



Üç Boyutlu Hareket Kabiliyetine Sahip Carangiform Türünde Bir Biyomimetik Robot Balığın Tasarımı ve Gerçeklemesi

Program Kodu: 1001

Proje No: 114E652

**Proje Yürütücüsü:
Yrd. Doç. Dr. Gonca ÖZMEN KOCA**

Araştırmacılar:

Yrd. Doç. Dr. Cafer BAL

Yrd. Doç. Dr. Mustafa AY

Danışman:

Prof. Dr. Zühtü Hakan AKPOLAT

Bursiyer(ler):

Deniz KORKMAZ

Mustafa Can BİNGÖL

Seda YETKİN (15.05.2015-12.02.2017)

Perihan KARAKÖSE (01.04.2017-05.01.2018)

ÖNSÖZ

Bu proje 114E652 nolu TÜBİTAK 1001 proje desteği ile gerçekleştirilmiştir. Projenin amacı, çok-eklemlili kuyruk yapısına sahip, bilimsel sualtı keşif, gözlem-araştırma alanlarında kullanılabilirliği yüksek, karar verme yeteneği sayesinde engellerden sakınarak otonom hareket etme kabiliyetine sahip Carangiform türünde yeni bir robot balık prototipi tasarlamak ve gerçekleştirmektir. Carangiform türü balıkların sert, çatallı ve uzun bir kuyruk yüzgeci bulunmaktadır. Bu yüzgeç sayesinde balığa etki eden sürtünme direnci ve türbülans etkisi hiçbir tahrik kuvveti kaybı olmadan azaltılabilmektedir. Böylece, Carangiform türü balıklar diğer balık türlerine göre daha hızlı yüzebilmektedir ve yüksek manevra kabiliyeti ile daha etkin bir yapıya sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı, robot balık tasarımında Carangiform türü bir balık model alınmıştır.

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

- ✓ Robot balığın Carangiform türü balıklardan esinlenilerek biyomimetik bir tasarıma sahip olması ve gerçek bir balığın yüzmeye hareketlerini taklit ederek yüzebilmesi gerekir.
- ✓ Robot balığın gövde yapısının hidrodinamik sürtünme kuvvetini 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, Merkezi Örüntü Üretici ve Bulanık Mantık yaklaşımlarını kullanan karmaşık denetim algoritmalarını gerçekleştirecek bir biyomimetik denetleyici yapısına sahip olmalıdır.

✓ Robot balığın su içerisinde engellerden sakınarak otonom bir şekilde yüzebilmesi gerekmektedir.

Yukarıda bahsedilen tasarım kriterleri dikkate alınarak projede iki gelişme raporu ve bir sonuç raporu dönemlerine ait aşağıda yer alan çalışmalar gerçekleştirilerek proje amaçlanan hedeflere ulaşmıştır.

Birinci Gelişme Raporu Döneminde; gerekli olan mekanik, elektronik malzeme ve teçhizatların satın alınması ana faaliyetimizi oluşturmuştur. Aynı zamanda, konuyla ilgili detaylı bir literatür taraması yapılarak güncel çalışmalar incelenmiştir. Daha sonra, robot balığın dinamik modeli türetilmiş ve SolidWorks teknik çizimleri oluşturularak tek eklemlili ilk prototip üretimi 3B yazıcıda parçaları üretilerek gerçekleştirilmiştir.

İkinci Gelişme Raporu Döneminde; çok eklemlili robot balık prototipinin üretilmesi ve 3B hareket kabiliyetinin gerçekleştirilmesi ana faaliyetlerimizi oluşturmuştur. Öncelikle, robot balığın 3B hareket kabiliyetlerinin incelenmesi için MATLAB ortamında çok eklemlili tahrik yapısına sahip bir dinamik model oluşturulmuş ve sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, robot balık prototipinin yukarı/aşağı hareketlerini gerçekleştirmek için ağırlık merkezi kontrol mekanizması tasarlanarak MATLAB ortamında yapılan benzetim çalışmaları ile doğruluğu test edilmiştir. Daha sonra, çok eklemlili tahrik yapısına sahip robot balık prototipinin bileşenleri tasarlanmış ve SolidWorks ortamında teknik çizimleri hazırlanmıştır. Son olarak, 3B yazıcı ile çok eklemlili prototip bileşenlerinin üretimi gerçekleştirilmiştir.

Sonuç Raporu Döneminde; prototipin her bir parçasının prototipin ana ünitelerini oluşturacak şekilde montajı, montajı yapılan her bir ünitenin su sızdırmazlığının sağlanması ve su sızdırmazlık testleri, prototipin tam montajı ve son olarak sürtünme etkisini azaltmak amacıyla yüzey pürüzsüzlüğünün sağlanması için gerekli çalışmalar yapılmıştır. Prototip gerçek zamanlı çalıştırılarak test edilmiş ve gerekli analizler yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Ayrıca bu dönemin sonuna prototipin farklı platformlarda ulusal-uluslararası tanıtımı yapılmıştır ve bu konudaki görüşler değerlendirilmiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1.GİRİŞ	1
2.LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	16
3.1 ROBOT BALIĞIN ÜÇ BOYUTLU DİNAMİK MODELİNİN ELDE EDİLMESİ.....	16
3.1.1 BALIKLARIN MORFOLOJİK YAPISI.....	16
3.1.2 İKİ EKLEMLİ KUYRUK YAPISINA SAHİP ROBOT BALIĞIN DOĞRUSAL OLMAYAN DİNAMİK MODELİ	20
3.2 LAMPREY TÜRÜ SINIR HÜCRESİ MERKEZİ ÖRÜNTÜ ÜRETECİ	39
3.2.1 TEK YÖNLÜ ZİNCİR BAĞLANTILI MÖÜ DEVRESİ	48
3.3 BULANIK MANTIK DENETLEYİCİLER.....	59
3.3.1 BULANIK MANTIK VE UYGULAMA ALANLARI.....	59
3.3.2 BULANIK MANTIK DENETLEYİCİLER.....	61
3.4 CARANGIFORM TÜRÜ BİYOMİMETİK ROBOT BALIK PROTOTİPİNİN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ.....	65
3.4.1 TEK EKLEMLİ ROBOT BALIK PROTOTİPİ	65
3.4.2 İKİ EKLEMLİ ROBOT BALIK PROTOTİPİ	66
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	83
4.1 ROBOT BALIK PROTOTİPİ İÇİN TASARLANAN MÖÜ MODELİ.....	84
4.2 PROTOTİPİN SİMMECHANİCS ORTAMINDA HAREKET ANALİZİ	89
4.3 ROBOT BALIĞIN AÇIK ÇEVİRİM PERFORMANSI.....	92
4.3.1 ROBOT BALIĞIN İLERİ YÖN DÜZ YÜZÜŞ İÇİN AÇIK ÇEVİRİM PERFORMANSI	94

4.3.2 ROBOT BALIĞIN DÖNÜŞ HAREKETİ İÇİN AÇIK ÇEVİRİM PERFORMANSI	98
4.4 ROBOT BALIĞIN KAPALI ÇEVİRİM DENETİM PERFORMANSI	104
4.4.1 ROBOT BALIĞIN SAPMA AÇISININ KAPALI ÇEVİRİM DENETİMİ	107
4.4.2 ROBOT BALIĞIN OTONOM KAPALI ÇEVİRİM DENETİMİ	115
4.4.3 ROBOT BALIĞIN ÜÇÜNCÜ BOYUT HAREKETİNİN KAPALI ÇEVİRİM DENETİMİ.....	124
KAYNAKLAR.....	135

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Amphibious robot balık (Yu ve Yi, 2009)	3
Şekil 2.2. Nanyang Awana (NAF-I) (Chong vd., 2009)	4
Şekil 2.3. Biyomimetik robot balık (Zou (2009).....	4
Şekil 2.4. Biyomimetik robot balık (Zhao vd., 2006)	4
Şekil 2.5. Robot balık (Papadopoulos vd., 2009)	5
Şekil 2.6. Robot balık (Chan vd., 2009)	5
Şekil 2.7. Robot balık (Zhao vd., 2009).....	5
Şekil 2. 8. Robot balık (Wang vd., 2009)	6
Şekil 2.9. Robot balık (Zhong vd., 2009).....	6
Şekil 2.10. Robot balık (Hu vd., 2009)	6
Şekil 2.11. G9 (Liu ve Hu, 2010).....	7
Şekil 2.12. SPC (Wang vd., 2010)	7
Şekil 2.13. Robot balık (Weibing vd., 2010).....	8
Şekil 2.14. Robot balık (Yu vd., 2013).....	8
Şekil 2.15. Robot balık (Ren vd., 2013)	8
Şekil 2.16. Robot balık (Yan vd., 2013).....	9
Şekil 2.17. Robot balık (Wu vd., 2013)	9
Şekil 2.18. ICHTHUS V5.6 robot balık (Wang vd., 2013).....	9
Şekil 2.19. Geliştirilen robot balık prototipi (Ren vd., 2014).....	10
Şekil 3.1. Carangiform türü bir balığın morfolojik yapısı	16
Şekil 3.2. Farklı balık türlerine ait genel vücut şekilleri	17
Şekil 3.3. Farklı balık türlerine ait genel kuyruk şekilleri: (a) Kürek tipi (Spade), (b) Yuvarlanmış (Rounded), (c) Girintili (Indented), (d) Çatallı (Forked), (e) Dengesiz çatallı (Unevenly Forked), (f) Sivri (Pointed)	17
Şekil 3.4. Yüzme türlerinin sınıflandırılması	18

Şekil 3.5. BCF ve MPF hareketlerine göre yüzme modelleri: (a) BCF ile hareket, (b) MPF ile hareket	19
Şekil 3.6. BCF yüzme hareketlerinin sınıflandırılması: (a) Anguilliform, (b) Subcarangiform, (c) Carangiform, (d) Thunniform	19
Şekil 3.7. Carangiform türü bir balığın eklemli yapısı	21
Şekil 3.8. Robot balığın kinematik yapısı: (a) Dört eklemli kinematik zincir bağlantı (b) Tek eklemli yapısı	22
Şekil 3.9. Kuyruk yüzgecinde oluşan hidrodinamik kuvvetler	26
Şekil 3.10. Carangiform türü bir balığın kuyruk uzunluğu ve yüksekliği	27
Şekil 3.11. Hidrodinamik bileşke kuvvetler	27
Şekil 3.12. Kuyruk üzerinde oluşan atak açısı	28
Şekil 3.13. Carangiform türü bir balığın dalış anı	29
Şekil 3.14. Ağırlık merkezi denetim mekanizması	30
Şekil 3.15. İki eklemli robot balığın 3B uzayda 6-SB eksen takımları	31
Şekil 3.16. İki eklemli robot balığın kesiti ile ağırlık ve kaldırma kuvvetlerinin gösterimi	37
Şekil 3.17. İki eklemli robot balığın 6-SB blok diyagramı	39
Şekil 3.18. Sinirsel Lamprey osilatör hücresi	40
Şekil 3.19. STA modelinin paralel R – C eş değer devresi	41
Şekil 3.20. Bir osilatör sinir hücresinin basitleştirilmiş gösterimi	43
Şekil 3.21. Osilatör modeli çıkışı	44
Şekil 3.22. Motor denetim merkezi modeli: (a) Detaylı gösterim (b) Basitleştirilmiş gösterim	45
Şekil 3.23. Motor denetim merkezi ile ayarlanan faz farkı değişiminin iki osilatör arasındaki dağılımı	46
Şekil 3.24. Osilatörler arasındaki sinaptik bağlantılar: (a) Tek yönlü bağlantı (b) Çift yönlü bağlantı	47
Şekil 3.25. Osilatörler arasındaki sinaptik bağlantılar: (a) Zincir bağlantı (b) Halka bağlantı	48
Şekil 3.26. Osilatörlerin karmaşık olarak birbirine bağlanması	48
Şekil 3.27. Tek yönlü zincir bağlı MÖÜ devresi	49

Şekil 3.28. A 'nın genlik, periyot ve faz farkına olan etkisi	50
Şekil 3.29. τ 'nın genlik, periyot ve faz farkına olan etkisi	51
Şekil 3.30. β ve A 'nın değişimine göre bağlı ofset	52
Şekil 3.31. β 'nın genlik, periyot ve ofset değerlerine olan olan etkisi	53
Şekil 3.32. α 'nın genlik, periyot ve faz farkına etkisi	55
Şekil 3.33. Genliğin α ve A ile değişimi	56
Şekil 3.34. Genlik kazancı	56
Şekil 3.35. Düzeltilmiş genlik	57
Şekil 3.36. Periyodun α ve τ ile değişimi	57
Şekil 3.37. Periyot kazancı	58
Şekil 3.38. Düzeltilmiş periyot	59
Şekil 3.39. Sıkça kullanılan üyelik fonksiyonları	60
Şekil 3.40. BMD yapısı ve denetlenen sistem	61
Şekil 3.41. Hata ve hatanın türevi için bulanıklaştırma işlemi	62
Şekil 3.42. Çıkış değişkenine ait üyelik fonksiyonları	62
Şekil 3.43. İlgili kuralların ima işlemi ile uygulanması	64
Şekil 3.44. Toparlama işlemi sonucunda oluşan çıkış bulanık kümesi	64
Şekil 3.45. (a) Tek eklemlı robot balık prototipi, (b) Katı model görüntüsü (Akpolat vd., 2017)	66
Şekil 3.46. Tek eklemlı robot balığın kuyruk hareketleri.	66
Şekil 3.47. Carangiform türü bir koi sazan balığı	68
Şekil 3.48. (a) Tasarlanan robot balık prototipi, (b) prototipin iç yapısı	69
Şekil 3.49. (a) Voxelizer ortamında katı modellerin işlenmesi, (b) Bileşenlerin 3B baskı teknolojisi ile üretimi	70
Şekil 3.50. Robot balık prototipinin bileşenleri	71
Şekil 3.51. Geliştirilen robot balık prototipinin görünümü	73
Şekil 3.52. İkinci eklemin mekaniksel yapısı	73

Şekil 3.53. İkinci eklem montaj yapısı	74
Şekil 3.54. Birinci eklem montajı: (a) Tasarlanan servo motor üst milinin montajı, (b) Motor yatağı montaj görünümü.....	75
Şekil 3.55. İki eklemli kuyruk mekanizması.....	75
Şekil 3.56. İki eklemli kuyruk mekanizmasının su içerisindeki çalışma döngüsü	76
Şekil 3.57. (a) Esnek kuyruk yüzgecinin kalıp silikonu ile üretimi, (b) Esnek kuyruk yüzgeci	76
Şekil 3.58. Ağırlık merkezi denetim mekanizmasının mekaniksel yapısı	77
Şekil 3.59. Geliştirilen ağırlık merkezi denetim mekanizmasının görünümü	78
Şekil 3.60. Robot balığın tasarlanan burun yapısı	79
Şekil 3.61. Mesafe sensörlerinin görüş açıları.....	79
Şekil 3.62. Elektronik sistemin blok diyagramı	80
Şekil 3.63. Robot balığın tasarlanan elektronik sistemi	82
Şekil 4.1. Deneysel çalışma ortamının temsili gösterimi.....	83
Şekil 4.2. Deneysel çalışma ortamının görüntüleri: (a) Deneysel havuz, (b) Kullanıcı bilgisayar, (c) Tepe kamerası, (d) Sualtı kamerası	84
Şekil 4.3. Geliştirilen tek yönlü zincir bağlı MÖÜ modeli.....	85
Şekil 4.4. Osilatör çıkışlarına bağlı eklemler arasındaki faz geçişleri	85
Şekil 4.5. Birinci eklem senaryosu	87
Şekil 4.6. İkinci eklem senaryosu	87
Şekil 4.7. Açık çevrim deneyler için örnek parametre değişimleri ve osilatör çıkışları.....	88
Şekil 4.8. Robot balık prototipinin SimMechanics görünümü.....	89
Şekil 4.9. Sazan balığının ileri yön düz yüzüş hareketinin bir periyodu.....	90
Şekil 4.10. Robot balığın ileri yön düz yüzüş hareketinin bir periyodu	90
Şekil 4.11. Sazan balığının dönüş hareketinin bir periyodu	91
Şekil 4.12. Robot balığın dönüş hareketinin bir periyodu	91
Şekil 4.13. Robot balığın açık çevrim performans analizleri için kullanılan blok şeması	92

Şekil 4.14. $A_1=10$ ve $A_2=20$ genlik değerleri için ARM Cortex M4 mikrodenetleyici ile elde edilen osilatör çıkışları	93
Şekil 4.15. $A_1=20$ ve $A_2=20$ genlik değerleri için ARM Cortex M4 mikrodenetleyici ile elde edilen osilatör çıkışları	93
Şekil 4.16. $A_1=20$ ve $A_2=30$ genlik değerleri için ARM Cortex M4 mikrodenetleyici ile elde edilen osilatör çıkışları	94
Şekil 4.17. Robot balığın deneysel ortamda çarpınma frekansı değişimine göre farklı genlik değerlerinde ileri yön hız değişimi	95
Şekil 4.18. Robot balığın deneysel ortamda çarpınma frekansı değişimine göre farklı faz değerlerinde ileri yön hız değişimi	96
Şekil 4.19. Robot balığın deneysel ortamda ileri yön düz yüzüş hareketi	98
Şekil 4.20. Robot balığın deneysel ortamda ofset değişimine göre farklı çarpınma frekanslarında dönüş yarıçapı değişimi	99
Şekil 4.21. Robot balığın deneysel ortama farklı ofset değişimine göre farklı çarpınma frekanslarında çizgisel dönüş hızı değişimi.....	100
Şekil 4.22. Robot balığın deneysel ortamda ofset değişimine göre farklı çarpınma frekanslarında açısal dönüş hızı değişimi	100
Şekil 4.23. Robot balığın $f=2\text{Hz}$, $A_1=10$, $A_2=20$, $\beta=0.8$, $\alpha=0.8$ ve $\gamma=0.2$ için deneysel ortamda dönüş hareketi.....	102
Şekil 4.24. 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.....	103
Şekil 4.25. Duyusal geri beslemeli kapalı çevrim denetim sistemi blok şeması	105
Şekil 4.26. Robot balığın su içerisindeki dengesi: (a) Üstten görünüm, (b) Yandan görünüm	105
Şekil 4.27. Refleks yayı model blok gösterimi	106
Şekil 4.28. Refleks yayı içeren duyusal MÖÜ modeli	106
Şekil 4.29. Duyusal kapalı çevrim döngüsü.....	107
Şekil 4.30. Bulanık denetleyici ile sapma açısının kapalı çevrim denetimi	107
Şekil 4. 31. 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	108

Şekil 4.32. Kineova 0.8.26 programı ile robot balık prototipinin konum değişiminin belirlenmesi	109
Şekil 4.33. 15°'lik sapma açısı referansı için kapalı çevrim denetimin deneysel görüntüleri	111
Şekil 4.34. 30°'lik sapma açısı referansı için kapalı çevrim denetimin deneysel görüntüleri	112
Şekil 4.35. 45°'lik sapma açısı referansı için kapalı çevrim denetimin deneysel görüntüleri	113
Şekil 4.36. 45°'lik Sapma açılarının zamana bağlı değişimi: (a) $\psi_{ref}=15^\circ$, (b) $\psi_{ref}=30^\circ$, (c) $\psi_{ref}=45^\circ$	114
Şekil 4.37. Bulanık denetleyici ile robot balığın otonom kapalı çevrim denetimi	115
Şekil 4.38. Otonom yüzüş için belirlenen giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları: (a) Engel mesafe bilgileri için giriş üyelik fonksiyonları, (b) çıkış üyelik fonksiyonları	116
Şekil 4.39. Rasgele engeller için t=30sn süre boyunca mesafe sensörlerinden elde edilen yüzdelik mesafe verileri	118
Şekil 4.40. Rasgele engeller için t=30sn süre boyunca bulanık denetleyicinin çıkışı	118
Şekil 4.41. Duyusal sinir hücresi davranışı.....	119
Şekil 4.42. Osilatör çıkışları	119
Şekil 4.43. Birincisenaryoya ait deney görüntüleri.....	121
Şekil 4.44. İkinci senaryoya ait deney görüntüleri	122
Şekil 4.45. Üçüncü senaryoya ait deney görüntüleri	123
Şekil 4.46. Oransal denetleyici ile yunuslama açısının kapalı çevrim denetimi	124
Şekil 4.47. -30°'lik yunuslama açı referansı için deneysel kapalı çevrim görüntüleri	126
Şekil 4.48. -45°'lik yunuslama açı referansı için deneysel kapalı çevrim görüntüleri	127
Şekil 4.49. Yüzeye yakın seviyede derinlik denetimi: (a) Deneysel görüntüler (b) Yunuslama açısının zamana bağlı değişimi grafiği.....	128
Şekil 4.50. Orta seviyede derinlik denetimi: (a) Deneysel görüntüler (b) Yunuslama açısının zamana bağlı değişimi grafiği	129
Şekil 4. 51. Tabana yakın seviyede derinlik denetimi: (a) Deneysel görüntüler (b) Yunuslama açısının zamana bağlı değişimi grafiği.....	130

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Robot balığın eksen takımları ve eksen takımlarında gerçekleşen davranışlar....	32
Tablo 3.2. Bir osilatör modeline ait içsel sinaptik ağırlıklar	43
Tablo 3.3. Osilatör için belirlenen başlangıç şartları	44
Tablo 3.4. Örnek olarak verilen girişler için üyelik dereceleri ve üyelik fonksiyonları	62
Tablo 3. 5. Örnek olarak verilen girişler için etkin kurallar	63
Tablo 3.6. Robot balık prototipinin teknik özellikleri.....	72
Tablo 4.1. MÖÜ modeli ve sinüzoidal fonksiyon için oluşturulan senaryo.....	86
Tablo 4.2. Örnek davranışlar için zamana bağlı parametre değişimleri	88
Tablo 4.3. Robot balığın çarpınma frekansı değişimine göre farklı genlik değerlerinde ileri yön hız değişimi	95
Tablo 4.4. Robot balığın çarpınma frekansı değişimine göre farklı faz değerlerinde ileri yön hız değişimi	97
Tablo 4.5. Robot balığın ofset değişimine göre farklı çarpınma frekanslarında çizgisel dönüş hızı değişimi	101
Tablo 4.6. Sapma açısı denetimi için oluşturulan bulanık denetleyici kural tablosu	109
Tablo 4. 7. Engellerden sakınarak otonom yüzüş için oluşturulan bulanık denetleyici kural tablosu	117

ÖZET

Bu proje çalışmasında, üç boyutlu hareket kabiliyetine sahip Carangiform türünde biyomimetik bir robot balık prototipi tasarlanmış, gerçekleştirilmiş ve gerçek bir ortamda analizleri yapılmıştır. Tasarım için aynı türde gerçek balık özellikleri ve hareketleri incelenerek boyutlar ve yapı olarak gerçek balığın fiziksel karakteristiklerini kullanan çok parçalı biyomimetik bir yaklaşım benimsenmiştir. Vücut oranlarının uygun değerleri balığın yüzüş modlarına ve kuyruk salınım sinyallerine göre farklı optimizasyon yöntemleri ile belirlenmiştir. Robot balığın ve gerçek ortamın tüm parametreleri yansıtılmaya çalışılarak ve Lagrange yaklaşımı kullanılarak robot balığın üç boyutlu dinamik modeli MATLAB benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu parametre değerleri kullanılarak tasarlanan robot balığın ilk analizleri benzetim ortamında yapılmıştır ve değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler dikkate alınarak tasarım güncellenmiştir. 3 Boyutlu yazıcı teknolojisi kullanılarak prototip parçaları üretilmiştir.

Prototip, sert bir ön gövde, iki eklemlili tahrikli kuyruk mekanizması ve esnek tahriksiz kuyruk olmak üzere üç ana bölümden oluşturulmuştur. Sensörler, elektronik denetim sistemi ve ağırlık merkezi denetim mekanizması robot balığın sert ön gövdesi içerisinde bulunmaktadır. Kuyruğu yüksek güçlü birer servo motor ile tahrik edilen iki eklemlili kuyruk mekanizması ve ikinci eklemin sonuna mesnetlenmiş esnek silikon kuyruktan oluşmaktadır. Birbirine seri bir zincir yapısı şeklinde bağlı olan eklemler ile hareket için gerekli tahrik kuvveti üretilir.

İki farklı akıllı denetim yapısı kullanılmıştır. Birinci denetim yapısı, gerçek bir Lamprey balığının omurilik sinir hücre yapısını model olarak oluşturulan Merkezi Örüntü Üreteci'dir. Bu yapı sayesinde robot balığın ritmik kuyruk hareketleri biyomimetik bir yapı ile oluşturulmaktadır. Merkezi Örüntü Üreteci ile oluşturulan ritmik kuyruk hareketleri; her bir ekleminin salınım hızı, salınım genliği ve eklemlerin birbirlerine göre faz farkı olmak üzere üç parametre ile Bulanık Denetleyici tabanlı bir yaklaşım kullanılarak denetlenir. İkinci denetim yapısı, balığın otonom yüzüş modunda amaç doğrultusunda yönlendirilmesi için hareket kombinasyonunu oluşturarak alt denetim birimlerine uygun denetim sinyallerini ileten bir Bulanık Denetleyicidir.

Prototip havuz ortamında üç boyutlu hareket denetimi ile farklı çırpınma frekansları ve genlikleri için analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Robot balık, Carangiform, Çok eklemlili, Biyomimetik, Merkezi Örüntü Üreteci, Bulanık Denetleyici, Otonom hareket

ABSTRACT

In this project, the prototype of a biomimetic robot fish in the form of Carangiform, which can move in three dimensions, has been developed and analyzed in its nature. For design, a multi-part biomimetic approach, which uses the physical characteristics of a real fish as its size and structure, has been adopted examining the characteristics and the movements of the same species real fish. Appropriate body rates have been determined by different optimization methods according to swimming modes and tail oscillation signals of the fish. Three-dimensional dynamic model of the robot fish has been performed in the MATLAB simulation environment by trying to reflect all the parameters of the robot fish and its real environment, and using the Lagrange approach. The first analysis of the designed robot fish, using these parameter values, has been performed and evaluated in a simulated environment. The design has been updated taking these evaluations into consideration. Prototype parts have been produced using 3D printer technology.

The prototype has been made up of three main sections: a rigid front body, a two-jointed tail mechanism to be driven and a fixed flexible tail. Sensors, electronic control system and center of gravity control mechanism are located in the rigid front body of the robot. The tail consists of a two-joint tail mechanism each driven by a high-powered servo motor and a flexible silicone tail fixed at the end of the second joint. The joints connected to each other in the shape of a series chain structures produce the drive force needed for movement.

Two different intelligent control structures have been used. The first one is a Central Pattern Generator created by modeling the spinal nerve cell structure of a real Lamprey fish. With the help of this structure, the rhythmic tail movements of the robot fish are formed by a biomimetic structure. Rhythmic tail movements created with Central Pattern Generator are controlled using a Fuzzy Controller-based approach with three parameters: the rate of oscillation of each joint, the amplitude of the oscillation, and the phase difference of the joints to each other. The second one is a Fuzzy Controller that transmits the appropriate control signals to the sub-control units by creating a combination of movements for orienting the fish in the direction of the goal in the autonomous swimming mode.

The prototype has been analyzed for three-dimensional motion control in the pool environment for different flapping frequencies and amplitudes.

Key Words: Robot fish, Carangiform, Multi jointed, Biomimetic, Central Pattern Generator, Fuzzy Controller, Autonomous motion.

1.GİRİŞ

Bu projede, iki eklemlili kuyruk mekanizmasına sahip, BCF tür yüzme hareketleri ile otonom bir şekilde üç boyutlu olarak yüzebilen, Carangiform türü, biyomimetik bir robot balık prototipi geliştirilmiştir.

Öncelikle gerçek bir balığın düz yüzüş, dönüş ve dalma hareketleri farklı açılardan eş zamanlı kaydedilmiştir. Carangiform yüzüş şekline sahip balıkların dönme hızı, dalma hızı, kuyruk çarpınma frekansı ve kuyruk osilasyon hareketini minimum kaç eklemlle sağlayabileceği, dönme esnasında balığın vücudunun aldığı şekle göre ana gövde ve kuyruk eklemlerinin birbirlerine göre oranları gibi birçok analiz gerçekleştirilmiştir. Farklı optimizasyon yöntemleriyle vücut oranlarının balığın kuyruk osilasyon sinyaline göre uygun değerleri belirlenmiştir.

Robot balık prototipi, baş kısmı olarak isimlendirilen sert bir ön gövde, iki eklemlili tahrikli kuyruk mekanizması ve esnek tahriksiz kuyruk olmak üzere üç ana 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 eklemlili kuyruk mekanizması ve esnek kuyruk robot balığın kuyruk salınım hareketini oluşturan yapıdır. Birbirine seri bir zincir yapısı şeklinde bağlı 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 eklemlili 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 yapılmıştır. Ayrıca, robot prototipi daha önce incelenen Carangiform türü gerçek bir sazan balığının biyolojik yapısı ve özellikleri dikkate alınarak tasarlandığından tamamen biyomimetik bir tasarıma sahiptir.

Robot balık modüler olarak tasarlanan birçok bileşenden oluşmaktadır. Prototipin sert ön gövdesi ana terminal bölümü, elektronik denetim sisteminin bulunduğu üst terminal bölümü, iki eklemlili kuyruk mekanizmasının birinci eklem alt milinin yataklığı alt mil yatağı terminal bölümü, ağırlık merkezi denetim mekanizmasının tahrik kuvvetini sağlayan servo motorun yataklığı terminal motor yatağı ve çevresel engellerin algılanması için kullanılan sensörlerin bulunduğu burun bölümü olmak üzere beş ana bölümden oluşmaktadır. Ana

terminal bölümünde ise tasarlanan ağırlık merkezi denetim mekanizması, batarya ve elektronik güç dağıtım sistemi yer almaktadır. Robot balığın esnek kuyruk yapısı iki eklemlili kuyruk mekanizması ve esnek kuyruk yüzgecinden oluşmaktadır ve bu kuyruk yapıları ile robot balığın itici tahrik kuvveti üretilir.

Robot balık prototipinde, iki farklı akıllı denetim yapısı bulunmaktadır. Birinci denetim yapısı, robot balığın ritmik kuyruk hareketlerini oluşturmak için gerçek bir Lamprey balığının omurilik sinir hücre yapısını model alarak oluşturulan Merkezi Örüntü Üretici (MÖÜ)'dir. Ritmik hareketler belirli aralıklarla tekrar eden hareketler olmakla birlikte balığın her bir ekleminin salınım hızı, salınım genliği ve eklemlerin birbirlerine göre hareket açısı farkı ya da faz farkı olmak üzere üç farklı özellik ile değişkenlik göstermektedir. Bu parametreleri istenilen amaç doğrultusunda belirlemek için robot balığın beyin sapı modeli olarak düşünülen Bulanık Denetleyici tabanlı bir yaklaşım kullanılmıştır. İkinci denetim yapısı, balığın otonom yüzüş modunda amaç doğrultusunda yönlendirilmesi için hareket kombinasyonunu oluşturarak alt denetim birimlerine uygun denetim sinyallerini iletir. Bu denetim yapısı için de akıllı Bulanık Mantık yaklaşımı kullanılmıştır. Robot balık denetim yapısı açısından da değerlendirildiğinde tasarımında olduğu gibi biyomimetik bir denetim yapısı kullanılmıştır.

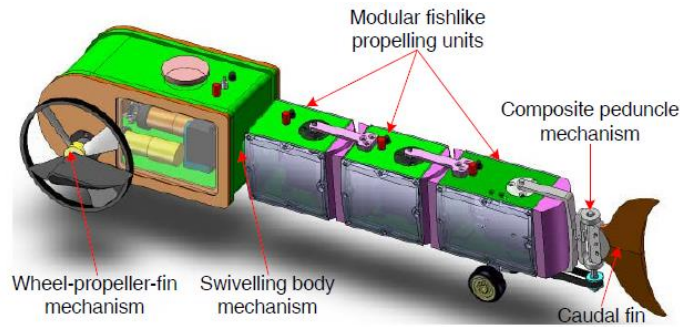
Bu proje 32 aylık bir çalışma sonucunda tamamlanmış olup, proje döneminde proje konusuyla alakalı olarak; toplam 2 adet uluslararası yurtdışı konferans tam metin sözlü sunumu, 1 adet uluslararası yurtiçi konferans tam metin sözlü sunumu, 2 adet uluslararası index makale (SCI-expanded), 2 adet uluslararası hakemli dergi makalesi, 1 adet ulusal TR-dizin makale, 2 adet yüksek lisans tezi tamamlanmıştır. Bu kapsamda, halen devam eden 3 adet uluslararası SCI-expanded makale hazırlığı ve çalışmaları tamamlanmış yazım aşamasında olan 1 adet doktora tezi bulunmaktadır. Tüm çalışmalarda TÜBİTAK desteği belirtilmiştir.

Ayrıca bu proje çalışması, yerel, ulusal basın ve yayın organları ve bunların internet siteleri üzerinden (sanal ortamda) uluslararası çapta tanıtılmıştır. Sanal ortamda video paylaşım, haber, ulusal basın, ulusal gazete, forum ve sosyal medya olmak üzere toplamda yaklaşık olarak 79 web sitesinde paylaşılmış ve sosyal medya ile video paylaşım sitelerinde 200.000'den fazla kullanıcı tarafından görüntülenmiştir.

2.LİTERATÜR ÖZETİ

Farklı eklem sayıları (El Daou vd., 2012; Yang vd., 2012; Chowdhury ve Panda 2014) ve yapılarına ait (Nguyen vd., 2013; Zhu vd.,2012; Wang vd., 2014; Li vd., 2014) robot balıkların dinamik modellerinin farklı yaklaşımlarla (Yu ve Yi, 2009; Zhou vd., 2008a, 2008b; Su vd., 2011; Nguyen vd., 2013) türetilmesi ve bu dinamik modellerin iki (Ding vd., 2009; Yu vd., 2011) ve üç boyutta (Chowdhury ve Panda 2014; Chowdhury vd., 2014) farklı yöntemlerle kontrolü (Zhong vd., 2009; Mazlan ve McGookin, 2012) üzerine birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda robot balığın dinamik modeli türetilerek, benzetim ortamında robot balığın hızı, frekansı, torku ve enine hareket sinyaline ait parametrelerin değişimi incelenmiş olup dinamik model çıkarımı ile ilgili sayısal çalışmalar daha önceki rapor dönmelerinde ayrıntılı bir şekilde verildiği için bu kısımda ayrıntılandırılmamıştır.

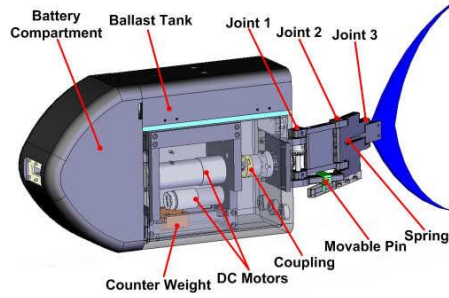
Yapılan birçok çalışma ile farklı robot balık prototipleri deneysel olarak gerçekleştirilmiş ve farklı kontrol algoritmaları ile test edilmiştir. Amphibious robot balık, karada ve denizde yaşayabilen canlılardan esinlenerek geliştirilen çok eklemli bir robot balıktır. Şekil 2.1.'de gösterildiği gibi robot balık üç eklemden oluşmaktadır ve karada hareket edebilmesi için göğüs ve kuyruk yüzgeçlerinde olmak üzere ikişer adet tekerleğe sahiptir (Yu ve Yi, 2009). Göğüs yüzgeçlerinde bulunan tekerleklerin hareketi için Maxon EC-max 16/GS16A DC motor kullanılmıştır, kuyruk yüzgecindeki tekerlekler ise serbesttir.



Şekil 2.1. Amphibious robot balık (Yu ve Yi, 2009)

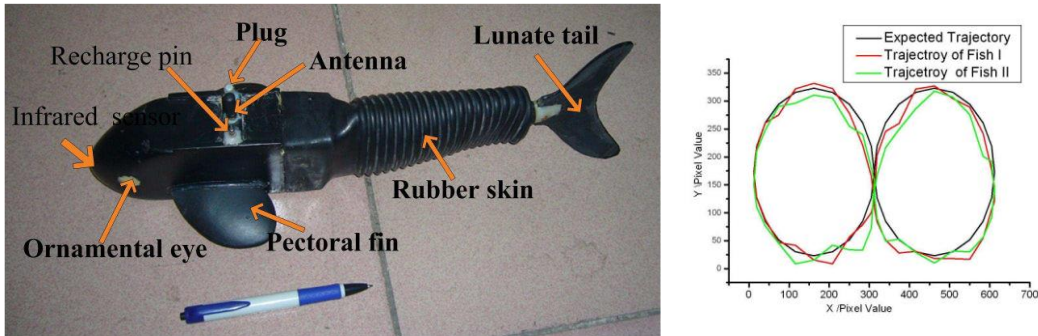
Şekil 2.2.'de gösterilen Nanyang Awana robot balığı üç eklemli carangiform türü yüzüş moduna sahip bir balıktır ve çalışma ekibi tarafından robot balık üzerinde çırpınma frekansının, osilasyon genliğinin, eklem bağlantılarının, en boy oranının tahrik kuvvetinde ve robot balığın hızında olan etkileri incelenmiştir (Chong vd., 2009). Ayrıca maksimum tahrik kuvvetinin hangi parametre değişimleri ile elde edilebilirliği araştırılmıştır. Robot balığın kuyruk yüzgeci bir adet DC motor ile tahrik edilmektedir. Denetleyici birimi için PIC18F2431 kullanılmıştır. Robot balık 0.35 m/sn maksimum hıza ulaşabilmektedir. Dönüş yarıçapı 0.1m'dir. İçerisinde ağırlık merkezinin kontrolü için bir adet DC motor bulunmaktadır. Yapılan

bu çalışmada; parametrelerin altı farklı değişimi için hız ve tahrik değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca, kuyruk yüzgecinin en boy oranının tahrik kuvvetine etkisi de incelenmiştir.



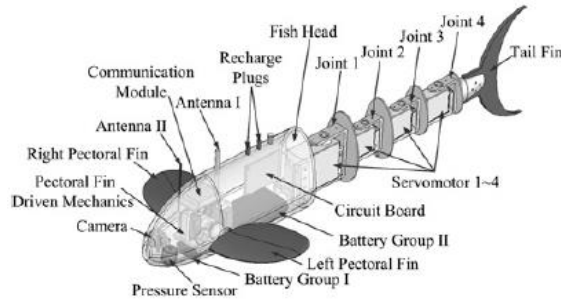
Şekil 2.2. Nanyang Awana (NAF-I) (Chong vd., 2009)

Yapay Sinir Ağları (YSA) tabanlı Kayma Kipli Kontrol (KKK) kullanılarak Şekil 2.3'deki gibi iki adet robot balığın birlikte yörünge takibi gerçekleştirilmiştir (Zou vd., 2009).



Şekil 2.3. Biyomimetik robot balık (Zou vd., 2009)

Bir başka çalışmada ise, çok eklemlili üç boyutlu hareket edebilen bir robot balık prototipi geliştirilmiştir. Robot balığın hareket planlaması CPG ile sağlanmıştır. Derinlik kontrolünün sağlanması için de 40PC001B basınç sensörü ve kontrol birimi olarak Atmeg128 denetleyici kartı kullanılmıştır. Uzaktan kontrolü TMS320DM642 kontrol kartı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.4'de verilen küçük boyutlu, düşük maliyetli ve uzaktan kontrollü biyomimetik robot balık üzerinde CPG denetim yapısı kullanılmıştır (Zhao vd., 2009).



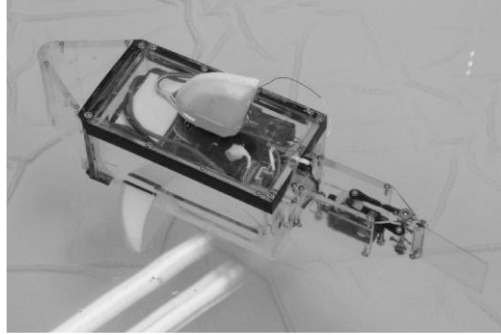
Şekil 2.4. Biyomimetik robot balık (Zhao vd., 2009)

Şekil 2.5.'te görülen robot balığın tahrik mekanizması tek eklemlı bir kuyruk ile sağlanmaktadır. Deneysel çalışmalarda, kuyruğun farklı çırpınma frekanslarına karşı hız ve kuvvet analizleri gerçekleştirilmiştir (Papadopoulos vd., 2009).



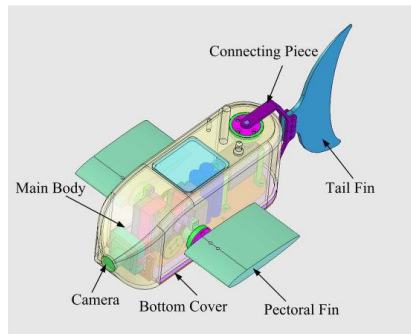
Şekil 2.5. Robot balık (Papadopoulos vd., 2009)

Şekil 2.6.'da gösterildiği gibi Ostraciiform türü bir robot balık geliştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, benzetimden elde edilen parametrelerin hız ve dönüş yarıçaplarına olan etkisi incelenmiştir (Chan vd., 2009).



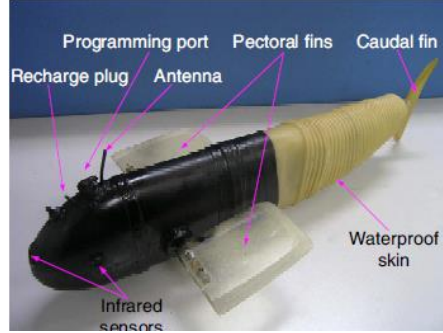
Şekil 2.6. Robot balık (Chan vd., 2009)

Şekil 2.7.'deki gibi tek eklemlı iki adet robot balığın görüntü işleme tabanlı algoritma ile birbirlerinin yörüngelerini takip etmesi deneysel olarak gerçekleştirilmiştir (Zhao vd., 2009).



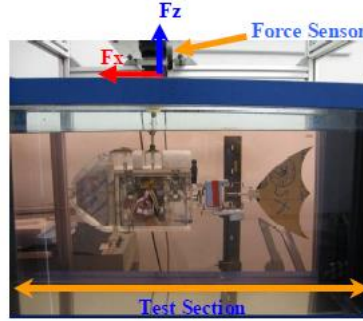
Şekil 2.7. Robot balık Zhao vd., 2009)

Göğüs yüzgeçleri kullanılarak gerçekleştirilen yukarı aşağı hareket için gerekli dinamik model türetilerek Şekil 2.8.'de görülen robot balık üzerinden CPG tabanlı kontrol algoritması geliştirilmiştir (Wang vd., 2009).



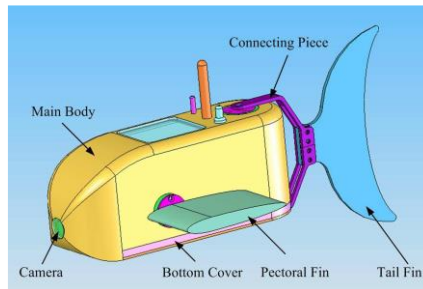
Şekil 2. 8. Robot balık (Wang vd., 2009)

Şekil 2.9.'da görülen bu çalışmada, BCF türü yüzebilen bir robot balığın boyutları matematiksel olarak analiz edilmiştir. Farklı çırpınma frekansları için diğer tahrik kuvveti ise deneysel olarak analiz edilmiştir (Zhong vd., 2009).



Şekil 2.9. Robot balık Zhong vd., 2009)

Bir başka çalışmada; yapılan robot balık için sırasıyla, PD ve durum geri beslemeli denetleyiciler ile kuyruk eklemine alması gereken konum değerleri denetlenmiştir (Zhou vd., 2009). Şekil 2.10'da gösterilen tek eklemli bir robot balık için görüntü geri besleme ile Bulanık Mantık denetleyici yardımı ile konum kontrolü gerçekleştirilmiştir (Hu vd., 2009).

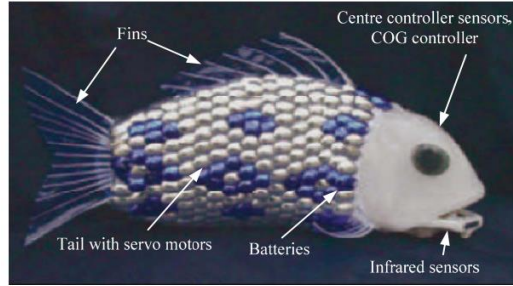


Şekil 2.10. Robot balık (Hu vd., 2009)

Robot balık için üzerinde bulunan kamera yardımı ile nesne takip algoritması geliştirilmiştir (Hu vd., 2009).

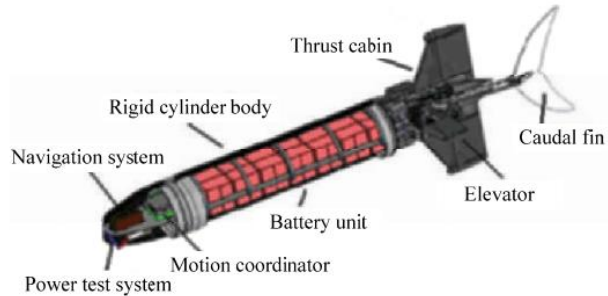
Bir başka çalışmada altı serbestlik dereceli bir balık modelinin görüntü işleme ile denetimi sağlanmıştır. Bu robot balığın kuyruk yapısında özel bir mekanizma denenmiştir. Bu kuyruğun uygulanma nedeni akış hızının artımına bağlı uygulanan basınç azalımının kaldırma kuvvetine olan negatif etkisini ortadan kaldırmaktır (Liu vd., 2008).

Şekil 2.11.'de verilen G9 robot balığının kuyruğunun dalgalanma hareketinin gerçekleştirmesi için robotik balık araştırma topluluğu iki önemli yöntem önermiştir (Liu ve Hu, 2010a). Bu yöntemlerin avantajları ve dezavantajları vardır. İlk yöntem, CPG kuyruktaki her motor için bir ritmik hareketler üretir. Ayrıca kolay tasarımlarda hızlı uygulama ve eşzamanlı ayarlama yeteneğine sahiptir. Ancak CPG ritmik özelliği sayesinde manevra içeren yüzme şekli için kuyruğa uygulamak zordur. Bu nedenle sadece düz ilerleme hareketi için uygulanır. İkinci yöntem ise yörünge yaklaşımıdır. Bu gerçek balıkların yüzmesindeki kuyruk eğrilerini oluşturmak için eklem ve linkler arasında kullanılan bir yaklaşımdır. Bu avantaj sayesinde balıkların bütün yüzme hareketleri gerçekleştirilir fakat balıkların hızları yavaştır.



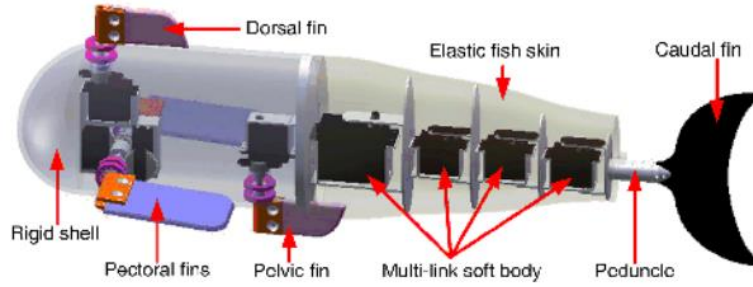
Şekil 2.11. G9 (Liu ve Hu, 2010b)

Şekil 2.12.'de gösterilen torpido görünümlü “SPC” robot balık 0.22 m çapında, 1.6 m uzunluğunda ve kuyruk yapısı yarım ay şeklindedir. 2 adet 150W servo motor kullanılmıştır. Bu servo motorlar iki eş çıkış eksenleri doğrudan çırparak kuyruğun enine ve dönme hareketlerini sağlamak için bir bağlantı sürüş çubuğu itme kabinine yerleştirilmiştir (Wang vd., 2010).



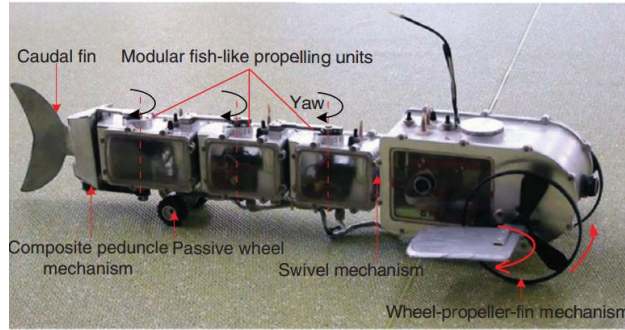
Şekil 2.12. SPC (Wang vd., 2010)

Şekil 2.13.'te görülen çalışmada çoklu kontrol yüzeylerinden esinlenerek bir robot balığın mekanik tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kontrolü ise CPG ile sağlanmıştır. Yapılan bu mekanik çalışma test sonuçlarıyla doğrulanmıştır (Weibing vd., 2010).



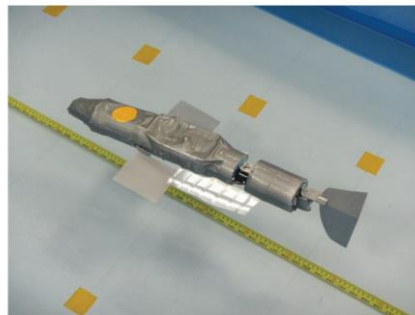
Şekil 2.13. Robot balık (Weibing vd., 2010)

Şekil 2.14'te verilen çalışmada, suda balık gibi yüzebilmesinin yanı sıra karada hareket edebilen karma bir robot modeli tasarlanmıştır. Bu karma robotun kontrolü merkezi örüntü üretici tabanlı olup deneysel olarak gerçekleştirilmiştir (Yu vd., 2013a).



Şekil 2.14. Robot balık (Yu vd., 2013b)

Şekil 2.15'de görüldüğü üzere, su üzerinde düz hareket edebilmesi ve keskin dönüşler yapabilmesi için çok bağlantılı bir robotik balık tasarlanmıştır. Bu robotun hareketi için, GIM tabanlı biyomimetik öğrenme benimsenmiştir (Ren vd., 2013).



Şekil 2.15. Robot balık (Ren vd., 2013)

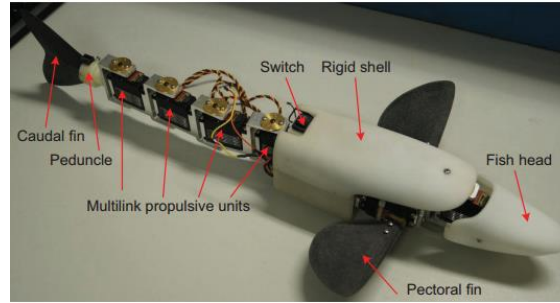
Bir başka robot balık prototipi Şekil 16'da gösterildiği gibi baş modülü, 3 eklem modülü ve esnek kuyruk yüzgecinden oluşmuştur. Baş modülü, ABS reçine (suda basınca dayanıklıdır

ve su geçirmezlik özelliği vardır.) maddesinden yapılmıştır ve lazer hızlı prototipleme ile işlenmiştir. Robotun kütle merkezinin değiştirilmesiyle robotun dalışı ve yükselişini elde etmek için merkez ağırlık mekanizması tasarlanmıştır. Balığın genlik, dalga boyu ve frekans değerleri incelenerek seyir performansı incelenmiştir (Yan vd., 2013).



Şekil 2.16. Robot balık (Yan vd., 2013)

Şekil 2.17’de verilen bir başka balık tasarımında, robotun 3 boyutlu hareket yeteneğinin geliştirmesi için 4 serbest dereceli çift esnek göğüs yüzgeçleri oluşturulmuştur. Yapılan deneysel sonuçlarla mekanizma tasarımı ve merkezi örüntü üretici tarafından yönetilen modelin hareket uyumu doğrulanmıştır (Wu vd., 2013).



Şekil 2.17. Robot balık (Wu vd., 2013)

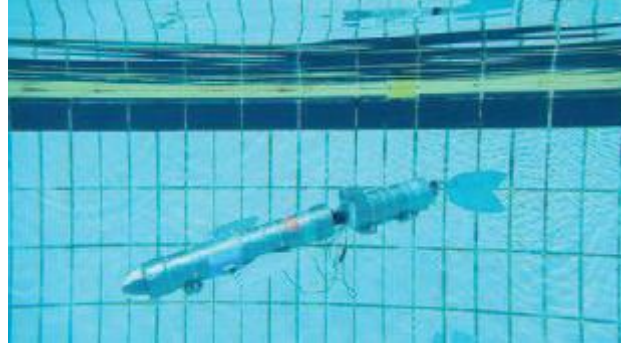
Şekil 2.18’de gösterilen ‘ICHTHUS V5.6’ robot balığın tasarım amacı daha önce tasarlanan ‘ICHTHUS V5.5’den daha hızlı bir robot balık performansı elde etmektir. Balığın tahrik kuvvetini ölçmek için bir deney düzeneği kurulmuştur. Deneyin sonunda robot balığın yüzme hızının 1.5m/sn’ye çıkabildiği görülmüştür. İleriki çalışmalarında yüzme hızının insanın yüzme hızına (1.9m/sn) ulaştırılması planlanmıştır (Wang vd., 2013).



Şekil 2.18. ICHTHUS V5.6 robot balık (Wang vd., 2013)

Temel amacı robot balığın yüzme hızını artırmak olan çalışmada; biyomimetik 'ICHTHUS V5.7' robot balığı tasarlanmıştır. Deneyin sonunda robot balığın yüzme hızının 2m/sn kadar çıkabildiği görülmüştür (Yang ve Ryuh, 2013).

Şekil 2.19'da görülen üç boyutlu hareket kabiliyetine sahip bir robot balığın tasarımı ve gerçekleştirilmesi sunulmuştur.



Şekil 2.19. Geliştirilen robot balık prototipi. (Ren vd., 2014)

Yukarı/aşağı hareket için 2 adet su tankı bulunmaktadır. Önerilen öğrenme yaklaşımındaki zamansal/konumsal ölçeklenebilirlik ile 3 boyutlu yüzme hareketleri robot balığa kolayca adapte edilmiştir. Öğrenme algoritması için öncelikle gerçek bir balığın yüzüşü üç noktadan video kaydına alınmıştır. Balık gövdesi ise 12 noktadan işaretlenmiştir. Öğrenme modeli sinyal üretici, Yapay Sinir Ağı (YSA) ve çıkış modülatörü olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır (Ren vd., 2014). Bir robot balığın düşük maliyetli, su pompası kullanılarak derinlik kontrol analizi yapılan bir başka çalışmada kontrol algoritması olarak durum geri beslemeli kontrol yöntemi seçilmiştir. Derinlik seviyesi bir basınç sensörü ile ölçülmüştür (Makrodimitris vd., 2014).

Bir diğer çalışmada paralel dört kol mekanizması ile tahrik kuvveti üretilen thunniform yüzme modunda bir robot balık prototipi geliştirilmiştir. Kuyruk eklemleri Hopf osilatör yapısında CPG kontrolör ile sürülmektedir (Hu vd., 2014).

Bu proje kapsamında farklı robot balık prototip çalışmalarını içeren çok sayıda literatür incelenmiştir. Bu çalışmalar eklem sayılarına göre: tek eklemli (Romero vd., 2013; Xu vd., 2013; Hong vd., 2012; Zhang vd., 2014; Zhu vd., 2014), çok eklemli (Jeong vd., 2011; Lee vd., 2011; Yu vd., 2012; Xu vd., 2012; Ren vd., 2014; Wu vd., 2014); yüzüş şekillerine göre, Carangiform (Su vd., 2009, Clapham ve Huosheng, 2014), yunuslama (Ma vd., 2013) ve diğer yüzüş şekillerine sahip (Xu ve Niu, 2011; Niu ve Xu, 2014); tasarım kriterlerine göre: biyomimetik balık tasarımı (Liu ve Hu, 2010a; Wang vd., 2013) ya da hareket açısından balık benzeri (Zhang ve Chen, 2009; Wang ve Xie, 2014) olmak üzere farklı amaçlar doğrultusunda birçok farklı yapıya sahip olarak gerçekleştirilmiştir.

Özellikle robotik alanında birden fazla ekleme sahip bir robotun her bir eklemine canlılık kaslarında gözlemlenen eşzamanlı ve doğrusal olmayan hareket özelliklerini eklemek her zaman önemli bir problem olmuştur (Yu vd., 2014a). Bunun üstesinden gelmek ve etkin bir hareket kabiliyeti sağlayabilmek için bir Merkezi Örüntü Üretici (MÖÜ) modeli konum, kuvvet, tork, kas uzunluğu, hareket hızı ve frekansı gibi farklı fiziksel özelliklere bağlı davranışları kolayca üretebilmekte ve dış bozuculara karşı bu çıktıları koruyabilmektedir. Böylece, MÖÜ tabanlı denetim yöntemleri, özellikle değişken dinamiğe sahip ortamlarda belirsiz lokomotor davranışlar için tek başına veya diğer denetim yöntemleri ile birlikte kolayca kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca, yukarıda detaylı bir şekilde 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 popüler bir hale getirmiştir (Ijspeert, 2008; Li vd., 2014; Wang vd., 2014; Yu vd., 2013a; Li vd., 2014; Ding vd., 2013; Yu vd., 2016; Liu vd., 2016; Goldschmidt vd., 2014).

Literatürdeki yüzen robotlar incelendiğinde, birbirinden farklı birçok MÖÜ modelinin kullanıldığı görülmektedir. Zhdang vd., altı eklemlili bir robot balık modelinin ileri, geri ve dönüş yüzme hareketlerini doğrusal olmayan Zhang osilatörleri ile benzetim ortamında gerçekleştirmişlerdir (Zhang vd., 2006). Wang ve arkadaşları, halka bağlı doğrusallaştırılmış GKFO'lerini kullanarak üç eklemlili robot balığın ileri yön ve dönüş hareketlerini üretmişlerdir (Wang vd., 2011). Daha sonra, Carangiform türü bir balığın aynı osilatör modeli ile enine hareket sinyallerini elde ederek robot balık ile sonuçların etkinliğini ileri ve geri yön hareketler için test etmişlerdir (Li vd., 2014). Aynı zamanda, MÖÜ tabanlı denetleyicinin mikrodenetleyici üzerine nasıl programlanması gerektiğine ait bazı çalışmaları da mevcuttur (Li vd., 2014, 2015). Wang ve arkadaşları, GKFO'lerine genlik, ofset ve frekans denetim fonksiyonları ekleyerek tek eklemlili ve çift göğüs yüzgeçine sahip Ostraciiform türü bir robot balığın yörünge takip denetimini gerçekleştirmişlerdir. Yörünge takibinin başarımını arttırmak için, robot balığın sapma, yunuslama ve yuvarlanma açılarının denetimi de ayrıca yapılmıştır (Wang vd., 2013, 2014). Daha sonra, basınç ve mesafe sensörleri ekleyerek geliştirdikleri robot balığın aynı osilatör ile frekans ve atak açısı değişimine bağlı ileri yön performanslarını incelemişlerdir (Wang vd., Temmuz 2014). Wang bu robotun bir noktadan başka bir noktaya en kısa yoldan daha hızlı bir şekilde gitmesini sağlamak için PSO ile MÖÜ osilatörleri parametrelerinin en uygun değerlerini de elde etmiştir (Wang vd., 2017). Ijspeert ise MÖÜ modellerinin incelenmesinde önemli bir yeri olan Lamprey balıklarının osilatör modelini STA ile elde ederek semender robotun yüzme hareketlerini üretmiştir (Ijspeert vd., 2005). Crespi ve Ijspeert ise GKFO'leri ile tek eklemlili ve çift göğüs yüzgeçli Ostraciiform türü bir robot balığın ileri ve dönüş hareketlerini, düz bir zeminde göğüs yüzleri ile ilerlemesini ve foto diyot ile ışığa yönelmesini denetlemişlerdir (Crespi vd., 2008; Lachat vd., 2006). Zhang ve

arkadaşları çift kuyruk yüzgeçli ve çift 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 (Zhang vd., 2016). Hu ve arkadaşları, tek eklemli bir robot balığın ileri yön hareketini Hopf osilatörü ile elde etmiş ve frekans değişimine bağlı hız performansını incelemişlerdir (Hu vd., 2014). Zhu ve arkadaşları ise 24 serbestlik derecesine sahip bir robot vatoz balığının hareketlerini MÖÜ osilatörleri denetlemişlerdir (Zhu vd., 2017). Hu ve diğerleri, Hopf osilatörlerine bir eğitim algoritması önererek bu osilatörlerin istenilen genlik ve faz değerlerini üretmesini sağlamışlardır. Bu sonuçlar çok eklemli bir robot balık modelinde ileri yön hareketler için sınanmıştır (Hu vd., 2011, 2014). Niu ve arkadaşları, Anguilliform türü bir balığın dört eklemli olduğunu kabul ederek ileri ve geri yön yüzüşteki eklem açılarını elde etmişlerdir. Bu açılar, 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 YSA modeli bulunmaktadır (Niu vd., 2014). Zhou ve diğerleri, vatoz balığından esinlenerek geliştirdikleri sekiz eklemli bir robotun kendi geliştirdikleri MÖÜ osilatörleri ile sinüzoidal hareketlerini incelemişlerdir. GA ile MÖÜ osilatörlerinin parametreleri de elde edilmiştir (Zhou ve Low, 2014). Sfakiotakis ve arkadaşları ise sekiz eklemli bir robot vatoz balığının Euler açılarının denetimini GKFO'leri ile birleştirilmiş geleneksel Oransal Integral Türev (PID) ile gerçekleştirmişlerdir (Sfakiotakis vd., 2016). Sinüzoidal eklem açılarının şekli çok uygun olmamasına rağmen Matsuoka osilatörler ile de robot balığın hareketleri incelenmiştir. Wang ve diğerleri, tek eklemli bir robot balığın kuyruk hareketlerini Matsuoka osilatörler ile üreterek, kuyruk üzerine etkiyen kuvvetlerin analizini gerçekleştirmişlerdir (Wang vd., 2005). Hu ve arkadaşları ise Matsuoka osilatörler ile robotun ileri, geri ve dönüş hareketlerini test etmiştir (Hu vd., 2008).

Yu ve arkadaşları, geliştirdikleri iki, üç ve dört eklemli robot balıklarla ve MÖÜ osilatörleri ile hareketlerinin gerçekleştirilmesi üzerine birçok çalışma yapmaktadır (Yu vd., 2014b; Wang vd., 2014; Yu vd., 2016; Zhao vd., 2006). Doğrusal olmayan bir MÖÜ osilatörü ile iki ve dört eklemli robot balıkların enine hareket sinyalini üreterek, PID denetleyici ile derinlik denetimi gerçekleştirmişlerdir (Yu vd., 2016; Zhao vd. 2006). Ayrıca bazı çalışmalarda, üç ve dört eklemli robot balıkların iki ve üç boyutlu BCF ve MPF hareketlerinin denetimini yapmışlardır. Bu çalışmalarda, Hopf ve GKFO osilatörleri ile farklı kuplajlı bağlantılar kurmuşlardır. Ayrıca, robot balıkların matematiksel modelleri türetilerek benzetim ortamında da önerilen yöntemler doğrulanmıştır. Osilatörlerin çıkış frekansı, genliği ve faz farklarının değişimine göre yüzme hızları ile dönüş yarıçapı gibi hareketin etkinliğini veren fiziksel değişimler de bu çalışmalarda deneysel olarak test edilmiştir (Yu vd., 2011, 2013a, 2014b; Wu vd., 2013, 2014, 2015; Wang vd., 2012). 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 (Wu vd., 2012, 2015). Başka bir çalışmada ise robot balık sürülerinin bir nesneyi istenilen bir noktaya götürülmesi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, robotların hareketi GKFO ile sağlanmıştır (Yu vd., 2016).

Literatürde, yüzebilen 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 GKFO'leri ile sağlanmaktadır. Duyusal işlemci merkezi olarak tanımladıkları geri beslemeli yapı, robotun osilatör parametrelerini gideceği yörünge ve en uygun hız değerleri için eşzamanlı olarak belirlemektedir. Duyusal işlemci merkezinde PSO algoritması kullanılmaktadır (Wang vd., 2017). Wang ve arkadaşlarının başka bir çalışmasında, tek eklemlili robot balıktan ivmeölçer ve jiroskop sensörlerinin birlikte bulunduğu IMU sensör (Inertial Measurement Unit) aracılığı ile sapma ve yalpalanma açıları geri besleme olarak alınmıştır. PID denetleyici aracılığıyla referans sapma ve yalpalanma açıları denetlenmiştir. PID denetleyicinin çıkışında kullanılan GKFO'leri parametreleri geçiş fonksiyonları ile belirlenmektedir (Wang vd., 2014). Ayrıca, robot balığın üzerinde bulunan kamera modülü geri besleme olarak kullanılarak hareketli bir nesnenin robot balık ile takip edilmesi sağlanmıştır. Bu kapalı çevrim denetiminde de PID ve GKFO'leri ile sapma açısı denetlenmiştir (Wang vd., 2013). Ijspeert ve arkadaşları, Ostraciiform türü tek eklemlili bir robot balığın halka bağlı GKFO'leri ile hareketleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, hareketli bir ışık yayan nesnenin takip edilmesi için kapalı çevrim denetim sistemi oluşturulmuştur. Robotta geri besleme yapısı iki adet foto diyot ile sağlanmaktadır. Hareket eden nesnenin takibi PD denetleyicinin osilatör genlik, frekans ve ofset parametrelerini belirlemesi ile sağlanmaktadır (Lachat vd., 2006). Takip ortamı hem su içerisinde hem de düz bir zeminde gerçekleştirilmiştir. Düz zemin için robotun hareketlerini çift göğüs yüzgeçleri sağlamaktadır (Crepes vd., 2008). Ijspeert ve arkadaşlarının çok bacaklı robotlarda da kapalı çevrim geri beslemeli bazı çalışmaları mevcuttur. Engibeli bir arazide, dört bacaklı bir robotun hareketini Hopf osilatörleri ile sağlamışlardır. Hopf osilatörünün çıkışını belirleyen eşitliğe bir fonksiyon ekleyerek bacak hareketlerinin faz geçişleri denetlenmiştir (Righetti ve Ijspeert, 2008; Gay vd., 2013). 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 uygulanmaktadır. BD ise robot balığın çift göğüs yüzgeçlerinin hareketini sağlayan osilatörlerin ofset değerlerini belirlemektedir (Yu vd., 2016). Yu ve arkadaşları ayrıca dört eklemlili bir robot balığın iki boyutlu yüzünün engellerden sakınarak gerçekleşmesini sağlamıştır. Robotun hareketleri Hopf osilatörler ile sağlanmaktadır. Engellerin belirlenmesi

için robotun üzerinde bir kamera modülü bulunmaktadır. Ancak osilatör ofset ve genlik parametrelerini belirleyen denetleyici basit bir geçiş fonksiyonu ile oluşturulmuştur (Yu vd., 2014b). Wang ve arkadaşları, dört eklemlili ve çift göğüs yüzgeçli bir robot balığın Hopf osilatörleri ve bir geçiş fonksiyonu ile kızılötesi sensörlerden gelen bilgilere göre engellerden sakınmasını denetlemişlerdir. Geçiş fonksiyonu osilatörlerin ofset değerini değiştirmek için kullanılmaktadır. Ayrıca, bir kamera ile ölçülen robot balığın hızı BD yardımıyla osilatörlerin frekans ve genlik parametreleri ayarlanarak denetlenmiştir (Wang vd., 2012, 2014). Wu ve arkadaşları ise dört eklemlili bir robotun iki boyutlu yüzüş hareketlerini Hopf osilatörler ile sağlamışlardır. Osilatör ofset parametresi ise oransal denetleyici ile belirlenmekte ve robotun sapma açısı denetlenmektedir (Wu vd., 2014). Yu ve arkadaşlarının bir başka çalışmasında ise üç eklemlili robot balık sürüşünün iki boyutlu bir ortamda bir nesneyi itererek istenilen bir noktaya götürmesi sağlanmıştır. Robotların kuyruk hareketleri GKFO'leri ile sağlanmaktadır. Nesnenin anlık konumu deneysel ortamın üzerinde bulunan sabit bir kamera ile belirlenmiş ve robotların sapma açısı denetlenmiştir (Yu vd., 2016). Hu ve arkadaşları, Thunniform türü tek eklemlili ve çift göğüs yüzgeçleri bulunan bir robot balık geliştirmişlerdir. Robot balığın kuyruk yapısı dört kol mekanizmasına göre tasarlanmıştır ve iki adet Hopf osilatörü ile hareketi sağlanmaktadır. Üzerinde bulunan IMU sensörü ile yalpalanma ve yunuslama hareketleri geri besleme olarak alınarak PID denetleyiciye uygulanmaktadır. PID denetleyici ise çift göğüs yüzgeçlerinin açılarını üreterek referans hareketlerin üretilmesini sağlamaktadır. Ancak bu çalışmada bulunana geri besleme yapısı osilatör modeli ile ilişkili değildir (Hu vd., 2015). Kim ve arkadaşları ise, geliştirdikleri üç eklemlili robot balığın Matsuoka osilatörleri ile hareketini sağlamışlar ve PD denetleyici ile robotun sapma açısı denetlemek için osilatör ofset parametrelerini denetlemişlerdir (Kim vd., 2008). 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 denetlenmektedir (Seo vd., 2010). Başka bir çalışmada ise Sfakiotakis ve arkadaşları altı eklemlili vatoz türü bir robot alık geliştirmişler ve robotun enine hareket sinyallerini üretmek için GKFO'leri kullanılmıştır. Robotun PD denetleyici ile sapma açısı denetlenmiştir. Denetleyici osilatörlerin genlik, frekans ve ofset parametrelerini belirlemektedir (Sfakiotakis vd., 2016).

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 örnekler verilmektedir.

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 duyusal geri besleme özelliğine sahip ara sinir hücreleri eklenmiştir. Böylece, robot karşısına çıkan engellere karşı duyusal yapı ile hareketinin yönünü kolayca değiştirebilmektedir. Ayrıca, GA ile MÖÜ parametrelerinin en uygun değerleri belirlenerek engebeli ortamlarda robotun hareketi sağlanmıştır (Li vd., 2014). 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 denetlenmektedir (Wang vd., 2015). Liu ve arkadaşları ise insansı bir robotun yürüme fazındaki hareketlerini Matsuoka osilatörler ile sağlamışlar ve osilatörlerin genliği oransal bir denetleyici ile belirlenmiştir (Liu vd., 2016). 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 iki faz evrimsel algoritma ile belirlenmiştir (Lee, 2017).

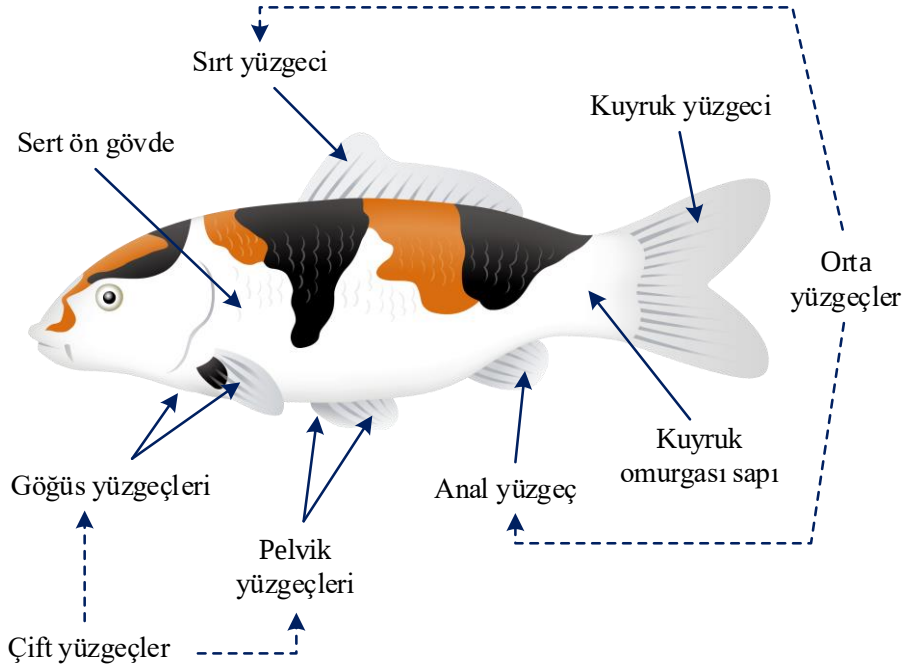
3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1 Robot Balığın Üç Boyutlu Dinamik Modelinin Elde Edilmesi

Bu bölümde, balıkların genel morfolojik yapısı incelenerek iki eklemlili Carangiform türü biyomimetik bir robot balığın doğrusal olmayan dinamik modeli türetilmiştir. Öncelikle balıklar hakkında genel bilgiler verilmiş ve morfolojik yapıları incelenmiştir. Böylece, tasarlanan ve gerçekleştirilen robot balık prototipi için gerekli bir zemin hazırlanmıştır.

3.1.1 Balıkların Morfolojik Yapısı

Balıklar su içerisinde yaşayan, soğukkanlı, solungaçlı ve derisi genellikle pullarla kaplı omurgalı hayvanlardır. Balıkların vücut ağırlıklarından kaynaklanan yerçekimi kuvveti, suyun yoğunluğu ile neredeyse dengelenmektedir. Böylece, hareket ortamı olan suyun sıkışmazlık ve yüksek yoğunluk (havanın yaklaşık 750 katı) gibi özellikleri, balıkların gelişiminde önemli bir rol oynamaktadır. Bir balığın su içerisindeki hareketini yüzgeçler ve vücut kasları sağlar. Yüzgeçlerin her biri yüzme hareket anında farklı görevlere sahiptir. Balıklara ait genel yüzme mekanizmalarının morfolojik yapısı Şekil 3.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Carangiform türü 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 dikey ekseninde (yunuslama) hareket ile kuyruk yüzgeciyle beraber dönüş hareketlerini (sapma) de kontrol ederler. Ayrıca, sürüklenme kuvvetini

kullanarak 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 oluşmasında yardımcı olurlar.

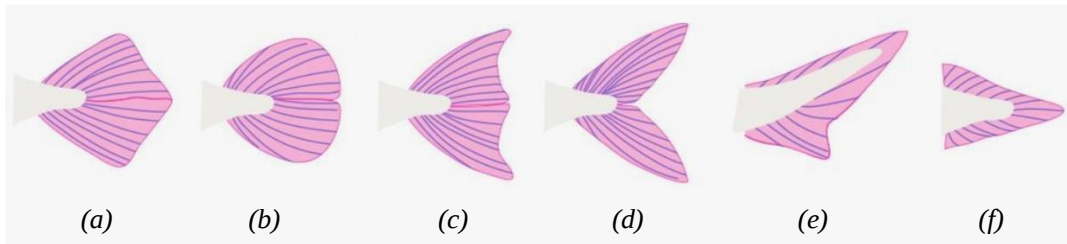
Balıkların vücutları, su içerisindeki hareketlerini kolayca gerçekleştirebilmek için farklı şekiller almışlardır. Bu şekiller farklı türler için değişiklik gösterdiği gibi farklı ortamlarda yaşayan aynı türler için de değişiklik göstermektedir. Şekil 3.2.'de, balıklarda en çok görülen vücut şekilleri verilmektedir.

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

Şekil 3.2. 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 şeritleşmiş 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 sabit hızlarda düşük manevra kabiliyeti ile hareket ederler.

Bir balığın tahrik kuvvetinin oluşmasını sağlayan kuyruk yüzgeçleri genel olarak yedi farklı şekilde incelenebilir ve Şekil 3.3'te verilmiştir.

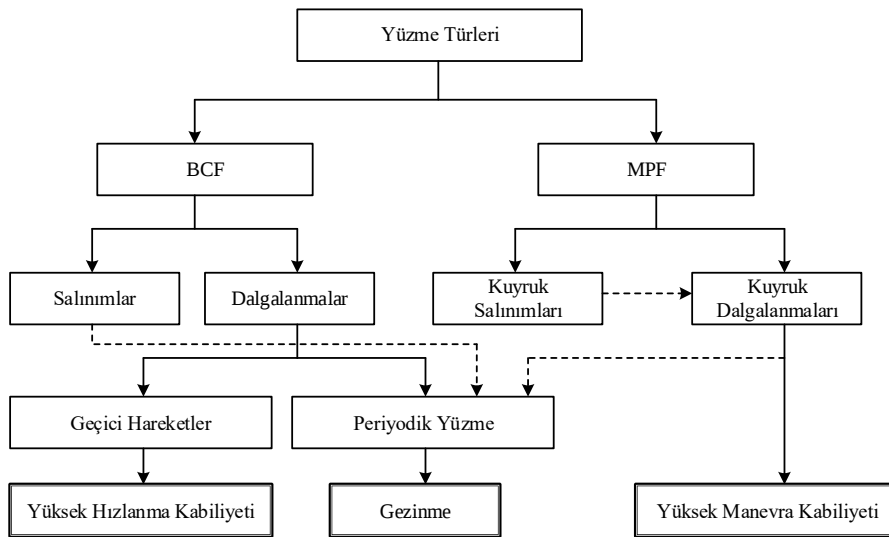


Şekil 3.3. Farklı balık türlerine ait genel kuyruk şekilleri: (a) Kürek tipi (Spade), (b) Yuvarlanmış (Rounded), (c) Girintili (Indented), (d) Çatallı (Forked), (e) Dengesiz çatallı (Unevenly Forked), (f) Sivri (Pointed)

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

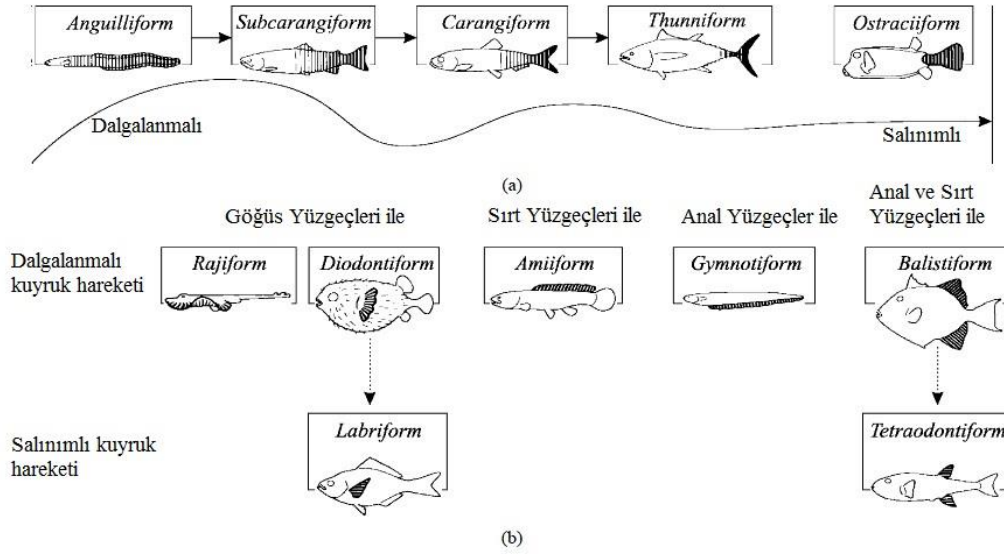
Balıkların sudaki hareketi vücutlarının ve/veya kuyruklarının kıvrılmasıyla (Body and/or Caudal Fin - BCF) gerçekleşir. Bazı balıklar ise bu hareket türünden farklı olarak sudaki hareketlerini orta ve/veya çift yüzgeçleri (Median and/or Paired Fin - MPF) ile sağlarlar. Balıklar suyun içerisindeki hareketi tek bir yüzme türüne bağlı olmamasına rağmen BCF tip yüzme yanal yüzgeçlerin kullanıldığı MPF tipine göre balık türlerinde sıklıkla görülen yüzme şeklidir. Balık türlerinin büyük çoğunluğu tahrik kuvvetini üretirken BCF tip yüzme şeklini kullanırken mevcut konumunu korumak ve manevra yapmak için MPF hareketini kullanırlar.

BCF ve MPF tip yüzme hareketleri kendi içinde dalgalanma ve salınım olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar. Dalgalanma hareketleri, balığın hareketli kuyruk yapısı boyunca bir dalga geçişini içerirken, salınım hareketlerinde kuyruk yapısı dönme hareketleri üretir. Dalgalanma hareketinde, balıkların vücutları genliği burundan başlayarak kuyruğa kadar artan bir sinüzoidal şekil alır. Salınım hareketinde bu dalgalanma miktarı giderek artmaktadır (Raj ve Thakur, 2016). Genellikle benzer morfolojik özellikler içeren balıklar benzer hareket türleri ile hareket ederler. Ancak Rigatos hızlanma, gezinme ve manevra kabiliyetine göre üç temel yüzme hareketi türetmiştir. Bu yüzme hareketleri arasındaki ilişki Şekil 3.4.'te verilmiştir.



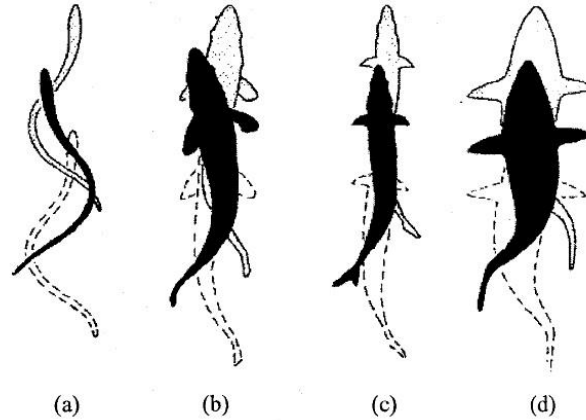
Şekil 3.4. Yüzme türlerinin sınıflandırılması (Rigatos, 2014)

Hem BCF hem de MPF hareketine ait terminolojik yüzme modellerinin sınıflandırılması ise Şekil 3.5.'te gösterilmiştir (Raj ve Thakur, 2016).



Şekil 3.5. BCF ve MPF hareketlerine göre yüzme modelleri: (a) BCF ile hareket, (b) MPF 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 BCF tür yüzme hareketi dörde ayrılmaktadır ve Şekil 3.6.'da verilmiştir.



Şekil 3.6. BCF yüzme hareketlerinin sınıflandırılması: (a) Anguilliform, (b) Subcarangiform, (c) Carangiform, (d) Thunniform

Anguilliform yüzücülerde vücut kasları burundan burundan kuyruğa kadar genliği giderek artan bir sinüzoidal dalga şeklini alır. Genel olarak yılan balıkları bu yüzme hareketini kullanmaktadır. Subcarangiform türü balıklarda Anguilliform hareketine göre daha az sayıda kas kullanılmaktadır. Dalgalanma hareketini vücut kaslarının 1/2'si ile 2/3'ü arasında kas üretmektedir. 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 sahiplerdir. 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.

MPF hareket türü daha iyi manevra kabiliyeti sağladığı için balıklar genellikle yiyecek ararken bu hareket türünü kullanmaktadır (Huss, 2007). 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/veya çift yüzgeçler ile sağlanırken dalgalanma hareketi ise kuyruk yüzgeci tarafından üretilir (Huss, 2007). Orta veya kuyruk yüzgeçleri ile dalgalanma hareketini sağlayan türler Amiiform, Gymnotiform, Balistiform, Rajiform ve Diodontiform olarak ayrılır. aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır. Salınım hareketini ise Tetraodontiform ve Labriform türü balıklar gerçekleştirir.

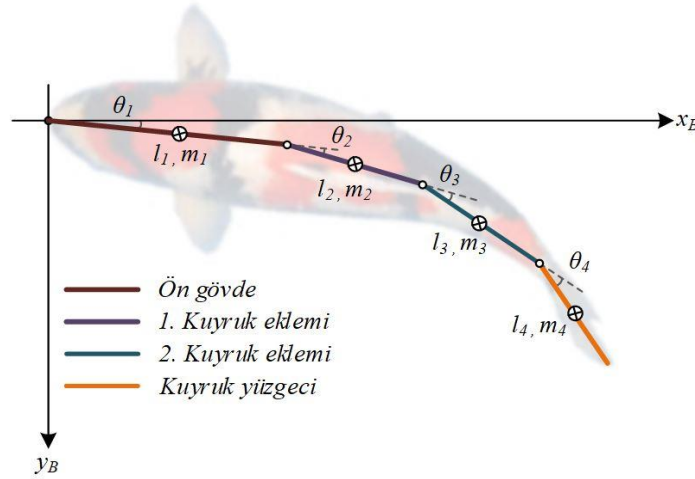
3.1.2 İki Eklemli Kuyruk Yapısına Sahip Robot Balığın Doğrusal Olmayan Dinamik Modeli

Dinamik modelin elde edilmesi, benzetim ortamı, denetleyici tasarımı ve prototipin gerçekleştirilmesi gibi birçok alt bileşen, donanımsal gerçeklemenin süreçlerini oluşturmaktadır. Dinamik model, robot balığın su içerisinde yüzme 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 robot balığın matematiksel modelinin elde edilmesi gerekmektedir.

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.

Tasarlanan robot balık rijit bir ön gövde ve esnek bir kuyruk yapısı olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Kuyruk yapısı ise iki aktif eklem ile bir pasif kuyruk yüzgeci içerir. Eğer ön gövde birinci eklem olarak düşünülürse, robot balık Şekil 3.7.'de görüldüğü gibi birbirine seri bağlı dört eklem içeren kinematik bir yapıda olur.

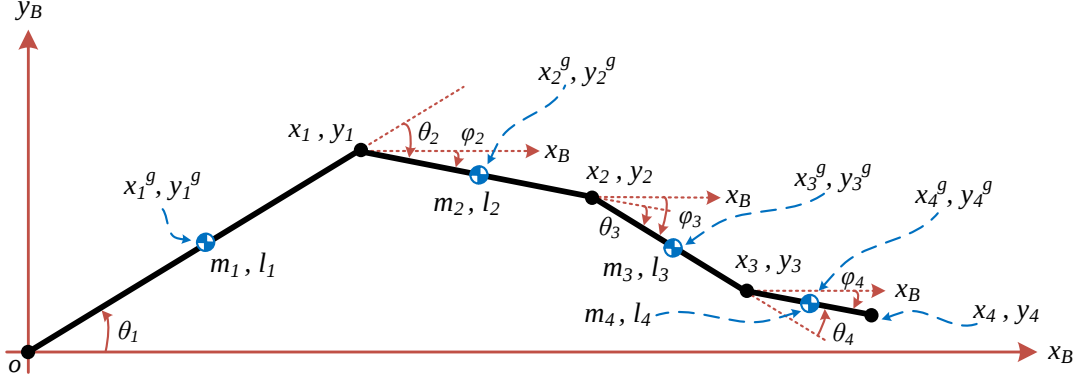


Şekil 3.7. Carangiform türü bir balığın eklemli yapısı

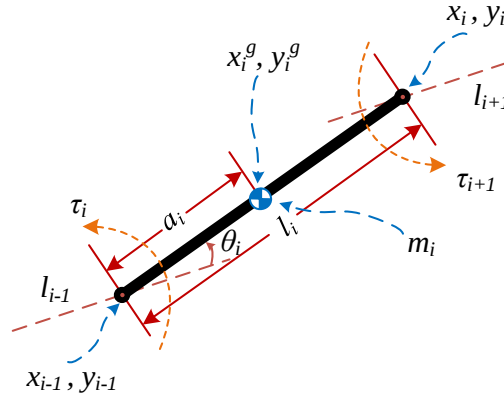
Burada i eklem indisi olmak üzere, m_i eklem ağırlıklarını, l_i eklem uzunluklarını ve θ_i eklemlerin açılarını belirtmektedir. Böylece, robot balık ana ön gövde, iki adet aktif kuyruk eklemi ve bir adet pasif kuyruk yüzgeci olmak üzere birbirine seri bağlı dört eklemli ve üç mafsallı kinematik bir zincir yapısı oluşturur ve Şekil 3.8.'de verilmektedir.

Burada m_1 ön gövde ağırlığı, m_2 ve m_3 kuyruk eklemlerinin ağırlıkları, m_4 ise kuyruk yüzgecinin ağırlığıdır. θ_1 ön gövdenin yatay eksen ile yaptığı açısı, θ_2 birinci kuyruk eklemine göre yaptığı açısı, θ_3 ikinci kuyruk eklemine göre yaptığı açısı ve θ_4 kuyruk yüzgecinin ikinci kuyruk eklemine göre yaptığı açısı temsil eder. $\varphi_i = \theta_i + \theta_{i-1}$ olmak üzere eklem yatay eksene göre yaptığı açısı belirtir. Robot balığın her bir eklemi homojen olarak kabul edildiğinden dolayı ağırlık merkezi eklemlerin orta noktası olarak belirlenmiştir. Böylece, bir eklem uzunluğu l_i ile temsil edilmek üzere o eklem ağırlık merkezine göre uzunluğu a_i olur. τ_i eklemeye 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 eksen koordinat çiftlerini tanımlar.



(a)



(b)

Şekil 3.8. Robot balığın kinematik yapısı: (a) Dört eklemlilik kinematik zincir bağlantı (b) Tek eklemin yapısı

Denklem (3.1), 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:

$${}^0T_N = \prod_{i=1}^N \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\cos(\alpha_{i,i+1}) & \sin(\theta_i)\sin(\alpha_{i,i+1}) & (A_{i,i+1})\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_{i,i+1}) & -\cos(\theta_i)\sin(\alpha_{i,i+1}) & (A_{i,i+1})\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_{i,i+1}) & \cos(\alpha_{i,i+1}) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Burada θ_i ve d_i dikey ekseninde olan dönme ve ötelemeyi α_i ve A_i ise yatay ekseninde olan dönme ve ötelemeyi simgeler. $i=1,2,...,N$ olmak üzere N toplam eklemlilik sayısını

tanımlamaktadır. D-H dönüşüm matrisinin en sağ sütunundaki yukarıdan aşağı doğru ilk üç parametre sırasıyla i . eklem ağırlık merkezinin (x_B, y_B, z_B) eksenlerindeki konumlarını hesaplamaktadır. Denklem (3.2) – (3.5)'de her bir eklem ağırlık merkezinin konumları ve zamana göre birinci türevleri elde edilmiştir. Buna göre birinci eklem konum ve hızları aşağıdaki gibi bulunur:

$$x_1^g = a_1 \cos(\theta_1) \quad (3.2.a)$$

$$\dot{x}_1^g = -a_1 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) \quad (3.2.b)$$

$$y_1^g = a_1 \sin(\theta_1) \quad (3.2.c)$$

$$\dot{y}_1^g = a_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) \quad (3.2.d)$$

İkinci eklem konum ve hızları,

$$x_2^g = l_1 \cos(\theta_1) + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.3.a)$$

$$\dot{x}_2^g = -l_1 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) - a_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.3.b)$$

$$y_2^g = l_1 \sin(\theta_1) + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.3.c)$$

$$\dot{y}_2^g = l_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) + a_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.3.d)$$

şeklinde olur. Üçüncü eklem konum ve hız ifadeleri ise,

$$x_3^g = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (3.4.a)$$

$$\dot{x}_3^g = -l_1 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) - l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 + \theta_2) - a_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (3.4.b)$$

$$y_3^g = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + a_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (3.4.c)$$

$$\dot{y}_3^g = l_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) + l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (3.4.d)$$

olur. Son olarak dördüncü eklem olan kuyruk yüzgecinin konum ve hızları,

$$x_4^g = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + a_4 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad (3.5.a)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_4^g = & -l_1 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) - l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 + \theta_2) - l_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ & - a_4 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \end{aligned} \quad (3.5.b)$$

$$y_4^g = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + a_4 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad (3.5.c)$$

$$\dot{y}_4^g = l_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) + l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + a_4 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad (3.5.d)$$

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

$$T = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m_i v_i^2 + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} I_i \omega_i^2 \quad (3.6)$$

şeklinde elde edilir. Denklem (3.6) daha açık bir şekilde yazılırsa,

$$T = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m_i ((\dot{x}_i^g)^2 + (\dot{y}_i^g)^2) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} I_i (\dot{\theta}_i)^2 \quad (3.7)$$

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

$$L = T - V \quad (3.8)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (3.7)'de bulunan kinetik enerjilerin toplamı Denklem (3.8)'de yerine yazılırsa L fonksiyonu,

$$L = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m_i ((\dot{x}_i^g)^2 + (\dot{y}_i^g)^2) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} I_i (\dot{\theta}_i)^2 - V \quad (3.9)$$

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:

$$L = \frac{1}{2} \left[\begin{aligned} & \left(m_1 ((\dot{x}_1^g)^2 + (\dot{y}_1^g)^2) \right) + \left(m_2 ((\dot{x}_2^g)^2 + (\dot{y}_2^g)^2) \right) + \left(m_3 ((\dot{x}_3^g)^2 + (\dot{y}_3^g)^2) \right) \\ & + \left(m_4 ((\dot{x}_4^g)^2 + (\dot{y}_4^g)^2) \right) + \left(I_1 \dot{\theta}_1^2 \right) + \left(I_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \right) + \left(I_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 \right) \\ & + \left(I_4 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)^2 \right) - \left(k_1 \theta_1^2 \right) - \left(k_2 (\theta_2 - \theta_1)^2 \right) - \left(k_3 (\theta_3 - \theta_2)^2 \right) \\ & - \left(k_4 (\theta_4 - \theta_3)^2 \right) \end{aligned} \right] \quad (3.10)$$

Burada, $i=1,2,...,N$ için k_i eklemlerde oluşan yay sabitidir. Bulunan L fonksiyonu robot balığın dinamik davranışını içermektedir ve $L(q_k, \dot{q}_k, t)$ için Denklem (3.11)'de yerine yazılırsa,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} \right) - \left(\frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} \right) = Q_i \quad (3.11)$$

olarak robot balığın hareketini içeren Lagrange denklemi elde edilir. Burada, Q_i sistemin genelleştirilmiş parametrelerini ve Q_i bu parametrelere etki eden kuvvetlerin toplamını ifade etmektedir. Eklemlerin dönme hareketinde oluşan sürtünme etkisinden dolayı tasarlanan sistemde sönümlenme etkisinin de dikkate alınması gerekir. Böylece, D Rayleigh disipasyon fonksiyonu olmak üzere,

$$D = \frac{1}{2} c_1 (\dot{\theta}_1)^2 + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{2} c_{i+1} (\dot{\theta}_{i+1} - \dot{\theta}_i)^2 \quad (3.12)$$

olur. Burada, C_i i . eklemin sönüm katsayısıdır. Denklem (3.12) daha açık bir halde yazılırsa,

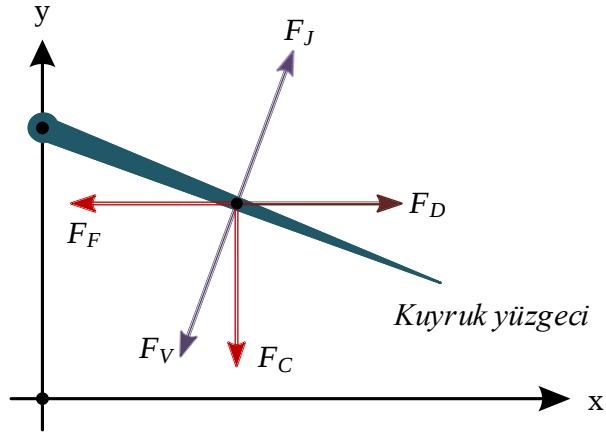
$$D = \frac{1}{2} \left(c_1 \dot{\theta}_1^2 + c_2 (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1)^2 + c_3 (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2)^2 + c_4 (\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_3)^2 \right) \quad (3.13)$$

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

$$M(\theta_i) \ddot{\theta}_i + C(\theta_i, \dot{\theta}_i) \dot{\theta}_i + B(\dot{\theta}_i) + K(\theta_i) = \tau_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.14)$$

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.

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 iki adet aktif kuyruk yapısından oluşur ve hareketi servo motorlar oluşturur. Pasif kuyruk yapısı 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 bulunmaktadır. Bu kuvvetler Şekil 3.9.'da gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Kuyruk yüzgecinde oluşan hidrodinamik kuvvetler

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

Kuyruk yüzgecinin kendi merkezine etki eden U bağıl akış hızı ile bir akış içerisinde çırpındığı düşünülürse, iki temel kuvvet olan F_V ivmelenme ve F_J kaldırma kuvvetleri Denklem (3.15) ve (3.16)'daki hesaplanır:

$$F_V = \pi \rho L C^2 \dot{U} \sin(\alpha) + \pi \rho L C^2 U \dot{\alpha} \cos(\alpha) \quad (3.15)$$

$$F_J = 2\pi \rho L C U^2 \sin(\alpha) \cos(\alpha) \quad (3.16)$$

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 3.10.'da gösterilmektedir.

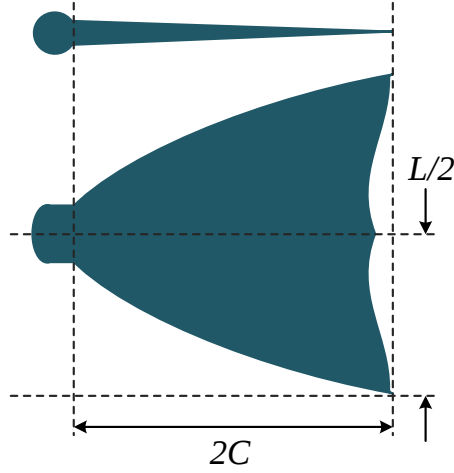
Aynı zamanda tahrik kuvveti olan F_F ve sapma açısına etkisi olan F_C kuvvetlerini hesaplamak için F_V ve F_J kuvvetleri Şekil 3.11.'deki gibi bileşke vektörlerine ayrılmalıdır. Böylece bu kuvvetler aşağıdaki gibi elde edilir:

$$F_F = F_{FV} + F_{FJ} \quad (3.17.a)$$

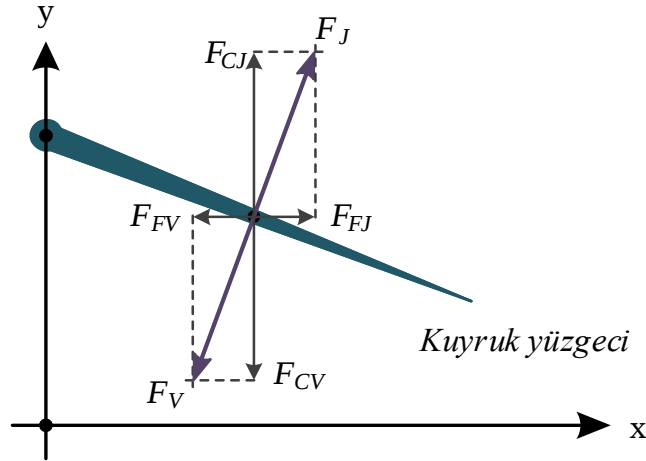
$$F_F = (F_V - F_J) \sin(360 - \sum_{i=1}^N \theta_i) \quad (3.17.b)$$

$$F_C = F_{CV} + F_{CJ} \quad (3.18.a)$$

$$F_C = (F_V - F_J) \cos(360 - \sum_{i=1}^N \theta_i) \quad (3.18.b)$$



Şekil 3.10. Carangiform türü bir balığın kuyruk uzunluğu ve yüksekliği



Şekil 3.11. Hidrodinamik bileşke kuvvetler

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

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D V_f^2 S_u \quad (3.19)$$

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 aşağıdaki ifade ile bulunur:

$$U = \sqrt{U_m^2 + u_f^2} \quad (3.20)$$

Bu denklemde U_m akış sabiti, u_f ise y eksenine göre kuyruk yüzgeci merkezinin y eksenine göre göreceli hızıdır ve Denklem (3.21) ile bulunur:

$$u_f = l_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) + l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + a_4 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad (3.21)$$

Aynı zamanda bu kuvvetlerin hesaplanabilmesi için Şekil 3.12.'de gösterilen atak açısı α Denklem (3.22) ile elde edilir:

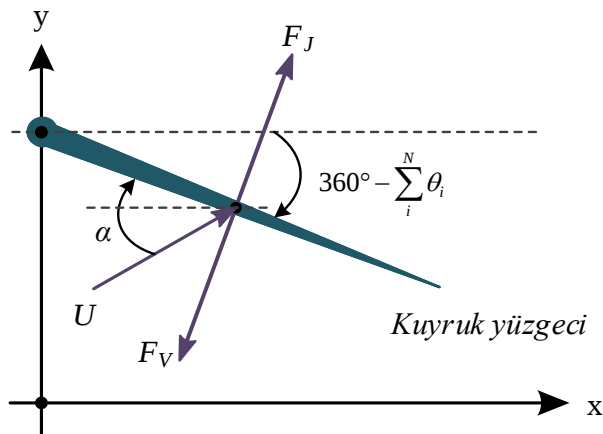
$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{u_f}{U_m} \right) + 360 - \sum_{i=1}^N \theta_i \quad (3.22)$$

Robot balığa etki eden hidrodinamik kuvvetlerin bulunması ile τ_i kuvvet matrisi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\tau = \begin{bmatrix} F_C l_1 \cos(\theta_1) - F_F l_1 \sin(\theta_1) \\ F_C l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) - F_F l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + T_1^u \\ F_C l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - F_F l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + T_2^u \\ F_C a_4 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - F_F a_4 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

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

$$T_i^u = A_{\max} \sin(2\pi f_T t \pm \Delta_i) \quad (3.24)$$



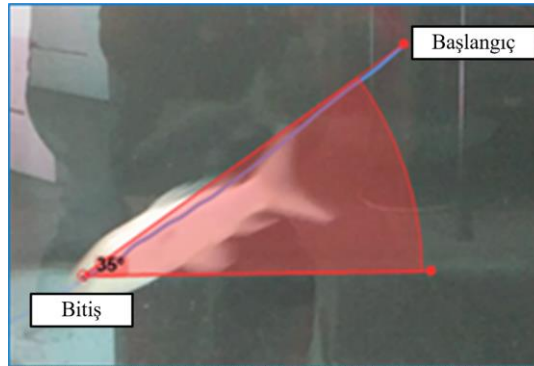
Şekil 3.12. Kuyruk üzerinde oluşan atak açısı

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:

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

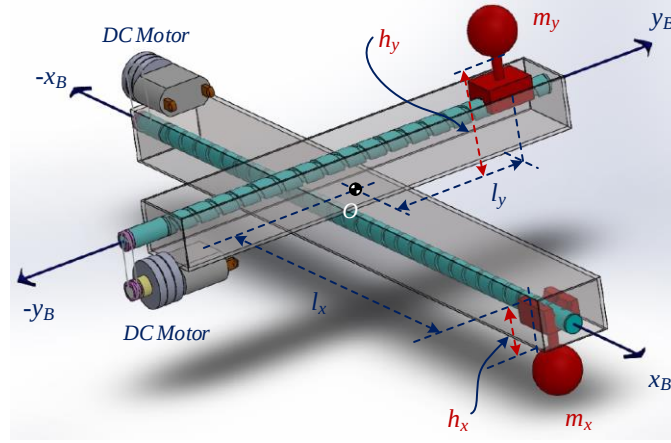
Burada, M kütle ve atalet momenti matrisini, N ise kuvvet, coriolis, sönüm ve yay sabiti ifadelerini içeren matrisi tanımlamaktadır.

Balıkların su içerisinde en önemli hareket kabiliyetlerinden biri dikey hareket olan yukarı/aşağı hareketlerdir. Şekil 3.13.'te 1050 ms içerisinde Carangiform türü bir balığın dalmak için 35° 'lik bir açıya kolayca ulaşabildiği görülmektedir. Aynı zamanda balıklar gövde x eksenleri etrafında da göğüs yüzgeçleri yardımı ile dönebilmektedir.



Şekil 3.13. Carangiform türü bir balığın dalış anı

Birçok balık dikey hareketlerin gerçekleşebilmesi için kaldırma kuvveti merkezini kullanır. 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. Tasarlanan robot balık modelinde bu problemi ortadan kaldırmak için ağırlık merkezi ile kaldırma kuvveti merkezi birbirine çakışık şekilde üst üste belirlenmiştir. Şekil 3.14.'de robot balık modeli için tasarlanan ağırlık merkezi denetim mekanizması verilmiştir. Tasarlanan mekanizmada, gövde x ekseninde bulunan ağırlığın hareket etmesiyle y ekseninde dönme ve dikey hareket, y ekseninde bulunan ağırlığın hareketi ile x ekseninde dönme ve yalpalanma hareketi gerçekleşmektedir.



Şekil 3.14. Ağırlık merkezi denetim mekanizması

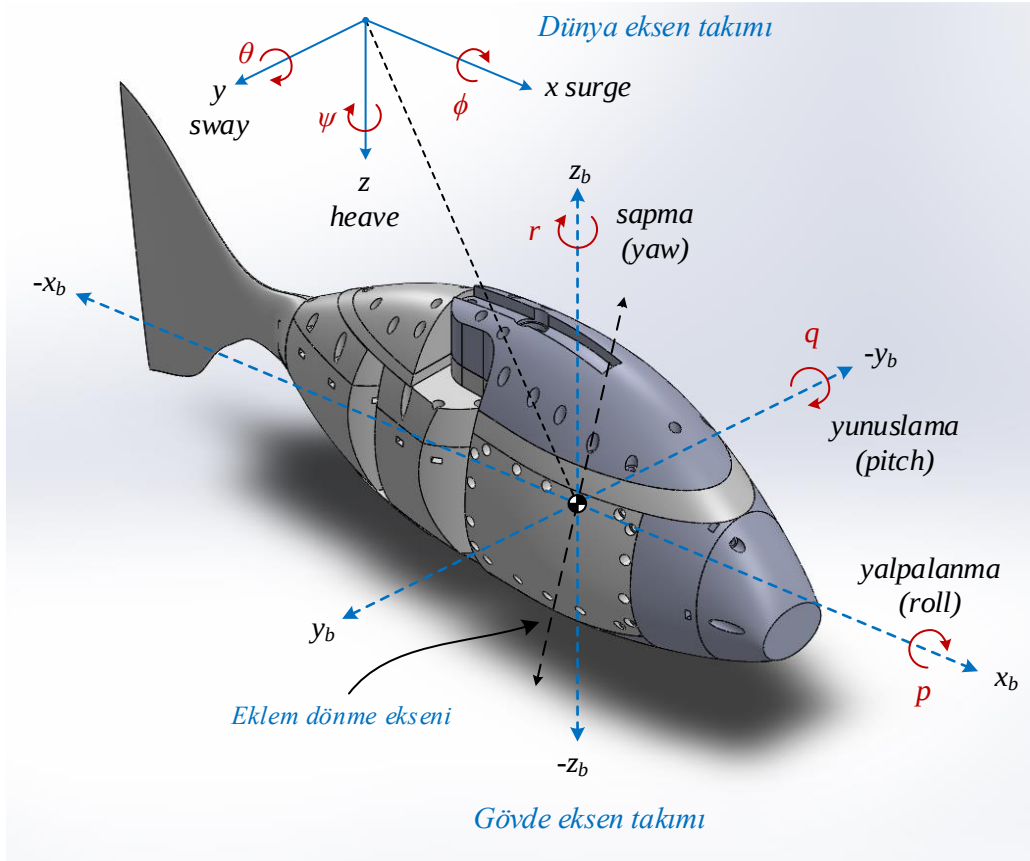
Burada m_x ve m_y sırasıyla x ve y gövde eksenlerinde hareket eden kütleler, h_x ve h_y x ve y gövde eksenlerinde bulunan kütlelerin bağlı oldukları eksene olan uzaklıkları, l_x ve l_y ise kütlelerin denge noktası olan uzaklıklarıdır. Böylece, ağırlıkların hareketi ile oluşan doğrusal olmayan moment ifadeleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\tau_x = g((l_x \sin(\phi) \sin(\theta) - h_x \sin(\phi) \cos(\theta))m_x + (l_y \cos(\phi) - h_y \sin(\phi) \cos(\theta))m_y) \quad (3.26)$$

$$\tau_y = g((l_x \cos(\theta) - h_x \sin(\theta))m_x + (h_y \sin(\theta))m_y) \quad (3.27)$$

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

Tasarlanan robot balık modelinin konum ve hız gibi fiziksel davranışlarının 3B uzayda analizinin yapılabilmesi için 6 Serbestlik Dereceli (6-SB, 6-Degrees of Freedom, 6-DoF) 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. Hareketli eksen takımı 3B uzayda robot balığın ağırlık merkezine sabitlenmiş ve sabit gövde eksen takımı olarak isimlendirilir. 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. Bu proje çalışmasında, 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-SB hareketini içeren model gösterimi Şekil 3.15.'de verilmiştir. Tablo 3.1.'de ise robot balığın eksen takımları açıklanmış ve bu eksen takımlarında gerçekleşen hareket verilmiştir.



Şekil 3.15. İki eklemlili robot balığın 3B uzayda 6-SB eksen takımları

Tablo 3.1. Robot balığın eksen takımları ve eksen takımlarında gerçekleşen davranışlar

Koordinat Sistemi	Hareket	Sembol	Adı	Açıklama	Birimi
Dünya	Öteleme	x	X	Kuzey yönündeki konum	metre (m)
		y	Y	Doğu yönündeki konum	
		z	Z	Aşağı yöndeki konum, derinlik	
	Dönme	ϕ	Euler Yalpalanma (Roll) Açısı	x eksenini etrafında dönme	Derece (°)
		θ	Euler Yunuslama (Pitch) Açısı	y eksenini etrafında dönme	
		ψ	Euler Sapma/Dönme (Yaw) Açısı	z eksenini etrafında dönme	
	Doğrusal Hız	u	Dalgalanma (Surge) Hızı	Uzunlama eksenini etrafında doğrusal hız	m/sn
		v	Sallanma (Sway) Hızı	Yanal eksenini etrafında doğrusal hız	
		w	Kaldırma (Heave) Hızı	Dikey eksenini etrafında açısal hız	
Gövde	Açısal Hız	p	Yalpalanma (Roll) Hızı	Uzunlama eksenini etrafında açısal hız	°/sn
		q	Yunuslama (Pitch) Hızı	Yanal eksenini etrafında açısal hız	
		r	Sapma/Dönme (Yaw) Hızı	Dikey eksenini etrafında açısal hız	

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

$$y = [u \ v \ w \ p \ q \ r \ x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T \quad (3.28)$$

Burada (u, v, w) gövde eksen takımındaki dalgalanma (surge), sallanma (sway) ve kaldırma (heave) hareketlerinin doğrusal hızları, (p, q, r) yalpalanma (roll), yunuslama (pitch) ve sapma (yaw) dönmelerinin açısal hızlarını ifade eder. Dalgalanma, sallanma ve kaldırmadaki konumlar dünya eksen takımında (x, y, z) ile gösterilmektedir. Robot balığın yalpalanma, yunuslama ve sapma (ϕ, θ, ψ) dairesel dönme hareketleri ise Euler açıları olarak bilinir ve robot balığın 3B uzaydaki oryantasyonunu tanımlamaktadır. Böylece, robot balığın hareketini tanımlamak için gerekli eksen takımları arasındaki kinematik dönüşüm Denklem (3.29) ile ifade edilebilir:

$$\dot{\eta} = J_{\Theta}(\eta)v \quad (3.29)$$

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,

$$J_{\Theta}(\eta) = \begin{bmatrix} R_{\Theta}(\eta) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & T_{\Theta}(\eta) \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

şeklinde olur. Burada R ve T sırasıyla dönme ve öteleme matrisidir ve Denklem (3.31) ve (3.32)'de verilmiştir:

$$R_{\Theta}(\eta) = \begin{bmatrix} c(\psi)c(\theta) & -s(\psi)c(\phi) + c(\psi)s(\theta)s(\phi) & s(\psi)s(\phi) + c(\psi)c(\phi)s(\theta) \\ s(\psi)c(\theta) & c(\psi)c(\phi) + s(\phi)s(\psi)s(\theta) & -c(\psi)s(\phi) + s(\psi)s(\theta)c(\phi) \\ -s(\theta) & c(\theta)s(\phi) & c(\theta)c(\phi) \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$T_{\Theta}(\eta) = \begin{bmatrix} 1 & s(\phi)t(\theta) & c(\phi)t(\theta) \\ 0 & c(\phi) & -s(\phi) \\ 0 & s(\phi)/c(\theta) & c(\phi)/c(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Aynı zamanda, Jacobian matrisi elde edilirken aşağıdaki sınır şartları dikkate alınmıştır:

$$\begin{cases} -\pi < \phi \leq \pi \\ -\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2} \\ 0 \leq \psi < 2\pi \end{cases} \quad (3.33)$$

Yukarıdaki ifadelerde $s(), c(), t()$ terimleri sırasıyla $\sin(), \cos(), \tan()$ fonksiyonlarını simgeler.

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

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau_f \quad (3.34)$$

Bu denklemde $M = M_{RB} + M_A$ robot balığın şekline bağlı kütle ve atalet momenti matrisini, M_{RB} gövde kütle matrisini, 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. $D(v)$, doğrusal D_L ve doğrusal olmayan $D_{NL}(v)$ sönümlleme etkilerinin toplamını içeren hidrodinamik sönümlleme matrisidir. $g(\eta)$ Robot balığın akışkan içerisindeki hidrostatik etkileri içeren vektördür. τ_f ise hidrodinamik kuvvet ve momentleri içeren kuvvet vektörüdür.

Katı gövde kütle matrisini bulmak için aşağıdaki ifade kullanır:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} M_{RB11} & M_{RB12} \\ M_{RB21} & M_{RB22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & -mS(r_G) \\ mS(r_G) & I_0 \end{bmatrix} \quad (3.35.a)$$

Burada m toplam gövde kütlesini, I_0 ise 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 yükünden kurtulmamızı ve daha kolay hesaplama yapmamızı sağlar. Herhangi bir $\lambda = [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \lambda_3]^T$ vektörü için $S(\lambda)$ aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$S(\lambda) = \begin{bmatrix} 0 & -\lambda_3 & \lambda_2 \\ \lambda_3 & 0 & -\lambda_1 \\ -\lambda_2 & \lambda_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.35.b)$$

Böylece Denklem (3.34.b), (3.34.a) içerisinde tekrar yazılırsa,

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & 0 \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & 0 & -mz_G & 0 \\ 0 & -mz_G & 0 & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ 0 & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.35.c)$$

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

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(v_1 m I_{3 \times 3} - v_2 m S(r_G)) \\ -S(v_1 m I_{3 \times 3} + v_2 m S(r_G)) & -S(v_1 m S(r_G) + v_2 I_0) \end{bmatrix} \quad (3.36.a)$$

ile bulunur. Burada hız terimi $v = [v_1 \ v_2]^T$ şeklinde ayrıklaştırılarak $v_1 = [u \ v \ w]^T$ ve $v_2 = [p \ q \ r]^T$ ile temsil edilsin. Denklem (3.35.b) kullanılarak Denklem (3.36.a) tekrar düzenlenirse,

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & mw & -mv \\ 0 & 0 & 0 & -mw & 0 & mu \\ 0 & 0 & 0 & mv & -mu & 0 \\ 0 & mw & -mv & 0 & I_{zz}r & -I_{yy}q \\ -mw & 0 & mu & -I_{zz}r & 0 & I_{xx}p \\ mv & -mu & 0 & I_{yy}q & -I_{xx}p & 0 \end{bmatrix} \quad (3.36.b)$$

şeklinde tekrar elde edilir. Ek kütle matrisleri ise robot balığın su içerisindeki hareketi sırasında, kendisiyle birlikte hareket ettirdiği akışkanın sisteme etki eden eklenmiş kütle ve ataletleri olarak ifade edilebilir. 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 modellenenebilir. Bu tanımlamalar kullanılarak sistemde kütle, atalet ve Coriolis ifadelerine eklenen ataletsel ek su kütlesi M_A ve ek Coriolis kütlesi $C_A(v)$ eklenir.

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 ek kütle matrisi,

$$M_A = \begin{bmatrix} M_{A11} & M_{A12} \\ M_{A21} & M_{A22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & Y_{\dot{r}} \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & Z_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{\dot{w}} & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & N_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

ile bulunur. M_A matrisinde bulunan her terim sıfır frekanstaki ek kütle katsayısıdır ve birbirine benzer şekilde aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$X_{\dot{u}} = \frac{\partial X}{\partial u_x} \quad (3.38)$$

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:

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(M_{A11}v_1 + M_{A12}v_2) \\ -S(M_{A11}v_1 + M_{A12}v_2) & -S(M_{A12}v_1 + M_{A22}v_2) \end{bmatrix} \quad (3.39.a)$$

Denklem (3.34.b), (3.38.a) için kullanılır ve yerine yazılırsa,

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v & 0 & -N_{\dot{r}}r & M_{\dot{q}}q \\ Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u & N_{\dot{r}}r & 0 & -K_{\dot{p}}p \\ -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 & -M_{\dot{q}}q & K_{\dot{p}}p & 0 \end{bmatrix} \quad (3.39.a)$$

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

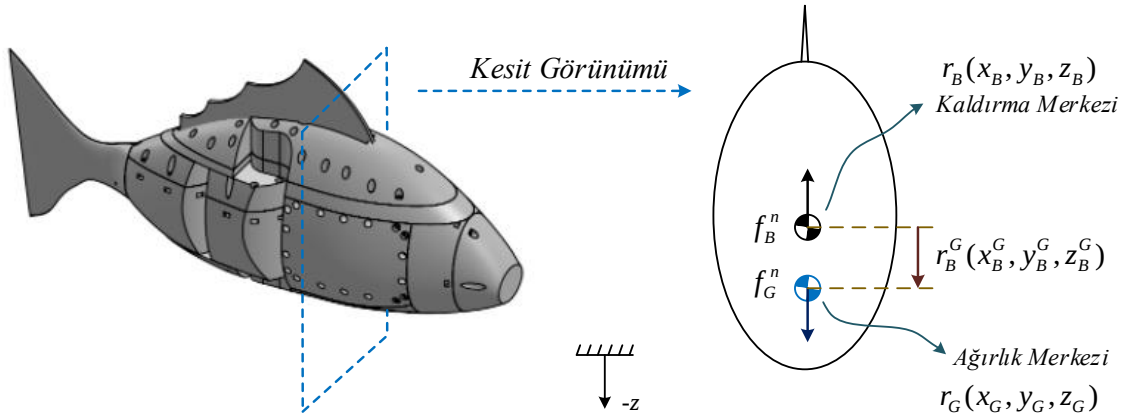
Hidrodinamik sönümleme matrisi, robot balığın su içerisinde hareket ettiği sırada akışkanın oluşturduğu doğrusal ve açısal hareketine karşı gelen kuvvet ve momentlerdir. Bu matrisin elde edilmesi için robotun gövde şekline etkiyen basınç ile oluşan şekil sürüklemesi ve yüzey alanına bağlı yüzey viskoz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

$$D_{NL}(v) = \begin{bmatrix} X_{|u|u} |u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{|v|v} |v| & 0 & 0 & 0 & -Y_{|v|r} |v| \\ 0 & 0 & Z_{|w|w} |w| & 0 & Y_{|w|q} |w| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{|p|p} |p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{|q|w} |q| & 0 & M_{|q|q} |q| & 0 \\ 0 & -N_{|r|v} |r| & 0 & 0 & 0 & N_{|r|r} |r| \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Doğrusal olmayan sönümler terimleri sistemin eksenlerindeki hızlara bağlıdır. Doğrusal sönümler matrisi ise sistemin şekli ve akışkan etkisi ile elde edilir ve Denklem (3.41) ile bulunur:

$$D_L = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 & 0 & -Y_r \\ 0 & 0 & Z_w & 0 & Z_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_w & 0 & M_q & 0 \\ 0 & -N_v & 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Yerçekimi ve kaldırma kuvvetlerinin arasında oluşan farktan dolayı robot balığın su içerisindeki hareketi sırasında hidrostatik etkiler oluşur. Bu durum Şekil 3.16.'da açıklanmaktadır.



Şekil 3.16. 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. Robot balığa etki eden yerçekimi kuvveti W ve kaldırma kuvveti B aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$W = mg \quad (3.42)$$

$$B = \rho g \Delta_f \quad (3.43)$$

Bu denklemlerde ρ robot balığın öz kütlesi, g yerçekimi ivmesi ve Δ_f robot balığın hacmidir. Böylece robot balığa etki eden $g(\eta)$ vektörü Denklem (3.44) ile bulunur.

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B)s(\theta) \\ -(W - B)c(\theta)s(\phi) \\ -(W - B)c(\theta)c(\phi) \\ -(y_G W - y_B B)c(\theta)c(\phi) + (z_G W - z_B B)c(\theta)s(\phi) \\ -(z_G W - z_B B)s(\theta) + (x_G W - x_B B)c(\theta)c(\phi) \\ -(x_G W - x_B B)c(\theta)s(\phi) - (y_G W - y_B B)s(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

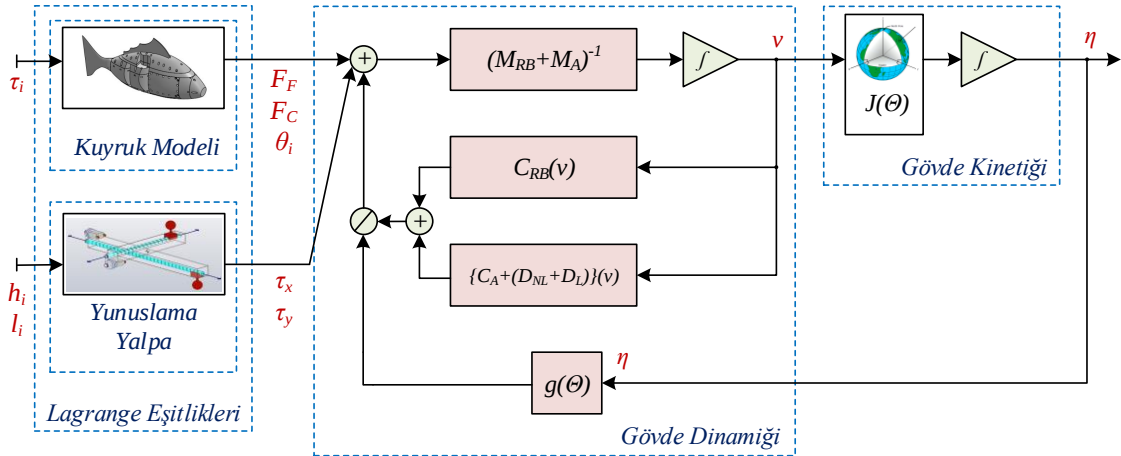
Robot balığın hareketini sağlayan ve hidrodinamik etkileri içeren tahrik kuvvet vektörü τ_f üç adet kuvvet ve üç adet moment terimlerini içerir ve aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\tau_f = [F_x \quad F_y \quad F_z \quad \tau_x \quad \tau_y \quad \tau_z]^T \quad (3.45)$$

Bu kuvvetler sırasıyla x, y ve z eksenlerinde ötelemeyi ve dönmeyi oluşturan kuvvetler ve momentlerdir. Böylece Denklem (3.45) tekrar düzenlenirse,

$$\tau_f = \begin{bmatrix} F_F c\left(\sum_{i=2}^3 \theta_i\right) \\ 0 \\ 0 \\ \tau_x \\ \tau_y \\ F_F ((l_1 + l_2 c(\theta_2) + l_3 c(\theta_2 + \theta_3))s(\theta_2 + \theta_3)) \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

şeklinde yazılabilir. Böylece, 6-SB doğrusal olmayan dinamik modele ait blok gösterim Şekil 3.17.'de verilmiştir.



Şekil 3.17. İki eklemli robot balığının 6-SB blok diyagramı

Sonuç olarak, iki eklemlili Carangiform türü biyomimetik bir robot balığın doğrusal olmayan dinamik modeli 3B uzayda 6-SB olarak elde edilmiştir.

3.2 Lamprey Türü Sinir Hücresi Merkezi Örüntü Üretici

Tasarlanan sinirsel Lamprey MÖÜ devresi bir motor kontrol merkezi ve bir dizi osilatörden oluşmaktadır. Motor kontrol merkezi MÖÜ devresinin beyin sapı gibi davranır ve osilatörlerin çıkış sinyalini ayarlamak için bu osilatörlere sinir hücreleri ile komutlar gönderir. CPG devre diyagramına ait her osilatör ise belirli aralıklar ile tekrarlanan çıkışlar üretir.

Şekil 3.18.'de verilen sinirsel Lamprey osilatör hücresi birbirine simetrik sol ve sağ bölüm olmak üzere iki temel yapıdan oluşmaktadır. Her iki bölümde üçer adet ara sinir hücresi (internöron - interneuron) ve bir adet Motor Sinir Hücresi (MS, Motor Neuron - MN) bulunur. Ara sinir hücreleri Çapraz Ara Sinir Hücresi (ÇAS, Crossed InterNeurons - CIN), Yanal Ara Sinir Hücresi (YAS, Lateral InterNeurons - LIN) ve Uyarıcı Ara Sinir Hücresi'nden (UAS, Excitatory InterNeurons - EIN) oluşur.

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

- Her ÇAS, aynı tarafa ait zar (aksiyon) potansiyelinin artması ile karşı taraftaki UAS hariç tüm ara sinir hücrelerine engelleyici (inhibitory) sinapslar yayar.
- Her UAS, aynı taraftaki diğer üç ara sinir hücresine uyarıcı (excitatory) 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 kuplaj sinapsları 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 başka bir osilatör ile bağlantı kurarsa, çift sayıda sinaptik kuplaja bağlı oluşur.

Şekil 3.18. Sinirsel Lamprey osilatör hücresi

Basit ve kolay kullanım yapısına sahip bir STA modeli, sızıntı olayının dirençten kaynaklandığı ve toplamının akım ile sağlandığı düşünülürse, Şekil 3.19.'da verilen paralel bir direnç - kondansatör (R - C) devresinin eşitliği gibi tanımlanır. Direnç akımı $I_R(t)$ ve kondansatör akımı $I_C(t)$ olmak üzere,

$$I(t) = I_R(t) + I_C(t) \quad (3.47.a)$$

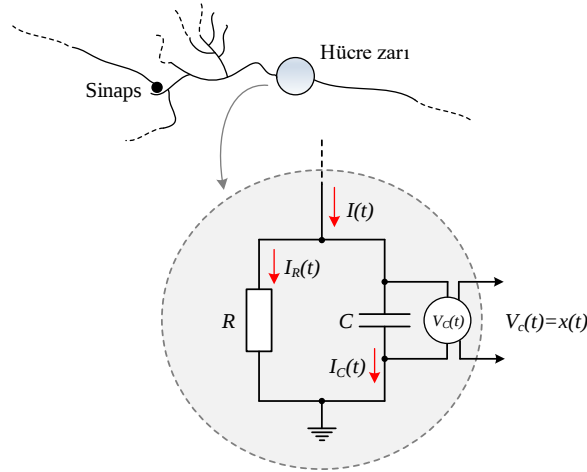
olur. Akım ifadelerinde kondansatör gerilimi $V_C(t)$ yerine yazılırsa, Denklem (3.47.a) aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir:

$$I(t) = \frac{V_C(t)}{R} + C \frac{dV_C(t)}{dt} \quad (3.47.b)$$

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

$$\tau \frac{dx(t)}{dt} = -x(t) + x_0 + RI(t) \quad (3.48)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, $x(t)$ hücrenin zar potansiyelini, τ hücre zarının zaman sabitini, R zar direncini ve $I(t)$ hücreye akan giriş akımının miktarını belirtir. Bu ifadede, eşitliğin sağ tarafı hücrenin ortalama ateşleme miktarını verir. Zar potansiyeli $x(t)$ belirli bir eşik değerine ulaştığında, anlık olarak daha düşük bir değere çekilir ve sızıntı toplama işlemi başlangıç değeri x_0 ile yeniden başlar. Kalıcı durumda, hücrenin çıkışı monoton artan ve azalan bir hal almış olur.



Şekil 3.19. STA modelinin paralel R – C eş değer devresi

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

$$\tau \frac{dx_{(\text{ÇAS})i}(t)}{dt} = -x_{(\text{ÇAS})i}(t) + \sum_{k=1}^n w_{i,k} s_{(\text{ÇAS})i,k}(t) \quad (3.49)$$

YAS modeli ise,

$$\tau \frac{dx_{(YAS)i}(t)}{dt} = -x_{(YAS)i}(t) + \sum_{k=1}^n w_{i,k} s_{(YAS)i,k}(t) + \sum_{j=1}^N \left(w_{i,j-1} c_{(YAS)j-1}(t) + w_{i,j+1} c_{(YAS)j+1}(t) \right) \quad (3.50)$$

olur. UAS ara sinir hücresi modeli için

$$x_{(UAS)i}(t) = \frac{A}{1 + e^{-x_{(GAS)i}(t)}} - \frac{A}{2} \quad (3.51)$$

ifadesi kullanılır. Motor sinir hücresi MS ise,

$$\tau \frac{dx_{(MS)i}(t)}{dt} = -x_{(MS)i}(t) + \beta A + \sum_{k=1}^n w_{i,k} s_{(MS)i,k}(t) \quad (3.52)$$

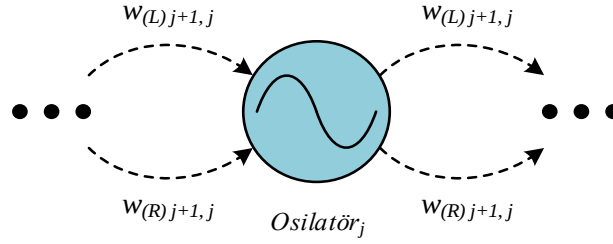
şeklinde ifade edilir. Böylece, osilatör çıkışı Denklem (3.53) ile elde edilir:

$$y_j(t) = \max(x_{(MS)1}(t), 0) - \max(x_{(MS)2}(t), 0) \quad (3.53)$$

Bu ifadelerde $i=1,2$ 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. $x_i(t)$ sinir hücrelerinin zar potansiyelleri ve $y_j(t)$ osilatörlerin çıkışı olmak üzere, τ , β ve A sırasıyla osilatör çıkışının periyodu, ofseti ve genliğini belirleyen parametrelerdir. w_{ik} ve w_{ij} sinir hücreleri ve osilatörler arasındaki sinaptik ağırlıkları tanımlayan bağlantılardır. S_i aynı osilatördeki sinaptik öncesi (presinaptik) sinir hücresi potansiyellerini, w_{ik} 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_{ij} ile birlikte c_j çarpımı ise diğer osilatördeki sinaptik sonrası sinir hücresine iletilen sinirsel tepki miktarını verir.

Denklem 3.51 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 3.20'de bir osilatörün

basitleştirilmiş gösterimi verilmiştir. Şekil içerisinde bulunan sinüzoidal sembol osilatörün kalıcı durumda periyodik çıkış sinyalleri ürettiğini ifade etmektedir.



Şekil 3.20. Bir osilatör sinir hücresinin basitleştirilmiş gösterimi

Tablo 3.2., bir osilatörde kullanılan sabit içsel sinaptik ağırlıkları vermektedir. Ritmik ve daha saf bir sinüzoidal osilatör çıkışı elde etmek için bütün içsel ağırlıklar 1 değerini, UAS'dan MS'ye olan 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 olarak uyarıcı ve engelleyici türler 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.

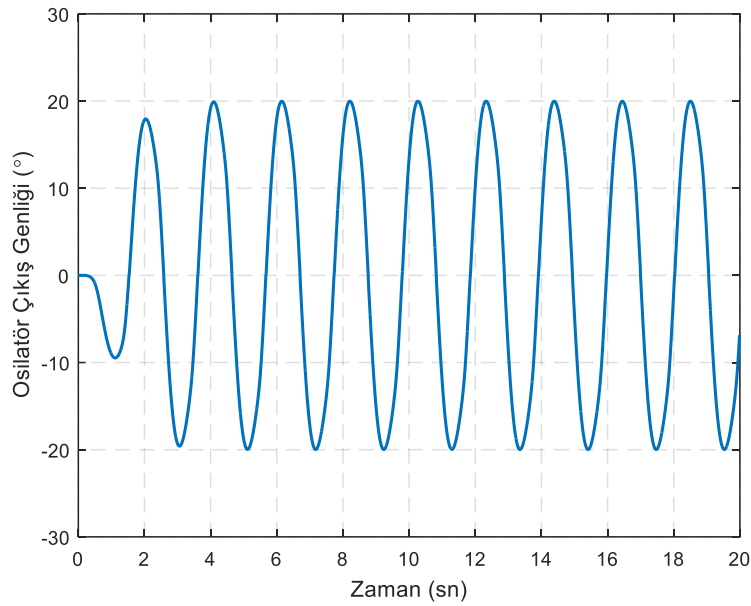
Tablo 3.2. Bir osilatör modeline ait içsel sinaptik ağırlıklar

$W_{i,k}$		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

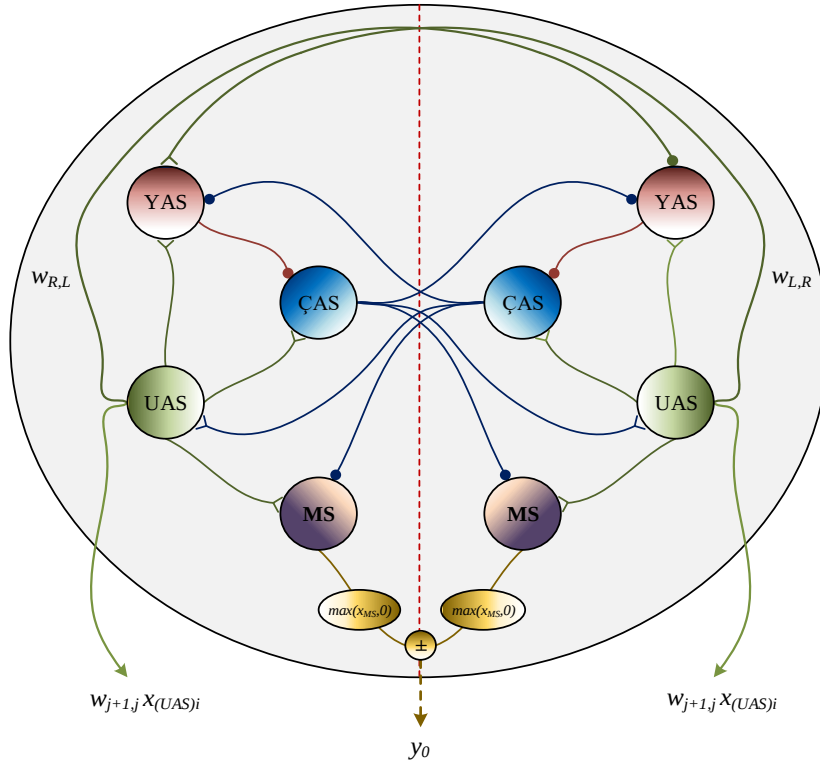
Ara Sinir Hücresi	Değeri	
	SOL	SAĞ
ÇAS	0.1	0.10001
UAS	0.01	0.01001
YAS	0	0
MS	0	0

Şekil 3.21.'de, yukarıda anlatılan yapıda Lamprey sinirsel osilatör modelinin çıkışı verilmektedir. Osilatör modeli için $\tau = 0.2$, $A = 20$ ve $\beta = 0$ olarak seçilmiştir.

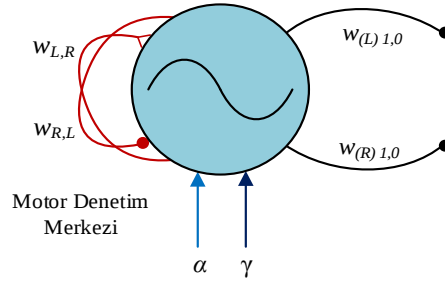


Şekil 3.21. Osilatör modeli çıkışı

Sinirsel motor denetim merkezi, osilatör dizisinde beyin sapı (brainstem) modeli olarak kullanılır ve belirlenen bağlantı topalojisine göre osilatörlere engelleyici veya uyarıcı sinapslar yayar. Bir sinirsel motor kontrol merkezi, bir osilatör hücresinde ek iki adet sinapsın daha kullanılmasıyla oluşur. Bu sinaptik ağırlıklardan $w_{R,L}$ sol UAS'dan sağdaki YAS'a giden engelleyici sinapsi, $w_{L,R}$ ise sağ UAS'dan soldaki YAS'a giden uyarıcı sinapsi belirtir. Bu iki ek sinaps ile osilatör dizisi çıkışları arasındaki faz farkı ayarlanmaktadır. Şekil 3.22.'de, tasarlanan motor denetim merkezi modeli verilmiştir.



(a)



(b)

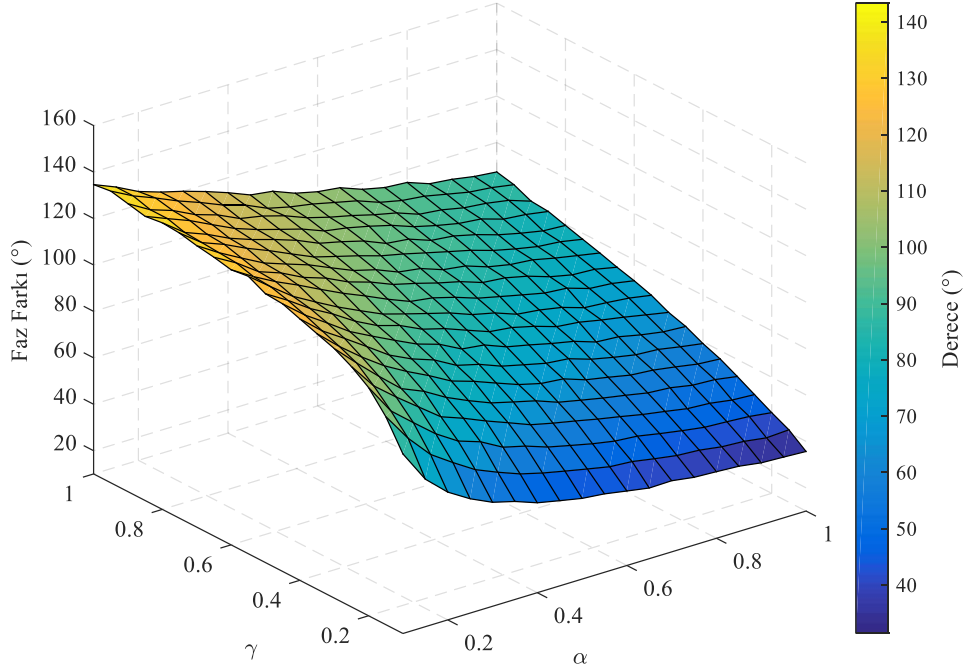
Şekil 3.22. Motor denetim merkezi modeli: (a) Detaylı gösterim (b) Basitleştirilmiş gösterim

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:

$$w_{L,R} = \frac{\alpha}{\alpha + \gamma} \quad (3.54)$$

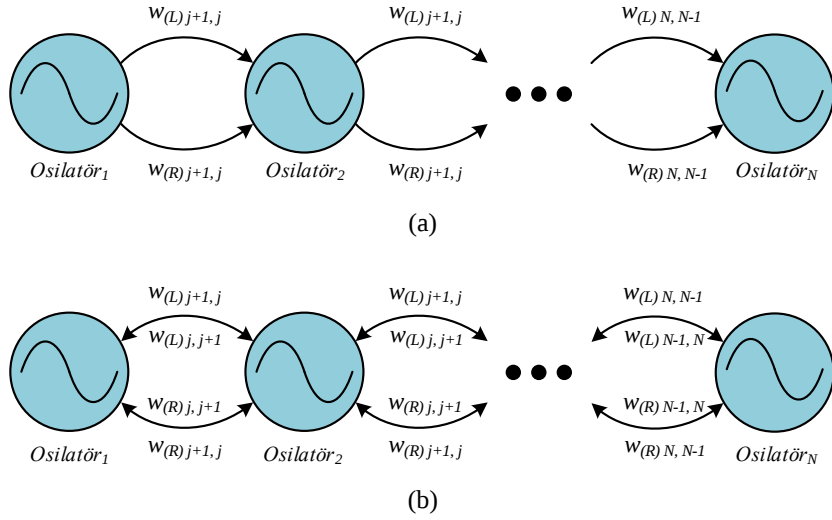
$$w_{R,L} = \frac{-\gamma}{\alpha + \gamma} \quad (3.55)$$

Bu ifadelerde, α ve γ faz farkı değişimini ayarlayan parametreler olup (0,1] aralığında değişmektedir. Şekil 3.23.'te, α ve γ parametrelerinin iki osilatör arasındaki faz farkına olan etkisi verilmektedir. Osilatör modeli için $\tau=0.2$, $A=20$ ve $\beta=0$ olarak belirlenmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, sonuçlar 30° - 140° aralığında değişken, monoton ve yumuşak eğimli bir yüzeye sahiptir. α değerinin artması faz farkını azaltırken, γ değerinin artması ile faz farkı artmaktadır.



Şekil 3.23. Motor denetim merkezi ile ayarlanan faz farkı değişiminin iki osilatör arasındaki dağılımı

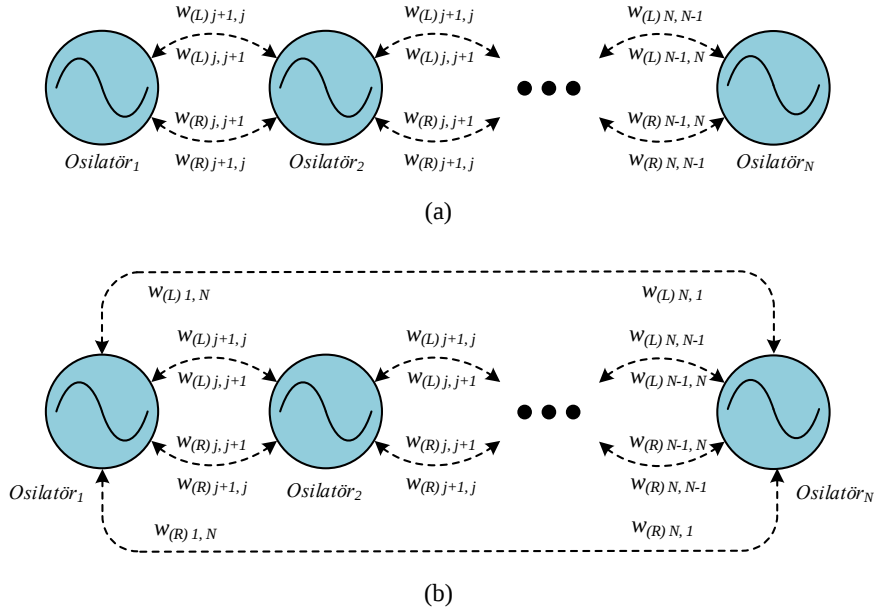
Böylece, α ve γ parametrelerinin faz farkı değişimde uygun değere ayarlanması ile iki osilatör arasında istenen faz farkı kolayca elde edilebilmektedir. Tasarlanan Lamprey sinirsel osilatör hücre modelleri birbirlerine farklı topolojiler ile bağlanarak osilatör dizilerini oluşturmaktadır. Bu bağlantılar sinaptik ağırlıklar ile gerçekleştirilir ve MÖÜ dizisindeki osilatörlerin davranışları belirler. Bir osilatör dizisi için tek yönlü ve çift yönlü olmak üzere iki tür sinaptik ağırlık bağlantısı vardır ve bu bağlantılar Şekil 3.24.'de verilmiştir.



Şekil 3.24. Osilatörler arasındaki sinaptik bağlantılar: (a) Tek yönlü bağlantı (b) Çift yönlü bağlantı

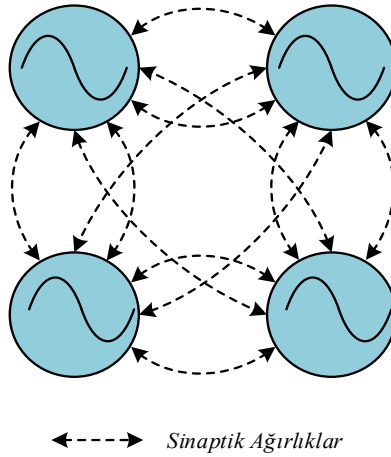
Şekil 3.24.a.'da, j . osilatörden $j+1$. osilatöre doğru yapılan bağlantı tek yönlü sinaptik bağlantı olarak isimlendirilir. Tek yönlü sinaptik bağlantılar ile sırasıyla birbirine bağlı osilatörler arasında istenen faz farkları oluşturulur. Şekil 3.24.b.'de ise her iki osilatör birbirine çift yönlü sinaptik bağlantılar göndermektedir. Çift yönlü bağlantıda faz farkları oluşurken osilatör çıkışlarının yerleşme zamanları daha uzun olur.

Osilatörler, Şekil 3.25.'te gösterildiği gibi zincir veya halka bağlı şekilde de birbirine bağlanabilirler. Kesik çizgili 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 üretmesi için halka çift yön bağlantı kullanılır ve büyük değerlikli sinaptik ağırlıklar seçilir.



Şekil 3.25. Osilatörler arasındaki sinaptik bağlantılar: (a) Zincir bağlantı (b) Halka bağlantı

Eğer sıralı olmayan bazı osilatör çıkışları arasında farklı faz davranışları istenirse, Şekil 3.26.'da gösterildiği gibi osilatörler karmaşık olarak da birbirine bağlanabilmektedir.

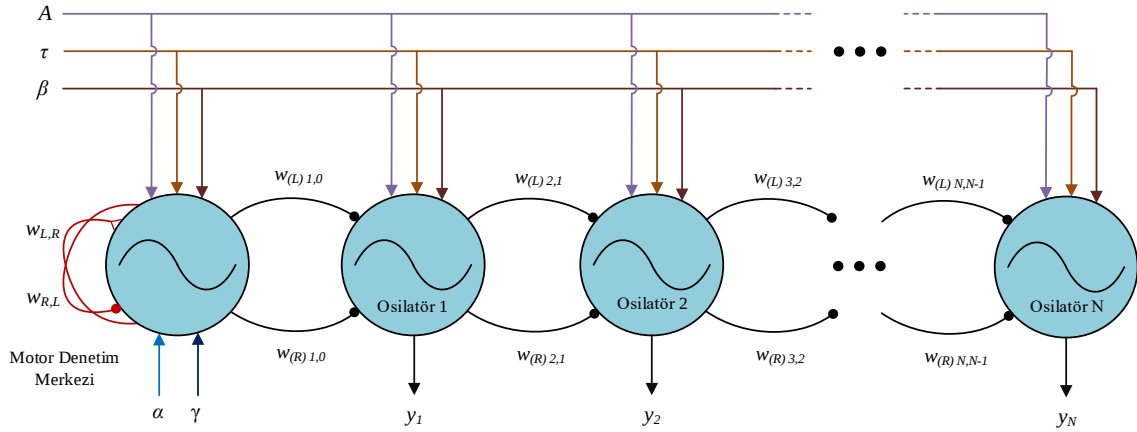


Şekil 3.26. Osilatörlerin karmaşık olarak birbirine bağlanması

3.2.1 Tek Yönlü Zincir Bağlantılı MÖÜ Devresi

Bir önceki bölümde bahsedildiği gibi, osilatörler arasındaki bağlantılar UAS'dan YAS'a sinaptik ağırlıklar vasıtasıyla gerçekleştirilir. Şekil 3.27.'de, bir motor denetim merkezi 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. Osilatörler arasındaki engelleyici ağırlıkların hepsi birbirine

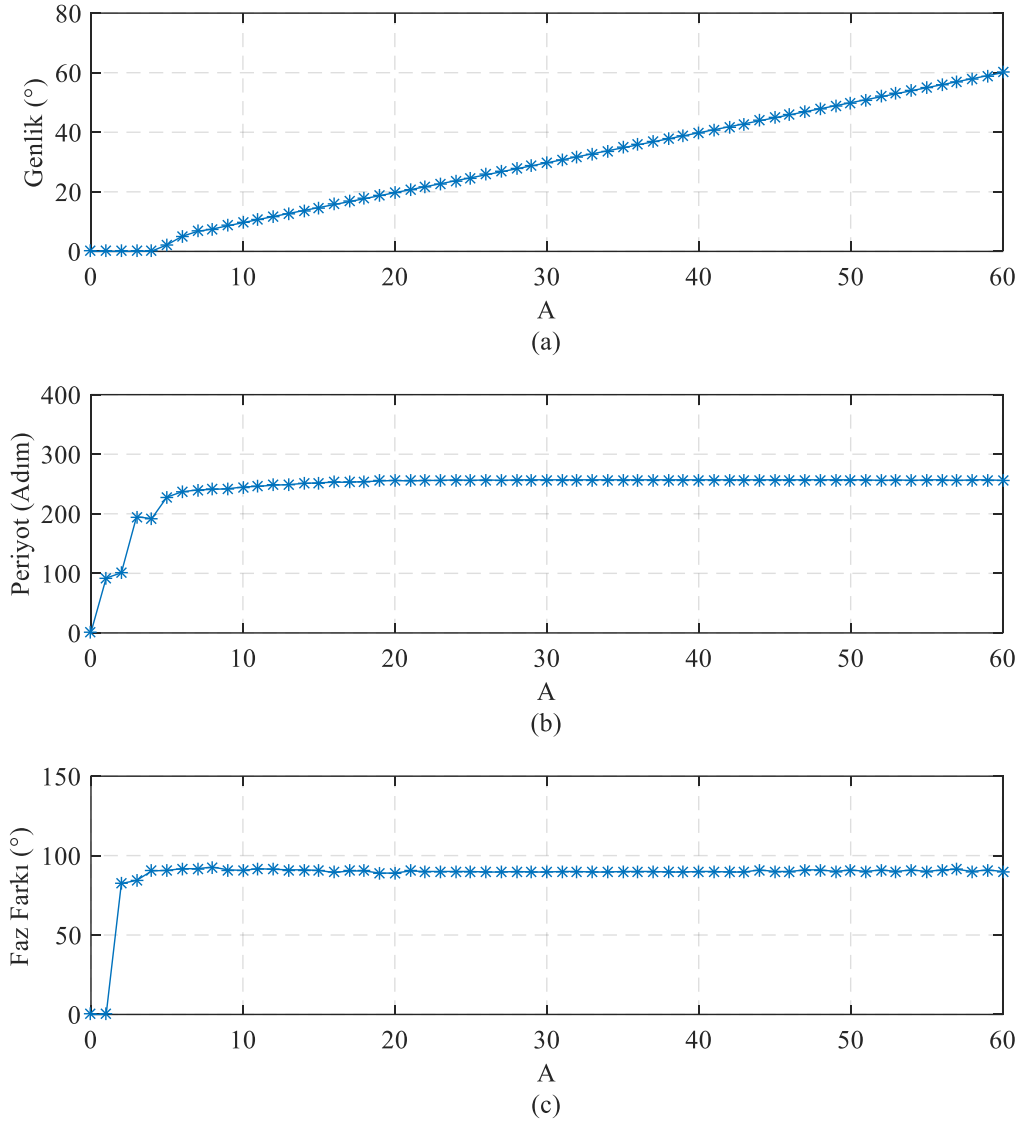
eşit ve -1 değerinde seçilmiştir. Böylece bütün osilatörler arasında eşit ve sabit bir faz farkı davranışı oluşturulur.



Şekil 3.27. 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 , motor denetim merkezi ile osilatörler arasındaki faz farkı değişimini ayarlayan (α, γ) sinaptik katsayı çifti 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 belirlenmiştir. Böylece, bir denetim parametresinin etkisi daha doğru görülmektedir.

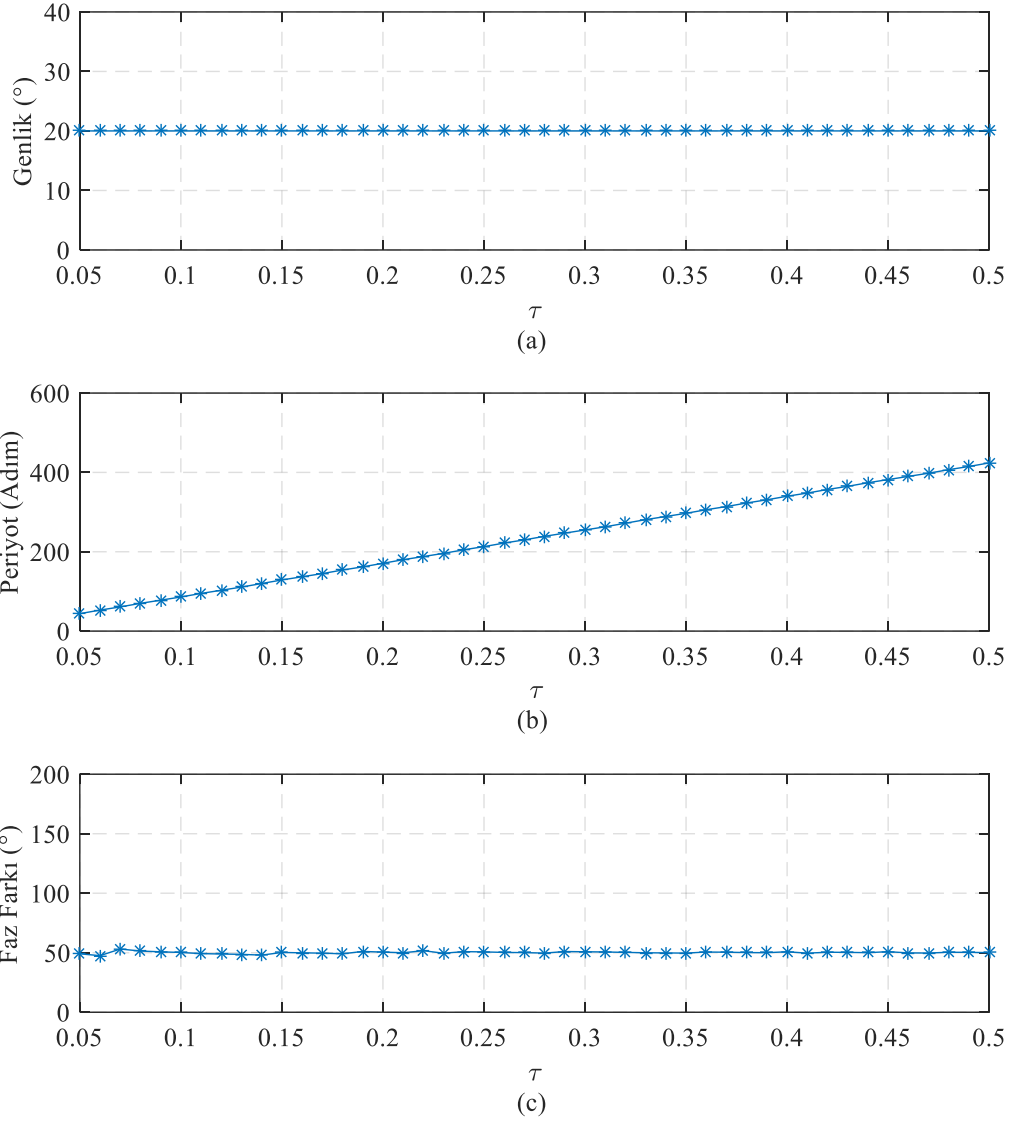
Bir MÖÜ devresinde, A parametresi osilatörlerin çıkış genliğini belirlemektedir. Bu parametrenin osilatör dinamiklerini nasıl etkilediğini görmek için τ , α , γ ve β sırasıyla 0.4, 0.8, 0.2 ve 0 olarak sabitlenmiş ve $A=0,1,2,...,60$ aralığında değiştirilmiştir. Şekil 3.28.a'da görüldüğü gibi, 7 ve daha 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 3.28. A 'nın genlik, periyot ve faz farkına olan etkisi

Şekil 3.28.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 proje çalışması için ihmal edilmektedir.

Bir sinirsel Lamprey tipi MÖÜ devresinde, τ parametresi osilatörlerin periyodunu belirlemek için kullanılmaktadır. Şekil 3.29'da, 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 3.29. τ 'nin genlik, periyot ve faz farkına olan etkisi

Şekil 3.29'da görüldüğü gibi, τ 'nin değişiminin osilatör çıkış genliği ve faz farkı üzerinde herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. Ancak, τ 'nin artması ile osilatör çıkış periyodu doğrusal bir şekilde artmaktadır. Yapılan benzetim çalışmalarından osilatör çıkış periyodunun yaklaşık olarak aşağıdaki ifade ile belirlenebildiği görülmüştür.

$$T_{osc} = 8.5475 \cdot \tau \quad (3.56)$$

Böylece, osilatör çıkış frekansı da istenildiği gibi değiştirilmektedir.

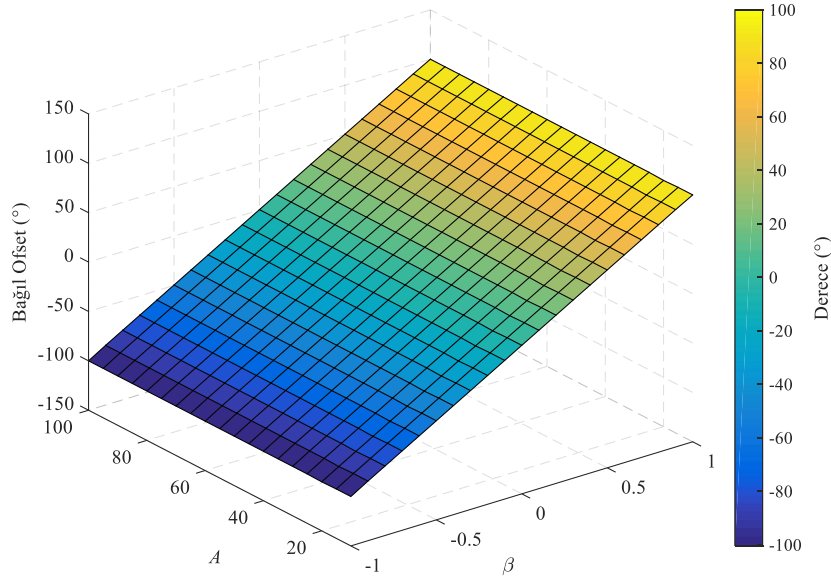
β parametresi, MS vasıtasıyla osilatör çıkışlarına ait ofset değerlerinin ayarlanması için kullanılır ve miktarı $\beta \cdot A$ ifadesi ile belirlenmektedir. Şekil 3.30'da, A parametresi [10,100] aralığında değiştirilmiş ve β 'nin [-1,1] aralığındaki değişimine göre y_{BO} bağıl ofset

değerleri verilmiştir. Bağlı ofset, osilatör çıkış genliğinin ofset yüzdesi olup aşağıdaki ifade ile tanımlanabilir:

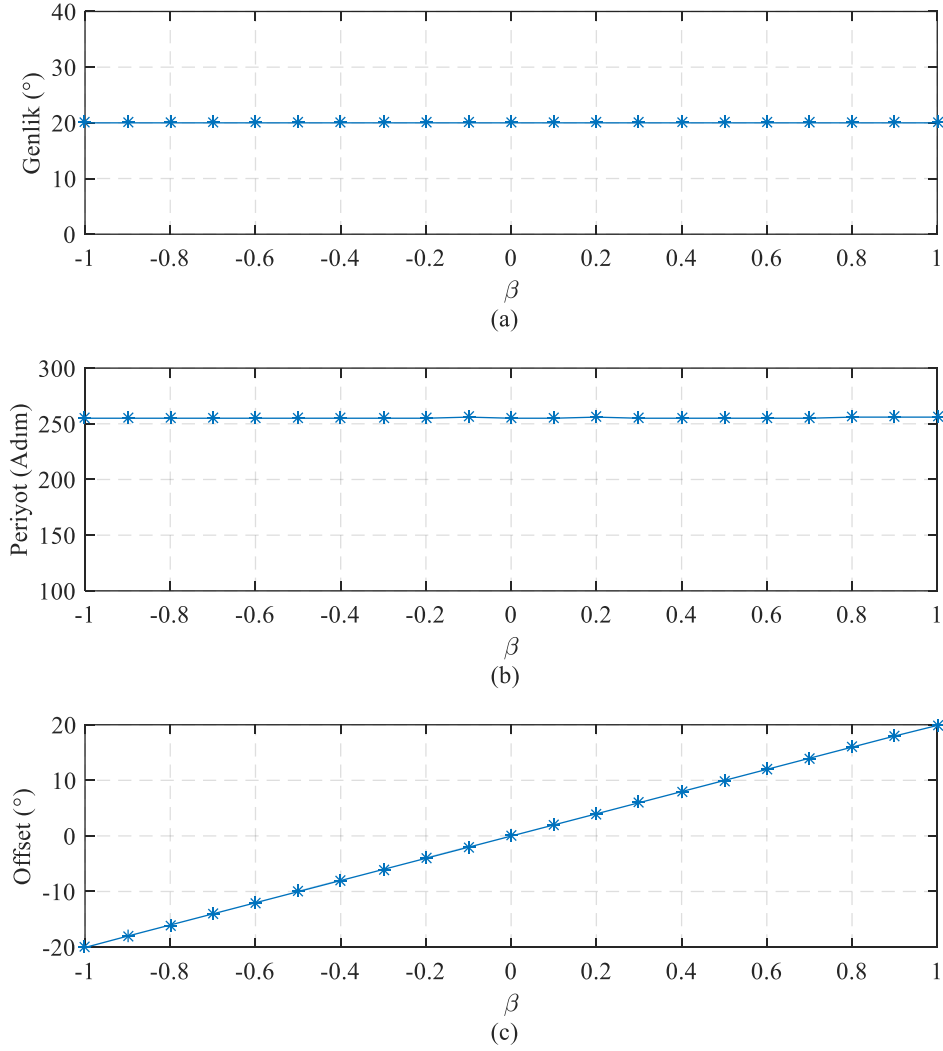
$$\%y_{BO} = \frac{y_{offset}}{A} 100 \quad (3.57)$$

Burada, y_{offset} osilatör çıkış genliğinin ofset değeridir. Şekil 3.30'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 3.31'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 eklenmiştir.



Şekil 3.30. β ve A 'nın değişimine göre bağlı ofset



Şekil 3.31. β 'nin genlik, periyot ve ofset değerlerine olan etkisi

Çıkış ofset değerlerinin gerçekleştirilen mekanik yapıya göre sınırlandırılması gerekir. Bu proje çalışmasına göre, mutlak β 'nin robot balık prototipinin çalışma uzayı içerisinde kalabilmesi için aşağıdaki ifade ile belirlenmesi gerekmektedir:

$$|\beta| \leq \frac{45^\circ - A}{A} \quad (3.58)$$

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

Şekil 3.32'de, τ , γ , β ve A sırasıyla 0.23, 0.2, 0 ve 20 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 0'dan 0.2'ye kadar artmasıyla osilatör çıkış genliği de 14°'den 20°'ye ulaşmaktadır. α 'nın diğer değerleri için ise genlik 20°'nin etrafında $\pm 0.5^\circ$ ile değişmektedir.

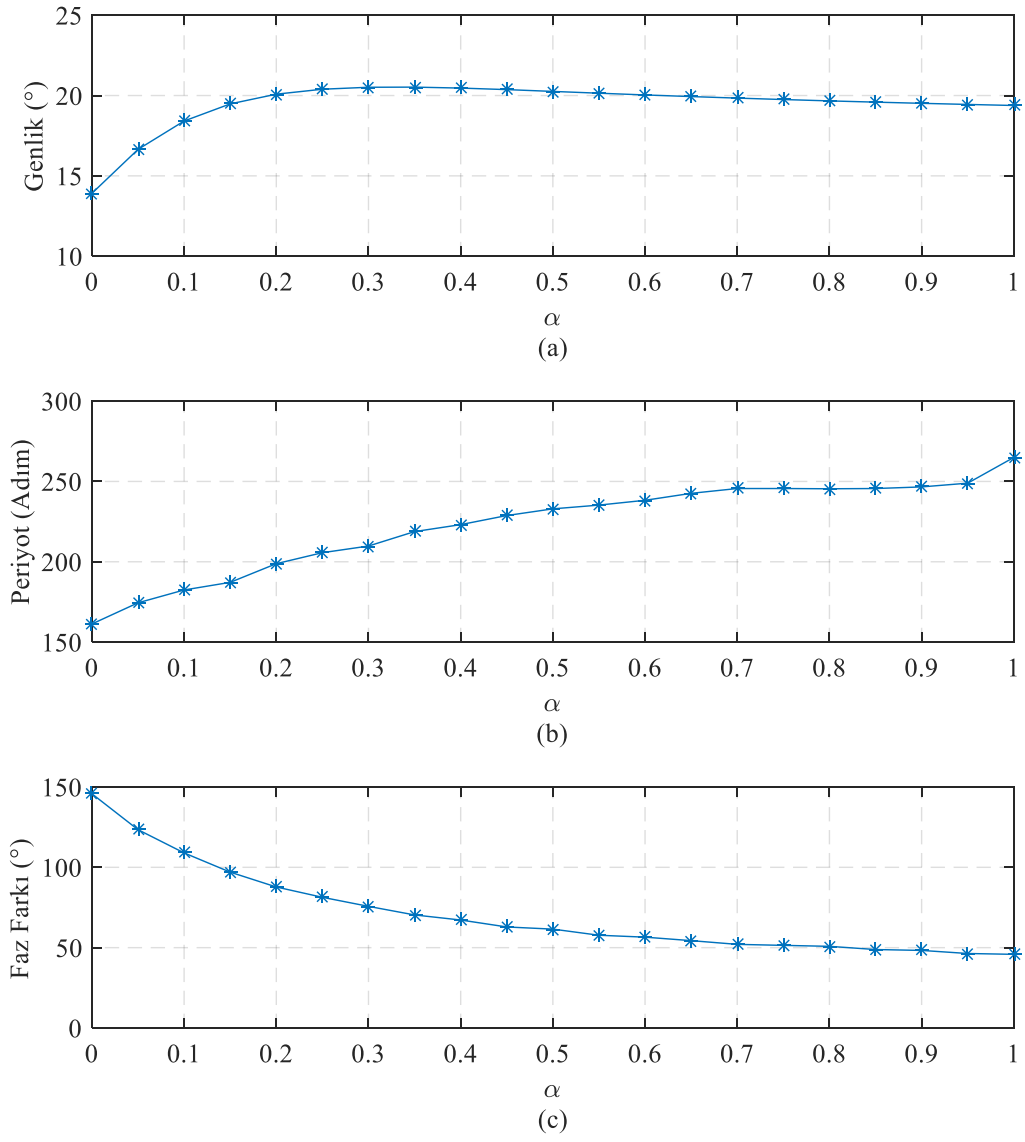
Şekil 3.33'de, A'ya bağlı genliğin α 'nın değişimine göre bozulduğu görülmektedir. Belirlenen aralıklarla ortaya çıkan genlik bir düzlem yerine eğimli bir yüzey oluşturmuştur. Bu bozucu etki altında kalan genlik $g_{osc}(A, \alpha)$ olarak isimlendirilir. α 'nın osilatör çıkış genliği üzerindeki etkisini 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 elde edilir:

$$K_A = \frac{g_{osc}(A, \alpha)}{A} \quad (3.59)$$

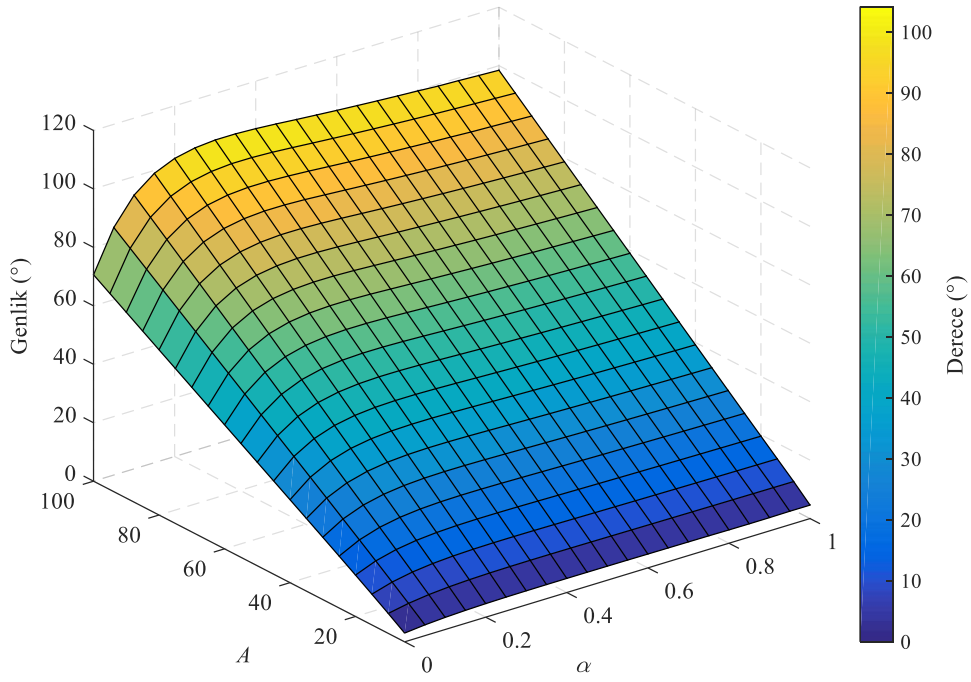
Şekil 3.34'te, Denklem (3.59) ile elde edilmiş K_A yüzeyi verilmiştir. Sonuç olarak, α etkisinden kurtulmuş genlik değerleri $g'_{osc}(A, \alpha)$ aşağıdaki gibi bulunur:

$$g'_{osc}(A, \alpha) = \frac{g_{osc}(A, \alpha)}{K_A} \quad (3.60)$$

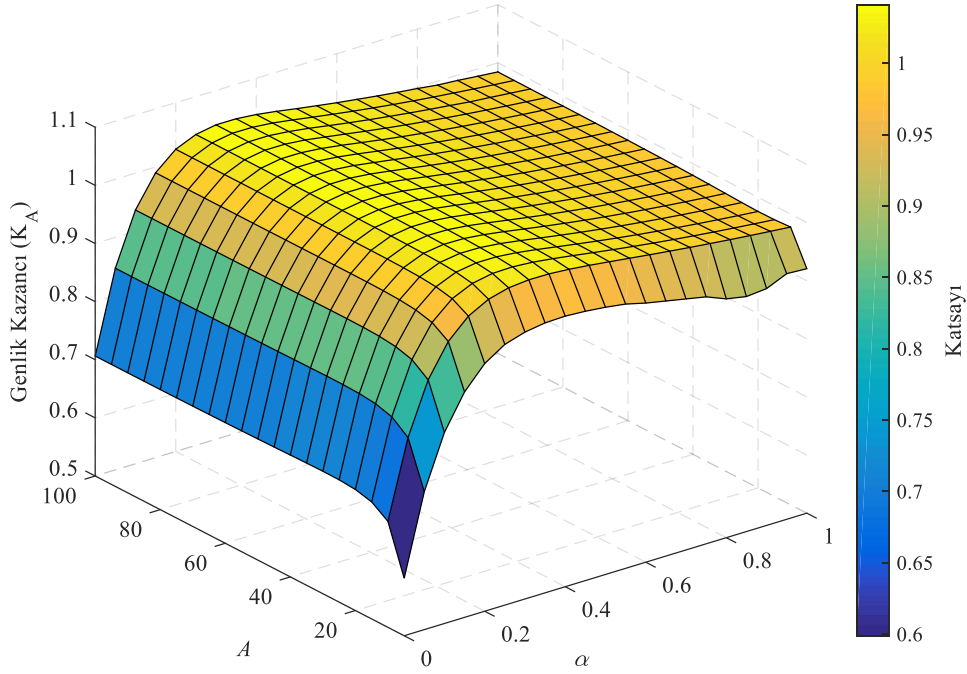
Böylece, α 'nın değişimi A'ya bağlı olan osilatör çıkış genliklerini etkilemeyecektir.



Şekil 3.32. α 'nın genlik, periyot ve faz farkına etkisi

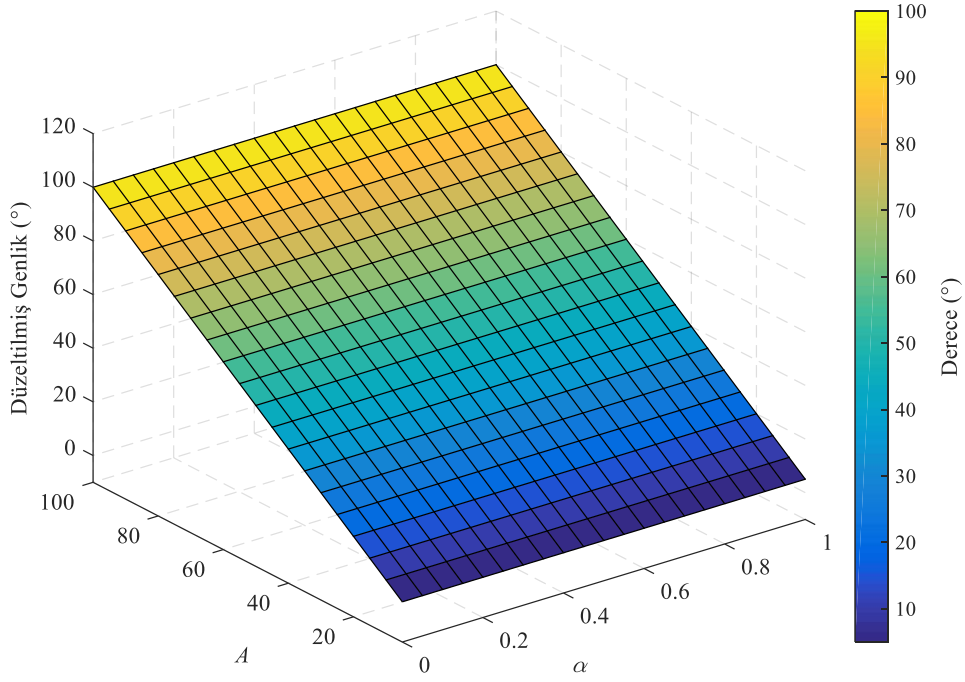


Şekil 3.33. Genliğin α ve A ile değişimi



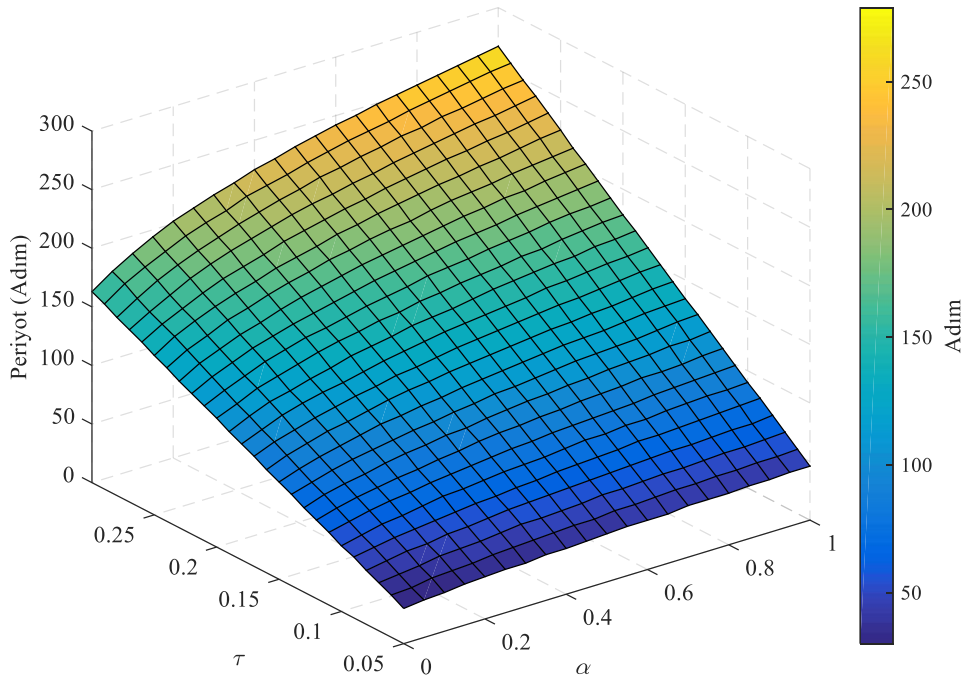
Şekil 3.34. Genlik kazancı

Düzeltilmiş genlik değerleri Şekil 3.35'te verilmiştir. Burada, genliğin sadece A'ya bağlı hale geldiği görülmektedir.



Şekil 3.35. Düzeltilmiş genlik

Benzer şekilde, α 'nın değişken aralığı boyunca periyotta hemen hemen doğrusal bir şekilde artmaktadır. Şekil 3.36'da, τ 'ya bağlı periyodun α 'nın değişimine göre bozulduğu ve eğimli bir yüzey oluşturduğu görülmektedir.



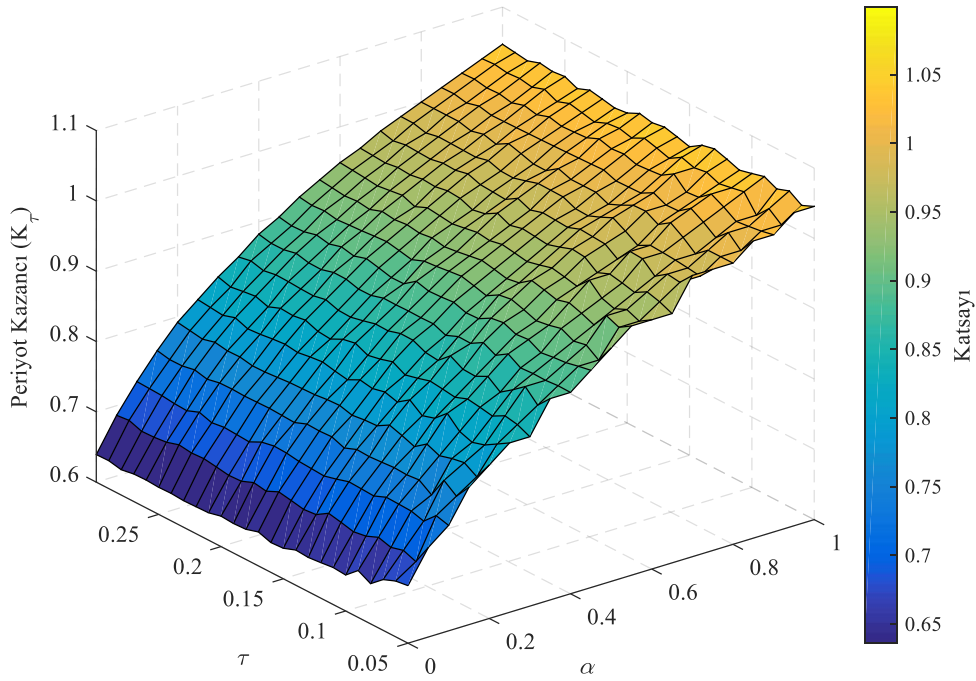
Şekil 3.36. Periyodun α ve τ ile değişimi

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

$$K_\tau = \frac{g_T(\tau, \alpha)}{T_{osc}} \quad (3.61)$$

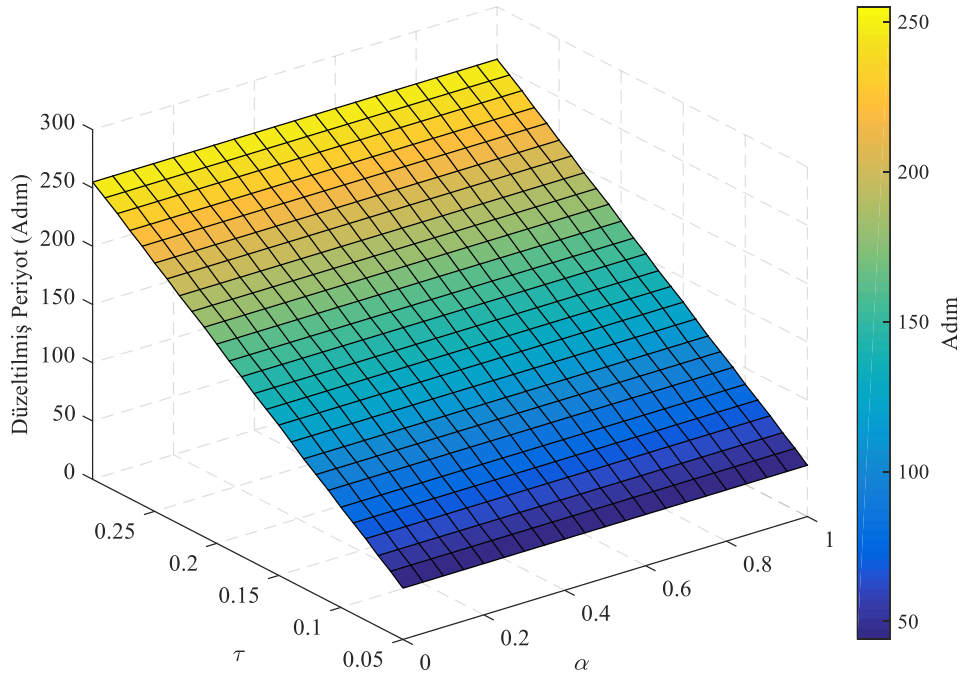
Şekil 3.37'de, Denklem (3.61) ile elde edilmiş K_τ yüzeyi verilmiştir. Sonuç olarak, α etkisinden kurtulmuş periyot değerleri $g'_T(\tau, \alpha)$ aşağıdaki gibi bulunur:

$$g'_T(\tau, \alpha) = \frac{g_T(\tau, \alpha)}{K_\tau} \quad (3.62)$$



Şekil 3.37. Periyot kazancı

Düzeltilmiş genlik değerleri Şekil 3.38'de verilmiştir. Burada, periyodun sadece τ 'ya bağlı hale geldiği görülmektedir. Böylece, α 'nın değişimi τ 'ya bağlı olan osilatör çıkış periyodunu etkilemeyecektir.



Şekil 3.38. Düzeltilmiş periyot

3.3 Bulanık Mantık Denetleyiciler

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 (BMD) tasarımı için denetlenecek sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duyulmaz. Bunun yerine, uzman bir kişi tarafından belirlenen dilsel ifadeler ve mantıksal ilişkiler ile denetim gerçekleştirilir. BMD'ler, insan sezgisine ve düşünce yapısına bağlı davranışlara benzer şekilde sistemin denetimini gerçekleştirirler. Bu bölümde, bulanık mantık kavramı ve BMD'lerin bileşenlerinden bahsedilecektir.

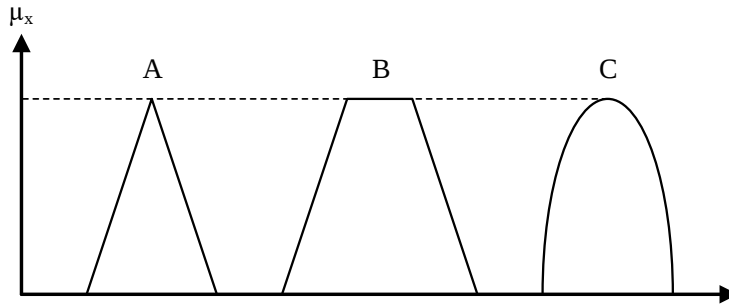
3.3.1 Bulanık Mantık ve Uygulama Alanları

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 (Zadeh, 1965). 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 (Özmen Koca, 2010; Bal, 2007; Wang vd., 1996).

Bulanık mantığın insan düşüncesine benzer bir yapıda olması ve karar verebilmesi geniş bir uygulama alanına sahip olmasını sağlamıştır (Özmen Koca, 2010; Wang vd., 1996).

Bulanık mantık; matematik, istatistik, borsa, ekonomi, bulanık karar verme ve tahmin, bulanık denetim ve yapay zeka gibi birçok araştırma alanında kullanılmaktadır. Özellikle matematik ve denetim alanlarının birbirinden bağımsız olmaması ile bulanık denetim oluşmuştur (Zadeh, 1965; Özmen Koca, 2010). 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 Japonya'daki metro sistemleri için geliştirdiği bulanık denetim sistemi ve 1990 yılından sonra çamaşır makineleri gibi günlük hayatta sıkça kullanılan elektronik sistemlere entegre edilmesi ile bulanık denetim yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Böylece, evimizdeki elektronik cihazlardan otomobillere kadar akıllı olarak isimlendirilen birçok teknolojik sistemde bulanık mantık kullanılmaktadır (Lilly, 2010).

Bulanık mantığın temeli bulanık kümeler dayanır. 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. Şekil 3.39.'da, sırasıyla üçgen, yamuk ve çan eğrisi gibi sıkça kullanılan üyelik fonksiyonları verilmiştir. Ancak gerek olması halinde başka tür üyelik fonksiyonları da kullanılabilir.

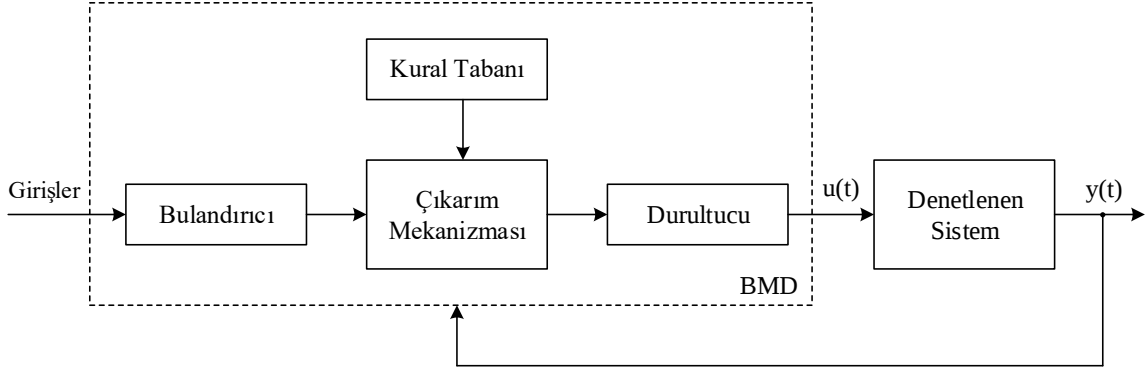


Şekil 3.39. Sıkça kullanılan üyelik fonksiyonları

Şekil 3.39.'da, bir x değişkeni için X uzayında tanımlı A bulanık kümesine ait üyelik fonksiyonu, $x \in X$ için $\mu_A(x)$ şeklinde tanımlanmaktadır.

3.3.2 Bulanık Mantık Denetleyiciler

Bir BMD yapısı bulandırıcı olan giriş birimi, kural tabanı, çıkarım mekanizması ve durultucu olan çıkış birimi olmak üzere dört temel bölümden oluşur. Bu bölümleri içeren BMD yapısı Şekil 3.40.'da verilmiştir.



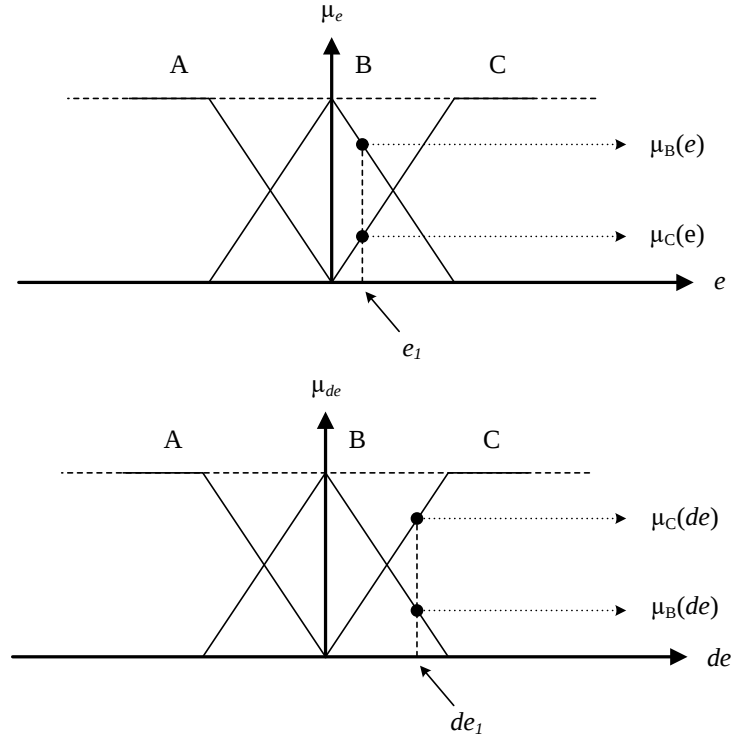
Şekil 3.40. BMD yapısı ve denetlenen sistem

Bir BMD'nin 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 BMD ile denetiminde sistemin uygun durum değişkenlerinden yararlanılarak sistemin giriş ve çıkışları belirlenir. Bir BMD'nin giriş değişkenleri için durum değişkenlerinin hataları, türevleri ve integralleri kullanılabilir.

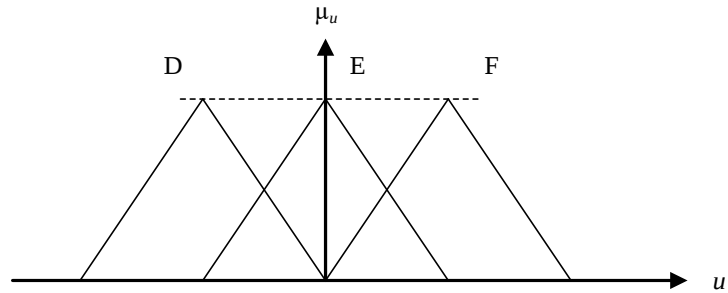
Bir bulanık denetleyicinin giriş birimi olan bulandırıcı, çıkarım mekanizmasında kullanılması için giriş değişkenlerinin ilgili bulanık kümelerdeki üyelik derecelerini hesaplar. Örnek olarak BMD'nin giriş değişkenleri istenilen çıkış değişkeninin hatası (e) ve hatanın türevi (de) olsun. Bu girişler için Şekil 3.41.'de verilen üçgen üyelik fonksiyonları ile tanımlanan A , B ve C bulanık kümelerin tanımlandığını varsayalım. Şekil 3.42.'de ise çıkış değişkenine ait üyelik fonksiyonları verilmiş olsun. Denetleyici girişlerinin (e , de) bu üçgen üyelik fonksiyonlarındaki üyelik dereceleri Tablo 3.4.'teki gibi olur:

Tablo 3.4. Örnek olarak verilen girişler için üyelik dereceleri ve üyelik fonksiyonları

Hata (e_1)		Hatanın türevi (de_1)	
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 3.41. Hata ve hatanın türevi için bulanıklaştırma işlemi



Şekil 3.42. Çıkış değişkenine ait üyelik fonksiyonları

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

Kural tabanı uzman kişiler tarafından denetlenen sistem hakkındaki IF-THEN şeklindeki dilsel ifadelerden oluşur. BMD'nin insan düşüncesine benzer şekilde çıkışlar üretmesi kural tabanı ile gerçekleşir. Kural tabanı oluşturulurken sisteme ait bütün ihtimaller dikkate alınmalıdır (Liu ve Hu 2006). Tablo 3.5.'de, örnek olarak verilen girişlere ait etkin kural tabanı verilmiştir. Verilen örnek için oluşacak bütün ihtimallerin sayısı dokuzdur. Bu ihtimaller aşağıda örnek olarak verilen IF-THEN yapılarından oluşur:

$$\text{IF } (e_1 \text{ is } B_e \text{ AND } de_1 \text{ is } C_{de}) \text{ THEN } (u \text{ is } D_u) \quad (3.63)$$

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

Tablo 3.5. Örnek olarak verilen girişler için etkin kurallar

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

Bulanık çıkarım mekanizma 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 ise 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 3.5.'de belirtilen dört kural için kuralların kesinlik dereceleri minimum operatörü kullanılarak aşağıda gibi elde edilir:

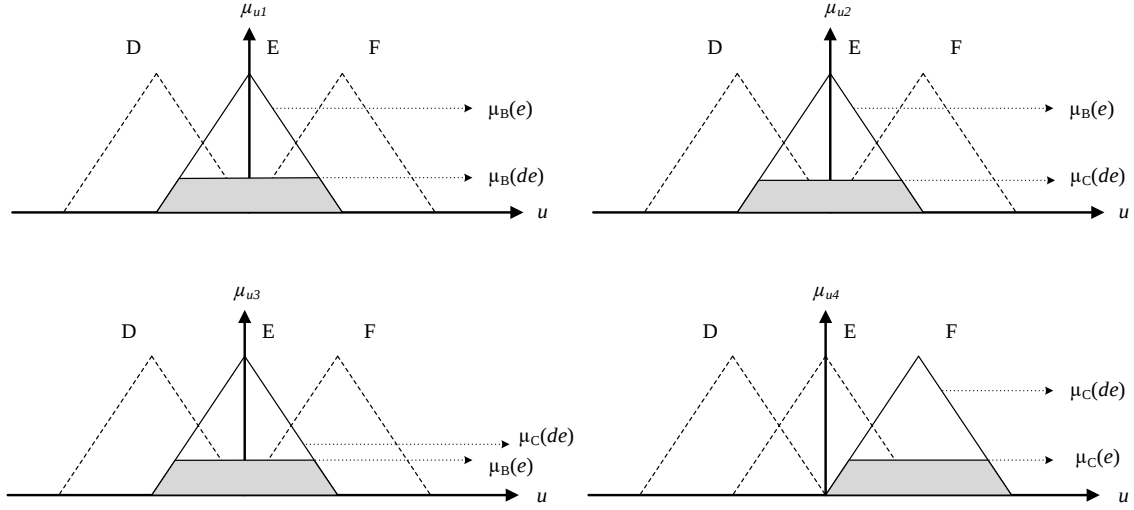
$$\text{IF } (e_1 \text{ is } B_e \text{ AND } de_1 \text{ is } B_{de}) \text{ THEN } (u \text{ is } E_u) \rightarrow \mu_{u1} = \min(\mu_B(e), \mu_B(de)) \quad (3.64.a)$$

$$\text{IF } (e_1 \text{ is } B_e \text{ AND } de_1 \text{ is } C_{de}) \text{ THEN } (u \text{ is } E_u) \rightarrow \mu_{u2} = \min(\mu_B(e), \mu_C(de)) \quad (3.64.b)$$

$$\text{IF } (e_1 \text{ is } C_e \text{ AND } de_1 \text{ is } B_{de}) \text{ THEN } (u \text{ is } E_u) \rightarrow \mu_{u3} = \min(\mu_C(e), \mu_B(de)) \quad (3.64.c)$$

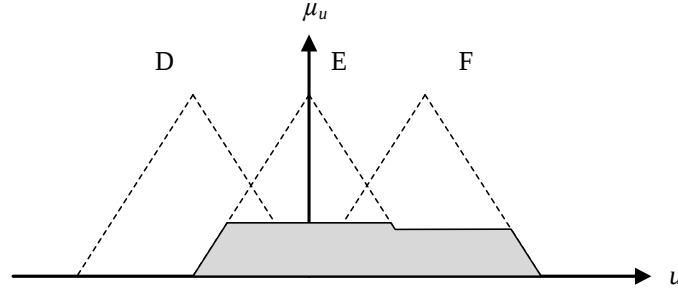
$$\text{IF } (e_1 \text{ is } C_e \text{ AND } de_1 \text{ is } C_{de}) \text{ THEN } (u \text{ is } F_u) \rightarrow \mu_{u4} = \min(\mu_C(e), \mu_C(de)) \quad (3.64.d)$$

Şekil 3.43.'te ise ilgili kuralların kesinlik derecelerini kullanarak ima işleminin minimum operatörü ile gerçekleştirilmesi verilmiştir.



Şekil 3.43. 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 3.44.'te verilmiştir.



Şekil 3.44. Toparlama işlemi sonucunda oluşan çıkış bulanık kümesi

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

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 işareti hesaplanır. Farklı durultma yöntemleri olmasına rağmen uygulamalarda en yaygın ağırlık merkezleri yöntemi kullanılır ve aşağıdaki gibi bulunur:

$$u^* = \frac{\int u \mu_{out}(u) du}{\int \mu_{out}(u) du} \quad (3.65)$$

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 işaretinin normalize edilmiş değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{ui} u_i}{\sum_{i=1}^n \mu_{ui}} \quad (3.66)$$

Burada μ_{ui} i . kuralın kesinlik derecesini, μ_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 verilir (Takagi ve Sugeno, 1993):

$$\text{IF } (x_1 \text{ is } A \text{ AND } x_2 \text{ is } B) \text{ THEN } u = f(x_1, x_2) \quad (3.67)$$

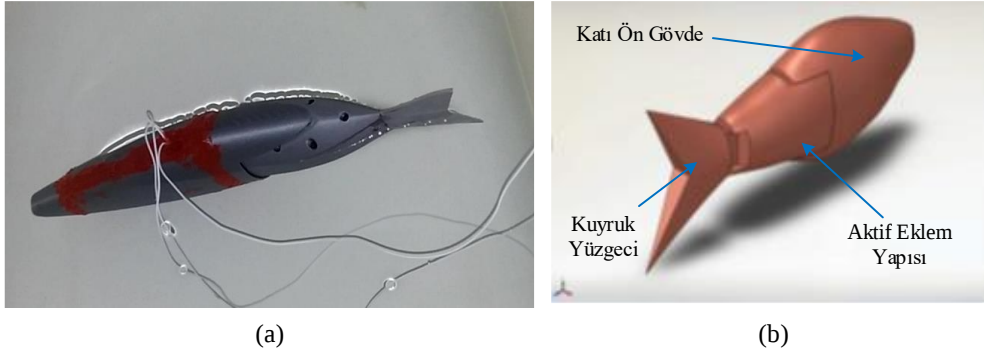
Bu denetleyicilerde durultucu birimine gerek yoktur ve çıkış doğrudan bir fonksiyon ile tanımlanır. Böylece, denetleyici çıkışı her kuralın oluşturacağı çıkışların ağırlıklı ortalaması bulunarak hesaplanabilir.

3.4 Carangiform Türü Biyomimetik Robot Balık Prototipinin Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi

“Üç Boyutlu Hareket Kabiliyetine Sahip Carangiform Türünde Bir Biyomimetik Robot Balığın Tasarımı ve Gerçekleşmesi” başlıklı ve 114E652 nolu TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında 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 anlatılmaktadır.

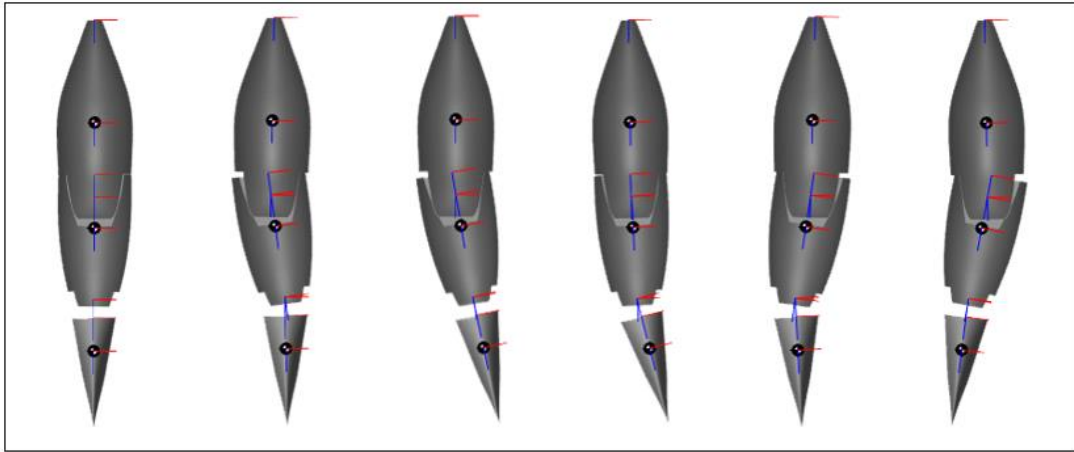
3.4.1 Tek Eklemlili Robot Balık Prototipi

114E652 nolu TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında, çalışma ekibi tarafından, projenin birinci döneminde tek eklemlili Carangiform türü biyomimetik bir robot balığın prototipi oluşturulmuştur. Yapılan bu çalışma Şekil 3.45.’te verilmektedir.



Şekil 3.45. (a) Tek eklemli robot balık prototipi, (b) Katı model görüntüsü (Akpolat vd., 2017).

Şekil 3.46.'da ise robot balık prototipine ait yüzüş hareketlerinin görüntüsü verilmektedir.



Şekil 3.46. Tek eklemli robot balığın kuyruk hareketleri

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

3.4.2 İki Eklemli 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 tespit edilir.

Balıkların birçoğu itici tahrik kuvvetini vücutlarını bükerek oluşan ve burundan başlayarak kuyruğa doğru genliği giderek artan yanal dalgalanma hareketi ile sağlarlar. Bu yüzüş şekli BCF yüzme türüne 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 (Suebsaiprom ve Lin, 2015, 2016; Suebsaiprom vd., 2017; Colgate ve Lynch 2004; Yu vd., 2005; Sfakiotakis vd., 1999). En çok görülen BCF türü Carangiform yüzücüler dalgalı yüzme hareketleri, yüksek hız performansı, düşük gürültü, hızlı ivmelenme ve ani dönüş yeteneği gibi önemli özelliklere sahiplerdir (Scaradozzi vd., 2017). Bu önemli özellikler ve doğada var olan birçok balığın bu yüzme türünde hareket edebilmesi insansız sualtı robotu olan robot balık tasarımı için Carangiform türü balıkları oldukça uygun ilham kaynağı haline getirir (Liu ve Hu, 2006).

Bu bölümün devamında, yazarın dahil olduğu çalışma ekibi tarafından 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.

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

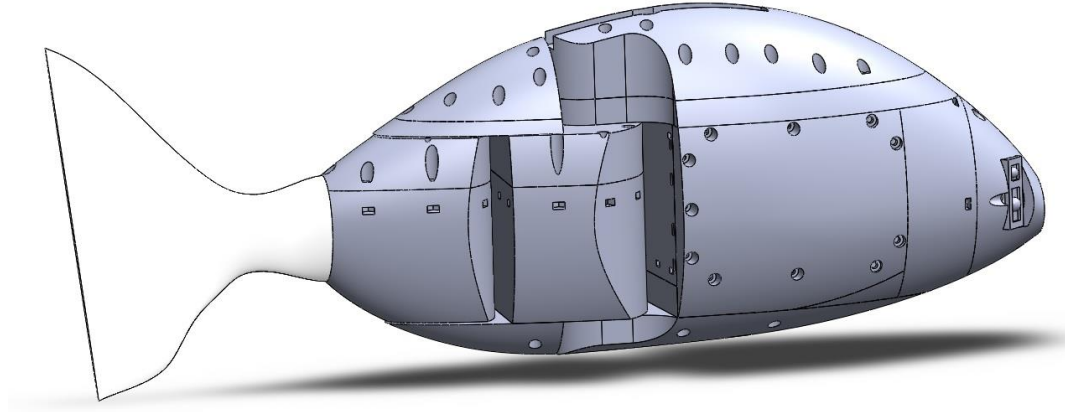
- Robot balığın Carangiform türü balıklardan esinlenilerek biyomimetik bir tasarıma sahip olması ve gerçek bir balığın yüzme hareketlerini taklit ederek yüzebilmesi gerekir.
- Robot balığın gövde yapısının hidrodinamik sürtünme kuvvetini azaltacak şekilde tasarlanması ve her bileşenin dış yüzeyinin suyun 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, Merkezi Örüntü Üretici ve Bulanık Mantık yaklaşımlarını kullanan karmaşık denetim algoritmalarını gerçekleştirecek bir biyomimetik denetleyici yapısına sahip olmalıdır.

- Robot balığın su içerisinde engellerden sakınarak otonom bir şekilde yüzebilmesi gerekmektedir.

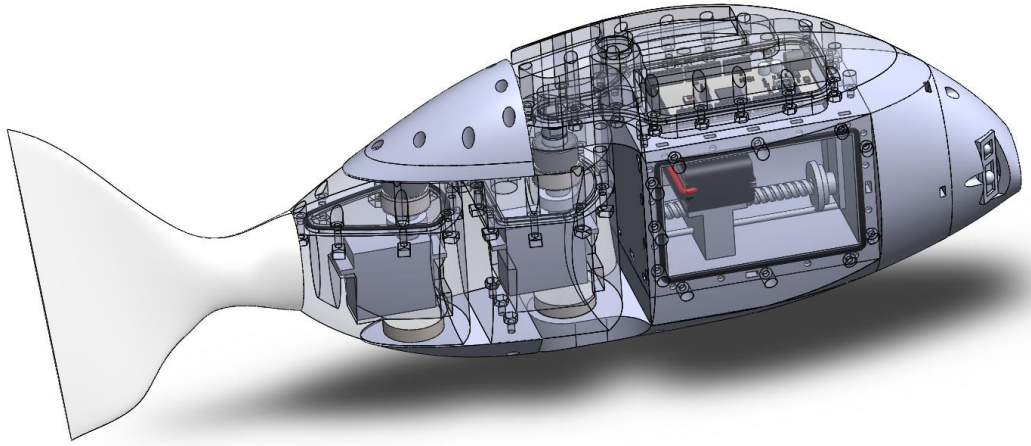
Bu proje çalışmasında, iki eklemlili kuyruk mekanizmasına sahip, BCF tür yüzmeye hareketleri ile otonom bir şekilde üç boyutlu olarak yüzeabilen, Carangiform türü, biyomimetik bir robot balık prototipi geliştirilmiştir. Robot balık prototipi, baş kısmı olarak isimlendirilen sert bir ön gövde ve iki eklemlili 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 yüzmeye hareketlerini sağlayan ağırlık merkezi denetim mekanizması bulunmaktadır. İki eklemlili kuyruk mekanizması robot balığın esnek kuyruk yapısını oluşturmaktadır. Birbirine seri bir zincir yapısı şeklinde bağlı olan eklemliler 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 kenetlenmiştir. Robot balığın mümkün olduğunca çok sayıda eklem yapısına sahip olması, gerçek balık hareketlerinin daha kolay elde edilebilmesini sağlar. Ancak, geliştirilen iki eklemlili 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 yapılmıştır. Ayrıca, robot balığa ait her bir bileşen ve montaj yapısı Şekil 3.47.'de verilen Carangiform türü gerçek bir sazan balığının biyolojik yapısı dikkate alınarak tasarlanmıştır. Şekil 3.48.'de ise geliştirilen robot balık prototipinin mekanik yapısı verilmiştir.



Şekil 3.47. Carangiform türü bir koi sazan balığı



(a)



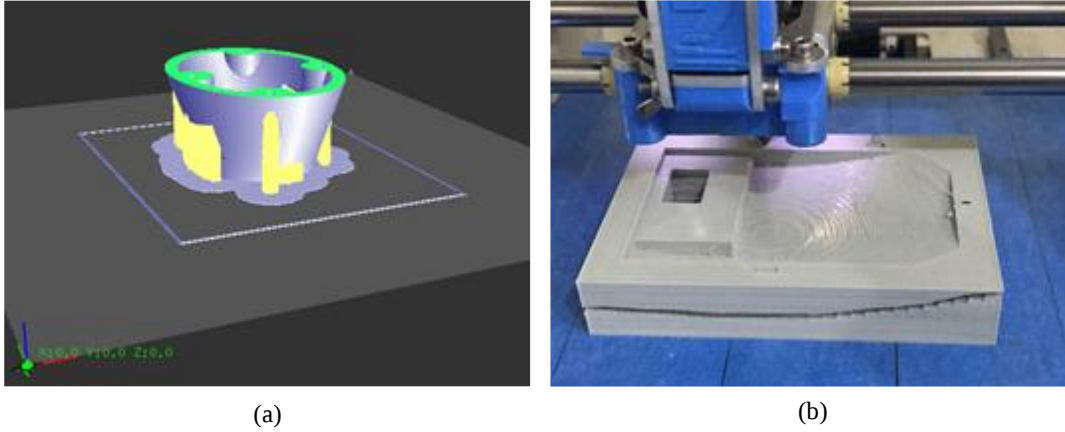
(b)

Şekil 3.48. (a) Tasarlanan robot balık prototipi, (b) prototipin iç yapısı

Robot balığın tüm bileşenleri birbiriyle orantılı ölçülerde tasarlanmıştır 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 3.49.a'da gösterildiği gibi katman, baskı ve destek noktası ayarları yapılmıştır. Tasarım aşaması tamamlanan bileşen modelleri G koduna dönüştürülerek, 3B baskı teknolojisi ile Zmorph 3B yazıcıda 1.75mm çapında Polilaktik Asit Termoplastik Polyester (PLA) olan biyoplastik kullanılarak üretilmiştir. Üretim aşamasına ait görüntü Şekil 3.49.b'de verilmektedir. Robot balığın esnek kuyruk yüzgeci ise PLA'dan farklı olarak oda sıcaklığında donan (Room Temperature Vulcanizing, RTV-2) özeliğinde beyaz renkli kalıp silikonu kullanılarak üretilmiştir.

3B 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 anında 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 cıvata ve somunlar kullanılmıştır. Ayrıca, cıvata yataklarında meydana gelebilecek su sızıntılarını önlemek için bu yatak boşlukları sızdırmazlık macunu ile kaplanmıştır. Üretim ve montaj sırasında oluşabilecek kılcal çatlak ve boşluklardan kaynaklanan su sızıntılarını önlemek için prototipin dış yüzeyi montaj tamamlandıktan sonra sentetik sprej boya ile boyanmıştır.

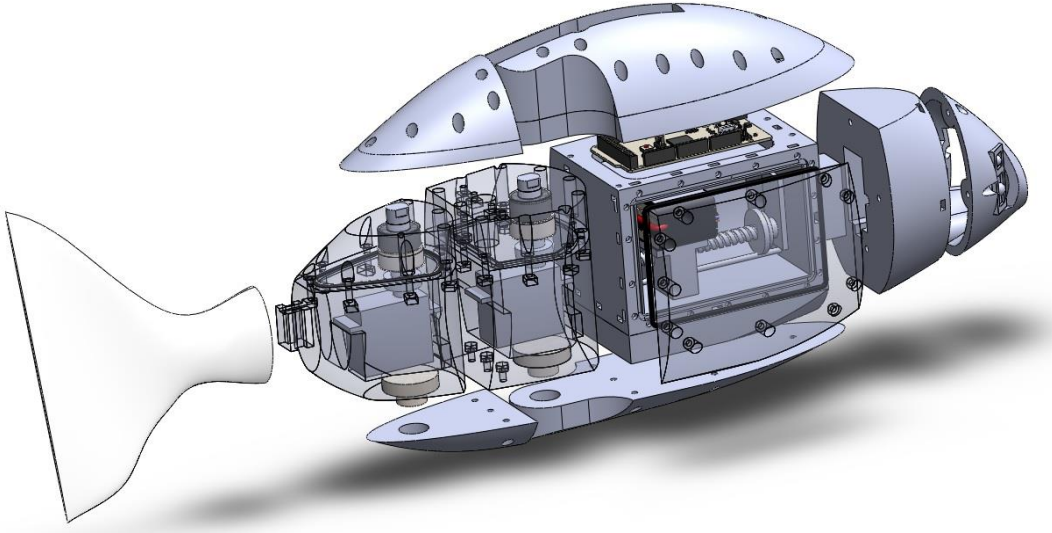


Şekil 3.49. (a) Voxelizer ortamında katı modellerin işlenmesi, (b) Bileşenlerin 3B baskı teknolojisi ile üretimi

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 yüzebilme 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 veri yolu (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 ataletsel ölçü birimi (Inertial Measurement Unit, IMU) olan Prop Shield 10-DoF IMU hareket sensörü bulunmaktadır. Tahrik kuvvetlerini sağlayan servo motorların ve elektronik denetim sisteminin enerjisi için 7.4V, 25C, 1350mAh

Lityum Polimer 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 3.50.'de verilmiştir. Prototipin sert ön gövdesi ana terminal bölümü, elektronik denetim sisteminin bulunduğu üst terminal bölümü, iki eklemlili kuyruk mekanizmasının birinci eklem alt milinin yatakladığı alt birinci eklem yatağı terminal bölümü, ağırlık merkezi denetim mekanizmasının tahrik kuvvetini sağlayan servo motorun yatakladığı 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 ise aynı zamanda birinci eklemin üst eklem yatağı olarak da kullanılmaktadır.

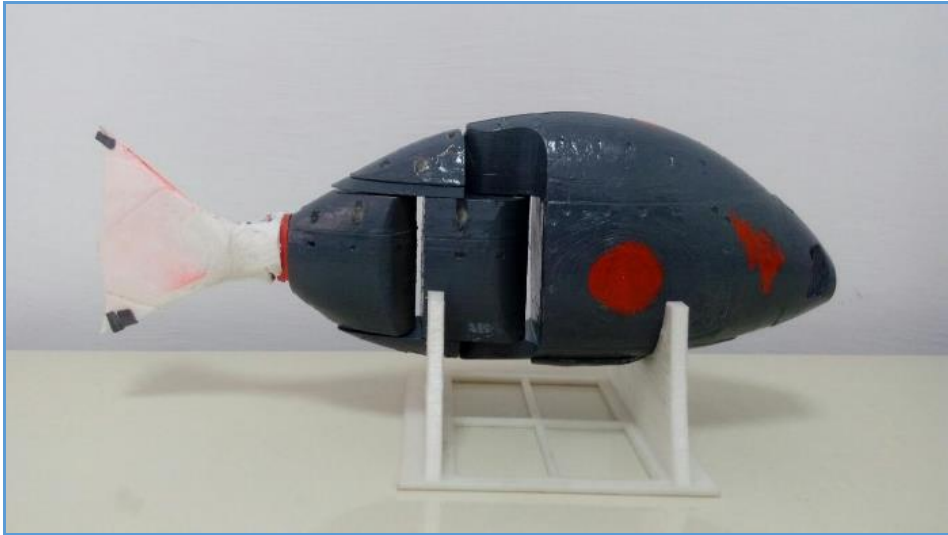


Şekil 3.50. Robot balık prototipinin bileşenleri

Robot balığın esnek kuyruk yapısı iki eklemlili kuyruk mekanizması ve esnek kuyruk yüzgecinden oluşmaktadır ve robot balığın itici tahrik kuvvetini üretir. Her eklemden birer adet Doğru Akım (DA) motorundan oluşan ve robotik uygulamalarında kullanılmak üzere geliştirilen (Radio Control, RC) Hitec RC servo motor kullanılmıştır. Bu motorlar eklem motor yataklarına sabitlenmiştir. Esnek kuyruk yüzgeci ise ikinci eklem motor yatağına sabitlenmiştir. Tablo 3.6.'de, geliştirilen robot balık prototipinin teknik özellikleri verilmektedir. Robot balığa ait fotoğraf görüntüsü ise Şekil 3.51.'de verilmiştir.

Tablo 3.6. Robot balık prototipinin teknik özellikleri

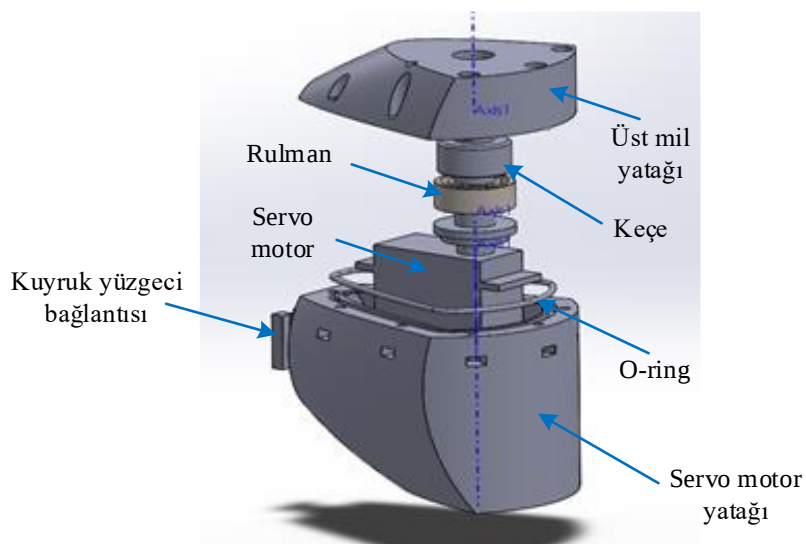
Parametreler	Özellikler
Uzunluk	~ 500mm
Genişlik	~ 76mm
Yükseklik	~ 215mm
Toplam kütle	~ 3.1kg
Eklem adedi	2
Üretim malzemesi	PLA
Üretim teknolojisi	3B baskı
Eklem yapısı	Servo motor (29kg.cm, 7.4V)
Sızdırmazlık malzemeleri	O-ring Gres yağı Epoksi reçine Sızdırmazlık macunu Sıvı conta Kauçuk conta Keçe Sentetik spreyci boya
Ağırlık merkezi tahrik sistemi	Tam tur servo motor (12kg.cm, 7.4V)
Ağırlık merkezi denetim mekanizması	Vidalı mil-somun, kurşun
Sensörler	10-DoF IMU Kızılötesi mesafe sensörü
Batarya	Lityum Polimer 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 3.51. 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.

Robot balığın su içerisindeki hareketi için gerekli tahrik kuvveti, iki eklemlili kuyruk mekanizması ile sağlanmaktadır. Her eklem birer adet servo motor, servo motor yatağı ve üst mil yatağı olmak üzere üç temel bileşenden oluşturulmuştur. Şekil 3.52.'de, ikinci eklem için tasarlanan mekanik yapı verilmektedir.



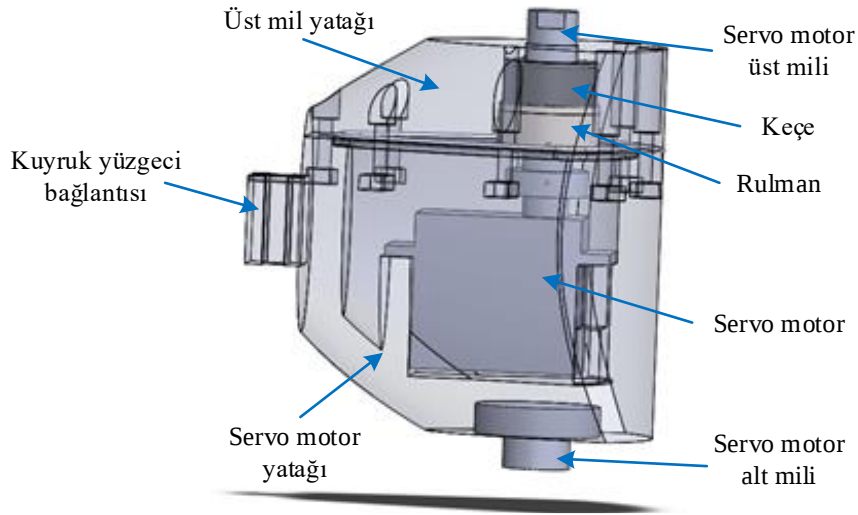
Şekil 3.52. İkinci eklemin mekaniksel yapısı

Eklemlerin tahrik kuvvetini üretmesi için iki adet 7.4V Hitec D954SW servo motor kullanılmıştır. Her servo motor, motor yatağına 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 sızdırmazlığının 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.

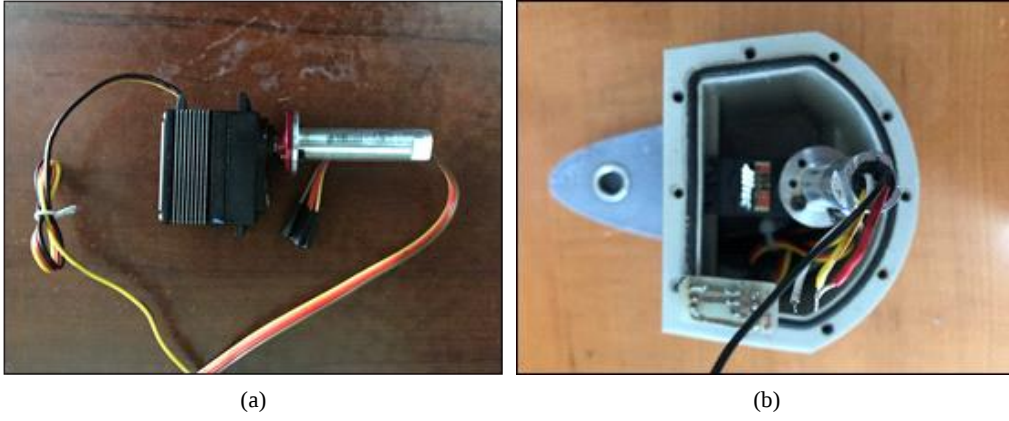
Servo motor yatağı ile üst mil yatağının su sızdırmazlık özelliğini sağlayacak şekilde montajlanması gerekmektedir. Bunun için servo motor yataklarında bulunan civata yataklarından sonra O-ring kanalları tasarlanmış ve bu kanallara gres yağı ile birlikte O-ring'ler yerleştirilmiştir. Sızdırmazlık özelliğinin 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 3.53.'te, ikinci eklemin tamamlanmış montaj yapısı gösterilmektedir.



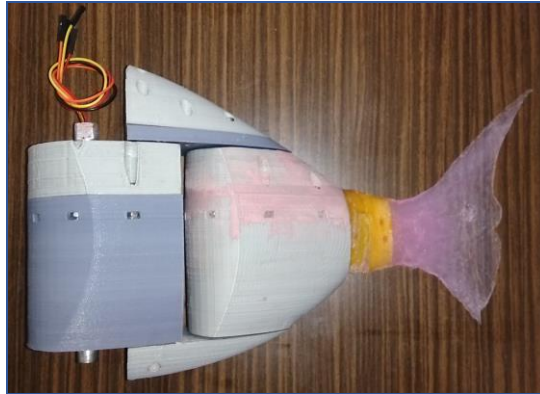
Şekil 3.53. İkinci eklemin montaj yapısı

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 3.54.'te, birinci eklemin servo motor üst mili ve motor yatağı montaj görüntüleri verilmektedir.



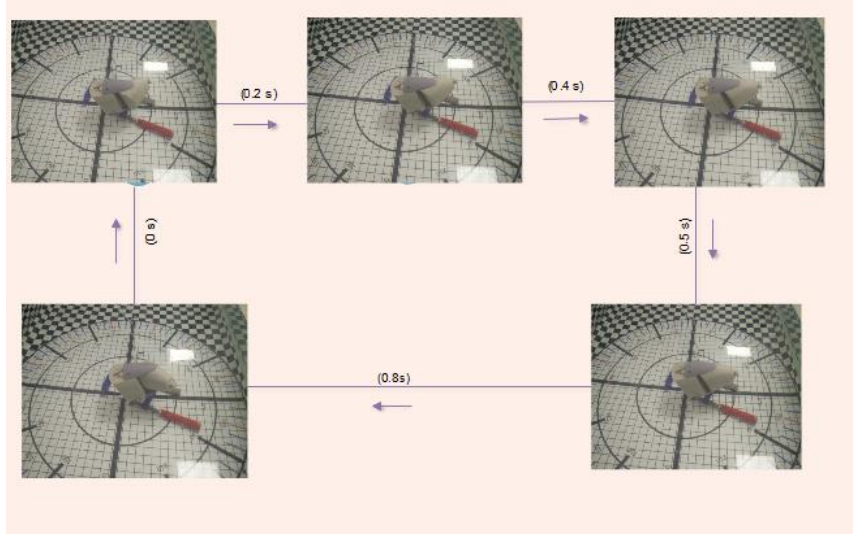
Şekil 3.54. Birinci eklemin montajı: (a) Tasarlanan servo motor üst milinin montajı, (b) Motor yatağı montaj görünümü

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 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 3.55.'te gösterilmektedir.



Şekil 3.55. İki eklemlilik kuyruk mekanizması

İki eklemlilik kuyruk mekanizmasında, yukarıda bahsedilen montaj ve sızdırmazlık aşamalarının başarılı bir şekilde tamamlandığını sınamak için bu mekanizma Şekil 3.56.'da 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 3.56. İki eklemlili kuyruk mekanizmasının su içerisindeki çalışma döngüsü

İki eklemlili kuyruk mekanizmasının esnek kuyruk yüzgecini üretmek için 3B baskı teknolojisi ile Şekil 3.57.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 3.57.b'de verilen esnek kuyruk yüzgeci üretilmiştir.



Şekil 3.57. (a) Esnek kuyruk yüzgecinin kalıp silikonu ile üretimi, (b) Esnek kuyruk yüzgeci

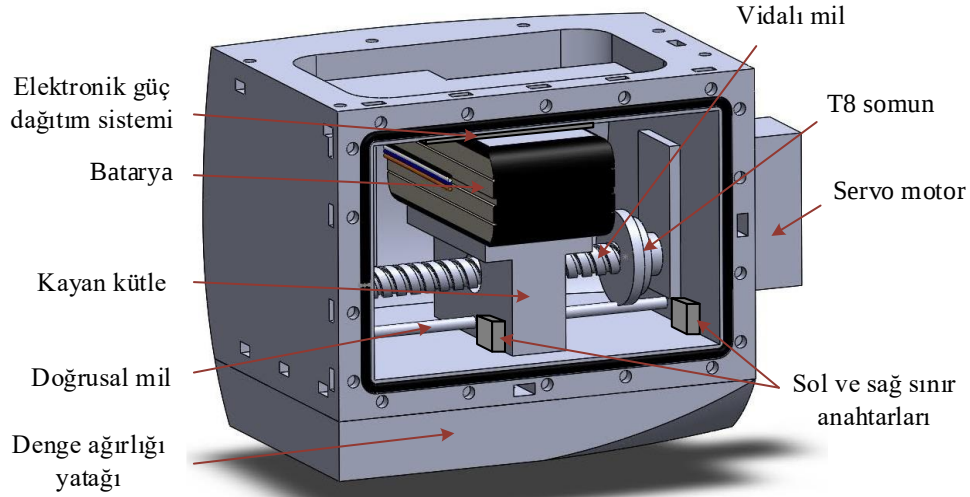
Böylece, aşağıdaki sinüzoidal eklem açılarının elde edilebilmesi için gerekli mekanik yapı tamamlanmıştır.

$$\theta_1(t) = A_1 \sin(2\pi ft \pm \Delta_1) \quad (3.68)$$

$$\theta_2(t) = A_2 \sin(2\pi ft \pm \Delta_2) \quad (3.69)$$

Burada A_1 ve A_2 birinci ve ikinci eklem açılarının genlik değerlerini, f kuyruğun çarpınma frekansını, Δ_1 ve Δ_2 ise birinci ve ikinci eklem açılarının birbirlerine göre olan faz farklarını tanımlamaktadır.

Robot balığın su içerisindeki üç boyutlu hareketlerinin gerçekleştirilebilmesi için tasarlanan ağırlık merkezi denetim mekanizmasının mekaniksel yapısı Şekil 3.58.'de verilmektedir.

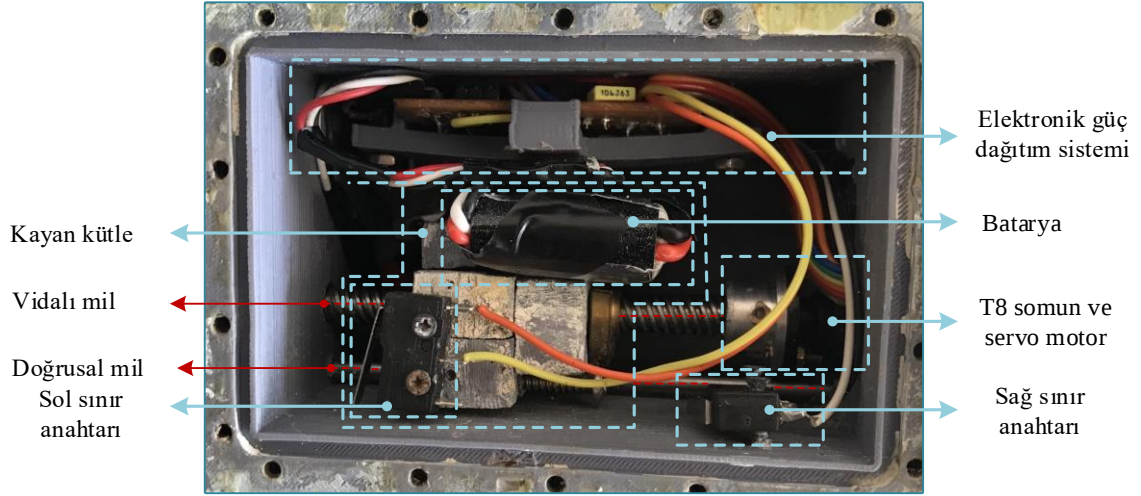


Şekil 3.58. Ağırlık merkezi denetim mekanizmasının mekaniksel yapısı

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 hareketlerin robot balık tarafından yapılabilmesini sağlamaktadır. Tasarlanan bu mekanizma temel olarak x ekseninde hareket eden bir kütle, bu kütle için mekanik bileşenleri ve bir RC servo motordan oluşmaktadır. 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 PowerHD AR3603HB tam tur 4.8V RC servo motor kullanılmış 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 dönüşmektedir. Tablanın hareketi anında oluşabilecek yalpalanma hareketlerini önlemek için vidalı mil ile aynı doğrultuda sabit bir doğrusal mil kullanılmıştır.

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 tersi 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 3.59.'da, robot balığın ana terminal bölümü ve içerisinde bulunan ağırlık merkezi denetim mekanizması verilmiştir.



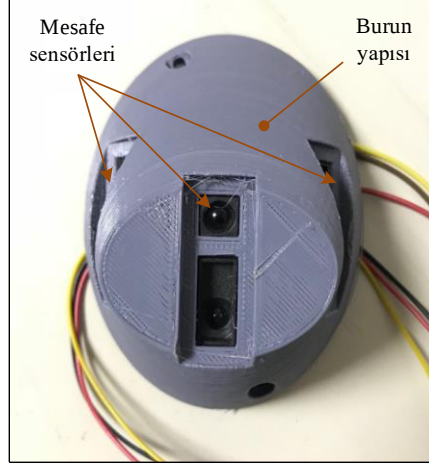
Şekil 3.59. Geliştirilen ağırlık merkezi denetim mekanizmasının görünümü

Ana terminal bölümünün üstünde ise elektronik denetim sisteminin yerleştirildiği ve birinci eklem üst milinin yatakladığı üst terminal parçası bulunmaktadır. Üst terminal ile ana terminal arasında, elektronik kablo bağlantılarının aktarılması bir kablo kanalı oluşturulmuştur. Bu iki parça arasındaki sızdırmazlığın sağlanması için birleşim yüzeyleri sıvı conta ile kaplanmıştır. Ana terminal bölümünün sızdırmazlığını sağlamak için cıvata 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 sağlanır ve yalpalanma hareketleri 0° civarında olur. Ayrıca robot balık prototipi, özkütlesi suyun özkütlesi olan 1000kg/m^3 'e oldukça yakın olacak şekilde 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 sağlanmaktadır. Denklem (3.70)'de, robot balık hacminin istenilen özkütleyle göre belirlenmesi için gerekli ifade verilmiştir.

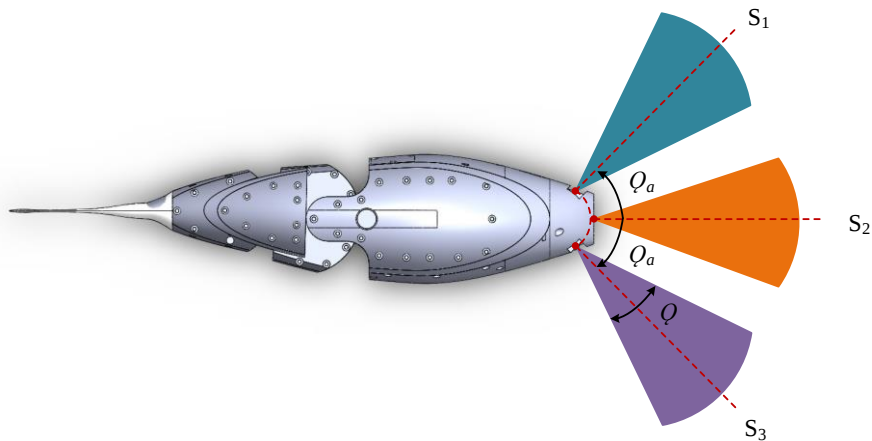
$$\Delta_f \cong m/\rho \rightarrow 998 \leq \rho < 1000 \quad (3.70)$$

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 3.60.'ta verilen robot balığın burun yapısı sol, sağ ve ön bölüm olmak üzere üç görüş mesafesine ayrılmıştır. Her bölümde bir adet Sharp GP2Y0A21YK0F kızılötesi mesafe sensörü kullanılmaktadır.



Şekil 3.60. Robot balığın tasarlanan burun yapısı

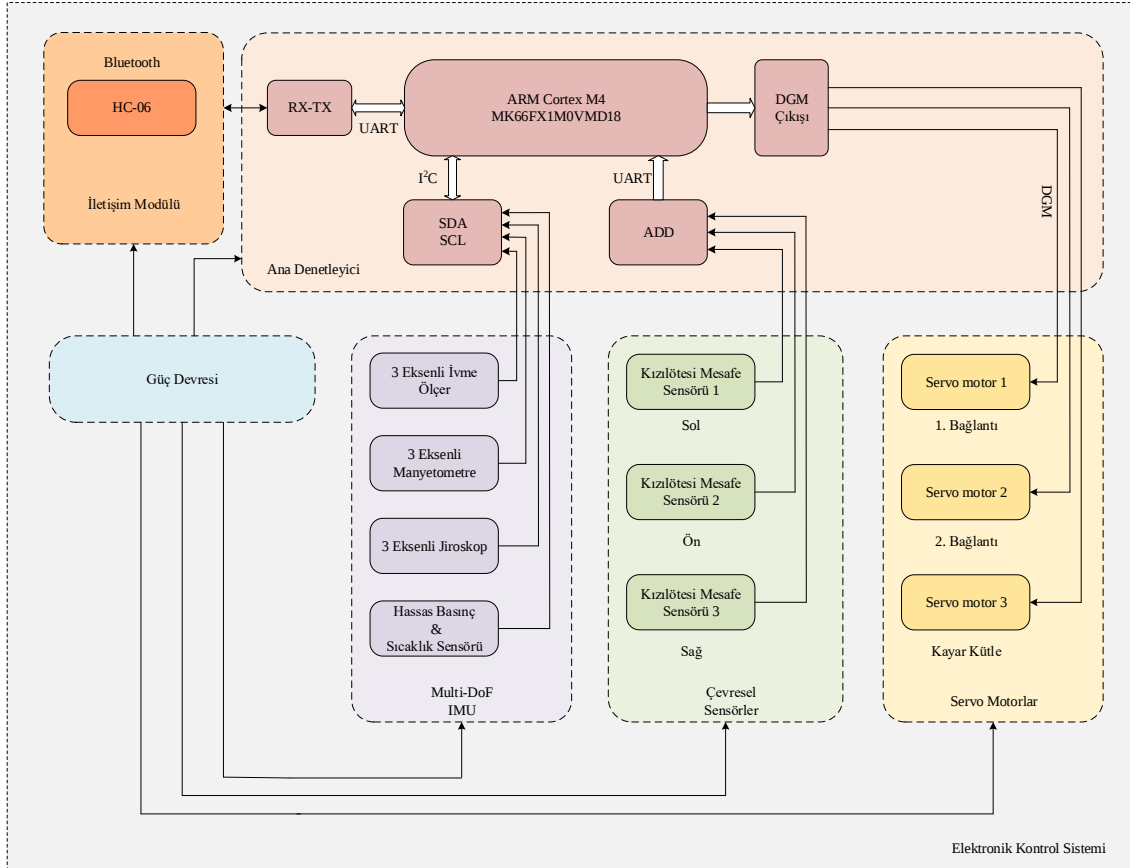
S_1 , S_2 ve S_3 sırasıyla sol, ön ve sağ bölümdeki mesafe sensörleri olmak üzere her sensörün doğrusal ölçüm aralığı 6-80cm'dir. Robot balık prototipinin deneysel çalışmalarda kabul edilebilir aralıklarda engelleri belirleyebilmesi için bu sensörlerin ölçüm aralığı 6-60cm olarak belirlenmiştir. Ön sensörün 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 3.61.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.61. Mesafe sensörlerinin görüş açıları

Burada Q bir sensörün görüş mesafesindeki engel algılama açısıdır ve robot balık prototipindeki mesafe sensörleri için 40°'dir.

Blok diyagramı Şekil 3.62.'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.



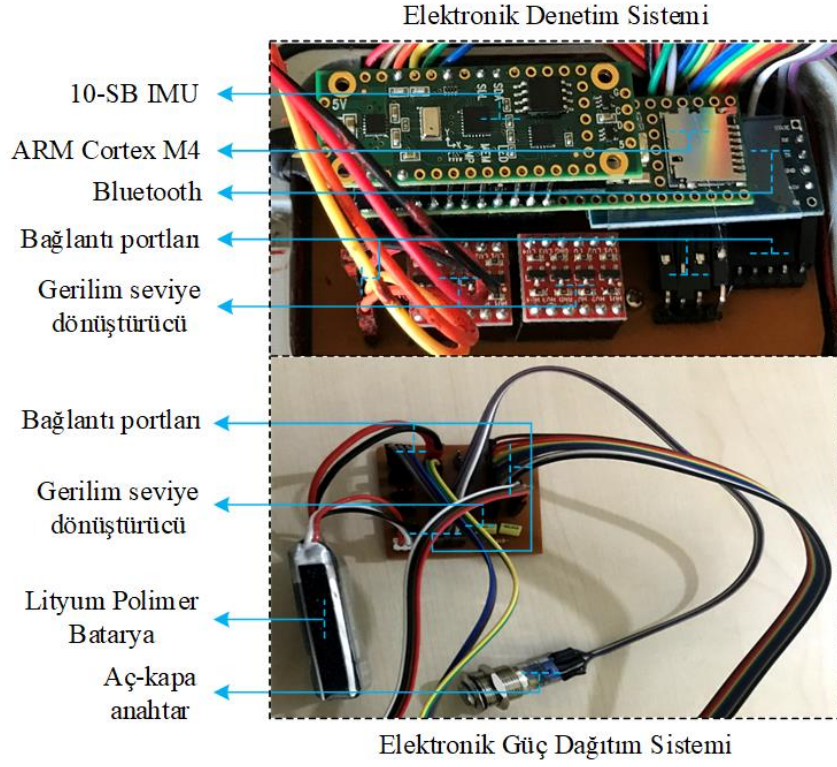
Şekil 3.62. Elektronik sistemin blok diyagramı

Robot balığın elektriksel enerjisi için 7.4V 1350mAh Lityum Polimer (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 elemanların uygun gerilim değerlerine göre ayarlayan bir güç dağıtım devresi tasarlanmıştır. Güç dağıtım devresinde, bataryanın 7.4V gerilim seviyesi mantıksal gerilim seviye dönüştürücüler ile gerekli 3.3V ve 5V değerlerine dönüştürülmektedir. Ayrıca aç-kapa anahtar, 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 kısa mesafe radyo frekansı teknolojisine sahip Bluetooth 2.0 HC-06 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 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 mikrodenetleyiciden gelen Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) bağlantı çıkışları aracılığıyla sürülmektedir.

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

Kullanılan mikrodenetleyici kartı sensörlerden alınan verileri değerlendirerek prototipin ritmik hareketlerini akıllı denetim algoritmasıyla gerçekleştirir ve bu hareketlerin eşzamanlı olarak sürekliliğini sağlamaktadır. Mikrodenetleyici kartı üzerinde bir adet 32bit 180MHz ARM Cortex M4 MK66FX1M0VMD18 mikrodenetleyici bulunmaktadır. Dahili hafıza olarak 1Mb flaş bellek, 256Kb RAM ve 4Kb EEPROM'a sahiptir. Şekil 3.63.'de, elektronik denetim ve güç dağıtım devre kartlarını içeren robot balığın yerleşik elektronik sistemi verilmiştir.



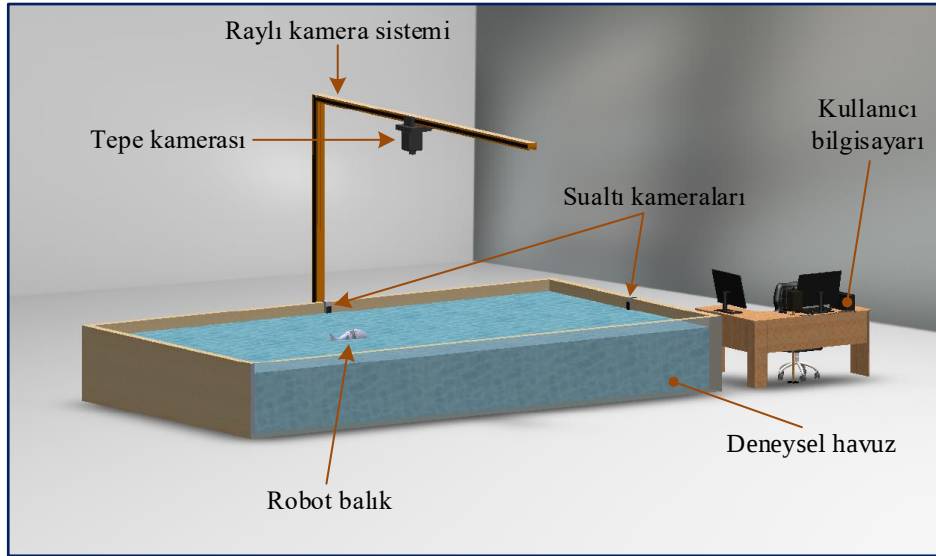
Şekil 3.63. Robot balığın tasarlanan elektronik sistemi

Geliştirilen robot balık prototipi hem otonom bir şekilde yüzebilmektedir hem de kullanıcı bilgisayarı tarafından gönderilen kablosuz bilgileri işleyebilmektedir. Ayrıca, su yüzeyine yakın yerlerde sensörlerin verileri eşzamanlı olarak kullanıcı bilgisayarına kablosuz haberleşme ile aktarılabilir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

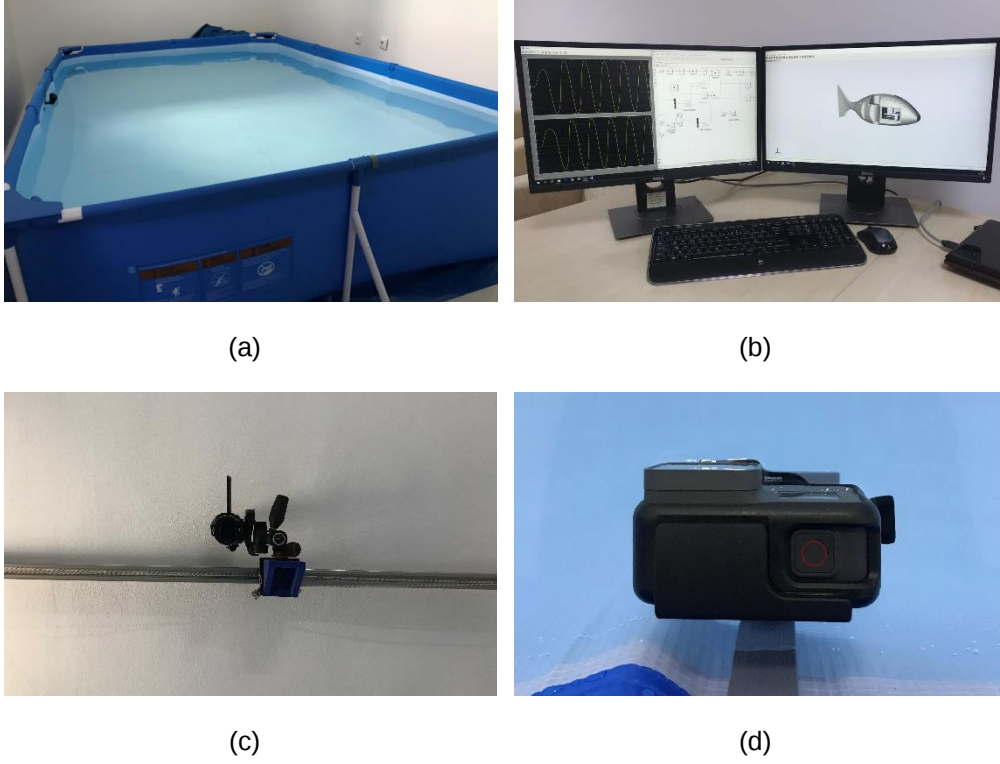
Prototip tasarımı ve üretimi tamamlanan robot balığın gerçek bir ortamda test edilmesi amacıyla deneysel bir çalışma ortamı gerçekleştirilmiştir. Bu ortamda 200cm eninde, 300cm boyunda ve 66cm derinliğinde deneysel yüzme havuzu ile bir Sony FDR-AX53 4K tepe kamerası, havuz içinde iki adet GoPro Hero5 Black Edition sualtı aksiyon kamerası ve veri aktarımı için i7 2.4GHz işlemci, 8GB DDR4 RAM ve 2GB ekran kartına sahip kullanıcı bilgisayarı yer almaktadır. 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 çıkarılması için açık çevrim davranışları analiz edilmiştir.

Kapalı çevrim denetim performansını göstermek için sapma açısının denetimi, yunuslama açısının denetimi ve engellerden sakınarak robot balık prototipinin otonom olarak yüzmesine ait üç boyutlu eksenlerde hareket kabiliyetleri analiz edilmiştir. Deneysel ortama ait temsili gösterim ve gerçek ortam görüntüleri sırasıyla Şekil 4.1 ve 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Deneysel çalışma ortamının temsili gösterimi

Şekil 4.2’de gösterilen deneysel çalışma ortamında üretimi ve sızdırmazlık deneyleri tamamlanan robot balık prototipinin açık çevrim ve kapalı çevrim deneyleri gerçekleştirilmiş olup sonuçlar değerlendirilmiştir.

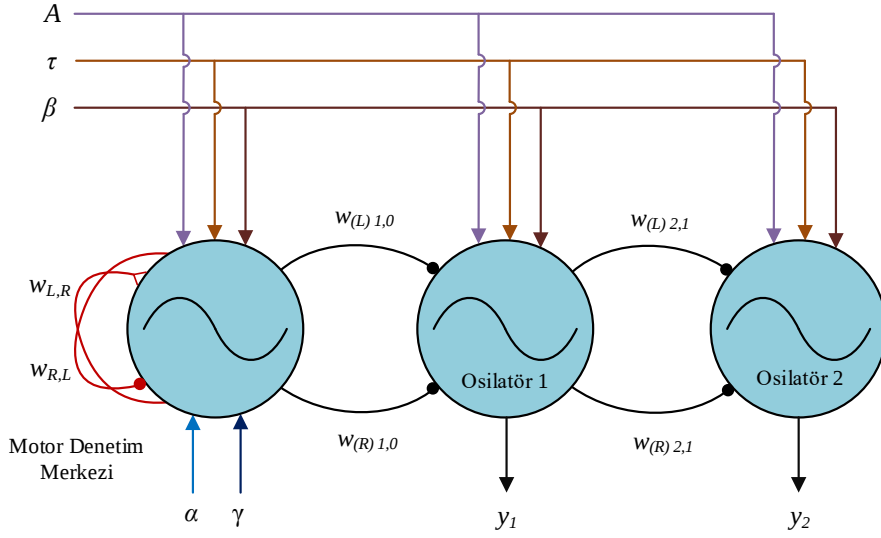


Şekil 4.2. Deneysel çalışma ortamının görüntüleri: (a) Deneysel havuz, (b) Kullanıcı bilgisayarı, (c) Tepe kamerası, (d) Sualtı kamerası

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.

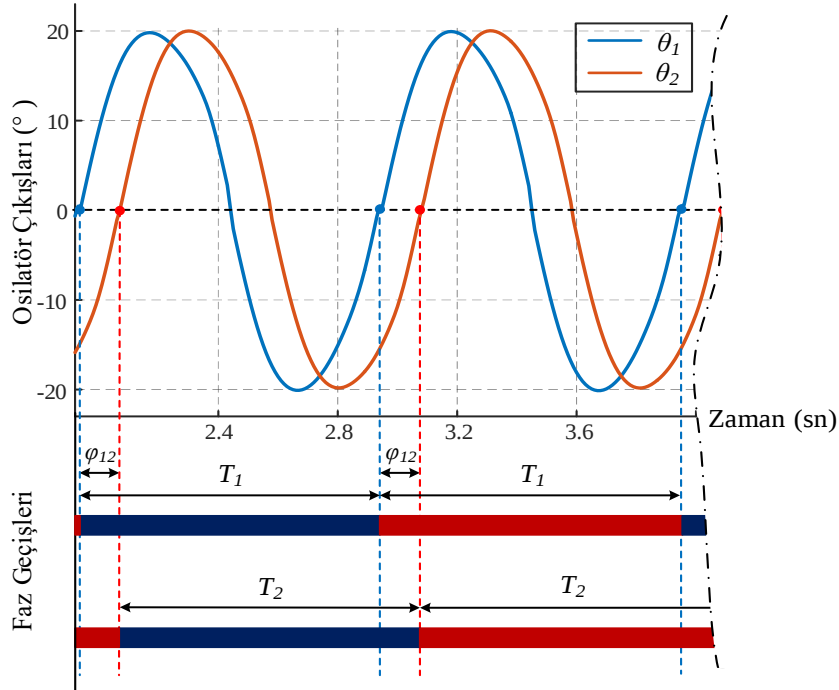
4.1 Robot Balık Prototipi için Tasarlanan MÖÜ Modeli

Robot balık prototipinin kuyruk eklem hareketlerini sağlamak ve bu hareketleri daha etkin denetlenebilir hale getirmek için Bölüm 3’de incelenen sinirsel Lamprey MÖÜ osilatör modeli geliştirilmiştir. Şekil 4.3’de verilen osilatör yapısı, bir motor denetim merkezi ve robot balığın her bir eklemine hareketlerini üreten iki adet osilatörden oluşmaktadır. Osilatör dizi modeli için tek yönlü zincir bağlantı kullanılmıştır. Osilatör modelinde giriş değişkenleri eklem açılarının genliği 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 $(w_{(L)}, w_{(R)})$ birbirine eşit olarak -1 değerini almaktadır.



Şekil 4.3. Geliştirilen tek yönlü zincir bağlı MÖÜ modeli

Robot balığın iki eklem arasındaki ϕ_{12} faz farkının istenilen aralıklarda belirlenebilmesi için deneysel açık çevrim çalışmalarda $\gamma=0.2$ değerinde sabitlenmiştir ve α (0-1] aralığında değiştirilmiştir. Şekil 4.4'de, periyodik osilatör çıkışları ile faz farkı arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 4.4. Osilatör çıkışlarına bağlı eklemler arasındaki faz geçişleri

$A_1=20$ ve $A_2=20$ genlikleri için oluşturulan bu faz farkı robot balığın gerçek bir balık hareketlerini taklit ederek yüzebilmesini sağlamaktadır.

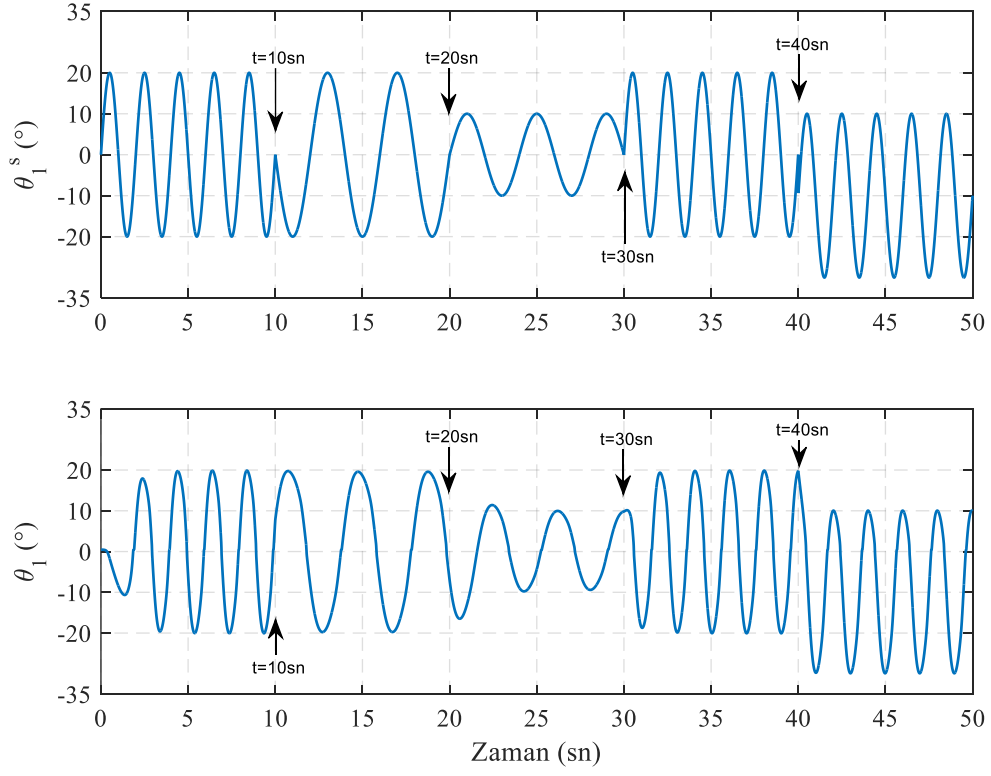
Geliştirilen MÖÜ modelinin etkinliğini incelemek Tablo 4.1'de verilen zaman aralıkları ve bu aralıklara bağlı genlik, frekans ve ofset için bir benzetim senaryosu oluşturulmuştur.

Burada, her iki eklem açılarını hem MÖÜ modeliyle hemde sinüzoidal fonksiyonlar ile MATLAB ortamında 50sn benzetim zamanı boyunca üretilmektedir. Hem osilatör çıkışında hemde sinüzoidal fonksiyonda aynı parametre değişimleri yapılmıştır.

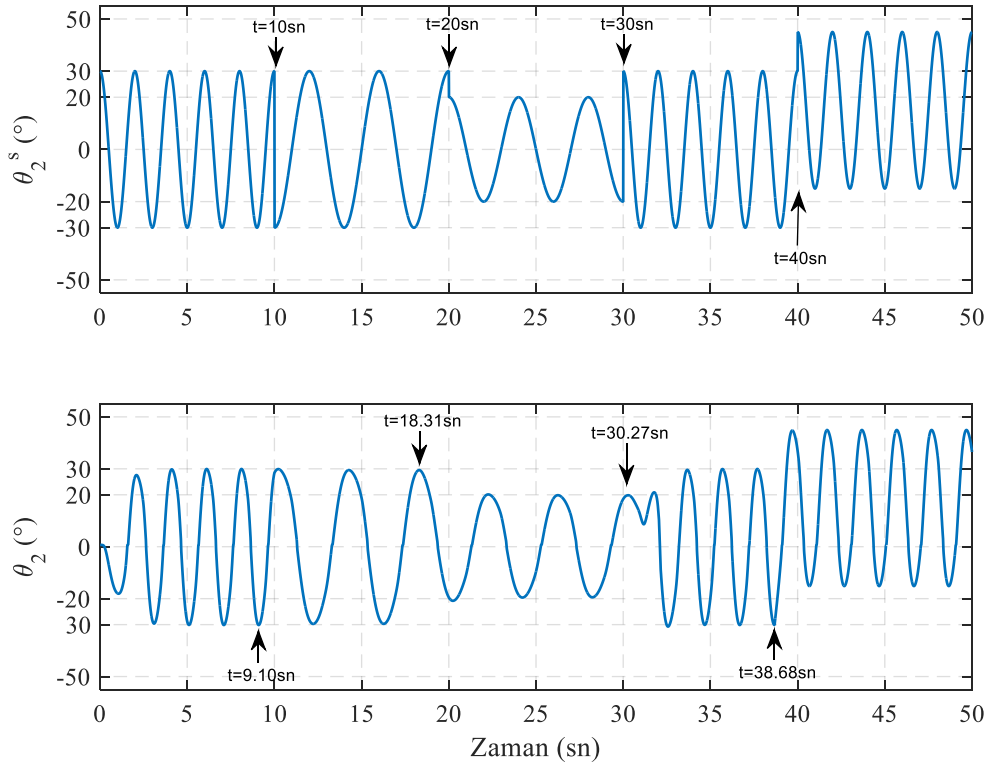
Tablo 4.1. MÖÜ modeli ve sinüzoidal fonksiyon için oluşturulan senaryo

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 ve ikinci eklem için oluşturulan senaryolar sırasıyla Şekil 4.5 ve 4.6'da gösterilmiştir. Birinci eklem için hem osilatör çıkışı hemde 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 10°, 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.



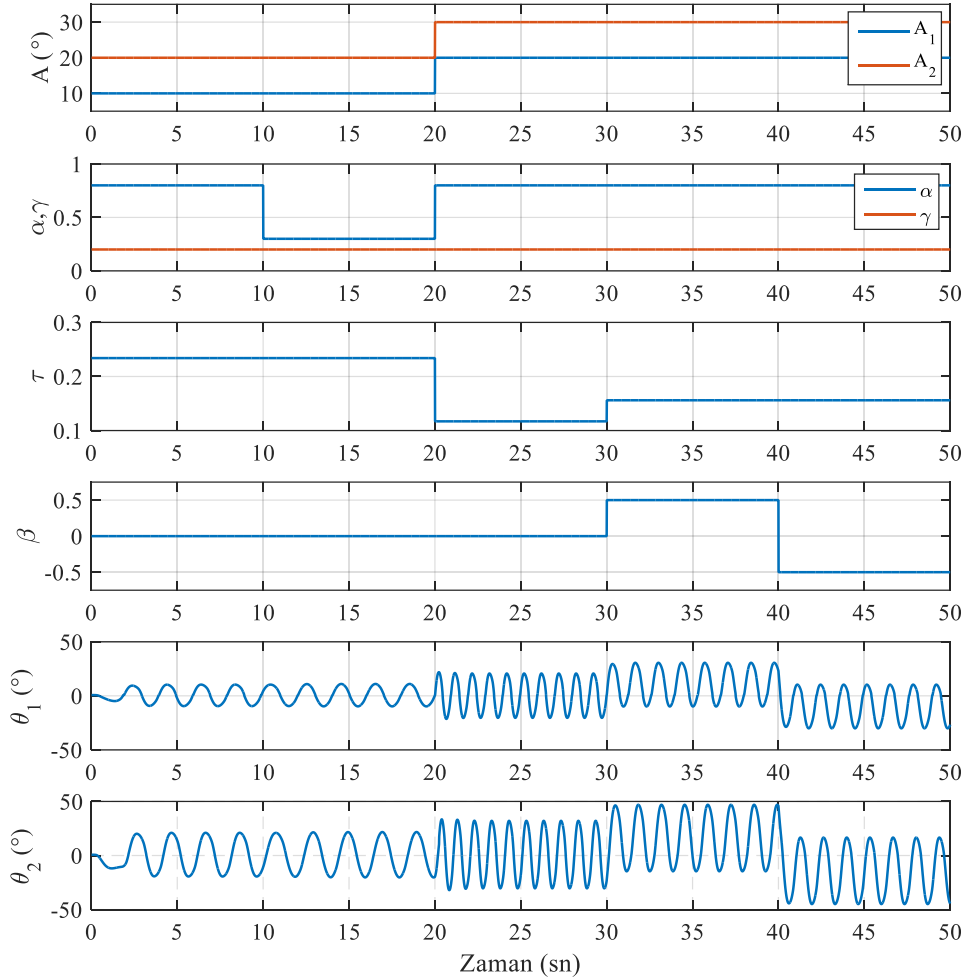
Şekil 4.5. Birinci eklem senaryosu



Şekil 4.6. İkinci eklem senaryosu

Şekil 4.6’da görüldüğü gibi, ikinci eklem senaryosunda ise parametre değişimleri hem osilatör çıkışı hemde sinüzoidal fonksiyon için 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 çevrim deneysel çalışmalarda kullanılan parametre değerleri için üretilen örnek osilatör çıkışları ve bu parametre değişimleri Şekil 4.7’de sunulmuştur. Tablo 4.2’de ise bu osilatör çıkışlarına ait parametre değişimleri ve zaman aralıkları verilmiştir.



Şekil 4.7. Açık çevrim deneyler için örnek parametre değişimleri ve osilatör çıkışları

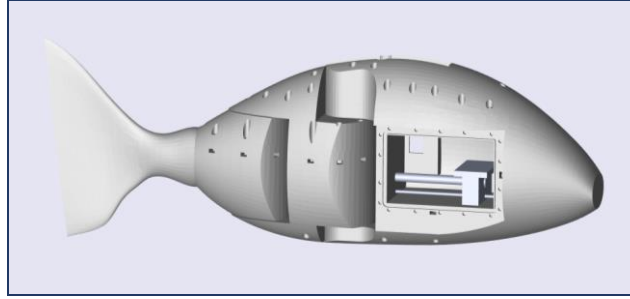
Tablo 4.2. Örnek davranışlar için zamana bağlı parametre değişimleri

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 sırasıyla 2Hz, 1Hz ve 0.75Hz olmaktadır.

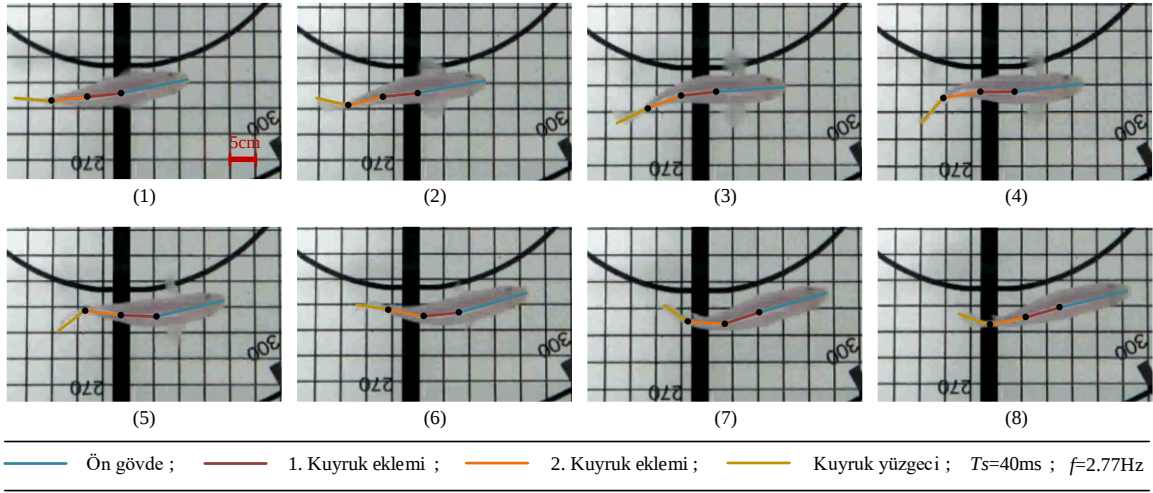
4.2 Prototipin SimMechanics Ortamında Hareket Analizi

Öncelikle SolidWorks ortamında üç boyutlu olarak tasarlanan robot balık prototipi Şekil 4.8’de gösterildiği gibi SimMechanics ortamına aktarılarak hareket analizi ileri yön düz yüzüş ve dönüş hareketleri için sanal ortamda gerçekleştirilmiştir.

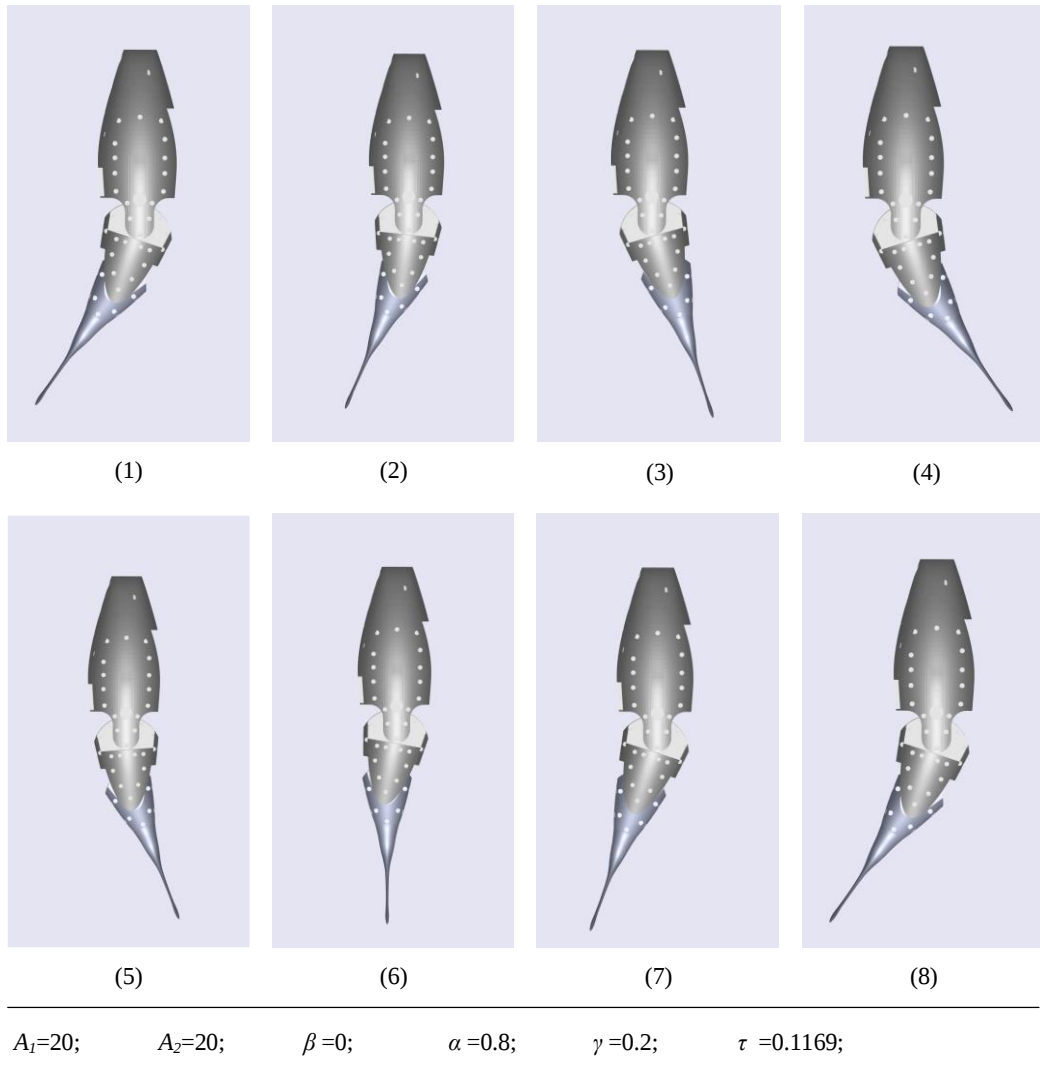


Şekil 4.8. Robot balık prototipinin SimMechanics görünümü

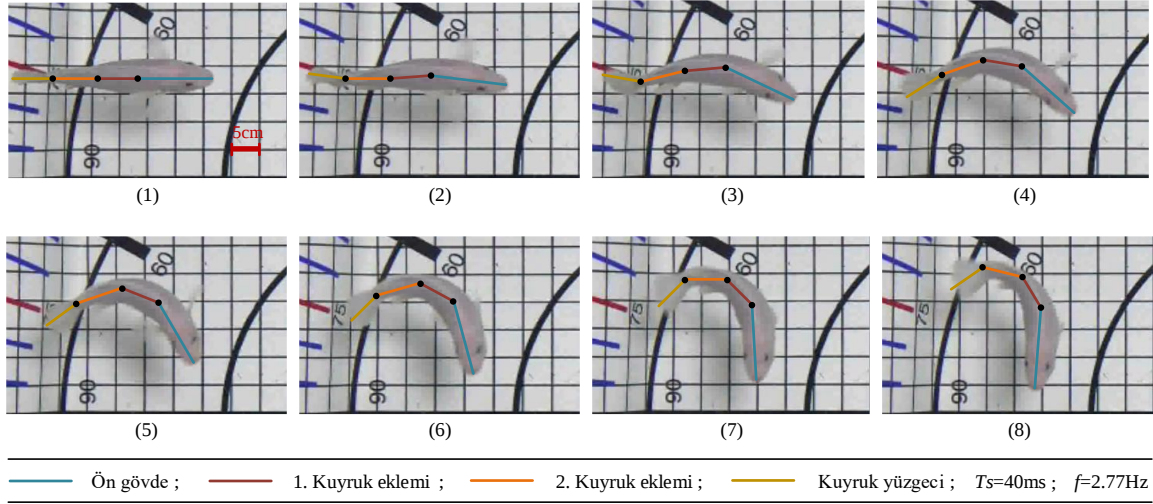
Carangiform türü yüzme hareketlerine sahip gerçek bir balığın fiziksel özellikleri dikkate alınarak tasarlanan iki eklemlili robot balık prototipinin ileri yön düz yüzüş ve dönüş hareketlerini yaparken vücudunun aldığı şekil ile gerçek balığın aynı hareketleri yaparken vücudunun aldığı şeklin uyumluluğunu göstermek için bu hareketler hem SimMechanics ortamında prototip üzerinde hemde gerçek ortamda carangiform türü gerçek bir sazan balığı üzerinde gözlemlenmiştir. Bu gözlemin 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 4.9 ve 4.11’de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Düz yüzüş ve dönüş açılarının bir periyot için uygulandığı SimMechanics görüntüleri de yine 8 ardışıl an için Şekil 4.10 ve 4.12’de verilmiştir. Gerçek balık ile SimMechanics ortamında oluşturulan prototipin eklem açılarının uyumluluğunu göstermek için düz yüzüş ve dönüş hareketlerine ait gerçek balık görüntüleri ve SimMechanics görüntüleri alt alta sunulmuştur.



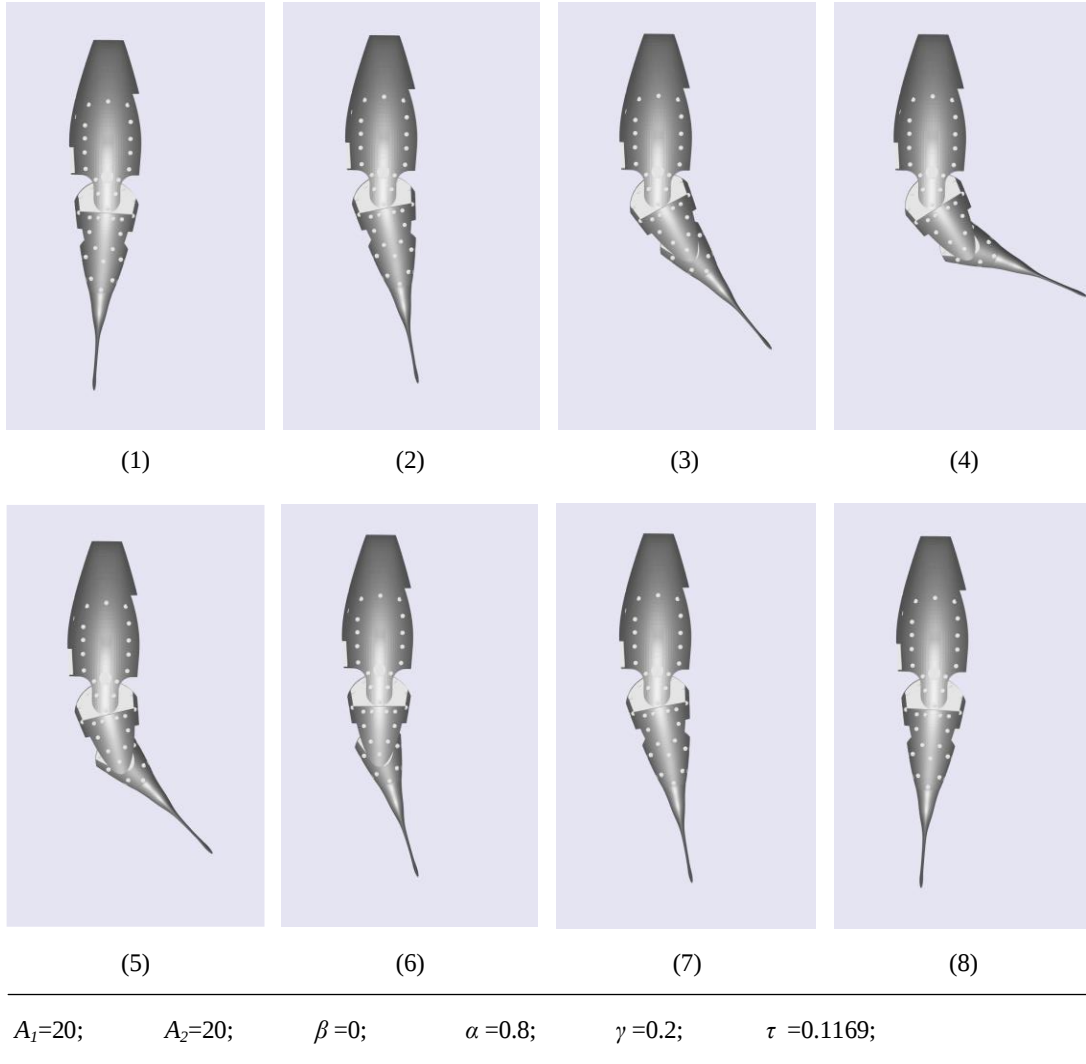
Şekil 4.9. Sazan balığının ileri yön düz yüzüş hareketinin bir periyodu



Şekil 4.10. Robot balığının ileri yön düz yüzüş hareketinin bir periyodu



Şekil 4.11. Sazan balığının dönüş hareketinin bir periyodu

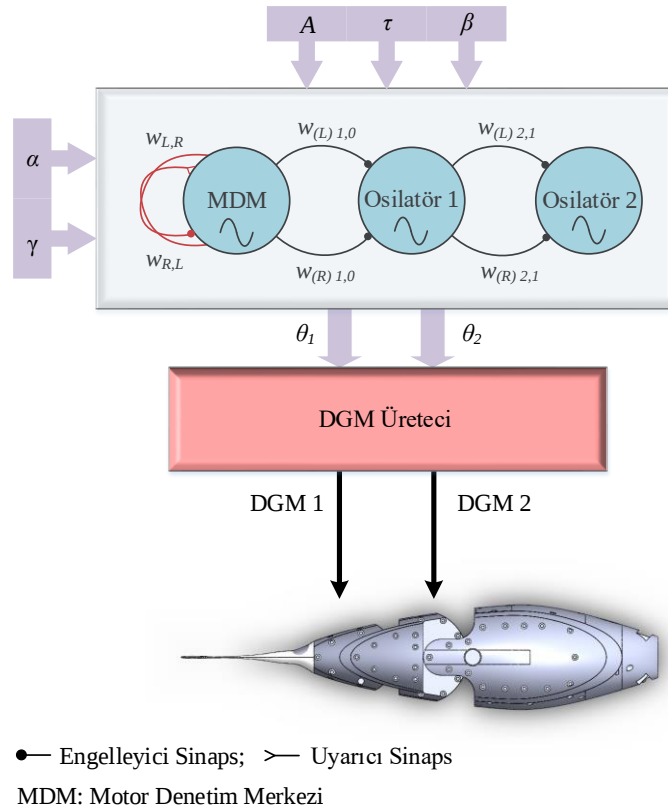


Şekil 4.12. Robot balığının dönüş hareketinin bir periyodu

Prototip ne kadar fazla hareketli kuyruk ekleminden oluşursa gerçek balık hareketi o kadar iyi bir performans ile taklit edilir. Ancak eklenen her bir kuyruk ekleminden dolayı ihtiyaç duyulan enerjinin artması, daha basit ve uygulanabilirliği yüksek bir tasarım gerçekleştirme ihtiyacını doğurduğundan bu dört parçalı prototip yapısı ile gerçek balık hareketleri başarılmaya çalışılmıştır. Hareketlerin büyük oranda uyumluluğu da Şekil 4.9, 4.10, 4.11 ve 4.12 ile gösterilmiştir.

4.3 Robot Balığın Açık Çevrim Performansı

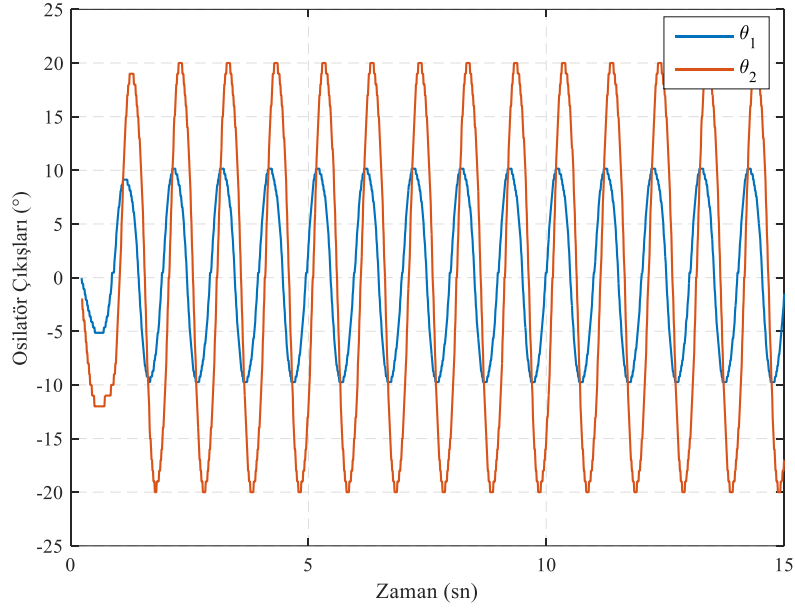
Prototipin açık çevrim performansını analiz etmek için Şekil 4.13'de blok şeması verilen MÖÜ yapısı kullanılmıştır. Burada MÖÜ modelinin daha önce Bölüm 3'de belirtildiği gibi giriş değişkenleri; osilatörlerin genlik (A), periyot (τ), faz farkı (α, γ) ve ofset (β) parametreleri olarak belirlenmiştir. MÖÜ modelinin çıkış değişkenleri ise osilatörlerin çıkışları ve aynı zamanda robot balığın üretilen eklem açılarıdır. Üretilen açılara göre servo motorların konumlarını değiştirmek için gerekli görev oranı Darbe Genişlik Modülatörü (DGM) Birimi tarafından hesaplanır.



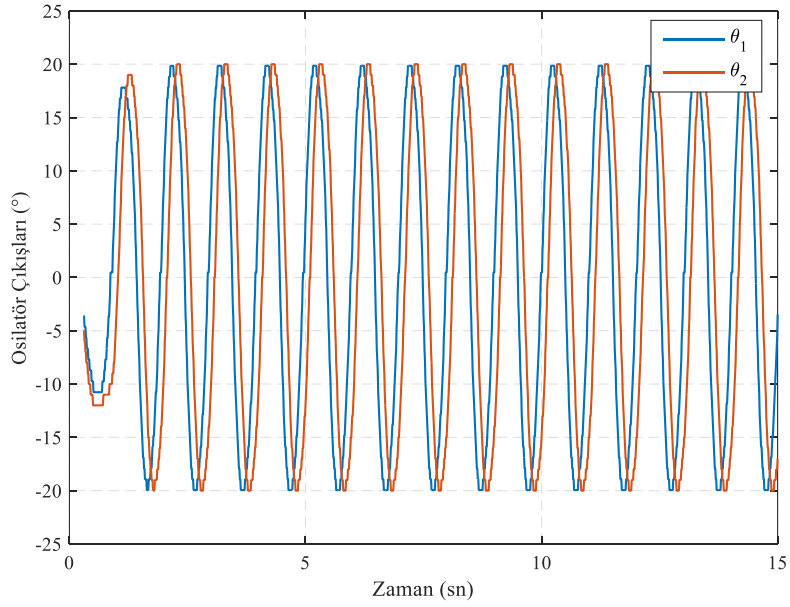
Şekil 4.13. Robot balığın açık çevrim performans analizleri için kullanılan blok şeması

MÖÜ modelinin giriş parametrelerinin belirlenen aralıklardaki değişimleri için robot balığın birinci ve ikinci eklem açıları (θ_1 , θ_2) hem benzetim hemde deneysel olarak incelenmiştir. Sırasıyla Şekil 4.14, 4.15 ve 4.16'da farklı genlik değerleri için ARM Cortex M4

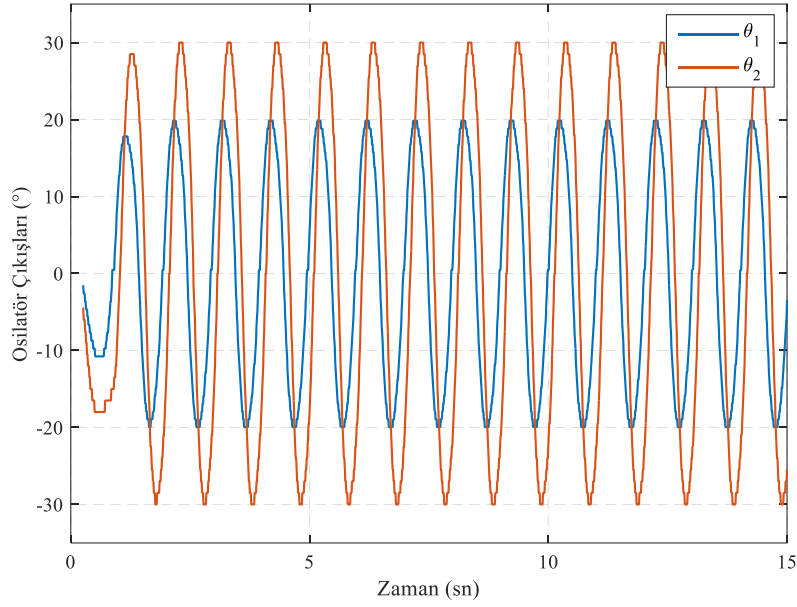
mikrodenetleyici ile üretilen osilatör çıkışları verilmiştir. Bu osilatör çıkışları aynı zamanda robot balık prototipinin eklem açılarıdır.



Şekil 4.14. $A_1=10$ ve $A_2=20$ genlik değerleri için ARM Cortex M4 mikrodenetleyici ile elde edilen osilatör çıkışları



Şekil 4.15. $A_1=20$ ve $A_2=20$ genlik değerleri için ARM Cortex M4 mikrodenetleyici ile elde edilen osilatör çıkışları

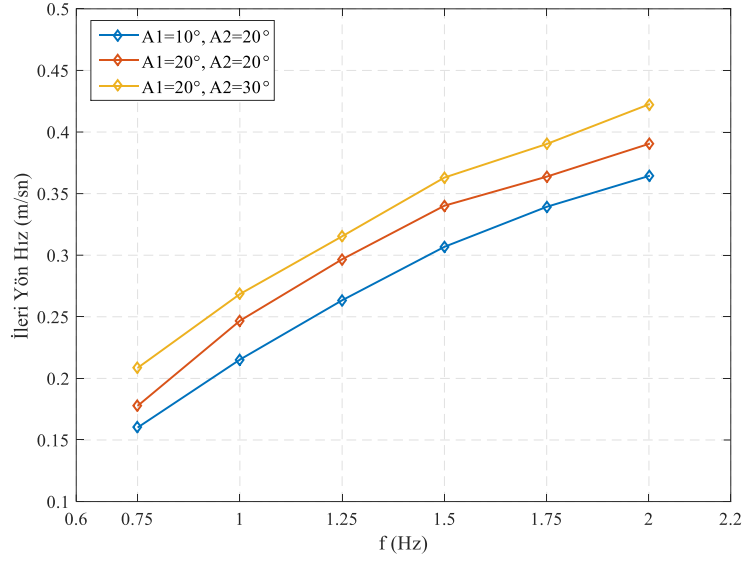


Şekil 4.16. $A_1=20$ ve $A_2=30$ genlik değerleri için ARM Cortex M4 mikrodeneleyici ile elde edilen osilatör çıkışları

Şekil 4.14, 4.15. ve 4.16.'da üretilen osilatör çıkışları için MÖÜ giriş parametreleri $\tau=0.1170$, $\alpha=0.8$, $\gamma=0.2$ ve $\beta=0$ olarak seçilmiştir. Bu durumda kuyruğun çarpınma frekansı $f=1\text{Hz}$ ve osilatör çıkışları arasındaki faz farkı $\phi_{12}=45^\circ$ olarak elde edilir.

4.3.1 Robot Balığın İleri Yön Düz Yüzüş için Açık Çevrim Performansı

Bu bölümde, Şekil 4.2'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 4.17'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 4.3'de sunulmuştur.



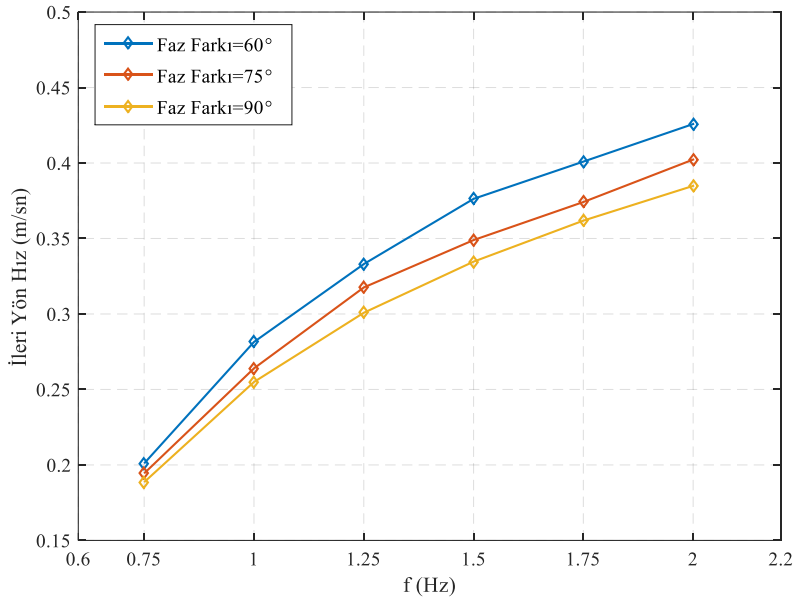
Şekil 4.17. Robot balığın deneysel ortamda çarpınma frekansı değişimine göre farklı genlik değerlerinde ileri yön hız değişimi

Tablo 4.3. Robot balığın çarpınma 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 4.17'den görüldüğü gibi robot balığın ileri yön düz yüzüş hızı çarpınma 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] aralığında belirlenmiştir. 2Hz'lik çarpınma 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 [1]. 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 çarpınma frekansı değişimine karşılık ileri yön hız değişimi Şekil 4.18'de verilmiştir. Bu analize ait parametre değişimlerine karşılık prototipten elde edilen ileri yön hız değerleri ise Tablo 4.4'de detaylandırılmıştır.



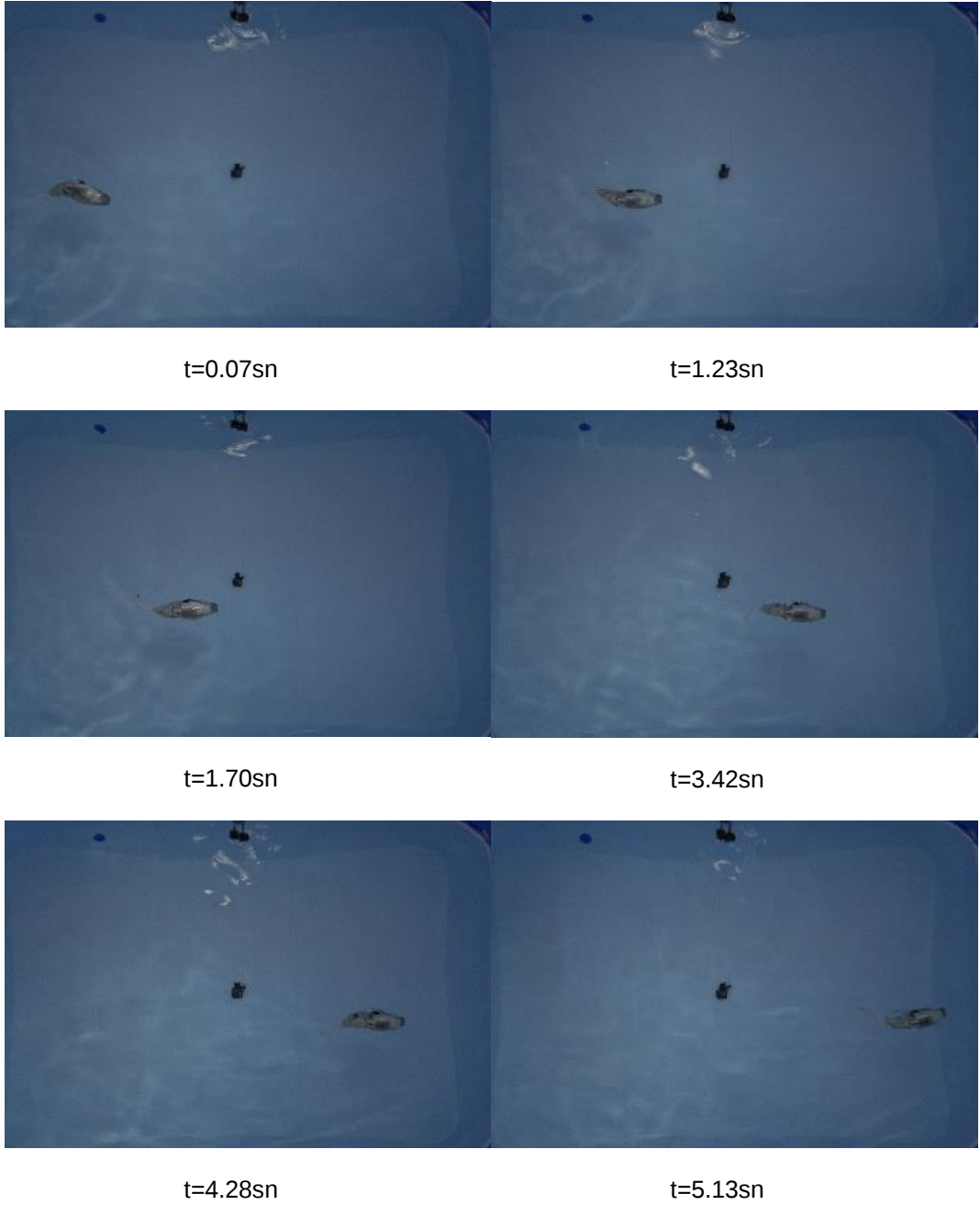
Şekil 4.18. Robot balığın deneysel ortamda çarpınma frekansı değişimine göre farklı faz değerlerinde ileri yön hız değişimi

Tablo 4.4. 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 karşın hız değeri artarken, eklemlere uygulanan açılar arasındaki faz farkı arttıkça kuyruk mekanizmasının ürettiği tahrik kuvveti azaldığından ileri yön hız değerleri azalmaktadır.

Şekil 4.19'da ise robot balığın $f=2\text{Hz}$, $A_1=20$, $A_2=20$, $\beta=0$, $\alpha=0.3$ ve $\gamma=0.2$ parametre değerleri için ileri yön düz yüzüş hareketine ait deneysel görüntüler verilmiştir.



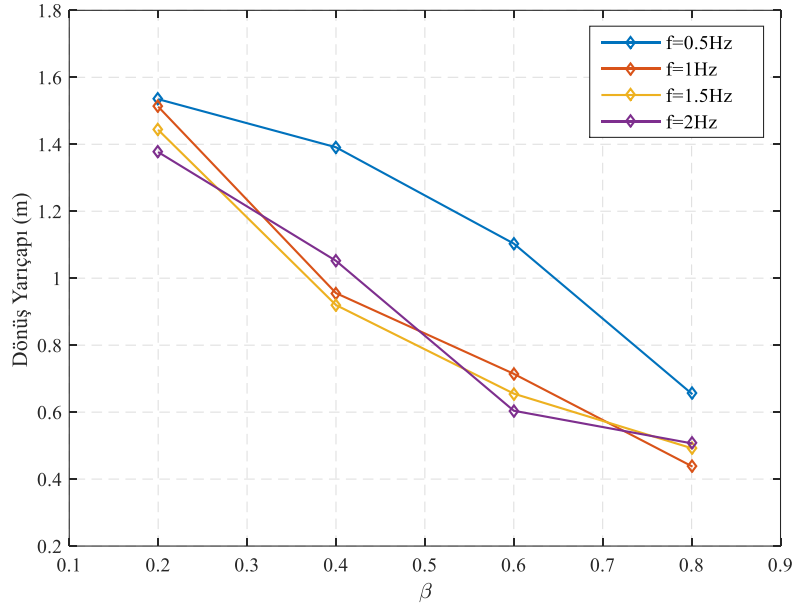
Şekil 4.19. Robot balığın deneysel ortamda ileri yön düz yüzüş hareketi

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.

4.3.2 Robot Balığın Dönüş Hareketi için Açık Çevrim Performansı

Robot balık prototipi dönüş hareketlerini, MÖÜ giriş değişkenlerinden olan ofset (β) değişimine karşı farklı dönüş yarıçapları ve hızları ile gerçekleştirebilmektedir. Bu bölümde, Şekil 4.2'de gösterilen deneysel çalışma ortamında robot balık prototipinin açık çevrim dönüş

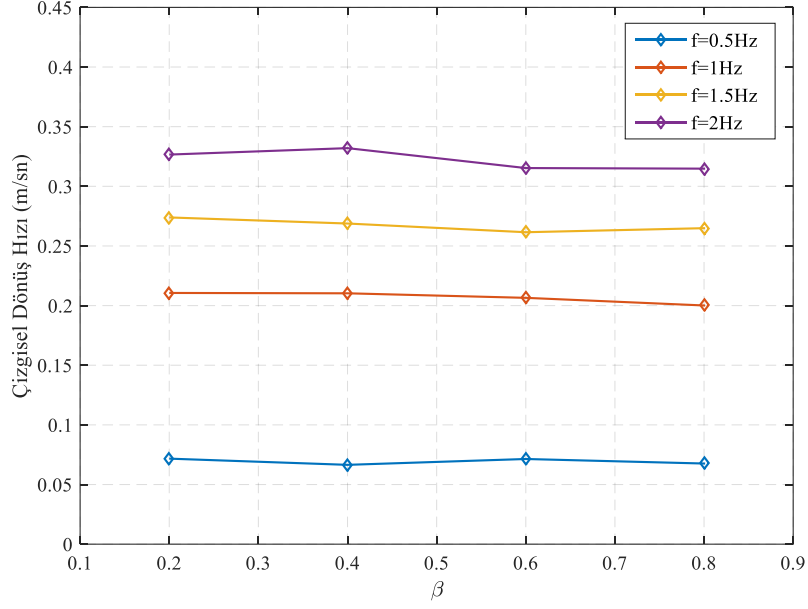
hareket kabiliyetleri belirlenen farklı parametre değerlerine göre analiz edilmiştir. Bu analizlerde; tahrikli kuyruk mekanizmasındaki eklem açılarının ofset değişimlerine karşılık farklı frekans değerlerinde balık prototipinin dönüş yarıçapı, çizgisel ve açısal hız değişimleri incelenmiştir. Şekil 4.20’de, robot balık prototipinin deneysel havuz ortamında eklem açılarının ofset değişimine göre farklı çarpınma frekansı değerleri için prototipin dönüş yarıçapı değişimleri verilmiştir.



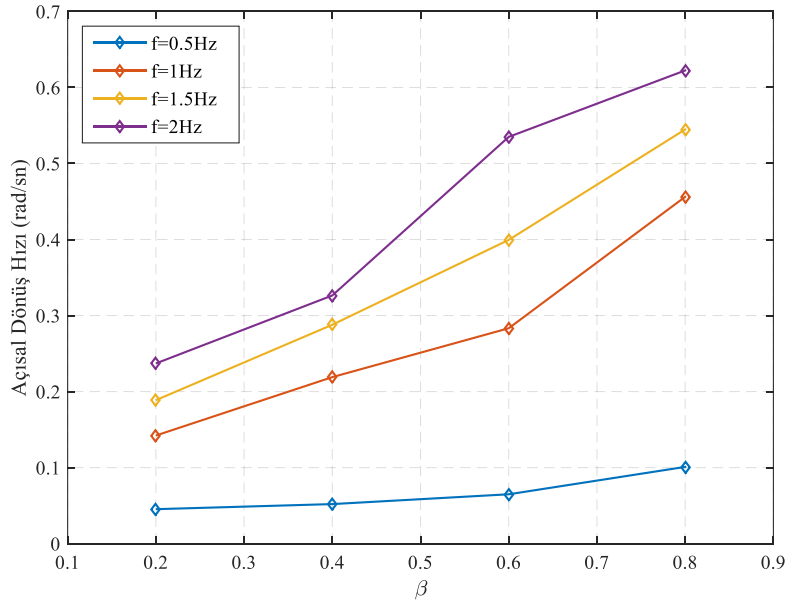
Şekil 4.20. Robot balığın deneysel ortamda ofset değişimine göre farklı çarpınma frekanslarında dönüş yarıçapı değişimi

Robot balığın dönüş hareket analizlerinde sabit frekans değerleri için ofset artışına karşılık dönüş yarıçapının azaldığı görülmektedir. Deneysel çalışmalar $f=[0.5, 1, 1.5, 2]\text{Hz}$ olmak üzere dört farklı çarpınma frekansı için gerçekleştirilmiştir. Düşük frekans değerinde 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 4.21 ve 4.22’de sunulmuştur.



Şekil 4.21. Robot balığın deneysel ortama farklı ofset değişimine göre farklı çırpınma frekanslarında çizgisel dönüş hızı değişimi



Şekil 4.22. Robot balığın deneysel ortamda ofset değişimine göre farklı çırpınma frekanslarında açısal dönüş hızı değişimi

Şekil 4.21’de 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 4.22.’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 hızının arttığı görülmektedir.

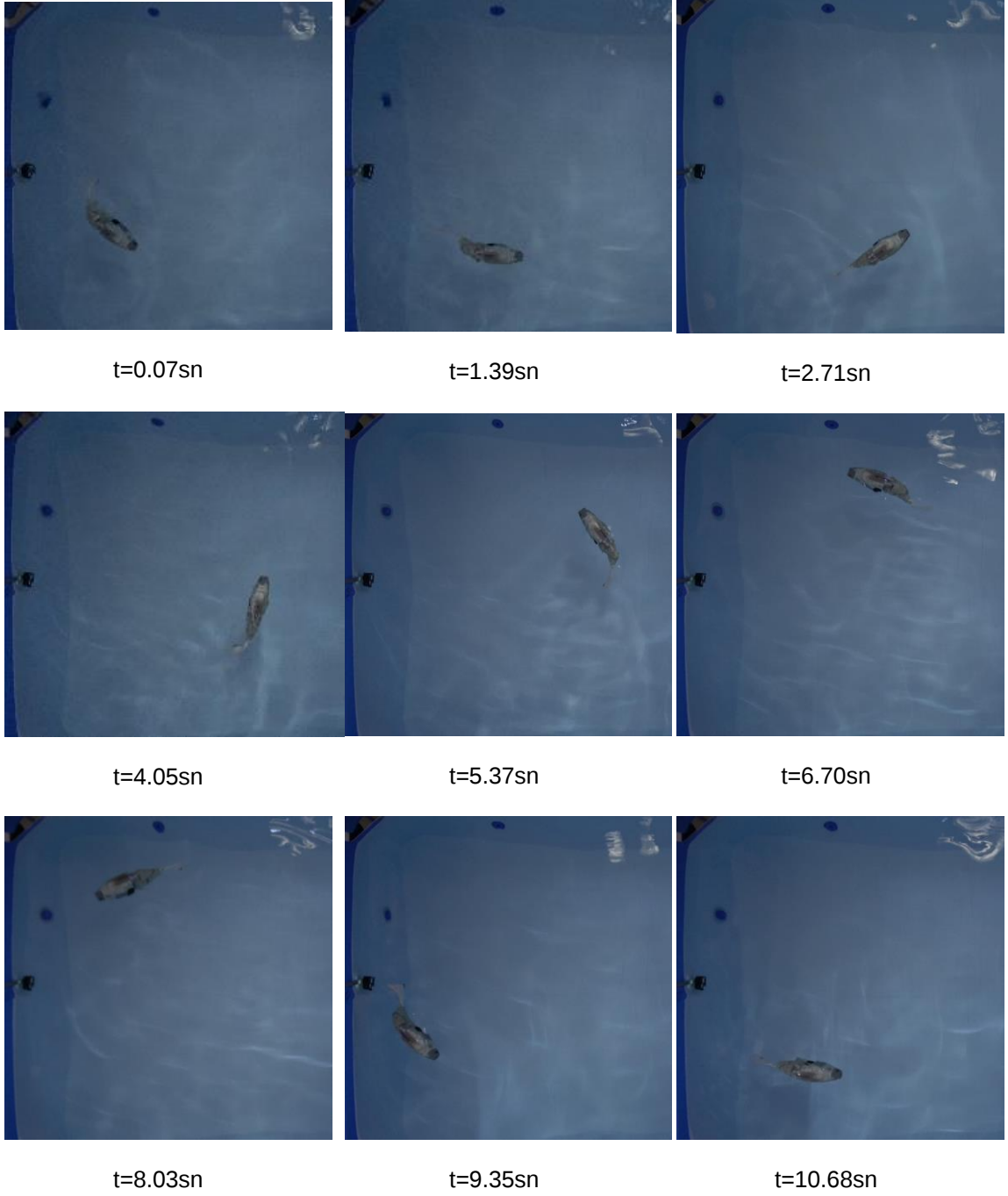
Ofset değerinin artışı robot balığın dönüş hareketinin yatay x eksenine ile yaptığı dönüş açısının da artmasına sebep olduğundan hem dönüş yarıçapının azalmasına hemde açısal dönüş hızının artmasına sebep olmaktadır. Aynı zamanda, sabit ofset değerleri için çarpınma frekansının artışı ile çizgisel ve açısal hız değerleri de artmaktadır. Robot balığın minimum dönüş yarıçapı 1Hz çarpınma frekansında 0.4387m, maksimum çizgisel hızı 2Hz çarpınma frekansında 0.3266m/sn ve maksimum açısal hızı 2Hz çarpınma frekansında 0.62rad/sn olarak elde edilmiştir. Ayrıca, robot balık prototipi için maksimum çizgisel dönüş hızı gövde uzunluğuna göre 0.6532GU/sn olarak hesaplanmıştır.

Robot balığın dönüş hareket performansının analizi için yukarıda verilen deneysel çalışmalardan elde edilen dönüş yarıçapı, çizgisel ve açısal hızlarına ait değerler detaylı olarak Tablo 4.5’de sunulmuştur.

Tablo 4.5. Robot balığın ofset değişimine göre farklı çarpınma frekanslarında çizgisel dönüş hızı değişimi

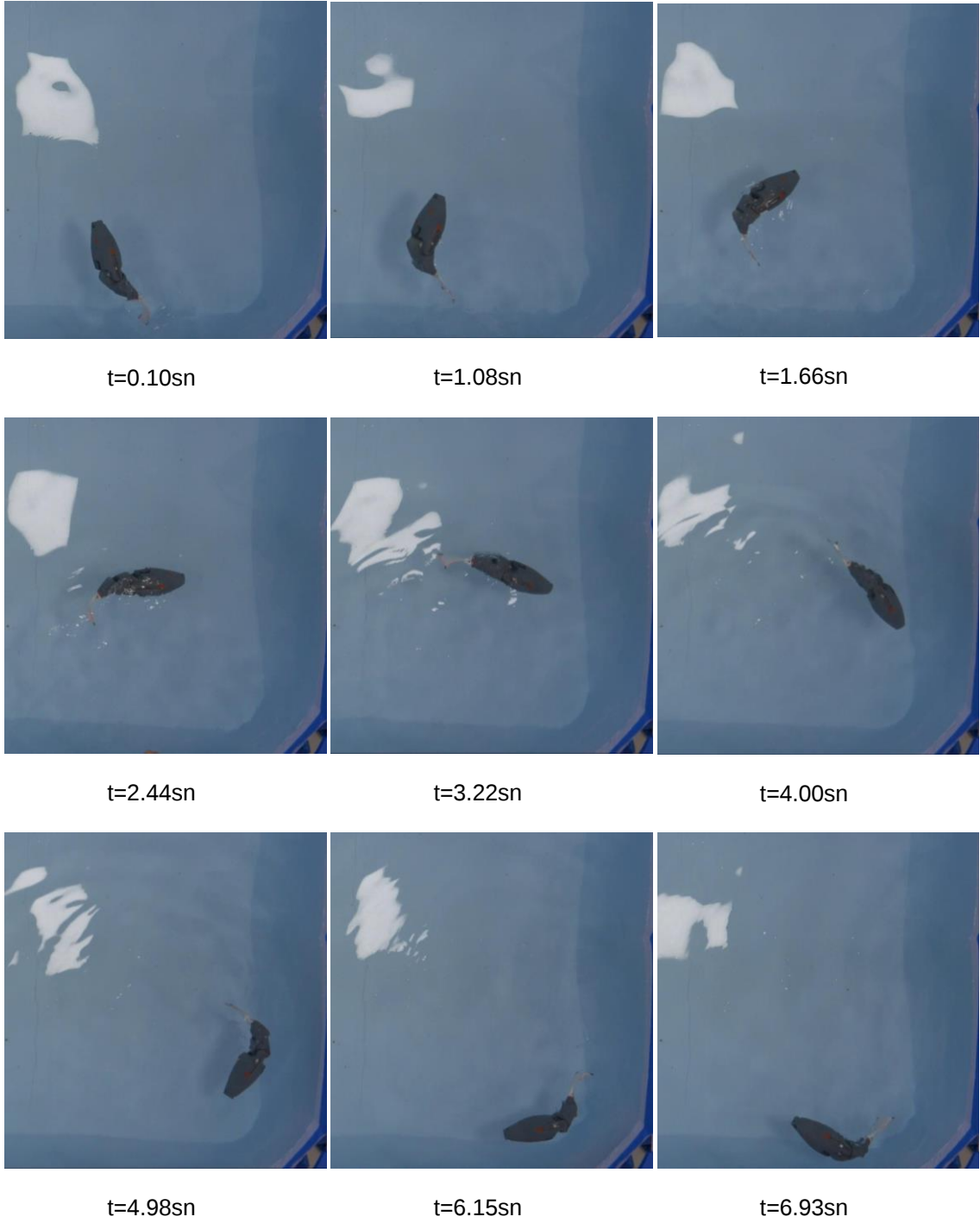
A_1 (°)	A_2 (°)	β	α	γ	ϕ_{12} (°)	τ	f (Hz)	Dönüş	Çizgisel	Açısal
								Yarıçapı	Dönüş Hızı	Dönüş Hızı
								(m)	(m/sn)	(rad/sn)
10	20	0.2	0.8	0.2	45	0.2339	0.5	1.5347	0.0717	0.0453
10	20	0.4	0.8	0.2	45	0.2339	0.5	1.3910	0.0665	0.0520
10	20	0.6	0.8	0.2	45	0.2339	0.5	1.1033	0.0714	0.0649
10	20	0.8	0.8	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	1.0519	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	0.5068	0.3148	0.6224

Şekil 4.23’de, robot balığın $f=2\text{Hz}$, $A_1=10$, $A_2=20$, $\beta=0.8$, $\alpha=0.8$ ve $\gamma=0.2$ parametre değerleri için dönüş hareketine ait deneysel görüntüler verilmiştir.



Şekil 4.23. Robot balığın $f=2\text{Hz}$, $A_1=10$, $A_2=20$, $\beta=0.8$, $\alpha=0.8$ ve $\gamma=0.2$ için deneysel ortamda dönüş hareketi

Şekil 4.24’de ise robot balığın $f=1.5\text{Hz}$, $A_1=20$, $A_2=30$, $\beta=1$, $\alpha=0.8$ ve $\gamma=0.2$ parametre değerleri için dönüş hareketine ait deneysel görüntüler verilmiştir.



Şekil 4.24. 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

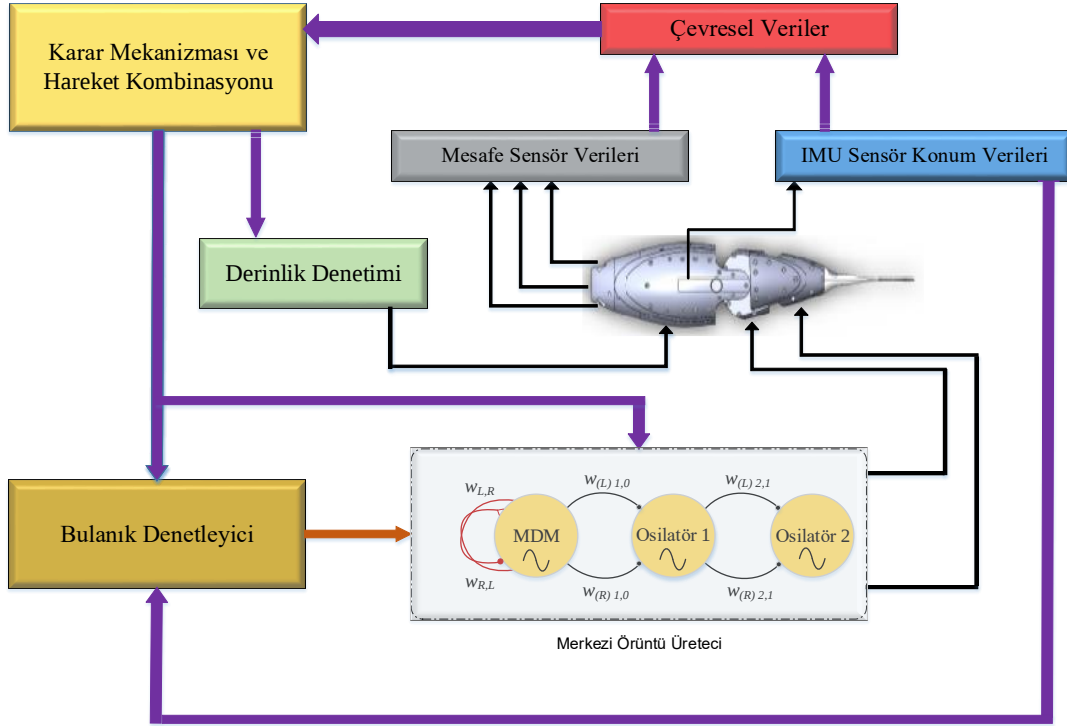
Bu deneylerde, aynı MÖÜ parametre değişimlerine karşılık robot balığa ait üç farklı performans kriteri değerlendirilmiştir.

4.4 Robot Balığın Kapalı Çevrim Denetim Performansı

Robot balığın kapalı çevrim kontrol performanslarını elde etmek için Şekil 4.25’de blok şeması verilen kapalı çevrim kontrol sistemi kullanılmıştır. Burada üç adet mesafe sensörü ve bir adet IMU sensörü ile robot balıktan engel ve konum verileri alınmaktadır. Bu veriler bir Karar Mekanizması yoluyla değerlendirilmekte ve robot balığın hareket kombinasyonu sağlanmaktadır. Bulanık Denetleyici çıkışında hareket kombinasyonuna göre MÖÜ modelinin λ giriş parametresinin değeri elde edilir. λ parametresi MÖÜ modelini duyuşal geri beslemeli kapalı çevrim denetim yapısına dönüştürmek için kullanılan gerçek bir duyuşal sinir hücresinden ilham alınarak tasarlanan geri besleme sinir hücresi yapısıdır. Bu parametre engellerden sakınarak yüzme deneyleri için mesafe sensörlerinden elde edilen engelin uzaklığı ile ilişkili olarak dönme açılarını ve sapma açısı denetimi deneyleri için robot balığın dünya eksen takımında uygun sapma açısına göre gerekli dönme açılarını belirler. MÖÜ modelinin diğer giriş parametreleri olan A , τ ve α ’nın uygun değerleri ise hareket kombinasyonuna göre belirlenir. Uygun faz farkları, bütün deneyler için $\gamma=0.2$ değerinde sabit tutularak α değişimi ile elde edilmiştir.

Üç boyutlu hareket kabiliyetinin sağlanması için yunuslama açısı ve derinlik seviyesi denetimi olmak üzere iki farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizler için robot balığın ağırlık merkezi denetim mekanizmasındaki hareketli kütlenin konumunun değiştirilmesi gerekmektedir. 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 kaldırma merkezi ile 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 4.26’da görüldüğü gibi, bu dağılım başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir ve yalpalanma hareketi 0° civarında olduğu için denetimi ihmal edilmiştir.



Şekil 4.25. Duyusal geri beslemeli kapalı çevrim denetim sistemi blok şeması



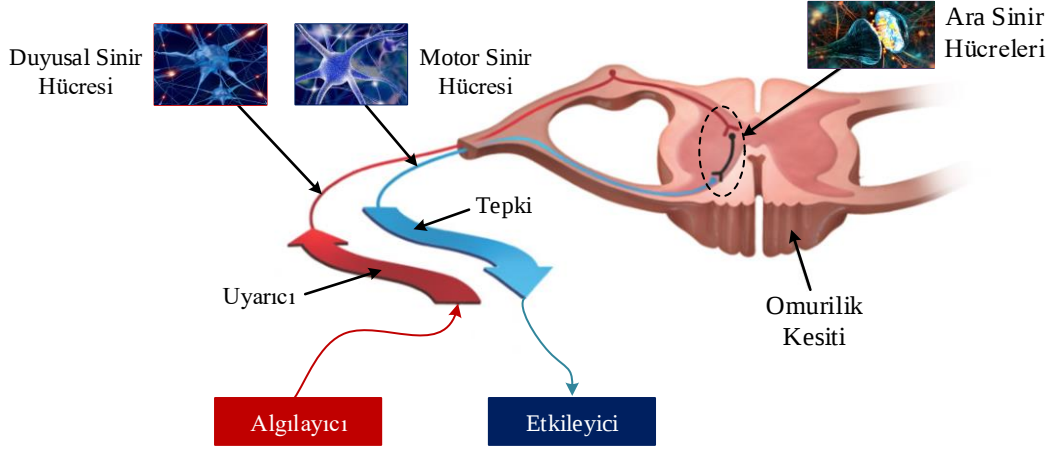
(a)



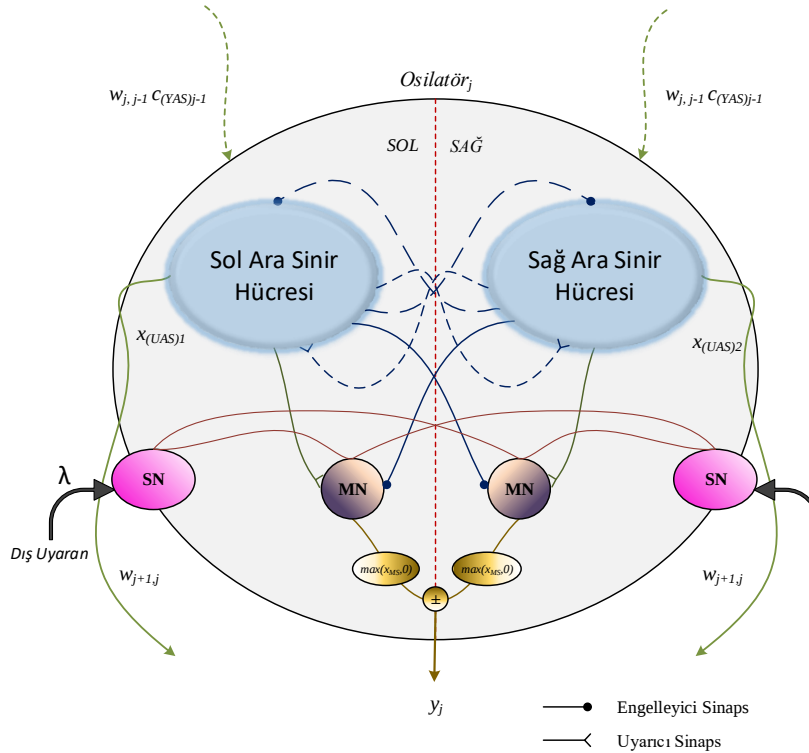
(b)

Şekil 4.26. Robot balığın su içerisindeki dengesi: (a) Üstten görünüm, (b) Yandan görünüm

Yukarıda belirtildiği gibi, bulanık denetleyici çıkışı λ parametresi Şekil 4.27’de gösterilen refleks yayı yapısında bulunan duyuşal sinir hücresinin (DS) uyarıcı girişlerini tanımlamaktadır. DS’lerden alınan uyarıcılar ile omurilikteki ara sinir hücrelerinde sistemin dışarıdan gelen durumlar için gereken tepkileri üretmesi sağlanır. Bu yapıya ait duyuşal geri beslemeli MÖÜ modeli Şekil 4.28’de gösterilmiştir.



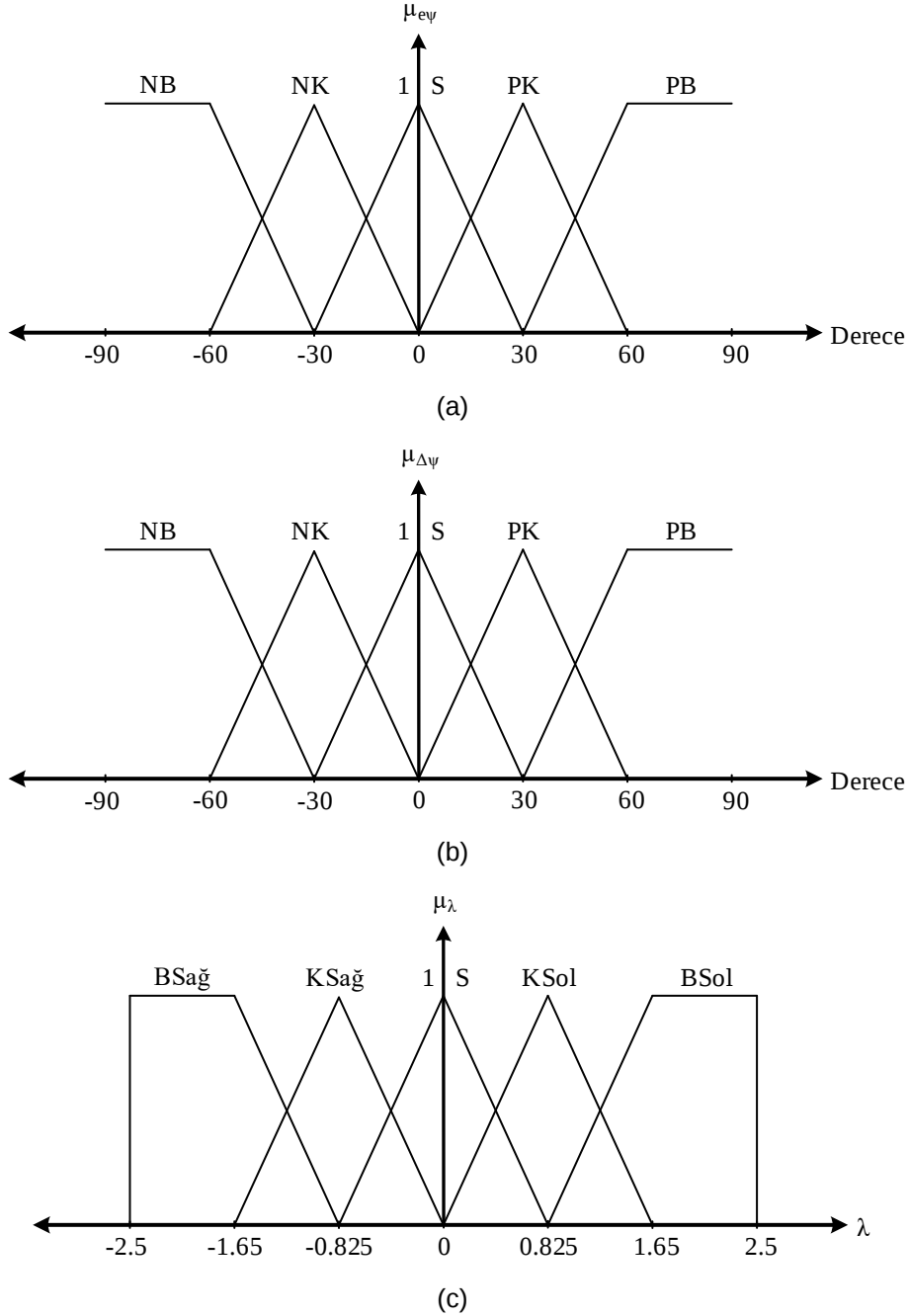
Şekil 4.27. Refleks yayı model blok gösterimi



Şekil 4.28. Refleks yayı içeren duyuşal MÖÜ modeli

Kapalı çevrim sistemde, Şekil 4.29’da verilen kapalı çevrim döngüsü ile veri akışı gerçekleştirilmiştir.

denetimi ileri yön hareket için $[-90\ 90]$ aralığında değişeceğinden giriş üyelik fonksiyonları da bu aralıkta tanımlanmıştır. MÖÜ'nin 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.



Şekil 4. 31. 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 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6. 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 karakteristikleri ve denetim hassasiyeti dikkate alınarak belirlenmiştir. 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 0.8.26 programına aktarılıp robot balık prototipi üzerinde bir referans bölge işaretlenmiştir. İşaretli bölgenin hareketi Şekil 4.32'de gösterildiği gibi takip edilerek robot balık prototipinin izlediği yol ile x ve y eksenlerindeki konum değişimi belirlenmiştir. Kineova programında örnekleme periyodu 0.04sn olarak seçilmiştir.



Şekil 4.32. Kineova 0.8.26 programı ile robot balık prototipinin konum değişiminin belirlenmesi

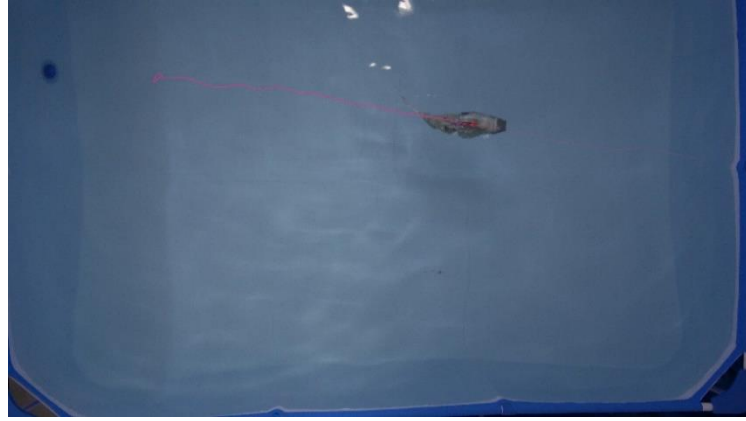
Kineova programı aracılığıyla elde edilen robot balığın izlediği yola ait video görüntüleri MATLAB ortamında deney süresine bağlı olarak belirlenen örnekleme periyotları ile anlık görüntülere dönüştürülmüştür. Her bir deneye ait sapma açıları ise x ve y eksenlerindeki konum değişimleri kullanılarak aşağıdaki gibi bulunur.

$$\psi_f = \tan^{-1}(y / x) \quad (4.1)$$

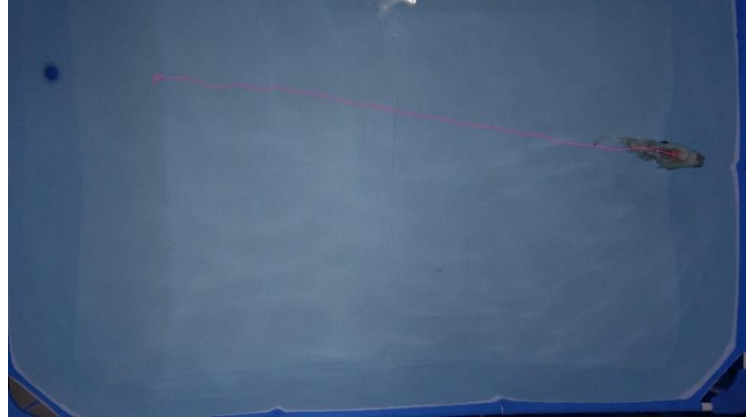
Bu sapma açılarının referans giriş değişkenine göre zamana bağlı değişimleri MATLAB ortamında elde edilmiştir. Sapma açısı denetimi için gerçekleştirilen deneylere ait üç farklı anın görüntüleri ψ_{ref} 15° , 30° ve 45° için sırasıyla Şekil 4.33, 4.34 ve 4.35’de sunulmuştur.



$t=0.43\text{sn}$



$t=4.8\text{sn}$



$t=7.12\text{sn}$

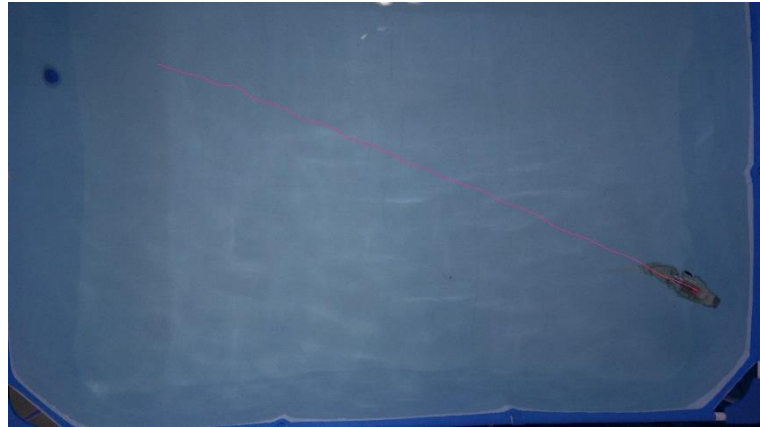
Şekil 4.33. 15°'lik sapma açısı referansı için kapalı çevrim denetimin deneysel görüntüleri



$t=0.67\text{sn}$



$t=3.96\text{sn}$



$t=8.00\text{sn}$

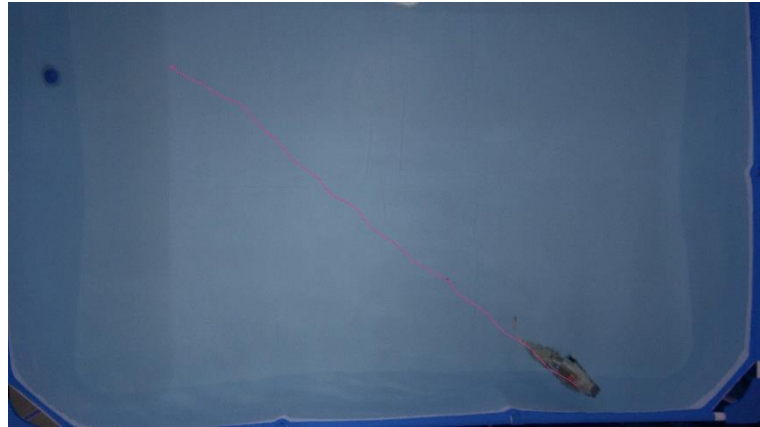
Şekil 4.34. 30°'lik sapma açısı referansı için kapalı çevrim denetimin deneysel görüntüleri



$t=0.34\text{sn}$



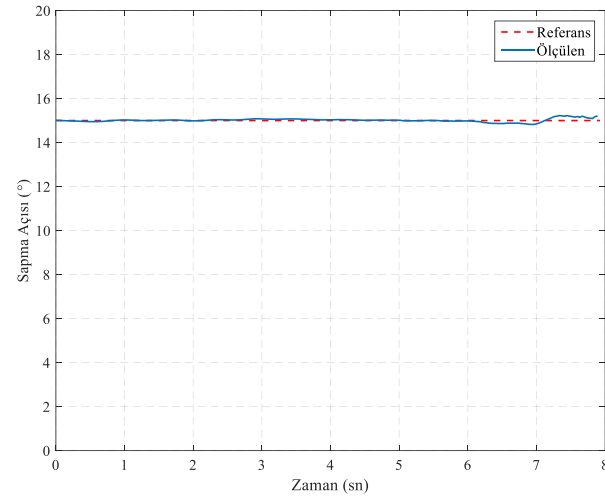
$t=4.13\text{sn}$



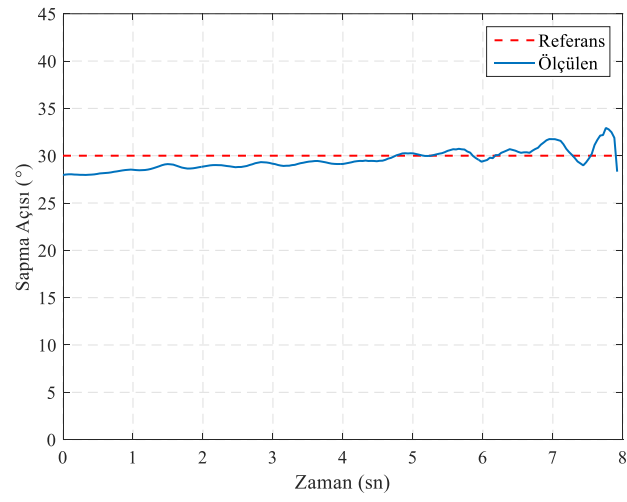
$t=7.04\text{sn}$

Şekil 4.35. 45°'lik sapma açısı referansı için kapalı çevrim denetimin deneysel görüntüleri

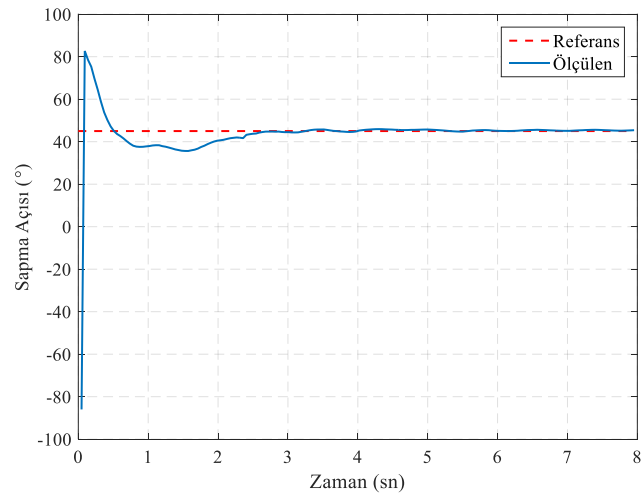
Üç farklı sapma açısı için gerçekleştirilen deneylerden elde edilen x ve y eksenindeki konum değişimleri ile Denklem (4.3) kullanılarak hesaplanan zamana bağlı sapma açıları ise Şekil 4.36'da verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

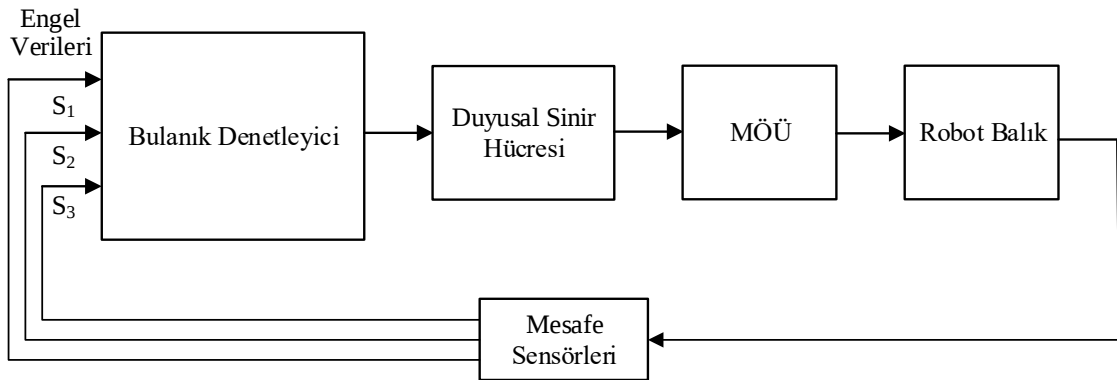
Şekil 4.36. Sırtma açılarının zamana bağlı değişimi: (a) $\psi_{ref}=15^\circ$, (b) $\psi_{ref}=30^\circ$, (c) $\psi_{ref}=45^\circ$

Şekil 4.36’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.

4.4.2 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 4.37’de verilmiştir. 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 40° olduğu saptanmıştır.

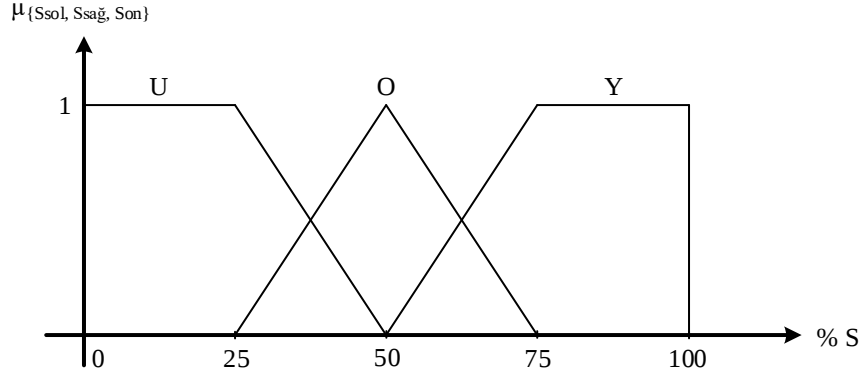
Sensörlerden gelen engel verilerinin yüzdeleri bulanık denetleyicinin giriş değişkenlerini oluşturmaktadır. Bulanık denetleyici çıkışında ise DS’nin girişi olan λ parametresi belirlenmektedir. DS’nin çıkışında ise MÖÜ modelinin ofset değeri olan β parametresi elde edilir. Böylece engelin mesafesine bağlı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



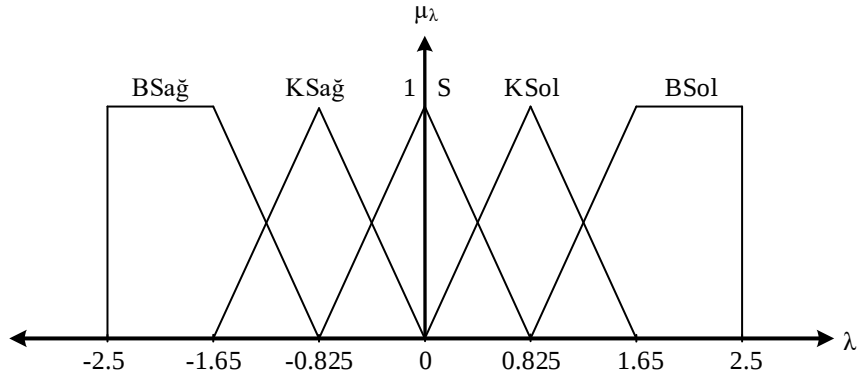
Şekil 4.37. Bulanık denetleyici ile robot balığın otonom kapalı çevrim denetimi

Sistemin yapısına göre bulanık denetleyici olarak Mamdani tipi tercih edilmiştir. Bulanık denetleyicinin bulandırıcıya ait giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları Şekil 4.38’de verilmiştir. Giriş üyelik fonksiyonları engel mesafesinin yüzdelerine 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’nin 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.



(a)



Şekil 4.38. Otonom yüzüş 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 Tablo 4.7’de verilmektedir.

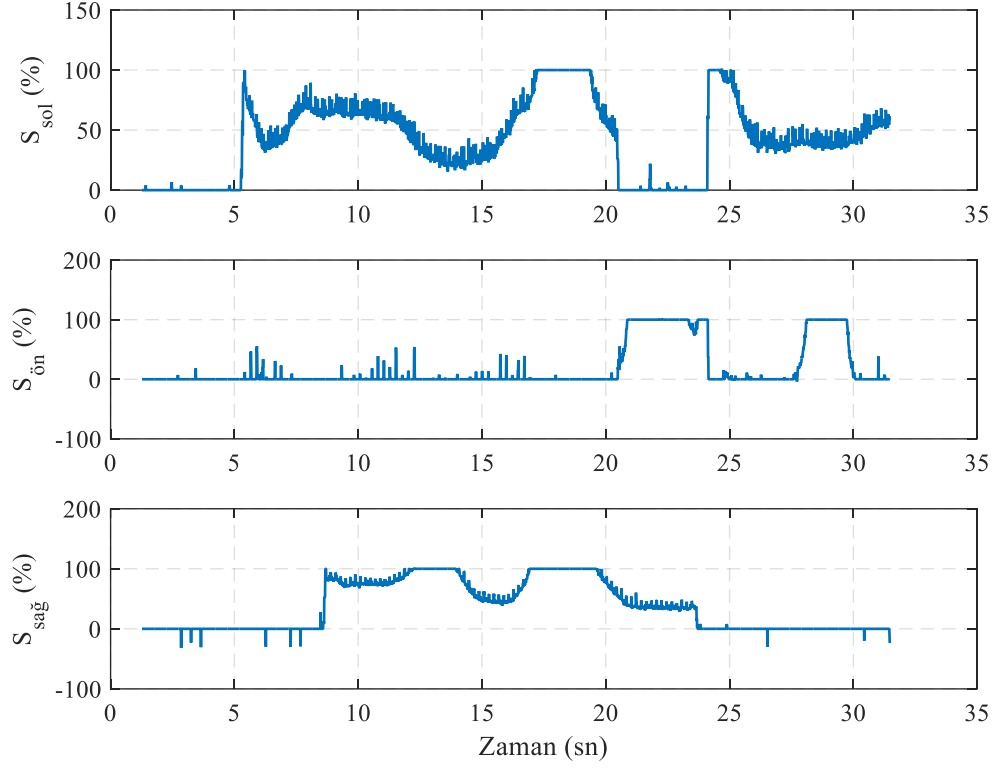
Tablo 4. 7. Engellerden sakınarak otonom yüzüş için oluşturulan bulanık denetleyici kural tablosu

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

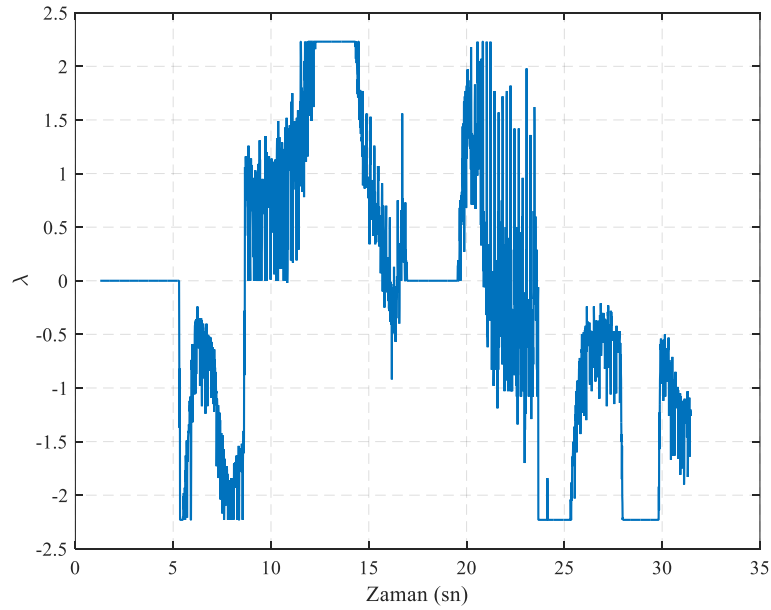
Kural tablosundaki kurallar yine robot balığın açık çevrim analizlerinden elde edilen karakteristikleri ve denetim hassasiyeti dikkate alınarak belirlenmiştir.

Şekil 4.37’de verilen kapalı çevrim denetim yapısının analizi için 30sn süre boyunca rastgele engeller üretilmiştir. Mesafe sensörlerinin karşılaştıkları engeller için ürettikleri ve aynı zamanda bulanık denetleyicinin de giriş değişkenleri olan yüzdelik mesafe ölçümleri

Şekil 4.39'da verilmiştir. Engellerin durumlarına bağlı olarak bulanık denetleyici çıkışından elde edilen ve aynı zamanda DS giriş değişkeni olan λ parametresinin değişimi Şekil 4.40'da sunulmuştur.

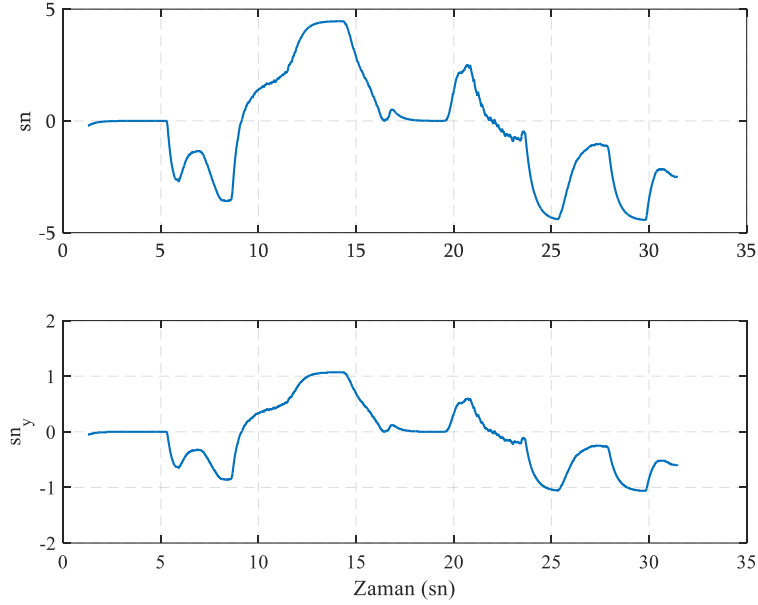


Şekil 4.39. Rasgele engeller için t=30sn süre boyunca mesafe sensörlerinden elde edilen yüzdelerik mesafe verileri

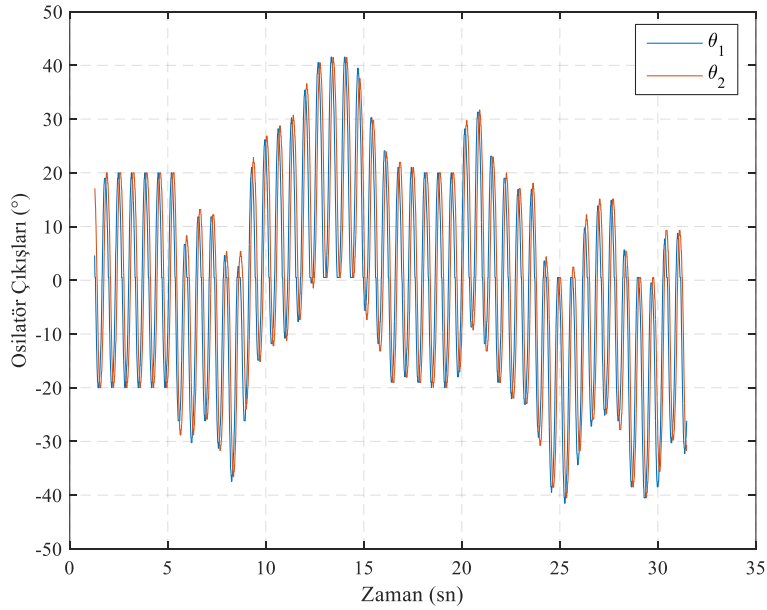


Şekil 4.40. Rasgele engeller için t=30sn süre boyunca bulanık denetleyicinin çıkışı

Bulanık denetleyici çıkışında üretilen uyarıcı λ değerine karşılık DS'nin sahip olacağı zar potansiyeli ve bu potansiyele karşılık gelen hücre çıkışı Şekil 4.41'de verilmiştir. Bu hücre çıkışı aynı zamanda MÖÜ modelinin giriş değişkenidir. Bu giriş değişkenine karşılık üretilen osilatör çıkışları ise Şekil 4.42'de gösterilmektedir. Bu osilatör çıkışları aynı zamanda robot balığın hareketlerini oluşturan eklem açılarıdır.



Şekil 4.41. Duyusal sinir hücresi davranışı



Şekil 4.42. Osilatör çıkışları

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 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.

Bu üç senaryo için tepe kamerasından elde edilen video görüntüleri Kineova programına aktararak robot balık prototipi üzerinde işaretlenen bölgenin izlediği yollar bulunmuştur. Kineova programında analiz edilen video görüntüleri MATLAB ortamında deney zamanlarına bağlı olarak belirlenen örnekleme periyodlarına 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 4.43, 4.44 ve 4.45'de sunulmuştur.



$t=0.92\text{sn}$

$t=2.61\text{sn}$



$t=3.69\text{sn}$

$t=5.08\text{sn}$



$t=7.39\text{sn}$

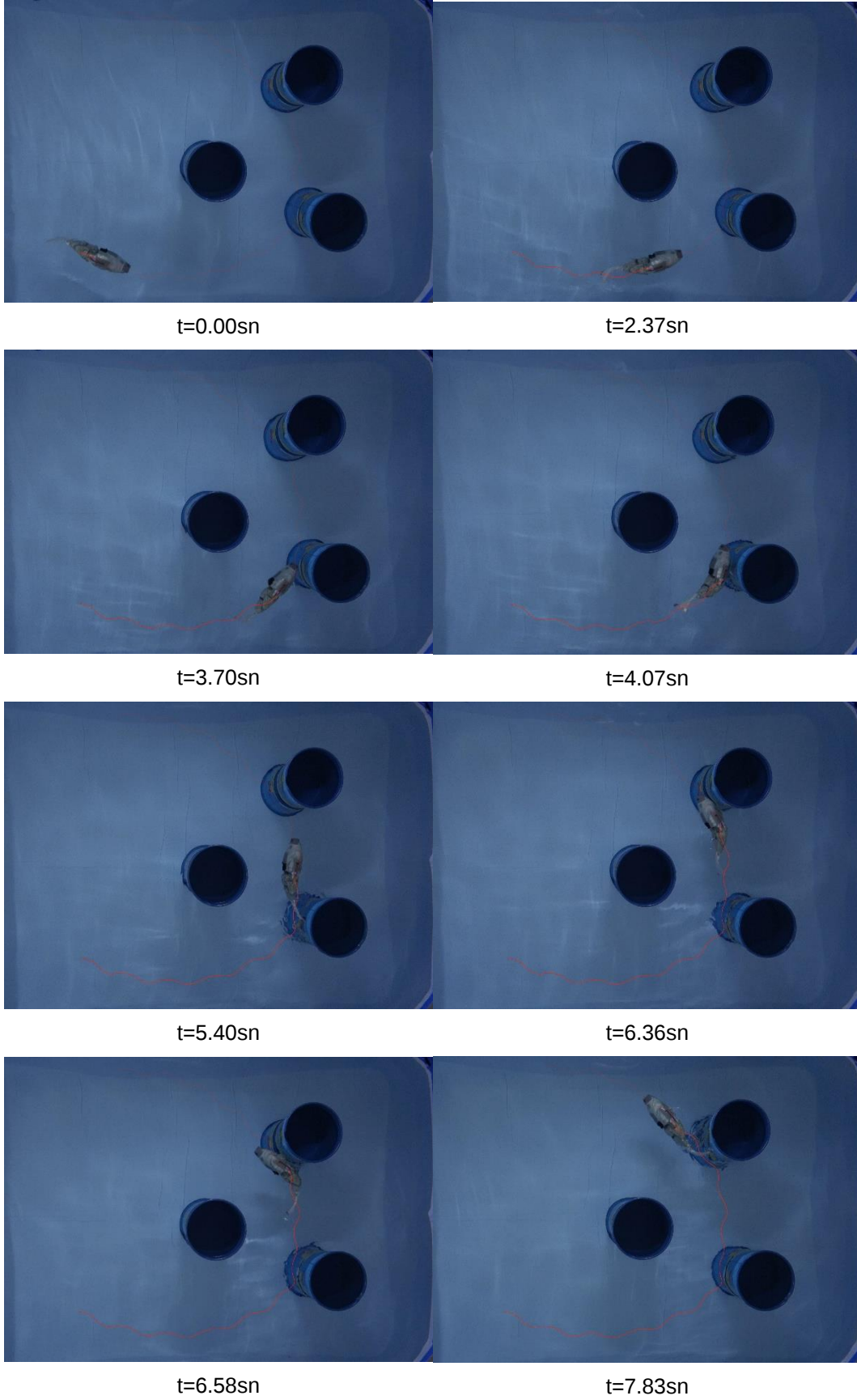
$t=11.09\text{sn}$



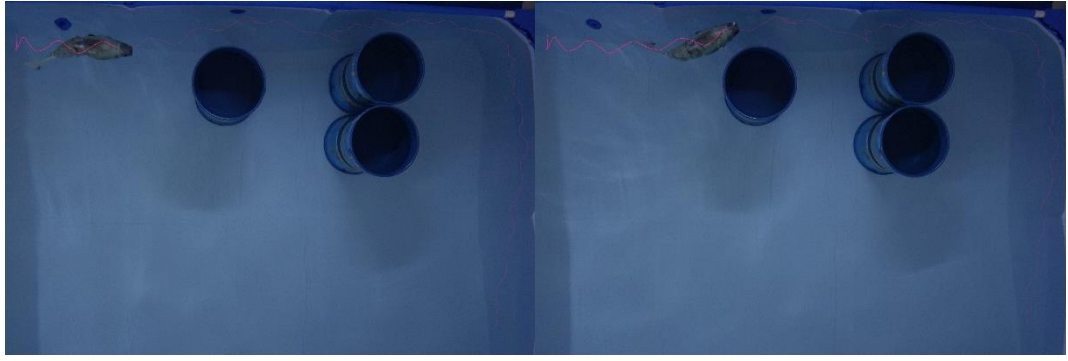
$t=12.94\text{sn}$

$t=16.03\text{sn}$

Şekil 4.43. Birincisenaryoya ait deney görüntüleri

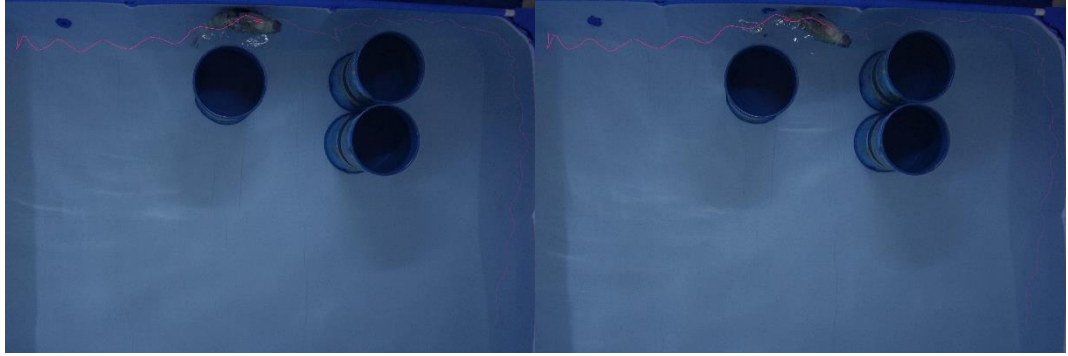


Şekil 4.44. İkinci senaryoya ait deney görüntüleri



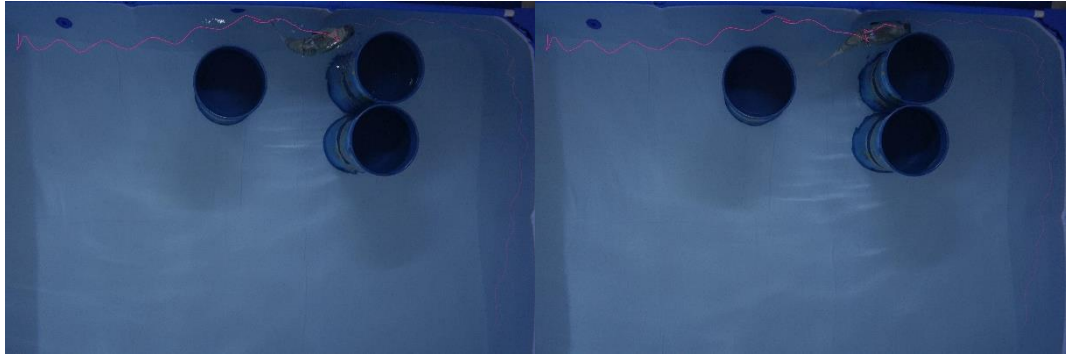
t=0.20sn

t=1.60sn



t=2.84sn

t=3.62sn



t=4.71sn

t=5.95sn



t=6.88sn

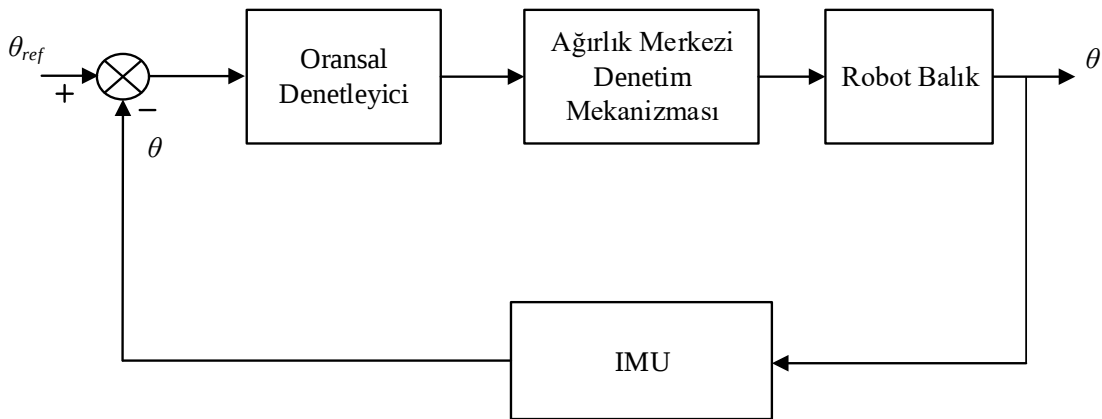
t=8.44sn

Şekil 4.45. Üçüncü senaryoya ait deney görüntüleri

Farklı engel dizilimleri ile oluşturulan üç farklı senaryo için robot balık prototipinin otonom olarak yüzmeye 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.

4.4.3 Robot Balığın Üçüncü Boyut Hareketinin Kapalı Çevrim Denetimi

Robot balık prototipinin üçüncü boyut hareketinin denetimi için Şekil 4.46'da blok şeması verilen kapalı çevrim denetim yapısı kullanılmıştır. Robot balığın dalma ve çıkma hareketleri prototipe üçüncü boyut kabiliyetlerini kazandırmaktadır. 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 istenen referans yunuslama açı değerlerinde kalarak dalma hareketini gerçekleştirmesi hedeflenmiştir. Derinlik seviyesi denetimi deneyinde ise robot balığın bulunduğu derinlik seviyesini koruması için yunuslama açısının 0° 'de tutulması amaçlanmıştır. Yunuslama açı 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 değiştikçe 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.



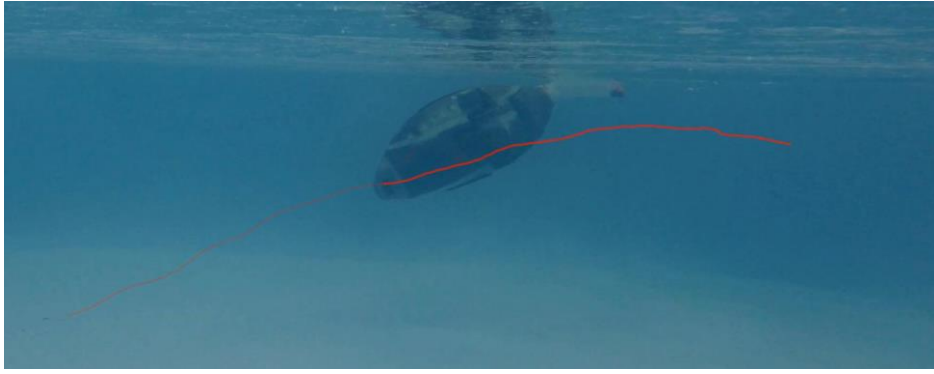
Şekil 4.46. Oransal denetleyici ile yunuslama açısının kapalı çevrim denetimi

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 Kineova 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 Kineova programı aracılığıyla elde edilmiştir. Bu analizlerde örnekleme periyodu 0.04sn olarak seçilmiştir.

Yunuslama açısı denetimi için gerçekleştirilen deneylere ait görüntüler -30° ve -45° referans değerleri için sırasıyla Şekil 4.47 ve 4.48’de sunulmuştur.



t=1.63sn



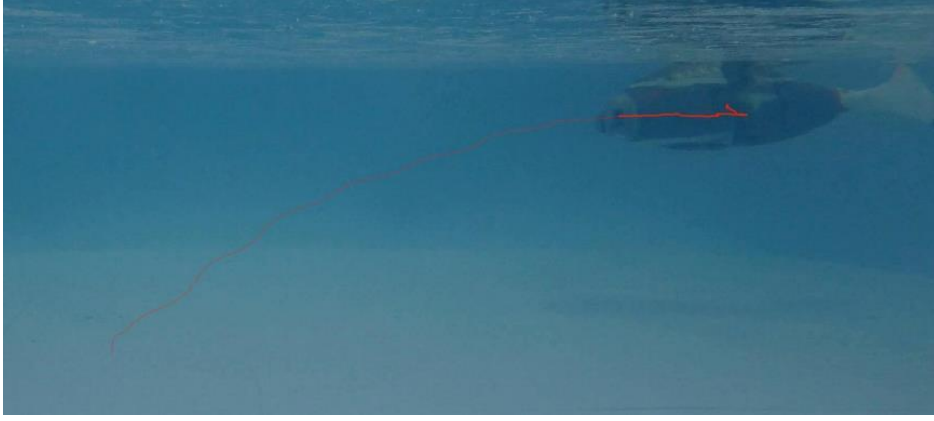
t=3.26sn



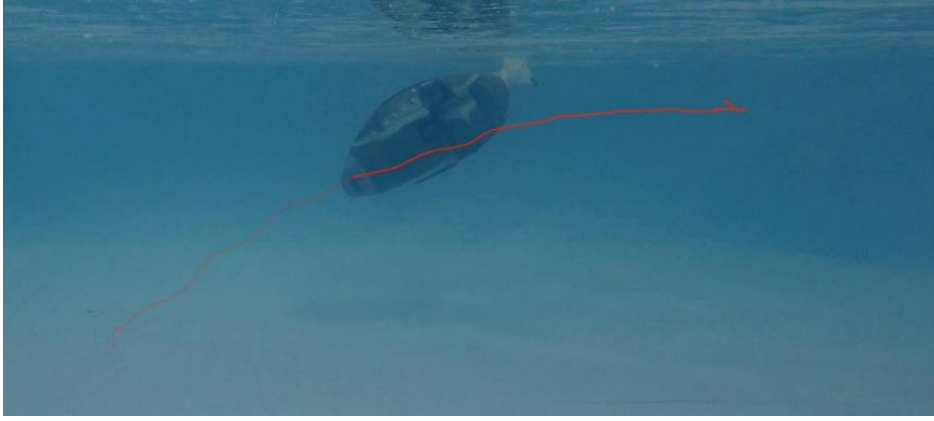
t=4.41sn

Şekil 4.47. -30°'lik yunuslama açısı referansı için deneysel kapalı çevrim görüntüleri

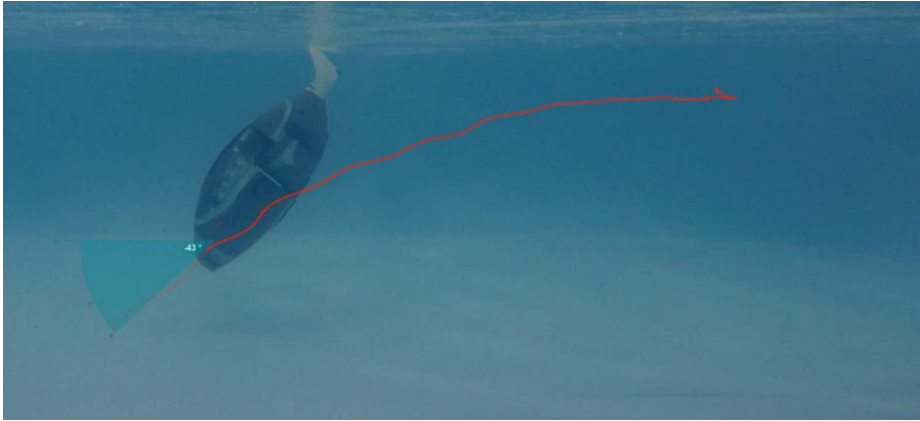
Şekil 4.47’de üç farklı an için görüntüleri verilen yunuslama açısı denetimi deneyi 5sn’lik süre içinde gerçekleştirilmiştir. Robot balığın izlediği yolun eğimi dikkate alındığında prototipin 3.sn sonunda kalıcı durum değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Böylece, görüntünün son 2sn’lik bölümünde Kineova programı kullanılarak yunuslama açısı değeri -28° olarak elde edilmiştir.



t=3.92sn



t=5.64sn

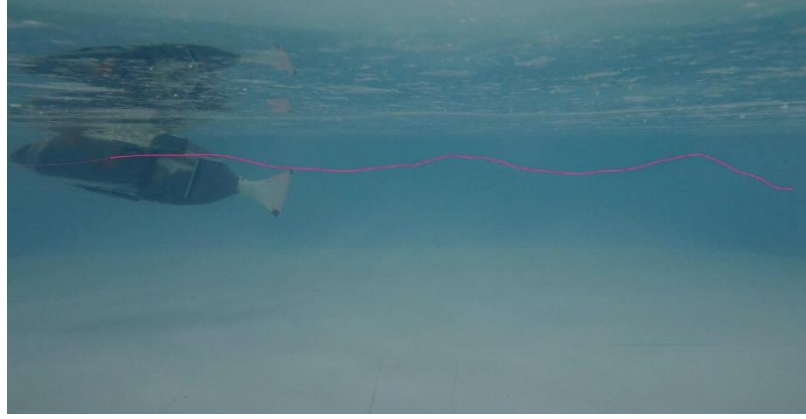


t=6.62sn

Şekil 4.48. -45°'lik yunuslama açısı referansı için deneysel kapalı çevrim görüntüleri

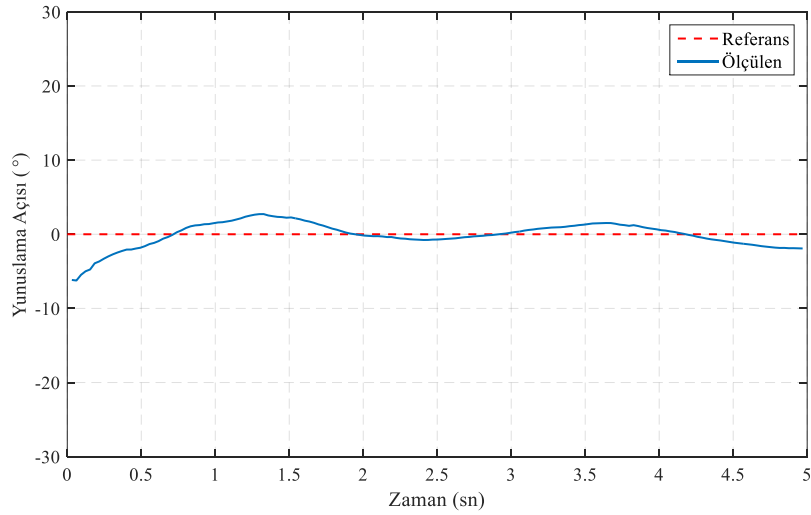
Şekil 4.48'de görülen -45°'lik yunuslama açısı referansı deneyi 7sn'lik süre içinde gerçekleştirilmiştir. Video görüntüsünün son 1sn'lik kısmında robot balığın izlediği yolun eğimi dikkate alındığında kalıcı durum değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu durumda ulaştığı açı değeri Kineova programında -43° olarak elde edilmiştir.

Robot balığın yüzeye yakın, ortada ve tabana yakın olmak üzere üç farklı seviyede bulunduğu seviyeyi koruması için derinlik seviyesi denetimi deneyleri 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 değişimi grafikleri sırasıyla Şekil 4.49, 4.50 ve 4.51’de verilmiştir.



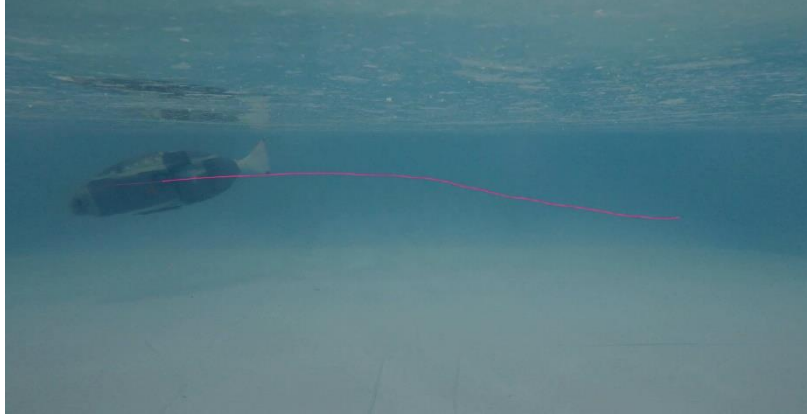
t=4.64sn

(a)



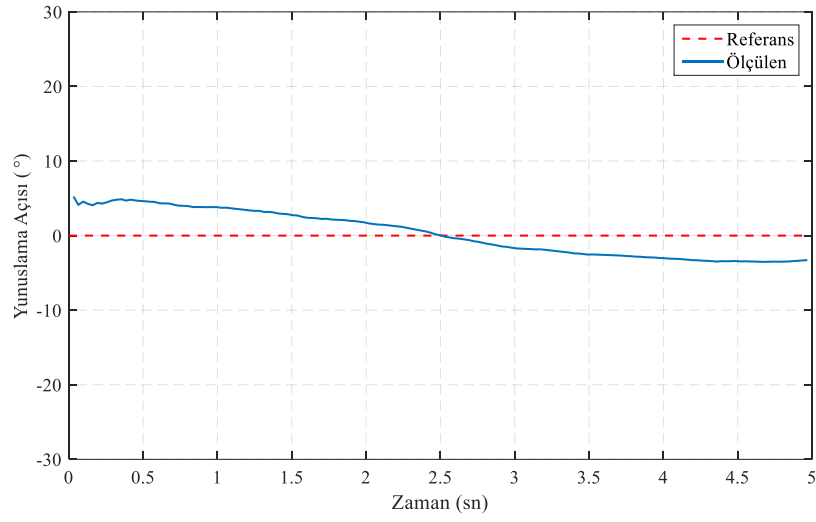
(b)

Şekil 4.49. Yüzeye yakın seviyede derinlik denetimi: (a) Deneysel görüntüler (b) Yunuslama açısının zamana bağlı değişimi grafiği



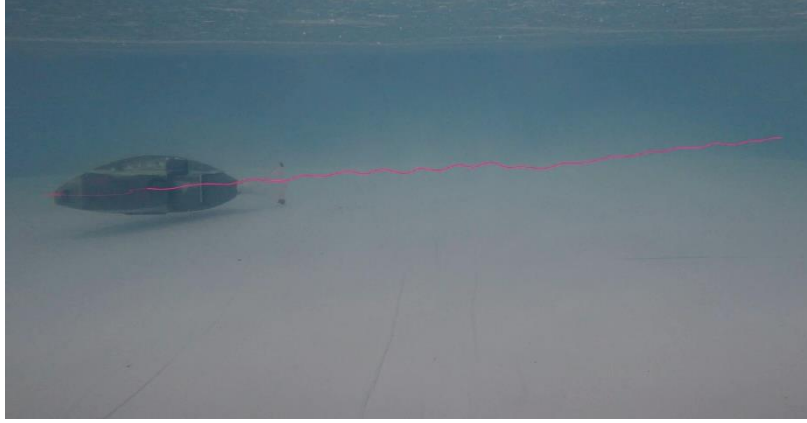
$t=4.75\text{sn}$

(a)



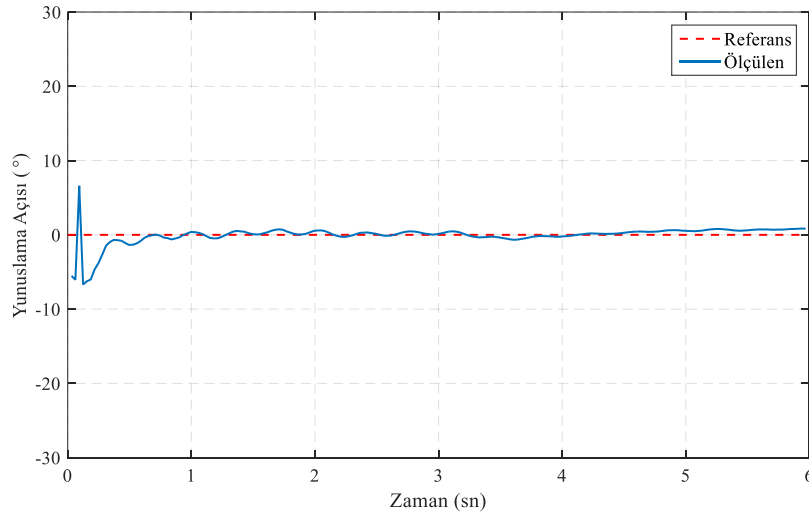
(b)

Şekil 4.50. Orta seviyede derinlik denetimi: (a) Deneysel görüntüler (b) Yunuslama açısının zamana bağlı değişimi grafiği



t=5.63sn

(a)



(b)

Şekil 4. 51. Tabana yakın seviyede derinlik denetimi: (a) Deneysel görüntüler (b) Yunuslama açısının zamana bağlı değişimi grafiği

Derinlik seviyesinin denetimi deneylerine ait görüntüler incelendiğinde, ortalama derinlik seviyelerinin yüze yakın seviye için yaklaşık -12cm, orta seviye için -19cm ve tabana yakın seviye için -39cm civarında olduğu Kineova programı ile hesaplanmıştır. Ayrıca bu deneylere ait yunuslama açısının zamana bağlı değişimi grafikleri irdelendiğinde yaklaşık ortalama 0° civarında yunuslama açılarının elde edildiği görülmektedir. Bu sonuçlar robot balık prototipinin yunuslama açısı ve derinlik seviyesi denetimlerinin etkin bir şekilde başarıldığını göstermektedir.

SONUÇ

114E652 nolu Tübitak 1001 kapsamında gerçekleştirilen bu proje çalışması toplam 32 aylık sürede 1 yürütücü, 2 araştırmacı, 1 danışman ve 3 bursiyer tarafından gerçekleştirilmiştir. Proje çalışmasında, iki eklemlili kuyruk mekanizmasına sahip, BCF tür yüzmeye hareketleri ile otonom bir şekilde üç boyutlu olarak yüzebilen, Carangiform türü, biyomimetik bir robot balık prototipi üretilmiştir.

Prototipin gerçekleştirilmesi:

- ✓ Aynı tür yüzüş şekline sahip gerçek bir balığın fiziksel özelliklerinden faydalanılarak prototipin katı modelinin üç boyutlu olarak SolidWorks ortamında tasarımı,
- ✓ SolidWorks ortamında üç boyutlu olarak tasarlanan robot balık prototipinin SimMechanics ortamına aktararak hareket analizlerinin ileri yön düz yüzüş ve dönüş hareketleri için sanal ortamda gerçekleştirilmesi,
- ✓ Gerçek balık ile SimMechanics ortamında oluşturulan prototipin eklem açılarının uyumluluğunu göstermek için düz yüzüş ve dönüş hareketlerine ait gerçek balık ve SimMechanics görüntülerinin analizi,
- ✓ Lagrange yöntemi kullanılarak prototipe ait dinamik modelin elde edilmesi,
- ✓ Denetleyici tasarımı ve prototipin dinamik modelinin açık ve kapalı çevrim analizlerinin MATLAB benzetim ortamında gerçekleştirilmesi,
- ✓ Beş ana bölümden oluşan prototipin parçalarının 3 Boyutlu yazıcı teknolojisi kullanılarak PLA ile üretimi,
- ✓ Her bir parçanın sızdırmazlığını sağlamak için dış yüzeyinin epoksi reçine ile kaplanması,
- ✓ Parçaların içine dış ortamda tüm analizleri tamamlanmış donanım elemanlarının yerleştirilerek bağlantılarının yapılması,
- ✓ Parçaların montajı,
- ✓ Montajı tamamlanmış bir ana gövde ve iki tahrikli kuyruk ekleminin su sızdırmazlık testlerinin yapılması,
- ✓ Prototipin tüm gövde montajının tamamlanması,
- ✓ Montaj esnasında oluşan mikro gözeneklerin giderilmesi için dış gövdenin sprey boya ile kaplanması,
- ✓ Prototipin su yüzeyinde denge analizinin yapılması,

- ✓ Prototipin açık ve kapalı çevrim performanslarının analizi için programlanması gibi alt süreçlerden oluşmuştur.

Tasarımı, üretimi ve sızdırmazlık analizleri tamamlanan robot balık prototipinin gerçek bir ortamda test edilmesi amacıyla deneysel bir havuz çalışma ortamı olarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel ortamda çarpınma 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 çıkarılması için açık çevrim davranışları analiz edilmiştir. Bu analizlere göre:

- ✓ 2Hz'lik çarpınma frekansında 45° sabit eklem açıları faz farkı değeri için maksimum 0.4224m/sn ileri yön hız değerine $A_1=20$, $A_2=30$ genlik değerleri için ulaşılmıştır ve bu hız değeri gövde uzunluğuna göre 0.8448GU/sn olarak hesaplanmıştır. Kuyruk çarpınma frekansı arttıkça ileri yön hız değeride artmaktadır. Daha büyük genlik değerlerinde ise kuyruk mekanizmasının ürettiği tahrik kuvveti arttığı için ileri yön hız değerleri de daha büyük olmaktadır.
- ✓ Genlik sabit tutularak ($A_1=20$, $A_2=20$) faz değerleri değiştirildiği zaman ise 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 karşın hız değeri artarken, eklemlere uygulanan açılar arasındaki faz farkı arttıkça kuyruk mekanizmasının ürettiği tahrik kuvveti azaldığından ileri yön hız değerleri azalmaktadır.
- ✓ Robot balığın minimum dönüş yarıçapı 1Hz çarpınma frekansında 0.4387m olarak elde edilmiştir. Robot balığın dönüş hareket analizlerinde sabit frekans değerleri için ofset artışına karşılık dönüş yarıçapının azaldığı görülmektedir. Deneysel çalışmalar $f=[0.5, 1, 1.5, 2]\text{Hz}$ olmak üzere dört farklı çarpınma frekansı için gerçekleştirilmiştir. Düşük frekans değerinde sabit ofset değerine karşılık daha büyük frekans değerlerine göre dönüş yarıçapının daha büyük olduğu gözlemlenmektedir.
- ✓ Robot balığın maksimum çizgisel hızı 2Hz çarpınma frekansında 0.3266m/sn olarak elde edilmiştir. Ayrıca, robot balık prototipi için maksimum çizgisel dönüş hızı gövde uzunluğuna göre 0.6532GU/sn olarak hesaplanmıştır. 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.

- ✓ Robot balığın maksimum açısal hızı 2Hz çarpınma frekansında 0.62rad/sn olarak elde edilmiştir. Çizgisel dönüş hızının aksine sabit genlik ve frekans değerleri için ofset artışı ile açısal dönüş hızının arttığı görülmektedir. Ofset değerinin artışı robot balığın dönüş hareketinin yatay x eksenini ile yaptığı dönüş açısının da artmasına sebep olduğundan hem dönüş yarıçapının azalmasına hemde açısal dönüş hızının artmasına sebep olmaktadır. Aynı zamanda, sabit ofset değerleri için çarpınma frekansının artışı ile çizgisel ve açısal hız değerleri de artmaktadır.

Kapalı çevrim denetim performansını göstermek için sapma açısının denetimi, yunuslama açısının denetimi ve engellerden sakınarak robot balık prototipinin otonom olarak yüzmesine ait üç boyutlu eksenlerde hareket kabiliyetleri analiz edilmiştir. 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 0.8.26 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 ulaşarak kalıcı durumda küçük salınımlar ile referans giriş değerlerinde kaldıkları gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar bulanık denetleyicinin sapma 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 balık rastgele yüzme hareketleriyle ilerlerken doğal bir ortamda karşılaşması muhtemel birbirine yakın 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 gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında robot balığın doğal bir ortamda yüzebilmesi için bir zemin oluşturulmuştur.

- ✓ 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 istenen referans yunuslama açısı değerlerinde kalarak dalma hareketini gerçekleştirmesi hedeflenmiştir. Derinlik seviyesi denetimi deneyinde 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 performansının da oldukça iyi olduğu gözlemlenmiştir. Kalıcı durum cevaplarında yaklaşık bir kaç derecelik hatalar ile istenilen referans değerleri yakalanmıştır. Bu cevaplar literatürdeki benzer çalışmalar ile birlikte değerlendirildiğinde robot balık prototipinin üçüncü boyut hareketleri için performansının oldukça iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu proje çalışmalarından elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, biyomimetik bir insansız su altı robot çalışmasının hem akademik hem de teknolojik açıdan çok sayıda çıktısının oluşmasından dolayı gelecekte konuyla bağlantılı başka projelere de bir zemin oluşturduğu görülmüştür. Bu çalışmada karşılaşılan problemler dikkate alındığında:

- ✓ Robot balığın üretimi için kullanılan 3 Boyutlu yazıcı teknolojisi yerine parça dış yüzeyinde gözenek barındırmayan daha gelişmiş bir yöntem tercih edilebilir. Böylece sızdırmazlık daha kolay sağlanabilir.
- ✓ Dayanıklılığı ve basınç dayanımını arttırmak için yine balık gövde ve eklem parçalarının daha yüksek bir teknoloji kullanılarak basılması hem montaj için hem de daha geniş alanlara hitap etmek için tercih edilebilir.

KAYNAKLAR

- Akpolat, Z. H., Bingöl, M., Ay, M., Özmen Koca, G., Bal, C., Korkmaz, D., 2017. "Dynamic Model and Simulation of One Active Joint Robotic Fish", e-Journal New World Sci. Acad., 12, 29–39.
- Bal, C., 2007. "Asenkron Motorun Kayma Kipli ve Sinirsel Bulanık Gözlemleyicilerle Algılayıcısız Hız Denetimi", Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Chan, W. L., Kang, T., Lee, Y. J., 2009. "Experimental characterization of ostraciiform swimming with rigid caudal fins ", IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 222-227, 22-25 Şubat.
- Chong, C.W., Zhong, Y., Zhou, C.L., Low, K.H., Seet, G.L.G., Lim, H.B. 2009. "Can the swimming thrust of BCF biomimetics fish be enhanced?", IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 437-442.
- Chowdhury, A.R., Panda, S.K., 2014. "Kinematic parameter based behaviour modelling and control of a bio-inspired robotic fish", 2014 Proceedings of the SICE Annual Conference (SICE), 319-324, 9-12 Eylül.
- Chowdhury, A.R., Prasad, B., Kumar, V., Kumar, R., Panda, S.K., 2011. "Design, modeling and open-loop control of a BCF mode bio-mimetic Robotic Fish", 2011 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 226-231, 1-5 Kasım.
- Chowdhury, A.R., Vishwanathan, V., Prasad, B., Kumar, R., Panda, S.K., 2014. "Inverse dynamics control of a bio-inspired robotic-fish underwater vehicle propulsion based on Lighthill slender body theory", OCEANS 2014 – TAIPEI, 1-6, 7-10 Nisan.
- Clapham, R.J., Huosheng Hu, 2014. "iSplash-I: High performance swimming motion of a carangiform robotic fish with full-body coordination", 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 322-327, Mayıs 31 -Haziran 7.
- Colgate, J. E., Lynch, K. M., 2004. "Mechanics and control of swimming: A review", IEEE J. Ocean. Eng., 29, 660–673.
- Crespi, A., Lachat, D., Pasquier, A., Ijspeert, A. J., 2008. "Controlling swimming and crawling in a fish robot using a central pattern generator", Auton. Robots, 25, 3–13.
- Ding, R., Junzhi Yu, Yang, Q., Tan, M., Zhang, J., 2009. "CPG-based dynamics modeling and simulation for a biomimetic amphibious robot", 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 1657-1662, 19-23 Aralık.
- Ding, R., Yu, J., Yang, Q., Tan, M., 2013. "Dynamic modelling of a CPG-controlled amphibious biomimetic swimming robot: Regular paper", Int. J. Adv. Robot. Syst., 10.
- El Daou, H., Salumae, T., Toming, G., Kruusmaa, M., 2012. "A bio-inspired compliant robotic fish: Design and experiments", 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 5340-5345, 14-18 Mayıs.

- Gay, S., Santos-Victor, J., Ijspeert, A. J., 2013. "Learning Robot Gait Stability using Neural Networks as Sensory Feedback Function for Central Pattern Generators", IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. , 1–8.
- Goldschmidt, D., Wörgötter, F., Manoonpong, P., 2014 "Biologically-inspired adaptive obstacle negotiation behavior of hexapod robots", Front. Neurobot., 8, 1–16.
- Hong, W., Jigang, X., Xingsong, W., Jialin, X., 2012. "Design and implementation of a single actuated bio-mimetic robotic fish", 2012 International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 237-242, 5-8 Ağustos.
- Hu, Y., Liang, J., Wang, T., 2014. "Parameter synthesis of coupled nonlinear oscillators for CPG-based robotic locomotion", IEEE Trans. Ind. Electron, 61, 6183–6193.
- Hu, Y., Tian, W., Liang, J., Wang, T., 2011. "Learning fish-like swimming with a CPG-based locomotion controller", IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst., 1863–1868.
- Hu, Y., Zhang, S., Liang, J., Wang, T. 2014. "Development and CPG-based control of a biomimetic robotic fish with advanced underwater mobility", 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 813-818, Mayıs 31-Haziran 7.
- Hu, Y., Zhang, S., Liang, J., Wang, T., 2014. "Development and CPG-based control of a biomimetic robotic fish with advanced underwater mobility", Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom., 813–818.
- Hu, Y., Zhao, W., Wang, L., Jia, Y. 2009. "Underwater target following with a vision-based autonomous robotic fish", American Control Conference, 5265-5270, 10-12 Haziran.
- Hu, Y., Zhao, W., Wang, L., 2009. "Vision-Based Target Tracking and Collision Avoidance for Two Autonomous Robotic Fish", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56, 1401-1410.
- Hu, Y., Zhao, W., Wang, L., Jia, Y., 2008 "Neural-based control of modular robotic fish with multiple propulsors", Proc. IEEE Conf. Decis. Control, 5232–5237.
- Hui, Y., Shen, A., Liang, P., 2012. "A new Autonomous Underwater Robotic Fish designed for water quality monitoring", 2012 Proceedings of International Conference on Modelling, Identification & Control (ICMIC), 561-566, 24-26 Haziran.
- Huss, M., 2007. "Computational modeling of the Lamprey CPG", Stockholm University.
- Ijspeert, A. J. 2008. "Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review.", Neural Networks, 21, 642–653.
- Ijspeert, A. J., Crespi, A., Cabelguen, J. M., 2005. "Simulation and Robotics Studies of Salamander Locomotion: Applying Neurobiological Principles to the Control of Locomotion in Robots", Neuroinformatics, 3, 171–196.
- Jeong, I. B., Park, C.S., Na, K. I., Han, S., Kim, J. H., 2011. "Particle swarm optimization-based central patter generator for robotic fish locomotion", 2011 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), 152-157, 5-8 Haziran.

- Kim, D. H., Lee, S., Park, J., 2008. "Design of central pattern generators (CPGS) for trajectory tracking of fish-mimetic robots", Proc. 7th WSEAS Int. Conf. Comput. Intell. man-machine Syst. Cybern. World Sci. Eng. Acad. Soc., 7, 191–196.
- Lachat, D., Crespi, A., Ijspeert, A. J., 2016. "BoxyBot: a swimming and crawling fish robot controlled by a central pattern generator", 1. International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 643-648, 20-22 Şubat.
- Hong, Y. D., 2015. "Evolutionary Optimization Approach for Optimal Hopping of Humanoid Robots", Journal of Electrical Engineering and Technology, 10 (6), 709-715.
- Lee, D., Kim, D., Myung, H., 2011. "Planar marker-based localization of a robotic fish in a public aquarium", 2011 11th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), 448-453, 26-29 Ekim.
- Li, G., Zhang, H., Zhang, J., Bye, R. T., 2014. "Development of adaptive locomotion of a caterpillar-like robot based on a sensory feedback CPG model", Adv. Robot., 28, 389–401.
- Li, G., Zhang, H., Li, W., Hildre, H. P., Zhang, J., 2014. "Design of neural circuit for sidewinding of snake-like robots", 2014 IEEE Int. Conf. Inf. Autom. ICIA, 333–338.
- Li, L., Wang, C., Xie, G., Shi, H., 2014. "Digital implementation of CPG controller in AVR system", Proc. 33rd Chinese Control Conf. CCC, 8293–8298.
- Li, L., Wang, C., Xie, G., 2015. "A general CPG network and its implementation on the microcontroller", Neurocomputing, 167, 299–305.
- Li, L., Wang, C., Xie, G., 2014. "Modeling of a carangiform-like robotic fish for both forward and backward swimming: Based on the fixed point", 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 800-805, Mayıs 31-Haziran 7 .
- Lilly, J. H., 2010. "Fuzzy Control and Identification", 2010, ISBN 9780470542774.
- Liu, C. C., Tsai, A. C., Lin, T. T., Hung, S. C., 2008. "Design and Implementation of an Intelligent Robotic Fish", IEEE International Conference on Advanced Robotics and its Social Impacts Taipei, 1-5, 23-25 Ağustos.
- Liu, C., Wang, D., Goodman, E. D., Chen, Q., 2016. "Adaptive Walking Control of Biped Robots Using Online Trajectory Generation Method Based on Neural Oscillators", J. Bionic Eng., 13, 572–584.
- Liu, J., Hu, H., 2006. "Biologically Inspired Behaviour Design for Autonomous Robotic Fish", Int. J. Autom. Comput., 4, 336–347.
- Liu, H., Hu, H., 2010a. "Biological Inspiration: From Carangiform Fish to Multi-Joint Robotic Fish", Journal of Bionic Engineering, 7, 35 -48 Mart.
- Liu, J., Hu, H., 2010b. "Biological Inspiration: From Carangiform Fish to Multi-Joint Robotic Fish", J. Bionic Eng., 7, 35–48.

- Ma, H., Bi, S., Cai, Y., Zhang, L., Gao, J., 2013. "Pitching stability modeling and analysis of robotic fish propelled by oscillating flexible pectoral fins", IEEE International Symposium on Robotics and Biomimetics, 830 – 835, 12-14 Aralık.
- Makrodimitris, M., Aliprantis, I., Papadopoulos, E., 2014. "Design and implementation of a low cost, pump-based, depth control of a small robotic fish", 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 1127-1132, 14-18 Eylül.
- Mazlan, A.N.A., McGookin, E., 2012. "Modelling and control of a biomimetic autonomous underwater vehicle", 2012 12th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV), 88-93, 5-7 Aralık.
- Nguyen, L. P., Do, P. V., Lee, R. B., 2013. "Dynamic Modeling and Experiment of a Fish Robot with a Flexible Tail Fin", Journal of Bionic Engineering, 10, 39-45.
- Niu, X., Xu, J., 2014. "Modeling, Control and Locomotion Planning of an Anguilliform Robotic Fish", Unmanned Syst, 2, 295–321.
- Niu, X., Xu, J., Ren, Q., Wang, Q., 2014. "Locomotion Learning for an Anguilliform Robotic Fish Using Central Pattern Generator Approach", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61, 9, 4780-4787.
- Özmen Koca, G., 2010. "Dört Kol Mekanizmalı Mekatronik Bir Sistemin Akıllı Yöntemlerle Kontrolü", Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Papadopoulos, E., Apostolopoulos, E., Tsigkourakos, P. 2009. "Design, control, and experimental performance of a teleoperated robotic fish", 17th Mediterranean Conference on Control and Automation, 766-771, 24-26 Haziran.
- Raj, A., Thakur, A., 2016. "Fish-inspired robots: design, sensing, actuation, and autonomy - a review of research", Bioinspiration and Biomimetics, 11, 1–23.
- Ren, Q., Xu, J., Fan, L., Niu, X., 2013. "A GIM-Based Biomimetic Learning Approach for Motion Generation of a Multi-Joint Robotic Fish", Journal of Bionic Engineering, 10, 423-433.
- Ren, Q., Xu, J., Guo, Z., Ru, Y., 2014. "Motion Control of a multi-joint robotic fish based on biomimetic learning", 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 1566-1571, 1-4 Haziran.
- Ren, Q., Xu, J., Yang, S., Yan, L. 2014. "Design and implementation of a biomimetic robotic fish with 3D locomotion" 11th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA), 139-144, 18-20 Haziran.
- Rigatos, G., 2014. "Robust synchronization of coupled neural oscillators using the derivative-free nonlinear Kalman Filter", Cogn. Neurodyn., 8, 465–478.
- Righetti, L., Ijspeert, A. J., 2008. "Pattern generators with sensory feedback for the control of quadruped locomotion.", Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom, 819–824.

- Romero, P., Sensale, R. B., Astessiano, D., and Canetti, R., 2013. "Fishe: A cost-effective intelligent autonomous robot fish, Advanced Robotics (ICAR), 2013 16th International Conference on, 1 – 6, 25-29 Kasım.
- Scaradozzi, D., Palmieri, G., Costa, D., Pinelli, A., 2017. "BCF swimming locomotion for autonomous underwater robots: a review and a novel solution to improve control and efficiency", Ocean Eng., 130, 437–453.
- Seo, K., Chung, S. J., Slotine, J. J. E., 2010. "CPG-based control of a turtle-like underwater vehicle", Auton. Robots, 28, 247–269.
- Sfakiotakis, M., Gliva, R., Mountoufaris, M., 2016. "Steering-plane motion control for an underwater robot with a pair of undulatory fin propulsors", 24th Mediterr. Conf. Control Autom., 496–503.
- Sfakiotakis, M., Lane, D. M., Bruce, C., Davies, C., 1999. "Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion", IEEE Journal of oceanic eng., 24, 237–252.
- Su, Z., Yu, J., Tan, M., Zhang, J., 2011. "A closed-loop method to generate fast C-start for a robotic fish", 2011 International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 365-370, 7-10 Ağustos.
- Su, Z., Yu, J., Tan, M., Zhang, J., 2009. "Bio-inspired design of body wave and morphology in fish swimming based on linear density", IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 1803-1808, 19-23 Aralık.
- Suebsaiprom, P., Lin, C. L., Engkaninan A. 2017. "Undulatory locomotion and effective propulsion for fish-inspired robot", Control Eng. Pract., 58, 66–77.
- Suebsaiprom, P., Lin, C. L., 2016. "Sliding mode path tracking control for fish-robot under ocean current perturbation", IEEE Int. Conf. Control Autom. ICCA, 972–977.
- Suebsaiprom, P., Lin, C. L., 2015. "Maneuverability modeling and trajectory tracking for fish robot", Control Eng. Pract., 45, 22–36.
- Takagi, T., Sugeno, M., 1993. "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control", In Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems; Elsevier, 387–403 ISBN 9781483214504.
- Wang, C., Xie, G., Wang, L., Cao, M., 2011. "CPG-based locomotion control of a robotic fish: Using linear oscillators and reducing control parameters via PSO", Int. J. Innov. Comput. Inf. Control, 7, 4237–4249.
- Wang, H. O., Tanaka, K., Griffin, M. F., 1996. "An approach to fuzzy control of nonlinear systems: Stability and design issues", IEEE Trans. Fuzzy Syst., 4, 14–23.
- Wang, J., Chen, S., Tan, X., 2013. "Design of High Speed Robotic Fish", 13th International Conference on Control, 894 – 896, 20-23 Ekim.
- Wang, L., Wang, S., Cao, Z., Tan, M., Zhou, C., Sang, H., Shen, Z., 2005. "Motion control of a robot fish based on CPG", Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol., 1263–1268.

- Wang, M., Yu, J., Tan, M., “CPG-based sensory feedback control for bio-inspired multimodal swimming”, *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, 11, 1–11.
- Wang, M., Yu, J., Tan, M., 2009. “Modeling neural control of robotic fish with pectoral fins using a CPG-based network”, *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control*, 6502-6507, 15-18 Aralık.
- Wang, M., Yu, J. Z., Tan, M., Zhang, J. W., 2012. “Multimodal swimming control of a robotic fish with pectoral fins using a CPG network”, *Chinese Sci. Bull.*, 57, 1209–1216.
- Wang, T., Wen, L., Liang, J., Wu, G., 2010. “Fuzzy Vorticity Control of a Biomimetic Robotic Fish Using a Flapping Lunate Tail”, *Journal of Bionic Engineering*, 7, 56 -65 Mart.
- Wang, W., Xie, G., Shi, H., 2014. “Dynamic modeling of an ostraciiform robotic fish based on angle of attack theory”, *2014 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 3944-3949, 6-11 Temmuz.
- Wang, W., Xie, G., 2014. “CPG-based Locomotion Controller Design for a Boxfish-like Robot”, *Int J Adv Robot Syst*, 11:87.
- Wang, W., Guo, J., Wang, Z., Xie, G., 2013. “Neural controller for swimming modes and gait transition on an ostraciiform fish robot”, *2013 IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics Mechatronics Hum. Wellbeing*, 1564–1569.
- Wang, W., Gu, D., Xie, G., 2017. “Autonomous Optimization of Swimming Gait in a Fish Robot With Multiple Onboard Sensors”, *IEEE transactions on systems*, 1–13.
- Wang, Z., He, B., Shen, R., Meng, W., 2015. “Contact impact inhibition strategy for biped robot walking based on central pattern generator”, *2015 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, IEEE-ROBIO*, 733–73.
- Weibing, W., Junzhi, Y., Ming, W., Rui, D., 2010. “Mechanical design and preliminary realization of robotic fish with multiple control surfaces”, *29th Chinese Control Conference*, 3758 – 3762, 29 -31 Temmuz.
- Wu, Z. X., Yu, J. Z., Su, Z. S., Tan, M., Li, Z. L., 2015. “Towards an *Esox lucius* inspired multimodal robotic fish”, *Sci. China Inf. Sci.*, 58, 1–13.
- Wu, Z., Yu, J., Su, Z., Tan, M., 2013. “An Improved Multimodal Robotic Fish Modelled After *Esox Lucius*”, *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 516 – 521, 12-14 Aralık.
- Wu, Z., Yu, J., Tan, M., Zhang, J., 2014. “Kinematic Comparison of Forward and Backward Swimming and Maneuvering in a Self-Propelled Sub-Carangiform Robotic Fish”, *Journal of Bionic Engineering*, 11, 199-212.
- Wu, Z., Yu, J., Tan, M., Zhang, J., 2014. “Kinematic comparison of forward and backward swimming and maneuvering in a self-propelled sub-carangiform robotic fish”, *J. Bionic Eng.*, 11, 199–212.

- Wu, Z., Yu, J., Su, Z., Tan, M., 2014. "Implementing 3-D high maneuvers with a novel biomimetic robotic fish", IFAC Proc., 19, 4861–4866.
- Wu, Z., Yu, J., Tan, M., 2012. "CPG parameter search for a biomimetic robotic fish based on particle swarm optimization", 2012 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, ROBIO 2012 - Conf. Dig., 563–568.
- Wu, Z., Wang, M., Yu, J., Member, S., Wu, Z., Wang, M., Tan, M., 2015. "CPG Network Optimization for a Biomimetic Robotic Fish via PSO CPG Network Optimization for a Biomimetic Robotic Fish via PSO", IEEE trans. on neural netw. And learning syst., 27, 1–7.
- Xu, J., Ren, Q., Guo, Z., and Niu, X., 2013. "Motion control for a multi-joint robotic fish with the pectoral fins assistance", IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1 – 6, 28-31 Mayıs.
- Xu, J. X., Niu, X. L., Ren, Q. Y., Wang, Q. G., 2012. "Collision-free motion planning for an Anguilliform robotic fish", 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 1268-1273, 28-31 Mayıs.
- Xu, J. X., Niu, X. L., 2011. "Gait generation and sliding mode control design for anguilliform biomimetic robotic fish", IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 3947-3952, 7-10 Kasım.
- Yan, Q., Shang, W., Zhu, Q., Zhang, S., 2013. "A Study on the Swimming Performance and the Maneuverability of a Robotic Fish with Modular Design", Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 1013 – 1018, 12-14, Aralık.
- Yang, G.H., Lee, S. H., Lee, H. J., Ryuh, Y. S., 2012. "Implementation and navigation of a 3-DOF fish robot 'Ichthus V5.5'", 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 1045-1049, 11-14 Aralık.
- Yang, H. G., Ryuh, Y., 2013. "Design of High Speed Fish-like Robot", 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, 451 – 453, Ekim 30- Kasım. 2.
- Yu, J., Ding, R., Yang, Q., Tan, M., 2013a. "Amphibious Pattern Design of a Robotic Fish with Wheel-propeller-fin Mechanisms", Journal of Field Robotics, 702-716.
- Yu, J., Wang, M., Su, Z., Tan, M., Zhang, J. 2013b. "Dynamic modeling of a CPG-governed multijoint robotic fish", Adv. Robot., 27, 275–285.
- Yu, J., Yi, C., 2009. "Analysis of Relationship between Efficiency and Motion Parameters of Robotic Fish" IHMSC '09, International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, 401-404, 26-27 Ağustos.
- Yu, J., Chen, S., Wu, Z., Wang, W., 2016. "On a miniature free-swimming robotic fish with multiple sensors", Int. J. Adv. Robot. Syst., 13.

- Yu, J., Tan, M., Chen, J., Zhang, 2014a. "J. A survey on CPG-inspired control models and system implementation", IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst., 25, 441–456.
- Yu, J., Wang, K., Tan, M., Zhang, J., 2014b. "Design and control of an embedded vision guided robotic fish with multiple control surfaces", Sci. World J., doi:10.1155/2014/631296.
- Yu, J., Wang, C., Xie, G., 2016. "Coordination of Multiple Robotic Fish with Applications to Underwater Robot Competition", IEEE Trans. Ind. Electron., 63, 1280–1288.
- Yu, J., Wang, M., Su, Z., Tan, M., Zhang, J., 2011. "Dynamic modeling and its application for a CPG-coupled robotic fish", 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 159-164, 9-13 Mayıs.
- Yu, J., Wang, S., Tan, M. A., 2005. "Simplified propulsive model of bio-mimetic robot fish and its realization", Robotica, 23, 101–107.
- Zadeh, L. A., 1965. "Fuzzy sets", Information and Control, 8 (3), 338–353.
- Zhang, H., Chen, L. L., 2009. "The research on the nonlinear control of carangiform biomimetic robotic fish", ICMA 2009, International Conference on Mechatronics and Automation, 3207-3211, 9-12 Ağustos.
- Zhang, D. B., Hu, D. W., Shen, L. C., Xie, H. B., 2006. "A Bionic Neural Network for Fish-Robot Locomotion", J. Bionic Eng., 3, 187–194.
- Zhang, S., Qian, Y., Liao, P., Qin, F., Yang, J., 2016. "Design and Control of an Agile Robotic Fish with Integrative Biomimetic Mechanisms", IEEE/ASME Trans. Mechatronics, 21, 1846–1857.
- Zhang, F., Wang, J., Thon, J., Thon, C., Litchman, E., Tan, X., 2014. "Gliding robotic fish for mobile sampling of aquatic environments", 2014 IEEE 11th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC), 167-172, 7-9 Nisan.
- Zhao, W., Hu, Y., Wang, L. 2009. "Leader-following formation control of multiple vision-based autonomous robotic fish ", 28th Chinese Control Conference Decision and Control, 579-584, 15-18 Aralık.
- Zhao, W., Hu, Y., Zhang, L., Wang, L., 2009. "Design and CPG-based control of biomimetic robotic fish", IET Control Theory & Applications, 3, 281-293.
- Zhong, Y., Chong, C.W., Zhou, C., Seet, G., Low, K.H. 2009. "Performance predict model for a body and caudal fin (BCF) biomimetics fish robot", IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 1230-1235, 14-17 Temmuz.
- Zhou, C., Chong, C.W., Zhong, Y., Low, K.H. 2009. "Robust gait control for steady swimming of a carangiform fish robot ", IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 100-105, 14-17 Temmuz.

- Zhou, C., Tan, M., Cao, Z., Wang, S., Creighton, D., Gu, N., Nahavandi, S., 2008a "Kinematic Modeling of a Bio-Inspired Robotic Fish", 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation , 695-699, 19-23 Mayıs.
- Zhou, C., Cao, Z., Wang, S., Tan, M., 2008b. "The Dynamic Analysis of the Backward Swimming Mode for Biomimetic Carangiform Robotic Fish", 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Acropolis Convention Center, 3072-3076, 22-26 Eylül.
- Zhou, C., Low, K. H., 2014. "On-line optimization of biomimetic undulatory swimming by an experiment-based approach", J. Bionic Eng., 11, 213–225.
- Zhu, M., Xu, W., Cheng, L. K., 2017. "Esophageal peristaltic control of a soft-bodied swallowing robot by the central pattern generator", IEEE/ASME Trans. Mechatronics, 22, 91–98.
- Zhu, Q., Zhong, K., Xie, G., 2014. "Speed estimation for robotic fish based on pressure sensor", The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC), 2714-2718, Mayıs 31 -Haziran 2.
- Zhu, Y., Chen, P., Cai, Q., 2012. "Design and implementation of the robot-fish simulation system", 2012 IEEE Symposium on Electrical & Electronics Engineering (EEESYM), 539-542, 24-27 Haziran.
- Zhao, W., Yu, J., Fang, Y., Wang, L., 2006. "Development of multi-mode biomimetic robotic fish based on central pattern generator", IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst., 3891–3896.
- Zou, K., Wang, C., Xie G., Chu, T., Wang, L., Jia, Y. 2009. "Cooperative control for trajectory tracking of robotic fish", American Control Conference, Şubat 21 – 26.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Yrd. Doç. Dr. GONCA ÖZMEN KOCA
Proje No:	114E652
Proje Başlığı:	Üç Boyutlu Hareket Kabiliyetine Sahip Carangiform Türünde Bir Biyomimetik Robot Balığın Tasarımı Ve Gerçeklemesi
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	32
Araştırmacılar:	MUSTAFA AY, CAFER BAL
Danışmanlar:	ZÜHTÜ HAKAN AKPOLAT
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	FIRAT Ü. TEKNOLOJİ F. MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/05/2015 - 15/01/2018
Onaylanan Bütçe:	362585.0
Harcanan Bütçe:	300806.99
Öz:	Bu proje çalışmasında, üç boyutlu hareket kabiliyetine sahip Carangiform türünde biyomimetik bir robot balık prototipi tasarlanmış, gerçekleştirilmiş ve gerçek bir ortamda analizleri yapılmıştır. Tasarım için aynı türde gerçek balık özellikleri ve hareketleri incelenerek boyutlar ve yapı olarak gerçek balığın fiziksel karakteristiklerini kullanan çok parçalı biyomimetik bir yaklaşım benimsenmiştir. Vücut oranlarının uygun değerleri balığın yüzüş modlarına ve kuyruk salınım sinyallerine göre farklı optimizasyon yöntemleri ile belirlenmiştir. Robot balığın ve gerçek ortamın tüm parametreleri yansıtılmaya çalışılarak ve Lagrange yaklaşımı kullanılarak robot balığın üç boyutlu dinamik modeli MATLAB benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu parametre değerleri kullanılarak tasarlanan robot balığın ilk analizleri benzetim ortamında yapılmıştır ve değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler dikkate alınarak tasarım güncellenmiştir. 3 Boyutlu yazıcı teknolojisi kullanılarak prototip parçaları üretilmiştir. Prototip, sert bir ön gövde, iki eklemlili tahrikli kuyruk mekanizması ve esnek tahriksiz kuyruk olmak üzere üç ana bölümden oluşturulmuştur. Sensörler, elektronik denetim sistemi ve ağırlık merkezi denetim mekanizması robot balığın sert ön gövdesi içerisinde bulunmaktadır. Kuyruğu yüksek güçlü birer servo motor ile tahrik edilen iki eklemlili kuyruk mekanizması ve ikinci eklemin sonuna mesnetlenmiş esnek silikon kuyruktan oluşmaktadır. Birbirine seri bir zincir yapısı şeklinde bağlı olan eklemler ile hareket için gerekli tahrik kuvveti üretilir. İki farklı akıllı denetim yapısı kullanılmıştır. Birinci denetim yapısı, gerçek bir Lamprey balığının omurilik sinir hücre yapısını model olarak oluşturulan Merkezi Örüntü Üreteci'dir. Bu yapı sayesinde robot balığın ritmik kuyruk hareketleri biyomimetik bir yapı ile oluşturulmaktadır. Merkezi Örüntü Üreteci ile oluşturulan ritmik kuyruk hareketleri; her bir ekleminin salınım hızı, salınım genliği ve eklemlerin birbirlerine göre faz farkı olmak üzere üç parametre ile Bulanık Denetleyici tabanlı bir yaklaşım kullanılarak denetlenir. İkinci denetim yapısı, balığın otonom yüzüş modunda amaç doğrultusunda yönlendirilmesi için hareket kombinasyonunu oluşturarak alt denetim birimlerine uygun denetim sinyallerini ileten bir Bulanık Denetleyicidir. Prototip havuz ortamında üç boyutlu hareket denetimi ile farklı çarpınma frekansları ve genlikleri için analiz edilmiştir.
Anahtar Kelimeler:	Robot balık, Carangiform, Çok eklemlili, Biyomimetik, Merkezi Örüntü Üreteci, Otonom hareket
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Implementations of the route planning scenarios for the autonomous robotic fish with the optimized propulsion mechanism (Makale - İndeksli Makale), 2- Implementations of the route planning scenarios for the autonomous robotic fish with the optimized propulsion mechanism (Makale - İndeksli Makale), 3- Farklı Kuyruk Modellerine Sahip Bir Robot Balığın FSI Analizi (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 4- Dynamic Model and Simulation of One Active Joint Robotic Fish (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 5- Link length optimization of a biomimetic robotic fish based on Big Bang?Big Crunch algorithm (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 6- En İyi Bildiri Ödülü (Best Article Award) (Ödül - Uluslararası Ödül - Diğer), 7- En İyi Bildiri Ödülü (Best Article Award) (Ödül - Uluslararası Ödül - Diğer), 8- Implementations of the route planning scenarios for the autonomous robotic fish with the optimized propulsion mechanism (Makale - İndeksli Makale), 9- Three-Dimensional Modeling of a Robotic FishBased on Real Carp Locomotion (Makale - Diğer Hakemli Makale), 10- Üç Boyutlu Çok Eklemlili Biomimetik Carangiform Türü Bir Robot Balığın FSI Analizi (Makale - Diğer Hakemli Makale), 11- Prototype Design and Waterproof Production of Intelligent Robotic Fish (i-RoF) (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 12- Design and Control of Diving Mechanism for the Biomimetic Robotic Fish (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 13- Çeşitli Ulusal Televizyon Kanallar ve Gazeteler ile Birçok İnternet Sitelerinde Robot Balık Haberleri (Yayılım - Uluslararası - Medyada Haber), 14- Yuotube Video Paylaşım (Yayılım - Uluslararası - Medyada Haber),
----------------------------	---