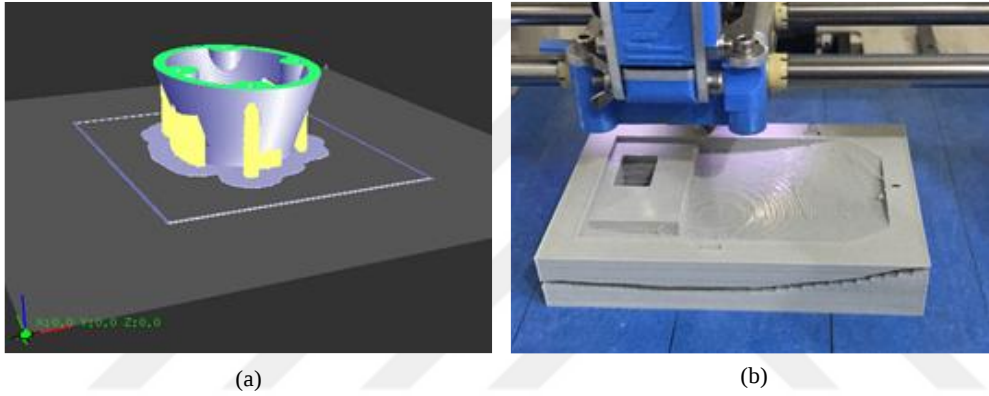
(b)

Şekil 5.6. Tasarlanan iki eklemlili Carangiform türü robot balık prototipi: (a) Prototip modeli, (b) Prototipin iç yapısı

Robot balığın tüm bileşenleri birbiriyle orantılı ölçülerde tasarlanmış ve her bileşenin üç boyutlu katı modeli SolidWorks ortamında hazırlanmıştır. Üretim aşamasında, hazırlanan katı modellerin STL dosya formatları Voxelizer programına aktarılmıştır. Bu dosyalar Voxelizer ortamında voksel formatına dönüştürülmüş ve Şekil 5.7.a’da gösterildiği gibi katman, baskı ve destek noktası ayarları yapılmıştır. Tasarım aşaması tamamlanan bileşen modelleri G koduna dönüştürülerek, üç boyutlu baskı teknolojisi ile Zmorph yazıcıda 1.75mm çapında Polilaktik Asit Termoplastik Polyester (PLA) olan biyoplastik kullanılarak üretilmiştir. Üretim aşamasına ait görüntü Şekil 5.7.b’de verilmiştir. Robot balığın esnek kuyruk yüzgeci ise PLA’dan farklı olarak oda sıcaklığında donan (Room Temperature Vulcanizing, RTV-2) beyaz renkli kalıp silikonu kullanılarak üretilmiştir.

Üç boyutlu baskı teknolojisi ile üretilen her parçada oluşan mikron gözeneklerin tamamen kapanması ve prototipin gövde yapısının hidrodinamik sürtünme kuvvetlerini azaltarak

suyun girdap etkilerinden daha az etkilenecek bir yapıda olması için tüm parçalar epoksi reçine ile kaplanmıştır. Prototipin sızdırmazlık özelliğini sağlamak için montaj esnasında katı parçaların birleşim yüzeyleri arasında O-ring sızdırmazlık elemanları ve gres yağı kullanılarak sıvı conta ile yalıtımı yapılmıştır. Prototip bileşenlerinin montajı için M3 imbus başlı paslanmaz çelik civata ve somunlar kullanılmıştır. Civata yataklarında meydana gelebilecek su sızıntılarını önlemek için bu yatak boşlukları sızdırmazlık macunu ile kaplanmıştır. Ayrıca, üretim ve montaj sırasında oluşabilecek kılcal çatlak ve boşluklardan kaynaklanan su sızıntılarını önlemek için prototipin dış yüzeyi montaj tamamlandıktan sonra sentetik spreyci boya ile boyanmıştır.

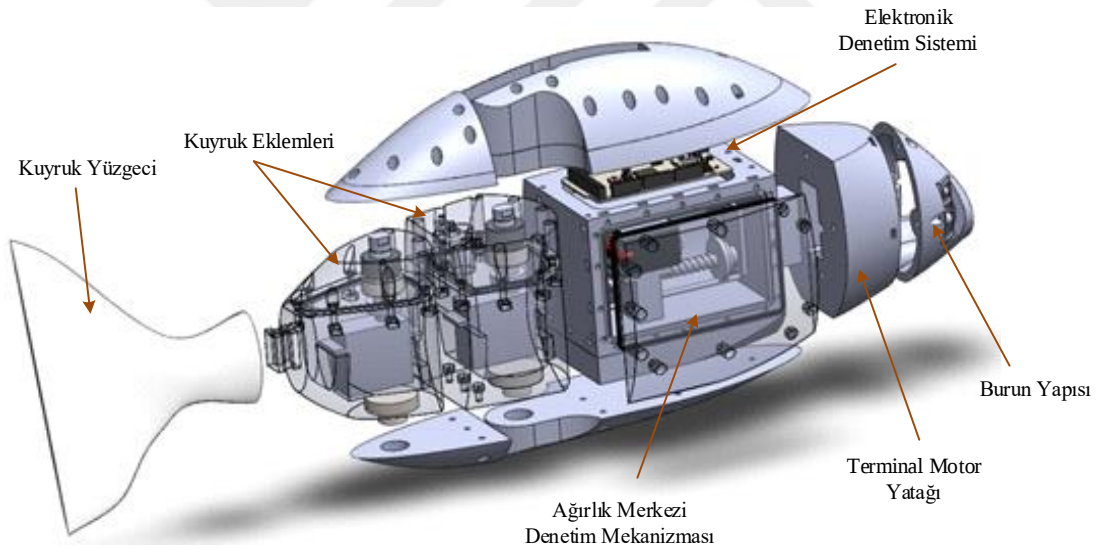


Şekil 5.7. Bileşenlerin üretim aşamaları: (a) Voxelizer ortamında katı modellerin işlenmesi, (b) Bileşenlerin Zmorph yazıcı ile üretimi

Robot balığın su içerisindeki üç boyutlu hareketlerini gerçekleştirebilmesi için prototip içerisinde sabitlenen bir ağırlık merkezi denetim mekanizması tasarlanmıştır. Geliştirilen robot balık hem su içerisinde otonom olarak yüzebilmekte hem de kullanıcının gönderdiği komutlar ile istenilen davranışı yapabilmektedir. Robot balık ile kullanıcı bilgisayarı arasındaki kablosuz haberleşme sistemi için kısa mesafe radyo frekansı teknolojisi olan Bluetooth 2.0 bağlantısı kullanılmıştır ve kablosuz haberleşme mesafesi yaklaşık olarak 10m'dir. Ayrıca, prototipin programlama bağlantısı evrensel seri veriyolu (Universal Serial Bus, USB) ile yapılmaktadır. Robot balık su içerisinde hareket ederken ortamda bulunan statik ve/veya dinamik engelleri algılayabilmesi gerekmektedir. Bunun için ön gövdenin sol, sağ ve ön bölümlerinde üç adet Sharp kızılötesi mesafe sensörü kullanılmıştır. Prototipin yüzüşü anında eşzamanlı olarak açısal ve doğrusal konum, hız, ivme ile irtifa ve sıcaklık verilerinin elde edilebilmesi için üzerinde bir adet Prop Shield 10-SD IMU hareket sensörü bulunmaktadır. Tahrik kuvvetlerini sağlayan servo motorların ve elektronik denetim

sisteminin enerjisi için 7.4V Lityum Polimer (Li-Po) şarj edilebilir batarya kullanılmıştır. Robot balık prototipinin su içerisindeki ortalama çalışma süresi ise tam şarjda yaklaşık olarak 30dk'dır.

Robot balık modüler olarak tasarlanan birçok bileşenden oluşmaktadır ve bu bileşenler Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Prototipin sert ön gövdesi ana terminal bölümü, elektronik denetim sisteminin bulunduğu üst terminal bölümü, iki eklemlili kuyruk mekanizmasının birinci eklem alt milinin yataklandığı alt birinci eklem yatağı terminal bölümü, ağırlık merkezi denetim mekanizmasının tahrik kuvvetini sağlayan servo motorun yataklandığı terminal motor yatağı ve çevresel engellerin algılanması için kullanılan sensörlerin bulunduğu burun bölümü olmak üzere beş ana bölümden oluşmaktadır. Ayrıca ana terminal bölümünde, tasarlanan ağırlık merkezi denetim mekanizması, batarya ve elektronik güç dağıtım sistemi bulunmaktadır. Üst terminal bölümü aynı zamanda birinci eklemin üst eklem yatağı olarak da kullanılmaktadır.



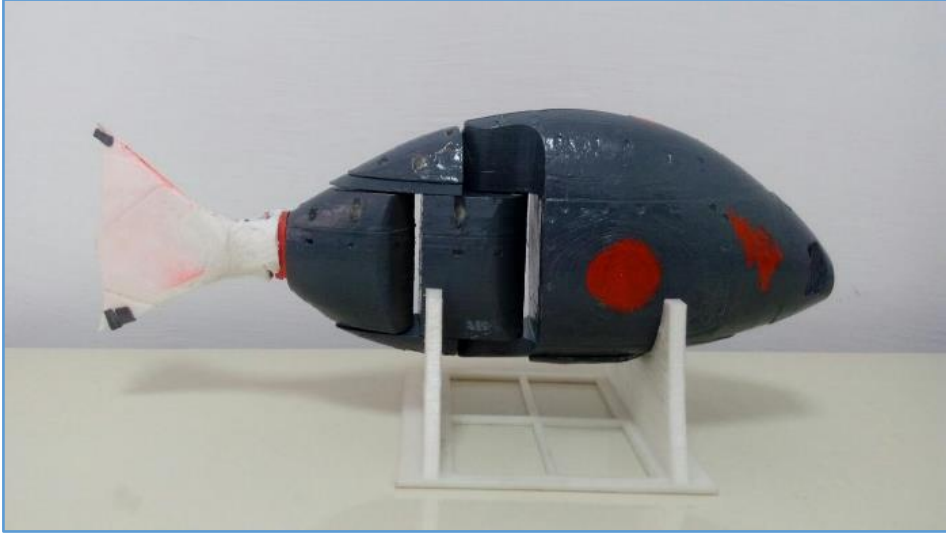
Şekil 5.8. Robot balık prototipinin bileşenleri

Robot balığın itici tahrik kuvvetini üreten esnek kuyruk yapısı iki eklemlili kuyruk mekanizması ve esnek kuyruk yüzgecinden oluşmaktadır. Her eklemden birer adet Hitec RC (Radio Control) servo motor kullanılmıştır. Bu motorlar eklem motor yataklarına sabitlenmiştir ve motor yatakları üst mil yatakları ile kapatılmıştır. Esnek kuyruk yüzgeci ise ikinci eklem motor yatağına sabitlenmiştir.

Tablo 5.1'de, geliştirilen robot balık prototipinin teknik özellikleri verilmiştir. Robot balığa ait fotoğraf görüntüsü ise Şekil 5.9'da gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Robot balık prototipinin teknik özellikleri

Parametreler	Özellikler
Uzunluk	~ 500mm
Genişlik	~ 76mm
Yükseklik	~ 215mm
Toplam kütle	~ 3.1kg
Eklem adedi	2
Üretim malzemesi	PLA
Üretim teknolojisi	Üç boyutlu baskı
Eklem yapısı	Servo motor (29kg.cm, 7.4V)
Sızdırmazlık malzemeleri	O-ring Gres yağı Epoksi reçine Sızdırmazlık macunu Sıvı conta Kauçuk conta Keçe Sentetik spreyl boya
Ağırlık merkezi tahrik sistemi	Tam tur servo motor (12kg.cm, 7.4V)
Ağırlık merkezi denetim mekanizması	Vidalı mil-somun, kurşun
Sensörler	10-SD IMU Kızılötesi mesafe sensörleri
Batarya	Li-Po şarj edilebilir batarya (7.4V, 1350mAh)
Ortalama çalışma süresi	~ 30dk
Yüzüş yeteneği	Otonom, kullanıcı denetimli
Kablosuz haberleşme	Bluetooth
Programlama bağlantısı	USB
Hareket kabiliyeti	Üç boyutlu

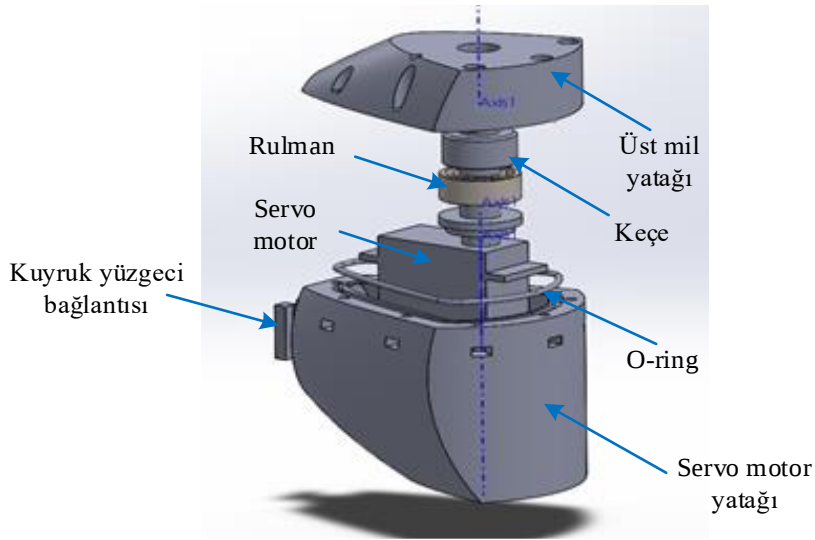


Şekil 5.9. Geliştirilen robot balık prototipinin görünümü

Robot balık prototipi yaklaşık olarak 500mm uzunluğunda, 76mm genişliğinde ve 215mm yüksekliğindedir. Prototipin kütlesi ise yaklaşık olarak 3.1kg'dır.

5.2.2.1. İki Eklemlı Kuyruk Mekanizması

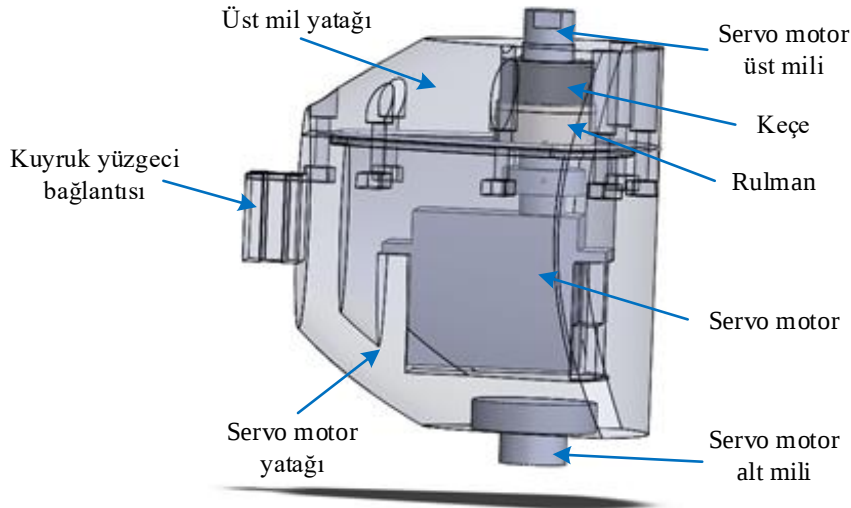
Robot balığın su içerisindeki hareketleri için gerekli tahrik kuvveti, iki eklemlı kuyruk mekanizması ile sağlanmaktadır. Her eklem birer adet servo motor, servo motor yatağı ve üst mil yatağı olmak üzere üç temel bileşenden oluşturulmuştur. Şekil 5.10'da, ikinci eklem için tasarlanan mekaniksel yapı verilmiştir.



Şekil 5.10. İkinci eklemin mekaniksel yapısı

Eklemlerin tahrik kuvvetini üretmesi için kullanılan her servo motor, motor yataklarına sabitlenmiş ve dönme hareketinin aktarılması için motor dişli miline montajlanan bir alüminyum 25T üst mil tasarlanmıştır. Motor üst milinin dönme hareketini kendi dikey eksenine doğrultusunda gerçekleştirebilmesi ve bu hareket anındaki sızdırmazlığın sağlanabilmesi için üst mil yatağında bir adet sızdırmazlık keçesi ve bir adet tek sıralı sabit bilyalı rulman yataklanmıştır. Ayrıca, döner yapıdaki üst milin su sızdırmazlık özelliğinin artırılması için mil ile rulman arasında gres yağı kullanılmıştır.

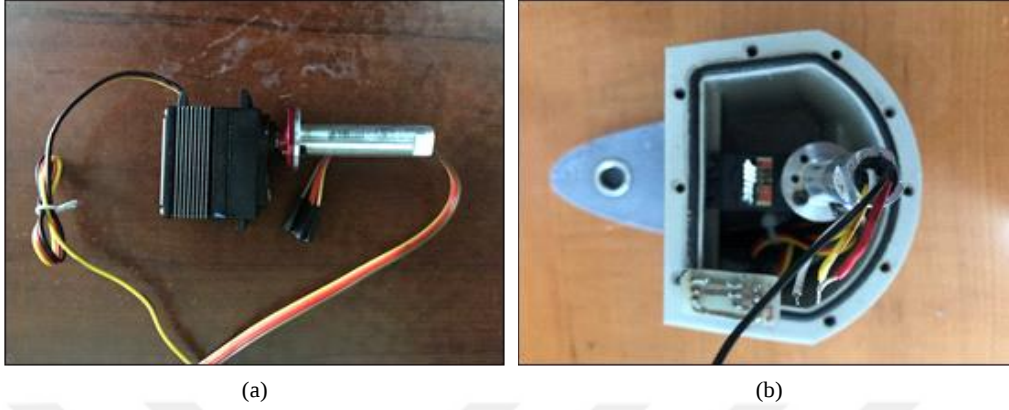
Servo motor yatağı ile üst mil yatağının su sızdırmazlık özelliğini sağlayacak şekilde montajlanması gerekmektedir. Bunun için servo motor yataklarında bulunan civata yataklarından sonra O-ring kanalları tasarlanmış ve bu kanallara gres yağı ile birlikte O-ring'ler yerleştirilmiştir. Sızdırmazlık özelliğinin artırılması için motor yatağı ile üst mil yatağının birleşim yüzeyleri ise sıvı conta ile kaplanmıştır. Montaj için kullanılan civata yatakları üst mil yatağında, civatanın sıkıştırılması için kullanılan somun yatakları ise motor yatağında bulunmaktadır. Aynı zamanda, eklemlerin serbest dönme hareketini gerçekleştirebilmesi için motor milinin dikey doğrultusunda ve motor yatağının alt bölümünde bir servo motor alt mili bulunmaktadır. Şekil 5.11'de, ikinci eklemin tamamlanmış montaj yapısı verilmiştir.



Şekil 5.11. İkinci eklemin montaj yapısı

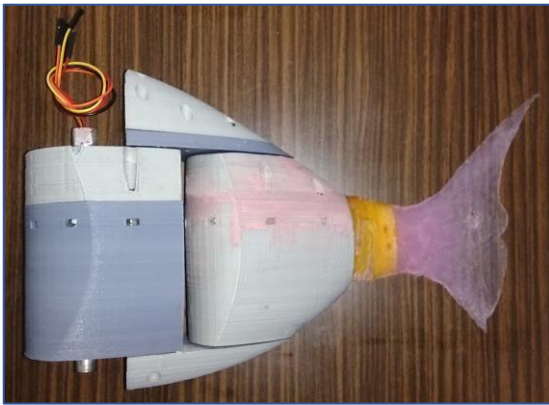
Servo motorların elektriksel kablo bağlantıları motor üst mili içerisinde bulunan kablo kanallarından geçmektedir. Bu kablo kanallarında oluşabilecek su sızıntılarını önlemek için

kanalın üst bölümü kauçuk conta ile kapatılmıştır. Şekil 5.12’de, birinci eklemin servo motor üst mili ve motor yatağı montaj görünüşleri gösterilmiştir.



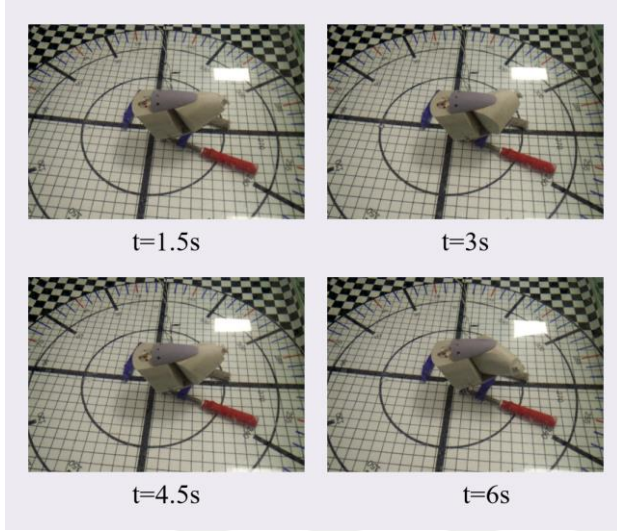
Şekil 5.12. Birinci eklemin montajı: (a) Tasarlanan servo motor üst milinin montajı, (b) Motor yatağı montaj görünümü

Montajı tamamlanan eklemlerin birbirine seri bir zincir yapısı ile birleştirilmesi gerekmektedir. Esnek kuyruk yüzgeci ikinci eklem motor yatağında bulunan bağlantı noktasına sabitlenmiştir. İkinci eklem yapısı ise birinci eklemin üzerinde sabitlenen alt ve üst ikinci eklem yataklarına montajlanmıştır. Ayrıca, ikinci eklemin elektriksel kablo bağlantıları üst ikinci eklem yatağının içerisinde bulunan kanaldan geçerek birinci eklem motor yatağına aktarılmaktadır. Burada, her iki servo motorun elektriksel kablo bağlantıları bir servo-port elektronik devre kartı ile birleştirilerek birinci eklemin üst mili içerisindeki kanal aracılığıyla ön gövdede bulunan elektronik denetim sistemine aktarılmaktadır. Alt ve üst birinci eklem yatakları ise robot balığın ön gövdesinde bulunmaktadır. Montajı tamamlanan iki eklemlilik kuyruk mekanizması Şekil 5.13’de gösterilmiştir.



Şekil 5.13. Montajı tamamlanan iki eklemlilik kuyruk mekanizması

Yukarıda bahsedilen montaj ve sızdırmazlık aşamalarının başarılı bir şekilde tamamlandığını sınamak için iki eklemlili kuyruk mekanizması Şekil 5.14’de gösterildiği gibi içi su dolu bir deney havuzunda 6 saat boyunca çalıştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmadan önce ve sonra kuyruk mekanizmasının kütlesi ölçülmüştür. Her iki durumda da yapılan ölçümlerin birbirine neredeyse eşit olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.14. İki eklemlili kuyruk mekanizmasının su içerisinde çalışma testi

İki eklemlili kuyruk mekanizmasının esnek kuyruk yüzgecini üretmek için üç boyutlu baskı teknolojisi ile Şekil 5.15.a’da verilen kuyruk yüzgeci dış kalıbı tasarlanmıştır. Dış kalıp içine dökülen RTV-2 beyaz renkli kalıp silikonu ve silikon içerisine yerleştirilen kuyruk yüzgeci bağlantı parçası ile Şekil 5.15.b’de verilen esnek kuyruk yüzgeci üretilmiştir.



Şekil 5.15. Esnek kuyruk yüzgecinin üretimi: (a) Dış kalıplar, (b) Esnek kuyruk yüzgeci

İki eklemlı kuyruk mekanizmasının gerçekleştirilmesi ile Denklem (5.1)'de tanımlanan sinüzoidal eklem açılarının elde edilebilmesi için gerekli mekanik yapı tamamlanmıştır.

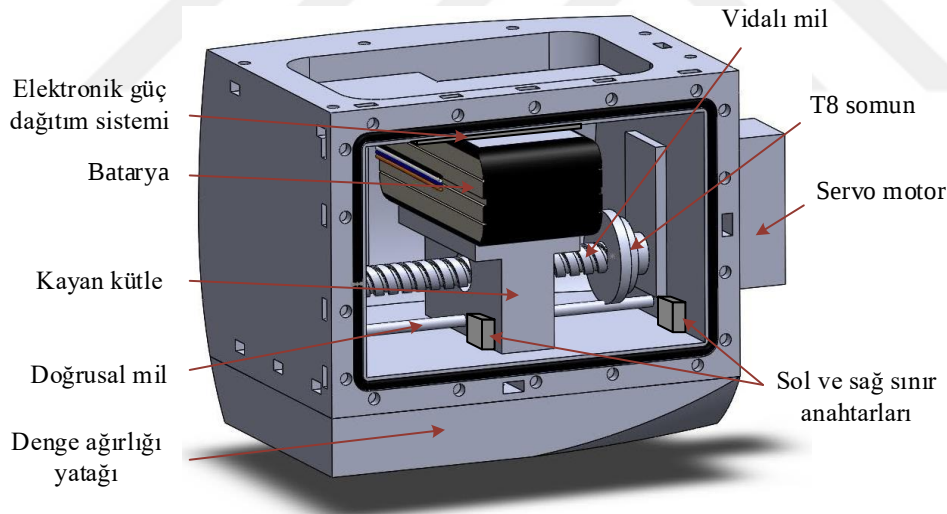
$$\theta_1(t) = A_1 \sin(2\pi ft \pm \varphi_1) \quad (5.1a)$$

$$\theta_2(t) = A_2 \sin(2\pi ft \pm \varphi_2) \quad (5.1b)$$

Burada A_1 ve A_2 birinci ve ikinci eklem açılarının genlik değerlerini, f kuyruğun çırpınma frekansını, φ_1 ve φ_2 ise birinci ve ikinci eklem açılarının faz farklarını tanımlamaktadır.

5.2.2.2. Ağırlık Merkezi Denetim Mekanizması

Robot balığın su içerisindeki üç boyutlu hareketlerinin gerçekleştirilebilmesi için tasarlanan ağırlık merkezi denetim mekanizmasının mekaniksel yapısı şekil 5.16'da verilmiştir.

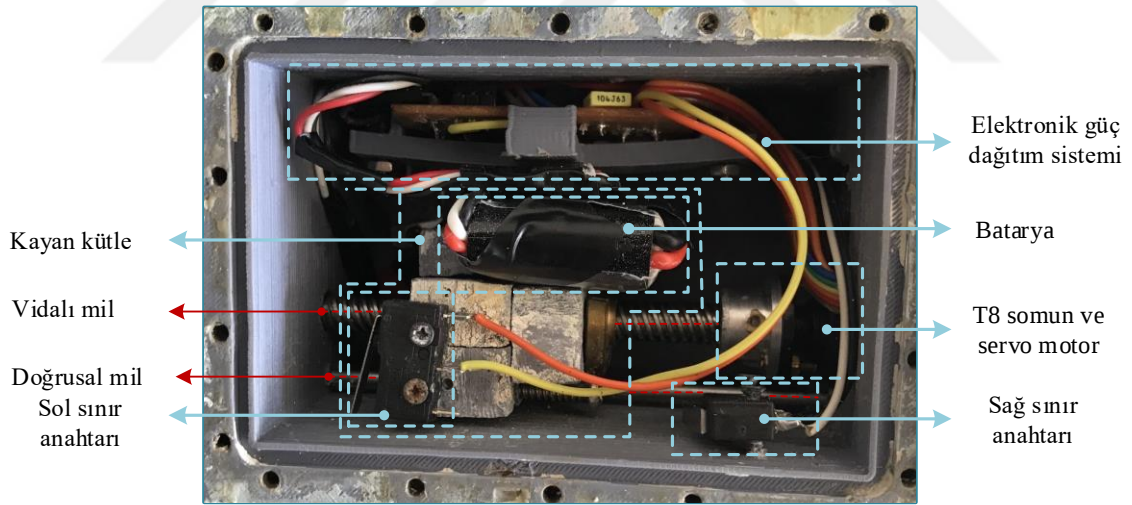


şekil 5.16. Ağırlık merkezi denetim mekanizmasının mekaniksel yapısı

Ön gövdenin ana terminal bölümünde bulunan ağırlık merkezi denetim mekanizması ile üretilen tahrik kuvveti robot balığın y ekseninde dönme hareketlerini gerçekleştirerek balıkların önemli yüzme yeteneklerinden biri olan yukarı/aşağı hareketin robot balık tarafından yapılabilmesini sağlamaktadır. Tasarlanan bu mekanizma temel olarak x ekseninde hareket eden bir kütle, bu kütlenin mekanik bileşenleri ve bir RC servo motordan oluşmaktadır. Yatay x eksen robot balığın burnu ile aynı doğrultuda bulunmaktadır. Ağırlık

merkezinin değişimini sağlayan hareketli kütle prizmatik bir kurşun tabla ve bu tablanın üzerine sabitlenen bir adet bataryadan oluşur. Kurşun tabla ve bataryanın kütleleri sırasıyla 300gr ve 90gr'dır. Bu kütle yapısının tahrik kuvvetini üretmek için bir adet tam tur RC servo motor kullanılmıştır ve terminal motor yatağı ile ana terminal arasında sabitlenmiştir. Kurşun tablanın hareketini sağlamak için servo motor dişli milinde montajlanmış T8 vidalı mil ve somun sistemi kullanılmıştır. Servo motorun dönme hareketi vidalı mil ile doğrusal harekete dönüştürölmektedir. Tablanın hareketi esnasında oluşabilecek yalpalanma hareketlerini önlemek için vidalı mil ile aynı doğrultuda sabit bir doğrusal mil kullanılmıştır.

Kurşun tablanın x eksenindeki doğrusal hareketinin sınırlarını belirlemek için sol ve sağ tarafta olmak üzere iki adet sınır anahtarı kullanılmıştır. Sol sınır anahtarı hareketli kurşun tablaya, sağ sınır anahtarı ise ters yöndeki ana terminal bölümüne sabitlenmiştir. Bataryanın bağlı olduğu ve gerilim seviyelerinin belirlendiği elektronik güç dağıtım kartı ise hareketli kütlenin üzerinde ana terminal bölümünde sabit olarak bulunmaktadır. Şekil 5.17'de, robot balığın ana terminal bölümü ve içerisinde bulunan ağırlık merkezi denetim mekanizması verilmiştir.



Şekil 5.17. Geliştirilen ağırlık merkezi denetim mekanizmasının görünümü

Ana terminal bölümünün üstünde elektronik denetim sisteminin yerleştirildiği ve birinci eklem üst milinin yataklandığı üst terminal bileşeni bulunmaktadır. Üst terminal ile ana terminal arasında elektronik kablo bağlantılarının aktarılması için bir kablo kanalı oluşturulmuştur. Bu iki parça arasındaki sızdırmazlığın sağlanması için birleşim yüzeyleri sıvı conta ile kaplanmıştır. Ana terminal bölümünün sızdırmazlığını sağlamak için civata yataklarından sonra O-ring kanalı bulunmaktadır. Bu kanala gres yağı ile birlikte O-ring

yerleştirilmiştir. Ana terminal bölümü ile temas eden diğer bileşenlerin yüzeyleri de sızdırmazlığın artırılması için sıvı conta ile kaplanarak montajlanmıştır.

Robot balığın ağırlık merkezinin kaldırma merkeziyle aynı doğrultuda ve biraz aşağıda olması gerekmektedir. Bunun için, ana terminal bölümü ile alt birinci eklem yatağı arasında bulunan denge ağırlığı yatağında 120gr kütlesi olan kurşun bulunmaktadır. Bu denge ağırlığı yapısı ile robot balık su içerisinde hareket ederken dikey doğrultudaki denge sağlanmıştır ve yalpalanma hareketleri 0° civarında olmuştur. Ayrıca robot balık prototipi, özkütlesi suyun özkütlesi olan 1000kg/m^3 'e oldukça yakın olacak şekilde yaklaşık 998kg/m^3 olarak tasarlanmıştır. Böylece, robot balığın hem su içerisinde üç boyutlu hareketlerinin kolayca gerçekleşmesi hem de tahrik kuvveti uygulanmadığı anda robotun su yüzeyine geri gelmesi sağlanmıştır. Denklem (5.2)'de, robot balık hacminin istenilen özkütleyle göre belirlenmesi için gerekli ifade verilmiştir.

$$\Delta_f \cong \frac{m}{\rho_f} \rightarrow \rho_f \cong 998\text{kg} / \text{m}^3 \quad (5.2)$$

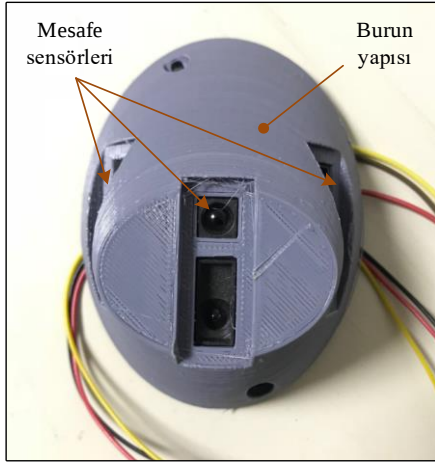
Burada m robot balığın kütlesi ve Δ_f robot balığın hacmini tanımlar. Tasarlanan ağırlık merkezi denetim mekanizması ile üretilen tahrik kuvvetinin oluşturacağı moment ise aşağıdaki ifade ile tanımlanabilir:

$$\tau_x = g m_x (l_x \sin(\phi) \sin(\theta) - h_x \sin(\phi) \cos(\theta)) \quad (5.3)$$

Bu denklemde g yerçekimi ivmesini, l_x kütlelerin x ekseninde aldığı yolu, h_x hareketli kütle merkezinin hareket merkezine olan uzaklığını, θ dikey hareketi gerçekleştiren dalma (yunuslama) açısını ve ϕ yalpalanma açısını temsil etmektedir.

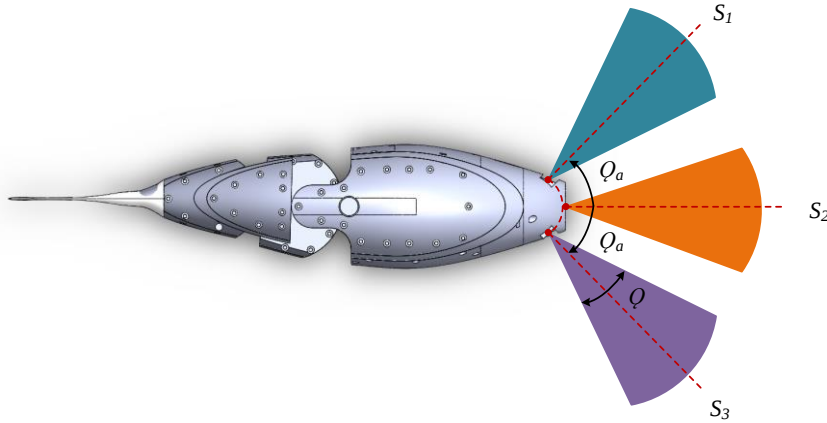
5.2.2.3. Robot Balığın Burun Tasarımı

Robot balığın su içerisinde engellerden sakınarak otonom bir şekilde yüzebilmesi için prototipin ön gövdesinde yatay eksene dik olarak birbirine paralel şekilde yerleştirilmiş sensörlerin bulunduğu bir burun yapısı tasarlanmıştır. Şekil 5.18'de verilen robot balığın burun yapısı sol, sağ ve ön bölüm olmak üzere üç görüş mesafesine sahiptir. Her bölümde bir adet Sharp kızılötesi mesafe sensörü bulunmaktadır.



Şekil 5.18. Robot balığın tasarlanan burun yapısı

S_1 , S_2 ve S_3 sırasıyla sol, ön ve sağ bölümdeki mesafe sensörleri olmak üzere her sensörün doğrusal ölçüm aralığı 6-80cm'dir. Robot balık prototipinin deneysel çalışmalarda kabul edilebilir aralıklarda engelleri belirleyebilmesi için bu sensörlerin ölçüm aralığı 6-60cm olarak belirlenmiştir. Ön sensörün konumu x eksenine aynı doğrultuda merkezlenerek sol ve sağ burun sensörleri, ön sensör ile 45° 'lik açısal aralıklar (Q_a) ile konumlandırılmıştır ve bu yapı Şekil 5.19'da gösterilmiştir.

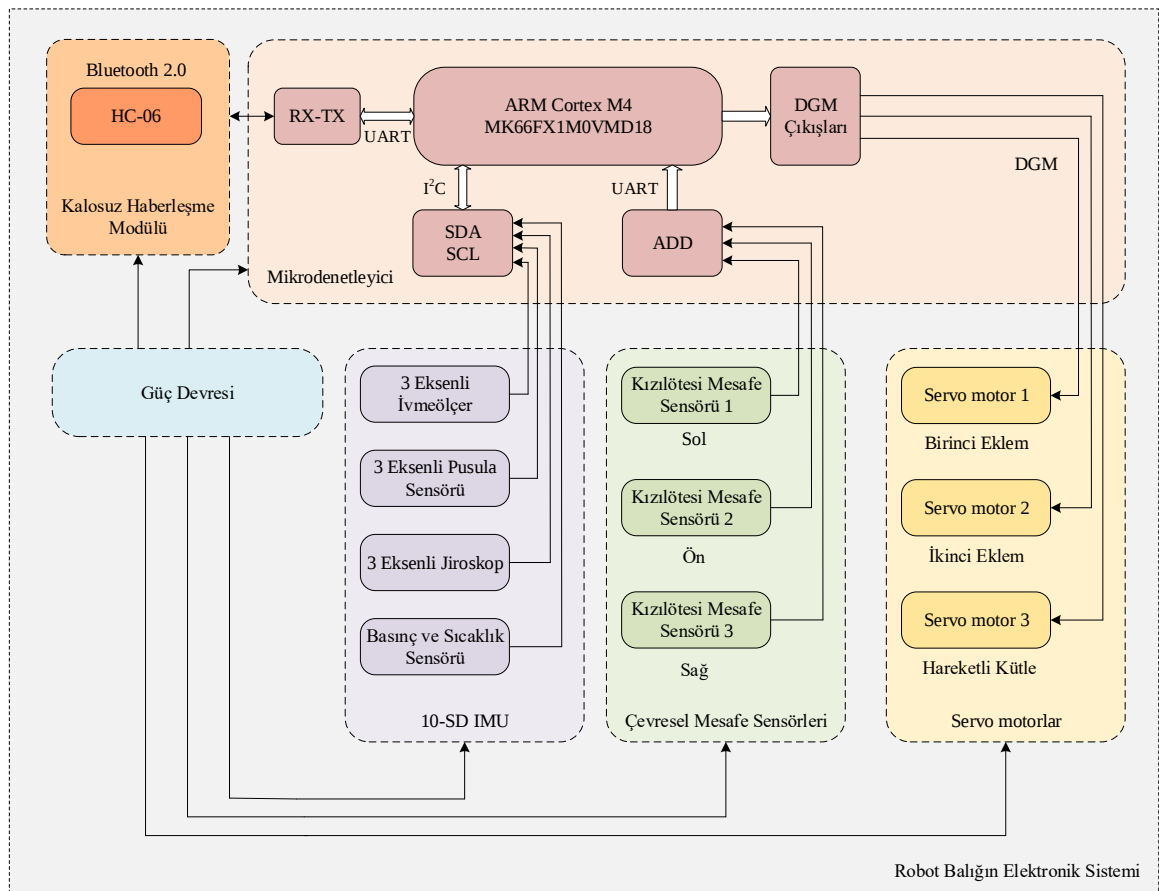


Şekil 5.19. Mesafe sensörlerinin görüş açıları

Burada Q bir sensörün görüş mesafesindeki engeli algılama açısıdır ve robot balık prototipindeki mesafe sensörleri için bu açı yaklaşık olarak 40° 'dir.

5.2.3. Elektronik Sistemlerin Tasarımı

Blok diyagramı Şekil 5.20’de verilen robot balığın elektronik sistemi güç, haberleşme, algılama, eklemlerin hareketi ve hareket denetimi işlevlerinin gerçekleşmesini sağlayan tümleşik bir yazılım ve donanım yapısını içerir. Elektronik donanım sistemi mekanik aksamı harekete geçirmektedir ve çevresel verilerin alınmasını sağlar. Alınan çevresel verilerin durumuna göre robot balığın istenilen hareket koordinasyonu ise geliştirilen denetim algoritması ile sağlanmaktadır.



Şekil 5.20. Elektronik sistemin blok diyagramı

Robot balığın elektriksel enerjisi için 7.4V, 1350mAh, 25C Li-Po şarj edilebilir batarya kullanılmıştır. Li-Po batarya diğer şarj edilebilir bataryalara göre küçük, hafif, uzun ömürlü ve daha fazla enerji depolayabilmektedir. Elektronik donanım elemanlarının besleme gerilim seviyeleri birbirlerinden farklı olduğu için bataryadan alınan gerilim değerini diğer elektronik elemanların uygun gerilim değerlerine göre ayarlayan bir elektronik güç dağıtım devresi tasarlanmıştır. Güç dağıtım devresinde, bataryanın 7.4V gerilim seviyesi mantıksal

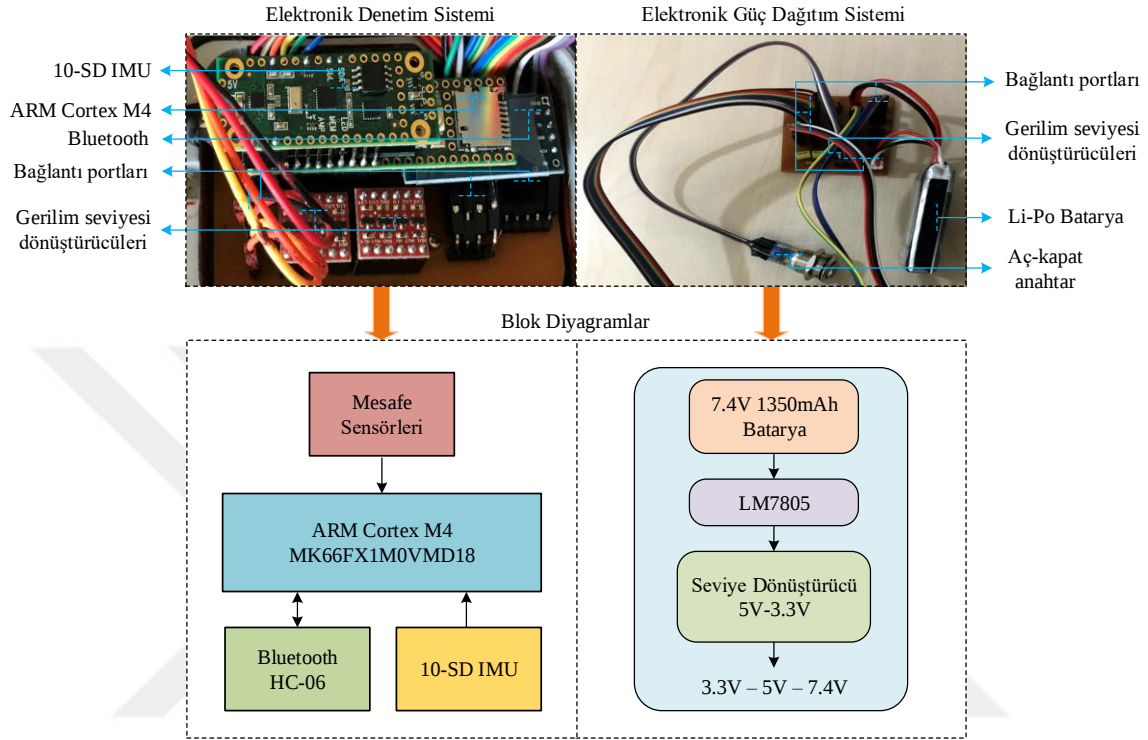
gerilim seviyesi dönüştürücüler ile gerekli 3.3V ve 5V değerlerine dönüştürülmektedir. Ayrıca robot balığın aç-kapa anahtarı ile şarj ve programlama bağlantısı da güç dağıtım kartından aktarılmaktadır. Aç-kapa anahtar için 5V 16mm su geçirmez kalıcı anahtar kullanılmıştır ve ana gövdenin üst terminal kapağına O-ring ile montajlanmıştır. Programlama ve şarj bağlantı girişleri ise ana terminal bölümünde yer almaktadır.

Robot balık ile kullanıcı bilgisayarı arasındaki kablosuz haberleşmenin sağlanabilmesi için HC-06 Bluetooth 2.0 modülü kullanılmıştır. Kablosuz haberleşme mesafesi yaklaşık olarak 10m'dir. Bluetooth modülü ile mikrodenetleyici arasındaki haberleşme RX/TX (ReceiveX/TransmitX) seri haberleşme protokolü ile gerçekleşmektedir. Robot balığın sol, sağ ve önde bulunan engelleri algılayabilmesi için tasarlanan burun yapısında üç adet Sharp GP2Y0A21YK0F kızılötesi analog mesafe sensörü bulunmaktadır ve bu sensörlerin çıkışları mikrodenetleyicinin Analog Dijital Dönüştürücü (ADD) girişlerine bağlanmıştır. Prototipin mekanik yapısının hareketleri servo motorlar ile sağlanmaktadır. Kuyruk mekanizmasını harekete geçirmek için eklemler içerisinde iki adet yüksek güçlü 7.4V Hitec D954SW RC servo motor kullanılmıştır. Ağırlık merkezi denetim mekanizmasının vidalı mili ise bir adet PowerHD AR3603HB tam tur 4.8V RC servo motor ile hareket etmektedir. Servo motorlar mikrodenetleyicide bulunan Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) çıkışları aracılığıyla sürülmektedir.

Modüler olarak tasarlanan elektronik denetim sistemi mikrodenetleyici kartını, Prop Shield 10-SD IMU hareket sensör modülünü, Bluetooth modülünü ve mantıksal gerilim seviyesi dönüştürücüleri içeren bir tümleşik devre kartıdır. Bu devre kartı robot balığın x eksenine paralel ve aynı doğrultuda yerleştirilmiştir. IMU modülü 50Hz örnekleme frekansı ile robotun üç boyutlu eksenlerde sapma, yunuslama ve yalpalanma açıları ile birlikte doğrusal konum ve hız bilgilerini ölçmek için kullanılmaktadır. Aynı zamanda, IMU bulunduğu ortamın sıcaklığını da ölçebilmektedir. Üzerinde bir adet FX0S8700CQ 6 eksen doğrusal ivmeölçer ve pusula sensörü, bir adet FXAS21002C 3 eksen jiroskop ve bir adet MPL3115A2 atmosferik basınç ve sıcaklık ölçer bulunmaktadır. IMU modülünden alınan bilgiler seri haberleşme protokolü olan I²C (Inter Integrated Circuit) ile SDA (Serial Data) ve SCL (Serial Clock) üzerinden mikrodenetleyiciye aktarılmaktadır.

Kullanılan mikrodenetleyici kartı, geliştirilen akıllı denetim algoritmasıyla sensörlerden alınan bilgiler doğrultusunda prototipin ritmik hareketlerini üretir ve bu hareketlerin eşzamanlı olarak sürekliliğini sağlar. Mikrodenetleyici kartı üzerinde bir adet 32bit 180MHz ARM Cortex M4 MK66FX1M0VMD18 mikrodenetleyici bulunmaktadır. Bu

mikrodenetleyici dahili hafıza olarak 1Mb flaş bellek, 256Kb RAM ve 4Kb EEPROM'a sahiptir. Şekil 5.21'de, elektronik denetim ve güç dağıtım devre kartlarını içeren robot balığın yerleşik elektronik sistemi verilmiştir.



Şekil 5.21. Robot balığın tasarlanan elektronik sistemi

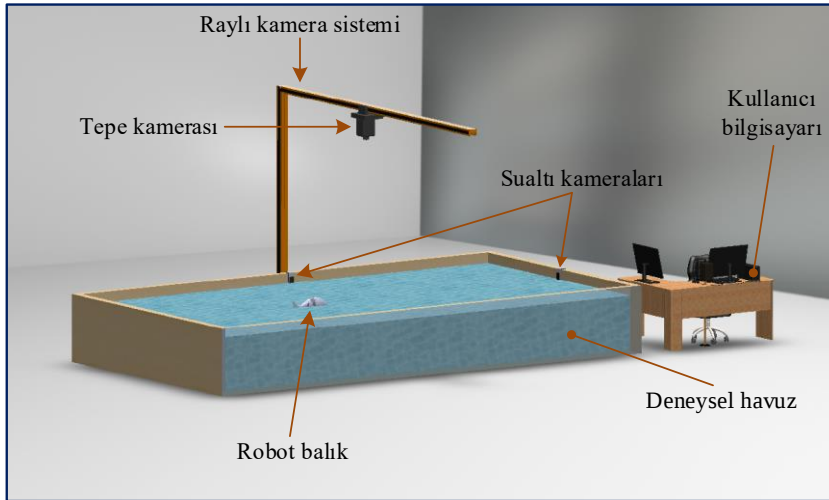
Geliştirilen robot balık prototipi hem otonom bir şekilde yüzebilmektedir hem de kullanıcı bilgisayarı tarafından gönderilen kablosuz bilgileri işleyebilmektedir. Ayrıca, robot balık su yüzeyine yakın yüzerken sensörlerden elde edilen bilgiler eşzamanlı olarak kullanıcı bilgisayarına kablosuz haberleşme birimi aracılığıyla aktarılabilir.

6. ROBOT BALIK PROTOTİPİNİN BENZETİM VE DENEYSEL ÇALIŞMALARI

Prototip tasarımı ve üretimi tamamlanan robot balığın gerçek bir ortamda test edilmesi amacıyla deneysel bir çalışma ortamı oluşturulmuştur. Bu ortamda 200cm genişliğinde, 300cm uzunluğunda ve 66cm derinliğinde deneysel bir yüzme havuzu, deneylerin havuz üzerinden kaydedilebilmesi için bir adet Sony FDR-AX53 4K tepe kamerası, havuz içinde sualtı görüntülerinin kaydedilebilmesi için iki adet GoPro Hero5 Black Edition aksiyon kamerası ve veri aktarımının gerçekleştirilebilmesi için i7 2.4GHz işlemci, 8GB DDR4 RAM ve 2GB 128bit ekran kartına sahip bir kullanıcı bilgisayarı yer almaktadır. Tepe kamerası ile alınan görüntüler 30fps oranında 3840x2160p çözünürlükte, aksiyon kameraları ile alınan görüntüler ise 30fps oranında 2704x1520 çözünürlükte kaydedilmiştir. Robot balığın kablosuz haberleşme birimi olarak Bluetooth bağlantısı kullanılmıştır.

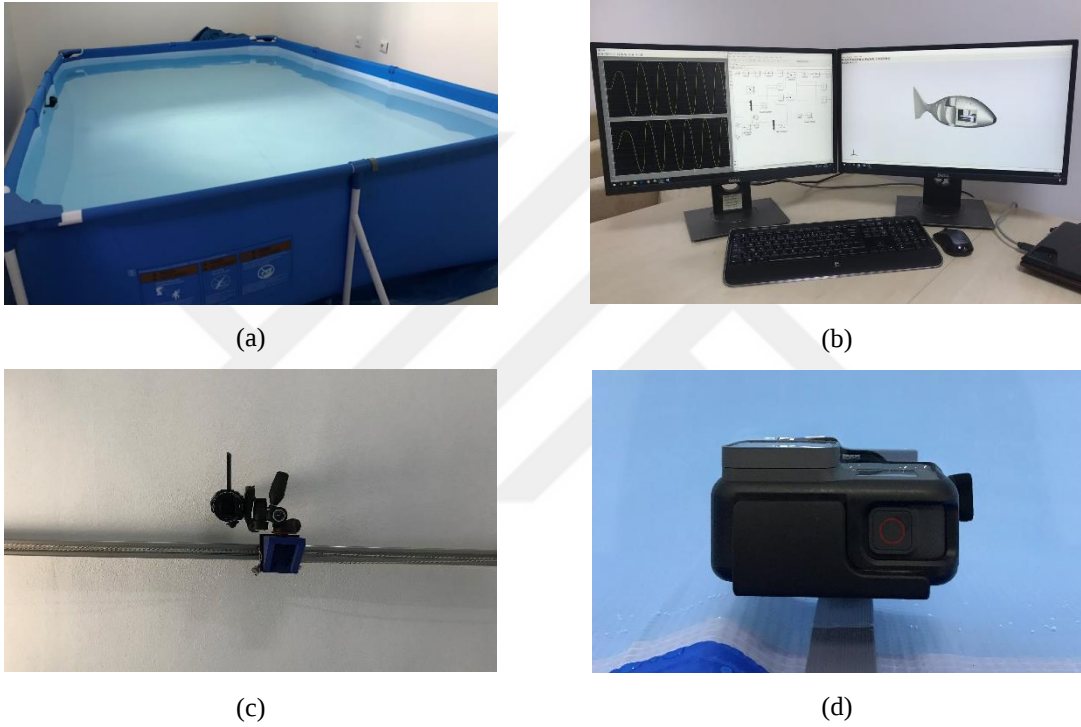
Deneysel ortamda çırpınma frekans değişimine karşılık ileri yön hız değişimi, eklemlere uygulanan ofset (β) değişimine karşılık dönüş yarıçapı değişimi ve yine eklemlere uygulanan ofset değişimine karşılık çizgisel ve açısal hız değişimleri gibi robot balık prototipinin karakteristik özelliklerinin elde edilmesi için açık çevrim davranışları analiz edilmiştir.

Kapalı çevrim denetim performansını göstermek için robot balığın sapma açısının denetimi, yunuslama açısının denetimi ve engellerden sakınarak otonom olarak yüzmesine ait üç boyutlu eksenlerde hareket kabiliyetleri analiz edilmiştir. Deneysel ortama ait temsili gösterim ve gerçek ortam görüntüleri sırasıyla Şekil 6.1 ve 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Deneysel çalışma ortamının temsili gösterimi

Şekil 6.2’de gösterilen deneysel çalışma ortamında, üretimi ve sızdırmazlık deneyleri tamamlanan robot balık prototipinin açık çevrim ve kapalı çevrim deneyleri gerçekleştirilmiş olup sonuçlar değerlendirilmiştir. Ayrıca, açık ve kapalı çevrim analizler MATLAB 2015a ile benzetim ortamında da sınanmıştır. Robot balığın açık çevrim karakteristiklerinin elde edilmesi ve kapalı çevrim performanslarının irdelenmesi için deneysel çalışmalar 40 gün boyunca devam etmiştir. Bu çalışmalarda, 72 açık çevrim ve 56 kapalı çevrim deneyleri olmak üzere toplam 128 farklı deney gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.2. Deneysel çalışma ortamının görüntüleri: (a) Deneysel havuz, (b) Kullanıcı bilgisayarı, (c) Tepe kamerası, (d) Sualtı aksiyon kamerası

Bu deneylerin analizi için tepe ve aksiyon kameraları vasıtasıyla video görüntüleri kaydedilmiştir. Elde edilen bu görüntüler Kinovea 0.8.26 programına aktarılıp robot balık prototipi üzerinde bir referans bölge işaretlenmiştir. İşaretli bölgenin hareketi Şekil 6.3’de gösterildiği gibi takip edilerek robot balık prototipinin izlediği yol, x ve y eksenlerindeki zamana bağlı konum değişimleri, robot balığın hızı ve ivmesi gibi dinamik davranışları belirlenmiştir. Kinovea programının örnekleme periyodu ise 0.04sn olarak seçilmiştir.



Şekil 6.3. Kinovea 0.8.26 programı ile robot balık prototipinde işaretli bölgenin takip edilmesi

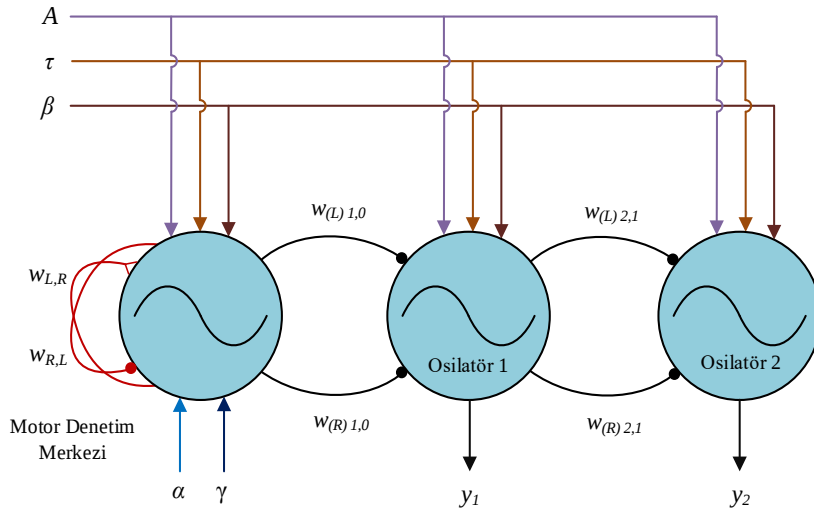
Kinovea programı aracılığıyla elde edilen robot balığın izlediği yola ait video görüntüleri MATLAB ortamında deney sürelerine bağlı olarak belirlenen örnekleme periyodu ile anlık fotoğraf görüntülerine dönüştürülmüştür. Her bir deneye ait sapma ve yunuslama açıları ise x ve y eksenlerindeki konum değişimleri kullanılarak aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$\begin{cases} \psi = \tan^{-1}(y / x) \\ \theta = \tan^{-1}(z / x) \end{cases} \quad (6.1)$$

Burada ψ ve θ sırasıyla robot balığın dünya eksen takımına göre sapma ve yunuslama açılarını temsil etmektedir.

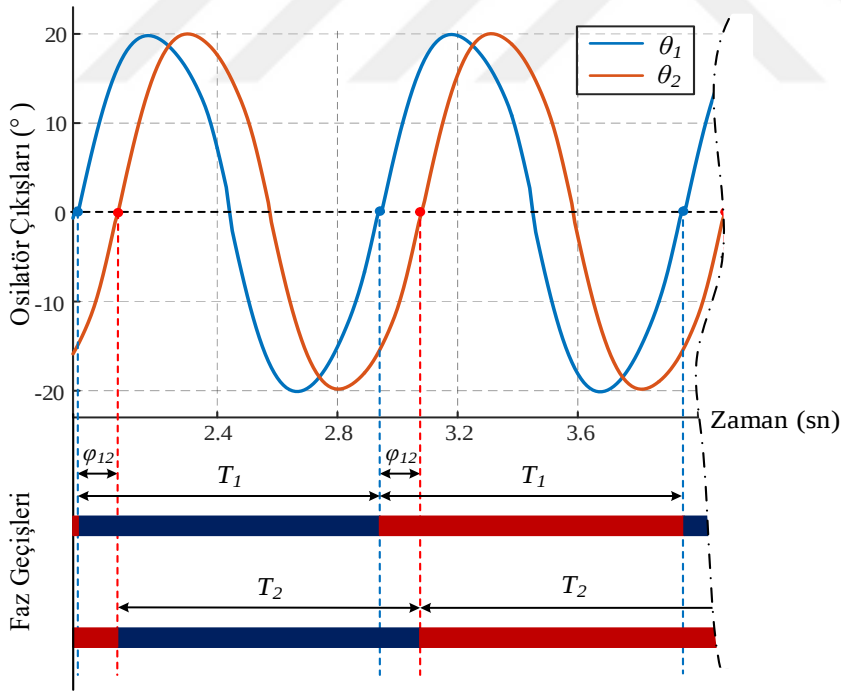
6.1. Robot Balık Prototipi için Tasarlanan Merkezi Örüntü Üreteci Modeli

Robot balık prototipinin kuyruk eklem hareketlerini sağlamak ve bu hareketleri daha etkin denetlenebilir hale getirmek için Bölüm 3’de incelenen sinirsel Lamprey türü MÖÜ osilatör modeli geliştirilmiştir. Şekil 6.4’de verilen osilatör yapısı, bir MDM ve robot balığın her bir ekleminin hareketlerini üreten iki adet osilatörden oluşmaktadır. Osilatör dizisi için tek yönlü zincir bağlantı yapısı kullanılmıştır. Osilatör modelinde giriş değişkenleri eklem açılarının genlik katsayısı (A), periyodu (τ), ofseti (β) ve faz farkı katsayıları (α, γ)’dır. Osilatör çıkışları y_1, y_2 ise sırasıyla birinci ve ikinci eklem açılarını tanımlar. Bütün osilatörler arasındaki tek yönlü sol ve sağ sinaptik bağlantılar ($w_{(L)}, w_{(R)}$) birbirlerine eşit olarak -1 değerini almıştır.



Şekil 6.4. Geliştirilen tek yönlü zincir bağlı MÖÜ modeli

Robot balığın iki eklem arasındaki φ_{12} faz farkının istenilen aralıklarda belirlenebilmesi için deneysel çalışmalarda $\gamma=0.2$ değerinde sabitlenmiştir ve α (0-1] aralığında seçilmiştir. Şekil 6.5’de, periyodik osilatör çıkışları ile faz farkı arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 6.5. Osilatör çıkışlarına bağlı eklemler arasındaki faz geçişleri

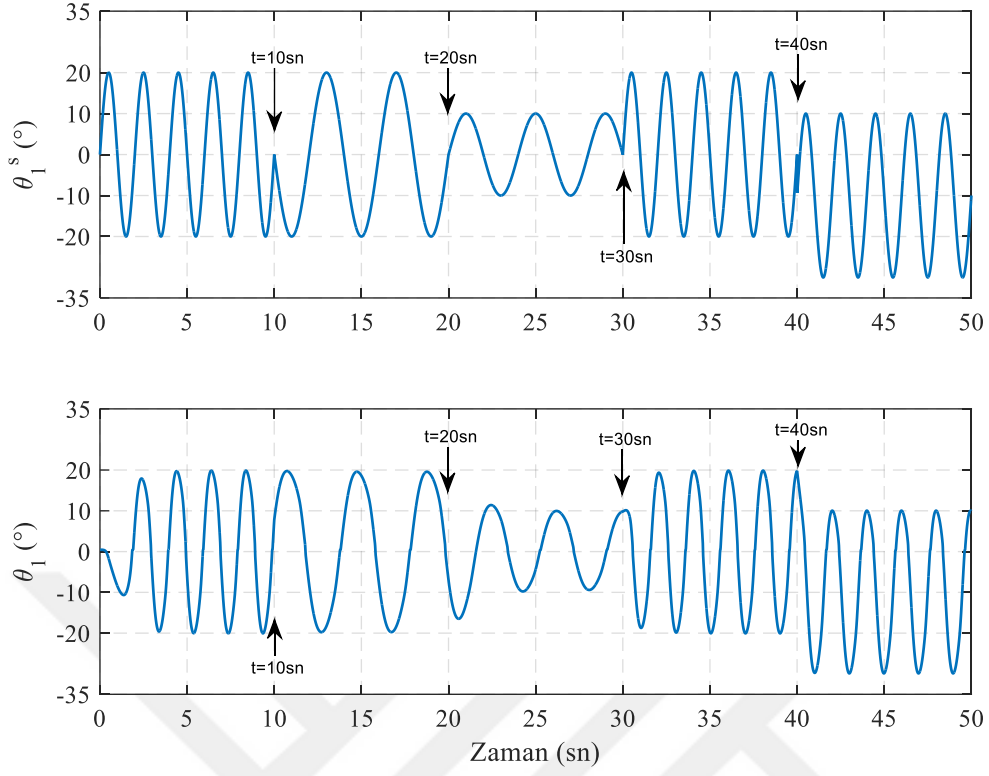
$A_1=20$ ve $A_2=20$ genlikleri için oluşturulan eklem açıları, belirlenen φ_{12} faz farkı ile robot balığın gerçek Carangiform balık hareketlerini taklit ederek yüzebilmesini sağlamaktadır.

Geliştirilen MÖÜ modelinin etkinliğini incelemek için Tablo 6.1’de verilen zaman aralıkları ve bu aralıklara bağlı genlik, frekans ve ofset değişimleri için bir benzetim senaryosu oluşturulmuştur. Burada, her iki eklem açılı hem MÖÜ modeliyle hem de oluşturulan sinüzoidal fonksiyonlar ile MATLAB ortamında 50sn benzetim zamanı boyunca üretilmiştir. Hem osilatör çıkışlarında hem de sinüzoidal fonksiyonlarda aynı parametre değişimleri gerçekleştirilmiştir. Birinci ve ikinci eklem için oluşturulan bu senaryolar sırasıyla Şekil 6.6 ve 6.7’de gösterilmiştir.

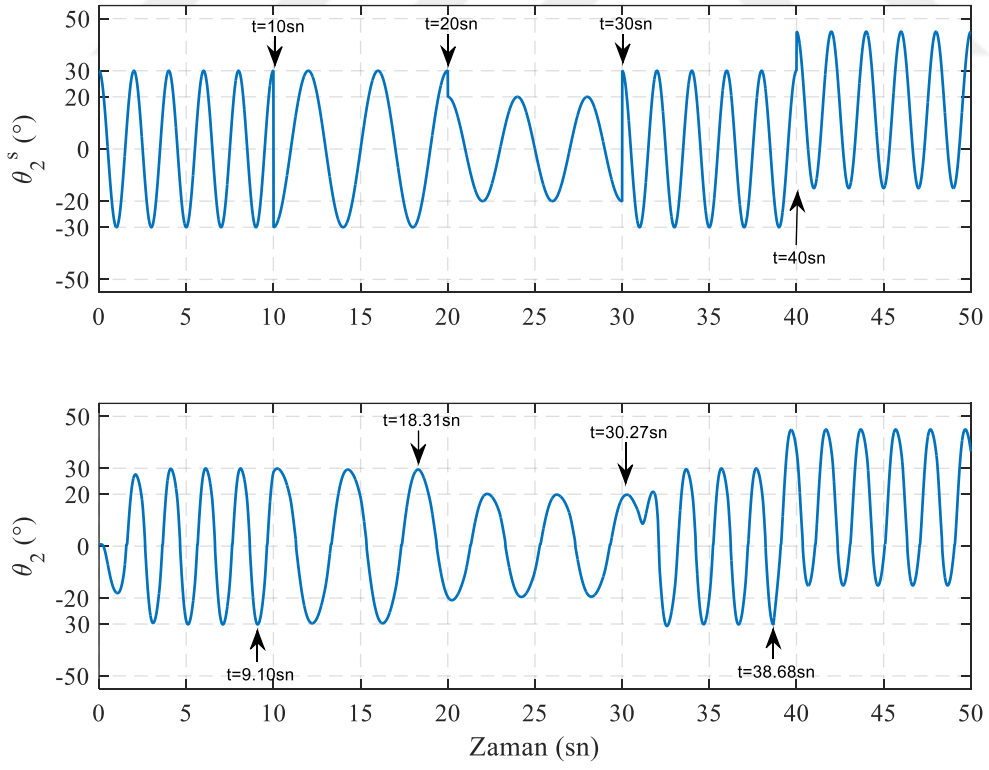
Tablo 6.1. MÖÜ modeli ve sinüzoidal fonksiyonlar için oluşturulan senaryo

θ_1 ve sinüzoidal fonksiyon için oluşturulan senaryo				
θ_1^s Zaman Aralığı (sn)	θ_1 Zaman Aralığı (sn)	Genlik (°)	Frekans (Hz)	Ofset (°)
[0-10]	[0-10]	20	0.5	0
(10-20]	(10-20]	20	0.25	0
(20-30]	(20-30]	10	0.25	0
(30-40]	(30-40]	20	0.5	0
(40-50]	(40-50]	20	0.5	-10
θ_2 ve sinüzoidal fonksiyon için oluşturulan senaryo				
θ_2^s Zaman Aralığı (sn)	θ_2 Zaman Aralığı (sn)	Genlik (°)	Frekans (Hz)	Ofset (°)
[0-10]	[0-9.10]	30	0.5	0
(10-20]	(9.10-18.31]	30	0.25	0
(20-30]	(18.31-30.27]	20	0.25	0
(30-40]	(30.27-38.68]	30	0.5	0
(40-50]	(38.68-50]	30	0.5	+15

Birinci eklem için hem osilatör çıkışı hem de sinüzoidal fonksiyon aynı zaman aralıklarında değiştirilmektedir. 0-10sn aralığında genlik 20°, çarpınma frekansı 0.5Hz ve ofset değeri 0; 10-20sn aralığında genlik ve ofset aynı kalarak çarpınma frekansı 0.25Hz; 20-30sn aralığında frekans ve ofset aynı kalarak genlik 10°; 30-40sn aralığında ofset aynı kalarak genlik 20°, frekans 0.5Hz ve 40-50sn aralığında genlik ve frekans aynı kalarak ofset -10° olarak belirlenmiştir. Her iki çıkış incelendiğinde sinüzoidal fonksiyonun geçişleri oldukça keskin, osilatör çıkışının ise oldukça düzgün olduğu gözlemlenmektedir.



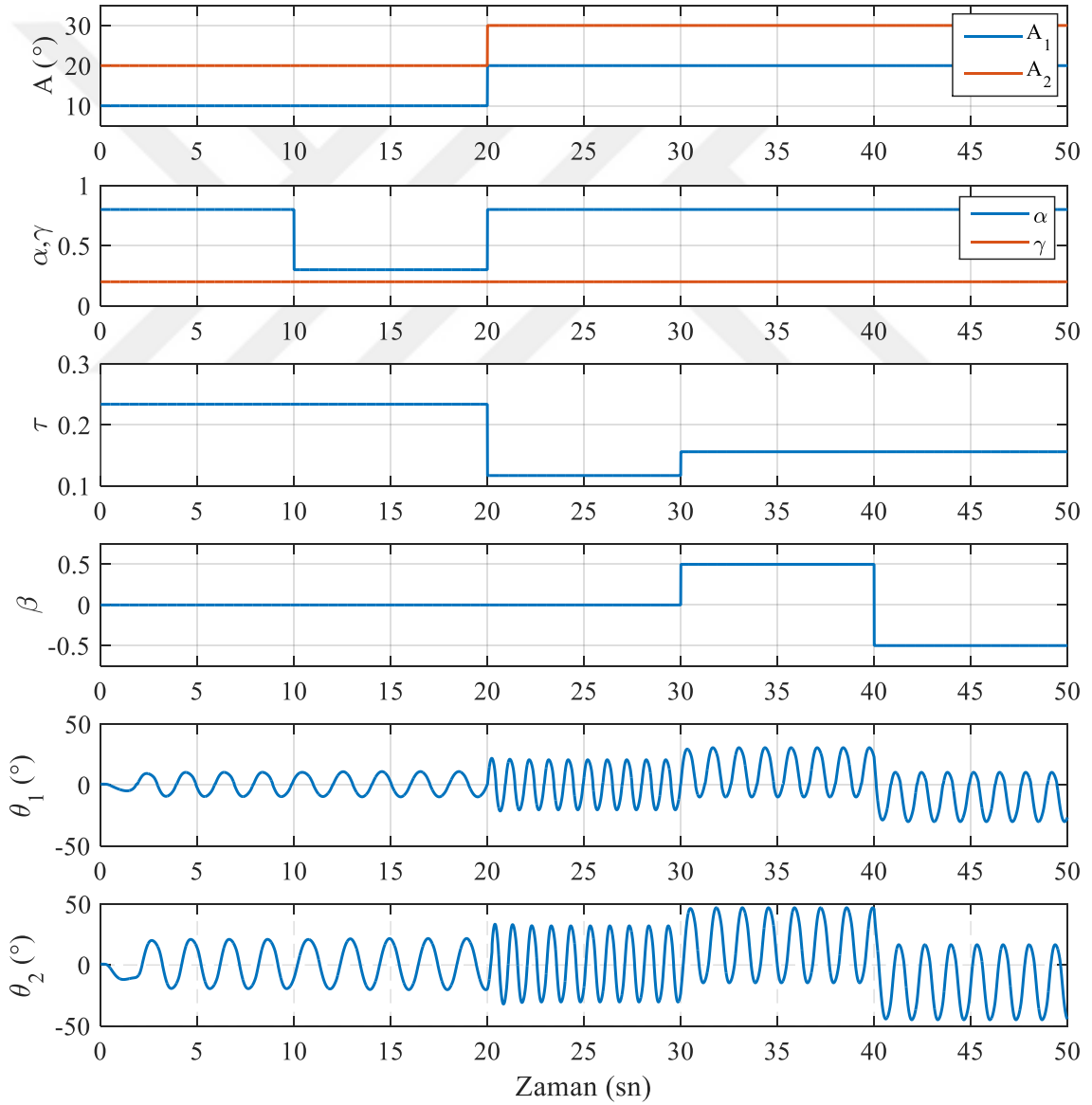
Şekil 6.6. Birinci eklem senaryosu



Şekil 6.7. İkinci eklem senaryosu

Şekil 6.7’de görüldüğü gibi, ikinci eklem senaryosunda ise parametre değişimleri hem osilatör çıkışı hem de üretilen sinüzoidal fonksiyon için pozitif tepe değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Her iki çıkış incelendiğinde sinüzoidal fonksiyonda bozulmalar oluşmaktadır ve olay geçişleri oldukça keskin ve anidir. Osilatör çıkışının ise oldukça düzgün olduğu gözlemlenmektedir.

Açık ve kapalı çevrim deneysel çalışmalarda kullanılan parametre değerleri için üretilen örnek osilatör çıkışları ve bu parametrelerin zamana bağlı değişimleri Şekil 6.8’de sunulmuştur. Tablo 6.2’de ise bu osilatör çıkışlarına ait parametre değişimleri ve zaman aralıkları verilmiştir.



Şekil 6.8. Açık çevrim deneyler için örnek parametre değişimleri ve osilatör çıkışları

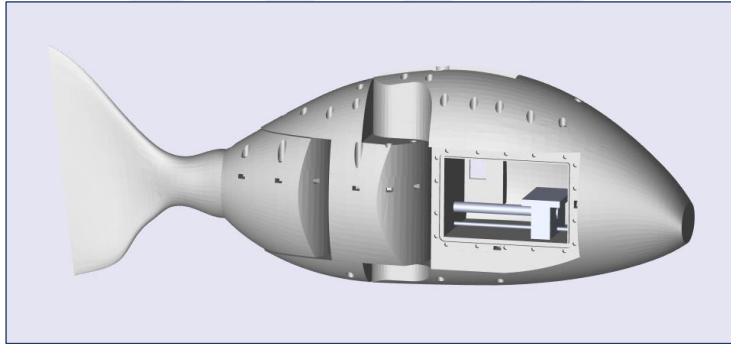
Tablo 6.2. Örnek davranışlar için zamana bağlı parametre değişimleri

Zaman Aralığı (sn)	A_1	A_2	α	γ	τ	β
[0-10]	10	20	0.8	0.2	0.2340	0
(10-20]	10	20	0.3	0.2	0.2340	0
(20-30]	20	30	0.8	0.2	0.1169	0
(30-40]	20	30	0.8	0.2	0.1559	0.5
(40-50]	20	30	0.8	0.2	0.1559	-0.5

Osilatör çıkışlarının çarpınma frekansları ise τ parametresine bağlı olarak sırasıyla 2Hz, 1Hz ve 0.75Hz olarak belirlenmiştir.

6.2. Robot Balık Prototipinin SimMechanics Ortamında Hareket Analizi

SolidWorks ortamında üç boyutlu olarak tasarlanan robot balık prototipi Şekil 6.9’da gösterildiği gibi SimMechanics ortamına aktarılarak, prototip modeli ile ileri yön düz yüzüş ve dönüş hareketleri için sanal ortamda hareket analizleri gerçekleştirilmiştir.

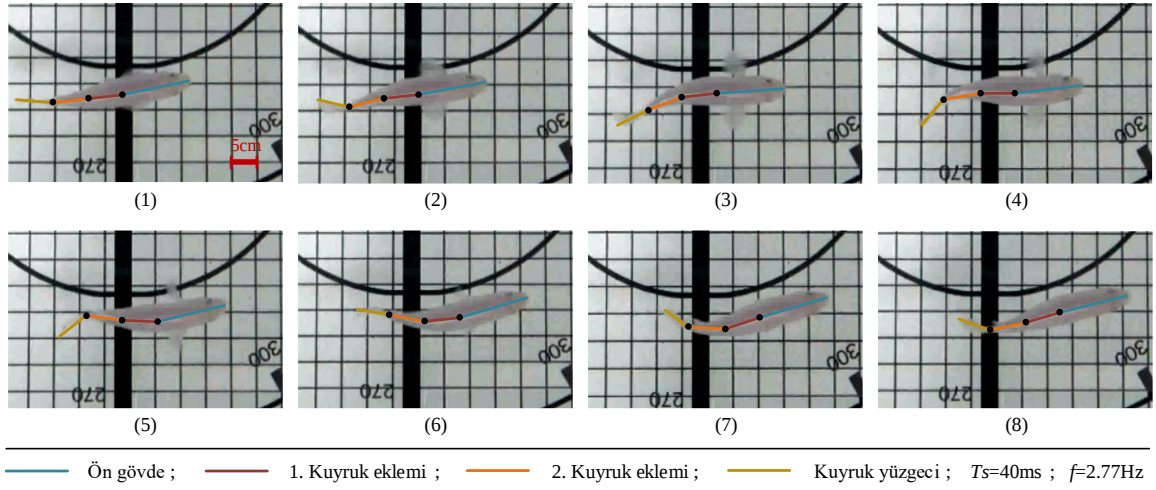


Şekil 6.9. Robot balık prototipinin SimMechanics görünümü

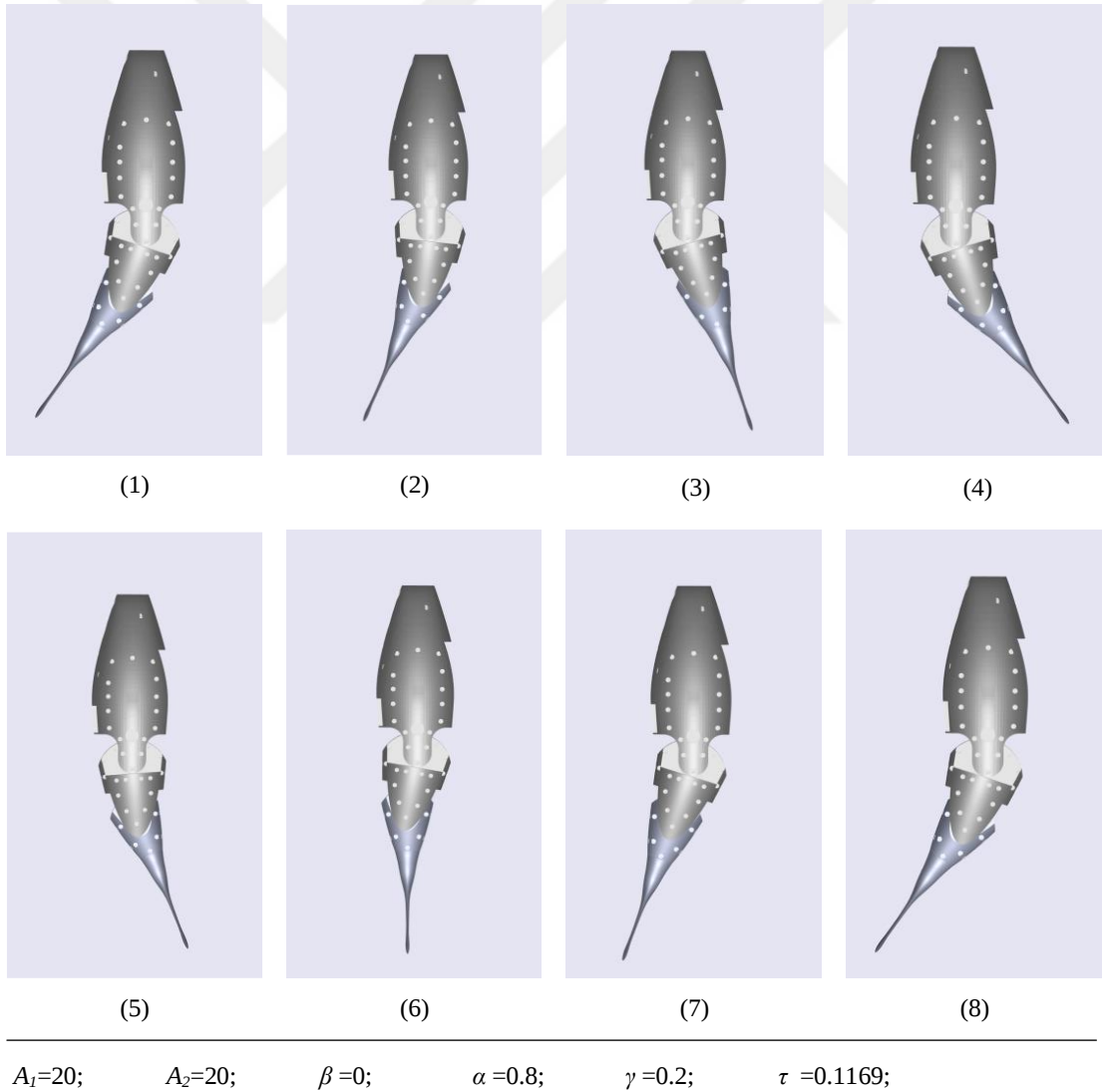
Carangiform türü yüzme hareketlerine sahip gerçek bir balığın fiziksel özellikleri dikkate alınarak tasarlanan iki eklemlili robot balık prototipinin ileri yön düz yüzüş ve dönüş hareketlerini yaparken vücudunun aldığı şekil ile gerçek balığın aynı hareketleri yaparken vücudunun aldığı şeklin uyumluluğunu göstermek için bu hareketler hem SimMechanics ortamında prototip modeli ile hem de gerçek ortamda Carangiform türü gerçek bir sazan balığı üzerinde gözlemlenmiştir. Bu gözlemlerin amacı gerçek balıkla aynı hareketlerin bir ön gövde, iki takrikli kuyruk eklemi ve bir tahriksiz esnek kuyruk yüzgeci olmak üzere dört ana parçadan oluşan prototipin eklem uzunlukları ve birbirine göre oranları dikkate alınarak

sağlanabildiğinin gösterilmesidir. Sazan balığından bir tepe kamerası vasıtasıyla alınan görüntüler bir periyotluk ileri yön düz yüzüş ve dönüş yönü için analiz edilmiştir. Prototipin eklem ölçüleri; ön gövde, iki tahrikli kuyruk eklemi ve bir esnek kuyruk boyutlarının prototip uzunluğuna oranı sabit tutularak düz yüzüş ve dönüş hareketleri yapan gerçek bir balıktan alınan bir periyotluk kuyruk hareketini içeren 8 tane ardışıl anlık görüntüye sırasıyla Şekil 6.10 ve 6.12’de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Düz yüzüş ve dönüş açılarının bir periyot için uygulandığı SimMechanics görüntüleri de yine 8 ardışıl hareket için Şekil 6.11 ve 6.13’de verilmiştir. Gerçek balık ile SimMechanics ortamında oluşturulan prototipin eklem açılarının uyumluluğunu göstermek için düz yüzüş ve dönüş hareketlerine ait gerçek balık ve SimMechanics görüntüleri alt alta sunulmuştur.

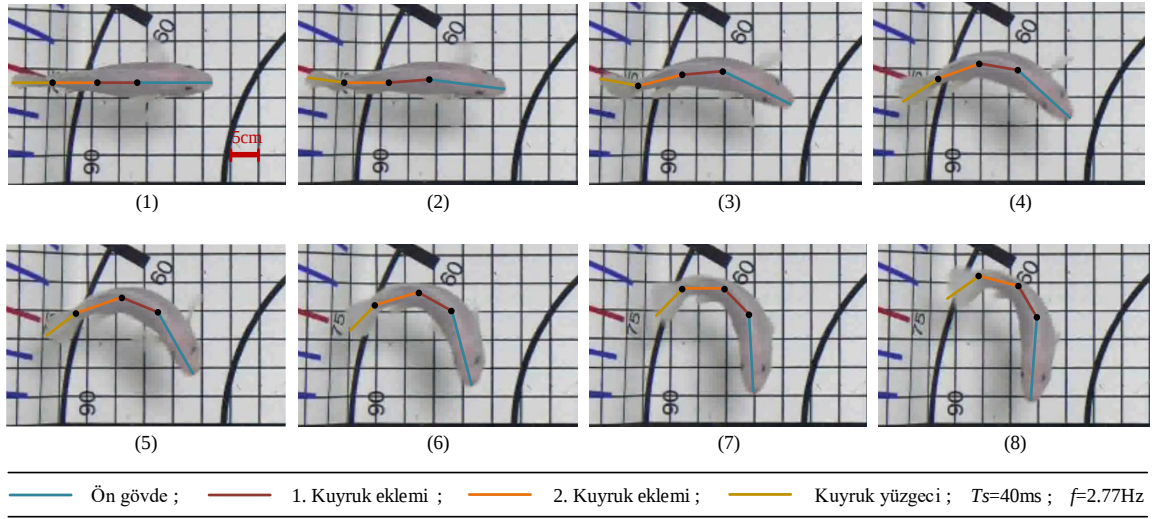




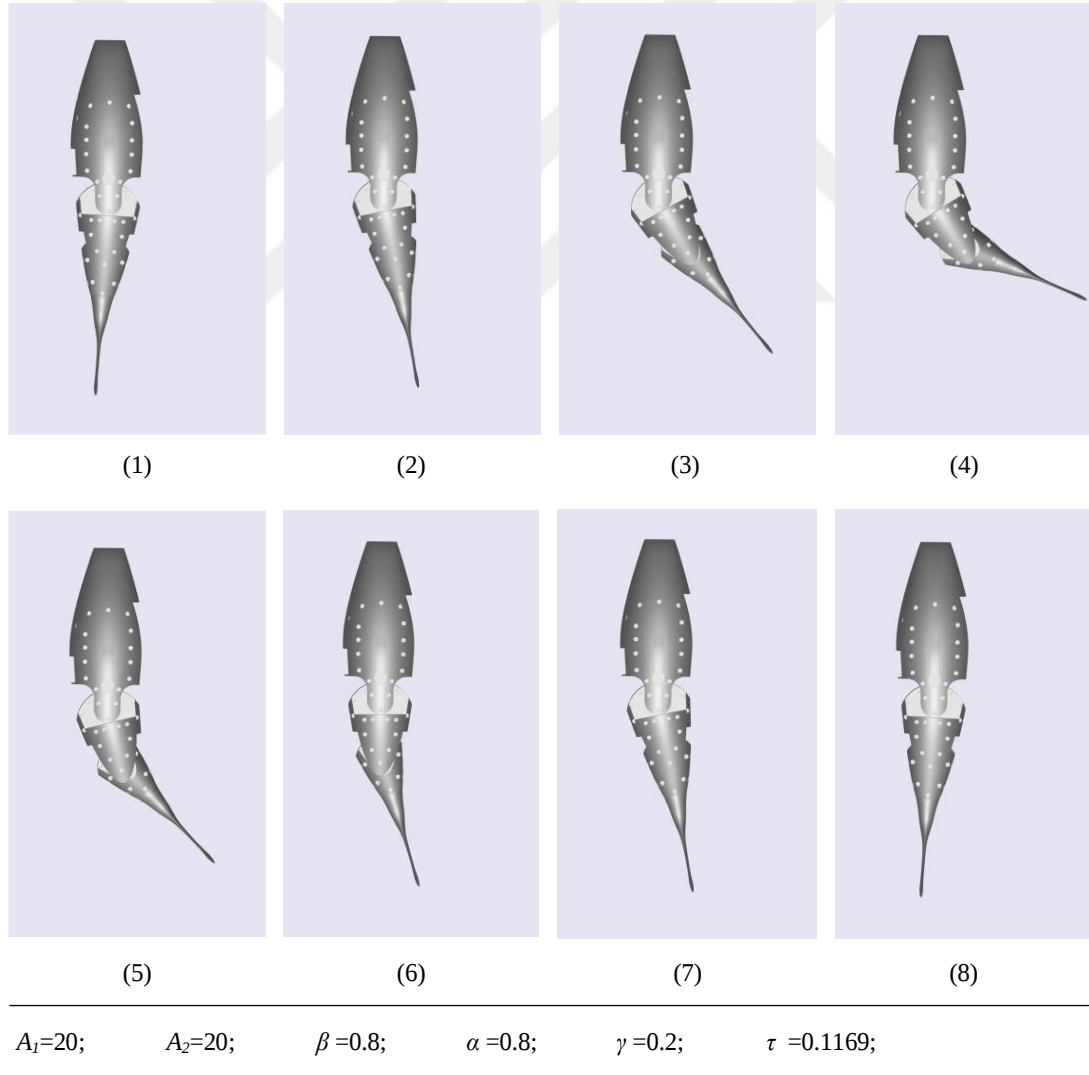
Şekil 6.10. Sazan balığının ileri yön düz yüzüş hareketinin bir periyodu



Şekil 6.11. Robot balığın ileri yön düz yüzüş hareketinin SimMechanics ortamında bir periyodu



Şekil 6.12. Sazan balığının dönüş hareketinin bir periyodu

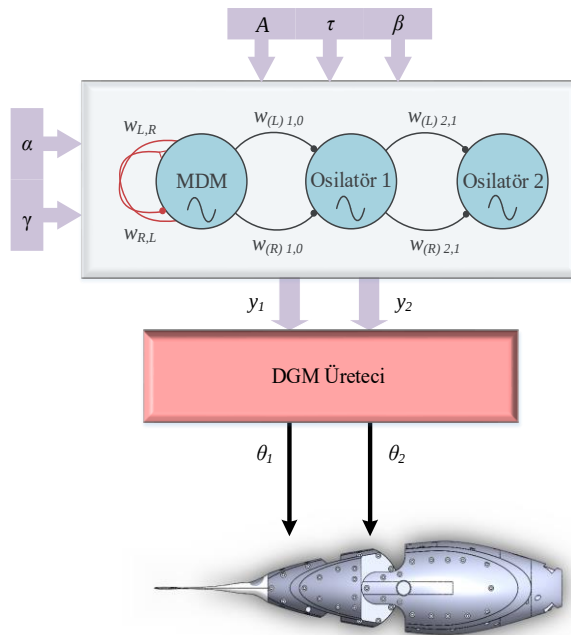


Şekil 6.13. Robot balığın dönüş hareketinin SimMechanics ortamında bir periyodu

Robot balık prototipi ne kadar fazla hareketli kuyruk ekleminden oluşursa gerçek bir balığın hareketleri o kadar iyi bir performans ile taklit edilebilir. Ancak, eklenen her bir kuyruk ekleminden dolayı prototip tasarımının ve denetim yapısının karmaşıklığı ile ihtiyaç duyulan enerjinin ve maliyetin artması gibi temel problemler ortaya çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında, denetim yapısının daha basit olması ve uygulanabilirliği yüksek bir tasarım gerçekleştirme amacından dolayı tasarlanan bu dört parçalı prototip yapısı ile gerçek balık hareketleri başarılmaya çalışılmıştır. Ayrıca, bu hareketlerin gerçek balık ile tasarlanan model arasındaki büyük oranda uyumluluğu da Şekil 6.10, 6.11, 6.12 ve 6.13 ile görülmüştür.

6.3. Robot Balığın Açık Çevrim Performansı

Robot balık prototipinin açık çevrim performansını analiz etmek için Şekil 6.14’de blok şeması verilen MÖÜ model yapısı kullanılmıştır. Burada MÖÜ modelinin giriş değişkenleri; osilatörlerin genlik katsayısı (A), periyodu (τ), faz farkı (α, γ) ve ofseti (β) parametreleri olarak belirlenmiştir. MÖÜ modelinin çıkış değişkenleri ise osilatörlerin çıkışları ve aynı zamanda robot balığın üretilen eklem açılarıdır. Bu açılara göre servo motorların konumlarını belirlemek için gerekli görev oranı DGM birimi tarafından hesaplanmaktadır.

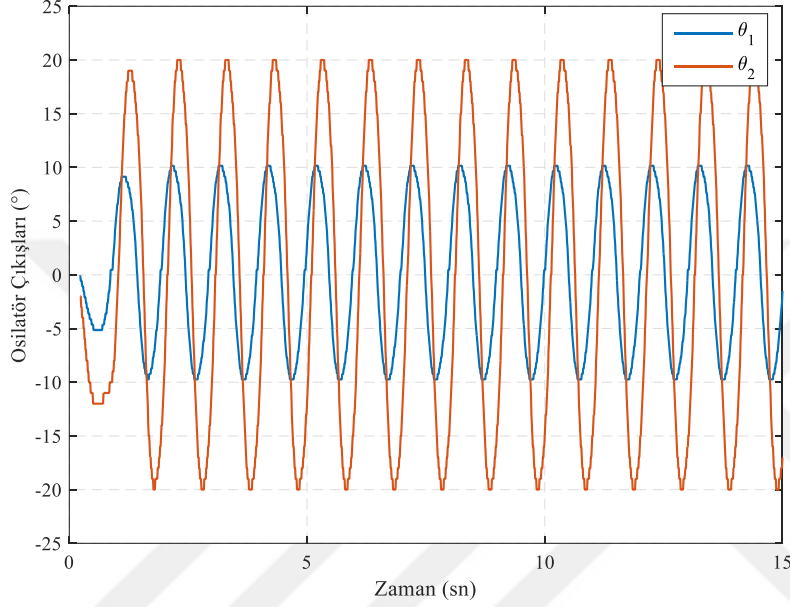


●— Engelleyci Sinaps; >— Uyarıcı Sinaps

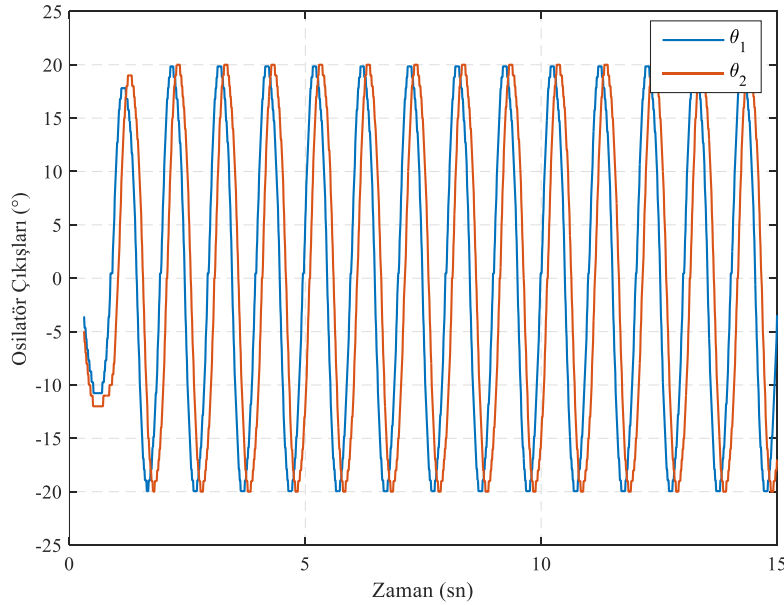
MDM: Motor Denetim Merkezi

Şekil 6.14. Robot balığın açık çevrim performans analizleri için kullanılan blok şeması

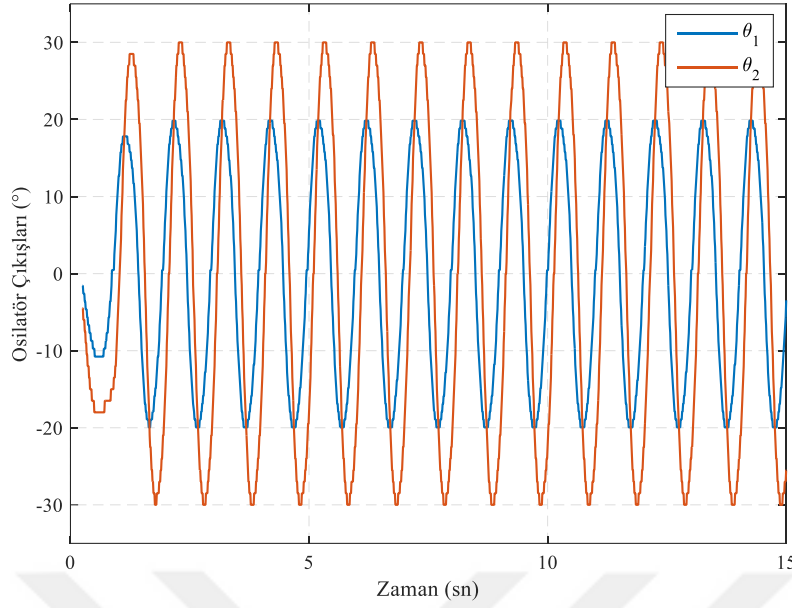
MÖÜ modelinin giriş parametrelerinin belirlenen aralıklardaki değişimleri için robot balığın birinci ve ikinci eklem açıları (θ_1 , θ_2) deneysel olarak incelenmiştir. Sırasıyla Şekil 6.15, 6.16 ve 6.17’de deneysel çalışmalarda kullanılan farklı genlik değerleri için ARM Cortex M4 mikrodnetleyici ile üretilen osilatör çıkışları verilmiştir. Bu osilatör çıkışları aynı zamanda robot balık prototipinin eklem açılarıdır.



Şekil 6.15. $A_1=10$ ve $A_2=20$ genlik değerleri için ARM Cortex M4 mikrodnetleyici ile elde edilen osilatör çıkışları



Şekil 6.16. $A_1=20$ ve $A_2=20$ genlik değerleri için ARM Cortex M4 mikrodnetleyici ile elde edilen osilatör çıkışları

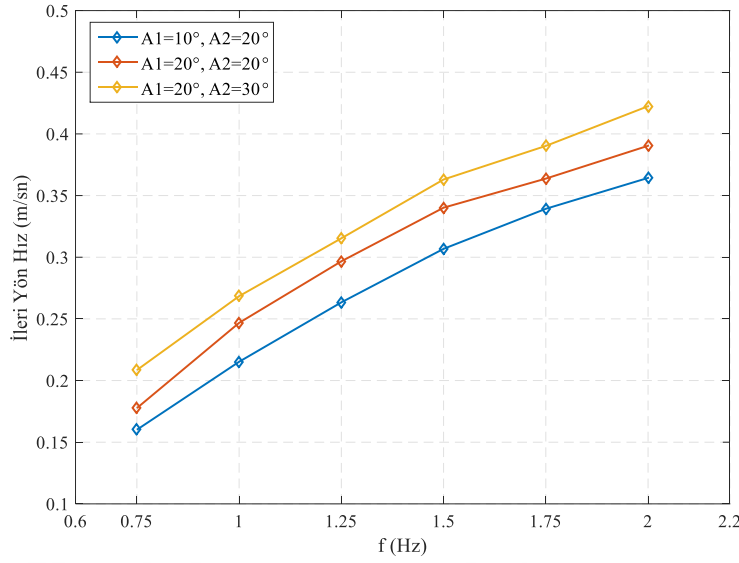


Şekil 6.17. $A_1=20$ ve $A_2=30$ genlik değerleri için ARM Cortex M4 mikrodenetleyici ile elde edilen osilatör çıkışları

Şekil 6.15, 6.16 ve 6.17’de üretilen osilatör çıkışları için MÖÜ giriş parametreleri $\tau=0.1170$, $\alpha=0.8$ ve $\beta=0$ olarak belirlenmiştir. Bu durumda kuyruğun çarpınma frekansı $f=1\text{Hz}$ ve osilatör çıkışları arasındaki faz farkı $\phi_{12}=45^\circ$ olarak elde edilmiştir.

6.3.1. Robot Balığın İleri Yön Düz Yüzüş için Açık Çevrim Performansı

Bu bölümde, Şekil 6.2’de gösterilen deneysel çalışma ortamında robot balık prototipinin açık çevrim ileri yön düz yüzüş performansı kullanıcı tarafından belirlenen farklı parametre değerlerine göre analiz edilmiştir. Bu analizlerde; kuyruğun çarpınma frekansı değişimine karşı farklı faz ve genlik değerleri için ileri yön hız değişimleri incelenmiştir. Şekil 6.18’de, robot balık prototipinin deneysel havuz ortamında çarpınma frekans değişimine göre farklı genlik değerleri için ileri yön hız değişimleri verilmiştir. Bu analize ait parametre değişimlerine karşılık prototipten elde edilen ileri yön hız değerleri detaylı olarak Tablo 6.3’de sunulmuştur.



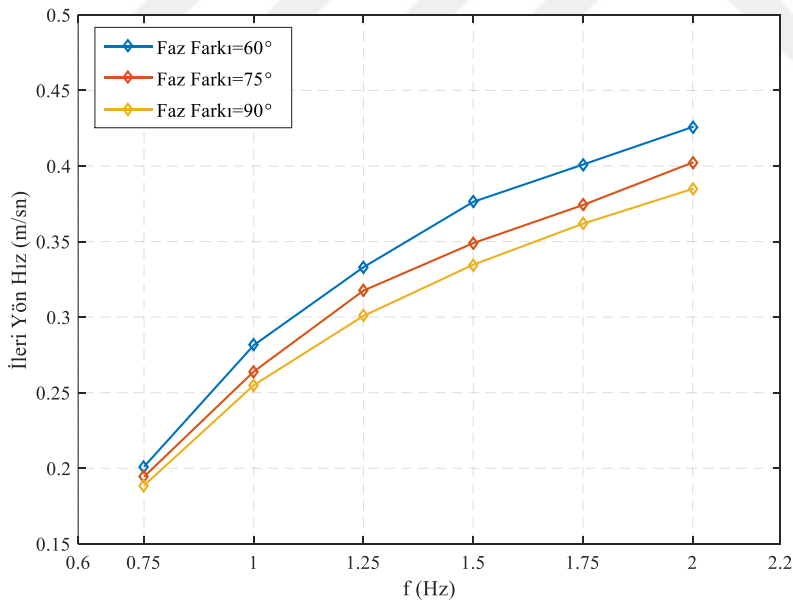
Şekil 6.18. Robot balığın deneysel ortamda çırpınma frekansı değişimine göre farklı genlik değerlerinde ileri yön hız değişimi

Tablo 6.3. Robot balığın çırpınma frekansı değişimine göre farklı genlik değerlerinde ileri yön hız değişimi

A_1	A_2	β	α	γ	ϕ_{12} (°)	τ	f (Hz)	İleri Yön Hız (m/sn)
10	20	0	0.8	0.2	45	0.1559	0.75	0.1600
10	20	0	0.8	0.2	45	0.1169	1	0.2152
10	20	0	0.8	0.2	45	0.0935	1.25	0.2634
10	20	0	0.8	0.2	45	0.0779	1.5	0.3068
10	20	0	0.8	0.2	45	0.0668	1.75	0.3392
10	20	0	0.8	0.2	45	0.0584	2	0.3643
20	20	0	0.8	0.2	45	0.1559	0.75	0.1776
20	20	0	0.8	0.2	45	0.1169	1	0.2467
20	20	0	0.8	0.2	45	0.0935	1.25	0.2966
20	20	0	0.8	0.2	45	0.0779	1.5	0.3401
20	20	0	0.8	0.2	45	0.0668	1.75	0.3637
20	20	0	0.8	0.2	45	0.0584	2	0.3903
20	30	0	0.8	0.2	45	0.1559	0.75	0.2084
20	30	0	0.8	0.2	45	0.1169	1	0.2684
20	30	0	0.8	0.2	45	0.0935	1.25	0.3153
20	30	0	0.8	0.2	45	0.0779	1.5	0.3630
20	30	0	0.8	0.2	45	0.0668	1.75	0.3902
20	30	0	0.8	0.2	45	0.0584	2	0.4224

Şekil 6.18’den görüldüğü gibi robot balığın ileri yön düz yüzüş hızı çırpınma frekansının artışı ile yaklaşık doğrusal olarak artmaktadır. Daha büyük genlik değerlerinde ise kuyruk mekanizmasının ürettiği tahrik kuvveti arttığı için ileri yön hız değerleri de daha büyük olmaktadır. Robot balık prototipinin her bir eklemi birbirinden bağımsız olarak en fazla $\pm 45^\circ$ ’lik mekanik dönüş açısı ile sınırlı olduğundan genlik değişimi $[10-30]^\circ$ aralığında belirlenmiştir. 2Hz’lik çırpınma frekansında maksimum 0.4224m/sn ileri yön hız değerine ulaşılmıştır. Ayrıca, sualtı robotlarında diğer bir hız performans kriteri olan Gövde Uzunluğu’na (GU) bağlı hız değişimi incelenmiştir [5]. Böylece, robot balık prototipi için maksimum ileri yön hız değeri 0.8448GU/sn olarak hesaplanmıştır.

Yukarıda farklı genlik değerleri için gerçekleştirilen ileri yön hız değişimleri analizi robot balık prototipinin deneysel havuz ortamında farklı faz değerleri için tekrar irdelenmiştir. Üç farklı faz farkı değeri için robot balık prototipinin kuyruk çırpınma frekansı değişimine karşılık ileri yön hız değişimi Şekil 6.19’da verilmiştir. Bu analize ait parametre değişimlerine karşılık prototipten elde edilen ileri yön hız değerleri ise Tablo 6.4’de detaylandırılmıştır.



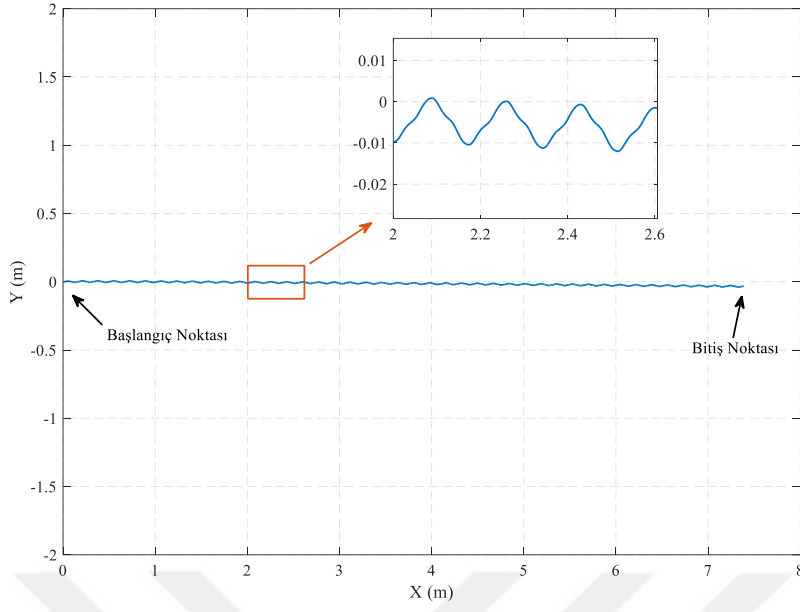
Şekil 6.19. Robot balığın deneysel ortamda çırpınma frekansı değişimine göre farklı faz değerlerinde ileri yön hız değişimi

Tablo 6.4. Robot balığın çırpınma frekansı değişimine göre farklı faz değerlerinde ileri yön hız değişimi

A_1	A_2	β	α	γ	ϕ_{12} (°)	τ	f (Hz)	İleri Yön Hız (m/sn)
20	20	0	0.5	0.2	60	0.1559	0.75	0.2010
20	20	0	0.5	0.2	60	0.1169	1	0.2814
20	20	0	0.5	0.2	60	0.0935	1.25	0.3330
20	20	0	0.5	0.2	60	0.0779	1.5	0.3762
20	20	0	0.5	0.2	60	0.0668	1.75	0.4009
20	20	0	0.5	0.2	60	0.0584	2	0.4258
20	20	0	0.3	0.2	75	0.1559	0.75	0.1944
20	20	0	0.3	0.2	75	0.1169	1	0.2639
20	20	0	0.3	0.2	75	0.0935	1.25	0.3175
20	20	0	0.3	0.2	75	0.0779	1.5	0.3489
20	20	0	0.3	0.2	75	0.0668	1.75	0.3741
20	20	0	0.3	0.2	75	0.0584	2	0.4022
20	20	0	0.2	0.2	90	0.1559	0.75	0.1885
20	20	0	0.2	0.2	90	0.1169	1	0.2549
20	20	0	0.2	0.2	90	0.0935	1.25	0.3007
20	20	0	0.2	0.2	90	0.0779	1.5	0.3346
20	20	0	0.2	0.2	90	0.0668	1.75	0.3618
20	20	0	0.2	0.2	90	0.0584	2	0.3848

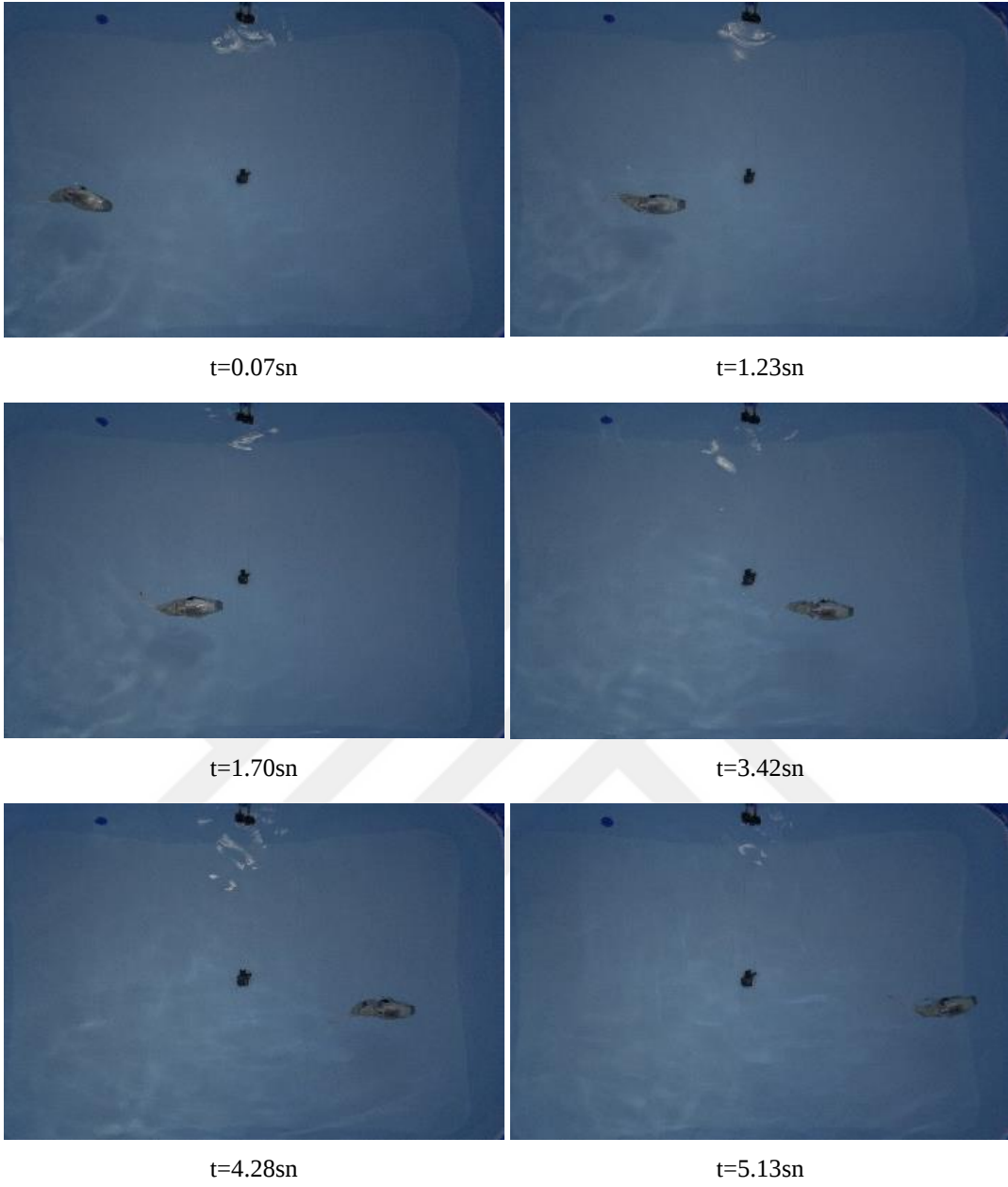
Bu analizde görülmektedir ki, genlik artışına karşı hız değeri artarken, eklemlere uygulanan açılar arasındaki faz farkı arttıkça kuyruk mekanizmasının ürettiği tahrik kuvveti azaldığından ileri yön hız değerleri azalmaktadır. En yüksek ileri yön hız değeri, 2Hz'lik çırpınma frekansında 60°'lik faz farkı için 0.4258m/sn olarak elde edilmiştir. GU'ya bağlı hız değeri ise 0.8516GU/sn olarak hesaplanmıştır.

Robot balığın en yüksek ileri yön hız değerinin elde edildiği $f=2\text{Hz}$, $A_1=20$, $A_2=20$, $\beta=0$ ve $\alpha=0.5$ parametre değerleri için ileri yön düz yüzüş hareketine ait benzetim sonucu Şekil 6.20'de verilmiştir. Ayrıca, bu parametreler ile gerçekleştirilen deneysel görüntüler Şekil 6.21'de sunulmuştur. Bu deneyden elde edilen robot balığın zamana göre hız, ivme ve yer değişim grafikleri ise sırasıyla Şekil 6.22, 6.23 ve 6.24'de gösterilmiştir.

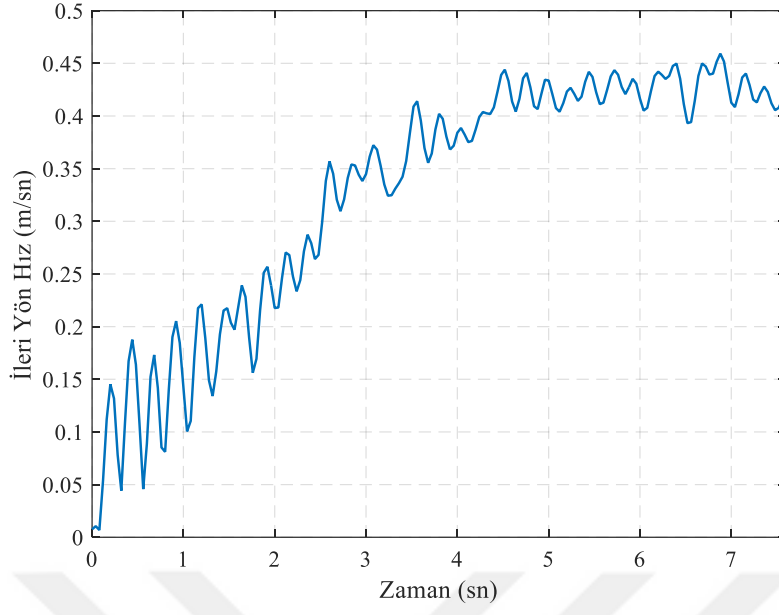


Şekil 6.20. $f=2\text{Hz}$, $A_1=20$, $A_2=20$, $\beta=0$ ve $\alpha=0.5$ için robot balığın ileri yön hareketinin benzetim sonuçları

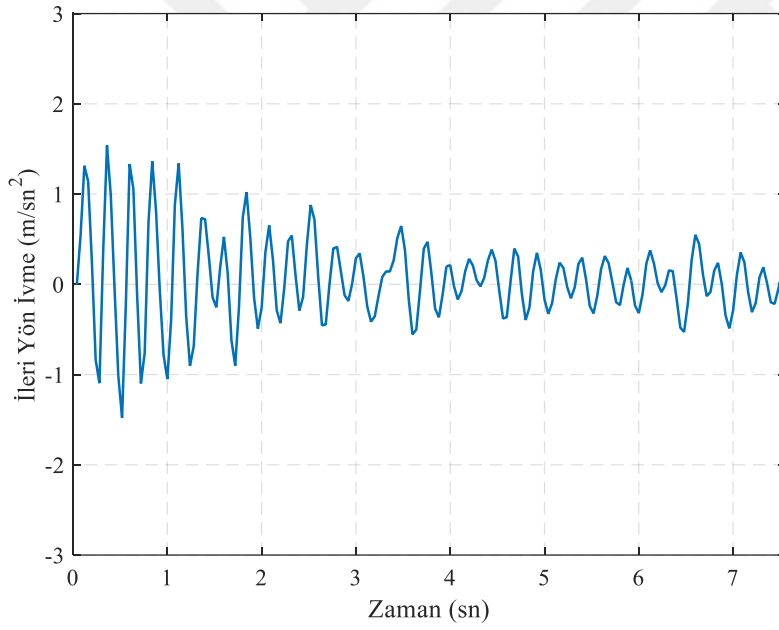
Şekil 6.20'ye göre, tasarlanan robot balık prototipi benzetim ortamında 25sn süre içerisinde 7.15m yol almıştır.



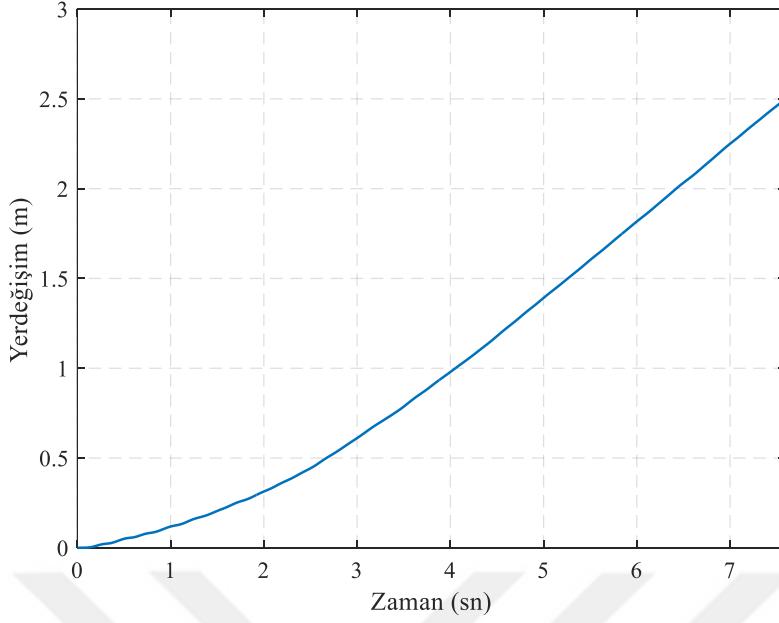
Şekil 6.21. Robot balığın deneysel ortamda $f=2\text{Hz}$, $A_1=20$, $A_2=20$, $\beta=0$ ve $\alpha=0.5$ için ileri yön düz yüzüş hareketi



Şekil 6.22. İleri yön deneysel yüzüş görüntüleri için robot balığın hız-zaman grafiği



Şekil 6.23. İleri yön deneysel yüzüş görüntüleri için robot balığın ivme-zaman grafiği

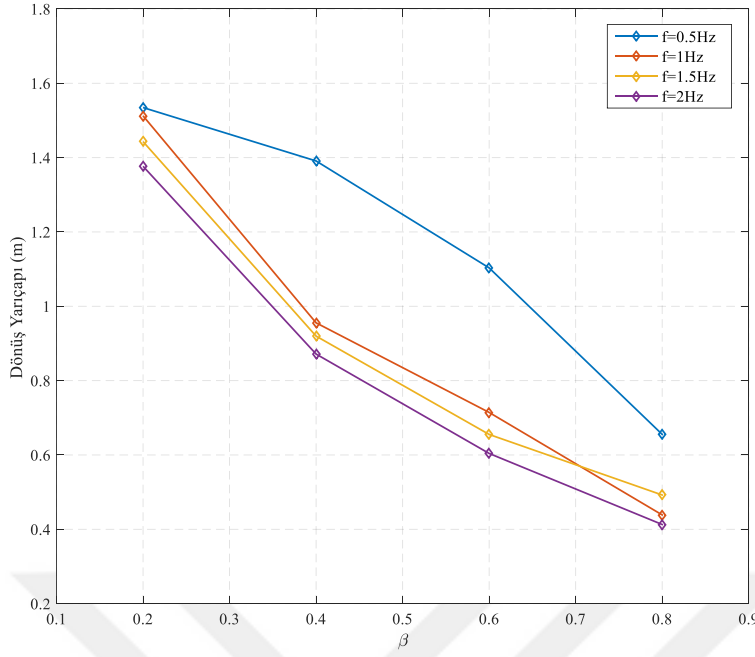


Şekil 6.24. İleri yön deneysel yüzüş görüntüleri için robot balığın yer değişim-zaman grafiği

Şekil 6.22’de görüldüğü gibi robot balığın ileri yön hızı kalıcı durum değerine yaklaşık 4.3sn’de ulaşmıştır. Aynı zamanda Şekil 6.23’deki ivme zaman grafiği incelendiğinde yaklaşık aynı zaman değerinde ivme, hızın belirli bir sınır içinde sabit kalmasından dolayı sıfırın etrafında küçük genliklerle salınmaktadır. Böylece robot balık prototipi 7.6sn sonunda 2.5m yol almıştır.

6.3.2. Robot Balığın Dönüş Hareketi için Açık Çevrim Performansı

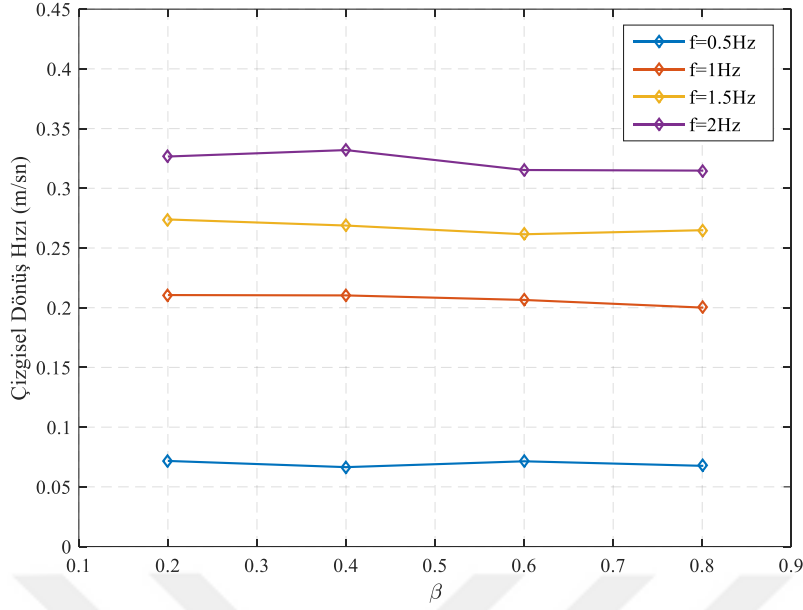
Robot balık prototipi dönüş hareketlerini MÖÜ giriş değişkenlerinden olan ofset (β) parametresi değişimine karşı farklı dönüş yarıçapları ve hızları ile gerçekleştirebilmektedir. Bu bölümde, Şekil 6.2’de gösterilen deneysel çalışma ortamında robot balık prototipinin açık çevrim dönüş hareket kabiliyetleri belirlenen farklı parametre değerlerine göre analiz edilmiştir. Bu analizlerde; tahrikli kuyruk mekanizmasındaki eklem açılarının ofset değişimlerine karşılık farklı frekans değerlerinde robot balığın dönüş yarıçapı ile çizgisel ve açısal hız değişimleri incelenmiştir. Şekil 6.25’de, robot balık prototipinin deneysel havuz ortamında eklem açılarının ofset değişimine göre farklı çırpınma frekans değerleri için prototipin dönüş yarıçapı değişimleri verilmiştir.



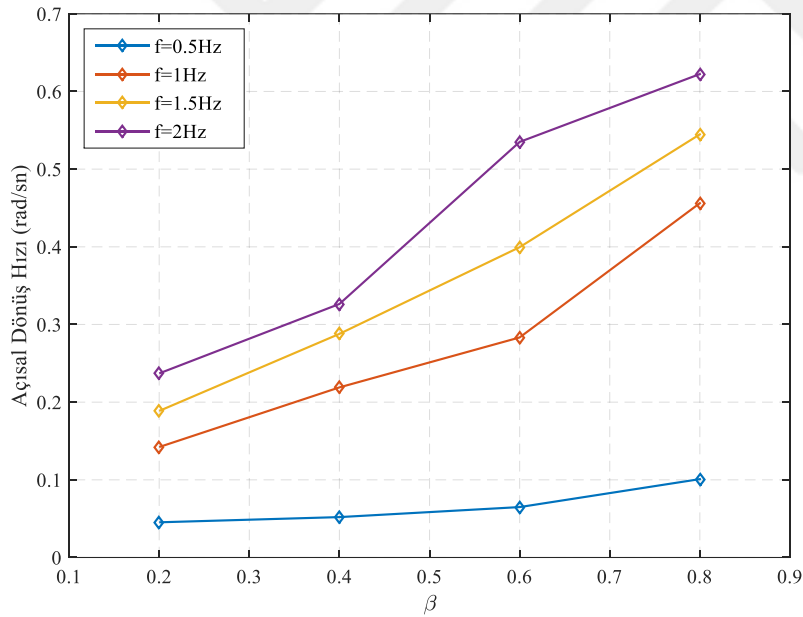
Şekil 6.25. Robot balığın deneysel ortamda ofset değişimine göre farklı çarpınma frekanslarında dönüş yarıçapı değişimi

Robot balığın dönüş hareket analizlerinde sabit frekans değerleri için ofset artışına karşılık dönüş yarıçapının azaldığı görülmektedir. Deneysel çalışmalar $f=[0.5, 1, 1.5, 2]$ Hz olmak üzere dört farklı çarpınma frekansı için gerçekleştirilmiştir. Düşük frekans değerlerinde sabit ofset değerine karşılık daha büyük frekans değerlerine göre dönüş yarıçapının daha büyük olduğu gözlemlenmektedir.

Yukarıda dönüş yarıçapı değişimleri için gerçekleştirilen analizlerden aynı zamanda robot balığın çizgisel ve açısal hız performansları da elde edilmiştir. Farklı frekans değerlerinde ofset değişimine karşılık çizgisel ve açısal hız değişimleri sırasıyla, Şekil 6.26 ve 6.27’de sunulmuştur.



Şekil 6.26. Robot balığın deneysel ortamda farklı ofset değişimine göre farklı çarpınma frekanslarında çizgisel dönüş hızı değişimi



Şekil 6.27. Robot balığın deneysel ortamda ofset değişimine göre farklı çarpınma frekanslarında açısal dönüş hızı değişimi

Şekil 6.26’da görüldüğü gibi, robot balığın dairesel dönüş hareketlerinden elde edilen çizgisel dönüş hız değerleri sabit frekans değerleri için oldukça küçük azalan değişimler göstermektedir. Bu durum sabit genlik ve frekans değerleri için ofset değişimine rağmen çizgisel dönüş hızının da neredeyse sabit kaldığını ifade etmektedir. Şekil 6.27’de aynı analizden elde edilen açısal dönüş hızı değişimi görülmektedir. Çizgisel dönüş hızının aksine

sabit genlik ve frekans değerleri için ofset artışı ile açısal dönüş hızı da artmaktadır. Ofset değerinin artışı robot balığın dönüş hareketinin yatay x eksenine ile yaptığı dönüş açısının artmasına sebep olduğundan hem dönüş yarıçapının azalmasına hem de açısal dönüş hızının artmasına sebep olmaktadır. Aynı zamanda, sabit ofset değerleri için çarpınma frekansının artışı ile çizgisel ve açısal hız değerleri de artmaktadır. Robot balığın minimum dönüş yarıçapı 2Hz çarpınma frekansında 0.4129m, maksimum çizgisel hızı 2Hz çarpınma frekansında 0.3320m/sn ve maksimum açısal hızı 2Hz çarpınma frekansında 0.6224rad/sn olarak elde edilmiştir. Ayrıca, robot balık prototipi için maksimum çizgisel dönüş hızı gövde uzunluğuna göre 0.6640GU/sn olarak hesaplanmıştır.

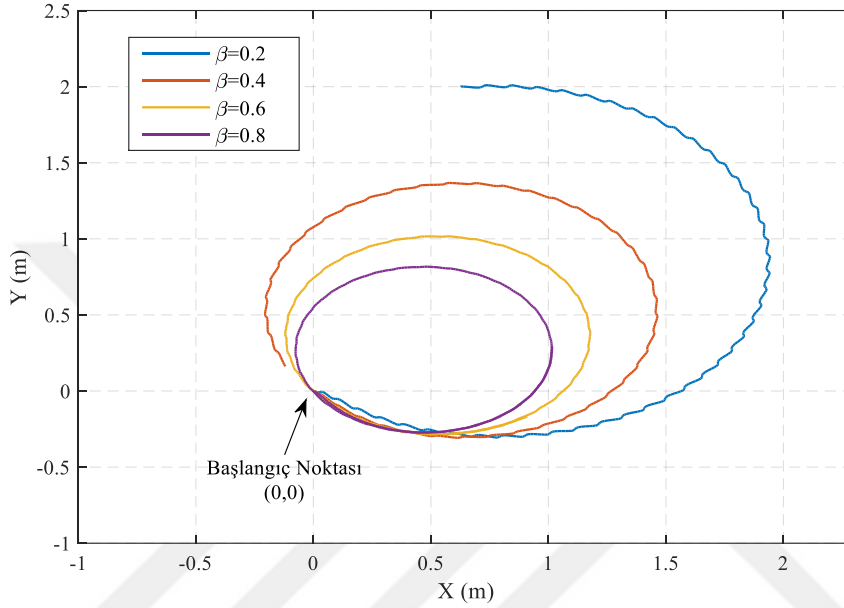
Robot balığın dönüş hareket performansının analizi için yukarıda verilen deneysel çalışmalardan elde edilen dönüş yarıçapı, çizgisel ve açısal hızlarına ait değerler ise detaylı olarak Tablo 6.5’de sunulmuştur.

Tablo 6.5. Robot balığın ofset değişimine göre farklı çarpınma frekanslarında çizgisel dönüş hızı değişimi

A_1	A_2	β	α	γ	ϕ_{12} (°)	τ	f (Hz)	Dönüş Yarıçapı (m)	Çizgisel Dönüş Hızı (m/sn)	Açısal Dönüş Hızı (rad/sn)
10	20	0.2	0.8	0.2	45	0.2339	0.5	1.5347	0.0717	0.0453
10	20	0.4	0.8	0.2	45	0.2339	0.5	1.3910	0.0665	0.0520
10	20	0.6	0.8	0.2	45	0.2339	0.5	1.1033	0.0714	0.0649
10	20	0.8	0.8	0.2	45	0.2339	0.5	0.6554	0.0676	0.1009
10	20	0.2	0.8	0.2	45	0.1169	1	1.5124	0.2106	0.1422
10	20	0.4	0.8	0.2	45	0.1169	1	0.9555	0.2103	0.2190
10	20	0.6	0.8	0.2	45	0.1169	1	0.7144	0.2065	0.2833
10	20	0.8	0.8	0.2	45	0.1169	1	0.4387	0.2001	0.4562
10	20	0.2	0.8	0.2	45	0.0779	1.5	1.4431	0.2739	0.1887
10	20	0.4	0.8	0.2	45	0.0779	1.5	0.9198	0.2688	0.2879
10	20	0.6	0.8	0.2	45	0.0779	1.5	0.6552	0.2615	0.3995
10	20	0.8	0.8	0.2	45	0.0779	1.5	0.4923	0.2649	0.5448
10	20	0.2	0.8	0.2	45	0.0584	2	1.3767	0.3266	0.2370
10	20	0.4	0.8	0.2	45	0.0584	2	0.8715	0.3320	0.3264
10	20	0.6	0.8	0.2	45	0.0584	2	0.6041	0.3153	0.5350
10	20	0.8	0.8	0.2	45	0.0584	2	0.4129	0.3148	0.6224

Bu deneylerde, aynı MÖÜ parametre değişimlerine karşılık robot balığa ait üç farklı performans kriteri değerlendirilmiştir.

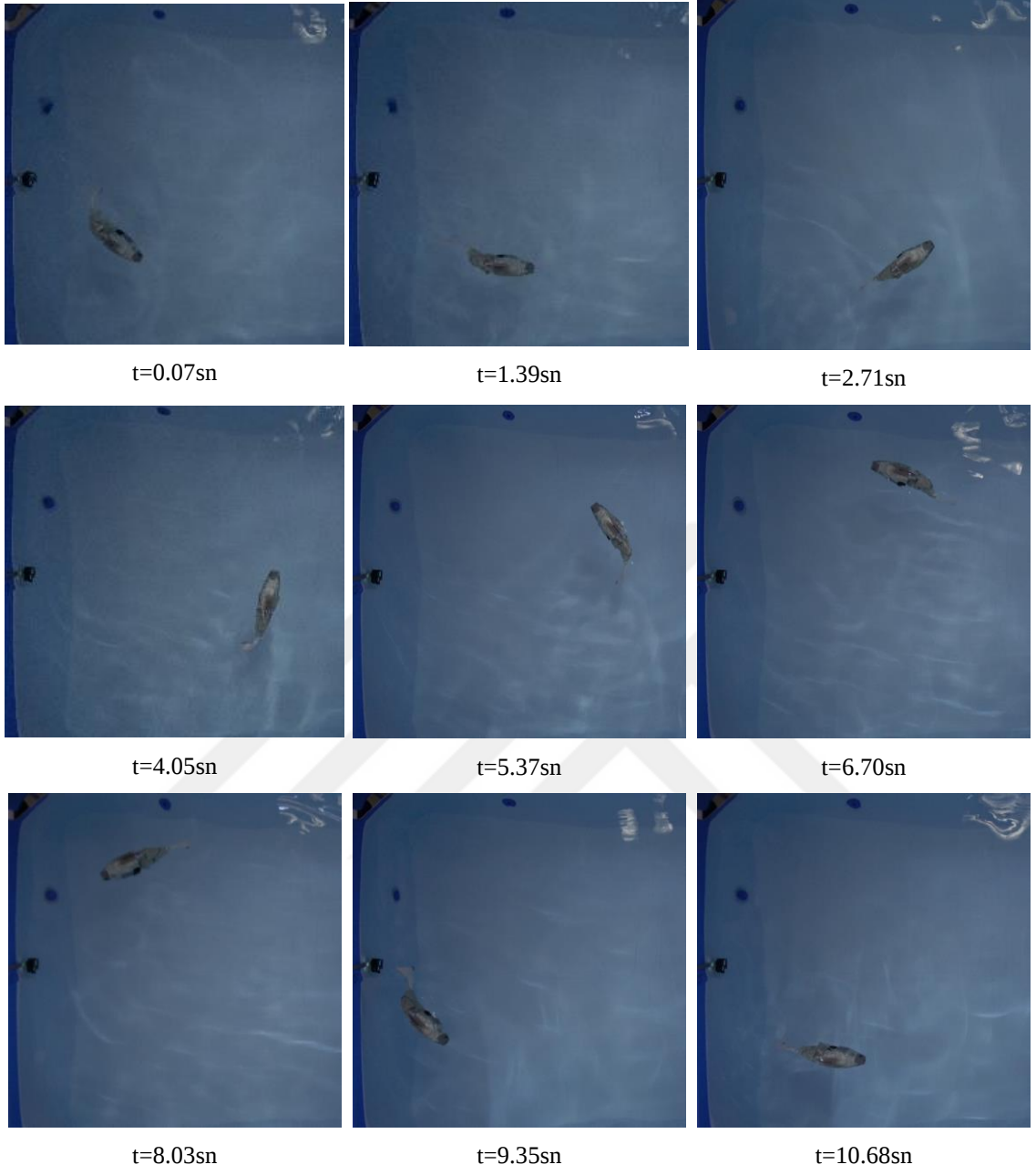
Aynı zamanda, robot balık modelinin dönüş hareketlerinin etkinliği benzetim ortamında sınanmıştır. Bunun için $\beta=[0.2, 0.4, 0.6, 0.8]$ aralığında değiştirilerek robot balığın x-y düzleminde, saat ibresi yönünün tersine dairesel dönüş hareketleri Şekil 6.28’de verilmiştir.



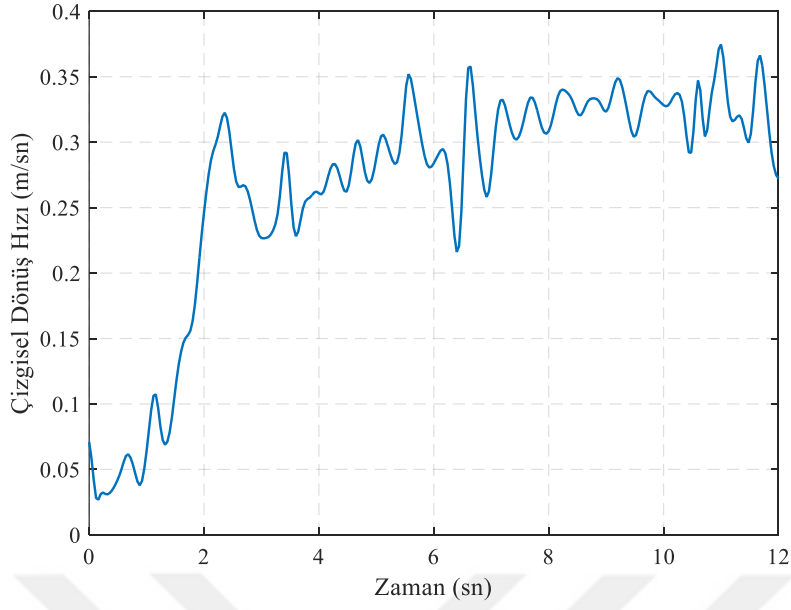
Şekil 6.28. β değişimine bağlı robot balığın dönüş hareketinin benzetim sonuçları

Benzetim sonuçlarına göre, yukarıda verilen β değişiminde robot balığın dönüş yarıçapları sırasıyla 1.1527m, 0.8308m, 0.6464m ve 0.5455m olarak elde edilmiştir.

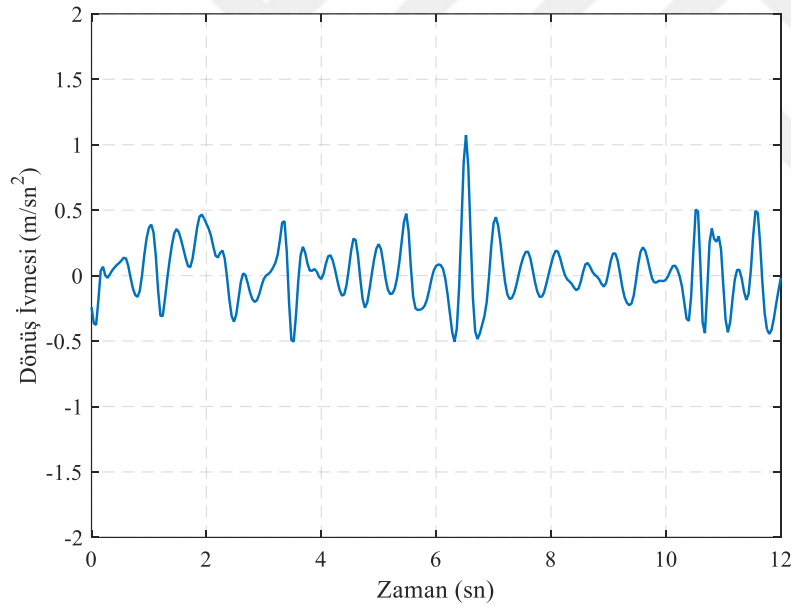
Şekil 6.29’da, robot balığın $f=2\text{Hz}$, $A_1=10$, $A_2=20$, $\beta=0.8$ ve $\alpha=0.8$ parametre değerleri için dönüş hareketine ait deneysel görüntüler verilmiştir. Bu deneye ait çizgisel dönüş hızı, dönüş ivmesi ve yer değişiminin zamana bağlı değişim grafikleri sırasıyla Şekil 6.30, 6.31 ve 6.32’de verilmiştir.



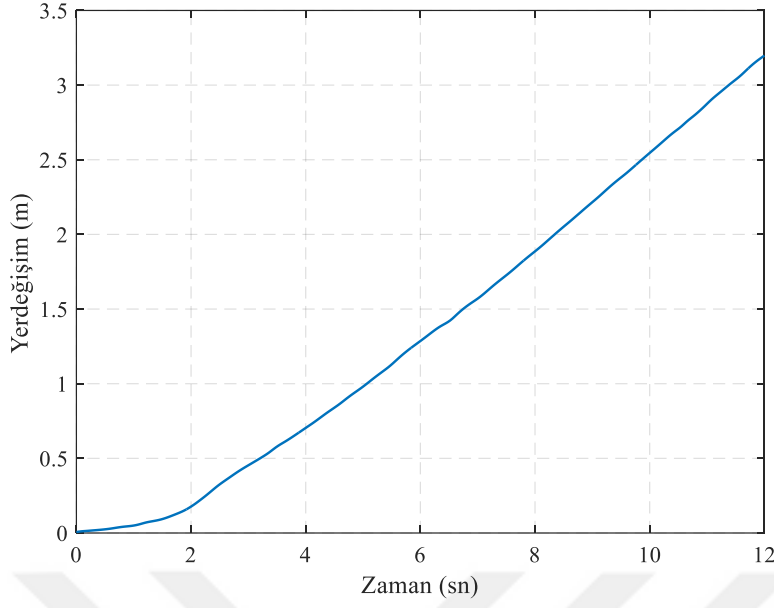
Şekil 6.29. Robot balığın $f=2\text{Hz}$, $A_1=10$, $A_2=20$, $\beta=0.8$ ve $\alpha=0.8$ için deneysel ortamda dönüş hareketi



Şekil 6.30. Robot balığın Şekil 6.29’da görüntüleri verilen deneye ait çizgisel dönüş hızının zamana bağlı değişim grafiği

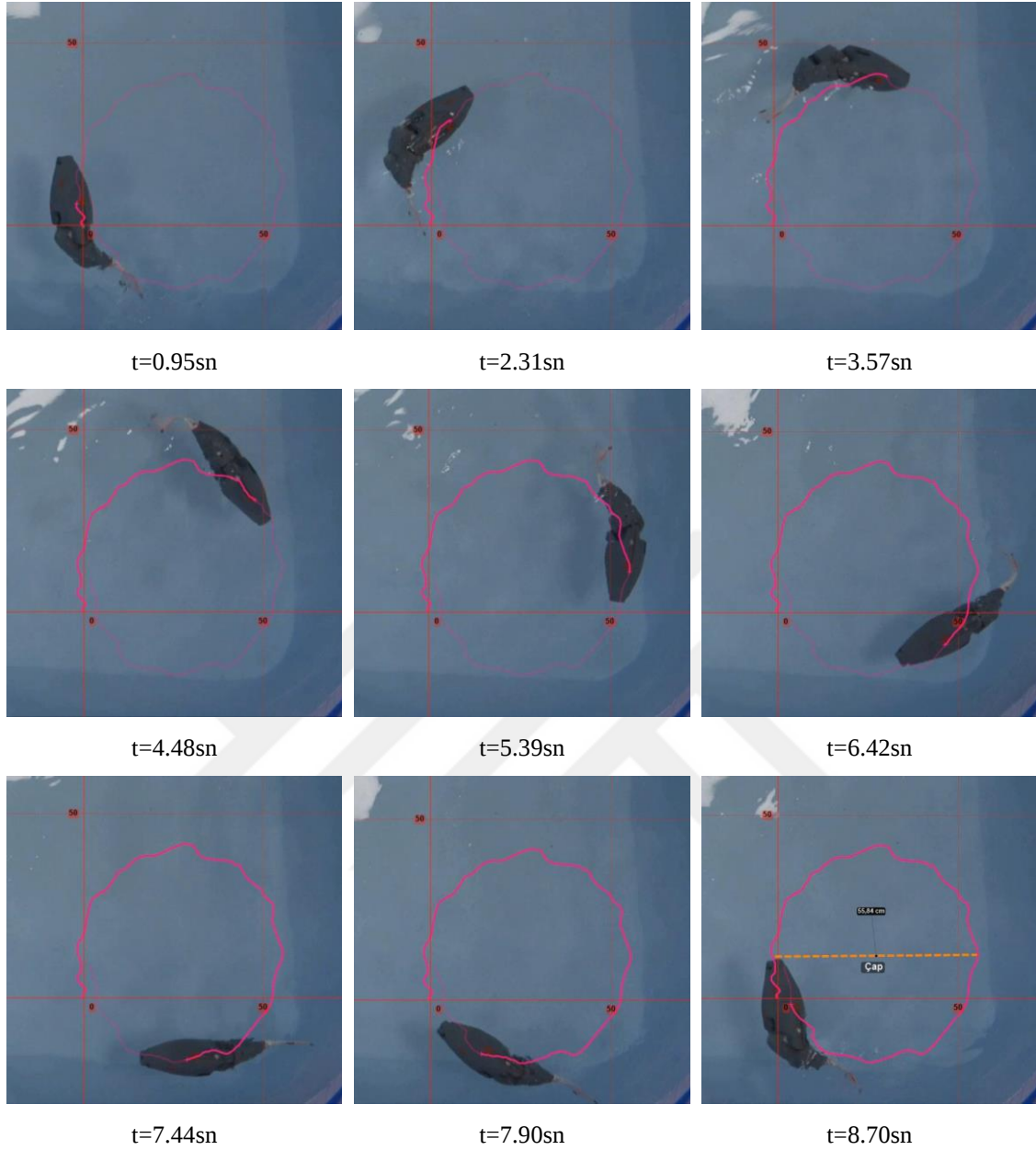


Şekil 6.31. Robot balığın Şekil 6.29’da görüntüleri verilen deneye ait çizgisel dönüş ivmesinin zamana bağlı değişim grafiği



Şekil 6.32. Robot balığın Şekil 6.29’da görüntüleri verilen deneye ait yer değişiminin zamana bağlı grafiği

Robot balık prototipinin Tablo 6.5’de yer alan değerler dışında mekanik sınırlarındaki dönüş hareketinin incelenmesi için $f=1.5\text{Hz}$, $A_1=20$, $A_2=20$, $\beta=0.85$ ve $\alpha=0.8$ parametre değerleri ile dönüş deneyi tekrarlanmıştır. Kullanılan parametre değerleri prototipin mekanik sınır değerlerine yakın olarak seçilmiştir. Bu deneye ait görüntüler Şekil 6.33’de sunulmuştur.



Şekil 6.33. Robot balığın $f=1.5\text{Hz}$, $A_1=20$, $A_2=20$, $\beta=0.85$, $\alpha=0.8$ ve $\gamma=0.2$ için deneysel ortamda dönüş hareketi

Bu deney ile robot balık 0.2792m yarıçap, 0.2343m/sn çizgisel dönüş hızı ve 0.7136rad/sn açısal dönüş hızı ile dairesel dönüş hareketini gerçekleştirmiştir.

6.4. Robot Balığın Duyusal Geri Beslemeli Kapalı Çevrim Denetim Performansı

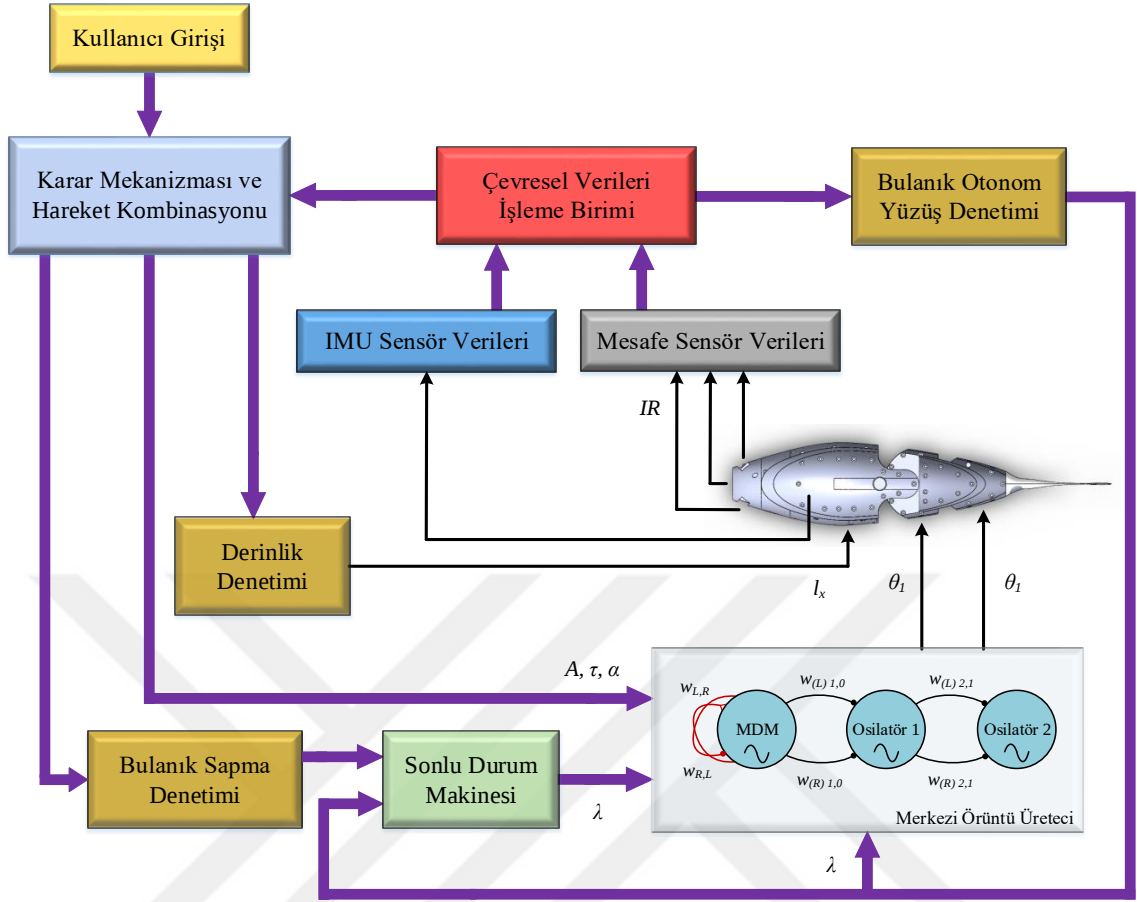
Robot balık prototipinin duyusal geri beslemeli kapalı çevrim denetim performanslarını elde etmek için Şekil 6.34’de blok şeması verilen kapalı çevrim denetim sistemi

kullanılmıştır. Burada üç adet mesafe sensörü ve bir adet IMU sensörü ile robot balıktan engel ve konum verileri alınmaktadır. Bu veriler, çevresel verileri işleme birimi tarafından filtrelenerek anlamlı değerlere dönüştürülmektedir. IMU verileri için Mahony [5] ve mesafe sensör verileri için ise sensörün doğrusal ölçüm aralığını yüzdelik mesafe değerlerine dönüştüren yazılımsal bir filtre kullanılmıştır. Robot balığın engellerden sakınarak otonom olarak yüzebilmesi için kendi içerisinde çevresel verileri işleme biriminden gelen sensör geri besleme verilerinin bulanık denetimi ile kapalı bir döngü oluşturan otonom yüzüş denetimi gerçekleştirilmiştir. Karar mekanizması ve hareket kombinasyonu birimi ise kullanıcı tarafından yapılan görev tanımına göre çevresel verileri işleme biriminden aldığı sensör geri besleme bilgilerini uygun denetim birimlerine iletmektedir ve/veya doğrudan prototipin eklem açılarını üreten MÖÜ'nin giriş parametreleri olan A , τ ve α 'nın uygun değerlerini üretmektedir.

Bulanık sapma ve otonom yüzüş denetleyicileri çıkışında hareket kombinasyonuna göre MÖÜ modelinin λ giriş parametresinin değeri elde edilir. Bu parametre engellerden sakınarak yüzme deneyleri için mesafe sensörlerinden elde edilen engelin uzaklığı ile ilişkili olarak dönme açılarını ve sapma denetimi deneyleri için ise robot balığın dünya eksen takımında uygun sapma açısına göre gerekli dönme açılarını belirler. Her iki denetim çıkışında da MÖÜ modelinin girişi için λ parametresinin farklı değerleri üretildiğinden Sonlu Durum Makinesi (SDM) ile bu denetim çıkışlarının önceliğine karar verilmektedir. Aynı zamanda, SDM ile her iki denetimin birlikte yapılması da sağlanmaktadır. MÖÜ modeli çıkışında ise prototipin eklemlerine uygulanacak servo motor açıları belirlenir.

Üç boyutlu hareket kabiliyetinin sağlanması için derinlik denetimi ile robot balığın ağırlık merkezi denetim mekanizmasındaki hareketli kütlenin konumu değiştirilmektedir. Robot balığın anlık dünya eksen takımındaki dikey konumu IMU sensörü ile belirlenir. Hareketli kütlenin konum denetimi için geleneksel Oransal (P) denetim yapısı kullanılmıştır.

Robot balığın ağırlık merkezi ile kaldırma merkezi dikey ekseninde, aynı doğrultuda ve daha altında dengelenmiştir. Bunun için donanımsal bileşenlerin hacimsel dağılımları yatay ekseninde birbirine simetrik ve dikey ekseninde de ana terminal parçasının alt bölümüne doğru yoğunluk göstermektedir. Şekil 6.35'de görüldüğü gibi, bu dağılım başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir ve yalpalanma hareketi 0° civarında olduğu için denetimi ihmal edilmiştir.



Şekil 6.34. Duyusal geri beslemeli kapalı çevrim denetim sistemi blok şeması



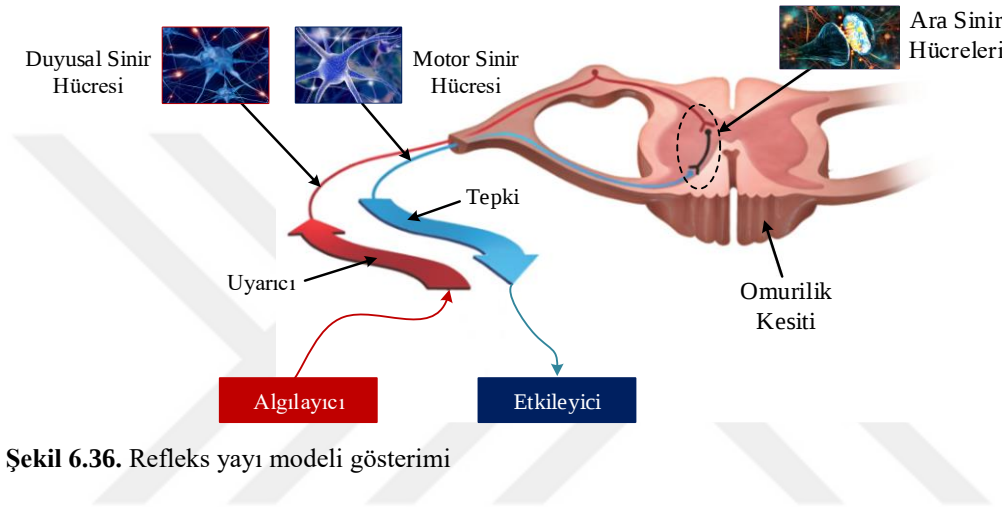
(a)

(b)

Şekil 6.35. Robot balığın su içerisindeki dengesi: (a) Üstten görünüm, (b) Yandan görünüm

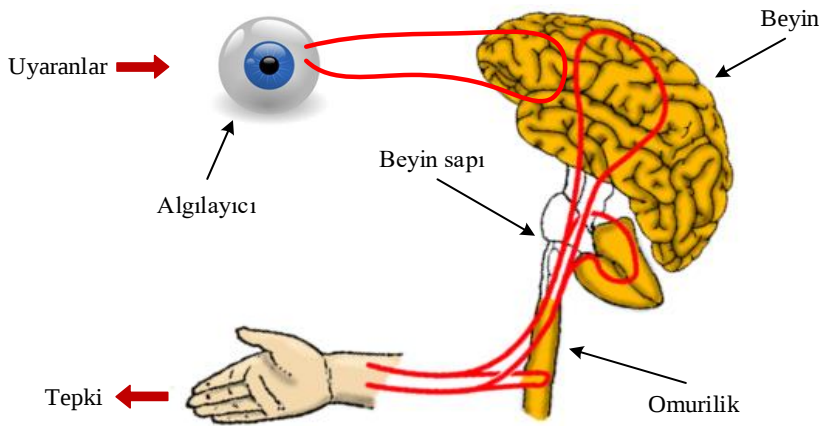
Yukarıda belirtildiği gibi, bulanık denetleyicilerin çıkışı olan λ parametresi MÖÜ modelini duyusal geri beslemeli kapalı çevrim denetim yapısına dönüştürmek için kullanılan gerçek bir Duyusal Sinir Hücresi'nden (DS) ilham alınarak tasarlanan geri besleme sinir hücresinin uyarıcı giriş değeridir. Şekil 6.36'da gösterilen refleks yayı yapısında bulunan DS'ler, uyarılara karşılık bir uyarıcı üretilmesini sağlamaktadır. Refleks yayı canlılarda sadece birkaç sinir hücresi ile refleks reaksiyonlarının gerçekleşmesini sağlayan sinir

modelidir. Refleks yayında algılama, işleme ve tepki üst beyin merkezinden gelen herhangi bir talimata gerek duyulmadan omurilik üzerinde gerçekleşebilmektedir [37]. İlk olarak alıcılar dış uyarıyı algılayarak bu uyarana karşılık bir uyarıcı üretir. Bu uyarıcı, DS'ler ile omurilik ara sinir hücrelerine taşınır. Omurilikte ise bu uyarana karşılık MS ile bir tepki üretilir. Bu döngüye her durumda omurilik ara sinir hücreleri katılmaz. Örneğin canlının bacağına dize gelen ani bir uyarana karşılık, tepki DS'lerin uyarıcıyı doğrudan MS'lere iletmesi ile gerçekleşir.



Şekil 6.36. Refleks yayı modeli gösterimi

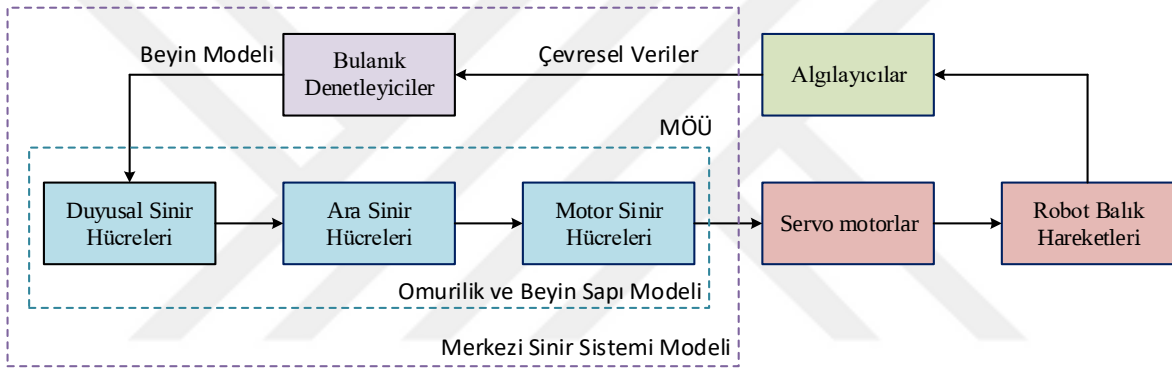
Ancak, canlılarda her tepki üst beyin merkezi olmadan üretilmez. Dış uyarılara karşı alınan bilgi öncelikle üst beyin merkezine aktarılır. Beyin ise bu bilgiyi işleyerek uyarana karşı gerekli tepkiyi üretmesi için omuriliğe komutlar gönderir. Bu işlemin koordine edildiği sinirsel yapı Şekil 6.37'de gösterilen Merkezi Sinir Sistemi'ni (MSS) oluşturmaktadır.



Şekil 6.37. MSS modeli gösterimi

MSS en genel haliyle beyin, omuriliği beyine bağlayan beyin sapı ve omurilikten oluşmaktadır. Omurilik, beyinin ürettiği komutlara karşılık sinir hücreleri ile tepkilerin ve gerekli eylemin gerçekleşmesini sağlar.

Lamprey türü balıkların omuriliklerinde her iki tarafına yerleşmiş DS'ler bulunmaktadır. Bu balık türlerinin sinirsel omurilik yapısından esinlenerek geliştirilen MÖÜ modelinde MDM hariç diğer MÖÜ hücrelerinin hem sol hem de sağ bölümlerine DS hücreleri yerleştirilerek yukarıda anlatılan duyuşal geri beslemeli MÖÜ modeli elde edilmiştir. Aynı zamanda tasarlanan iki farklı bulanık denetleyici ile robot balığın üst beyin merkezi oluşturulmuştur. Böylece, robot balığın istenilen yüzme hareketleri Şekil 6.38'de verilen kapalı çevrim bir MSS modeli ile gerçekleştirilmiş olur.



Şekil 6.38. Kapalı çevrim MSS modeli ve veri akışının gerçekleştirilmesi

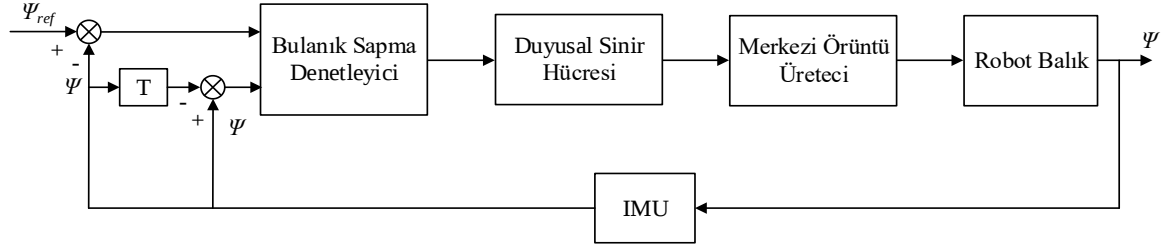
Buna göre, karar mekanizmasının belirlediği hareket yapısı ile robot balık su içerisinde yüzerken bu hareket esnasında sensörler vasıtasıyla elde edilen çevresel veriler gerekli bulanık denetleyici tarafından değerlendirilir ve DS'lerin uyarıcı girişi olan λ parametresine karar verilir. DS'ler ile alınan yorumlanmış uyarıcı MÖÜ modeline aktarılır ve çıkışında robot balığın üreteceği tepki MS'ler vasıtasıyla servo motorlara iletilir. Böylece, istenilen denetim davranışına göre robot balığın yüzüş hareketleri elde edilmiş olur.

Tasarlanan duyuşal geri beslemeli Lamprey MÖÜ osilatöründe, her bir DS hücresi aşağıdaki denklem ile tanımlanır:

$$\begin{cases} \tau_{res} \dot{x}_{(DS)i} = -x_{(DS)i} + p\lambda & \Lambda \leq \lambda \\ \tau_{rec} \dot{x}_{(DS)i} = -x_{(DS)i} & \Lambda > \lambda \end{cases} \quad (6.2)$$

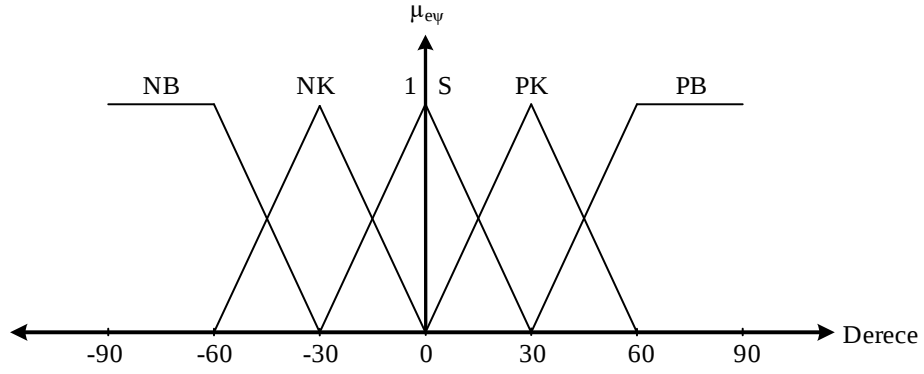
Burada $x_{(DS)i}$ DS hücresinin zar potansiyelini, τ_{res} uyarıcıya karşılık üretilen tepkinin yükselme zaman sabitini, τ_{rec} uyarıcıya karşılık üretilen tepkinin düşme zaman sabitini, p

olan β parametresi elde edilir. Böylece açık çevrim denetim yapısında bahsedilen sapma açısının β 'ya bağlı değişimi kapalı çevrim yapı ile denetlenmektedir.

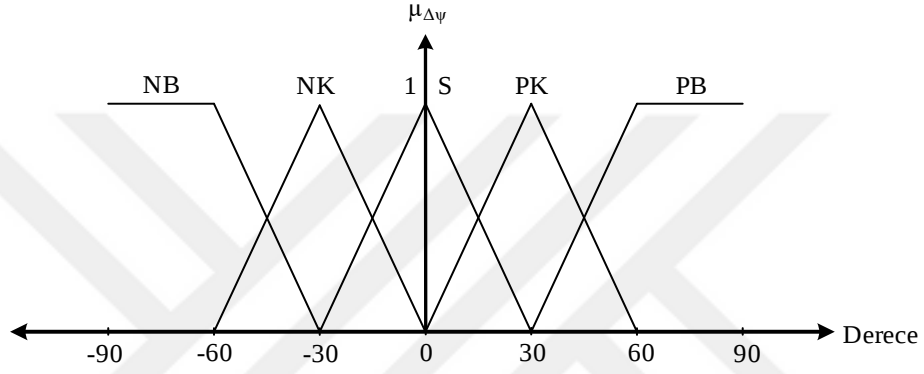


Şekil 6.40. Bulanık denetleyici ile sapma açısının kapalı çevrim denetimi

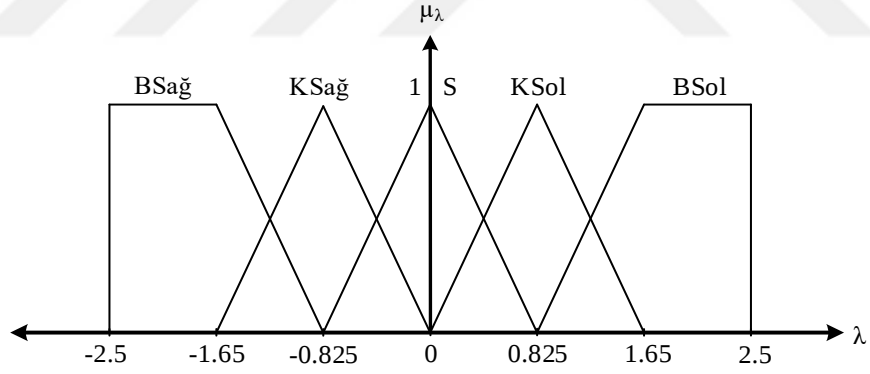
Sistemin yapısına göre bulanık denetleyici olarak Mamdani tipi denetleyici tercih edilmiştir. Bulanık denetleyicinin giriş değişkenleri olarak sapma açısının hatası ve sapma açısının değişimi seçilmiştir. Referans giriş ile robot balığın IMU sensöründen elde edilen eş zamanlı gerçek sapma açısının farkından sapma açısı hatası elde edilir. Daha hızlı tepki üreten bir denetim yapısı için bulanık denetleyicinin ikinci giriş değişkeni olarak hatanın değişimi yerine sistem çıkışının değişimi alınmıştır. Bulanık denetleyicinin bulandırıcıya ait giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları Şekil 6.41’de verilmiştir. Üyelik fonksiyonlarının değer aralıkları robot balığın açık çevrim performanslarından elde edilen karakteristikler kullanılarak belirlenmiştir. Sapma açısının denetimi ileri yön hareket için $[-90 \ 90]^\circ$ aralığında değişeceğinden giriş üyelik fonksiyonları da bu aralıkta tanımlanmıştır. MÖÜ’nün genlik parametreleri $A_1=20$, $A_2=20$, kuyruk çırpınma frekansı $f=1.5\text{Hz}$ için $\tau=0.0779$ ve faz farkı 45° için $\alpha=0.8$ olarak belirlenmiştir. Bu değerlere göre β parametresinin $[-1 \ 1]$ aralığında sınırlandırılabilmesi için robot balığın sapma açısının değişimini sağlayan MÖÜ modelinin giriş değişkeni λ parametresi $[-2.5 \ 2.5]$ aralığında seçilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.41. Sapma açısı denetimi için belirlenen giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları: (a) Hata için giriş üyelik fonksiyonu, (b) Sistem çıkışının değişimi için giriş üyelik fonksiyonu, (c) Çıkış üyelik fonksiyonu

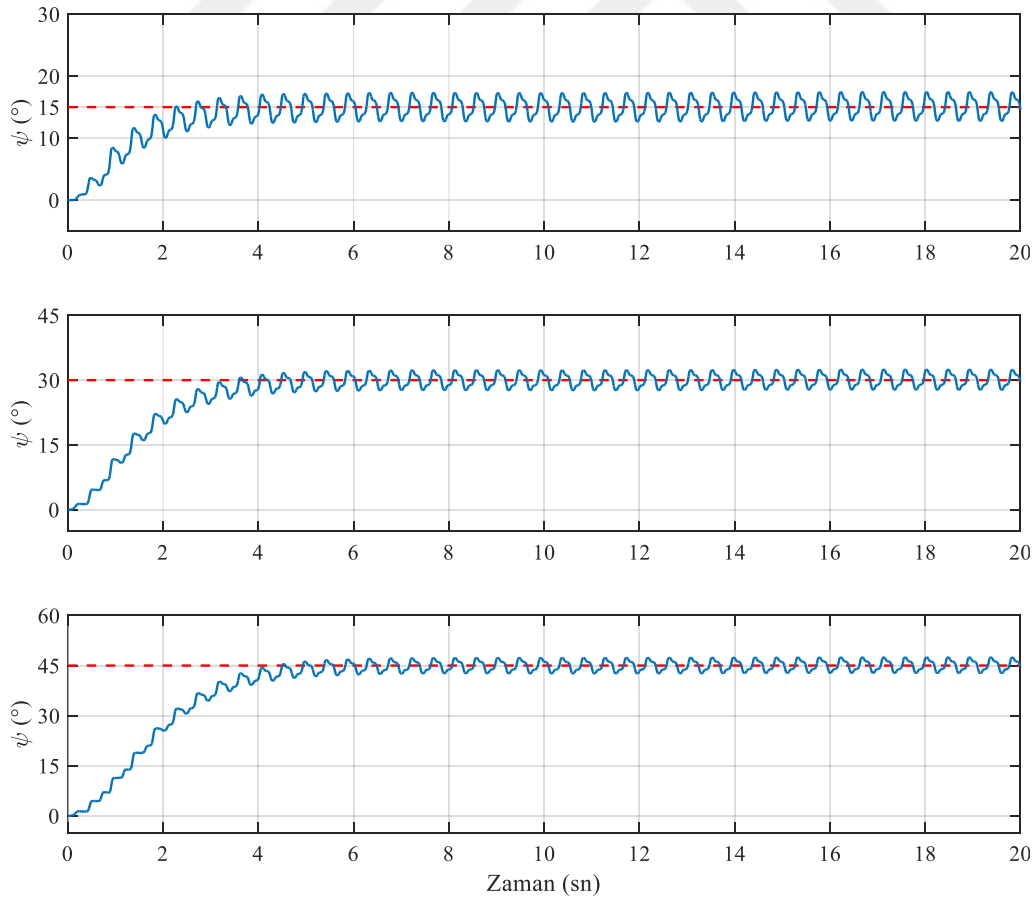
Üyelik fonksiyonlarında kullanılan bulanık kümeler giriş üyelik fonksiyonları için; Negatif Büyük (NB), Negatif Küçük (NK), Sıfır (S), Pozitif Küçük (PK), Pozitif Büyük (PB) ve çıkış üyelik fonksiyonları için; Büyük Sağ (BSağ), Küçük Sağ (KSağ), Sıfır (S), Küçük Sol (KSol), Büyük Sol (BSol) olarak belirlenmiştir. Giriş değişkenlerine göre çıkış değişimi için bulanık denetleyicinin kural tablosu Tablo 6.6’da verilmiştir.

Tablo 6.6. Sapma açısı denetimi için oluşturulan bulanık denetleyici kural tablosu

λ		$\Delta\psi$				
		NB	NK	S	PK	PB
e_ψ	NB	BSağ	BSağ	KSağ	KSol	KSol
	NK	BSağ	KSağ	KSağ	KSol	KSol
	S	KSağ	KSağ	S	KSol	KSol
	PK	BSol	KSol	KSol	KSağ	KSağ
	PB	BSol	KSol	KSol	KSağ	KSağ

Kural tablosundaki kurallar yine robot balığın açık çevrim analizlerinden elde edilen karakteristikler ve denetim hassasiyeti dikkate alınarak belirlenmiştir.

Öncelikle, önerilen denetimin etkinliği üç farklı referans sapma açısı (15° , 30° , 45°) için Şekil 6.42’de gösterildiği gibi benzetim ortamında sınanmıştır. Benzetim sonuçları incelendiğinde, tasarlanan denetleyicinin başarımı gözlemlenmiştir.

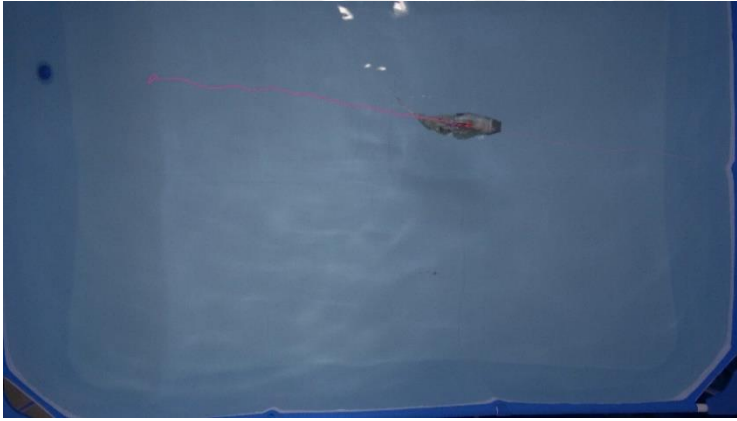


Şekil 6.42. $\psi_{ref}=[15, 30, 45]^\circ$ için robot balığın sapma açısı denetiminin benzetim sonuçları

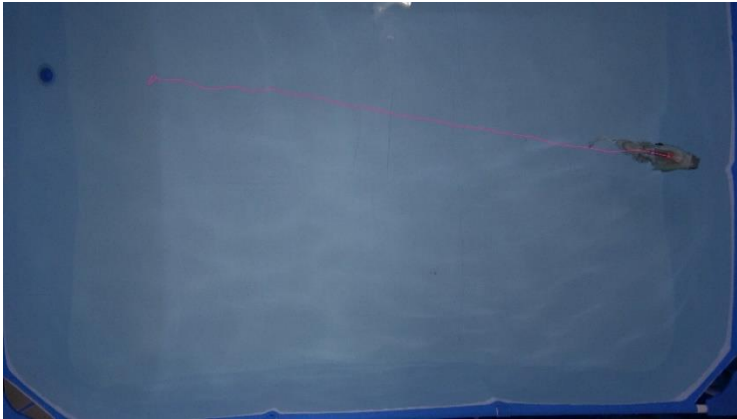
Robot balığın sapma denetimi deneyleri ise benzetim çalışmalarında belirlendiği gibi üç farklı referans sapma açısı (15° , 30° , 45°) için gerçekleştirilmiştir. Bu deneylere ait görüntüler sırasıyla Şekil 6.43, 6.44 ve 6.45’de sunulmuştur.



t=0.43sn



t=4.80sn



t=7.92sn

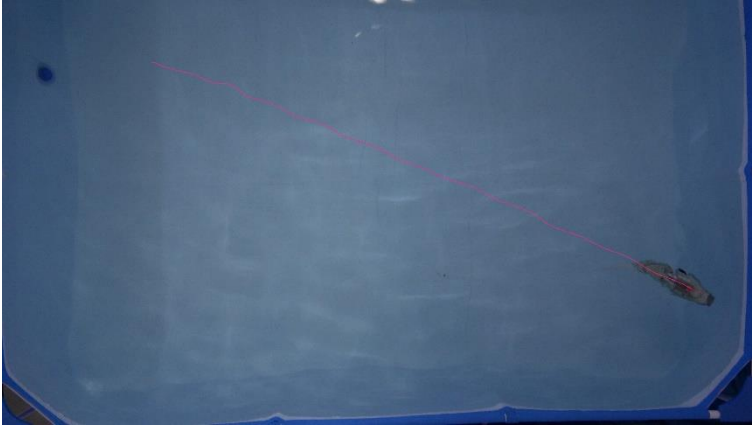
Şekil 6.43. 15° sapma açısı referansı için kapalı çevrim denetimin deneysel görüntüleri



$t=0.67\text{sn}$



$t=3.96\text{sn}$



$t=7.89\text{sn}$

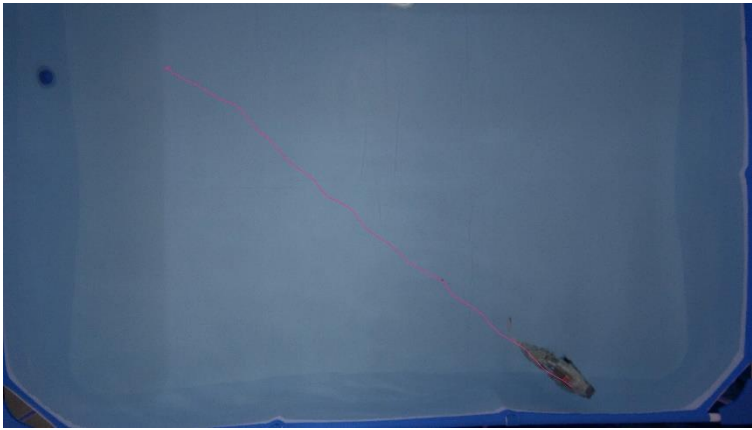
Şekil 6.44. 30° sapma açısı referansı için kapalı çevrim denetimin deneysel görüntüleri



$t=0.34\text{sn}$



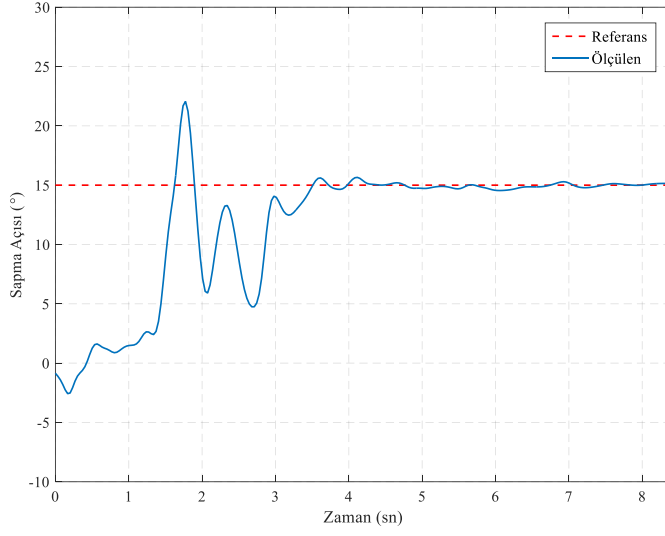
$t=4.13\text{sn}$



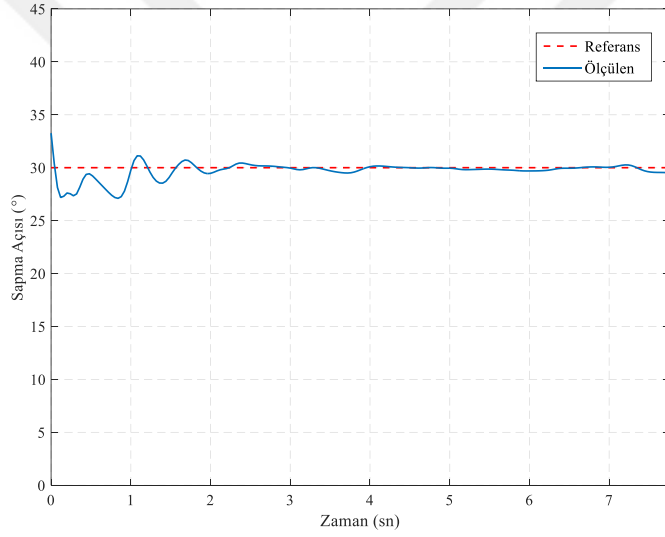
$t=7.04\text{sn}$

Şekil 6.45. 45° sapma açısı referansı için kapalı çevrim denetimin deneysel görüntüleri

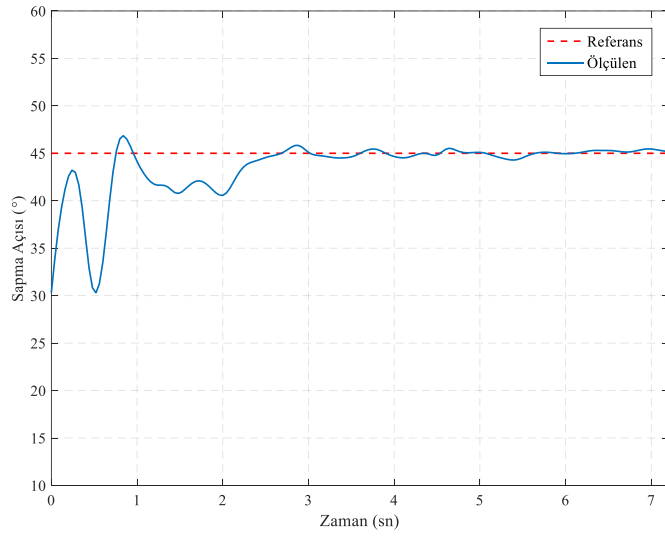
Üç farklı sapma açılarının referans giriş değişkenine göre zamana bağlı değişimleri Kinovea programı ile elde edilen x ve y eksenlerindeki konum değişimleri ile Denklem (6.1) kullanılarak hesaplanmıştır ve Şekil 6.46’da verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

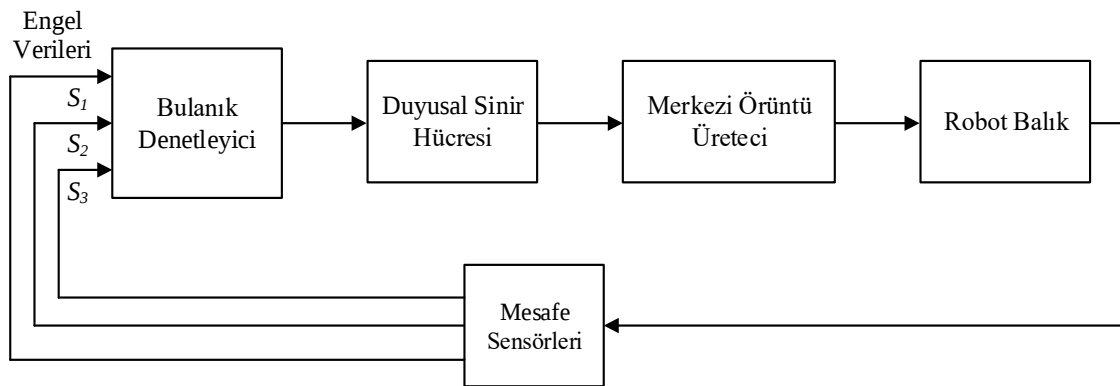
Şekil 6.46. Sapma açılarının zamana bağlı değişimi: (a) $\psi_{ref}=15^\circ$, (b) $\psi_{ref}=30^\circ$, (c) $\psi_{ref}=45^\circ$

Şekil 6.46’da görüldüğü gibi, robot balığın sapma açısı istenilen referans giriş değerlerine ulaşarak küçük salınımlar ile referans giriş değerlerinde kalmaktadır. Bu sonuçlar incelendiğinde, bulanık denetleyicinin sapma denetim performansının oldukça iyi olduğu görülmektedir.

6.4.2. Robot Balığın Otonom Kapalı Çevrim Denetimi

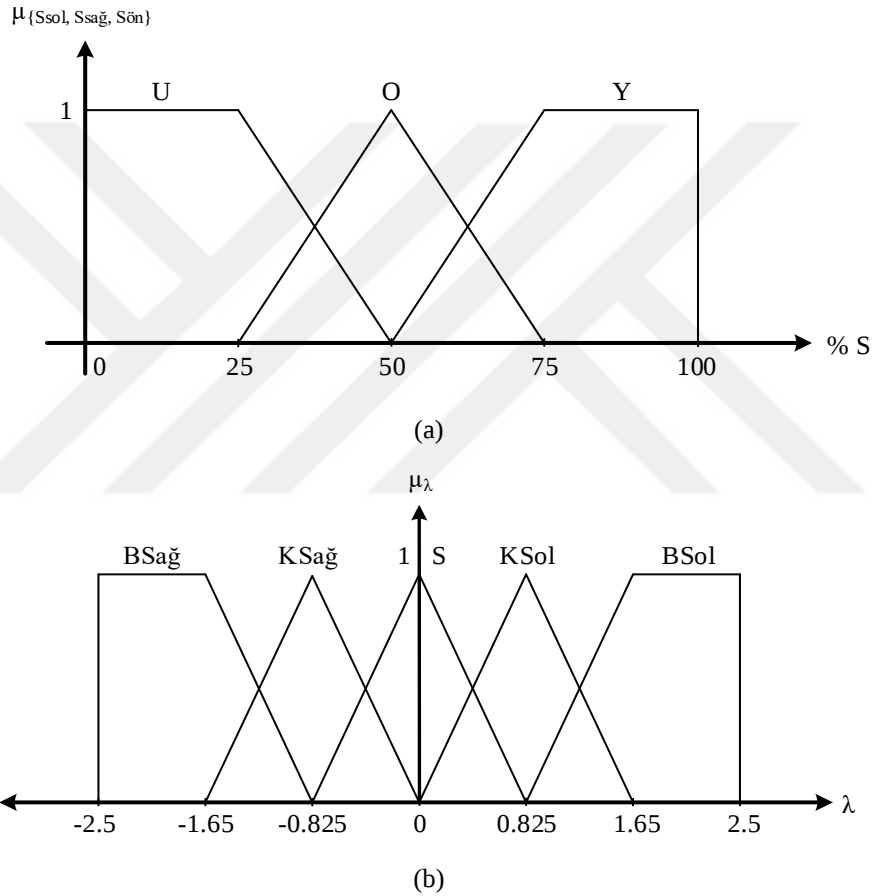
Karar mekanizması tarafından hareket kombinasyonu belirlenen robot balık, burun kısmında yer alan sol, sağ ve öndeki mesafe sensörlerinden aldığı engel bilgilerine bağlı olarak otonom hareket kabiliyetine sahiptir. Robot balığın engellerden sakınarak otonom olarak hareketinin kapalı çevrim denetimini içeren blok şeması Şekil 6.47’de gösterilmiştir. Sensörlerden elde edilen mesafe verilerinin doğrusal ölçüm aralığı 6-60cm olarak belirlenmiştir. Ön sensörün konumu x eksenine aynı doğrultuda merkezlenerek sol ve sağ burun sensörleri, ön sensör ile 45° ’lik açısal aralıklar ile konumlandırılmıştır. S_1 , S_2 ve S_3 sırasıyla sol, ön ve sağ bölümdeki mesafe sensörleri olmak üzere deneysel analizler sonucu her sensörün engeli tarama açısının yaklaşık olarak 40° olduğu saptanmıştır.

Sensörlerden gelen engel verilerinin yüzdeleri bulanık denetleyicinin giriş değişkenlerini oluşturmaktadır. Bulanık denetleyici çıkışında DS’nin girişi olan λ parametresi belirlenmektedir. DS’nin çıkışında ise MÖÜ modelinin ofset değeri olan β parametresi elde edilir. Böylece, engelin mesafesine bağlı olarak robot balığın gerçekleştirmesi gereken manevraya uygun β değeri elde edilmektedir. Bu yapı robot balık prototipinin engellerden sakınarak otonom bir şekilde yüzmesini sağlar.



Şekil 6.47. Bulanık denetleyici ile robot balığın otonom kapalı çevrim denetimi

Sistemin yapısına göre bulanık denetleyici olarak Mamdani tipi tercih edilmiştir. Bulanık denetleyicinin bulandırıcıya ait giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları Şekil 6.48’de verilmiştir. Giriş üyelik fonksiyonları engel mesafesinin yüzdelik değerlerine bağlı olarak Uzak (U), Orta (O) ve Yakın (Y) olan bulanık kümeler ile tanımlanmıştır. Çıkış üyelik fonksiyonu sapma açısının denetimi için kullanılan çıkış üyelik fonksiyonuyla aynı yapıya sahiptir. MÖÜ’nün genlik parametreleri $A_1=20$, $A_2=20$, kuyruk çarpınma frekansı $f=1.5\text{Hz}$ için $\tau=0.0779$ ve faz farkı 45° için $\alpha=0.8$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.48. Otonom yüzüş denetimi için belirlenen giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları: (a) Engel mesafe bilgileri için giriş üyelik fonksiyonları, (b) Çıkış üyelik fonksiyonları

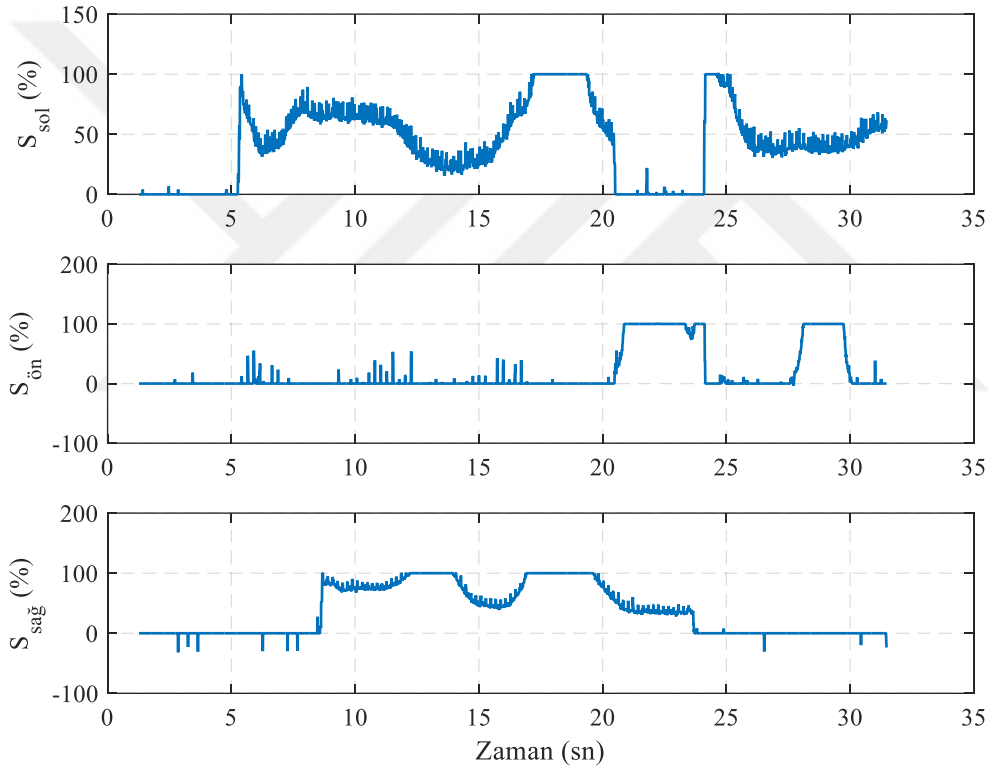
Giriş değişkenlerine göre çıkış değişimi için bulanık denetleyicinin kural tablosu ise Tablo 6.7’de sunulmuştur.

Tablo 6.7. Engellerden sakınarak otonom yüzüş denetimi için oluşturulan bulanık denetleyici kural tablosu

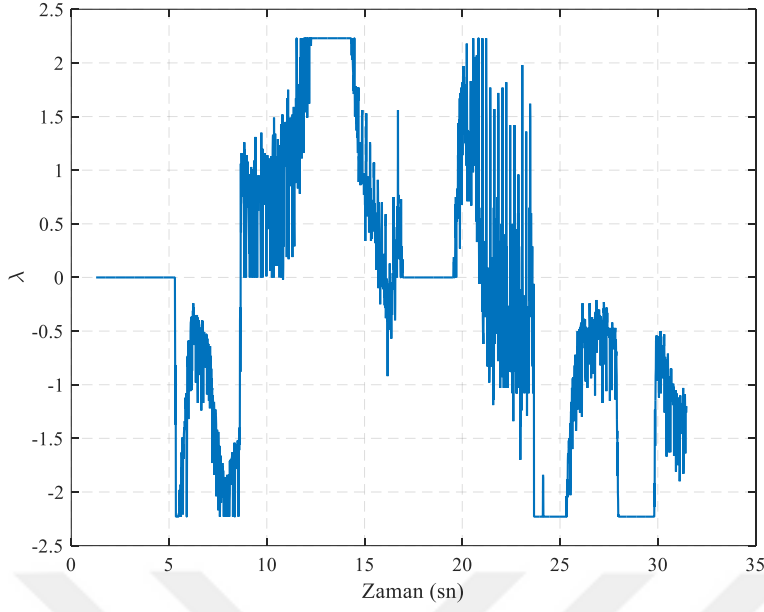
Kural No	Girişler			Çıkış
	S_{sol}	$S_{sağ}$	$S_{ön}$	λ
1	U	U	U	S
2	U	U	O	BSağ
3	U	U	Y	BSağ
4	U	O	U	KSol
5	U	O	O	BSol
6	U	O	Y	BSol
7	U	Y	U	BSol
8	U	Y	O	BSol
9	U	Y	Y	BSol
10	O	U	U	KSağ
11	O	U	O	BSağ
12	O	U	Y	BSağ
13	O	O	U	S
14	O	O	O	BSol
15	O	O	Y	BSol
16	O	Y	U	BSol
17	O	Y	O	BSol
18	O	Y	Y	BSol
19	Y	U	U	BSağ
20	Y	U	O	BSağ
21	Y	U	Y	BSağ
22	Y	O	U	KSağ
23	Y	O	O	BSağ
24	Y	O	Y	BSağ
25	Y	Y	U	S
26	Y	Y	O	BSol
27	Y	Y	Y	BSol

Otonom yüzüş denetimi için oluşturulan kural tablosundaki kurallar robot balığın açık çevrim analizlerinden elde edilen karakteristikleri ve denetim hassasiyeti dikkate alınarak belirlenmiştir.

Şekil 6.47’de verilen kapalı çevrim denetim yapısının analizi için 30sn süre boyunca rastgele engeller üretilmiştir. Mesafe sensörlerinin karşılaştıkları bu engeller için ürettikleri ve aynı zamanda bulanık denetleyicinin de giriş değişkenleri olan yüzdelik mesafe ölçümleri Şekil 6.49’da gösterilmiştir. Engellerin durumlarına bağlı olarak bulanık denetleyici çıkışından elde edilen ve aynı zamanda DS giriş değişkeni olan λ parametresinin değişimi Şekil 6.50’de sunulmuştur.

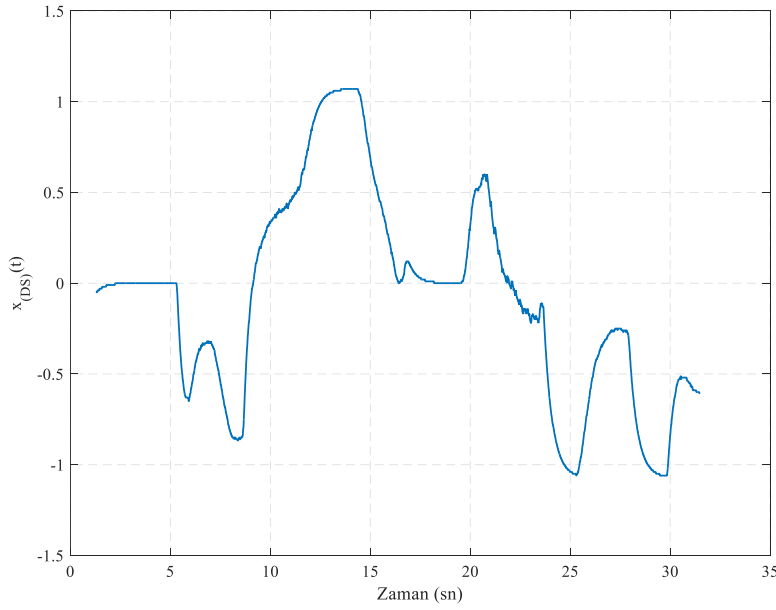


Şekil 6.49. Rasgele üretilen engeller için mesafe sensörlerinden elde edilen yüzdelik mesafe verileri

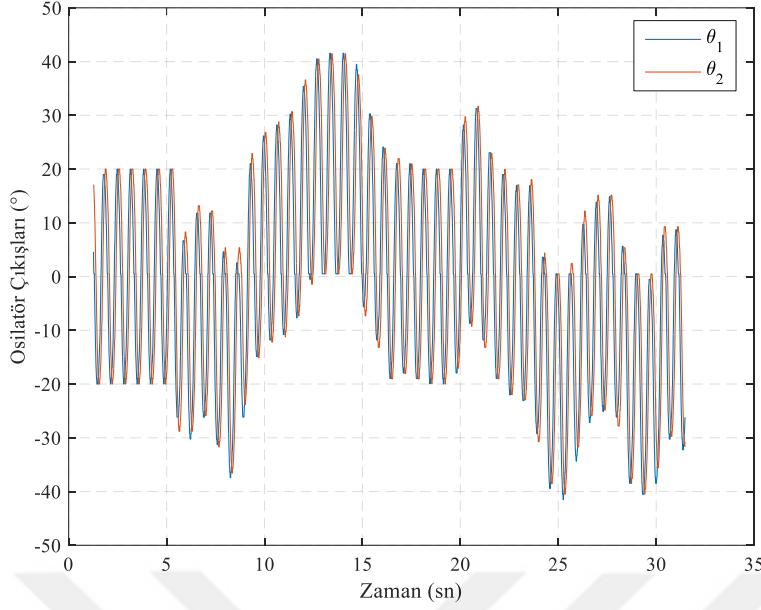


Şekil 6.50. Rasgele üretilen engeller için bulanık denetleyicinin çıkışı

Bulanık denetleyici çıkışında üretilen uyarıcı λ değerine karşılık DS'nin sahip olacağı zar potansiyeli Şekil 6.51'de verilmiştir. Bu hücre çıkışı aynı zamanda MÖÜ modelinin giriş değişkenidir. Bu giriş değişkenine karşılık üretilen osilatör çıkışları ise Şekil 6.52'de gösterilmiştir. Osilatör çıkışları aynı zamanda robot balığın hareketlerini oluşturan eklem açılarını verir.



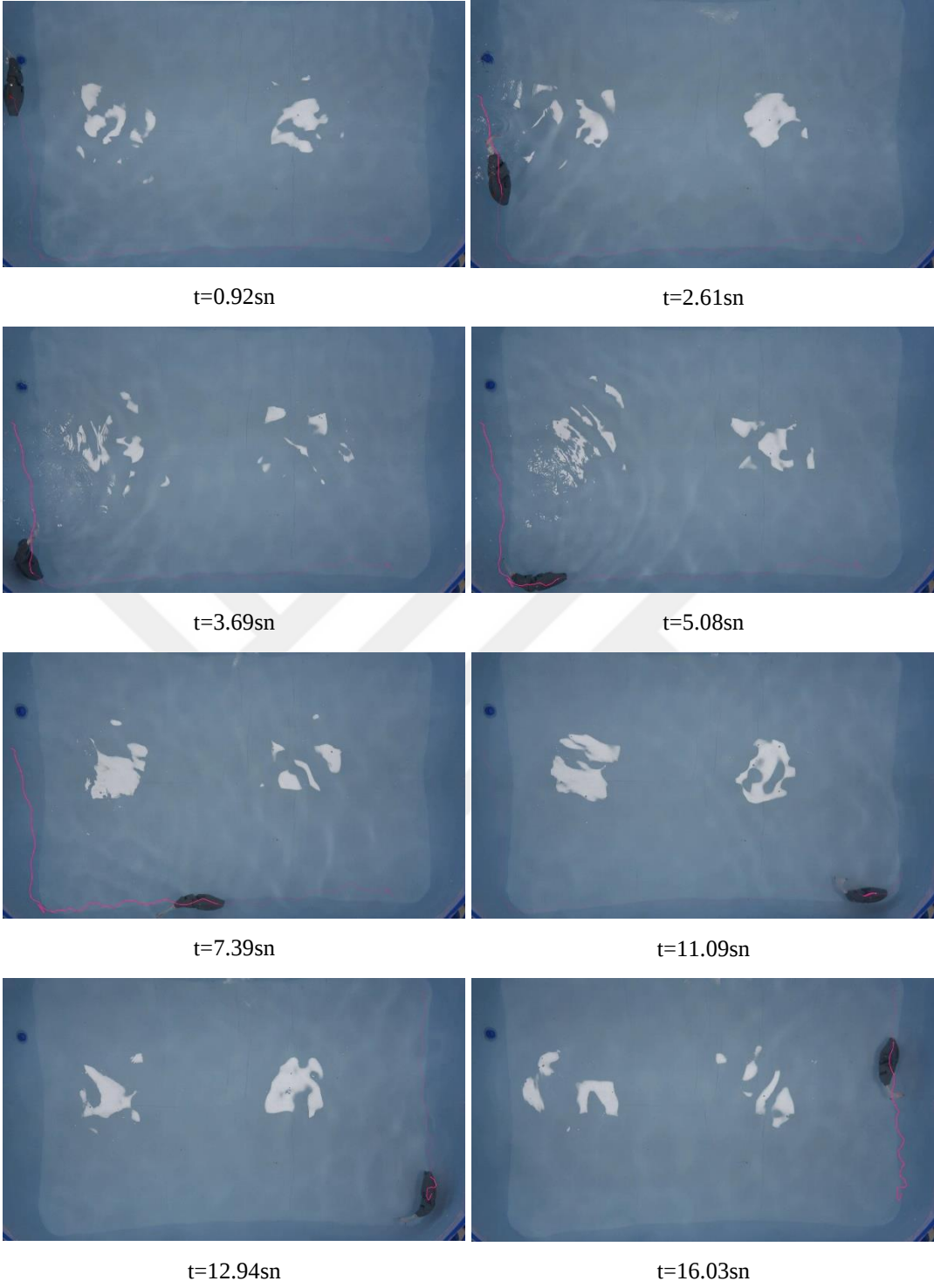
Şekil 6.51. Rastgele üretilen engeller için duyuşal sinir hücresinin zar potansiyeli



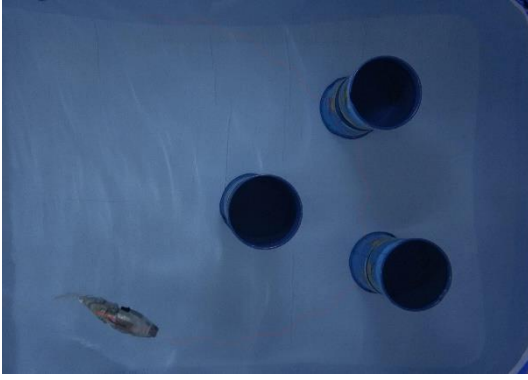
Şekil 6.52. Rastgele üretilen engeller için osilatör çıkışları

Ayrıca, robot balığın engellerden sakınarak yüzme deneyleri için üç farklı senaryo oluşturulmuştur. Birinci senaryoda robot balık havuzun sol üst kenarına yakın bir şekilde konumlandırılmıştır. Robot balık, karar mekanizması ve hareket kombinasyonu birimi tarafından belirlenen ileri yön yüzüş hareketini gerçekleştirirken havuz kenarlarını ön ve sağ mesafe sensörleri ile algılayıp kenarlara çarpmadan düz yüzüş hareketini gerçekleştirmektedir. Böylece engellerden sakınarak başlangıç noktasından bitiş noktasına kadar bir ‘U’ hareketi ile yol almıştır. İkinci senaryoda, üç adet dairesel engel bir üçgenin köşelerini oluşturacak şekilde havuzun içine rasgele yerleştirilmiştir. Böylece robot balık rastgele yüzme hareketleriyle ilerlerken doğal bir ortamda karşılaşması muhtemel birbirine yakın engellerin bulunduğu bir senaryo oluşturulmuştur. Üçüncü senaryo ise robot balığın klasik su altı araçları ve insanların giremeyeceği dar ve ulaşılması zor bölgelerdeki hareket kabiliyetini göstermek için tasarlanmıştır. Bunun için robot balık üç adet dairesel engel ile oluşturulan dar bir alandan engellere çarpmadan geçmeye zorlanmıştır.

Bu üç senaryo için tepe kamerasından elde edilen video görüntüleri Kinovea programına aktararak robot balık prototipi üzerinde işaretlenen bölgenin izlediği yollar bulunmuştur. Kinovea programında analiz edilen video görüntüleri MATLAB ortamında deney zamanlarına bağlı olarak belirlenen örnekleme periyotlarına göre ardışıl anlık görüntülere dönüştürülmüştür. Bu senaryolara ait deney görüntüleri sırasıyla $t=16.03\text{sn}$, $t=7.83\text{sn}$ ve $t=8.44\text{sn}$ ’lik süreler için Şekil 6.53, 6.54 ve 6.55’de sunulmuştur.



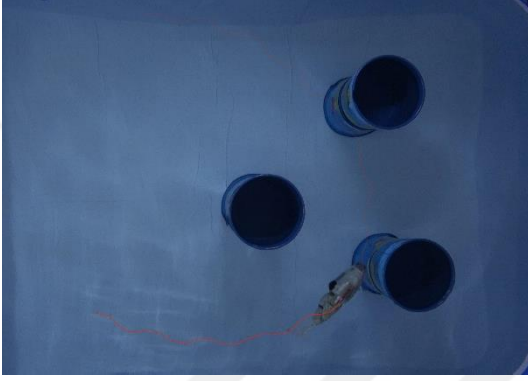
Şekil 6.53. Birinci senaryoya ait otonom yüzüş deney görüntüleri



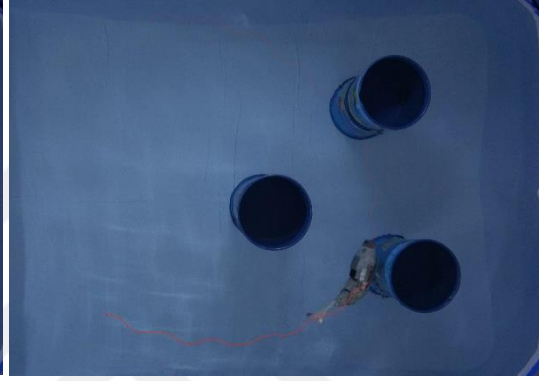
t=0.00sn



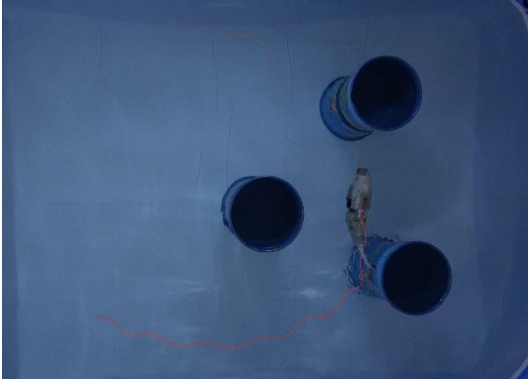
t=2.37sn



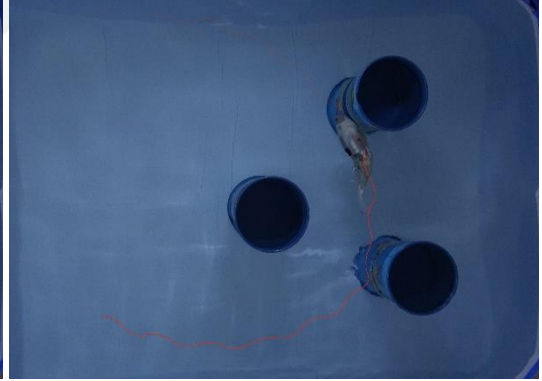
t=3.70sn



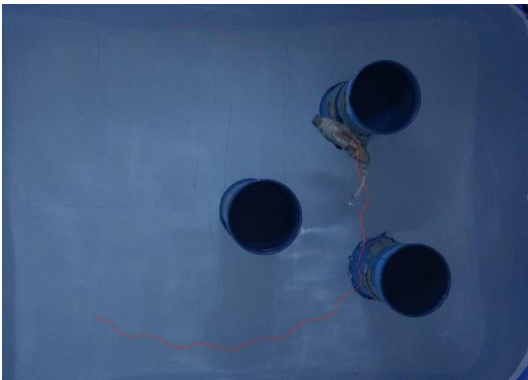
t=4.07sn



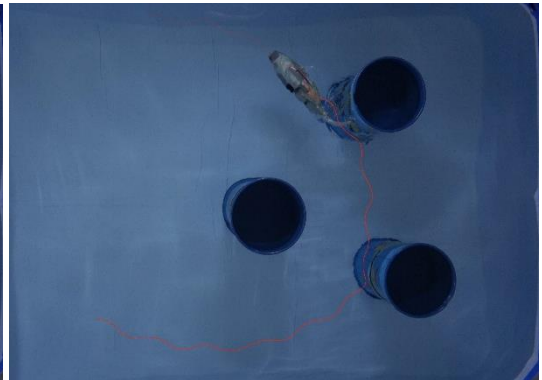
t=5.40sn



t=6.36sn

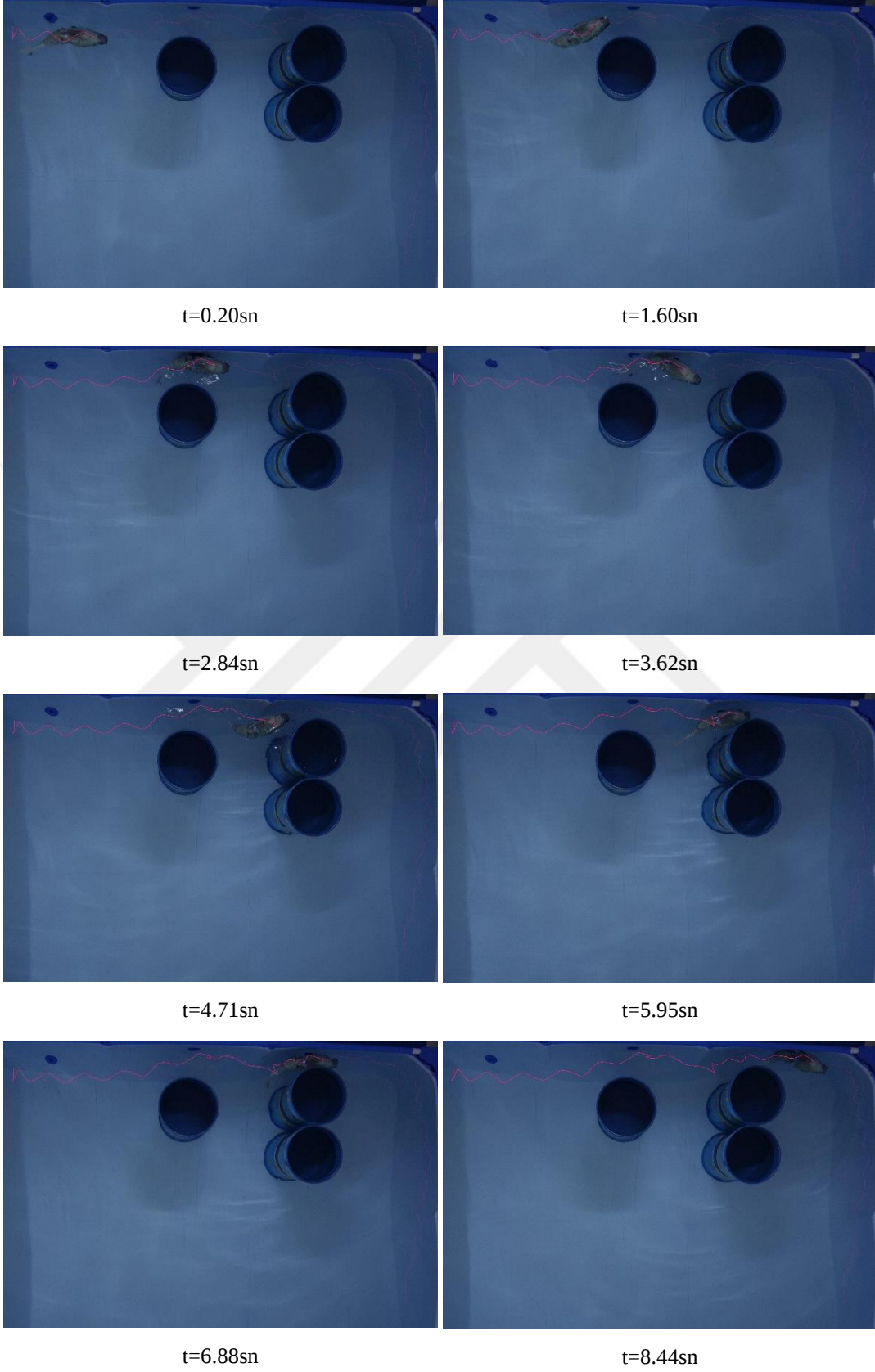


t=6.58sn



t=7.83sn

Şekil 6.54. İkinci senaryoya ait otonom yüzüş deney görüntüleri



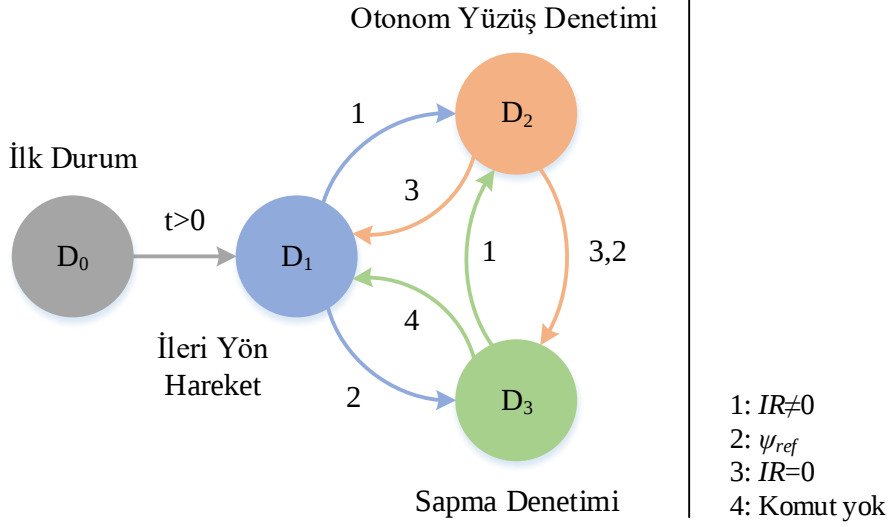
Şekil 6.55. Üçüncü senaryoya ait otonom yüzüş deney görüntüleri

Farklı engel dizilimleri ile oluşturulan üç farklı senaryo için robot balık prototipinin otonom olarak yüzme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylere ait sonuçlar değerlendirildiğinde tasarlanan denetim yapısının oldukça etkin olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında robot balığın doğal bir ortamda yüzebilmesi için bir zemin oluşturulmuştur.

6.4.3. Robot Balığın Engellerden Sakınarak Kapalı Çevrim Sapma Denetimi

Kullanıcı girişi ile tanımlanan herhangi bir görev robot balık prototipi tarafından gerçekleştirilirken prototipin karşılaşacağı olası bir engel durumunda görev önceliği prototipin bu engele çarpmadan engeli geçmesidir. Engel aşıldıktan sonra robot balığın kullanıcı tarafından verilen görevi yerine getirmeye devam etmesi gerekir. Böylece robot balık verilen görevi yerine getirirken doğal ortamda karşılaşabileceği engellere karşı da tepki üreterek görev tanımı ile birlikte otonom yüzüş denetimini sağlamış olur. Şekil 6.34’de kapalı çevrim blok şeması verilen denetim yapısında yer alan SDM ile hem kullanıcı tarafından tanımlanan hem de robotun otonom yüzüşünün gerekliliğinden gelen görev önceliğine karar verilmektedir. Aynı zamanda bu görevlerin aynı döngü içinde yapılması da bu yapı ile sağlanmaktadır.

Bu durumu analiz etmek için kullanıcı tarafından tanımlanan görev sapma denetimi olarak belirlenmiştir. Bu denetim gerçekleştirilirken robot balığın engellerle karşılaşmasını sağlayacak iki farklı senaryo oluşturulmuştur. Şekil 6.56’da bu analiz için tasarlanmış SDM’nin çevrim yapısı verilmiştir. Buna göre, D_0 robot balığın başlangıç anındaki durumunu, D_1 herhangi bir görev tanımlanmadığı sürece ileri yön hareketini, D_2 engellerden sakınarak yüzebilme kabiliyeti olarak tanımlanan otonom yüzüş denetimini ve D_3 bu analiz için kullanıcı tarafından tanımlanan sapma denetimi görevini temsil etmektedir. Çevrim üzerinde yer alan değerler karşılaşılabilecek durumlara göre birbirleri arasındaki geçişin hangi şartlarda olacağını gösterir.



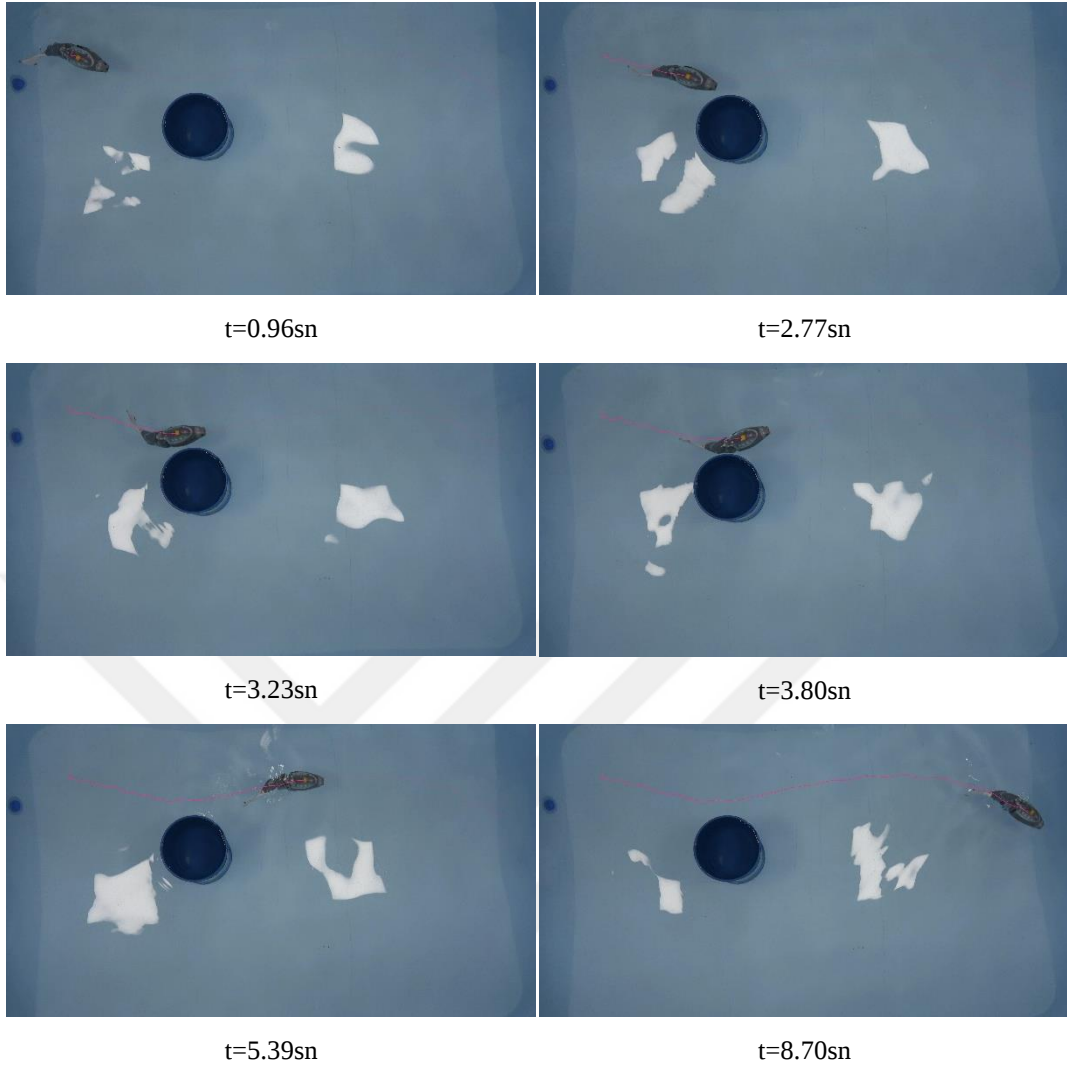
Şekil 6.56. Geliştirilen SDM yapısı

Şekil 6.56’da verilen SDM’de, IR parametresi robot balığın mesafe sensörlerinde herhangi bir engel bilgisinin olup olmadığını tanımlamaktadır. IR değerinin sıfır olmadığı durumlar robot balığın yüzdüğü ortamda bir engel ile karşılaştığını gösterir. Aynı zamanda IR ’nin değeri engel ile olan mesafenin vektörel büyüklüğünü de vermektedir. Bu parametre Denklem 6.3 ile aşağıdaki gibi tanımlanır:

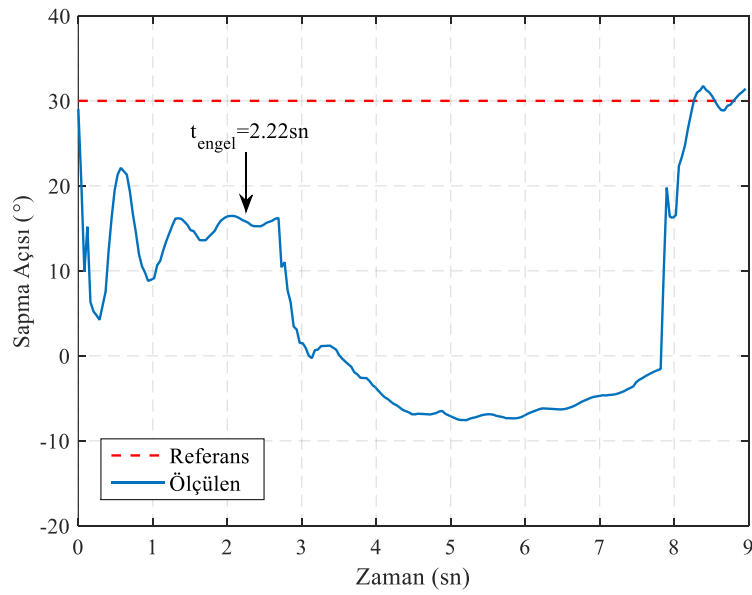
$$IR = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} \quad (6.3)$$

Burada, S_1 , S_2 , ve S_3 sırasıyla sol, ön ve sağ mesafe sensörlerinden alınan engelin uzaklığını göstermektedir.

Robot balığın engellerden sakınarak sapma denetimi deneyleri için oluşturulan senaryolar iki farklı referans sapma açısı (30° , 45°) için gerçekleştirilmiştir ve bu deneylere ait görüntüler sırasıyla Şekil 6.57 ve 6.59’da sunulmuştur. Sapma açılarının referans giriş değişkenlerine göre zamana bağlı değişimleri Kinovea programından alınan x ve y eksenlerindeki konum değişimleri ile MATLAB ortamında Denklem (6.1) kullanılarak elde edilmiştir. Bu sapma açılarının zamana bağlı değişimleri ise sırasıyla Şekil 6.58 ve 6.60’da verilmiştir.

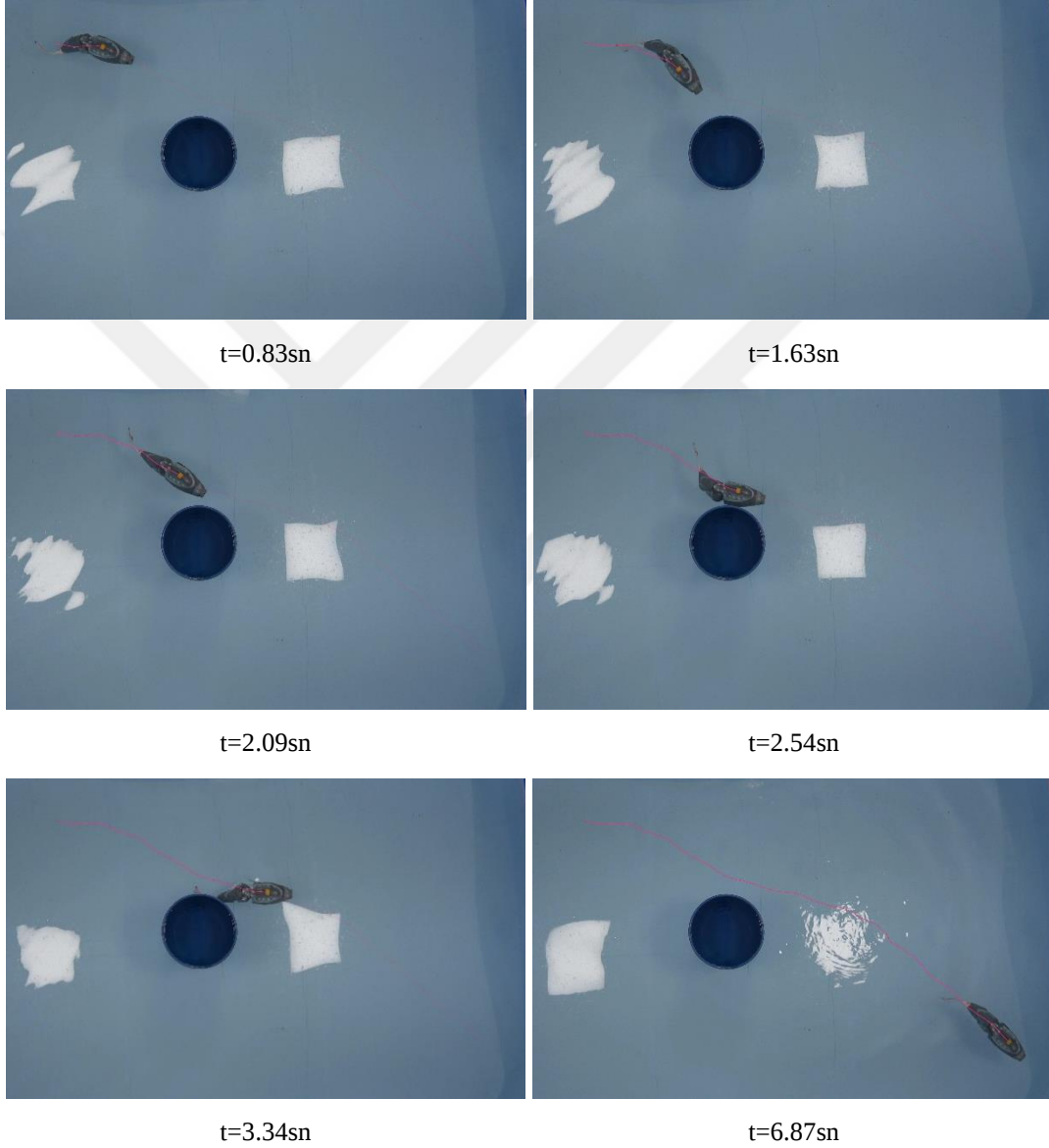


Şekil 6.57. Birinci senaryoya ait engellerden sakınarak sapma denetimi deney görüntüleri

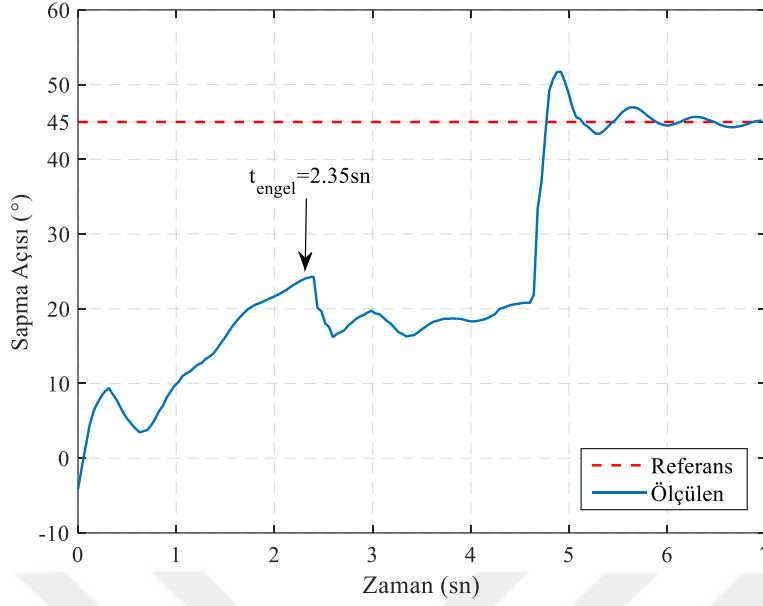


Şekil 6.58. Birinci senaryo için elde edilen sapma açısının zamana bağlı değişimi

Şekil 6.58’de görüldüğü gibi, robot balığın sapma açısı istenilen referans giriş değerine ulaşmadan 2.22sn zaman değerinde yüzdüğü yön doğrultusunun sağında bir engel ile karşılaşmıştır. Bu engeli yaklaşık 3sn süre içerisinde aşarak tekrar verilen görev doğrultusunda ulaşması gereken sapma açısı değerine doğru yönelmiştir. Yaklaşık 8.2sn sonunda ise küçük salınımlar ile referans giriş değerinde kalmaktadır.



Şekil 6.59. İkinci senaryoya ait engellerden sakınarak sapma denetimi deney görüntüleri



Şekil 6.60. İkinci senaryo için elde edilen sapma açısının zamana bağlı değişimi

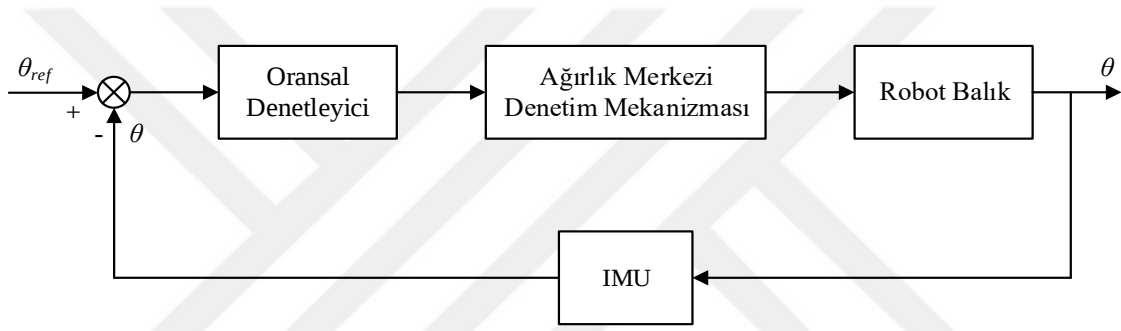
Şekil 6.60’da görülen ikinci senaryoda ise robot balık 2.35sn zaman değerinde referans sapma açısına ulaşmadan yüzdüğü yön doğrultusunun sağında bir engel ile karşılaşmıştır. Bu engeli yaklaşık 2.5sn süre içerisinde aşarak tekrar verilen görev doğrultusunda referans sapma açısına yönelmiştir. Yaklaşık 4.8sn sonunda ise küçük salınımlar ile referans giriş değerinde kalmaktadır.

Bu iki senaryo için sonuçlar incelendiğinde, engellerin bulunduğu ortamlarda bile robot balığın sapma denetim performansının oldukça iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca robotun engellerden kaçış performansının oldukça hızlı olduğu da sınıanmıştır.

6.4.4. Robot Balığın Üçüncü Boyut Hareketinin Kapalı Çevrim Denetimi

Robot balık prototipinin üçüncü boyut hareketinin denetimi için Şekil 6.61’de blok şeması verilen kapalı çevrim denetim yapısı kullanılmıştır. Robot balığın dalma ve çıkma hareketleri prototipe üçüncü boyut kabiliyetlerini kazandırmaktadır. Deneyler, üçüncü boyut hareketlerinin denetimi ile ilgili olarak yunuslama açısı ve derinlik seviyesi denetimi olmak üzere iki farklı durum için gerçekleştirilmiştir. Yunuslama açısının denetimi için robot balığın istenilen referans yunuslama açısı değerlerinde kalarak dalma hareketini gerçekleştirmesi hedeflenmiştir. Derinlik seviyesi denetimi deneylerinde ise robot balığın bulunduğu derinlik seviyesini koruması için yunuslama açısının 0°’de tutulması amaçlanmıştır. Yunuslama açısı değerleri IMU sensöründen alınarak referans yunuslama

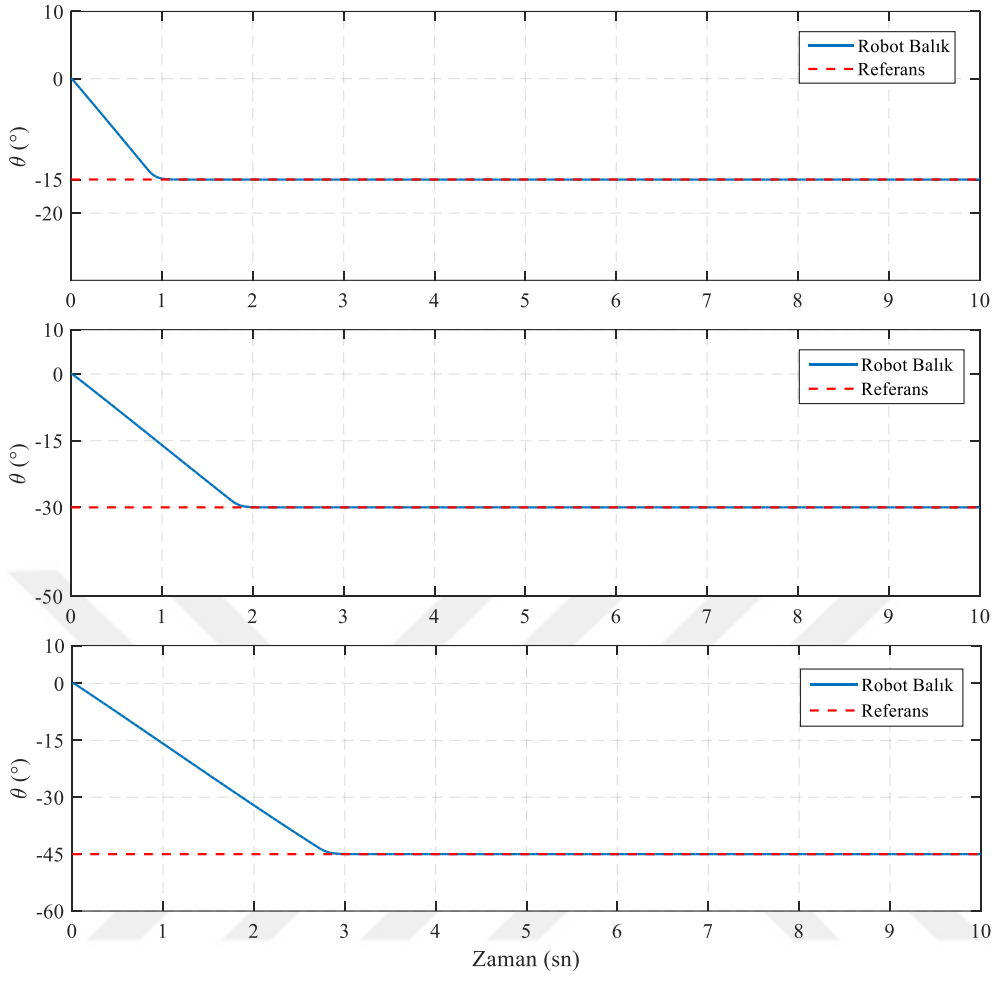
açısına göre değerlendirilip oransal bir denetleyici vasıtasıyla robot balığın ağırlık merkezi denetim mekanizmasında bulunan kayan kütlenin konumu değiştirilmektedir. Kayan kütlenin konumu değişikçe robot balığın ağırlık merkezi değişmekte ve böylece robot balık dalma ve çıkma hareketlerini sağlamaktadır. Bu hareketli kütlenin konumuna bağlı olarak elde edilen hata değeri negatif ise kayan kütle balığın burnu ile aynı doğrultuda ileri yönde, pozitif ise burun ile aynı doğrultuda ters yönde hareket etmektedir. Kayan kütlenin doğrusal hareketi 5mm hatve aralığına sahip sonsuz vidalı bir mil üzerinde gerçekleşmektedir. Bu milin dönme hareketini sağlayan tam tur servo motor ise 25.21 dev/dk dönme hızına sahiptir. Böylece kayan kütle, 2.10mm/sn’lik çizgisel hız ile doğrusal olarak hareket eder. Kütlenin ağırlık merkezi denetim mekanizmasındaki hareket mesafesi yaklaşık olarak 28mm’dir.



Şekil 6.61. Oransal denetleyici ile yunuslama açısının kapalı çevrim denetimi

Robot balığa üçüncü boyut hareketinin kazandırılması için gerçekleştirilen yunuslama açısının denetimi deneyleri mevcut ortam şartları dikkate alınarak iki farklı referans yunuslama açısı (-30° ve -45°) için gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin analizi için iki adet sualtı aksiyon kamerası vasıtasıyla video görüntüleri kaydedilmiştir. Elde edilen bu görüntüler Kinovea programına aktarılıp robot balık prototipinin yan yüzeyinde bir referans bölge işaretlenmiştir. İşaretli bölgenin hareketi takip edilerek robot balık prototipinin izlediği yol ile x ve y eksenlerindeki konum değişimi belirlenmiştir. Bu işaretli bölgenin kalıcı durumdaki izlediği yol ile yunuslama açısı Kinovea programı aracılığıyla elde edilmiştir.

Öncelikle, önerilen denetim yapısının etkinliğini göstermek için üç farklı referans yunuslama açısının (-15°, -30°, -45°) denetimi Şekil 6.62’de gösterildiği gibi benzetim ortamında sınanmıştır. Bu sonuçlar incelendiğinde, tasarlanan denetleyicinin ve referans açı değerlerinin deneysel ortama göre uygunluğu görülmüştür.

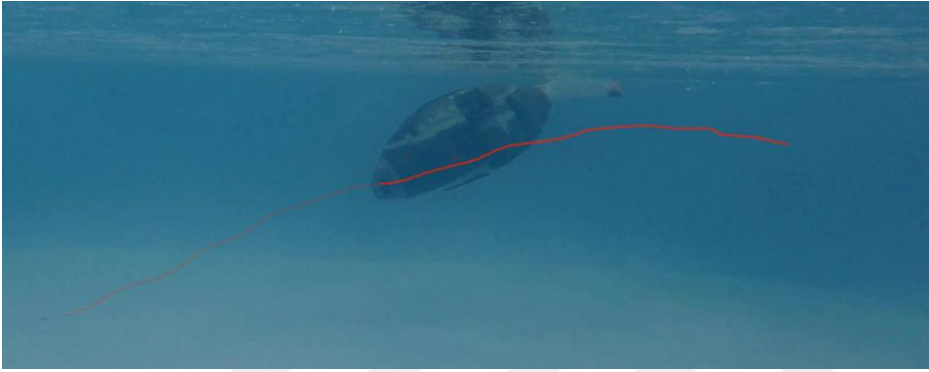


Şekil 6.62. $\theta_{ref} = [-15, -30, -45]^\circ$ için robot balığın yunuslama açısı denetiminin benzetim sonuçları

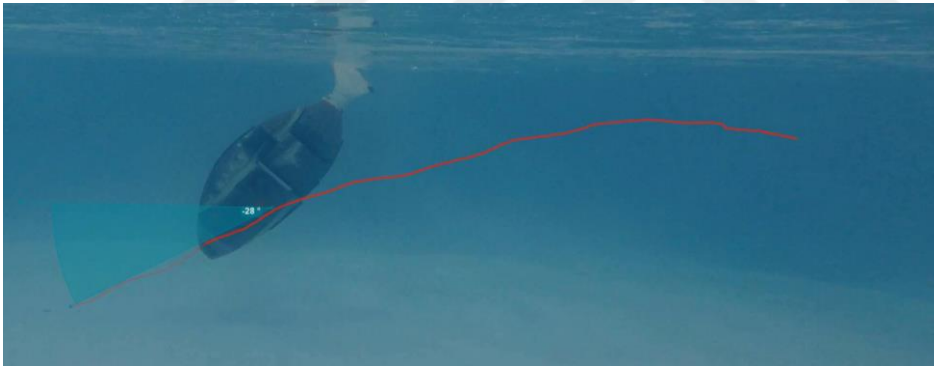
Robot balık prototipinin yunuslama açısı denetimi için gerçekleştirilen deneylere ait görüntüler ise -30° ve -45° referans değerleri için sırasıyla Şekil 6.63 ve 6.64'de sunulmuştur.



t=1.63sn



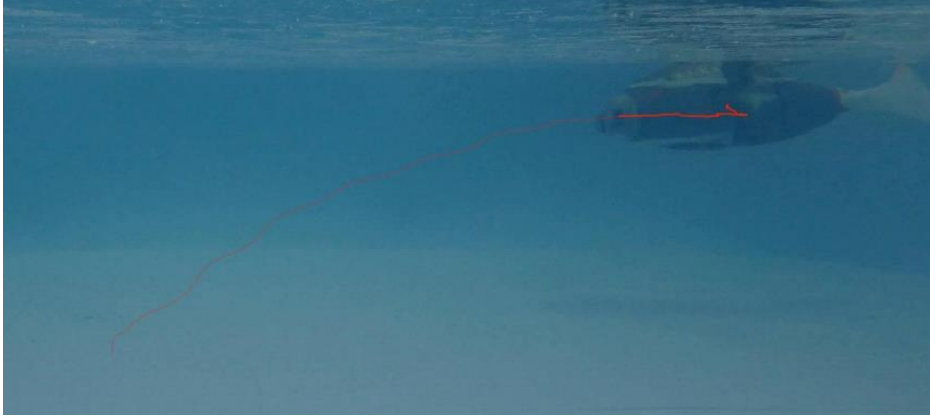
t=3.26sn



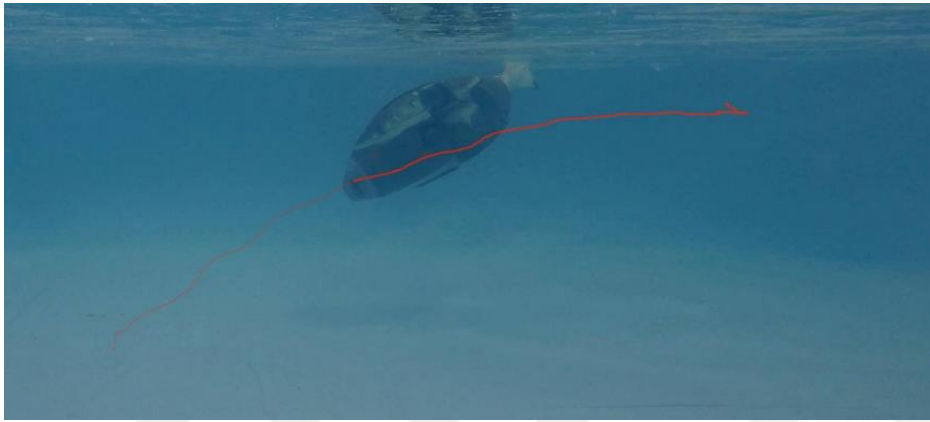
t=4.41sn

Şekil 6.63. -30°'lik yunuslama açısı referansı için robot balığın kapalı çevrim deneysel görüntüleri

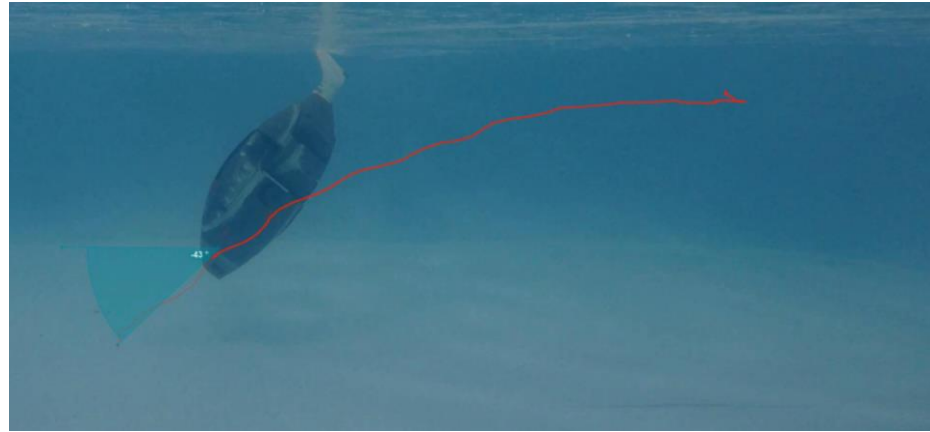
Şekil 6.63’de üç farklı an için görüntüleri verilen yunuslama açısı denetimi deneyi 5sn’lik süre içinde gerçekleştirilmiştir. Robot balığın izlediği yolun eğimi dikkate alındığında prototipin 3sn sonunda kalıcı durum değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Böylece, görüntünün son 2sn’lik bölümünde Kinovea programı kullanılarak yunuslama açısı değeri -28° olarak elde edilmiştir.



t=3.92sn



t=5.64sn

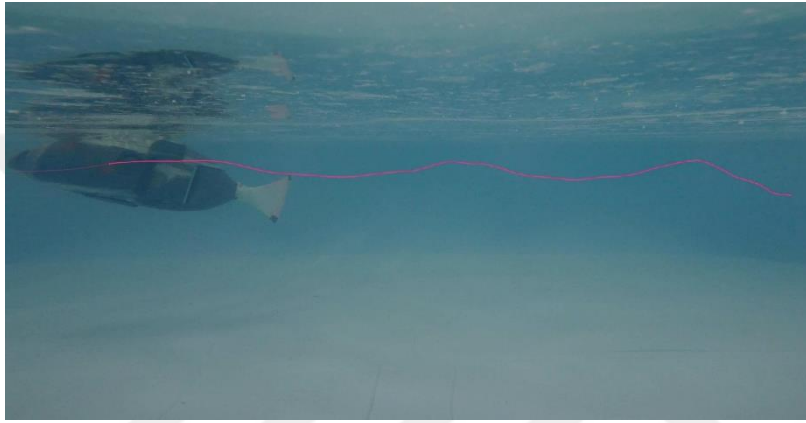


t=6.62sn

Şekil 6.64. -45°'lik yunuslama açısı referansı için robot balığın kapalı çevrim deneysel görüntüleri

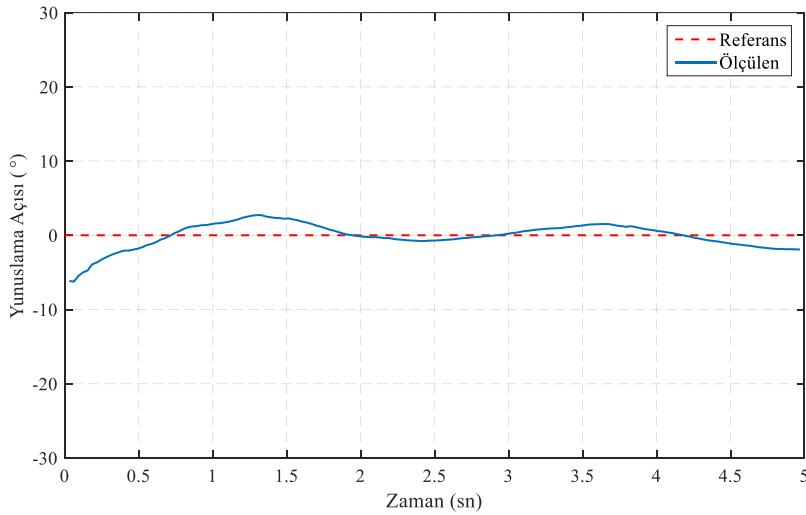
Şekil 6.64'de görülen -45°'lik yunuslama açısı referansı deneyi 7sn'lik süre içinde gerçekleştirilmiştir. Video görüntüsünün son 1sn'lik kısmında robot balığın izlediği yolun eğimi dikkate alındığında kalıcı durum değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu durumda ulaştığı açı değeri Kinovea programında -43° olarak elde edilmiştir.

Derinlik seviyesi denetimi deneyleri, robot balığın yüzeye yakın, ortada ve tabana yakın olmak üzere üç farklı seviyede bulunduğu seviyeyi koruması için gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde robot balığın o anda bulunduğu seviyede kalmasını sağlamak için yunuslama açısının sıfır derecede tutulması amaçlanmıştır. Yüzeye yakın, ortada ve tabana yakın seviyedeki derinlik denetimi deneylerine ait görüntüler ve MATLAB ortamında elde edilen yunuslama açısının zamana bağlı değişim grafikleri sırasıyla Şekil 6.65, 6.66 ve 6.67’de verilmiştir.



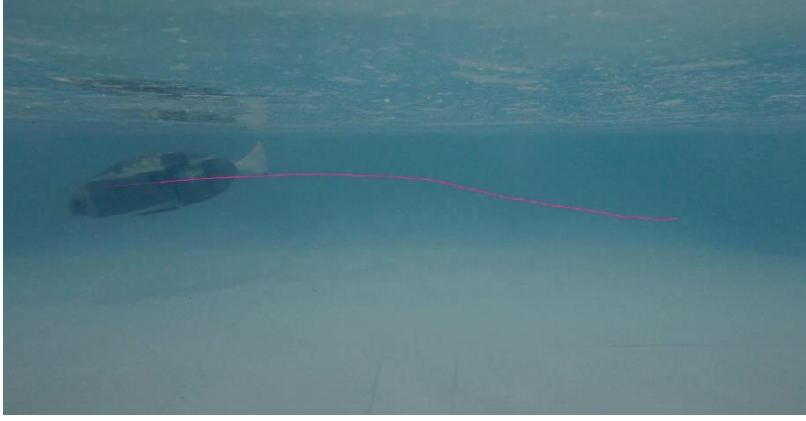
$t=4.64\text{sn}$

(a)



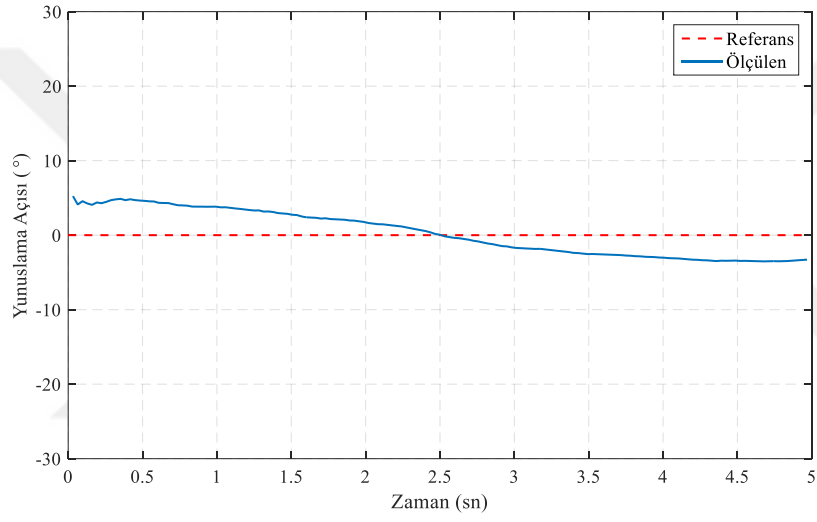
(b)

Şekil 6.65. Yüzeye yakın seviyede derinlik denetimi: (a) Deneysel görüntüler, (b) Yunuslama açısının zamana bağlı değişim grafiği



$t=4.75\text{sn}$

(a)



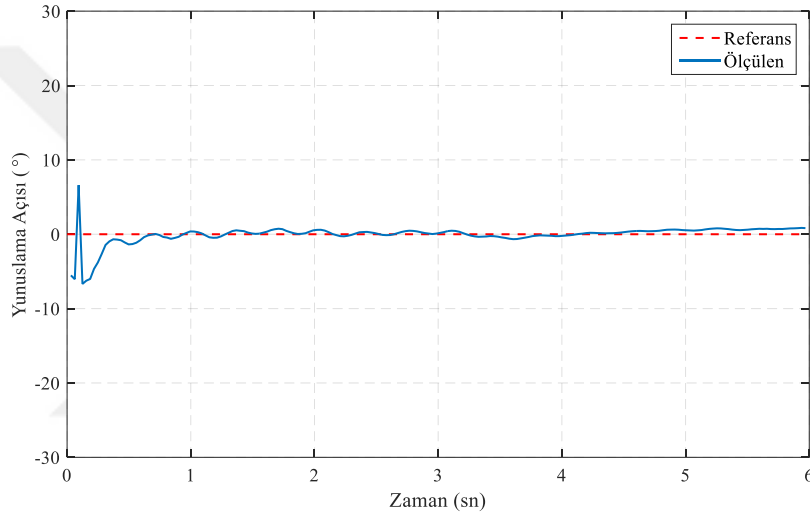
(b)

Şekil 6.66. Orta seviyede derinlik denetimi: (a) Deneysel görüntüler, (b) Yunuslama açısının zamana bağlı değişim grafiği



t=5.63sn

(a)



(b)

Şekil 6.67. Tabana yakın seviyede derinlik denetimi: (a) Deneysel görüntüler, (b) Yunuslama açısının zamana bağlı değişim grafiği

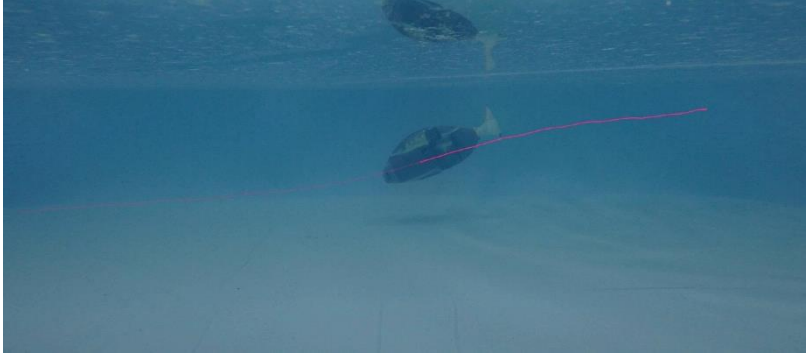
Derinlik seviyesinin denetimi deneylerine ait görüntüler incelendiğinde, ortalama derinlik seviyelerinin yüzeye yakın seviye için yaklaşık -12cm, orta seviye için -19cm ve tabana yakın seviye için -39cm civarında olduğu Kinovea programı ile hesaplanmıştır. Ayrıca bu deneylere ait yunuslama açısının zamana bağlı değişim grafikleri irdelendiğinde yunuslama açılarının yaklaşık 0° civarında elde edildiği görülmektedir.

Ayrıca, yukarıda sonuçları irdelenen yunuslama ve derinlik seviyesi denetimi deneylerine ek olarak robot balığa bu iki davranışın birlikte gözlemlenmesine imkan tanıyan bir basamak yunuslama açısı referansı uygulanmıştır. Buna göre 4sn süre boyunca yunuslama açısı referansı -15° 'de kalırken 4sn süre sonunda bu açının 0° 'de olması istenerek bulunduğu seviyeyi koruması hedeflenmiştir.

Bu deneye ait robot balığın performansını gösteren anlık görüntüler ve yunuslama açısı referansına göre robot balığın yunuslama açısı grafiği sırasıyla Şekil 6.68 ve 6.69’da sunulmuştur.



$t=0.11\text{sn}$

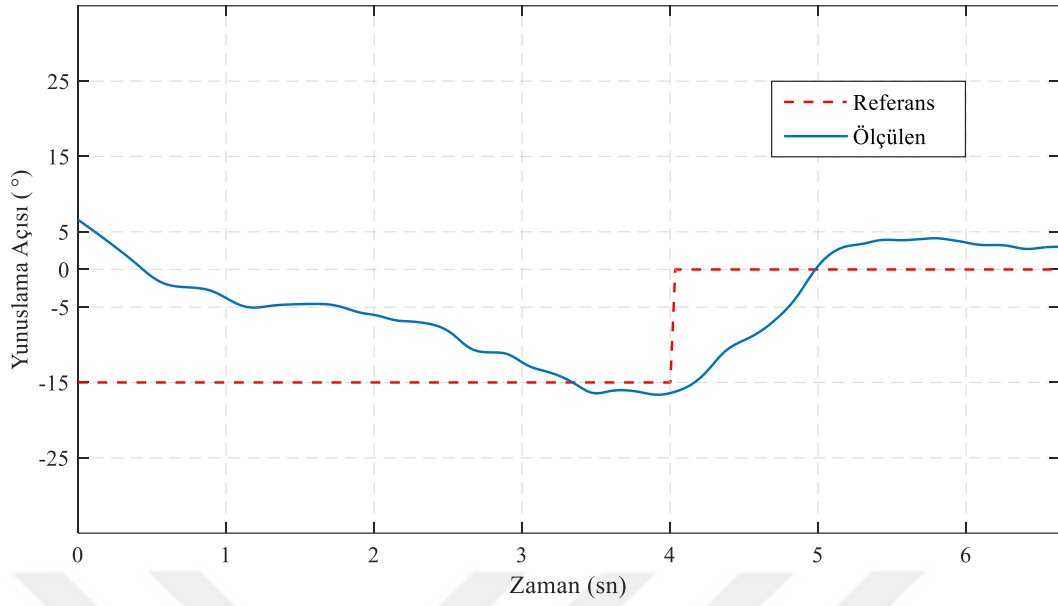


$t=3.80\text{sn}$



$t=5.76\text{sn}$

Şekil 6.68. Basamak yunuslama açısı referansı için robot balığın kapalı çevrim deneysel görüntüleri



Şekil 6.69. Basamak yunuslama açısı referansı için robot balığın kapalı çevrim cevabı

Şekil 6.69 incelendiğinde robot balığın istenilen yunuslama açısına ulaşması yaklaşık olarak 3.3sn sürmüştür. Bu zaman değerinden sonra 4sn süreye kadar robot balık -15° civarında küçük salınımlar ile dalmaya devam etmiştir. 4sn süre sonunda referans giriş değerine göre hareketli kütle ters yönde hareket ederek robot balığın yunuslama açısının 0° civarında olması sağlanmıştır. Böylece robot balık bulunduğu derinlik seviyesini korumaktadır. Bu sonuçlar irdelendiğinde robot balık prototipinin yunuslama açısı ve derinlik seviyesi denetimlerinin etkin bir şekilde başarılıldığı görülmektedir.

7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu bölümde, elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve önerilen denetim yöntemlerinin uygunluğu tartışılmıştır. Ayrıca, gelecekte yapılabilecek çalışmalar için bazı öneriler sunulmuş ve bu tez kapsamında gerçekleştirilen yayınlar verilmiştir.

7.1. Yapılan Tez Çalışmasının Sonuçları ve Öneriler

Bu tez çalışmasında, iki eklemlili esnek kuyruk mekanizmasına sahip, BCF yüzme hareketleri ile otonom bir şekilde üç boyutlu olarak yüzebilen, Carangiform türü, biyomimetik bir robot balık prototipi tasarlanmış ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Prototip üretiminden önce iki eklemlili Carangiform türü biyomimetik robot balığın üç boyutlu, 6-SD, doğrusal olmayan matematiksel modeli elde edilmiştir. Robot balığın hareket denklemlerini elde etmek için Lagrange yöntemi kullanılmıştır. Aynı zamanda robotun hareket ortamı olan suyun etkilerini gerçekçi bir şekilde modellemek için kuyruğa etki eden hidrodinamik kuvvetler elde edilmiş ve robot balığın üç boyutlu hareketlerinin denetimi için ağırlık merkezi denetim mekanizması tasarlanmıştır. Bu hareketlerin analiz edilebilmesi için gövde ve dünya eksen takımları tanımlanarak 6-SD hareket denklemleri türetilmiştir.

Robot balık prototipinin tasarımında Carangiform türü gerçek bir sazan balığının morfolojik özelliklerinden esinlenilmiştir. Prototip bileşenlerinin katı modeli üç boyutlu olarak SolidWorks ortamında oluşturulmuştur. Yapılan tasarım sonucunda 10 ana bölümden oluşan robot balığın bileşenleri PLA kullanılarak üç boyutlu baskı teknolojisine sahip yazıcıda üretilmiştir. Prototipin esnek kuyruk yüzgecinin üretimi için RTV-2 beyaz renkli kalıp silikonu kullanılmıştır. Her bir bileşenin sızdırmazlığını sağlamak için bileşenlerin birleşim yüzeyleri arasında tasarlanan kanallara O-ring'ler yerleştirilmiştir. Hem sızdırmazlık direncini arttırmak hem de üretim ve montaj anında oluşabilecek kılcal boşluklardan kaynaklanan sızıntıları önlemek için bileşenlerin montajında epoksi reçine, sıvı conta ve macun gibi sızdırmazlık elemanları kullanılmıştır. Ayrıca döner yapıdaki eklem milleri ve gövde ile birleşim yüzeylerinde kauçuk conta kullanılmıştır. Bileşenlerin içerisine yerleştirilen donanım elemanlarının tüm analizleri montajdan önce dış ortamda gerçekleştirilmiştir. Montajı tamamlanan kuyruk mekanizması ve gövde yapısı için su

sızdırmazlık testleri yapılmış ve robot balığın su içerisinde üç boyutlu olarak yüzebilmesi için gerekli özkütle ve denge analizleri gerçekleştirilmiştir.

Robot balığın eklemlerinin hareket denetimi için Lamprey türü balıkların omuriliklerinden esinlenerek tasarlanan MÖÜ osilatör modeli kullanılmıştır. MÖÜ modeli bir MDM birimi ve iki adet tek yönlü zincir bağlı osilatör dizisinden oluşturulmuştur. Her osilatör hücresinde üç adet ara sinir hücresi ve bir adet MS kullanılmıştır. MDM birimi, MÖÜ osilatör dizisinin beyin sapı modeli gibi davranır ve osilatörlerin çıkışları arasındaki faz farkını belirler. Sinirsel MÖÜ modeli çıkışlarında sürekli salınımlı ritmik sinüzoidal sinyaller üretilmektedir. Bu çıkış sinyallerinin genliği, frekansı ve ofseti istenilen değerlerde ayarlanarak robot balığın eklemlerini hareket ettiren servo motor açıları olarak kullanılmıştır. Tasarlanan bu yapı ile robot balığın sinirsel omurilik ve beyin sapı modeli geliştirilmiştir. MÖÜ modeli ile üretilen eklem açılarının oluşturduğu ileri yön düz yüzüş ve dönüş hareketleri ile gerçek bir balığın hareketleri arasındaki uyumluluğu göstermek için hem gerçek bir sazan balığının hem de SimMechanics ortamında tasarlanan robot balığın bu hareketleri bir periyot için gözlemlenmiştir. Bu gözlemlere göre tasarlanan MÖÜ modeli ile oluşturulan ileri yön ve dönüş hareketlerinin, gerçek bir balığın hareketlerini taklit edebildiği görülmüştür.

Tasarımı, hareket analizi, üretimi ve sızdırmazlık testleri tamamlanan robot balık prototipinin hem benzetim ortamında hem de deneysel olarak açık ve kapalı çevrim analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçek bir ortamda analizlerin yapılabilmesi için deneysel bir havuz ortamı hazırlanmıştır.

Açık çevrim deneylerde robot balık prototipinin ileri yön ve dönüş hareketleri analiz edilmiş ve robot balığın karakteristik özellikleri elde edilmiştir. İleri yön hareket analizlerinde, farklı genlik ve faz farkları için kuyruğun çırpınma frekansı değişimine karşılık ileri yön hız değişimleri gözlemlenmiştir. Dönüş hareketleri için farklı faz farklarında eklem açılarının ofset değerini belirleyen MÖÜ parametresi β değişimine karşılık dönüş yarıçapı ile çizgisel ve açısal hız değişimleri gözlemlenmiştir. Yapılan bu açık çevrim analizlere göre:

- 2Hz'lik çırpınma frekansında, eklem açılarının 45° 'lik faz farkı değeri için maksimum ileri yön hız değeri, $A_1=20$, $A_2=30$ genlik değerlerinde 0.4224m/sn olarak elde edilmiştir. Bu hız değeri gövde uzunluğuna göre 0.8448GU/sn olarak hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen bu deneylerde, kuyruk çırpınma frekansı arttıkça ileri yön hız değerinin de arttığı görülmüştür. Daha büyük genlik değerlerinde ise kuyruk

mekanizmasının ürettiği tahrik kuvveti arttığı için ileri yön hız değerleri de daha büyük olmaktadır.

- $A_1=20$ ve $A_2=20$ sabit genlik değerlerinde farklı faz değerleri değişimi için en yüksek ileri yön hız değeri, 2Hz'lik çarpınma frekansında 60° 'lik faz farkı için 0.4258m/sn olarak elde edilmiştir. GU'ya bağlı hız değeri ise 0.8516GU/sn olarak hesaplanmıştır. Bu analizde görülmektedir ki, genlik artışına karşı hız değeri artarken, eklemlere uygulanan açılar arasındaki faz farkı arttıkça kuyruk mekanizmasının ürettiği tahrik kuvveti azaldığından ileri yön hız değerleri azalmaktadır.
- Robot balığın en düşük dönüş yarıçapı 2Hz çarpınma frekansında 0.4129m olarak elde edilmiştir. Robot balığın dönüş hareketlerinin analizinde sabit frekans değerleri için ofset artışına karşılık dönüş yarıçapının azaldığı görülmektedir. Deneysel çalışmalar $f=[0.5, 1, 1.5, 2]$ Hz olmak üzere dört farklı çarpınma frekansı için gerçekleştirilmiştir. Düşük frekans değerinde sabit ofset değerine karşılık daha büyük frekans değerlerine göre dönüş yarıçapının da daha büyük olduğu gözlemlenmektedir.
- Robot balığın maksimum çizgisel dönüş hızı 2Hz çarpınma frekansında, 0.3320m/sn olarak elde edilmiştir. Ayrıca, robot balık prototipi için maksimum çizgisel dönüş hızı gövde uzunluğuna göre 0.6640GU/sn olarak hesaplanmıştır. Robot balığın dairesel dönüş hareketlerinden elde edilen çizgisel dönüş hızı değerleri sabit frekans değerleri için oldukça küçük azalan değişimler göstermektedir. Bu durum sabit genlik ve frekans değerleri için ofset değişimine rağmen çizgisel dönüş hızının neredeyse sabit kaldığını ifade etmektedir.
- Robot balığın maksimum açısal dönüş hızı 2Hz çarpınma frekansında, 0.6224rad/sn olarak elde edilmiştir. Çizgisel dönüş hızının aksine sabit genlik ve frekans değerleri için ofset artışı ile açısal dönüş hızının da arttığı görülmüştür. Ofset değerinin artışı robot balığın dönüş hareketinin yatay x eksenine ile yaptığı dönüş açısının artmasına sebep olduğundan bu ofset değerinin artışı hem dönüş yarıçapının azalmasına hem de açısal dönüş hızının artmasına sebep olmuştur. Aynı zamanda, sabit ofset değerleri için çarpınma frekansının artışı ile çizgisel ve açısal dönüş hızı değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir.

Robot balığın kapalı çevrim denetim performansını analiz etmek için duyusal geri beslemeli kapalı çevrim denetim yapısı oluşturulmuştur. Kapalı çevrim denetim yapısında, sapma açısı denetimi ve engellerden sakınarak otonom yüzüş denetimi için iki farklı bulanık denetleyici tasarlanmıştır. Bulanık denetleyiciler ile üst beyin merkezi modellenmiş ve DS

hücrelerine sahip MÖÜ modeli ile robot balığın MSS modeli oluşturulmuştur. Ayrıca, oransal denetleyici ile robot balığın yukarı ve aşağı hareketlerini oluşturan yunuslama açısının denetimi gerçekleştirilmiştir. Bu analizlere göre:

- Robot balığın sapma denetimi deneyleri üç farklı referans sapma açısı (15° , 30° , 45°) için gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin analizi için tepe kamerası vasıtasıyla video görüntüleri kaydedilmiştir. Elde edilen bu görüntüler Kineova programına aktarılıp robot balık prototipi üzerinde bir referans bölge işaretlenmiştir. İşaretli bölgenin hareketi takip edilerek robot balık prototipinin izlediği yollar ile x ve y eksenlerindeki konum değişimleri belirlenmiştir. Sapma denetimi deneylerine ait sonuçlar irdelendiğinde, robot balığın sapma açılarının istenilen referans giriş değerlerine 4sn'den kısa sürede ulaşarak kalıcı durumda küçük salınımlar ile referans giriş değerlerinde kaldıkları gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar bulanık denetleyicinin sapma açısı denetim performansının oldukça iyi olduğunu göstermektedir.
- Robot balığın engellerden sakınarak yüzme deneyleri için üç farklı senaryo oluşturulmuştur. Birinci senaryoda robot balık havuzun sol üst kenarına yakın bir şekilde konumlandırılmıştır ve engellerden sakınarak başlangıç noktasından bitiş noktasına kadar bir 'U' hareketi ile yol almıştır. İkinci senaryoda, üç adet dairesel engel bir üçgenin köşelerini oluşturacak şekilde havuzun içine rasgele yerleştirilmiştir. Böylece, robot balığın rastgele yüzme hareketleriyle ilerlerken doğal bir ortamda karşılaşması muhtemel engellerden oluşan bir senaryo oluşturulmuştur. Üçüncü senaryo ise robot balığın klasik su altı araçları ve insanların giremeyeceği dar ve ulaşılması zor bölgelerdeki hareket kabiliyetini göstermek için tasarlanmıştır. Bunun için robot balık üç adet dairesel engel ile oluşturulan dar bir alandan engellere çarpmadan geçmeye zorlanmıştır. Engellerden sakınarak yüzme deneylerine ait sonuçlar değerlendirildiğinde tasarlanan denetim yapısının oldukça etkin olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında robot balığın doğal bir ortamda yüzebilmesi için bir zemin oluşturulmuştur.
- Kullanıcı tarafından tanımlanan herhangi bir görevin gerçekleştirilmesi esnasında robot balığın karşılaşabileceği olası engelleri aşabilmesi ve tekrar tanımlanan görevi yerine getirebilmesi için bir SDM yapısı tasarlanmıştır. Tanımlanan görev olarak sapma denetimi belirlenmiş ve iki farklı referans sapma açısı (30° , 45°) için robot balığın engellerden sakınarak sapma denetimi gerçekleştirilmiştir. Bu iki senaryo için sonuçlar incelendiğinde, robot balığın engellerin bulunduğu ortamlarda

bile sapma denetimi performansının oldukça iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca, robot balığın engelleri aşabilme süresi de oldukça kısadır.

- Üçüncü boyut hareketlerinin denetimi ile ilgili olarak yunuslama açısı ve derinlik seviyesi denetimi olmak üzere iki farklı durum için deneyler gerçekleştirilmiştir. Yunuslama açısının denetimi için robot balığın -30° ve -45° referans yunuslama açısı değerlerinde kalarak dalma hareketini gerçekleştirmesi hedeflenmiştir. Derinlik seviyesi denetimi deneylerinde ise robot balığın bulunduğu derinlik seviyesini koruması için yunuslama açısının 0° 'de tutulması amaçlanmıştır. Üçüncü boyut hareketinin denetimi ile ilgili deneyler incelendiğinde robot balık prototipinin dalış ve belirlenen sualtı seviyesinde kalma performanslarının oldukça iyi olduğu gözlemlenmiştir. Kalıcı durum cevaplarında ise 4° 'yi aşmayan bir kaç derecelik hatalar ile istenilen referans değerleri yakalanmıştır.

Bu sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalar ile birlikte değerlendirildiğinde iki eklemlili robot balık prototipinin üç boyutlu otonom yüzme hareketleri için performansının oldukça iyi olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, geliştirilen duysal geri beslemeli kapalı çevrim denetim yapısı ile robot balık için özgün bir MSS modeli önerilmiştir. Geliştirilen robot balık prototipi ile biyomimetik insansız bir sualtı robotu tasarımı için hem akademik hem de teknolojik açıdan bir zemin oluşturulduğu düşünülmektedir.

Bundan sonraki çalışmalarda özellikle robot balığın tasarımında dayanıklılığı ve sızdırmazlık özelliğini artırmak için daha yüksek bir teknoloji kullanılabilir. Ayrıca robot balığın gerçek havuz ortamında elde edilen kapalı çevrim denetim performansları literatürün oldukça üstünde olmasına rağmen farklı MÖÜ modelleri ile akıllı ve dayanıklı denetim yapıları kullanılarak denetim performanslarını arttırmaya yönelik çalışmalar da yapılabilir.

7.2. Tez Kapsamında Gerçekleştirilen Bilimsel Çalışmalar

Bu tez çalışması, 114E652 nolu TÜBİTAK 1001 proje desteği ile gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, tez kapsamında gerçekleştirilen bilimsel yayınlar ve projelerin listesi verilmiştir. Tez çalışması boyunca bu yayınlar 4 adet atıf almıştır. Ayrıca, geliştirilen i-RoF robot balık prototipi yerel, ulusal basın ve yayın organları ile internet siteleri (sanal ortam) üzerinden uluslararası çapta tanıtılmıştır [155–163]. Sanal ortamda video paylaşım, haber, ulusal basın, ulusal gazete, forum ve sosyal medya olmak üzere toplamda yaklaşık olarak 79 internet

sitesinde paylaşılmış ve sosyal medya ile video paylaşım sitelerinde 200.000’den fazla kullanıcı tarafından görüntülenmiştir [164–172].

7.2.1. SCI ve SCI-E Kapsamındaki Uluslararası Hakemli Dergi Yayınları

1. Ozmen Koca, G., Bal, C., **Korkmaz, D.**, Bingol, M. C., Ay, M., Akpolat, Z. H., and Yetkin, S., (2018). Three-Dimensional Modeling of a Robotic Fish Based on Real Carp Locomotion, *Applied Sciences*, 8(2), 180.
2. Ozmen Koca, G., **Korkmaz, D.**, Bal, C., Akpolat, Z. H., Ay, M., (2016). Implementations of the Route Planning Scenarios for the Autonomous Robotic Fish with the Optimized Propulsion Mechanism, *Measurement*, 93, 232-242.

7.2.2. Diğer Uluslararası Hakemli Dergi Yayınları

1. Akpolat, Z. H., Bingol, M. C., Ay, M., Ozmen Koca, G., Bal, C., **Korkmaz, D.**, (2017). Dynamic Model and Simulation of One Active Joint Robotic Fish, *Engineering Sciences*, 12(1), 29-39.

7.2.3. Uluslararası Konferanslar

1. Ay, M., Ozmen Koca, G., **Korkmaz, D.**, Bingol M., C., Akpolat Z. H., Bal C., Karakose, P., (2017). Prototype Design and Waterproof Production of Intelligent Robotic Fish (i-RoF), *8th International Advanced Technologies Symposium, (IATS’17)*, 18, Elazığ, Turkey, 19-22 October, 3960-3968.
2. Ozmen Koca, G., Bingol, M. C., Bal, C., Akpolat, Z. H., Ay, M., and **Korkmaz, D.**, (2017). Design and Control of Diving Mechanism for the Biomimetic Robotic Fish, *International Conference Mechatronics, Springer*, Brno, Czech Republic, 6-8 September, 662-670.
3. Bal, C., **Korkmaz, D.**, Ozmen Koca, G., Ay, M., Akpolat, Z. H., (2016). Link Length Optimization of A Biomimetic Robotic Fish Based on Big Bang - Big Crunch Algorithm, *21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, (MMAR 2016)*, Miedzyzdroje, Poland, 29 August–1 September, 189-193.

7.2.4. Yurtiçi Projeler

1. Bursiyer. Üç Boyutlu Hareket Kabiliyetine Sahip Carangiform Türünde Bir Biyomimetik Robot Balığın Tasarımı ve Gerçeklemesi, Tübitak 1001 Projesi, Proje No:114E652, 15.05.2015-15.01.2018.



KAYNAKLAR

- [1] **Wang, M., Yu, J. and Tan, M.**, 2014. CPG-based sensory feedback control for bio-inspired multimodal swimming, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, **11**, 1–11.
- [2] **Yu, J., Wang, M., Su, Z., Tan, M. and Zhang, J.**, 2013. Dynamic modeling of a CPG-governed multijoint robotic fish, *Advanced Robotics*, **27**(4), 275–285.
- [3] **Lachat, D., Crespi, A. and Ijspeert, A.J.**, 2006. BoxyBot: a swimming and crawling fish robot controlled by a central pattern generator, *The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, BioRob 2006*, Pisa, Italy, 20-22 Feb., 643-648.
- [4] **Crespi, A., Lachat, D., Pasquier, A. and Ijspeert, A.J.**, 2008. Controlling swimming and crawling in a fish robot using a central pattern generator, *Autonomous Robots*, **25**(1–2), 3–13.
- [5] **Hu, Y., Liang, J. and Wang, T.**, 2015. Mechatronic design and locomotion control of a robotic thunniform swimmer for fast cruising, *Bioinspiration & biomimetics*, **10**(2), 026006.
- [6] **Wang, T., Hu, Y. and Liang, J.**, 2013. Learning to swim: A dynamical systems approach to mimicking fish swimming with cpg, *Robotica*, **31**(3), 361–369.
- [7] **Wu, Z., Yu, J., Tan, M. and Zhang, J.**, 2014. Kinematic comparison of forward and backward swimming and maneuvering in a self-propelled subcarangiform robotic fish, *Journal of Bionic Engineering*, **11**(2), 199–212.
- [8] **Wu, Z., Yu, J., Su, Z. and Tan, M.**, 2013. An improved multimodal robotic fish modelled after *Esox lucius*, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2013*, Shenzhen, China, 12-14 December, 516–521.
- [9] **Hu, Y., Tian, W., Liang, J. and Wang, T.**, 2011. Learning fish-like swimming with a CPG-based locomotion controller, *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, San Francisco, CA, USA, 25-30 Sept., 1863–1868.
- [10] **Yang, G.H., Choi, W., Lee, S.H., Kim, K.S., Lee, H.J., Choi H.S. and Ryuh, Y.S.**, 2011. Control and design of a 3 DOF fish robot ‘Ichthus’, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2011*, Karon Beach, Phuket, Thailand, 7-11 Dec., 2108–2113.

- [11] **Zhou, C., Tan, M., Cao, Z., Wang, S., Creighton, D., Gu, N., Nahavandi, S.**, 2008. Kinematic modeling of a bio-inspired robotic fish, *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, 19-23 May, 695–699.
- [12] **Liu, J. and Hu, H.**, 2010. Biological inspiration: From carangiform fish to multi-joint robotic fish, *Journal of Bionic Engineering*, **7**(1), 35–48.
- [13] **Ding, R., Yu, J., Yang, Q. and Tan, M.**, 2013. Dynamic modelling of a cpg-controlled amphibious biomimetic swimming robot, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, **10**(4), 199.
- [14] **Ryuh, Y.S., Yang, G.H., Liu, J. and Hu, H.**, 2015. A school of robotic fish for mariculture monitoring in the sea coast, *Journal of Bionic Engineering*, **12**(1), 37–46.
- [15] **Yu, J., Wang, S. and Tan, M.**, 2005. A simplified propulsive model of bio-mimetic robot fish and its realization, *Robotica*, **23**(1), 101–107.
- [16] **Wright, J. and Jordanov, I.**, 2015. Intelligent approaches in locomotion - a review, *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, **80**(2), 255–277.
- [17] **Hu, O., Liu, J., Dukes, I. and Francis, G.**, 2006. Design of 3d swim patterns for autonomous robotic fish, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, 9-15 Oct., 2406–2411.
- [18] **Yu, J., Tan, M., Chen, J. and Zhang, J.**, 2014. A survey on cpg-inspired control models and system implementation, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, **25**(3), 441–456.
- [19] **Yu, J., Wang, L. and Tan, M.**, 2007. Geometric optimization of relative link lengths for biomimetic robotic fish, *IEEE Transactions on Robotics*, **23**(2), 382–386.
- [20] **Yu, J., Liu, L. and Tan, M.**, 2008. Three-dimensional dynamic modelling of robotic fish: simulations and experiments, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, **30**(3–4), 239–258.
- [21] **Ijspeert, A.J.**, 2008. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: a review, *Neural Networks*, **21**(4), 642–653.
- [22] **Ijspeert, A.J.**, 1998. Design of artificial neural oscillatory circuits for the control of lamprey-and salamander-like locomotion using evolutionary algorithms, *PhD Thesis*, University of Edinburgh.

- [23] **Dörfler, F. and Bullo, F.**, 2014. Synchronization in complex networks of phase oscillators: a survey, *Automatica*, **50**(6), 1539–1564.
- [24] **Wu, Q.D., Liu, C.J., Zhang, J.Q. and Chen Q.J.**, 2009. Survey of locomotion control of legged robots inspired by biological concept, *Science in China, Series F: Information Sciences*, **52**(10), 1715–1729.
- [25] **Mackay-Lyons, M.**, 2012. Central pattern generation of locomotion : a review of the evidence, *Physical Therapy*, **82**(1), 69–83.
- [26] **Huss, M.**, 2007. Computational modeling of the lamprey cpg, *PhD Thesis*, Stockholm University.
- [27] **Crespi, A.**, 2007. Design and control of amphibious robots with multiple degrees of freedom, *PhD Thesis*, Lausanne, EPFL.
- [28] **Li, G.**, 2013. Hierarchical control of limbless locomotion using a bio-inspired cpg model, *PhD Thesis*, University of Hamburg.
- [29] **Marbach, D.**, 2005. Evolution and online optimization of central pattern generators for modular robot locomotion, *Master Thesis*, School of Computer and Communication Sciences, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne.
- [30] **ADAK, Ö.K.**, 2013. Quadruped locomotion reference synthesis with central pattern generators tuned by evolutionary algorithms, *Master Thesis*, Sabanci University.
- [31] **Hu, Y., Liang, J. and Wang, T.**, 2014. Parameter synthesis of coupled nonlinear oscillators for cpg-based robotic locomotion, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **61**(11), 6183–6193.
- [32] **Righetti, L., Buchli, J. and Ijspeert, A.J.**, 2006. Dynamic hebbian learning in adaptive frequency oscillators, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, **216**(2), 269–281.
- [33] **Yu, J., Wu, Z., Wang, M. and Tan, M.**, 2016. CPG network optimization for a biomimetic robotic fish via pso, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, **27**(9), 1962–1968.
- [34] **Li, G., Zhang, H., Herrero-Carron, F., Hildre, H.P. and Zhang, J.**, 2011. A novel mechanism for caterpillar-like locomotion using asymmetric oscillation, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, Budapest, Hungary, 3-7 July, 164–169.

- [35] **Li, G., Deng, Y., Osen, O.L., Bi, S. and Zhang, H.**, 2016. A bio-inspired swimming robot for marine aquaculture applications: from concept-design to simulation, *OCEANS 2016*, Shanghai, China, 10-13 April, 1-7.
- [36] **Li, G., Zhang, H., Zhang, J. and Bye, R.T.**, 2014. Development of adaptive locomotion of a caterpillar-like robot based on a sensory feedback cpg model, *Advanced Robotics*, **28**(6), 389–401.
- [37] **Li, G., Zhang, H., Zhang, J. and Hildre, H.P.**, 2014. An approach for adaptive limbless locomotion using a cpg-based reflex mechanism, *Journal of Bionic Engineering*, **11**(3), 389–399.
- [38] **Li, L., Wang, C. and Xie, G.**, 2015. A general cpg network and its implementation on the microcontroller, *Neurocomputing*, **167**, 299–305.
- [39] **Wang, W. and Xie, G.**, 2014. CPG-based locomotion controller design for a boxfish-like robot, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, **11**(6), 87.
- [40] **Li, G., Zhang, H., Li, W., Hildre, H.P. and Zhang, J.**, 2014. Design of neural circuit for sidewinding of snake-like robots, *IEEE International Conference on Information and Automation, ICIA 2014*, Hailar, China, 28-30 July, 333–338.
- [41] **Yu, J., Wang, C. and Xie, G.**, 2016. Coordination of multiple robotic fish with applications to underwater robot competition, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **63**(2), 1280–1288.
- [42] **Chengju, L., Danwei, W., Erik, D., G., Q.C.**, 2016. Adaptive walking control of biped robots using online trajectory generation method based on neural oscillators, *Journal of Bionic Engineering*, **13**(4), 572–584.
- [43] **Goldschmidt D., Wörgötter F. and Manoonpong P.**, 2014. Biologically-inspired adaptive obstacle negotiation behavior of hexapod robots, *Frontiers in Neurorobotics*, **8**, 1–16.
- [44] **Scaradozzi D., Palmieri G., Costa D. and Pinelli A.**, 2017. BCF swimming locomotion for autonomous underwater robots: a review and a novel solution to improve control and efficiency, *Ocean Engineering*, **130**, 437–453.
- [45] **Wen, L. and Lauder, G.**, 2013. Understanding undulatory locomotion in fishes using an inertia-compensated flapping foil robotic device, *Bioinspiration and Biomimetics*, **8**(4), 046013.

- [46] **Wen, L., Wang, T., Wu, G., Liang, J. and Wang, C.,** 2012. Novel method for the modeling and control investigation of efficient swimming for robotic fish, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **59**(8), 3176–3188.
- [47] **Ozmen Koca, G., Korkmaz, D., Bal, C., Akpolat, Z.H. and Ay, M.,** 2016. Implementations of the route planning scenarios for the autonomous robotic fish with the optimized propulsion mechanism, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, **93**, 232–242.
- [48] **Colgate, J.E. and Lynch, K.M.,** 2004. Mechanics and control of swimming: a review, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **29**(3), 660–673.
- [49] **El Daou, H., Salumae, T., Toming, G. and Kruusmaa, M.,** 2012. A bio-inspired compliant robotic fish: design and experiments, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Saint Paul, MN, USA, 14-18 May, 5340–5345.
- [50] **Wang, W., Guo, J., Wang, Z. and Xie, G.,** 2013. Neural controller for swimming modes and gait transition on an ostraciiform fish robot, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics: Mechatronics for Human Wellbeing, AIM 2013*, Wollongong, NSW, Australia, 9-12 July, 1564–1569.
- [51] **Wang, L., Wang, S., Cao, Z., Tan, M., Zhou, C., Sang, H. and Shen Z.,** 2005. Motion control of a robot fish based on cpg, *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, Hong Kong, China, 14-17 Dec., 1263–1268.
- [52] **Yu, J., Chen, S., Wu, Z. and Wang, W.,** 2016. On a miniature free-swimming robotic fish with multiple sensors, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, **13**(2), 62.
- [53] **Wu, Z.X., Yu, J.Z., Su, Z.S., Tan, M. and Li, Z.L.,** 2015. Towards an esox lucius inspired multimodal robotic fish, *Science China Information Sciences*, **58**(5), 1–13.
- [54] **Bal, C., Korkmaz, D., Ozmen Koca, G., Ay, M. and Akpolat, Z.H.,** 2016. Link length optimization of a biomimetic robotic fish based on big bang - big crunch algorithm, *21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR 2016*, Miedzyzdroje, Poland, 29 Aug.-1 Sept., 189–193.

- [55] **Chong, C.W., Zhong, Y., Zhou, C.L., Low, K.H., Gerald Seet G.L. and Lim, H.B.**, 2008. Can the swimming thrust of bcf biomimetics fish be enhanced, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2008*, Bangkok, Thailand, 22-25 Feb., 437–442.
- [56] **Wang, M., Yu, J.Z., Tan, M. and Zhang, J.W.**, 2012. Multimodal swimming control of a robotic fish with pectoral fins using a cpg network, *Chinese Science Bulletin*, 57(10), 1209–1216.
- [57] **Zhao, W., Hu, Y. and Wang, L.**, 2009. Leader-following formation control of multiple vision-based autonomous robotic fish, *48h IEEE Conference on Decision and Control*, Shanghai, China, 15-18 Dec., 579–584.
- [58] **Wang, T., Wen, L., Liang, J. and Wu, G.**, 2010. Fuzzy vorticity control of a biomimetic robotic fish using a flapping lunate tail, *Journal of Bionic Engineering*, 7(1), 56–65.
- [59] **Wang, W., Xie, G. and Shi, H.**, 2014. Dynamic modeling of an ostraciiform robotic fish based on angle of attack theory, *International Joint Conference on Neural Networks*, Beijing, China, 6-11 July, 3944–3949.
- [60] **Yang, G.H. and Ryuh, Y.**, 2013. Design of high speed fish-like robot ‘Ichthus V5.7’, *10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, URAI 2013*, Jeju, South Korea, 30 Oct.-2 Nov., 451–453.
- [61] **Jindong, L., Huosheng, H. and Dongbing, G.**, 2006. A hybrid control architecture for autonomous robotic fish, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, 9-15 Oct., 312–317.
- [62] **Yu, J., Wang, K., Tan, M. and Zhang, J.**, 2014. Design and control of an embedded vision guided robotic fish with multiple control surfaces, *The Scientific World Journal*, 2014, 1-14
- [63] **Mili, P., Cizek, P. and Faigl, J.**, 2016. On chaotic oscillator-based central pattern generator for motion control of hexapod walking robot, *CEUR Workshop Proceedings*, 1649, 131–137.
- [64] **Izhikevich, E.M.**, 2003. Simple model of spiking neurons, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 14(6), 1569–1572.
- [65] **Lin, K.K.**, 2006. Entrainment and chaos in a pulse-driven hodgkin-huxley oscillator, *SIAM Journal on Applied Dynamical Systems*, 5(2), 179–204.

- [66] **Thurman, Z.**, 2013. Dynamics of the fitzhugh-nagumo neuron model, Senior Project, California Polytechnic State University.
- [67] **Rigatos, G.**, 2014. Robust synchronization of coupled neural oscillators using the derivative-free nonlinear kalman filter, *Cognitive Neurodynamics*, **8**(6), 465–478.
- [68] **Wen, P., Linsen, X., Baolin, F. and Zhong, W.**, 2015. CPG control model of snake-like robot parameters of optimization based on ga, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE-ROBIO 2015*, Zhuhai, China, 6-9 Dec., 1944–1949.
- [69] **Herrero-Carron, F.**, 2011. Novel central pattern generator elements for autonomous modular robots, *PhD Thesis*, Autonoma De Madrid Universiy.
- [70] **Herrero-Carron, F., Rodriguez, F.B. and Varona, P.**, 2011. Bio-inspired design strategies for central pattern generator control in modular robotics, *Bioinspiration and Biomimetics*, **6**(1), 016006.
- [71] **Ekeberg, Ö.**, 1993. A combined neuronal and mechanical model of fish swimming, *Biological Cybernetics*, **69**(5–6), 363–374.
- [72] **Ijspeert, A.J.**, 2001. A connectionist central pattern generator for the aquatic and terrestrial gaits of a simulated salamander, *Biological Cybernetics*, **84**(5), 331–348.
- [73] **Patel, L.N., Murrayi A. and Hallam, J.**, 2007. Super-lampreys and wave energy: optimised control of artificially-evolved, simulated swimming lamprey, *Neurocomputing*, **70**(7–9), 1139–1154.
- [74] **Donati, E., Corradi, F., Stefanini, C. and Indiveri G.**, 2014. A spiking implementation of the lamprey’s central pattern generator in neuromorphic vlsi, *IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*, Lausanne, Switzerland, 22-24 Oct., 1-4.
- [75] **Chowdhury, A.R. and Panda, S.K.**, 2015. Finding answers to biological control methods using modulated patterns : an application to bio-inspired robotic fish, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seattle, WA, USA, 26-30 May., 3146–3153.
- [76] **Liu, G.L., Habib, M.K., Watanabe, K. and Izumi, K.**, 2008. Central pattern generators based on matsuoka oscillators for the locomotion of biped robots, *Artificial Life and Robotics*, **12**(1–2), 264–269.

- [77] **Kim, D.H., Leei S. and Park, J.**, 2008. Design of central pattern generators (cpgs) for trajectory tracking of fish-mimetic robots, *7th WSEAS international conference on computational intelligence, man-machine systems and cybernetics*, (WSEAS), 191–196.
- [78] **Taga, G.**, 1995. A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion - I. emergence of basic gait, *Biological Cybernetics*, **73**(2), 97–111.
- [79] **Ijspeert, A.J. and Crespi, A.**, 2007. Online trajectory generation in an amphibious snake robot using a lamprey-like central pattern generator model, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, Italy, 10-14 April, 262–268.
- [80] **Ijspeert, A.J., Crespi, A. and Cabelguen, J.M.**, 2005. Simulation and robotics studies of salamander locomotion: applying neurobiological principles to the control of locomotion in robots, *Neuroinformatics*, **3**(3), 171–196.
- [81] **Righetti, L. and Ijspeert, A.J.**, 2008. Pattern generators with sensory feedback for the control of quadruped locomotion, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, 19-23 May, 819–824.
- [82] **Ahmadizadeh, S., Nesic, D., Grayden, D.B. and Freestone, D.R.**, 2015. Analytic synchronization conditions for a network of wilson and cowan oscillators, *IEEE Conference on Decision and Control*, Osaka, Japan, 15-18 Dec., 3104–3109.
- [83] **Fang, Y., Hu, J., Liu, W., Chen, B., Qi, J. and Ye, X.**, 2016. A cpg-based online trajectory planning method for industrial manipulators, *Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems, ACIRS 2016*, Tokyo, Japan, 20-22 July, 41–46.
- [84] **Zhang, D., Hu, D., Shen, L. and Xie, H.**, 2006. A bionic neural network for fish-robot locomotion, *Journal of Bionic Engineering*, **3**(4), 187–194.
- [85] **Wangi C., Xiei G., Wangi L. and Cao, M.**, 2011. CPG-based locomotion control of a robotic fish: uing linear oscillators and reducing control parameters via pso, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, **7**(7), 4237–4249.

- [86] **Li, L., Wang, C. and Xie, G.,** 2014. Modeling of a carangiform-like robotic fish for both forward and backward swimming: based on the fixed point, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Hong Kong, China, 31 May-7 June, 800–805.
- [87] **Li, L., Wang, C., Xie, G. and Shi, H.,** 2014. Digital implementation of cpg controller in avr system, *33rd Chinese Control Conference, CCC 2014*, Nanjing, China, 28-30 July, 8293–8298.
- [88] **Wang, W., Gu, D. and Xie, G.,** 2017. Autonomous optimization of swimming gait in a fish robot with multiple onboard sensors, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 1–13.
- [89] **Zhang, S., Qian, Y., Liao, P., Qin, F. and Yang, J.,** 2016. Design and control of an agile robotic fish with integrative biomimetic mechanisms, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **21**(4), 1846–1857.
- [90] **Hu, Y., Zhang, S., Liang, J. and Wang, T.,** 2014. Development and cpg-based control of a biomimetic robotic fish with advanced underwater mobility, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Hong Kong, China, 31 May-7 June, 813–818.
- [91] **Zhu, M., Xu, W. and Cheng, L.K.,** 2017. Esophageal peristaltic control of a soft-bodied swallowing robot by the central pattern generator, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **22**(1), 91–98.
- [92] **Niu, X., Xu, J., Ren, Q. and Wang, Q.,** 2014. Locomotion learning for an anguilliform robotic fish using central pattern generator approach, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **61**(9), 4780–4787.
- [93] **Niu, X. and Xu, J.,** 2014. Modeling control and locomotion planning of an anguilliform robotic fish, *Unmanned Systems*, **2**(4), 295–321.
- [94] **Zhou, C. and Low, K.H.,** 2014. On-line optimization of biomimetic undulatory swimming by an experiment-based approach, *Journal of Bionic Engineering*, **11**(2), 213–225.
- [95] **Sfakiotakis, M., Gliva, R. and Mountoufaris, M.,** 2016. Steering-plane motion control for an underwater robot with a pair of undulatory fin propulsors, *24th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2016*, Athens, Greece, 21-24 June, 496–503.

- [96] **Hu, Y., Zhao, W., Wang, L. and Jia, Y.,** 2008. Neural-based control of modular robotic fish with multiple propulsors, *IEEE Conference on Decision and Control*, Cancun, Mexico, 9-11 Dec., 5232–5237.
- [97] **Zhao, W., Yu, J., Fang, Y. and Wang, L.,** 2006. Development of multi-mode biomimetic robotic fish based on central pattern generator, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, 9-15 Oct., 3891–3896.
- [98] **Yu, J., Wang, M., Su Z., Tan, M. and Zhang, J.,** 2011. Dynamic modeling and its application for a cpg-coupled robotic fish, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (Icra)*, Shanghai, China, 9-13 May, 159-164.
- [99] **Wu, Z., Yu, J., Su, Z. and Tan, M.,** 2014. Implementing 3-d high maneuvers with a novel biomimetic robotic fish, *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, **47**(3), 4861–4866.
- [100] **Wu, Z., Yu, J. and Tan, M.,** 2012. CPG parameter search for a biomimetic robotic fish based on particle swarm optimization, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2012*, Guangzhou, China, 11-14 Dec., 563–568.
- [101] **Manoonpong, P., Pasemann, F. and Wörgötter, F.,** 2008. Sensor-driven neural control for omnidirectional locomotion and versatile reactive behaviors of walking machines, *Robotics and Autonomous Systems*, **56**(3), 265–288.
- [102] **Steingrube, S., Timme, M., Wörgötter, F. and Manoonpong, P.,** 2010. Self-organized adaptation of a simple neural circuit enables complex robot behaviour, *Nature Physics*, **6**(3), 224–230.
- [103] **Xiong, X., Wörgötter, F. and Manoonpong, P.,** 2014. Neuromechanical control for hexapedal robot walking on challenging surfaces and surface classification, *Robotics and Autonomous Systems*, **62**(12), 1777–1789.
- [104] **Manoonpong, P., Parlitz, U. and Wörgötter, F.,** 2013. Neural control and adaptive neural forward models for insect-like energy-efficient and adaptable locomotion of walking machines, *Frontiers in Neural Circuits*, **7**, 1–28.
- [105] **Haitao, Y., Haibo, G., Liang D., Mantian Li, Z., and Liu G.,** 2016. Gait generation with smooth transition using cpg-based locomotion control for hexapod walking robot, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **63**(9), 5488–5500.

- [106] **Zhong, G., Chen, L., Jiao, Z., Li, J. and Deng, H.**, 2017. Locomotion control and gait planning of a novel hexapod robot using biomimetic neurons, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1–13.
- [107] **Heim, S., Ajallooeian, M., Eckert, P., Vespignani, M. and Ijspeert, A.J.**, 2015. On designing an active tail for body-pitch control in legged robots via decoupling of control objectives, *Assistive Robotics: Proceedings of the 18th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR)*, 43(3), 338–346.
- [108] **Buchli, J., Iida, F. and Ijspeert A.J.**, 2006. Finding resonance: adaptive frequency oscillators for dynamic legged locomotion, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China. 9-15 Oct., 3903–3909.
- [109] **Gay, S., Santos-Victor, J. and Ijspeert, A.J.**, 2013. Learning robot gait stability using neural networks as sensory feedback function for central pattern generators, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Tokyo, Japan, 3-7 Nov., 1–8.
- [110] **Li, X., Wang, W. and Yi, J.**, 2015. Gait transition based on cpg modulation for quadruped locomotion, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, Busan, South Korea, 7-11 July, 500–505.
- [111] **Huang, Z. and Wang, W.**, 2016. Controller-switching based gait transition for a quadruped robot, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2016*, Harbin, China, 7-10 Aug., 653–658.
- [112] **Li, X., Wang, W. and Yi, J.**, 2016. Foot contact force of walk gait for a quadruped robot, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2016*, Harbin, China, 7-10 Aug., 659–664.
- [113] **Zhang, J.**, 2011. Dynamic walking of aibo with hopf oscillators, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 24(4), 612.
- [114] **Zhang, X., Xiong, J., Weng, S., Li, H., Chen, M., Gan, Y., Zhao, Q., Xia, Z.**, 2015. A modified gait planning method for biped robot based on central pattern generators, *IEEE International Conference on Information and Automation*, Lijiang, China, 8-10 Aug., 1551–1555.

- [115] **Ryu, J.K., Chong, N.Y., You, B.J. and Christensen, H.**, 2009. Adaptive cpg based coordinated control of healthy and robotic lower limb movements, *IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, Toyama, Japan, 27 Sept.-2 Oct., 122–127.
- [116] **Avrin, G., Makarov, M., Rodriguez-Ayerbe, P. and Siegler, I.A.**, 2016. Particle swarm optimization of matsuoka's oscillator parameters in human-like control of rhythmic movements, *Proceedings of the American Control Conference*, Boston, MA, USA, 6-8 July, 342–347.
- [117] **Marbach, D. and Ijspeert, A.J.**, 2005. Online optimization of modular robot locomotion, *IEEE International Conference Mechatronics and Automation*, Niagara Falls, Ont., Canada, 29 July-1 Aug., 248–253.
- [118] **Sproewitz, A., Moeckel, R., Maye, J. and Ijspeert, A.J.**, 2008. Learning to move in modular robots using central pattern generators and online optimization, *International Journal of Robotics Research*, 27(3–4), 423–443.
- [119] **Crespi, A. and Ijspeert, A.J.**, 2006. AmphiBot II : an amphibious snake robot that crawls and swims using a central pattern generator, *9th International Conference on Climbing and Walking Robots*, Brussels, Belgium, September, 19-27
- [120] **Wang, Z., Gao, Q. and Zhao, H.**, 2017. CPG-inspired locomotion control for a snake robot basing on nonlinear oscillators, *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 85(2), 209–227.
- [121] **Chung S.J. and Dorothy, M.**, 2010. Neurobiologically inspired control of engineered flapping flight, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 33(2), 440–453.
- [122] **Kwon, J., Yang, W., Lee, H., Bae, JH. and Oh, Y.**, 2014. Biologically inspired control algorithm for an unified motion of whole robotic arm-hand system, *IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, Edinburgh, UK, 25-29 Aug., 398–404.
- [123] **Kwon, J. and Kim, H.**, 2016. The enhanced performance of a robotic arm control based on neural oscillator networks, *42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy, 23-26 Oct., 803-808.
- [124] **Seo, K., Chung, S.J. and Slotine, J.J.E.**, 2010. CPG-based control of a turtle-like underwater vehicle, *Autonomous Robots*, 28(3), 247–269.

- [125] **Wang, Z., He, B., Shen, R. and Meng, W.**, 2015. Contact impact inhibition strategy for biped robot walking based on central pattern generator, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE-ROBIO 2015*, Zhuhai, China, 6-9 Dec., 733–738.
- [126] **Hong, Y.D. and Lee, B.**, 2017. Evolutionary optimization approach for optimal hopping of humanoid robots, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **64**(2), 1279–1283.
- [127] **Low, K.H.**, 2007. Mechatronics and buoyancy implementation of robotic fish swimming with modular fin mechanisms, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, **221**(3), 295–309.
- [128] **Sfakiotakis, M.**, 1999. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **24**(2), 237–252.
- [129] **Korkmaz, D.**, 2011. Uzaktan kontrollü bir robot balığın tasarımı ve gerçekleştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [130] **Ward, A.B. and Mehta, R.S.**, 2010. Axial elongation in fishes: using morphological approaches to elucidate developmental mechanisms in studying body shape, *Integrative and Comparative Biology*, **50**(6), 1106–1119.
- [131] **Nesteruk, I., Passoni, G. and Redaelli, A.**, 2014. Shape of aquatic animals and their swimming efficiency, *Journal of Marine Biology*, **2014**, 1-9.
- [132] **Raj, A. and Thakur, A.**, 2016. Fish-inspired robots: design, sensing, actuation, and autonomy - a review of research, *Bioinspiration and Biomimetics*, **11**(3), 1–23.
- [133] **Webb, P.W.**, 1988. Simple physical principles and vertebrate aquatic locomotion, *American Zoologist*, **28**(2), 709–725.
- [134] **Söylemez, E.**, 2013. Makina Dinamiği, 1. ed. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [135] **Suebsaiprom, P. and Lin, C.L.**, 2015. Maneuverability modeling and trajectory tracking for fish robot, *Control Engineering Practice*, **45**, 22–36.
- [136] **Suebsaiprom, P., Lin, C.L., Engkaninan, A.**, 2017. Undulatory locomotion and effective propulsion for fish-inspired robot, *Control Engineering Practice*, **58**, 66–77.
- [137] **Vo, T.Q., Kim, H.S. and Lee, B.R.**, 2012. Smooth gait optimization of a fish robot using the genetic-hill climbing algorithm, *Robotica*, **30**(2), 257–278.

- [138] **Ozmen Koca, G., Bingol, M.C., Bal, C., Akpolat, Z.H., Ay, M. and Korkmaz, D.,** 2017. Design and control of diving mechanism for the biomimetic robotic fish, *Mechatronics 2017, Advances in Intelligent Systems and Computing*, **644**, 662–670.
- [139] **Ozmen Koca, G., Bal, C., Korkmaz, D., Bingol, M.C., Ay, M., Akpolat, Z.H. and Yetkin, S.,** 2018. Three-dimensional modeling of a robotic fish based on real carp locomotion, *Applied Sciences*, **8**(2), 180.
- [140] **Fossen, T.I.,** 2011. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control, John Wiley & Sons.
- [141] **Niu, X. and Xu, J.,** 2013. Modeling, control and locomotion planning of an anguilliform robotic fish, *Unmanned Systems*, **2**(4), 295-321.
- [142] **Nicole S. M.,** 2016. Analysis of sensory feedback in the lamprey central pattern generator for locomotion, *PhD Thesis*, University of Maryland Baltimore County.
- [143] **Jadbabaie, A., Motee, N., Barahona, M.,** 2004. On the stability of the kuramoto model of coupled nonlinear oscillators, *American Control Conference*, Boston, MA, USA, 30 June-2 July, 4296-4301.
- [144] **Shimokawa, T., Pakdaman, K. and Sato, S.,** 1999. Time-scale matching in the response of a leaky integrate-and-fire neuron model to periodic stimulus with additive noise, *Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, **59**(3), 3427–3443.
- [145] **Zadeh L.A.,** 1965. Fuzzy sets, *Information and control*, **8**(3), 338–353.
- [146] **Özmen Koca, G.,** 2010. Dört kol mekanizmalı mekatronik bir sistemin akıllı yöntemlerle kontrolü, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [147] **Bal, C.,** 2007. Asenkron motorun kayma kipli ve sinirsel bulanık gözlemleyicilerle algılayıcısız hız denetimi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [148] **Wang, H.O., Tanaka, K. and Griffin, M.F.,** 1996. An approach to fuzzy control of nonlinear systems: stability and design issues, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, **4**(1), 14–23.
- [149] **Lilly, J.H.,** 2010. Fuzzy control and identification, John Wiley and Sons.

- [150] **Takagi, T. and Sugeno, M.**, 1993. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, *Reading in Fuzzy Sets for Intelligent Systems*, 387–403.
- [151] **Korkmaz, D., Budak, U., Bal, C., Ozmen Koca, G. and Akpolat, Z.H.**, 2012. Modeling and implementation of a biomimetic robotic fish, *21st International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, Sorrento, Italy, 20-22 June, 1187–1192.
- [152] **Korkmaz, D., Ozmen Koca, G. and Akpolat, Z.H.**, 2011. Robust forward speed control of a robotic fish, *6th International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ, Turkey, 16-18 May, 33-38.
- [153] **Akpolat, Z.H., Bingöl, M., Ay, M., Ozmen Koca, G., Bal, C., and Korkmaz, D.**, 2017. Dynamic model and simulation of one active joint robotic fish, *Engineering Sciences*, **12**(1), 29–39.
- [154] **Liu, J. and Hu, H.**, 2006. Biologically inspired behaviour design for autonomous robotic fish, *International Journal of Automation and Computing*, **4**, 336–347.
- [155] <http://www.firat.edu.tr/tr/content/firat-universitesi-uretti-akilli-robot-balik>, i-RoF Robot Balık Haberi. 16.02.2018.
- [156] <http://www.milliyet.com.tr/Milliyet-Tv/video-izle/robot-balik-su-altinin-yeni-kesifcisi-olacak-g0ix3LPAXvJl.html>, i-RoF Robot Balık Haberi. 16.02.2018.
- [157] <http://www.iha.com.tr/haber-bu-da-akilli-robot-balik-710243/>, i-RoF Robot Balık Haberi. 16.02.2018.
- [158] <https://www.sabah.com.tr/yasam/2018/02/13/3-boyutlu-yaziciyla-robot-balik>, i-RoF Robot Balık Haberi. 16.02.2018.
- [159] <https://www.takvim.com.tr/guncel/2018/02/13/bu-da-robot-balik>, i-RoF Robot Balık Haberi. 16.02.2018.
- [160] <http://www.posta.com.tr/su-altinin-yeni-kasifi-akilli-robot-balik-videosu-1381484>, i-RoF Robot Balık Haberi. 16.02.2018.
- [161] <https://www.haberler.com/su-altinin-yeni-kasifi-akilli-robot-balik-10554440-haberi/>, i-RoF Robot Balık Haberi. 16.02.2018.
- [162] <http://www.hurriyet.com.tr/egitim/ogretim-elemanlarindan-robot-balik-40739460>, i-RoF Robot Balık Haberi. 16.02.2018.

- [163] <http://www.trthaber.com/haber/bilim-teknoloji/robot-balik-su-altinin-yeni-kesifcisi-olacak-350322.html>, i-RoF Robot Balık Haberi. 16.02.2018.
- [164] <https://www.msn.com/es-ar/noticias/fotos/akilli-robot-balik-su-altinin-yeni-keşifçisi-olacak/vp-BBJ19ek>, i-RoF Robot Balık Haberi. 16.02.2018.
- [165] <https://www.youtube.com/watch?v=nIlXIk246Qc>, i-RoF Robot Balık Haberi. 16.02.2018.
- [166] https://www.youtube.com/watch?time_continue=18&v=OMoKauQTvwg, i-RoF Robot Balık Haberi. 16.02.2018.
- [167] <https://www.facebook.com/haberinbizdencom/videos/2043322105710603/>, i-RoF Robot Balık Haberi. 16.02.2018.
- [168] <http://www.mynet.com/haber/guncel/akilli-robot-balik-su-altinin-yeni-kesifcisi-olacak-3711066-1>, i-RoF Robot Balık Haberi. 16.02.2018.
- [169] <http://video.haber7.com/video-galeri/113544-su-altinin-yeni-kasifi-akilli-robot-balik>, i-RoF Robot Balık Haberi. 16.02.2018.
- [170] <https://www.izlesene.com/video/turk-muhendisler-akilli-robot-balik-uretti/10198542>, i-RoF Robot Balık Haberi. 16.02.2018.
- [171] <https://www.youtube.com/watch?v=y2irlB-jY9c>, i-RoF Robot Balık Haberi. 16.02.2018.
- [172] <https://www.youtube.com/watch?v=8oN11suWesw>, i-RoF Robot Balık Haberi. 16.02.2018.

ÖZGEÇMİŞ

Deniz KORKMAZ

denizkorkmaz17@gmail.com, dkorkmaz@firat.edu.tr

Tlf: +90 424 237 0000 / 7617

Fırat Üniversitesi

Teknik Eğitim Fakültesi

Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü

Elazığ, Türkiye

1985 yılında Çanakkale’de doğdu. İlk ve orta öğretimini Çanakkale’de, lise öğrenimini Kocaeli’nde tamamladı. 2004 yılında Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü’nü kazandı. 2008 yılında bu bölümden mezun oldu. Bir dönem sonra Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Ana Bilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2009 yılında, aynı bölümde açılan Araştırma Görevliliği sınavını kazanarak göreve başladı. Halen bu görevi sürdürmektedir. 2011 yılında, yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2014 yılında Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Elektronik Mühendisliği Teknolojileri Programı’nda doktora eğitimine başladı. Yabancı dili İngilizce’dir.