



**BİYOMİMETİK TASARIM İLE AKILLI YILANIMSİ
ROBOT TASARIMI ve UYGULAMASI**

**2024
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Murat GÖKMEN

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Cevat ÖZARPA**

**BIYOMİMETİK TASARIM İLE AKILLI YILANIMSİ ROBOT TASARIMI
ve UYGULAMASI**

Murat GÖKMEN

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Cevat ÖZARPA**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Mayıs 2024**

Murat GÖKMEN tarafından hazırlanan “BİYOMİMETİK TASARIM İLE AKILLI YILANIMSİ ROBOT TASARIMI ve UYGULAMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Cevat ÖZARPA
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 06/05/2024

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu) İmzası

Başkan : Prof. Dr. Selami SAĞIROĞLU (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Hüseyin KURT (NEÜ) Online

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Cevat ÖZARPA (MEDİPOL)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Murat GÖKMEN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİYOMİMETİK TASARIM İLE AKILLI YILANIMSİ ROBOT TASARIMI ve UYGULAMASI

Murat GÖKMEN

Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:
Dr. Öğr. Üyesi Cevat ÖZARPA
Mayıs 2024, 82 sayfa

Geçmişten günümüze insanlık tabiatı gözlemleyerek problemlerine çözümler bulmuş ve hayatını sürdürmüştür. Bugün mühendislik disiplinlerinde karşılaşılan sorunları çözmek için tıpkı geçmişte olduğu gibi yine tabiattaki çözümlere başvurulmaktadır. Mühendisliğin her alanında biyomimetik yaklaşımlar kullanılmaktadır. Günümüzde pek çok çalışma alanında robotlara yer verilmektedir. Bunlar; arama kurtarma, keşif, denetim, üretim, kontrol ve askeri alanlar sayılabilir.

Yılanların üzerinde yapılan uzun çalışmaların neticesinde bu canlıların her türlü çevre koşullarına uyum sağladığı ve engel tanımaksızın hareket kabiliyeti geliştirdikleri gözlemlenmiştir. Yılanların zorlu çevre koşullarında hareket edebilmesi birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve farklı çalışmalara ilham olmuştur.

Bu tez çalışmasında biyomimetik tasarım ile yılanımsı robot tasarım ve uygulaması yapılmıştır. Yılanımsı robotun katı modellenmesi ve tasarımı SolidWorks programında gerçekleştirilmiştir. Yılanımsı robot sisteminin içinde pil, bir adet kafa, elektronik bileşenlerinin olduğu bir adet kuyruk ve dokuz eklemden oluşan bir yapı şeklinde tasarlanmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen yılanımsı robotun hareketlerini incelemek ve benzetimi için Gazebo simülatörü kullanılmıştır. Biyomimetik yılanımsı robotun parçaları eklemeli imalat yöntemi ile 3D yazıcılar kullanılarak imal edilmiştir. Benzetim ve imalat aşamasından sonra deneylere geçilmiştir. Deneysel çalışmalarda yılanımsı robotun benzetim ortamındaki hareket kabiliyetleri ile gerçek ortamdaki hareket kabiliyetleri analiz edebilmiştir. Yapılan bu tez çalışmasıyla farklı çevre koşullarında engel tanımaksızın hareket kabiliyeti sunan biyomimetik yılanımsı robotun tasarımı, imalatı ve uygulaması yapılmıştır.

Anahtar Sözcükler : Biyomimetik, Yılanımsı robot, Eklemeli imalat, Gazebo benzetim

Bilim Kodu : 91430

ABSTRACT

Master Thesis

SMART SNAKE-LIKE ROBOT DESIGN and APPLICATION WITH BIOMIMETIC DESIGN

Murat GÖKMEN

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Assist. Prof. Dr. Cevat ÖZARPA

May 2024, 82 pages

From past to present, humanity has found solutions to its problems by observing nature and has continued its life. Today, in order to solve the problems encountered in engineering disciplines, just like in the past, solutions from nature are used. Biomimetic approaches are used in every discipline of engineering. Today, robots are used in many work areas. These are search and rescue, exploration, inspection, production, control and military.

As a result of long studies on snakes, it has been observed that these creatures adapt to all kinds of environmental conditions and develop mobility without any obstacles. The ability of snakes to move in harsh environmental conditions has attracted the attention of many researchers and inspired different studies.

In this thesis, a snake-like robot was designed and implemented with biomimetic design. The solid modeling and design of the snake-like robot was carried out in SolidWorks program. The system of the snake-like robot is designed as a structure consisting of a battery, a head, a tail with electronic components and nine joints. Gazebo simulator was used to simulate and analyze the movements of the designed snake robot. The parts of the biomimetic snake robot were manufactured using 3D printers with additive manufacturing method. After the simulation and manufacturing phase, experiments were started. In the experimental studies, the movement capabilities of the snake robot in the simulation environment and its movement capabilities in the real environment were analyzed. In this thesis, a biomimetic snake robot that offers unobstructed mobility in different environmental conditions has been designed, manufactured and implemented.

Key Word : Biomimetic, Serpentine robot, Additive manufacturing, Gazebo simulation .

Science Code : 91430

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, yönlendirme ve akademik birikimleriyle katkı sağlayan saygıdeğer hocam Dr. Öğr. Üyesi Cevat ÖZARPA'ya őükranlarımı sunarım

Tez çalışmasında, benzetim ve yazılım alanlarında desteğini esirgemeyen kadim dostum Sayın Yazılım Mühendisi Furkan ÇETİN Beyefendiye teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak başta maddi ve manevi her türlü desteği sunan sevgili annem Zeliha GÖKMEN olmak üzere aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
BÖLÜM 1.....	1
BİYOMİMETİK KAVRAMI.....	1
1.1 BİYOMİMETİĞİ ETKİLEYEN BİLİM DALLARI.....	3
1.1.1 Biyomekanik.....	3
1.1.2 Biyomimikri.....	4
1.1.3 Biyonik.....	5
1.2 BİYOMİMETİK YAKLAŞIM VE TASARIMI.....	6
1.2.1 Model Olarak Tabiat.....	7
1.2.2 Bir Ölçüt Olarak Tabiat.....	7
1.2.3 Yol Göstercisi Olarak Tabiat.....	7
1.3 BİYOMİMETİK TASARIM METOTLARI.....	7
1.3.1 Biyolojiden Tasarıma.....	8
1.3.2 Biyolojiye Sorma.....	9
1.4 BİYOMİMETİK TASARIM YAKLAŞIMLARI.....	10
1.4.1 Problem Esaslı Yaklaşım.....	10
1.4.2 Çözüm Esaslı Yaklaşım.....	12
BÖLÜM 2.....	14
LİTERATÜR.....	14
2.1 ACM III YILAN ROBOT.....	14

	<u>Sayfa</u>
2.2 ACM R3 YILAN ROBOT	15
2.3 ACM R5 YILAN ROBOT	16
2.4 KARL PAAP'S GMD YILAN ROBOT	17
2.5 IKEDA VE TAKANASHİ YILAN ROBOT	18
2.6 MİLLER YILAN ROBOT	18
2.7 GENBU YILAN ROBOT	19
2.8 KOHGA YILAN ROBOT.....	20
2.9 CMU YILAN ROBOT	21
BÖLÜM 3	23
BİYOMİMETİK YILAN ROBOT	23
3.1 BİYOLOJİK YILAN HAREKETLERİ	23
3.1.1 Yanal Dalgalanma	23
3.1.2 Doğrusal Hareket	24
3.1.3 Akordiyon Hareket	25
3.1.4 Yan Sarma Hareketi.....	27
3.2 YILAN ROBOTLARIN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI	28
3.2.1 Yılan Robotların Avantajları	28
3.2.2 Yılan Robotların Dezavantajları	30
3.3 YILAN ROBOTLARIN KULLANIM ALANLARI	33
3.3.1 Gözlem ve Keşif	33
3.3.2 Arama Kurtarma	33
3.3.3 Tıbbi Uygulamalar	34
3.3.4 Askeri Uygulamalar	34
3.3.4 Boru İçi Denetim	35
3.4 YILAN ROBOTLARIN SINIFLANDIRILMASI	36
3.4.1 Karasal Yılan Robotlar	36
3.4.2 Amfibi ve Sucul Yılan Robotlar	37
3.5 YILAN ROBOTLARIN HAREKET KABİLİYETLERİ	37
3.5.1 Dönme Hareketi	37
3.5.2 İleri ve Geri Hareket	38
3.5.3 Basamak Çıkma Hareketi	38

	<u>Sayfa</u>
3.5.4 Yüzme Hareketi	39
3.5.5 Yana Dönüş Şeklinde Hareket.....	39
3.6 YILAN ROBOT MATEMATİKSEL MODELİ.....	40
3.6.1 Biyomimetik Yılan Robot Kinematığı.....	41
3.6.2 Biyomimetik Yılsanı Robot Dinamiğı.....	46
3.6.3 Düz Dinamik.....	49
3.6.4 Ters Dinamik	49
BÖLÜM 4	51
BİYOMİMETİK YILANSI ROBOT TASARIMI VE İMALATI	51
4.1 YILAN ROBOTUN İŞLEV VE PERFORMANS GEREKSİNİMLERİ	53
4.1.1 İşlev Gereksinimleri.....	53
4.1.2 Fonksiyon Gereksinimleri	54
4.2 YILAN ROBOTUN TASARIM GEREKSİNİMLERİ.....	54
4.2.1 Mekanik Yapı Tasarımı	55
4.2.2 Yılan Robotun Tasarım Optimizasyonu	58
4.2.3 Yılan Robotun Elektrik ve Elektronik Bileşenleri.....	59
4.3 YILAN ROBOTUN İMALATI	62
BÖLÜM 5	63
BENZETİM ve DENEY ÇALIŞMALARI.....	63
5.1 YILAN ROBOTUN RVIZ ORTAMINDA MODELLENMESİ.....	63
5.2 YAPILANDIRMA DOSYASININ OLUŞTURULMASI.....	64
5.3 YILAN ROBOTUN GAZEBO ORTAMINDA GÖSTERİLMESİ.....	66
BÖLÜM 6	77
SONUÇLAR.....	77
KAYNAKÇA.....	79
ÖZGEÇMİŞ	82

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Benyus'un biyomimetik döngüsü [3].	2
Şekil 1.2. Biyomimetği etkileyen bilim dalları.	3
Şekil 1.3. Leonardo Da Vinci kanat tasarımı [4].	4
Şekil 1.4. Dulavrat otundan esinlenen Velcro bant tasarımı [5].	5
Şekil 1.5. Biyolojiden tasarım döngüsü [7].	9
Şekil 1.6. Biyolojiye sorma döngüsü [7].	10
Şekil 1.7. Biyomimikrinin bazı tasarım yaklaşımlarıyla ilişkisi.	11
Şekil 1.8. DaimlerChrysler'in imal ettiği bionik araç [8].	11
Şekil 1.9. Lotus'tan ilham alan Lotusan boyası [9].	13
Şekil 1.10. Yalıçapkını kuşundan esinlenen Japon "Mermi Tren" tasarımı [10].	13
Şekil 2.1. ACM III [4].	14
Şekil 2.2. ACM III hareket kabiliyetleri [4].	15
Şekil 2.3. ACM R3 [4].	16
Şekil 2.4. ACM R5 [4].	17
Şekil 2.5. IKEDA ve TAKANASHİ tarafından tasarlanmış yılan robot [17].	18
Şekil 2.6. Miller tarafından geliştirilen farklı tip yılan robotlar [12].	19
Şekil 2.7. Genbu yılan robotun iç yapısı [16].	20
Şekil 2.8. Kohga [19].	21
Şekil 2.9. Kevin Downing tarafından yapılan robot [20].	22
Şekil 3.1. Yanal dalgalanma biçimi [23].	24
Şekil 3.2. Doğrusal harekette kas davranışları [15].	25
Şekil 3.3. Akordiyon hareketinin adımları [24].	26
Şekil 3.4. Yan sarma hareketi [18].	27
Şekil 3.5. Yılan robotların teknolojik gelişimi [25].	30
Şekil 3.6. Deprem sonrası arama kurtarma faaliyetlerini ifa edecek yılan robot [28].	34
Şekil 3.7. Askeri gözlem ve keşif amaçlı yapılan yılan robot [29].	34
Şekil 3.8. TÜBİTAK tarafından geliştirilen boru içi denetim robotu [12].	35
Şekil 3.9. Yılan robot dönme hareketi [32].	38
Şekil 3.10. Basamak tırmanan yılan robot [33].	39

Sayfa

Şekil 3.11. Yana dönüş hareketi [34].....	40
Şekil 3.12. N bileşenli yılanın kinematik gösterimi [15].	42
Şekil 3.13. Yılan robotun dinamik parametreleri[15].	46
Şekil 4.1. Yılsızı robotun eklemi.	56
Şekil 4.2. Yılsızı robotun servo motor yuva eklemi	56
Şekil 4.3. Yılan robotun baş ve kuyruk eklemi.....	57
Şekil 4.4. İlk olarak kare formunda tasarlanan yılan robot.....	59
Şekil 4.5. Optimize edilmiş yılan robot.	59
Şekil 4.6. Servo motorlar	60
Şekil 4.7. Arduino UNO	61
Şekil 4.8. Eklemlerin 3D yazıcı ile basımı	62
Şekil 4.9. Eklemlerin montaj	62
Şekil 5.1. Yılan robotun RVIZ ortamında görünümü.....	63
Şekil 5.2. Yılan robotun RVIZ ortamında TF görünümü	64
Şekil 5.3. Yaml dosyasında bağlantıların kod gösterimi	65
Şekil 5.4. Yaml dosyasında bağlantıların kod gösterimi	65
Şekil 5.5. Yanal dalgalanma hareketinin Gazebo ortamında görünümü	66
Şekil 5.6. 1 ve 2. motora ait zaman açığı grafiği	67
Şekil 5.7. 3 ve 4. Motora ait zaman açığı	67
Şekil 5.8. Yanal dalgalanma set_point grafiklerine anlık olarak gelen değerler.	68
Şekil 5.9. Process value ve dot değerleri grafiği.....	68
Şekil 5.10. Process value ve dot değerleri grafiği.....	69
Şekil 5.11. Yan sarma hareketinin Gazebo ortamında görünümü	70
Şekil 5.12. 1,2 numaralı motorların zaman açığı değerleri	70
Şekil 5.13. 3,4 numaralı motorların zaman açığı değerleri	71
Şekil 5.14. Yan sarma hareketi için set_point grafiklerine anlık olarak gelen değerler.	71
Şekil 5.15. Yan sarma hareketi için process value ve dot grafiği.	72
Şekil 5.16. Yan sarma hareketi için process value ve dot grafiği.	72
Şekil 5.17. Akordiyon hareketinin Gazebo ortamında hareketi.....	73
Şekil 5.18. 1 ve 2 numaralı motorların zaman açığı grafiği.....	74

Sayfa

Şekil 5.19. 3 ve 4 numaralı motorların zaman açığı grafiği.....	74
Şekil 5.20. Akordiyon hareketi için set_point grafiklerine anlık olarak gelen değerler	75
Şekil 5.21. Akordeon hareketi için process value ve dot grafiği,	75
Şekil 5.22. Akordeon hareketi için process value ve dot grafiği,	76



ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1. Problem esaslı yaklaşım.	6
Çizelge 1.2. Çözüm esaslı yaklaşım.	6
Çizelge 3.1. Yılanların uyguladıkları hareketler.	28
Çizelge 3.2. Son yıllarda yapılan yılan robot çalışmaları.	32
Çizelge 3.3. Yılan robotların özelliklerine sınıflandırılması.	36
Çizelge 3.4. Yılan robot bileşenleri.	43
Çizelge 4.1. Biyomimetik yılan robotun tasarım akış şeması.	52
Çizelge 4.2. Yılan robotun tasarım bileşenleri.	55
Çizelge 4.3. Yılan robotun bileşenleri.	55
Çizelge 4.4. Yılan robotun fiziksel özellikleri.	58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- C_d : sürüklenme katsayısı
 m_i : kütle
 I_i : atalet momenti
 l_i : bağlantı uzunluğu
 Q_i : bağlantı açısı
 d_i : z eksenin yönündeki uzunluğu
 a_i : x eksenindeki uzunluğu
 b_i : hareket eksen yönündeki vektör
 r_i : hareket eksen yönündeki uzunluk
 J_i : jakobyen matrisi
 T_i : bağlantının homojen dönüşüm matrisi

KISALTMALAR

GMD	:	Alman Ulusal Araştırma Merkezi
DOF	:	Degree of Freedom (Serbestlik Derecesi)
CMU	:	Carnegie Mellon University (Carnegie Mellon Üniversitesi)
GMM	:	Genlik Modülasyon Metodu
MÖÜ	:	Merkez Örüntü Üretici
NASA	:	National Aeronautics and Space Administration
TF	:	Transform (Dönüşüm)



BÖLÜM 1

BIYOMİMETİK KAVRAMI

Biyomimetik kelimesi aslen Yunanca olup iki farklı kelimenin bir araya gelmesiyle oluşmuştur. Bu kelimeler “bios” hayat ve “mimic” taklit kelimelerinin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Kısaca biyomimetik kavramı tabiattan ilham alarak taklit etmek yahut tasarlamak olarak özetleyebiliriz [1].

İnsanoğlu geçmişte olduğu gibi bugün de sorunlarını çözmek için tabiata başvurmaktadır. Bugün mühendislikte karşılaştığımız sorunları aynı şekilde tabiatı gözlemleyerek çözüm aramaktayız. Tabiattan ilham alma yahut taklit etme kavramlarını: Biyonik, biyognoz, biyomimesis, biyomimetik olarak isimlendirmekteyiz [2].

Biyomimetik kavramının prensiplerini Janine Beynus 1997 yılında 3 farklı başlık altında ortaya koymuştur. Bunlar [3];

- Tabiatın model alınması: Karşılaşılan problemlere çözüm bulmak için tabiatı gözlemleyip çözümler üreten bilim dalıdır.
- Tabiatın ölçüt alınması: Gözlemlenen, tabiatta var olan sistemlerin başarılı ve uzun ömürlü olması gerekliliği bilinmektedir.
- Tabiatın referans kabul edilmesi: Biyomimetik, tabiatı anlamının ve tahlil etmenin bir yöntemidir. Tabiata ne verebileceğimizi değil, tabiattan ne öğrenebileceğimize yaslanan bir perspektif sunar.

Benyus, yaptığı çalışmalar neticesinde tabiatın prensiplerini göz önüne alarak biyomimetik bir döngü oluşturmuştur. Şekil 1.1’de Benyus’un oluşturduğu döngü gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Benyus'un biyomimetik döngüsü [3].

Tabiat 3,8 milyar yıldır hiçbir aksaklık yaşamadan kendi kendine yeten ve bütün gereksinimlerini kendi döngüsü içinde barındıran bir sistem bütünüdür. Kaynaklarını verimli bir şekilde kullanan ve gerektiğinde geri dönüşümle sistemdeki kaynaklarını tekrar kendine kazandıran büyük bir organizasyondur [3].

Tabiat, işleyişini dokuz farklı ilke üzerine devam ettirmektedir. Bu ilkeler tabiattaki tüm sistemlerin müşterek özelliklerini yansıtmaktadır, insanlar tabiatı taklit edip problemlerini çözecekleri vakit tasarımlarını bu ilkeler doğrultusunda yapmalıdır. Bu ilkeler aşağıdaki gibidir [2]:

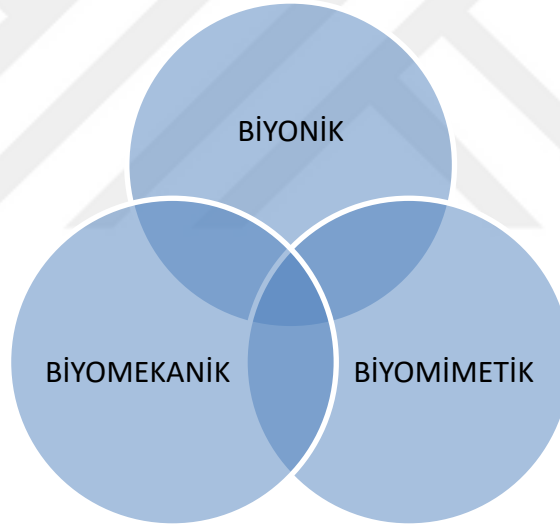
- Tabiatın sürdürülebilirliğini güneş enerjisi ile sağlar,
- Tabiat sadece asgari ihtiyacı doğrultusunda enerji kullanır,
- Tabiat yapıyı işleve uygun hale getirir.
- Tabiat her şey geri kazanımlıdır,
- Tabiat kazan kazan ilkesi mevcuttur,
- Tabiat değişkendir, değişmeye eğilimlidir,
- Tabiat bölgesel uzmanlığı arzu eder,
- Tabiat aşırılıktan kaçır,

- Tabiat gücünün sınırlarını zorlamaktadır.

1.1 BİYOMİMETİĞİ ETKİLEYEN BİLİM DALLARI

Biyomimetik genel olarak biyoloji ile iltisaklıdır. Biyolojinin yapmış olduğu her türlü çalışma ve araştırmaların neticesinde elde edilen bilgiler, biyomimetğin verilerini oluşturur. Başta Zooloji ve Botanik bilimleri olmak üzere biyolojinin alt dalları biyomimikri 'ye fayda sağlamaktadır.

Birbirinden farklı çalışma alanlarına sahip disiplinler müşterek amaçlarla bir araya gelmekte ve birbirini desteklemektedir. Biyonik, biyomekanik ve biyomimikri gibi alanlarda bilimsel çalışmalar yapılmakta olup biyomimetik tasarım yaklaşımın bileşenlerini oluşturmaktadır [4]. Şekil 1.2'de biyomimetği etkileyen bilim dalları görülmektedir.



Şekil 1.2. Biyomimetği etkileyen bilim dalları.

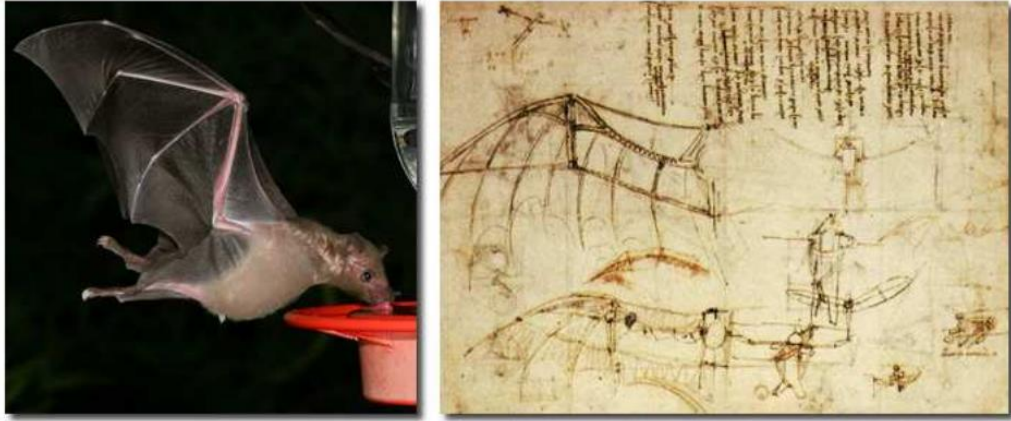
1.1.1 Biyomekanik

Biyomekanik, canlıların hareketlerini ve anatomik prensiplerini tahlil eder ve gözlemler. Bu gözlemlerin neticesinde gözlemlerini suni yapılara aktarır. Biyomekanik gözlemler, çok kapsayıcı bir alanı ele almaktadır. Canlıların moleküler yapısına, dokularına ve hatta tüm organizmaya kadar olan geniş bir yelpazeyi kapsar.

Günümüz biyomekaniğinin kurucularından sayılan Giovanni Alfonso Borelli, tabiatın bir parçası olan hayvanların gövdelerinin yalnızca mekanik olan kısımlarını incelemekle kalmamış aynı zamanda hayvanların hareketlerinin psikolojik etmenlerini de incelemiştir. Ağaç köklerinin mekanik desteklerini, kuşların aerodinamiklerini, balıkların hidrodinamiklerini kısaca farklı canlıların hareket biçimlerini incelemektedir.

Rönesans döneminin önde gelen Hezarfen'i Leonardo da Vinci, uçan kanat tasarımı için yarasaların uçuş aerodinamiğini ve mekaniğini incelemiştir lakin dönem itibariyle yarasalar hakkında yeteri kadar biyomimetik veri bulunmadığı için başarı gösterememiştir [4]. Şekil 1.3'te Leonardo da Vinci kanat tasarımı görülmektedir.

Leonardo da Vinci kendi not defterinde yaptığı çalışmayı şu şekilde anlatıyor: “Yarasaların kanatları çok ince ve esnek. Kanatlarında özel kas lifleri mevcut, sertlikle ilişkili ve sertliği kontrol ediyor. Kanat zarı hava geçirmez bir özelliğe sahip. Eklemlerinde hareket ve manevra sağlayıcılar mevcut. Şu an yarasayı birebir taklit edemiyorum. Fakat ileride uçuş kanatları yapmak isteyen araştırmacılar yarasayı dikkate almalı.”



Şekil 1.3. Leonardo Da Vinci kanat tasarımı [4].

1.1.2 Biyomimikri

Bios (yaşam) ve mimesis (taklit) kelimelerinin bir araya gelmesiyle oluşmuştur. Biyomimikri kavramı ilk olarak 1950'lerde Otto Schmitt tarafından kullanılmıştır. Biyomimikri tabiattaki bir canlının işlevlerini, biçimlerini, mekanizmalarını tamamen

yahut bir kısmını taklit etmesidir. Biyomimetik karşılaştığımız teknik sorunlarda çözüm üretmek biyolojiye yani tabiata bakmaktır. Tabiatta iyi bir tasarımı gözlemleyip kopyalamak, karşılaştığımız birçok sorunu çözmektedir.

Biyomimikri denildiğinde akla ilk gelen kişilerden biri de George de Mestraldır. Köpeğiyle birlikte çıktığı doğa gezisinde hem köpeğine hem de kendi pantolonuna yapışan pıtrak otunu (Arctium Lappa) fark etmiş daha sonrasında bu bitkiyi mikroskop altında incelemiş ve akabinde bu bitkiyi taklit ederek bugün bildiğimiz ve pek çok alanda kullandığımız cırt cırtı üretmiştir. Şekil 1.4’de cırt cırt ve Arctium lappa ve Velcro görülmektedir.



Şekil 1.4. Dulavrat otundan esinlenilen Velcro bant tasarımı [5].

1.1.3 Biyonik

Biyonik, tabiatta var olan yöntemleri ve sistemleri gözlemleyip günümüz mühendislik sistemlerinde kullanılmasıdır. Kelime kök itibariyle Yunanca bion (yaşam ünitesi) ve -ic (benzer) kelimelerin bir araya gelmesiyle yaşam benzeri anlamına gelmektedir.

2003 yılında geçirdiği bir motor kazası neticesinde sol kolunu kaybeden Claudia Mitchell için doktorlar ve mühendisler tarafından biyonik kol tasarlanıp üretilmiştir. Biyonik kol sol göğsünden sinir uçlarına bağlanmış ve beyinden gelen sinyalleri biyonik kola aktarabilmiştir.

1.2 BİYOMİMETİK YAKLAŞIM VE TASARIMI

Tabiatın öğretilerini temel olarak idrak etmek için tabiatın yaşam şekli ve işleyiş yapısı detaylı bir şekilde gözlemlenmelidir. Biyomimetik anlamak için bazı prensipler geliştirilmiştir. Tabiatın hayat döngüsünü öğrenmek, nasıl ve hangi yöntemle işlediğini bilmek biyomimetik konusunda bilginizi artırır. Biyomimetik temelde iki sınıfa ayrılır. Bunlar: Çözüm Esaslı Yaklaşım (Tasarıma Tesir Eden Biyolojik Yaklaşım) ve Sorun Esaslı Yaklaşım (Biyolojiyi Sorgulayan Yaklaşım)'dır [1,5]. Çizelge 1.1'de problem esaslı yaklaşım, Çizelge 1.2'de çözüm esaslı yaklaşım verilmektedir.

Çizelge 1.1. Problem esaslı yaklaşım.

Problem Esaslı Yaklaşım
1.Adım: Problemin Tanımlanması
2.Adım: Problemin Ele Alınması
3.Adım: Tabiatta Çözüm Araştırmak
4.Adım: Tabiatteki Çözümü Tasniflemek ve Tanımlamak
5.Adım: Esasların Oluşturulması
6.Adım: Esasların Tatbik Edilmesi

Çizelge 1.2. Çözüm esaslı yaklaşım.

Çözüm Esaslı Yaklaşım
1.Adım: Tabiatteki Çözümü Tespit Etmek
2.Adım: Tabiatteki Çözümü Tasniflemek ve Tanımlamak
3.Adım: Esasların Oluşturulması
4.Adım: Çözümleri Tekrardan Ele alınması
5.Adım: Problem Aramak ve Tespit Etmek
6.Adım: Problemin Tanımlanması
7.Adım: Esasların Tatbik Edilmesi

Biyomimetikte tabiat, bir hammadde kaynağı olarak değil bir fikir ve ilham kaynağı olarak görülmektedir. Biyomimetik yaklaşım 3 farklı şekilde sınıflandırılmaktadır.

1.2.1 Model Olarak Tabiat

Tabiatın modellerini incelemek, tabiattaki süreçleri, sistemleri gözlemlemek ve bu gözlemler ışığında var olan problemleri çözmek için çözüm üretmek biyomimikri bilimine aittir.

Bir araç olarak biyomimetik; yönetim, mimari, mühendislik, işletme vb. farklı sahalarda tasarımcılar tarafından daha verimli ve sürdürülebilir tasarımlar için kullanılabilir.

1.2.2 Bir Ölçüt Olarak Tabiat

Biyomimetik, yeniliklerin sürdürülebilirliğini değerlendirdiği için ekolojik bir denge kullanır. Tasarımcının geliştirdiği çözümleri tabiatın çözümlerine karşı teste tabi tuttuğunda bir filtre oluşturur. Tasarımcının çözümü tabiatın 9 işleyişini içermelidir.

1.2.3 Yol Göstericisi Olarak Tabiat

Biyomimetik, tabiatı farkına varmanın ve ona değer atfetmemenin farklı bir yolu olarak gösterilebilir. Tabiat ondan ne elde edeceğimize değil, tabiatın ne öğrenebileceğimize dayanır.

Esasında biyomimetik, temel olarak üç temek esasa dayanır. Bunlar biyomimetikğin tohumları olarak bilinir. Bu tohumlar: öykünme, bağlanma ve ethos (yeninden) olarak adlandırılmaktadır. Biyomimetik bu üç esas ile somutlaştırılmaktadır. Temel esaslar bir araya gelerek biyomimetik tasarımlar meydana gelmektedir [6].

1.3 BİYOMİMETİK TASARIM METOTLARI

Biyomimetik tasarım konusunda farklı yöntemler mevcuttur. Geliştirilen bu yöntemler esasen mühendislik disiplinleri için geliştirilmiş olup, biyomimetik metotların yaklaşımı farklı çalışma alanları ile iş birliği içinde ve sürdürülebilir olması gerektiğinden esas olarak diğer yöntemlere benzer olsa da farklılıklar göstermektedir. Biyomimetik tasarım metotlarını iki başlık altında toplayabiliriz. Bunlar biyolojiden

tasarıma ve biyolojiye sorma şeklinde sınıflandırılır [7]. Şekil 1.5’de biyolojiden tasarım döngüsü, Şekil 1.6’da biyolojiye sorma döngüleri görülmektedir.

1.3.1 Biyolojiden Tasarıma

- Tabiatı keşfetme: Tabiattaki canlıları ve ekosistemi detaylı bir şekilde gözlem yaparak, yapılan çalışmaların yani literatürü tarama şeklinde yapılan ilk aşamadır.
- Biyolojik prensiplerin soyutlaştırılması: Tabiatta tespit edilen şekil, akış yahut sisteme karar verilir ve bu aşamada belirlenen biyolojik prensipler soyut hale getirilir.
- Olası tatbik edilecek uygulamaların düşünülmesi: Tespit edilip tanımlanan çözümün hangi alanda yenilik oluşturulacağı, var olan sorunları çözebilme niteliği olup olmadığı tartışılıp düşünülen aşamadır.
- Tabiatın stratejisini taklit: Belirlenen çözüm yolları bir süzgeçten geçerek tafsilatlıdır. Sürdürülebilirlik dahilinde çözüm ilkeleri tasarıma tatbik edilir.
- Hayat prensiplerinin değerlendirilmesi: Oluşturulan çözüm belli aşamalardan ve değerlendirmelerden geçirilir. Oluşturulan çözümün çevre ve ekosistemle uyumluluğu, enerji tasarrufu, malzeme ve sürdürülebilirlikle alakalı konular göz önüne alınarak süreç tamamlanmış olur.



Şekil 1.5. Biyolojiden tasarım döngüsü [7].

1.3.2 Biyolojiye Sorma

- Fonksiyon belirleme: Bu adımda ilk olarak ne tasarlamamız gerekiyor yerine nasıl bir fonksiyonu olması gerekiyor sorusunun cevabını bulmalıyız.
- Çerçevesini belirleme: Yapılacak tasarımın fonksiyonunu belirledikten sonra yapacağımız çalışmanın çerçevesini çizmemiz gerekiyor.
- Sorunu biyoloji ile ilişkilendirmek: Tasarım için belirlenen fonksiyonun tabiatta nasıl gerçekleştiğini araştırıp tanımlanması gereken adımdır.
- Tabiattaki misalleri keşfetme: Bu adımda biyolojik olarak yapılan çalışmalar incelenir ve alanında mütehassıs kişilere başvurulur. Tabiatta belirlediğiniz fonksiyonları gerçekleştiren canlılar aranır.
- Soyutlama: Karar verilen fonksiyonları tatbik edecek misaller tasniflenir ve müşterek stratejiler, farklılıklar göz önüne alarak istenilen fonksiyona en yakın olanlar belirlenir.

- Tabiatın stratejisini taklit etme: Oluşturulan çözümler değerlendirilir, tafsilatlı incelemeler için biyologlara başvurulur. Tasarımda çözümler yapıldığı aşamadır. Sistem ve ekosistem taklit edilirken biyolojik süreç, morfoloji ve ekosistem şartları tafsilatlı bir şekilde araştırılır.
- Hayatın ilkelerinin değerlendirilmesi: Tasarımda oluşturulan çözümlerin ekosisteme tatbik edilebilirliği, enerji verimliliği, malzeme, çevre hassasiyeti ve geri dönüşüme uygun olup olmadığı birçok etmen tahlil edilir ve nihai çözüme erişilir [7].



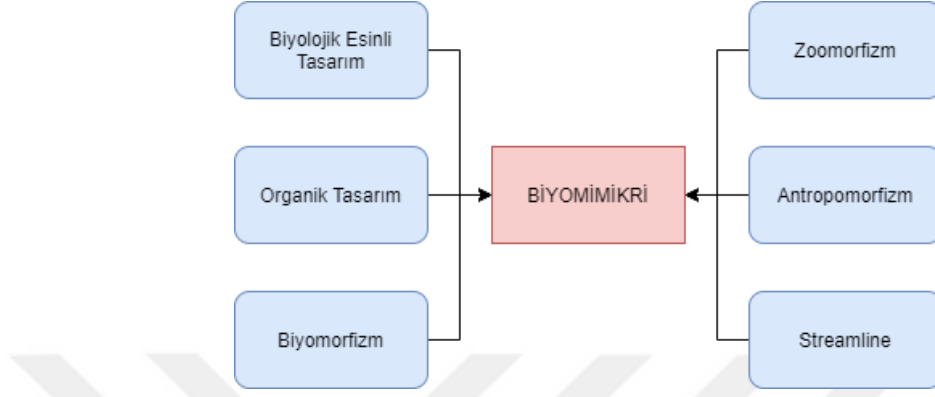
Şekil 1.6. Biyolojiye sorma döngüsü [7].

1.4 BİYOMİMETİK TASARIM YAKLAŞIMLARI

1.4.1 Problem Esaslı Yaklaşım

Bu yaklaşım, farklı araştırmacılar tarafından farklı isimlendirmelerle ile tanımlanmıştır. Misal problem esaslı tasarım, dolaysız yaklaşım, biyolojiyi sorgulayan tasarım, yukarıdan aşağı yaklaşım olarak isimlendirilmektedir. Şekil 1.7'de biyomimikrinin bazı tasarım yaklaşımlarıyla ilişkisi görülmektedir.

Bu yaklaşımda esas olarak tasarımcılar, ortaya çıkan sorunun tespitinin yapılması ve akabinde biyologların çözüm için tabiattaki canlılar ile eşleştirme yapması gerekmektedir. Her iki uzmanda iş birliği halinde çalışmaktadır.



Şekil 1.7. Biyomimikrinin bazı tasarım yaklaşımlarıyla ilişkisi.

Problem esaslı yaklaşımın bir örneği DaimlerChrysler'in imal ettiği biyonik araçtır. Yüksek hacimli ve aerodinamik özelliklerinin yapısının çok iyi olduğu bir araç tasarlamak isteyen tasarımcılar tabiatta yöneldi ve istedikleri tasarımı kutu balığında buldular. Tasarımı yapılan araç 0,19'luk sürtünme katsayısına (Cd) sahiptir. Bu otomobilin temel yapısı büyük bir dış görünüş ve küçük tekerleklerden oluşmaktadır ve tasarım minimum bir gerilme elde etmek için bilgisayar benzetimi ile değerlendirilmiştir. 2 Litrelik dizel motora sahip bu otomobilin ortalama yakıt verimliliği 23 km/l ve maksimum 190 km/s hıza sahiptir ve bu da mevcut araçlardan daha fazla yakıt tasarrufu sağlar [1],[8]. Şekil 1.8'de DaimlerChrysler'in imal ettiği biyonik araç görülmektedir.

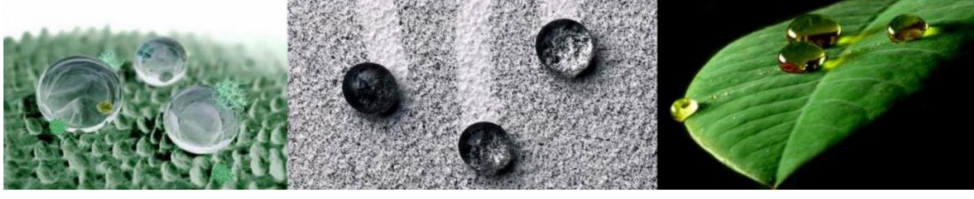


Şekil 1.8. DaimlerChrysler'in imal ettiği biyonik araç [8].

1.4.2 Çözüm Esaslı Yaklaşım

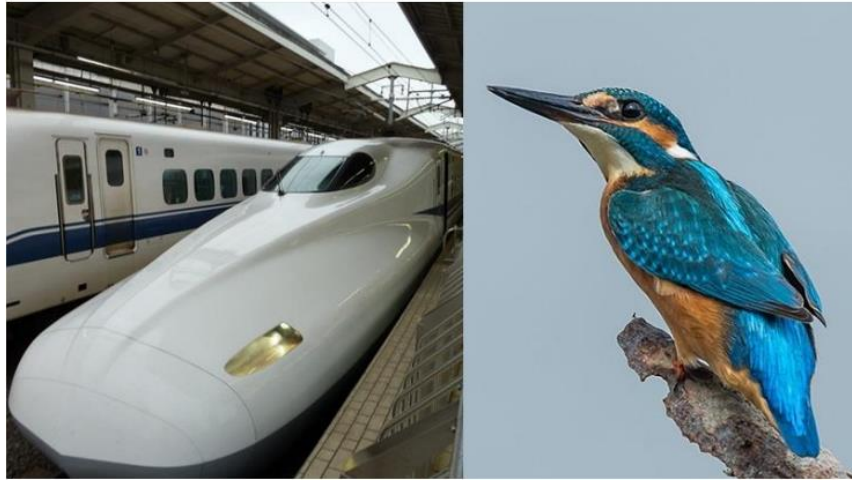
Tasarıma etki eden biyolojik yaklaşım, biyolojiyi sorgulayan yaklaşım üslubuna benzerlik gösterse de süreç esasen ters şekilde işler. Her iki uzmanlığı, tasarımcılar ve biyologlar müşterek şekilde çalışmaktadırlar. Biyologlar organizmaları, ekosistemleri, yaşam döngüleri ve canlıların fonksiyonlarını inceler. Tasarımcılar ise ihtiyaca nazaran biyologlarla beraber tasarımı gerçekleştirir.

Bataklık alanlarda yaşayan nilüfer çiçeği kirli çevre koşullarına rağmen temiz kalmayı başarmaktadır. Bu durum nilüferin kendi yapraklarını temizliyor olabilmesindedir. Yaprakların üzerindeki pürüzlü yüzeyler sayesinde nilüfer bitkisi temiz kalmaktadır. Bu durumu gözlemleyen ve nilüfer bitkisini taklit eden Lotusan firması kendi kendini temizleyebilen bir boya geliştirmiştir [9]. Şekil 1.9 Lotus'tan ilham alan Lotusan boyası.



Şekil 1.9. Lotus'tan ilham alan Lotusan boyası [9].

Japonya'da geliştirilen ve yüksek hızlara çıkabilen tren büyük övgüler almasına rağmen bazı sorunları da beraberinde getirdi. Tren, tünele girdiğinde tüneldeki havayı ileri doğru itmekte ve trenin tünel çıkışında yüksek basınçla beraber yüksek desibelde ses oluşturmaktaydı. Bu durum ister istemez çevredeki insanları rahatsız ediyordu. Tasarımcıların önünde bu sorunu çözmek için iki tane seçenek vardı. Birincisi tünellerin tekrar yapılması, fakat bu seçenek hem çok maliyetli hem de büyük bir zaman kaybıydı. İkinci seçenek ise tren tasarımının tekrar ele alınmasıydı. Eiji Nakatsu sorunu çözmek için tabiata yöneldi ve tasarımı tekrar ele aldı. Yaptığı çalışmaların neticesinde yalıçapkını kuşunun gagası dikkatini çekti. Kuş avlanmak için suya dalarken gagasının uzun ve ince olmasından dolayı suda hava kabarcıkları oluşturmuyordu. Buradan hareket ederek bu kuşun gagasının tren tasarımı için uygulanabileceğini fark etti. Trende yapılan tasarım değişikliği ile sorunun ortadan kalktığını ve enerji tasarrufu sağlandığı gözlemlenmiş oldu. [10]. Şekil 1.10' da Yalıçapkını kuşundan esinlenen Japon "mermi tren" tasarımı görülmektedir.



Şekil 1.10. Yalıçapkını kuşundan esinlenen Japon "Mermi Tren" tasarımı [10]

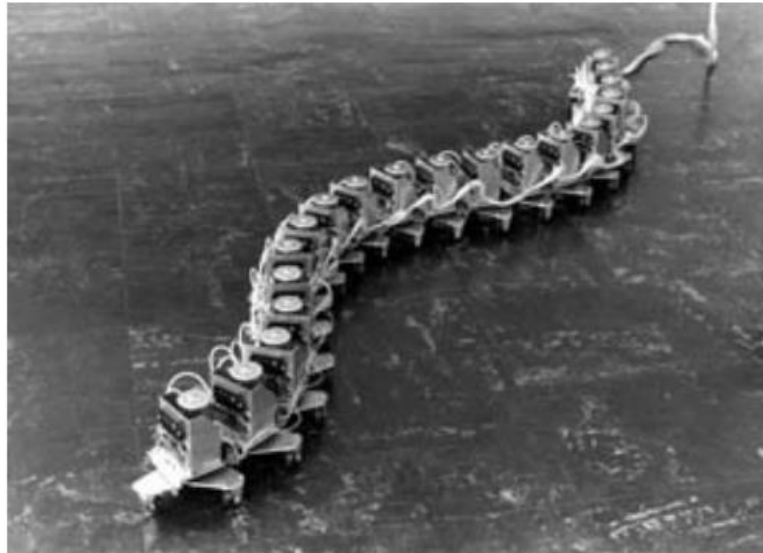
BÖLÜM 2

LİTERATÜR

Bu bölümde yılan robotlar hakkında yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Yapılan literatür çalışmasının neticesinde yılan robotların ilk olarak 1970'lerde geliştirilmeye başladığı görülmüştür. Daha sonraki yıllarda yapılan çalışmalarda yılan robotlara hareket kabiliyetleri ve yeni kontrol mekanizmaları geliştirilmiş ve farklı görev alanları için tasarımlar yapılmıştır.

2.1 ACM III YILAN ROBOT

İlk yılan robotu 1972 yılında Shigeo HIROSE ACM III adıyla üretmiştir. Bu robot, yılanların sahip olduğu yanal dalgalanma hareketini gerçekleştirebilmektedir. Toplam boyu 2 metre olup 20 eklemden oluşmaktadır ve saatte 40 cm/s hıza çıkabilmektedir [11]. Şekil 2.11 de ACM III görülmektedir.



Şekil 2.1. ACM III [4]

Her eklem yapısında sağ ve sol yönlere dönmek için servo motor mekanizmaları mevcuttur. Hareketini uzuvlarının altında bulunan tekerlekler ile sağlamaktadır. İleri ve geri hareketi baş kısmına verilen ve akabinde diğer uzuvlara iletilen sinusoidal hareketle sağlanmaktadır. Bu hareketle beraber baş kısmından kuyruk kısmına kadar olan eklemlerde dalga hareketi oluşmaktadır. Eklemlerin altında bulunan tekerleklerin dönmesiyle rahat bir dalga hareketi oluşmaktadır [12]. Şekil 2.2' de ACM III hareket kabiliyetleri görülmektedir.



Şekil 2.2. ACM III hareket kabiliyetleri [4].

2.2 ACM R3 YILAN ROBOT

Shigeo HIROSE ilk yapmış olduğu yılan robot olan ACM III'ü geliştirerek ACM R3 yapmıştır. Şekil 2.3'de görüldüğü gibi ACM R3 ACM III farklı olarak yüzeyinin her bir tarafı tekerliklere kaplıdır. Yan sarma ve serpatin hareketleri bu robot tarafından kullanılmaktadır. Yüksek tork elde etmek ve teker millerinin çarpışmasını engellemek için HIROSE radyo kontrollü servo motorlar kullanmıştır. Eklemler arası bağlantılar ve diğer kablolama sistemleri gövdenin içinde kalacak şekilde tasarlanmıştır. Her eklemin içinde kendine mahsus ortogonal dönme eksenleri mevcuttur. Engellerden kurtulmak için yılan robot ön kısmını kaldırır ve engelleri tırmanarak aşar. Bununla birlikte, tasarım robotu silindirik bir gövde olduğu için sabit değildir; ancak gövdeyi düz hale getirerek ve ona tekerlekler ekleyerek sabitlik elde edilebilir [13].

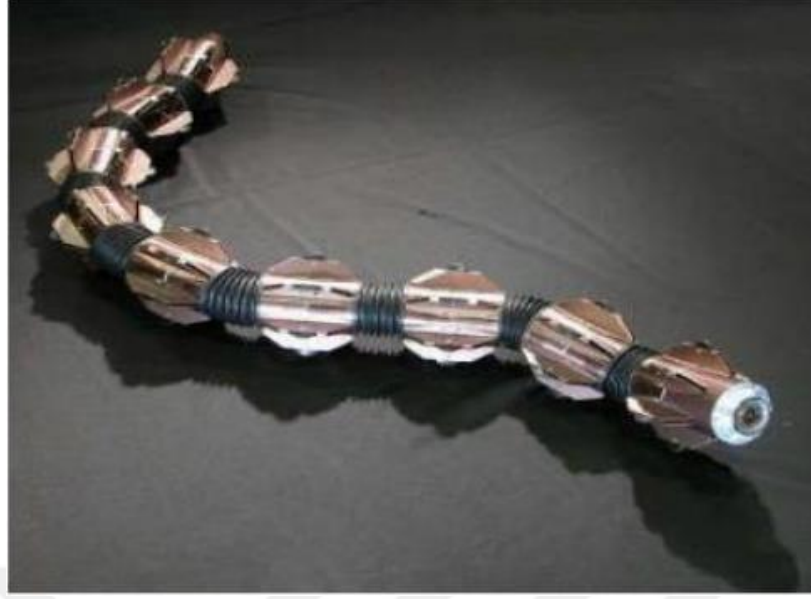


Şekil 2.3. ACM R3 [4].

2.3 ACM R5 YILAN ROBOT

ACM R5 HIROSE ve arkadaşları tarafından araştırma ve keşif faaliyetleri yapmak için geliştirilen hem karada hem de denizde görev ifa edecek olan amfibi bir robottur. Bu yılan robot yüzey altında ve suya dalma ve su yüzeyinde hareket etme yeteneğine sahiptir. ACM R5 üniversal eklemlere sahiptir 3D ve uzayda hareket kabiliyetine sahiptir. Karada hareketini kolaylaştırma için pasif tekerlekler eklenmiştir. Sırtında bulunan pasif yüzgeçler sudaki hareket kabiliyetini arttırmaktadır. Hem karada hem suda 0.4 m/s hıza ulaşabilmektedir [14].

Bu robot dokuz bölümden oluşmaktadır. Robot gövdesinin her iki yanında pasif tekerlekler ve yüzgeçler bulunmaktadır. Şekil 2.4'de ACM R5 görülmektedir. Her eklemin kendine ait kontrol sistemi vardır bundan dolayı her eklem bağımsız olarak hareket edebilir [15].



Şekil 2.4. ACM R5 [4].

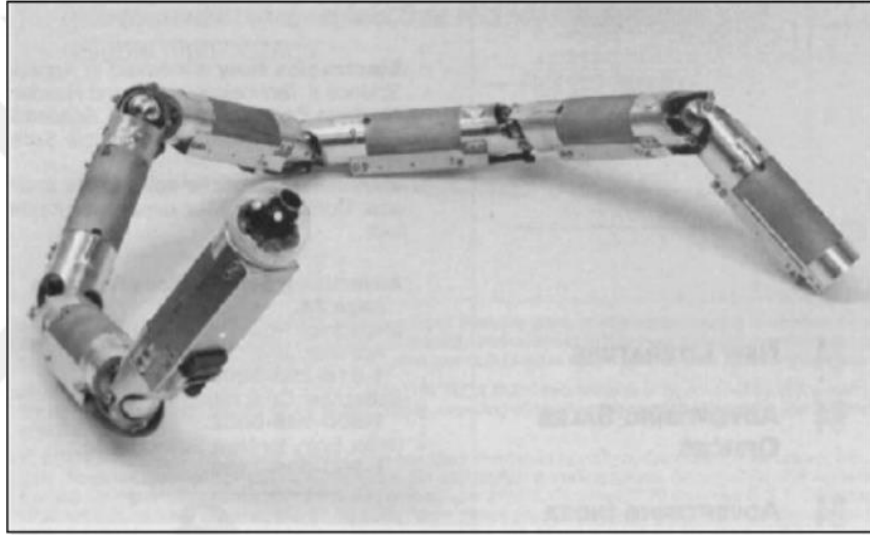
2.4 KARL PAAP'S GMD YILAN ROBOT

Karl Paap ve arkadaşları GMD (Alman Ulusal Araştırma Merkezi) çatısı altında yılan robotları gerçek zamanlı kontrol etmek için bir kontrol sistemi geliştirdiler. Bu bazı segmentler boyunca eğrilikleri kontrol etmek için kablo sarma mekanizmasına sahiptir. Geliştirdikleri bu yılan robot akordiyon tipi hareket gerçekleştirmektedir [16]. Geliştirilen GMD yılanı robot, tekerlekleri yahut uzuvları olmayan biyolojik yılanlara benzer şekilde farklı çevre koşullarında hareket edecek şekilde tasarlanmıştır. Her biri farklı ve ayrı ayrı kontrol edilebilen eklemlerden oluşmaktadır. GMD robotu tasarımı itibariyle diğer yılan robotların yapamadığı hareketleri yapabilmektedir.

En içteki ve dıştaki plakalar arasındaki açığı ölçmek, en etkili izleme türüdür ancak GMD yılanında izleme, sürücünün dönüş sayıları sayılarak yapılır. Saymak için; Her sürücü, dönüşü saymak için bir çift kamış kontağı ile birleştirilmiştir. Bu kamış kontakları, yılanın konumunu izlemek için ana sensörlerdir ve sundukları bilgiler, hareket kontrolünün merkezi bir parçasıdır. Hareket, tüm bölümlerde ayarlanmış ve senkronize edilmiş bükülme ile elde edilir [16].

2.5 IKEDA VE TAKANASHİ YILAN ROBOT

1995 yılında Japon bir elektronik firması olan NEC deprem yılı olarak adlandırdıkları deprem sonrası enkaz altında arama kurtarma faaliyetleri ifa edecek olan robot tasarladıklarını duyurdu. Orochi adı verilen cihaz, Ikeda ve Takanashi tarafından tasarlanan bir Hooke eklemine yeni bir formu olan aktif bir evrensel eklem kullandı. Eklem birbiri universal eklem ile bağlanmıştır. Yılan robot yedi eklemden oluşmaktadır [17]. Şekil 2.5'te NEC firması tarafından enkaz altında arama kurtarma faaliyetleri sürdüreceği yılan robot görülmektedir.

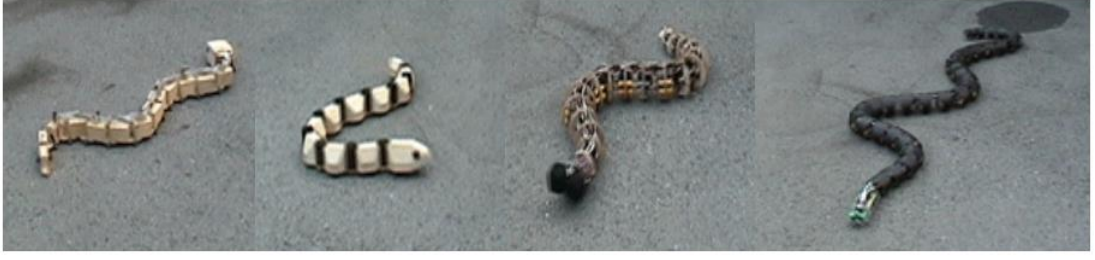


Şekil 2.5. IKEDA ve TAKANASHİ tarafından tasarlanmış yılan robot [17].

Yılan robotun baş kısmına bir kamera yerleştirilmiştir ve böylelikle operatöre konum bilgisi ve görüntü sağlamaktadır. Yılan robot kaygan dalga hareketi ile ilerlemektedir.

2.6 MİLLER YILAN ROBOT

Gavin Miller tarafından geliştirilen yılan robotların hareket ve ilerleme yöntemleri Hirose tarafından yapılan yılan robotlarla aynıdır. Miller geliştirdiği kontrol sistemleri ve yılan robot tasarımında yapmış olduğu iyileştirmeler ile biyolojik yılanlara daha yakın hareket sergileyen yılan robot hareketleri sağlamıştır. Şekil 2.6'da Miller tarafından yapılan farklı yılan robotları görülmektedir.



Şekil 2.6. Miller tarafından geliştirilen farklı tip yılan robotlar [12].

Yapılan bu robot tasarımlarında aktif tekerlekler bulunmaktadır ve düzlemde hareket tipi olarak yanal dalgalanma hareketinin yanında diğer yılan robotlardan farklı olarak yanal kayma hareketi ile ilerleme katetmektedir. Yılanlar uzaktan kumada ile kontrol edilmektedir. Robotların güç kaynağı olan pilleri gövdelerinde bulunmaktadır ve böylelikle kablosuz bir yapıya sahiptirler [12].

2.7 GENBU YILAN ROBOT

Mobil yılan robot, Hirose ve öğrencileri tarafından geliştirildi. 1972'den beri Hirose yılan robotlar üzerine çalışmalar yapmaktadır ve aktif kordon mekanizmasına dayalı farklı robotlar geliştirdi. Hirose önceki çalışmalarında aktif eklemler pasif tekerlerden oluşan robotlar geliştirmişti. Fakat Genbu yılan robot, diğerlerinin aksine aktif tekerlekli pasif eklemlerli bir yapıya sahiptir. Yılan robot pasif eklemlerini kullanarak araziye hızlı bir şekilde adapte olabilir [18].

Her ne kadar pasif eklemlere sahip olmak avantajlar sağlasa da aynı zamanda dezavantajlarda oluşturmaktadır. Pasif mafsallara sahip olmak geniş boşluklardan geçmeyi zorlamaktadır. Robotun eklemleri pasif yapıda olduğu için hareket sadece aktif tekerlerden sağlanmaktadır bu da bazı zorluklar doğurmaktadır. Robotun kullanımı uzaktan kumanda ile yapılmaktadır.

Genbu'nun her ekleminde, tekerlere tahrik vermek için motor, motor kontrolü için ise motor sürücüsü bulunmaktadır. Aynı zamanda gövdenin içinde pil da bulunmaktadır. Şekil 2.7'de Genbu yılan robotun bir eklemimin iç yapısı görülmektedir. Bu robot sisteminde, çok tekerlekli robotların duruşu kullanılarak arazi için uyarlanabilir kontrol mümkündür. Pratik kullanım için bu robot, her eklemden X-ring kullanılarak su geçirmezdir [16].



Şekil 2.7. Genbu yılan robotun iç yapısı [16].

2.8 KOHGA YILAN ROBOT

Yılan benzeri robot Kohgo, altı adet paletli aracın pasif eklemlerle birbirine bağlanmasıyla imal edilmiştir. Kohgo robotu tıpkı Genbu yılanı robot gibi aktif tekerlekli pasif eklemlerli yılanı robot olarak tasniflenebilir. Şekil 2.8’de Kohga görülmektedir. Bu robotun enkaz altında arama kurtarma faaliyetleri yapmak için inşa edilmiştir. Uzaktan kumanda ile kontrol edilmektedir.

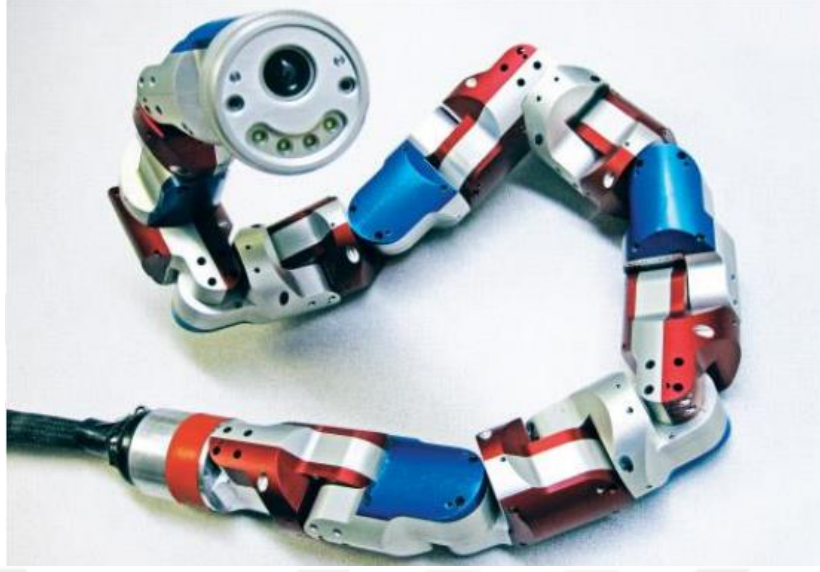
Ana gövdesindeki eklemler pasiftir ve üç serbestlik derecesine sahiptir. Bu robotun sadece baş ve kuyruk kısmında 2 DOF aktif eklemi vardır. Ayrıca kafa kısmında ve kuyruğunda birer adet kamera da mevcuttur. Aktif eklemlerle kameranın kontrolünü sağlamaktadır [19].



Şekil 2.8. Kohga [19].

2.9 CMU YILAN ROBOT

Yaptığı çalışmalar NASA (National Aeronautics and Space Administration) tarafından finansa edilen Kevin Downing CMU (Carnegie Mellon University) uzumsuz ve ayaksız robotlar üzerine çalışmalar yapmıştır. Çalışmaların birinde yılan robotların hareketini sağlayacak yürüyüş üretici bir sistem geliştirmiştir. Mekanik anlamda yılan robotun çevre koşullarına uyum sağlayacak şekilde eklem tasarımını gerçekleştirmiştir. Çalışmalarının bir diğer odak noktası ise yılan robotun hareket planlamalarıdır ve bunun için yer belirleme ve hareket algoritması geliştirmiştir. Yılan robotun hareketini süper servo motorlar kullanarak sağlamış, robotun eklemlerini ise alüminyum kasa üzerine inşa etmiştir. Şekil 2.9’da Kevin Downing tarafından yapılan robot görülmektedir. Bununla birlikte yılan robotun gövdesini bir kaplama ile kaplayarak dış etmenlerden korumaya almıştır. İmal ettikleri son model 97 cm boya sahip olup 16 eklemden oluşmaktadır ayrıca yılan robot uzaktan kumanda ile kontrol edilmektedir [20].



Şekil 2.9. Kevin Downling tarafından yapılan robot [20].

BÖLÜM 3

BİYOMİMETİK YILAN ROBOT

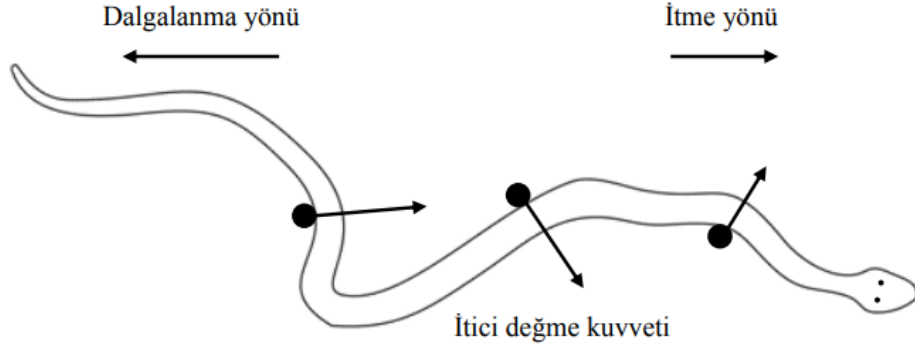
3.1 BİYOLOJİK YILAN HAREKETLERİ

Yılanlar buldukları çevre koşullarına göre hareketlerini değiştirebilirler. Bu yetenekleri, yılanları robot çalışmalarında önemli bir yere getirmektedir. Biyolojik yılanların hareket kabiliyetleri, yılan robotların yapısal tasarımı ve robot kontrolü üzerine yapılan araştırmaların temelini oluşturdu [21].

Gray ve arkadaşları yaptıkları çalışmaların neticesinde biyolojik yılanların hareketlerini mekanik olarak izah ederek bu hareketleri dört başlık altında tasniflediler. Hareketleri şu şekilde sıralayabiliriz: yanal dalgalanma, doğrusal hareket, akordiyon hareket ve yan yan hareket. Bu izahları yılan robotların ilham verici noktalarını oluşturmaktadır. Biyolojik olarak yılanların hareket kabiliyetlerindeki çevikliklerinin çalışılması, yılan robotların performansını arttırmaya yardımcı olabileceğini öne sürdü. Biyolojik yılanlardan toplanan parametrelili şekil yörünge verilerinin tekrarlanması, yaklaşık olarak kinematik olan yılan hareketi için yılan robotlarında eşdeğer hareketler üretebileceği hipotezini sürdürdüler [22].

3.1.1 Yanal Dalgalanma

Tabiatta yılanlar arasında en sık kullanılan hareket biçimi yanal dalgalanma hareketidir. Aynı zamanda bu hareket şekli ekseriyetle yılan robotlarda da sık bir şekilde kullanılmaktadır. Yılanların bu hareketi uygulama şekli yerin düzensizliğinden kuvvet elde etmesiyle ilerlemektedir. Yılanlar yanal dalgalanma hareketini düz ve kaygan ortamlarda sağlayamazlar. Yılan hareketini sürdürdükçe yılanın vücudundaki her nokta zemindeki aynı noktadan geçer ve zemin ile yılan arasında statik değme noktası oluşmaz. [23]. Şekil 3.1' de yanal dalgalanma biçimi görülmektedir



Şekil 3.1. Yanal dalgalanma biçimi [23].

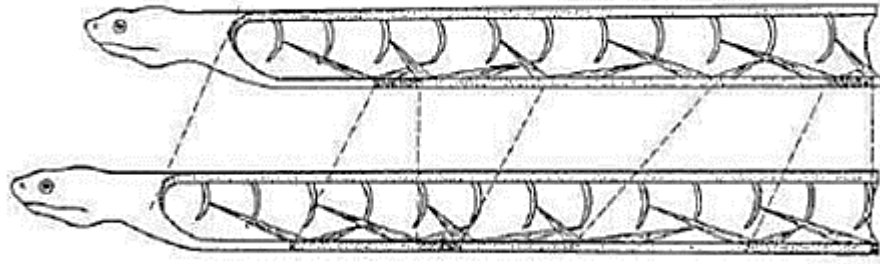
Esas olarak zemin ile yılanın gövdesi daimî olarak sürtünme halindedir ve sürtünmeden yararlanarak yılanın baş kısmından kuyruk kısmına doğru daimî olarak yayılmaktadır. Yılanın vücudunun tüm uzuvları aynı anda hareket etmektedir. Hareketin devamlılığı için daimî olarak üç noktaya gerek duymaktadır. İtici bir kuvvet üretmek için iki nokta ve bu kuvvetin yönünü düzenlemek için üçüncü bir nokta. Yılan pulları yardımıyla zemine olan sürtünmeyi sağlar [24].

Yanal dalgalanma hareketinin verimliliğini etkileyen 2 husus vardır. Bunlar;

- Ortamın konturu. Ortamın konturu ne kadar fazla ise yanal dalgalanma hareketi o kadar verimli bir şekilde gerçekleşir.
- Yılanın boyunun çevresi ile oranı

3.1.2 Doğrusal Hareket

Doğrusal hareket, kütlesi büyük ve ağır olan yılanlar tarafından sıklıkla kullanılan bir hareket çeşididir. Aynı zamanda bu hareket kabiliyetini kullanan yılanların avlanma esnasında fark edilmemek için kullandıkları bir harekettir. Bu harekette yılan zemine düz bir şekilde pullarının zemine sürtünmesiyle kendini ileri doğru çekmesiyle oluşur. Yılan vücudundaki pulları kendini ileri taşımak için bir çengel gibi kullanmaktadır. Aşağıda Şekil 3.2’de verilen yılan tarafından uygulanan doğrusal hareket görülmektedir.



Şekil 3.2. Doğrusal harekette kas davranışları [15].

Bu hareket çeşidi pek etkin ve etkili olamayan hareket çeşididir. Daha çok dar ve hareket kabiliyetinin az olduğu alanlarda tercih edilen bir hareket türüdür. Bu hareketi inceleyen birçok çalışma vardır fakat çalışmaların çoğu teorik düzeydedir. Doğrusal hareketin değişkenlerini saptamak için birçok matematiksel ifade ve modelleme kullanılmıştır.

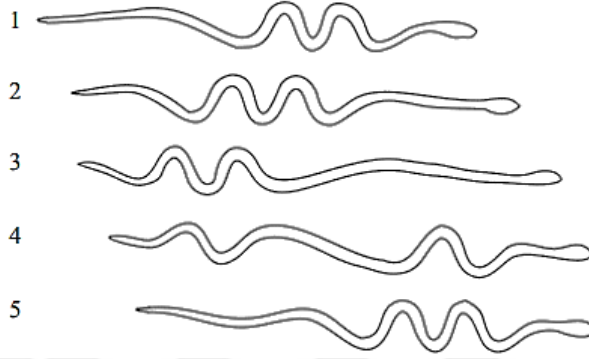
Yapılan ilk çalışmalarda bu hareketin yılan iskeletinin hareketi olarak atfedilmiştir. Daha sonraki çalışmalarda bu hareketin deri tarafından yapıldığı saptanmıştır [15].

Bu hareket türünde, yılanın derisinin yılan iskeletinin doğrultusunda hareket etmesiyle oluşan bir hareket biçimidir. Diğer hareket türlerine nazaran daha yavaş bir hareket çeşididir. Araştırmacılar ilk başlarda bu hareketin omurga tarafından yapıldığı sanmasına rağmen ilerleyen dönemlerde yapılan çalışmalar bu hareketin yılan derisiyle yapıldığını görmüşlerdir. Marvi ve arkadaşları yılanların yaptığı doğrusal hareketi incelemiş ve akabinde bu hareket türünü hem mekanik olarak hem de matematiksel olarak göstermiştir. Yılanlar bu hareketi yaparken her an vücutları yer ile temas halinde bulunmaktadır. Yılanın karın kasları öne doğru çekilir ve pulları kanca görevi görerek tutunma sağlar böylece yılan vücudunu ileri taşır. Bu hareketi devamlı hale getirerek yılan ilerleme sağlar. Yılanın doğrusal harekete başlaması için küçük bir dikey harekete ihtiyacı vardır [22].

3.1.3 Akordiyon Hareket

Akordiyon hareket, yılan vücudunun tıpkı bir akordiyon gibi uzayıp kısılmasıyla oluştuğu için bu şekilde adlandırılmıştır. Yılan vücudunun belli bir kısmı sabit kalırken, vücudun diğer kısmı çekme itme kuvvetini sağlar. Bu hareket

tamamlandıktan sonra ardıl bir şekilde devam eder. Yılan vücudunun bir kısmı hareketli iken diğer kısmı sabit kalmaktadır. Bu hareketin temel esası, dinamik sürtünme katsayısının sebep olduğu düşük orandaki kuvvete ve statik sürtünmenin sebep olduğu büyük kuvvetlerin arasında oluşan farkla yılan vücudunun hareket etmesidir. Şekil 3.3'te akordiyon hareketi görülmektedir.



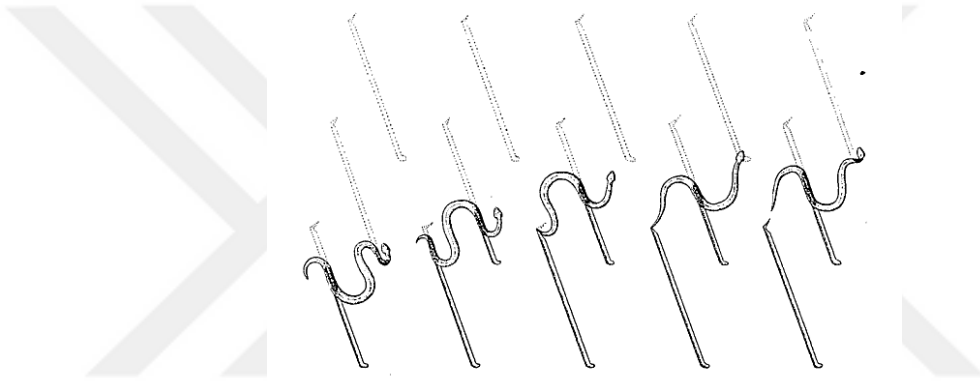
Şekil 3.3. Akordiyon hareketinin adımları [24].

Yılan vücudundaki pullar pasif hareket sağladığı için ileri doğru bir hareket meydana gelir. Yapılan araştırmaların neticesinde araştırmacılar, akordiyon hareketin diğer hareketlere nazaran yedi kat daha az etkili olduğunu görmüşlerdir. Yılanların bu hareketi sürtünme katsayısının yüksek olduğu çevre koşullarında ve dar alanlarda kullandıklarını tespit etmişlerdir. Düşük hız ve ivme değişikliklerinden dolayı bu hareketin uzmanlar tarafından verimsiz olduğu tespit edilmiştir. Verimliliğinin düşük olmasının başlıca nedenlerden bir tanesi, hareketi sağlamak için sürtünme kuvvetini kullanmasıdır. Fakat olumsuzluklara rağmen dar alanlarda avantajlı bir hareket çeşididir [24].

Süreç boyunca yılanın gövdesinin hareketli kısmındaki veya yakınındaki kas dokusunun aktive edilmesi gerekir. Bu hareketin temel esası, vücudun hareket yönü ile farklı yönlerde statik sürtünme katsayısı tarafından üretilen daha büyük sürtünme ile vücut kısmı boyunca kinetik hareket katsayısı tarafından üretilen daha küçük kuvvet arasındaki farktır. Esasen momentumdaki değişiklikler, yavaş hız ve statik sürtünmedeki hususlar akordiyon hareketini verimsiz kılmaktadır. Bu hareket yılanların çok dar alanlarda örneğin boru ve labirent gibi ortamlarda hareket etmesine olanak sağlamaktadır [15,22].

3.1.4 Yan Sarma Hareketi

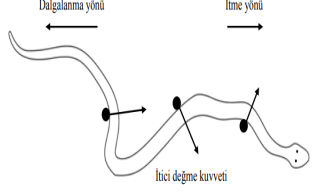
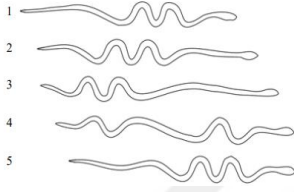

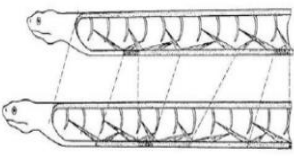
Yılan bu harekette, hareket devamlılığını sekteye uğratmadan sürtünme kuvvetini kullanarak hareketi gerçekleştirir. Yanal dalgalanma hareketinde olduğu gibi hareket dalgalanma etkisine sahipken, kuvveti iletim şekli olarak ise daha çok akordiyon hareketine benzemektedir. İlk hareketi sağladıktan sonra hareketin devamlılığını sağlaması yılan vücudunun ortam ile sürtünmesini devam ettirmesine bağlıdır. Ekseriyetle bu hareket kaygan ve kumlu zeminlerde yılanlar tarafından kullanılır özellikle çöl yılanları bu hareketi sergilemektedir [18]. Şekil 3.4'te yılan tarafından uygulanan yan sarma hareketi görülmektedir.



Şekil 3.4. Yan sarma hareketi [18].

Yılan bu hareketi ilk olarak icra ederken vücudun bir kısmı sabit kalmaktadır, kuyruk ve baş kısmı yerden kaldırılır ve yana doğru atılır. Akabinde kuyruk ve baş kısmı sabit kalırken diğer sabit olan kısım yana atılır. Yılan başı ile 45^0 derecelik bir açı ile oluşturarak harekete devam eder. Yılan hareket halindeyken zemin ile iki nokta arasında temas halindedir. Bu temas yılanın kaymasını engeller ve hareketi daha verimli bir hale getirir. Bu hareketlerin haricinde yılanların özel durumlara karşı geliştirdikleri kendilerine mahsus hareketleri de vardır [15]. Çizelge 3.1' de yılanların tatbik ettiği hareketler görülmektedir.

Çizelge 3.1. Yılanların uyguladıkları hareketler.

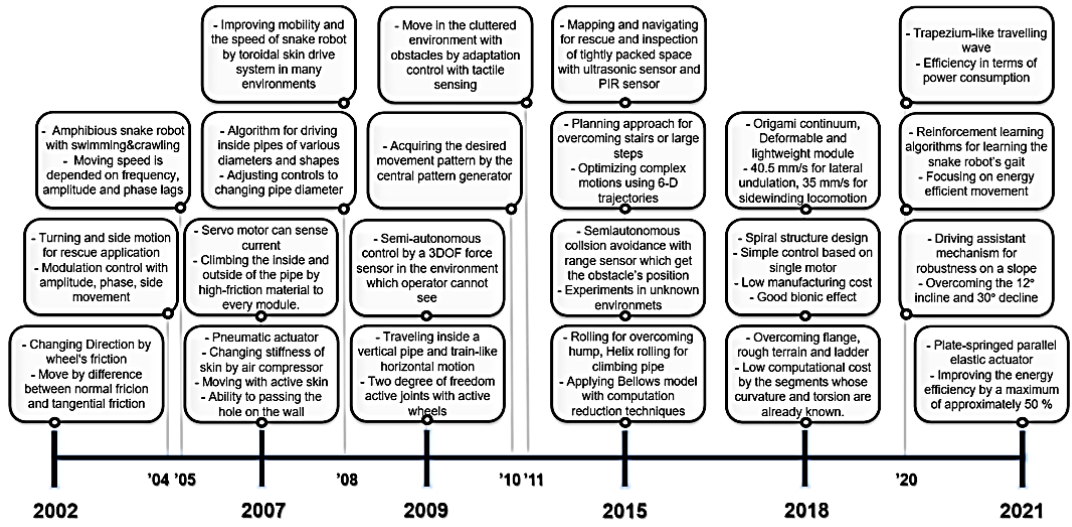
Hareket Çeşidi	Hareket şekli	Hareket Prensipleri
Yanal Hareket		Hareketi, zeminin pürüzlülüğünden ve baştan kuyruğa paralel yayılan sinüzoidal dalgalardan (serpanoid eğri) faydalanarak elde eder.
Akordiyon Hareket		Vücudun esnemesi ve katlanmasıyla ileri itme gücü elde edilir. Katlanmış kısım sabit tutulur, geri kalan kısım çekilir veya itilir.
Yanal Sarma		Bu yılanlar eğimli olarak hareket ederken vücudunu kaldırıp kıvrarak yerde paralel izler bırakırlar.
Doğrusal Hareket		Hareket, ventral deriden kuyruğa doğru bir genişleme ve daralma dalgasının yayılmasıyla gerçekleştirilir.

3.2 YILAN ROBOTLARIN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

3.2.1 Yılan Robotların Avantajları

Yılan robotların yüksek hareket kabiliyetlerinden dolayı farklı operasyon alanlarında yüksek performans sağlamaktadır. Modüler bir yapıya sahip olması farklı görev şartları için uygun modüler yapıya getirilmesine imkân tanımaktadır. Bunlara ek olarak amfibi olarak da tasarlanabilen yılan robotlar hem kara görevleri için hem de su altı görevleri için kullanılabilir. Farklı tip kategorilerde yılan robotların olması görev tanımlarını ve operasyonel etkilerini arttırmaktadır [25]. Şekil 3.5'te yıllara göre yılan robotların teknolojik gelişimi görülmektedir.

- Zeminden yüksek bir alanda sürünmediği takdirde düşme durumu söz konusu değildir. Tasarımı gereği vücudunun büyük bir kısmı zemin ile temas ettiğinden ağırlık merkezi zemine çok yakındır. Uzunlu bir yapıya ve tasarıma sahip olmadığı için yüksek bir yerden düşme durumunda dahi az bir şekilde hasara uğrar. Birçok farklı engeli aşabilme özelliklerine sahiptirler, misal basamak çıkmak, merdiven çıkmak, boru içinde ilerleme vb.
- Yılan robotlar için hareket ettikleri yüzeylerin sertliğinin bir ehemmiyeti yoktur. Buldukları çevre çöl, bataklık, engebeli gibi alanlar olabilir.
- Engeli arazilerde paletli ve tekerlekli robotlar, atlama hareketi yaparken yılan robotlar engelli arazilerde çevreye uyum sağlayarak engebeli alandan kurtulabilirler.
- Yılan robotlar eklemli yapılara sahiptir, görev esnasında herhangi bir ekleminde arıza meydana geldiğinde, arızalı eklem çıkartılır ve yılan robot görevine devam edebilir.
- Yılan robotun eklemleri arasında sadece dönme hareketi mevcuttur ve tekerleklerde olduğu gibi daimî dönme hareketine ihtiyaç duyulmamaktadır. Bundan dolayı sistemin sızdırmazlığı çok rahat bir şekilde sağlanabilir. Bu durum su altı uygulamalarında kolaylık sağlar.
- Yılan robotlar vücutlarını, çevreye asgari temas ile çok dar alanlarda hareketini sürdürecektir ince ve esnek vücut yapılarına sahiptirler. Bulduğu çevre şartlarına göre hareketlerini kolaylıkla değiştirebilir ve uyum sağlayabilir. Çoğu yılan robot modüler yapıda olduğu için görev şartlarına göre modülleri görevleri için yapılandırılabilir.
- Yılan robotlar tasarımları sayesinde tabiatta bulunan farklı tipteki yılanları hareketlerini, sergileyebilmektedir. Serbestlik derecesi arttıkça yılanların uyguladığı hareket çeşitliliği de artmaktadır.
- Yılan robotların vücutları zeminde birçok yere temas ettiğinden hareketleri kararlılık göstermektedir. Yılan robotun hareket esnasında zemin ile çok fazla teması mevcuttur. Bu geniş ölçüde temas alanı, yılan robotların farklı çevre koşullarında iyi çekiş özelliklerine sahip olmasını sağlamaktadır.
- Yapılan araştırmalar yılan robotların, sürtünmeye rağmen az miktarda enerji tükettiğini kanıtladı bu durum yılan robotların güç verimliliğinde iyi olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.5. Yılan robotların teknolojik gelişimi [25].

3.2.2 Yılan Robotların Dezavantajları

Yılan robotların avantajları olduğu gibi dezavantajları da mevcuttur. İlk göze çarpan ise elektro-mekanik yapılarından dolayı yüksek hızlara çıkamamaktır. Kısıtlı olmayan düz arazilerde, geniş görev alanlarında, tekerlekli ve bacaklı robotlar yılan robotlara göre daha iyi bir performans sergilemektedir. Bir diğer dezavantaj konusu ise yılan robotların esnekliği ve yeteneklerinin artmasına rağmen, yüksek serbestlik derecesinin yeteri kadar gelişim gösterememesidir. Yılan robotların modüler yapıda olması ve eklemlerinin faydalı yük taşımaya pek elverişli olmaması diğer dezavantajlarından birisidir[25,26].

Yılan robotların esas amacı biyolojik yılanları taklit etmektir. Uzun yıllardır yapılan çalışmalar ilerleme kat etmiş olsa da yapılan yılan robotlar biyolojik yılanların gerisinde kalmaktadır. Bunlara ek olarak yılan robotların mekanik tasarım, kontrol sistemleri ve algılama teknolojilerinde kısıtlamalar mevcuttur. Biyolojik yılanlar yüzlerce omurgaya sahipken yılan robotlar kısıtlı tork kontrollü eklemlere sahiptir bu durumda robot hareketlerinde kısıtlamaya neden olmaktadır. Yılan robotlar tasarımları geri ince ve hafif gövde yapılarına sahiptirler bundan dolayı büyük miktarlarda faydalı yük taşıyamazlar. Yılan robotların matematiksel modellenmesi ve hareket tipi kontrolleri, yedekli yapıları nedeniyle uzuvlu ve tekerlekli robotlara göre daha zordur.

Çizelge 3.2’de son yıllarda yapılan yılan robot çalışmaları ve karakteristik özellikleri görülmektedir.

Tekerlekli ve uzuvlu robotlara yılan robotları mukayese ettiğimizde temel olarak şu dezavantajları içerir [22];

- Çok fazla serbestlik derecesinin olması, hareket kontrolünü ve planlamasını zorlaştırır.
- Yapının sınırlı olması nedeniyle yük kapasitesi sınırlıdır.
- Tekerlekli robotlara kıyasla yılan robotun hareket hızı daha yavaştır.
- Mekanik yapısı ve tasarımından dolayı çok fazla sensör bulunduramaz, bundan dolayı çevre şartlarını tahlil ve detaylı algılaması sınırlıdır.

Çizelge 3.2. Son yıllarda yapılan yılan robot çalışmaları.

PROJE	YIL	HAREKET	SENSÖR	TAHRİK	DOF	KİNAMATİK YAPI
Takemori et al., Kyoto University	2021	Yanal Dalgalanma-Yuvarlanma-Tırtıl	Konum- Doğrulayıcı sensör	Servo Motor	1	Sabit
Inazawa et al., Kyoto University	2021	Yuvarlanma	Kamera	Servo Motor	1	Sabit
Kakogawa et al., Ritsumeikan University	2021	Sinüs Dalga	Enkoder	Servo Motor	1	Sabit
Virgala et al., Technical University of Kosice	2020	Sinüs Dalga	3D Kamera-Mesafe sensör	Servo Motor	1	Sabit
Virgala et al., Technical University of Kosice	2020	Tırtıl	Optik- mesafe sensör	Servo Motor	1	Sabit
Dear et al., Columbia University	2020	Sinüs Dalga	/	Servo Motor	1	Sabit
Qi et al., Michigan State University	2020	Tırtıl	Basınç Sensör	pinomatik	4	Sabit
Manzoor et al., Mirpur University of Science and Technology	2019	Sinüs Dalga	GPS	Servo Motor	1	Aktif
Whitman et al., Carnegie Mellon University	2018	Yanal Dalgalanma-Yuvarlanma-Tırtıl	Kamera	Servo Motor	1	Sabit
Singh et al., National Institute of Technology	2018	Tırtıl	Enkoder	DC Motor	1	Aktif

3.3 YILAN ROBOTLARIN KULLANIM ALANLARI

3.3.1 Gözlem ve Keşif

Yılan robotların vücut yapılarının esnek olmasından dolayı ve ağırlıklarının robotun vücudunun boyunca dağıtılabilmesi, bu tür robotların insan için hareket alanlarının çok güvenli olmadığı noktalarda ve hareket kabiliyetine imkân tanımayan dar alanlarda gözlem ve keşif için kullanılabilirler. Bakım onarım gerektiren köprü, bina gibi yapılarda, ulaşılması güç olan kısımlarında bakım ve onarım işleri için kullanılabilirler. İnsan yaşamına elverişli olmayan gezegenler, okyanus altı, nükleer santraller gibi bir çok tehlike barındıran alanlarda inşaların yerine uzaktan kontrol ile yılan robotlar kullanılabilirler [12].

3.3.2 Arama Kurtarma

Doğal afetlerde özellikle toprak kayması, deprem, çığ ve tsunami gibi afetlerden sonra oluşan enkaz ve yıkıntıların içerisine gönderilerek, hayata kalan yahut yaralanmış afetzedelere ulaşip yerlerini tespit etmek için kullanılabilirler. Deprem sonrası arama kurtarma faaliyetlerinde ilk 48 saat çok önemli bir yer tutmaktadır. Bundan dolayı enkaz altındaki insanlara çok hızlı bir şekilde ulaşılmalıdır. Doğal afet sonucu oluşan, özellikle deprem sonrası oluşan enkazların içine girmek büyük risk taşımaktadır. Bundan dolayı arama kurtarma faaliyetlerinde personelin can güvenliğini tehlikeye atmadan arama faaliyetlerini ifa edecek olan yılan robotlar kullanılabilir. Şekil 3.6'da deprem sonrası arama kurtarma faaliyetlerini ifa etmek Gökhan Çetin ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş yılan robot görülmektedir.

Yılan robotlara kullanılacakları göreve istinaden kamera, mesafe sensörü, ısı sensörü, gaz sensörü ve termal sensörler eklenebilir. Aynı zamanda yılan robotun eklemleri ile kazazedelere ihtiyaç duyulan gereksinimler de taşınabilir [27],[28].



Şekil 3.6. Deprem sonrası arama kurtarma faaliyetlerini ifa edecek yılan robot [28].

3.3.3 Tıbbi Uygulamalar

Endoskopik uygulamalarının tıp alanında kullanılmaya başlamasıyla birlikte hastalıkların teşhisi ve tedavilerinde büyük gelişmeler sağlamıştır. Yılan robotların esnek kabiliyetleri ve rahat bir şekilde farklı şekil alma özellikleri sayesinde zorlu cerrahi operasyonlarda ciddi kolaylıklar sağlamaktadır.

3.3.4 Askeri Uygulamalar

Farklı tür hareket kabiliyetlerine sahip olmalarından dolayı yılan robotlar birçok çevre koşullarında hakaret yeteneklerine sahiptir. Bu tip robotlar düşman bölgesine gözleme, keşif faaliyetleri yürütme, bulunduğu ortamdan görüntü sağlama ve bunların dışında mayın, bomba gibi mühimmatların yerleştirilmesinde kullanabilirler. Şekil 3.7’de askeri amaçlı gözlem ve keşif amaçlı Shivraj S. Dalu ve arkadaşı tarafından yapılan yılan robot [29].



Şekil 3.7. Askeri gözlem ve keşif amaçlı yapılan yılan robot [29].

Özellikle son dönemlerde askeri operasyonel bölgelerde insansız araçların kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Uzaktan kontrollü araçlarla birlikte personel kayıpları asgari

düzeye indirilmektedir. Önümüzdeki yıllarda yılan tipi robotların askeri alanda kullanımının da artması beklenmektedir.

3.3.4 Boru İçi Denetim

Boru hatları içlerinde meydana gelen arızaların yerini belirlemek kimi zaman mali külfetin yüksek olduğu uygulamalardır. Boru hatlarında meydana gelen arızalara nokta tespiti yapmak kimi zaman olanaksızdır. Yılan robotların esnekliği ve hareket kabiliyetlerinin yüksek olmalarından dolayı rahatlıkla boru içlerinde hareket edebilmektedir. Yılan robota eklenen sensörler ile kolaylıkla boru hattı içinde meydana gelen sızıntı yahut arızaları bulabilir ve bununla birlikte tespit ettiği arızaya ekipmanları ile müdahale ederek sorunu ortadan kaldırabilir. Böylelikle boru içi denetimde yüksek maliyetlere neden olan hata tespiti ve bakım onarımı daha kolay ve ucuz bir yol ile yapılabilmektedir [12]. Şekil3.8’de TÜBİTAK tarafından boru içi denetim için yapılan yılan robot gösterilmektedir.



Şekil 3.8. TÜBİTAK tarafından geliştirilen boru içi denetim robotu [12].

3.4 YILAN ROBOTLARIN SINIFLANDIRILMASI

Son yıllarda, yılan robotlar üzerine ciddi araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırmalar yılan robotların ekseriyetle matematik modellemesi, mekatronik sistemleri, mekanik tasarımları ve yazılımlar gibi birçok alanında sürmektedir. Yılan robotların sınıflandırılması üzerine yapılan birçok çalışma yılan robotların gelişimi için büyük heyecan uyandırmaktadır. Yılan robotların birçok farklı sınıflandırılması vardır. Bunlar özellikle; çalışma şartları, görev yerleri, hareket türleri, aktüer çeşitleri ve eklem yapıları olmak üzere sınıflandırmalar mevcuttur. Çizelge 3.3'de bu sınıflandırmalar görülmektedir [22].

Çizelge 3.3. Yılan robotların özelliklerine sınıflandırılması.

Çalışma Çevresi	Hareket Tipleri	Aktüatör Tipi	Bağlantı Yapısı	Bağlatı Tipi	Kontrol yöntemi
<ul style="list-style-type: none">• Karasala açık, kısıtlanamaz ortam• Karasal, kısıtlı çevre• Su altı	<ul style="list-style-type: none">• Pasif tekerlek• Aktif tekerlek• Paletli tahrik	<ul style="list-style-type: none">• Elektronik motor• Hidrolik• Pnömatik• Akıllı malzeme• Kablolu	<ul style="list-style-type: none">• Paralel eklemeli• Ortogonal mafsallı• Eğik mafsallı	<ul style="list-style-type: none">• Üniversal tip• Burulma tip• Teleskopik tip• Paralel mekanizmalı bağlantı• Kaplin eklemeli	<ul style="list-style-type: none">• Serpenoid eğrili• Merkezi olmayan kontrol• Kinematik/Dinamik tabanlı yöntem

Genel olarak yılan robotları iki başlık altında tasnifleyebiliriz. Bunlar karasal yılan robotlar ve sucul yılan robotlar olarak adlandırabiliriz.

3.4.1 Karasal Yılan Robotlar

Karasal yılan robotlar üzerine ilk çalışmaların yapıldığı sınıftır. Sucul ve amfibi yılan robotlar üzerine yapılan çalışmalara nazaran daha geniş bir literatür havuzuna sahiptir. Karasal yılan robotlarda kendi içinde dört farklı çeşide ayrılmaktadır. Bunlar;

- Pasif tekerlekli yılan robotlar: Pasif tekerlekli yılan robotlarda güç aktarımı tekerleklere olmaz, tahrik eklemlere verilir ve eklemlerinden pasif bir şekilde tekerleklere iletilir. Tekerlekler hareket kolaylığı sağlar.
- Tekerleksiz yılan robotlar: Tekerleksiz yılan robotlarda tekerlek mevcut değildir. Bu robotlar iç eklemlerini kullanarak hareketlerini oluştururlar. Tekerlekleri bulunmadığı için tekerlekli robotlara nazaran yüksek sürtünmeye sahiptir.

- Aktif tekerlekli yılan robotlar: Bu robotlar gövde üzerinde tekerleklere sahiptir ve tahrik tekerlere ileterek hareket sağlar.
- Uzama şeklinde hareket eden yılan robotlar: Aktüatörlü bağlantılara ek olarak modüller arasında doğrusal aktüatörlere sahiptir [14].

3.4.2 Amfibi ve Sucul Yılan Robotlar

Amfibi yılan robotlar hem karada hem de suda hareket edebilmektedir. Sucul robotların tasarımı sadece su altında hareket edecek şekilde tasarlanmışken amfibi yılan robotlar tasarımları itibariyle iki çevre koşulunda rahatlıkla hareket edebilmektedir. Sucul yılan robotlarında kendi içlerinde 3 alt başlık altında incelenmektedir [30,31].

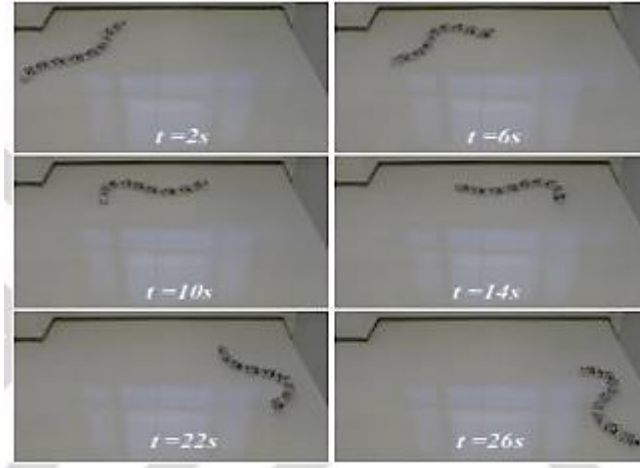
- Aktif pervaneli yılan robot: Bu robot türünde, serpantin hareketine bir ek olarak itme kuvveti oluşturmak için yılan robota bağlı bir şekilde geçirilmiş mekanizmadan müteşekkildir.
- Pasif pervaneli yılan robot: Harekete geçirilmemiş, motor tarafından tahriki olmayan mekanizmalardan oluşan ve serpantin hareketine ek olarak pasif bir şekilde itme kuvveti oluşturur.
- Pervanesiz yılan robot: Bu robot türünde, serpantin hareketi dışında başka bir itme kuvvetine sahip değildir.

3.5 YILAN ROBOTLARIN HAREKET KABİLİYETLERİ

3.5.1 Dönme Hareketi

Yılan robotlarda farklı tiplerde kontrol sistemleri mevcuttur bunlardan bir tanesi, Genlik Modülasyon Metodu (GMM) dur. Bu kontrol yöntemi, engellerden kurtulmak ve lazım gelen dönüş açısını oluşturmak için kullanılmaktadır. Yılan robotların en temel hareketlerinden biri olan dönme hareketi Şekil 3.9'da görülmektedir.

Matsuo, osilatörü kullanarak sinirsel osilatör özelliğine sahip ve yılan robotun hareket kontrolüne uygulanabilen bir kontrol sistemi geliştirmiştir [32].



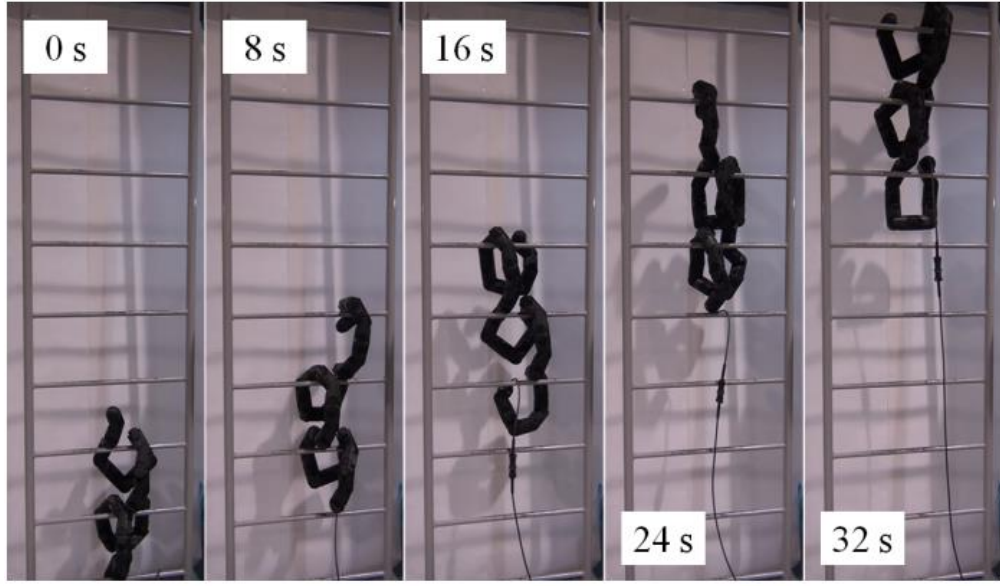
Şekil 3.9. Yılan robot dönme hareketi [32].

3.5.2 İleri ve Geri Hareket

Yılan robot hareketlerini kontrol etmek ve esas noktası dinamik model olan Merkez Örüntü Üretici (MÖÜ) harmonik hareketleri kontrol etmek için, hareket kontrollü bir model oluşturulmuştur. Yılan robotta ileri ve geri hareketi elde etmek için osilatör yapısında ufak bir parametre değişikliği yapılmıştır. Yılan robotların eklemlerine S şekli oluşturularak ileri yahut geri hareket elde edilmektedir. Yılan robotların bazılarında ileri ve geri hareket vücutlarının sadece S formunu alarak gerçekleştirirken bazı yılan robotlar ise bu hareketi aynı anda kendi eksenleri etrafında dönerek oluşturmaktadır.

3.5.3 Basamak Çıkma Hareketi

Basamak ve merdiven gibi zorlu çevre koşullarında hareket etmek ve bu engelleri aşmak için, yılan robotlara bir gezinme yaklaşımı sunulmuştur. Yılan robot çevresini lazer tarayıcı ile tarayarak çevresini algılar akabinde merdiven yahut basamağı tırmanmak için Z ekseninde S hareketleri yaparak tırmanmaya başlar. Yılan robot, ritmik bir hareket ile hareketin devamlılığını sağlayarak engeli aşar [33]. Şekil 3.10'da basamak tırmanan bir yılan robot görülmektedir.



Şekil 3.10. Basamak tırmanan yılan robot [33].

3.5.4 Yüzme Hareketi

Yılan robotlarda yüzme kabiliyeti karasal robotlara göre daha kolay bir hareket kabiliyetidir. Yılan robotların sınıflandırılmasında sucul ve amfibi yılan robotların yüzmeyi gerçekleştirebilmesi için pasif yahut aktif pervaneleri bulunmaktadır. Tıpkı kara yılanlarında olduğu gibi sucul yılanlar da suyun içinde S şeklini oluşturarak yüzme hareketini oluşturmaktadır. Bunlara ek olarak yılan robotların yüzme kabiliyeti kazandırmak için bir ağırlık merkezi kontrol noktası tasarlanmış ve yılan robotlara yüzme kabiliyeti kazandırılmıştır.

3.5.5 Yana Dönüş Şeklinde Hareket

Bing ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarda, hesaplama süresi hızlı olan MÖÜ modelini önermişlerdir. Daha sonrasında yılan robot çalışmalarında hareket kontrolü olarak MÖÜ tabanlı sistemler sunuldu. Biyomimetik yılan robotların bir diğer hareket kabiliyeti ise yana dönüş hareketidir. Yılan robotların bu hareketi aşağıdaki şekilde, Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Bu hareketi yılan robot hilal şeklini alarak gerçekleştirmektedir.



Şekil 3.11. Yana dönüş hareketi [34].

Alexander ve arkadaşları yılan robotlara doğrusal ve farklı hareket çeşitleri uygulamışlardır. Yaptıkları çalışmada zemine ve vücut eğrisine uygun bir şekilde hareketler tanımlamışlardır. Yılan robotun sistem dinamiklerinin tekrarlı olan matematiksel uyumu, hareketin parametre kapsamına göre sabit sistemsel davranışlarının tatbik ederek bir kontrol mekanizması uyumunu oluşturmasını sağlayarak hareketini gerçekleştirmişlerdir[28,32,34].

3.6 YILAN ROBOT MATEMATİKSEL MODELİ

Yılan robotlarının hareket şekillerinin matematiksel olarak modellenmesi ve analizi hakkında yapılan akademik çalışmalar, yılan robotun hareket ettiği yüzeyin düzensiz yahut düz olmasına göre tasniflenebilir. Düz yüzeylerdeki harekette kendi içinde alt başlıklara ayrılmaktadır.

Yılan robotların yana hareket kabiliyetlerinin olmaması düşüncesi, yılan robotların matematiksel modellemesinde en sık başvurulan metottur. Bu yaklaşım, yılan robotun oluşturduğu hareketlerinin denklemlerine harmonik olmayan kısıtların eklenmesiyle sağlanır.

Yan yan kayma kısıtının dikkate alındığı çalışmaların haricinde yılan robotların eklemlerinin tabiatta bulunan yılanların eklemleri gibi izotropik olmayan sürtünme özelliklerinin tatbik edildiği kabullenmeleri yapan pek çok farklı yılan robot modelleri bulunmaktadır.

Dinamik ve statik Coulomb sürtünme kuvvetlerini barındıran izotropik olmayan sürtünme kuvveti özellikleriyle yılan robotların 2D dinamik modellerini inceleyen bir araştırmada Newton-Euler denklemlerine yer verilmiştir. Başka bir çalışmada ise tekerleksiz yılan robotun dinamik modellemesi Newton'nun hareket yasalarından ikinci yasayı kullanarak gerçekleştirmişler [35].

Kane ve arkadaşları yılan robotların izotropik olmayan ve viskoz zeminde sürtünme ile hareket sağlayan robotların dinamik modellerini yaptıkları çalışmalar ile oluşturdular. Nilson ise zemin sürtünme kuvvetlerini göz önüne alan bir model gerçekleştirmiştir. Araştırmacılar Newton-Euler denklemlerini kullanarak yılan robotun düz düzlemdeki hareketlerini 3D dinamik modellerini oluşturmuşlardır. Coulomb tarafından oluşturulan statik ve dinamik model sinüs hareket ve kaldırma modeli için tatbik edilmiştir. Transeth ise düzgün olmayan sert sürtünme yasalarını kullanarak modelleme yapmıştır. Vossoughi yaptığı çalışmalarda Gibbs-Appell yaklaşımını kullanarak tekerleksiz biyomimetik yılan robotun 3D statik ve dinamik analizlerini yapmıştır [35].

3.6.1 Biyomimetik Yılan Robot Kinematığı

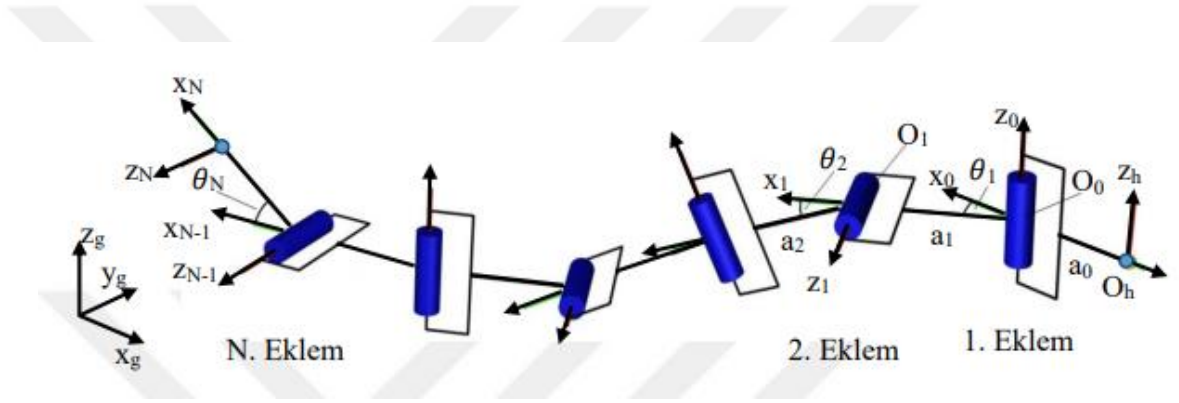
Yılan robotun kinematığı, üç boyutlu uzay geometrisinde etrafındaki nesnelere ve kendi tasarım yapısının konumuyla ilgilidir. Konum bilgisi, konum yöneliminin ve vektör matrisi gibi iki bileşenle izah edilir. Sayısal olarak bir cismin konumu yönelimi matrisi ve konum vektörü ile saptanır.

Kinematik, nesnelere hareketleriyle ilgilenen bir bilim dalıdır. Kinematik ile yılan robotun hız, ivme ve kuvvet analizleri yapılabilir. Kinematik özellikle eklemeler arasındaki ilişkileri tanımlar. Yılan robotlar tasarım olarak birbirinden bağımsız hareket kabiliyeti olan dönme ve öteleme hareketlerini yapan eklemlere ve bu eklemleri birbirine bağlayan bağlantılardan oluşur. Yılan robotun her bir eklemi hareketi gerçekleştirdikten sonra ardı gelen eklem bir önceki hareketin yerini alır ve hareket bu şekilde devamlılığını sağlar. Peşi sıra gelen bu yapıya açık kinematik zincir olarak adlandırılır. Bu hareketler 4x4 konum matrisi ile ifade edilirler ve her eklem için bu matrisler oluşturulur. Matrislerinin sayısını yılan robotun serbestlik derecesi belirler. Geometrik uzayda yılan robot için altı serbestlik derecesi yeterlidir.

Yılan robotun kinematığı, robot eklemlerinin konumları, yılan robotun hızı ve ivmesi arasındaki ilişkilerle ilgilidir. Biyomimetik yılan robot ana iskeletinden eklemelerine doğru dönel eklemeler ile birbirine eklenmiştir. İki eklem arasındaki bağ homojen değişim matrisi ile izah edilir. Eklemler için oluşturulan matrislerin çarpılmasıyla ana gövde ile ortam arasındaki ilişki tanımlanır. Yılan robotun ters kinematik

denklemlerinde karşılaşılan doğrusal boyutta olmayan denklemlerin çözümleri çok karmaşık yapıya sahiptir.

Aşağıdaki şekilde (Şekil 3.12) kinematik parametrelere gösterilen N adet ekleme sahip yılan robotun kinematik yapısını modellemek için sistemsal bir anlayışa sahip Hartenberg kuralına göre belirlenmiştir. Bir yılan robotun her eklemi kinematik olarak tanımlanabilir. Yapılan çalışmalarda dönel mafsallarda θ_i , yılan robotun eklemlerinin değişkeni olarak tanımlanır. Diğer değişkenler ise yılan robot sabit değişkenlerdir. Yılan robotun prizmatik eklemde d_i eklem değişkenini tanımlarken diğer üç değişken yılan robotun sabit bağlantı değişkenleridir. Bir mekanizmada büyüklüklerin tanımlanmasını gösteren şekle Denavit-Hartenberg denir.



Şekil 3.12. N bileşenli yılanın kinematik gösterimi [15].

Biyomimetik yılanlı robotun kinematik bileşenleri aşağıdaki Çizelge 3.4'te ve yılan robotun üzerinde gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Yılan robot bileşenleri.

Sembol	Tanım	Birim
m_i	Kütle	kg
I_i	Atelet Momenti	$kgmm$
l_i	Bağlantı Uzunluğu	m
Q_i	Bağlantı Açısı	$derece$
d_i	Z Eksenin Yönündeki Uzunluğu	mm
a_i	X Eksenindeki Uzunluğu	mm
b_i	Hareket eksenini Yönündeki Vektör	mm
r_i	Hareket eksenini Yönündeki Uzunluk	mm
J_i	Jakobyen Matrisi	
T_i	Bağlantının Homojen Dönüşüm Matrisi	

Biyomimetik yılan robotun eklemlerinin her biri m kütlelerine, uzunlukları ise l kadar olsun θ açısı x eksenini üzerindeki açı d parametresi ise yılan robotun eklem ağırlık merkezi yerleşimini göstermektedir. Yılan robotun kinematik modeli için her eklemine bir koordinat sistemi tanımlanmalıdır. i yılan robotun ivmesini hızını ve eklem pozisyonunu denklemleri aşağıda verilmiştir. Yerçekiminin türevini alırsak yılan robotun hızını ve yılan robotun hızının türevini alırsak yılan robotun ivmesini vermektedir (denklik (3.1-3.6)).

$$x_i = x_b + \sum_{j=1}^{i-1} l_j \cos \theta_j \quad (3.1)$$

$$z_i = z_b + \sum_{j=1}^{i-1} l_j \sin \theta_j \quad (3.2)$$

$$\dot{x} = \dot{x} - \sum_{j=1}^{i-1} l \dot{\theta}_j \sin \theta \quad (3.3)$$

$$\dot{z} = \dot{z} + \sum_{j=1}^{i-1} l \dot{\theta}_j \cos \theta \quad (3.4)$$

$$\ddot{x} = \ddot{x} - \sum_{j=1}^{i-1} l \ddot{\theta}_j \sin \theta - \sum_{j=1}^{i-1} l \dot{\theta}_j \dot{\theta} \cos \theta \quad (3.5)$$

$$\ddot{z} = \ddot{z} - \sum_{j=1}^{i-1} l \ddot{\theta}_j \cos \theta - \sum_{j=1}^{i-1} l \dot{\theta}_j \dot{\theta} \sin \theta \quad (3.6)$$

Yılan robotun i bağlantısıyla hız, ivme ve yerçekimi merkezinin konum parametreleri aşağıdaki denklemler ile bulunur (denklik (3.7-3.12)).

$$x_{ci} = x_b + \sum_{j=1}^{i-1} l \cos \theta + d_i \cos \theta \quad (3.7)$$

$$z_{ci} = z_b + \sum_{j=1}^{i-1} l \sin \theta + d_i \sin \theta \quad (3.8)$$

$$\dot{x}_{ci} = \dot{x}_b - \sum_{j=1}^{i-1} l \dot{\theta}_j \sin \theta - d_i \dot{\theta} \sin \theta \quad (3.9)$$

$$\dot{z}_{ci} = \dot{z}_b + \sum_{j=1}^{i-1} l \dot{\theta}_j \cos \theta + d_i \dot{\theta} \cos \theta \quad (3.10)$$

$$\ddot{x}_{ci} = \ddot{x}_b - \sum_{j=1}^{i-1} l \ddot{\theta}_j \sin \theta - \sum_{j=1}^{i-1} l \dot{\theta}_j \dot{\theta} \cos \theta - d_i \ddot{\theta} \sin \theta - d_i \dot{\theta} \dot{\theta} \cos \theta \quad (3.11)$$

$$\ddot{z}_{ci} = \ddot{z}_b - \sum_{j=1}^{i-1} l_j \ddot{\theta} \cos \theta - \sum_{j=1}^{i-1} l_j \dot{\theta} \sin \theta - d_i \ddot{\theta} \cos \theta - d_i \dot{\theta} \sin \theta \quad (3.12)$$

Biyomimetik yılanlı robot N adet eklemden oluştuğunda yılan robotun ağırlık merkezi aşağıda verilen denklem ile bulunur (denklik (3.13-3.14)).

$$MX_c = \sum_i^n mx_{ci} \quad (3.13)$$

$$MZ_c = \sum_i^n mz_{ci} \quad (3.14)$$

Yılan robotun ağırlık merkezinin yer değişim ivmesi ve hızı aşağıdaki formüller ile hesaplanır (denklik (3.15-3.19))

$$X_c = \frac{\sum_{i=1}^n mx_{ci}}{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.15)$$

$$\dot{X}_c = \frac{\sum_{i=1}^n m\dot{x}_{ci}}{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \dot{x}_i \quad (3.16)$$

$$\ddot{X}_c = \frac{\sum_{i=1}^n m\ddot{x}_{ci}}{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ddot{x}_i \quad (3.17)$$

$$Z_c = \frac{\sum_{i=1}^n mz_{ci}}{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \quad (3.18)$$

$$\dot{Z}_c = \frac{\sum_{i=1}^n m\dot{z}_{ci}}{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \dot{z}_i \quad (3.19)$$

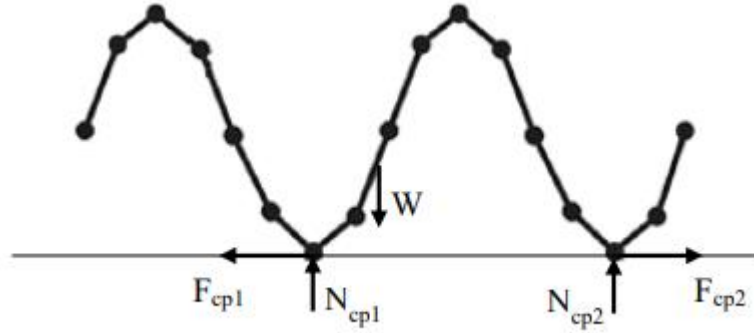
X ve Y yer değişimleri, birinci türevleri hızı verirken ikinci türevleri ise ivmeyi vermektedir.

3.6.2 Biyomimetik Yılsarı Robot Dinamiđi

Biyomimetik yılsarı robotun hareketli eklemlerinin dinamik analizi, motorlar tarafından tahrik edilen eklemlerin üzerindeki moment yahut kuvvet büyüklükleri, yılsarı robotun bileşenleri ile hızı ivmesi ve zamana göre değişen konumu arasındaki ilişkilerin incelenmesi olarak tanımlanabilir. Yılsarı robotun dinamik modelinin oluşturulması için robotun dinamik davranışlarını izah eden doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin oluşturulup çözümlenmesi gerekmektedir.

Robotların dinamik modellerinin çıkarılması konusunda birçok farklı çalışmalar yapılmıştır. Bu denklemlerin çıkarılmasında Lagrange-Euler ve Newton-Euler denklemleri temel teşkil etmiş ve bu denklemler ile birçok farklı yöntem geliştirilmiştir.

Biyomimetik yılsarı robotun dinamik denklemlerinin bulunması, robotu hareket ettirecek tork hesabı için gerekmektedir. Yılsarı robotların birçok zorlukları vardır. Bunlardan biri dinamik denklemlerini türetmek ve n eklemlili bir robota tatbik etmek zorluklardan biridir. Bu çalışmada Lagrange yöntemi ile yılsarı robotun dinamik modeli oluşturulmuştur. Aşağıdaki Şekil 3.13'te yılsarı robotun dinamik denklemler parametreleri şekil üzerinde gözükmektedir.



Şekil 3.13. Yılsarı robotun dinamik parametreleri[15].

Yılsarı robotun doğrusal yönde vücut hareketini sağlması her eklemin yere değmesiyle olacaktır. Eklemlerdeki değme noktaları yılsarı robotu hareket ettirmek için iki sürtünme kuvvetinin tesiri altında olacaktır. Sürtünme kuvveti Coulomb sürtünme şekli olarak formüle edilebilir (denklik 3.20).

$$F_i = -\mu \cdot \sin(\nu) \cdot N_i \quad (3.20)$$

Formülde verilen μ , yüzeyin yılan robotla değme noktasındaki sürtünme katsayısıdır. Burada göz önüne alınması gereken husus değme noktalarının asla sabit olamayacağıdır. Yılan robotun bir değme noktası durağın diğeri ise yılan robotun yüzeyine doğru kaymaktadır. Yılan robota Newton'un ikinci kanunu tatbik edildiğinde aşağıdaki denklemler elde edilir (denklik (3.21-3.22)).

$$N_{cp2} = \frac{1}{d} [(W + M\ddot{Z}_c)(x_c - x_{cp1}) - M\ddot{Z}_c] \quad (3.21)$$

$$N_{cp2} - W + N_{cp1} = M\ddot{Z}_c \quad (3.22)$$

Denklemlerde yer bulan d yılan robotun destek noktasını, W ağırlığını, N ise yılan robotun destek kuvvetini göstermektedir.

Dinamik sistemler potansiyel ve kinetik enerji farklarından yararlanarak Langrange denklemiyle basit bir modelleme yapılabilir. K ve P robotun kinetik ve potansiyel enerjilerini temsil eder. İki enerjinin farklı Langrange formülü ile ifade edilir (denklik 3.23).

$$L_{(q,\dot{q})} = K_{(q,\dot{q})} - P_{(q)} \quad (3.23)$$

Öncelikli olarak yılan robotun genelleştirilmiş koordinatları bulunur (denklik 3.24).

$$q = [Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n, x_b, z_b] \quad (3.24)$$

Yılan robotun hareket denklemleri aşağıdaki gibi formüle edilir (denklik 3.25).

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = Q_i^{nc} (i = 1, 2, 3, \dots, n + 2) \quad (3.25)$$

Yılan robotun genelleştirilmiş kuvvetleri aşağıdaki formüllerle bulunur (denklik 3.26-3.28).

$$Q_{Q_j} = -l_j \left[\sin Q_j \sum_{i=j+1}^n F_{xi} \right] + l_j \left[\cos Q_j \sum_{i=j+1}^n N_{zi} \right] + \tau_{j-1} - \tau_j \quad (3.26)$$

$$Q_{xb} = \sum_{i=j+1}^n f_{xi} \quad (3.27)$$

$$Q_{zb} = \sum_{i=j+1}^n N_{zi} \quad (3.28)$$

Yılan robotun kinetik enerjisi ve potansiyel enerjisi aşağıdaki denklemlerle bulunur (denklik 3.29-3.30).

$$K = \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{2} l_i Q_i^2 + \frac{1}{2} m_i (x_i^2 + z_i^2) \right] \quad (3.29)$$

$$V = \sum_{i=1}^n m_i g z_{ci} \quad (3.30)$$

Oluşturulan denklemler Lagrange formülünde yerlerine konulursa N tane ekleme sahip biyomimetik yılanlı robotun dinamik denklemi aşağıdaki gibi formüle edilir (denklik 3.31).

$$BT = M(\theta)\ddot{q} + H(\theta, \dot{\theta}) + F(\theta) + G(\theta) + S(\theta) \quad (3.31)$$

$M(n+2) \times (n+2)$ pozitif simetrik atalet matrisi, $H(n+2) \times 1$ merkezkaç ve Coriolis terimleri, $F(n+2) \times 1$ sürtünme kuvvetleri, $B(n+2) \times (n-1)$ sabit matris, $G(n+2) \times 1$ matrisi potansiyel enerji, $S(n+2) \times 1$ matrisi yardımcı kuvvetleri, $T(n-1) \times 1$ giriş torkunu ve q, \dot{q}, \ddot{q} $(n+2) \times 1$ genelleştirilmiş koordinatlar matrisi ve onların türevlerini göstermektedir. Denklemdaki matrisler aşağıda gösterilmiştir (denklik 3.32-3.35).

$$M = \begin{bmatrix} M_{n \times n} & N_{n \times 2} \\ M_{2 \times n} & N_{2 \times 2} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$q_N = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n m_i & 0 \\ 0 & \sum_{i=1}^n m_i \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$p_{Mij} = \left[m_j d_j l_j + \left(\sum_{k=j+1}^n m_k \right) l_i l_j \right] \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (3.34)$$

$$M_{2j} = \cos \theta_j \left[m_j d_j + \left(\sum_{l=j+1}^n m_k \right) l_j \right] \quad (3.35)$$

3.6.3 Düz Dinamik

Düz dinamik denklemler biyomimetik yılanlı robotun herhangi bir t zamanında kuvvet ve momentler verildiğinde robotun yer değiştirmesi, konumu, hızı ve ivmesini bulmak için kullanılmaktadır. Yılan robotun hareketi eklemlere gönderilen tork kuvveti ile hesaplanır. Bunun için denklem 3.37 kullanılır. Bu denklemin çözümüyle birlikte yılan robotun eklemlerinin açısal ivmeleri ve yılan robotun kafa kısmındaki bir noktanın ivmelenmesi hesaplanabilir. Akabinde yılan robotun açısal yer değişimi, açısal hızları ve hız pozisyonları hesaplanabilir. Biyomimetik yılanlı robotun hareketlerinin oluşturduğu değişkenler, yılan robotun eklemleri için tork değeri verildiğinde hesaplanabilir.

3.6.4 Ters Dinamik

Ters dinamik, yılan robotun istenilen bir konuma götürülmesi için ihtiyaç duyulan moment ve kuvvetlerin hesaplanma işlemidir. Denklem 3.37'yi kullanarak yılan robot için gerekli tork hesabı yapılır. Bağlı eklem ve mutlak açıları aşağıdaki gibi bulunur (denklik 3.26).

$$\varphi_i = \theta_{i+1} - \theta_i \quad i = 1, 2, \dots, n - 1 \quad (3.36)$$

Yukarıdaki formülün matris halinde yazımı aşağıda gösterildiği gibidir (denklik 3.37).

$$\theta = E_\varphi + e\theta_1 \quad (3.37)$$

Fii ve e aşağıdaki gibi tanımlanır (denklik 3.38).

$$e = [1, 1, \dots, 1^T] \text{ ve } E_{ij} = \begin{cases} 1 & i > j \\ 0 & \text{diğerleri} \end{cases} \quad (3.38)$$

3.37 de ki denklem iki kısma ayrılır ve aşağıdaki gibi ifade edilir (denklik 3.39-3.40).

$$M(\theta)\ddot{\theta} + N(\theta)\dot{r}_b + H(\theta, \dot{\theta}) + f(\theta) + G(\theta) + S(\theta) = D_\tau \quad (3.39)$$

$$M(\theta)\ddot{\theta} + N(\theta)\dot{r}_b + H(\theta, \dot{\theta}) + f(\theta) + G(\theta) + S(\theta) = 0 \quad (3.40)$$

3.54 deki denklemin ikinci türevi alınır ve 3.58 deki denklemin yerine konulursa aşağıdaki denklemi elde etmiş oluruz (denklik 3.41).

$$\begin{aligned} D_\tau + (N^p N^q M - M^p) e \ddot{\theta}_1 \\ = (M^p - N^p N^q M) E \ddot{\phi} - N^p N^q (H^a + f^a + G^a + S^a) \\ + (H^p + f^p + G^p \\ + S^p) \end{aligned} \quad (3.41)$$

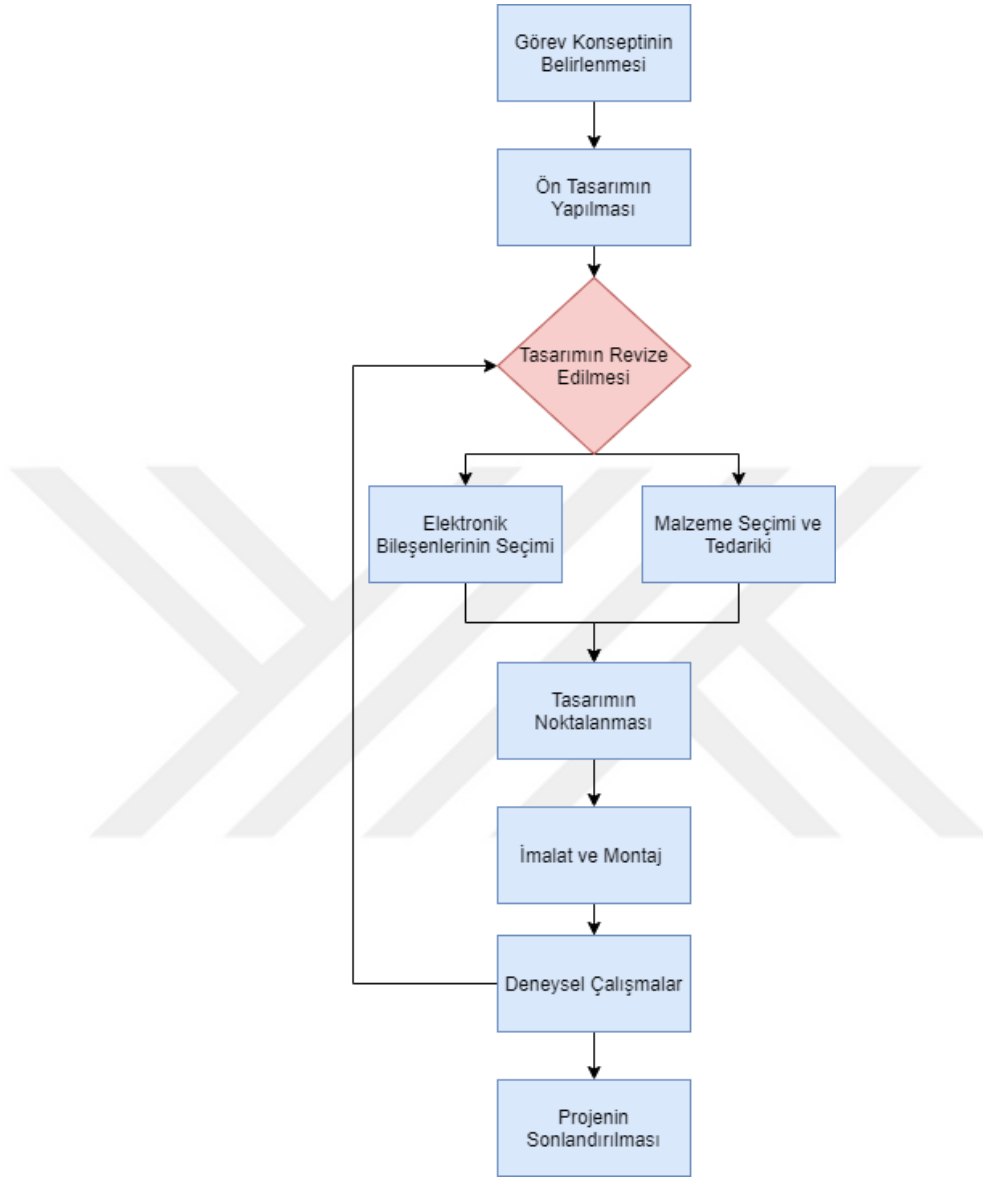
Sonuç olarak bulduğumuz denklem n boyutlu doğrusal n bilinmeyenli bir denklemdir. Bu denklemin çözülmesiyle yılan robotun eklemlerindeki tork ve baş kısmındaki açısız ivme hesaplanabilir. Bu değerler son denklemde yerine konulursa baş kısmının ivmesi hesaplanabilir. Yılan robotun hareketlerini izah eden parametrelerinin hepsi, yılan robot farklı şekillerde olsa dahi hesaplanabilir.

BÖLÜM 4

BİYOMİMETİK YILANSI ROBOT TASARIMI VE İMALATI

Bu bölümde biyomimetik yılanı robotun tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Tasarım için Solidworks 3D katı modelleme programı kullanılmıştır. Biyomimetik yılanı robotun tasarımı gerçekleştirildikten sonra eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan 3D yazıcı ile üretimi sağlanmıştır. Yapılan çalışmaların neticesinde yılan robot için dokuz eklemli bir yapıya sahip olacak şekilde tasarım kriteri belirlenmiştir. Dokuz eklemli bir yılanı robotun gerçek bir yılanın hareket kabiliyetine daha uygun performans sergilediği saptanmıştır. Biyomimetik yılan robotun dokuz ekleminin dışında kafa modülü de tasarlanmıştır. Kafa modülünün içinde ileriki çalışmalarda yer alacak olan, görev ihtiyacına uygun şekilde sensörler yerleştirilmiştir. Biyomimetik yılanı robotun tasarımı yapılırken aşağıda Çizelge 4.1’de verilen akış şemasına uygun bir şekilde tasarım adımları takip edilmiştir.

Çizelge 4.1. Biyomimetik yılansı robotun tasarım akış şeması



Biyomimetik yılansı robotun tasarım hedefleri şu doğrultudadır ve aşağıdaki listelenen kriterinin karşılanması beklenir.

1. Modüler Yapı Tasarımı

- Geliştirmeye Açık Zekâ
- 3 Birbirinden Bağımsız Alt Bileşenler
- Çevresel Etkenler
- Beyin
- Servo Motor Kontrolörleri

2. Kontrol Sistemi Tasarımı

- Çevresel Etki Modülleri
- Çevre Hakkında Bilgi Toplama
- Beyne Bilgi Gönderme
- Beyni
- Hareket Kontrolörü
- Hız Komutu
- Yön Komutu
- Yol Oluşturma
- Çevresel Modüller
- Servo Kontrolörler
- Servo Kontrol Cihazları
- Servo Pozisyonlarını Koruma
- Beyinden Pozisyon Komutları Alma

3. Mekanik Tasarım

- Düzlemsel Olmayan Hareket
- Doğru Biyolojik Taklit

4.1 YILAN ROBOTUN İŞLEV VE PERFORMANS GEREKSİNİMLERİ

4.1.1 İşlev Gereksinimleri

- Hareket işlevi: Biyomimetik bir yılanımsı robotun, farklı çalışma ortamlarına uyum sağlaması için farklı türde hareket biçimlerine sahip olmalıdır. Görevini ifa edebilmek için farklı hareket kabiliyetlerine sahip olmalıdır.
- Uzaktan kumanda işlevi: Biyomimetik yılanımsı robotun, operatör tarafından uzak mesafelerden kontrol edilmesi gerekir. Görevini ifa ederken operatör robotu izleyebilmelidir.
- Engellerden kaçınma işlevi: Yılan robotun başarılı bir şekilde görevini yapabilmesi için, robotun tasarımının görev şartlarına uygun olması gerekir.

- Çevresel uyarlanabilirlik: Yılan benzeri bir robot görevleri yerine getirdiğinde, robotun farklı çevre koşullarına uyum sağlayacak, değişken olabilme yapısına sahip olmalı [36].

4.1.2 Fonksiyon Gereksinimleri

- Hafif: Biyomimetik yılanlı robotun toplam ağırlığı (tüm birleşenleri dahil) 3 kg'dan az olmalıdır.
- Yılanlı robotun radyal değeri 20 mm 'ye eşit veya daha küçük, toplam uzunluk 1,2 m 'den az olmalıdır.
- Faydalı yük kütlesi: Robot, kütlesi 2 kg 'dan büyük olan bir faydalı yükü 1 g'ın altında taşıyabilmelidir. ($1 \text{ g} = 9,8 \text{ kg/m}^2$).

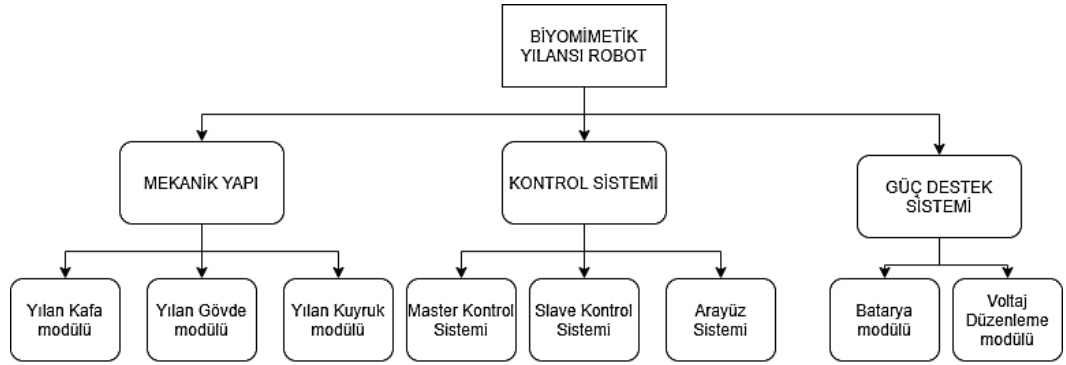
4.2 YILAN ROBOTUN TASARIM GEREKSİNİMLERİ

Biyomimetik yılanlı robotu tasarlarırken daha önce yapılmış yılanlı robotlar incelenmiş ve bu incelemelerin neticesinde bazı tasarım kriterleri belirlenmiştir. Bunları şu şekilde sıralayabiliriz[14,37];

- Modüler yapıya sahip olması
- Hafif ve esnek hareket kabiliyetine sahip olması
- Dağıtılmış çalıştırma gücü ve kontrolü
- Tasarım esnekliği ve geliştirebilirliği
- Görev ortamına uyum sağlanabilirliği
- Kontrol ve takip kolaylığı

Biyomimetik yılanlı robot tasarımı yapılırken 3 farklı etken göz önüne alınmaktadır. Bunlar; mekanik tasarım, kontrol sistemleri ve güç sistemlerinden oluşmaktadır. Bu tasarım kriterleri yılan robotun tasarım bileşenlerini oluşturmaktadır. Çizelge 4.2'de bu bileşenler gösterilmektedir.

Çizelge 4.2. Yılan robotun tasarım bileşenleri



4.2.1 Mekanik Yapı Tasarımı

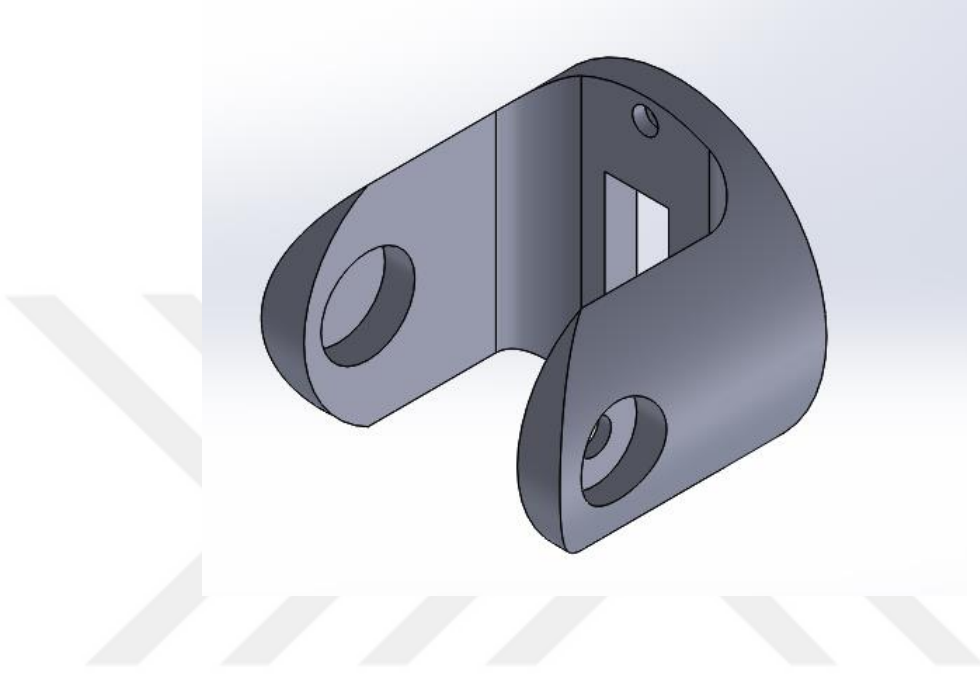
Biyomimetik yılan robotun tasarımı 3 kısım olarak belirlenmiştir. Bunlar yılan robotun kafası, eklemleri ve kuyruğudur. Tasarım gerçekleştirilirken yılan robotun çalışma ortamı göz önüne alınarak ve değerlendirilerek yapılmıştır. Yılan robotun gövdesi modüler şekilde tasarlanmış olup imalatı bu minvalde gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.3'te yılan robotun bileşenleri görülmektedir.

Çizelge 4.3.Yılan robotun bileşenleri

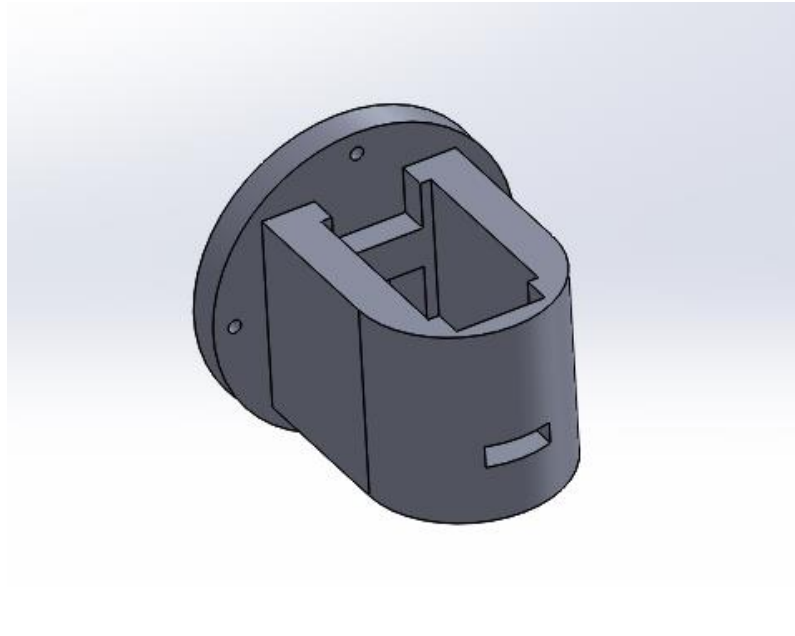
Yılan Robotunun Bileşenlerinin Kavramsal Diyagramı	
Kontrol metodu	<ul style="list-style-type: none"> Basit hareketlerin uygulanması Haritalandırma ve navigasyon algoritması Özel görev hareketleri (basamak, merdiven, boru)
Kinematik Yapı tasarımı	<ul style="list-style-type: none"> Daha verimli hareket için kuvvet doğrultusu İleri hareket etmek için motorlu tekerlekler
Aktüatör	<ul style="list-style-type: none"> Doğru dönüş için servo motor Tekerleksiz gövde yapısı
Hareket	<ul style="list-style-type: none"> Temel hareket olan yanal dalgalanma Yılan robotu döndüğünde yuvarlanma hareketi Çöl yılanından ilham alan yan sarma

Yılan Vücut Eklemleri Tasarımı: Biyomimetik yılan robot; eklemler, lityum pil, kontrol devre kartları, servo motorlar ve diğer birleşenleri karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Biyomimetik yılan robotun eklemleri aşağıda Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de

Solidworks görünümü verilmiştir. Eklemler X ekseninde 180° derece hareket kabiliyetine sahip olacak şekilde eklem tasarımı yapılmıştır. Eklemler arası bağlantılar yatay ve dikey olarak yerleştirilen servo motorlar ile sağlanmıştır. Hareket kabiliyetini arttırmak için rulmanlar yerleştirilmiştir böylelikle eklemler arası hareket kolaylaştırılmıştır. Eklemler arası bağlantı M3 cıvatalar ile sağlanmıştır.

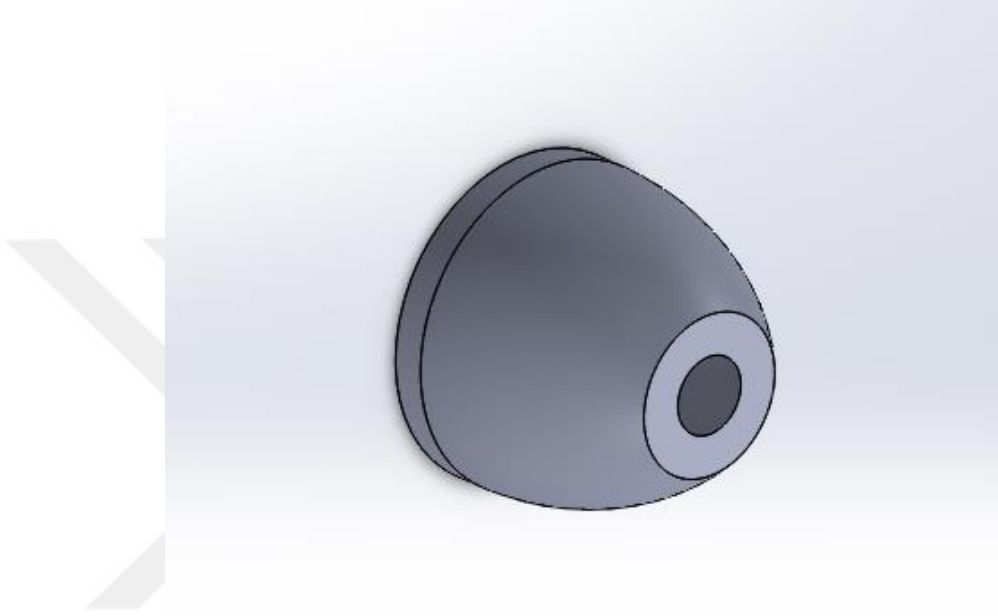


Şekil 4.1. Yılanlı robotun eklemi



Şekil 4.2. Yılanlı robotun servo motor yuva eklemi

Yılan Başı Eklem Tasarımı: Biyomimetik yılanı robotun baş eklem tasarımı aşağıdaki şekilde, Şekil 4.3’de verilmiştir. Yılan başı tasarımında esneklik göz önüne alınmıştır. İleriye dönük çalışmalarda eklenecek birleşenler için tasarım esnekliği sağlanmıştır. Baş tasarımda göz önüne alınan en önemli etmen yılan gövde tasarımı ile bütünlüğü koruması olarak ele alınmıştır.



Şekil 4.3.Yılan robotun baş ve kuyruk eklemi

Yılan Kuyruğu Eklem Tasarımı: Biyomimetik yılanı robotun kuyruk tasarımı, baş kısmı ile benzer olarak tasarlanmıştır. Kuyruk kısmından güç kaynağına ve kontrol sistemine erişim sağlanmaktadır. İlerleyen çalışmalara yönelik kuyruk kısmında çevre şartlarına istinaden bazı sensörler eklenecektir.

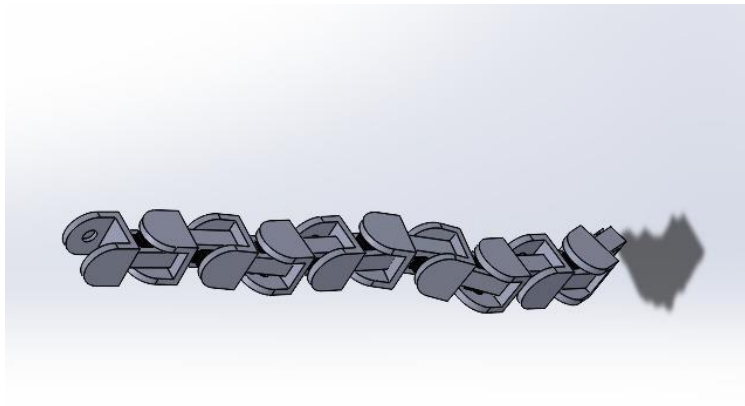
Tasarımı gerçekleştirilen biyomimetik yılanı robotun fiziksel özellikleri Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Yılan robotun fiziksel özellikleri

Boyutlar	Çap	70 mm
	Eklem uzunluğu	130 mm
	Yılanın robotun uzunluğu	947 mm
Ağırlık	Eklem ağırlığı	142 g
	Yılan robotun ağırlığı	1520 g
Tahrik	MG995 Tower Pro servo motor 360°	12 adet/Tork: 4.8V:138.9 oz-in (10.00 kg-cm)
Güç	Lipo Pil	7,4V Lipo Pil 8000mAh 40C - 2S Kutulu Lipo Pil
Hareket kabiliyeti	Yanal dalgalanma- Doğrusal hareket- Akerdeon hareket- Yansarma hareket	

4.2.2 Yılan Robotun Tasarım Optimizasyonu

Yapılan ilk tasarım çalışmaları neticesinde elde edilen tasarım incelenmiş olup, hareket çeşitlerinde bazı noksanlıklarının olduğu tespit edilmiştir. Yapılan ilk tasarımda denge kolaylığı sağlanması için kare formunda bir tasarım ele alınmıştır. Fakat daha sonrasında yapılan simülasyonlarda hareket kabiliyetinin kısıtlı olduğu gözlemlenmiştir. Daha sonrasında tasarım için optimizasyona gidilmiştir ve yeni bir tasarım şekli orta konulmuştur[38]. Şekil 4.4'de yapılan ilk tasarım görülmektedir, şekil 4.5'de optimize edilmiş tasarım görülmektedir.



Şekil 4.4. İlk olarak kare formunda tasarlanan yılan robot.



Şekil 4.5. Optimize edilmiş yılan robot.

4.2.3 Yılan Robotun Elektrik ve Elektronik Bileşenleri

Bu bölümde biyomimetik yılan robotun elektrik ve elektronik bileşenlerine yer verilmiştir. Yılan robotta görev koşullarına istinaden sensörler kullanılabilir. İlk etapta yapılan yılan robot bilgisayar kontrollü olurken gelecek dönemdeki çalışmalarda yılan robot uzaktan kumandalı bir şekilde kontrol edilecektir. Yılan robotun hareketini sağlayacak 9 tane servo motor kullanılacaktır, bunlarla beraber güç kaynağı olarak bir adet pil kullanılmıştır. Motor kontrolü için bir adet mikrodenetleyici Arduino UNO kullanılmıştır.

Servo motor:

Servo motor, bir öğeyi doğru bir şekilde itebilen veya döndürebilen elektrikli bir motor çeşididir. Bir sistemin belirli bir açıda döndürülmesi gerektiğinde yahut sabit tutulmak istendiğinde servo motorlar kullanılabilir. Küçük ve hafif yapıları sayesinde birçok projede rahatlıkla kullanılmaktadır. Servo motorlar iki bölümden oluşmaktadır[39]. Yapılan bu tez çalışmasında toplam dokuz adet servo motor kullanılmıştır bunların konumu şu şekildedir; 5 tanesi dikey 4 tanesi ise yatay pozisyonda yer almaktadır. Bu

motorlar Arduino UNO tarafından kontrol edilmektedir. Arduino'nun servoya verdiği komutlara göre yılan robotun uygun hareketi sağlamaktadır. Şekil 4.6'da kullanılan servo motorlar görülmektedir.



Şekil 4.6.Servo motorlar

Arduino UNO:

Arduino UNO, ATmega328P mikrodenetleyici çipi ile desteklenen ve Arduino.cc tarafından oluşturulan bir mikrodenetleyici kartıdır. Kart, genişletme levhalarını (kalkanları) ve seçmeli devreleri değiştirmek için gelişmiş ve basit bilgi/verim (G/Ç) pimleri setleri ile donatılmıştır. Kartın altı basit pini, on dört gelişmiş pini vardır ve bir B tipi USB bağlantısı aracılığıyla Arduino IDE (Entegre Geliştirme Ortamı) ile programlanabilir[40]. Yedi ve yirmi volt aralığında bir yerde voltaj kabul etmesine bakılmaksızın, bir USB bağlantısı veya harici bir 9V pil ile beslenecektir. Ayrıca, Arduino Nano ve Leonardo'ya eşdeğerdir. Şekil 4.7 yılan robot için kullanılan Arduino UNO kartı



Şekil 4.7. Arduino UNO

Arduino Uno Sensör ve Genişletme Shield:

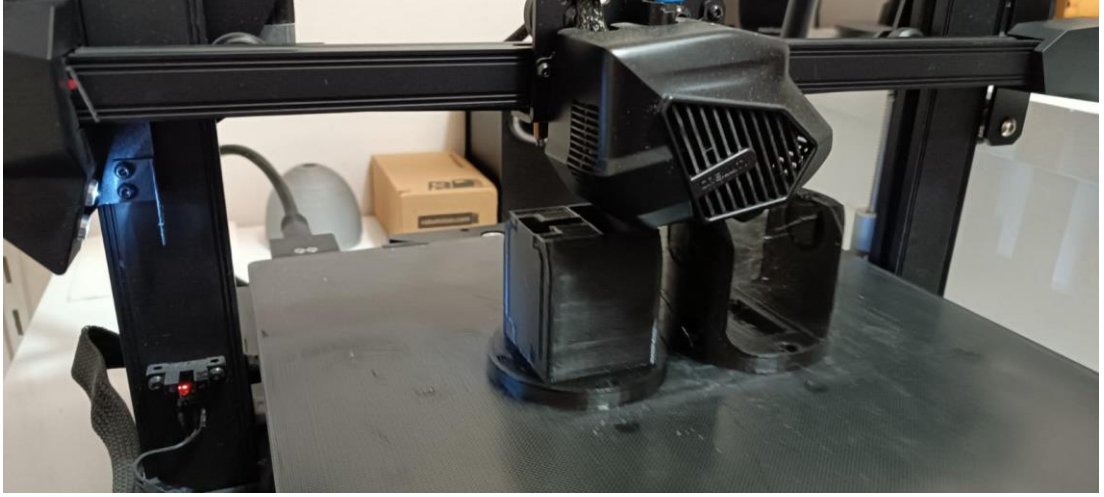
Arduino kartlarına takılabilen, jumper kabloları vasıtasıyla sensör bağlantılarını sağlayan bir karttır. Çoklu servo motor kullanım gereksinimi olan çalışmalarda, bulundurduğu pinler sayesinde servo motorların Arduino bağlantılarını kolaylaştırmaktadır. Bu kart sensörler, servolar, röleler, düğmeler, potansiyometreler ve daha birçok çeşitli modüllere bağlantı sağlayabilmektedir.

7.4V Lipo Pil:

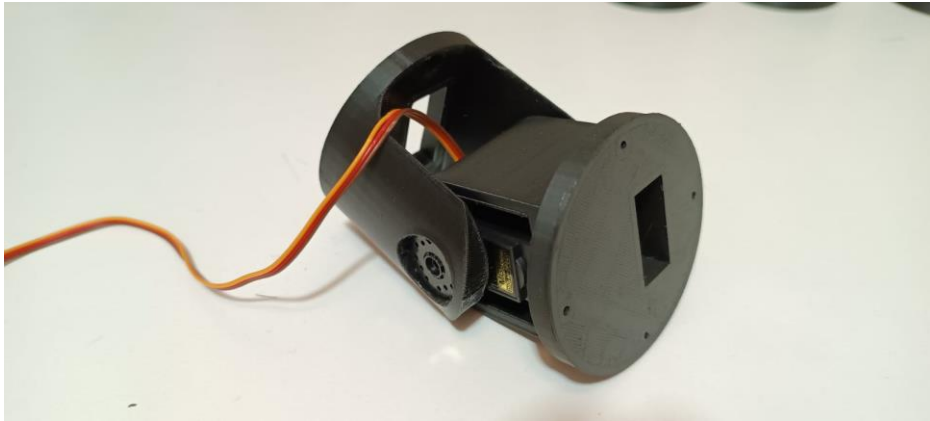
Lipo piller yüksek akım değerleri sağlamaktadır bu özelliklerinden dolayı diğer pillere göre daha kullanışlıdır. Uzun süreli çalışma aralığına sahip sistemler için uygun bir pil türüdür. Lipo piller 3.7V değerine sahip hücrelerden oluşmaktadır. Yılan robot için 2S hücreye sahip 7.4V lipo pil tercih edilmiştir. Lipo piller aynı zamanda şarj edilebilmektedir. Lipo pilleri kullanırken bazı noktalara dikkat edilmesi gerekmektedir bunlar; kabloları birbirine değdirerek kısa devre yaptırılmamalıdır. Verimli bir şekilde kullanılması için hücreleri 3,00V-4,20V aralığında olmalıdır. Aşırı şarj 4,20V üzerine çıkmamalıdır. Pillerin içi açılmamalı ve su ile teması önlenmelidir. Şekil 4.8' yılan robot için kullanılan 7.4V Lipo pil görülmektedir.

4.3 YILAN ROBOTUN İMALATI

Biyomimetik yılan robotun imalatı eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan 3D yazıcılar ile yapılmıştır. Baskı malzemesi olarak PLA filament kullanılmıştır. PLA filament organik ürünlerden üretildiği için insan sağlığına olumsuz anlamda bir etkisi yoktur. Sert bir yapıya sahiptir bundan dolayı darbelere karşı dirençlidir. PLA esnek yapıya sahip olmasına rağmen kırılğan bir yapısı vardır. Robotun parçaları basılırken %30 doluluk oranı ile basılmıştır. Şekil 4.8’de yılan robotun 3D yazıcı ile basımı görülmektedir. Parçaların basımı yapılırken zikzak dolgu yöntemi tercih edilmiştir. Şekil 4.9’da eklemlerin montajı görülmektedir.



Şekil 4.8. Eklemlerin 3D yazıcı ile basımı



Şekil 4.9. Eklemlerin montaj

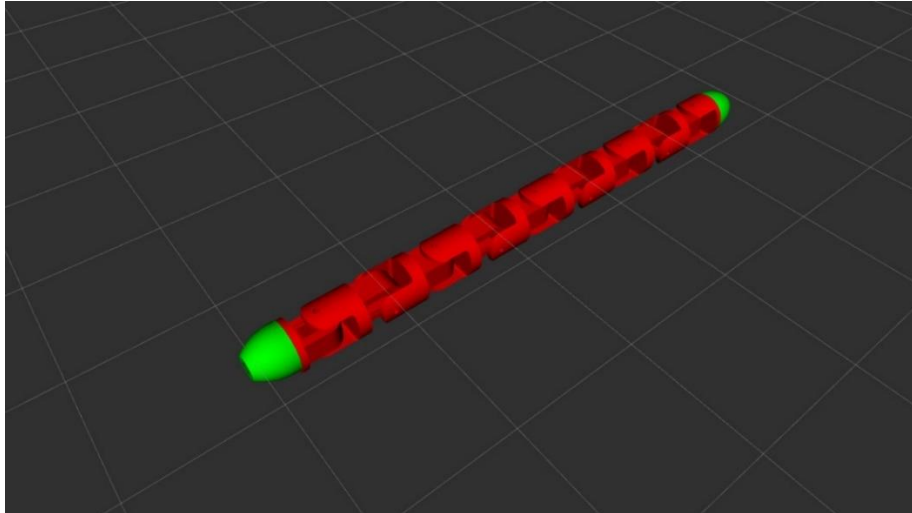
BÖLÜM 5

BENZETİM ve DENEY ÇALIŞMALARI

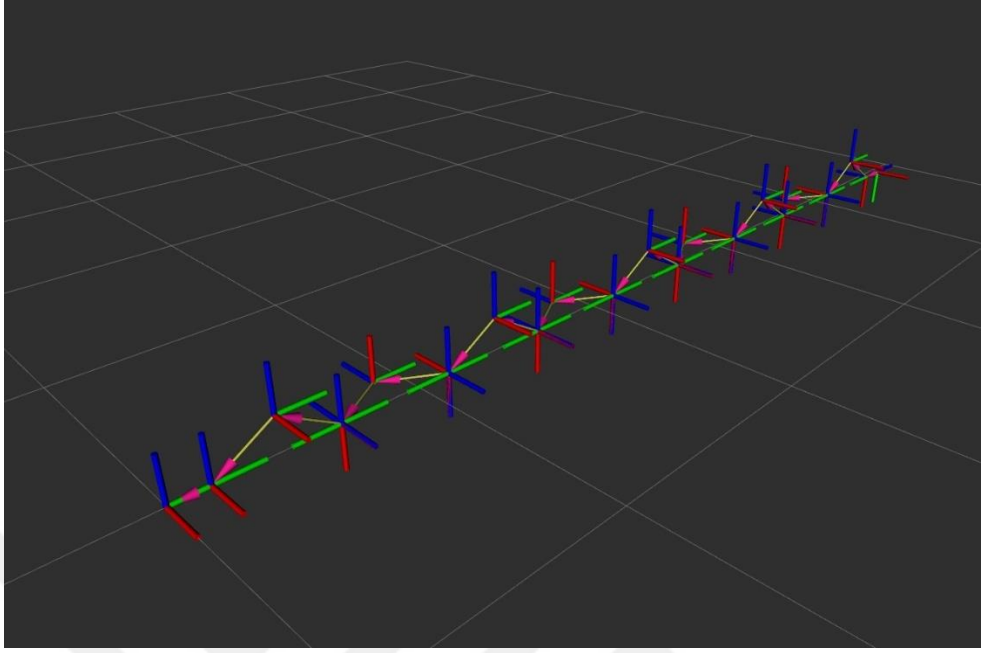
Biyomimetik yılan robotun benzetim çalışmaları Gazebo benzetim ortamında yapılmıştır, yazılım kütüphanesi olarak Robot Operating System (ROS) kullanılmıştır.

5.1 YILAN ROBOTUN RVIZ ORTAMINDA MODELLENMESİ

Biyomimetik yılan robotun modellemesinde Xacro dosya formatı kullanılmıştır. Solidworks ortamında tasarlanan yılan robotun eklemleri birleştirilerek RVIZ ortamında gösterilmesi sağlanmıştır. RVIZ ortamında robotun yapısı oluşturulmuştur. Yılan robotu RVIZ ortamında açmak için launch dosyayı oluşturuldu. Oluşturulan dosya çalıştırılarak yılan robotun RVIZ ortamında çıktısı elde edildi. Aşağıdaki şekillerde (Şekil 5.1, Şekil 5.2) yılan robotun RVIZ ortamındaki çıktısı ve TF (Transform) ağaç yapısı



Şekil 5.1. Yılan robotun RVIZ ortamında görünüm



Şekil 5.2. Yılan robotun RVIZ ortamında TF görünümü

5.2 YAPILANDIRMA DOSYASININ OLUŞTURULMASI

Eklemleri Gazebo ortamında hareket ettirmek için yaml dosyası oluşturuldu. Oluşturulan bu dosya sayesinde benzetim ortamında yılan robota hareket kabiliyeti kazandırıldı. Aşağıdaki şekillerde (Şekil 5.3, Şekil 5.4) yaml dosyasının kod parçası gösterilmektedir.

```

snake:
  # Publish all joint states -----
  joint_state_controller:
    type: joint_state_controller/JointStateController
    publish_rate: 50

  # Position Controllers -----
  joint_1_position_controller:
    type: effort_controllers/JointPositionController
    joint: joint_1
    pid: {p: 100.0, i: 0.01, d: 10.0}

  joint_2_position_controller:
    type: effort_controllers/JointPositionController
    joint: joint_2
    pid: {p: 100.0, i: 0.01, d: 10.0}

  joint_3_position_controller:
    type: effort_controllers/JointPositionController
    joint: joint_3
    pid: {p: 100.0, i: 0.01, d: 10.0}

```

Şekil 5.3. Yaml dosyasında bağlantıların kod gösterimi

```

  joint_4_position_controller:
    type: effort_controllers/JointPositionController
    joint: joint_4
    pid: {p: 100.0, i: 0.01, d: 10.0}

  joint_5_position_controller:
    type: effort_controllers/JointPositionController
    joint: joint_5
    pid: {p: 100.0, i: 0.01, d: 10.0}

  joint_6_position_controller:
    type: effort_controllers/JointPositionController
    joint: joint_6
    pid: {p: 100.0, i: 0.01, d: 10.0}

  joint_7_position_controller:
    type: effort_controllers/JointPositionController
    joint: joint_7
    pid: {p: 100.0, i: 0.01, d: 10.0}

  joint_8_position_controller:
    type: effort_controllers/JointPositionController
    joint: joint_8
    pid: {p: 100.0, i: 0.01, d: 10.0}

  joint_9_position_controller:
    type: effort_controllers/JointPositionController
    joint: joint_9
    pid: {p: 100.0, i: 0.01, d: 10.0}

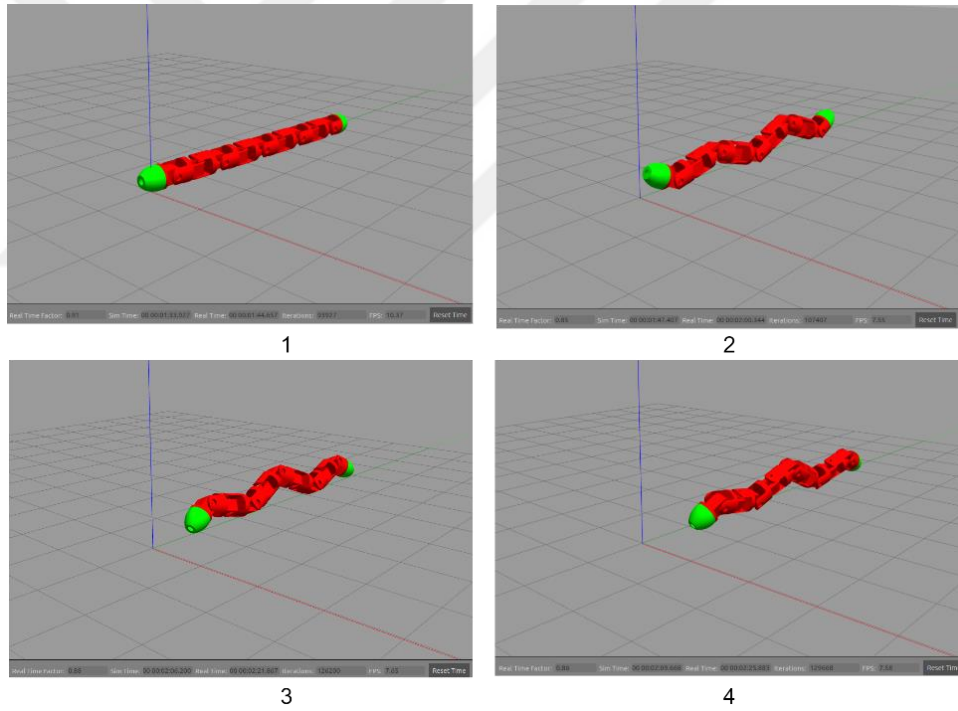
```

Şekil 5.4. Yaml dosyasında bağlantıların kod gösterimi

5.3 YILAN ROBOTUN GAZEBO ORTAMINDA GÖSTERİLMESİ

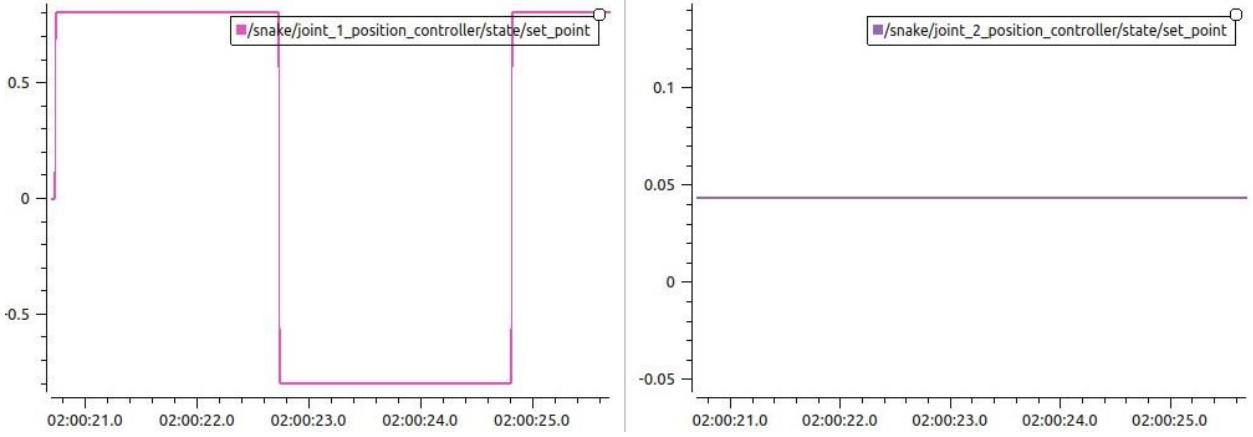
İlk olarak yılan robotun benzetimi için bir ortam oluşturuldu. Oluşturmuş olduğumuz ortama yılan robot eklendi. Yılan robota hareket kabiliyeti kazandırmak için, oluşturduğumuz yapılandırma dosyalarını launch dosyasına eklenmiştir ve bu şekilde yılan robot Gazebo ortamında hareket kabiliyeti kazanmış oldu. Gazebo benzetim ortamında 3 farklı hareket çeşidi uygulandı. Bunlar; Yanal dalgalanma, yan sarma ve akordiyon hareket.

Yanal dalgalanma hareketinin Gazebo ortamında farklı zaman aralıklarında hareket görünümü aşağıda Şekil 5.5’de verilmiştir.



Şekil 5.5. Yanal dalgalanma hareketinin Gazebo ortamında görünümü

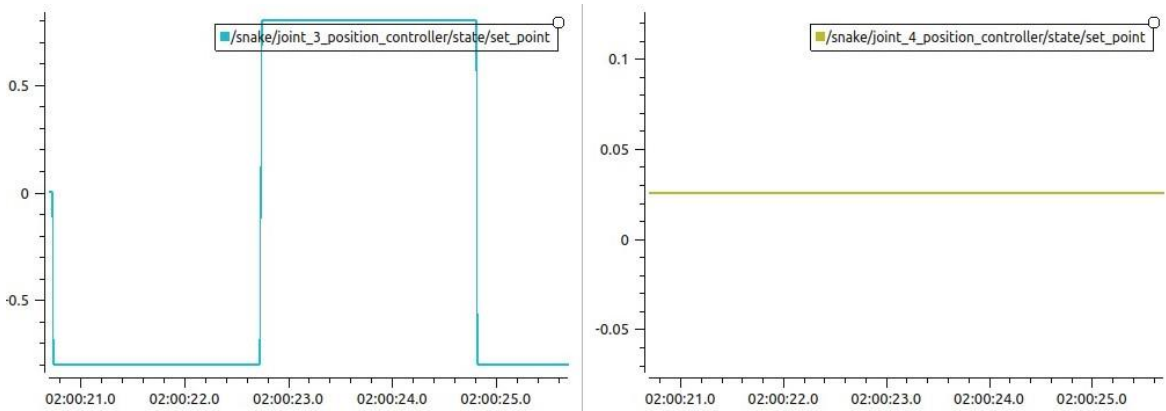
Yanal dalgalanma hareketinde motorlara gönderilen komutların zamana göre dönüş açılarını gösteren grafikler aşağıda (Şekil 5.6 ve Şekil 5.7) verilmiştir. Bu hareketi sağlamak için 1-3-5-7-9 numaralı motorlar hareket etmektedir. Şekil 5.8’de set_point grafiklerine anlık olarak gelen değerlerin gösterimi verilmektedir.



Şekil 5.6. 1 ve 2. motora ait zaman açığı grafiği

Grafiklerde gösterilen dört motorun da (iki motor Şekil 5.6'da diğer iki motor Şekil 5.7'de) hedef açısı 0.800 olarak belirlenmiştir. Dört motorda istenen hedef açıya erişmektedir. Fakat aralarında bazı farklılıklar mevcuttur. 1 ve 3 numaralı motorlara zıt yönde hareket etme kabiliyeti verilirken 2 ve 4 numaralı motorlara hareket etme kabiliyeti tanımlanmamıştır.

Motor 1 Gazebo ortamında hedef açıya yaklaşık olarak 2 saniyede ulaşmaktadır. Motor 2'ye ise hareket kabiliyeti verilmediği için herhangi bir hareket set_point grafiğinde 0'a yakında sabit bir değer harici veri gözlenmemiştir.



Şekil 5.7. 3 ve 4. Motora ait zaman açığı grafiği

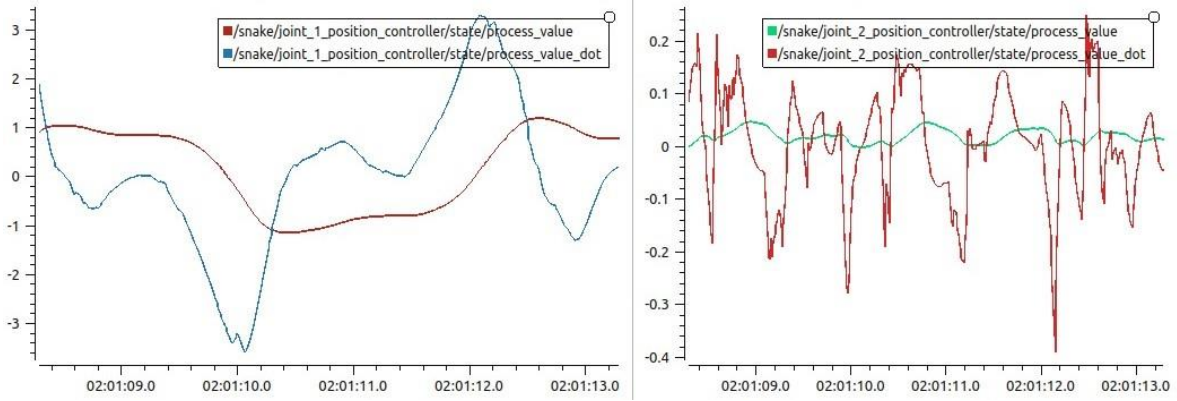
Motor 3 simülasyon ortamında hedef konuma ortalama 2 saniyede ulaşmaktadır. Motor 4’de ise isterler doğrultusunda herhangi bir hareket gözlenmemiştir.

Series name	Samples Count	Minimum	Maximum	Average
/snake/joint_1_position_controller/state/set_point	496	-0.800000	0.800000	0.135484
/snake/joint_2_position_controller/state/set_point	497	0.000000	0.000000	0.000000
/snake/joint_3_position_controller/state/set_point	494	-0.800000	0.800000	-0.132794
/snake/joint_4_position_controller/state/set_point	495	0.000000	0.000000	0.000000

Şekil 5.8. Yanal dalgalanma set_point grafiklerine anlık olarak gelen değerler.

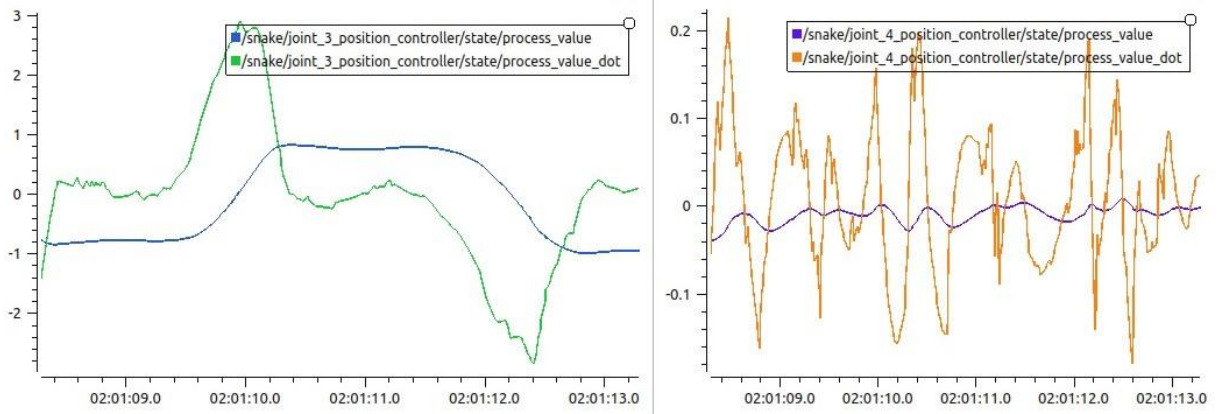
Bu tablodaki değerler set_point grafiklerine anlık olarak gönderilen maksimum minimum ve ortalama değerleri gösteren tablosudur. Bu tabloda asgari ve azami değerleri motorlara gönderilen asgari ve azami açı değerlerini göstermektedir.

Yanal dalgalanma hareketi process_value değeri için motorların anlık hareket değişimini gösteren grafikler ve process_value_dot grafiği aşağıdaki gibidir (Şekil 5.9 ve Şekil 5.10).



Şekil 5.9. Process value ve dot değerleri grafiği.

Grafikte gösterilen dört motorun da process_value (süreç değeri) ve process_value_dot (süreç değerinin zamana göre ilk türevi) değerleri gösteriliyor. Dört motorda hedef açığa erişmektedir. Process_value_dot grafiğinde Motor 1’e hareket verildiği için Motor 2’den daha yüksek değerler gözlemlenmiştir.



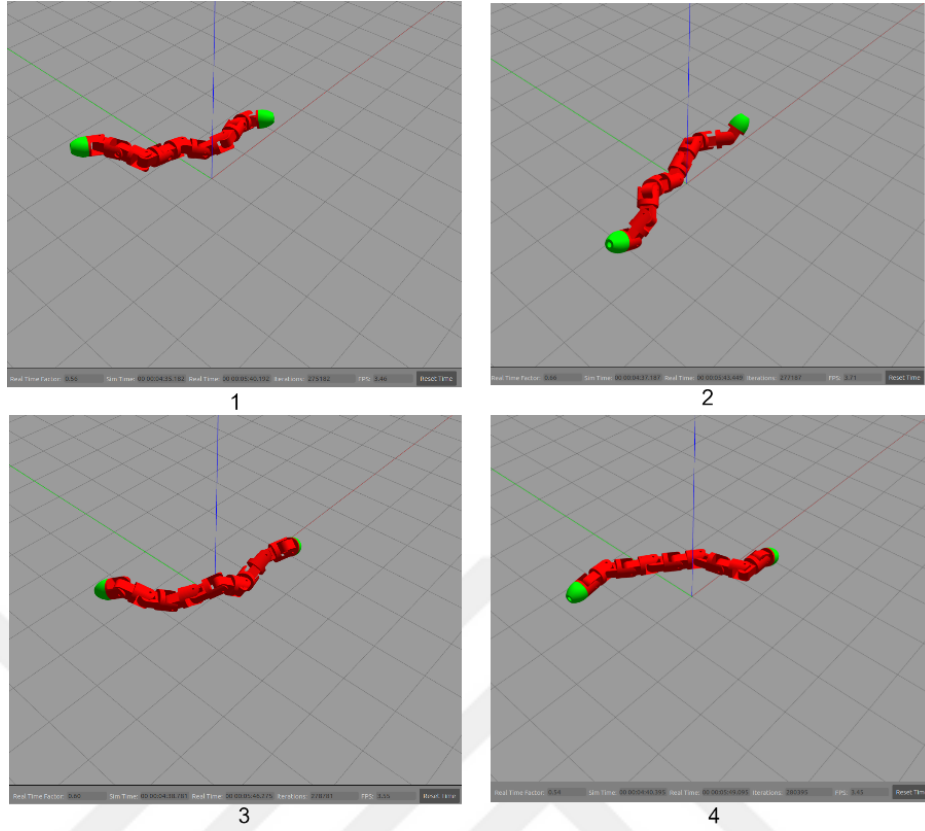
Şekil 5.10. Process value ve dot değerleri grafiği.

Aynı şekilde Motor 3'e hareket kabiliyeti verildiği için process_value_dot grafiğinde Motor 4'e göre daha yüksek değerler gözlemlenmiştir.

Aynı zamanda Motor 1 ile Motor 3 grafikleri motorlara zıt yönde hareket verildiği için grafiklerde yer alan process_value ve process_value_dot değerleri birbirinin zıt yönü olarak gözlemlendi ve Motor 2 ile Motor 4'e hareket etme kabiliyeti verilmediği için process_value ve process_value_dot grafiklerindeki değer aralığı belli bir aralıkta sürekli hareket halinde gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise Motor 1 ve Motor 3'e verilen hareket kabiliyetinde gördükleri etkiden dolayı olmasıdır.

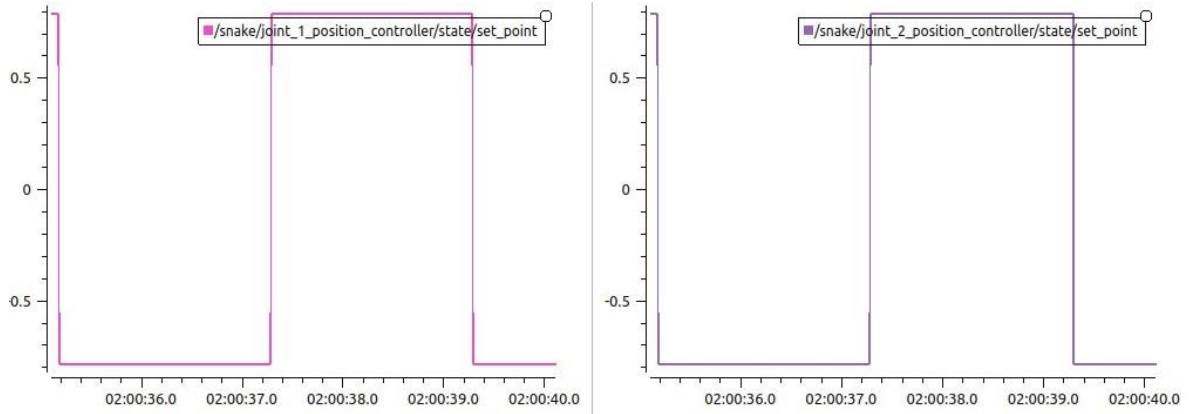
Process value, PID denetleyicinin geri besleme döngüsündeki değerlerini ifade etmektedir. Örneğin bir sıcaklık kontrol sisteminde, sıcaklık sensöründe okunan anlık sıcaklık değeri process value olarak adlandırılmaktadır. Process value dot ise process value değerinin zamana göre nasıl değiştiğini ifade etmektedir. Türev terimi, hızlı değişen süreçlerde denetleyiciye daha hassas tepki vermesini sağlar. Örneğin bir hız kontrol sisteminde hız sensöründen okunan anlık hız değerlerinin türevi olan process value dot hızın artma yahut azalma hızını gösterir.

Yan sarma hareketinin Gazebo ortamında farklı zaman aralıklarında hareket görünümü aşağıda Şekil 5.11'de verilmiştir.



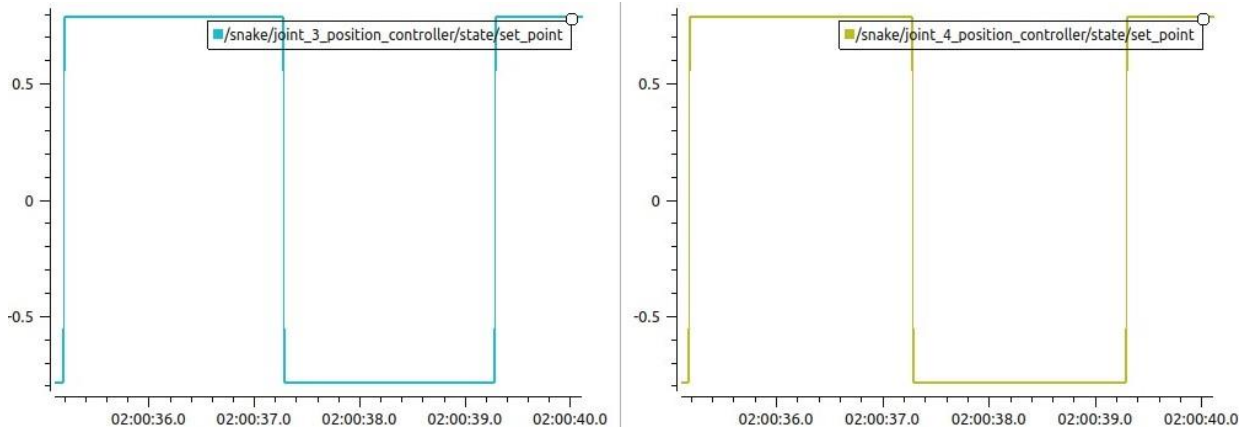
Şekil 5.11. Yan sarma hareketinin Gazebo ortamında görünümü

Yan sarma hareketinde motorlara gönderilen komutların zamana göre dönüş açılarını gösteren grafikler aşağıda (Şekil 5.12, Şekil 5.13) verilmiştir. Bu hareketi sağlamak için tüm motorlara hareket etme kabiliyeti verilmiştir.



Şekil 5.12. 1,2 numaralı motorların zaman açış değerleri

Grafikte gösterilen (Şekil 5.12 ve Şekil 5.13) dört motorun hedef konumu 0.785 olarak belirlenmiştir. Dört motorda belirlenen hedef noktalara ulaşmaktadır. Motor 1 ve 2 aynı yönde motor 3 ve 4 aynı yönde hareket edecek şekilde açı değeri verilmiştir. Burada verilen açı değerleri birbirinin zıttı olacak yöndedir. Hareket sağlanması için Motor 1 ve 2'ye 0.785 değeri verildi. Buna mukabil Motor 3 ve 4'e ise -0.785 değeri verilmiştir ve her adımda motorlar birbirine zıt olacak şekilde (-1) ile çarpılıp yönleri ters çevrilmiştir.



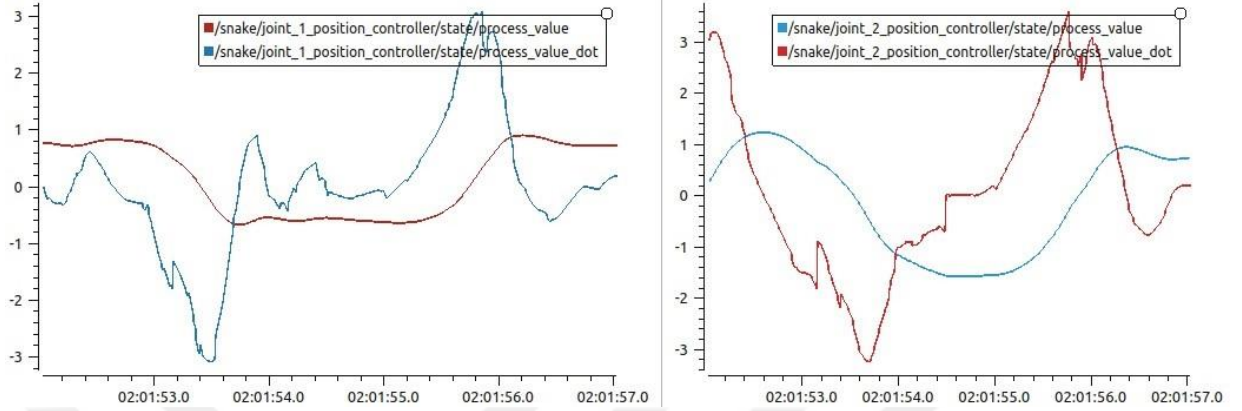
Şekil 5.13. 3,4 numaralı motorların zaman açı değerleri

Grafiklerde gösterilen 4 motorun hepsine baktığımız zaman Gazebo ortamında hedef konuma yaklaşık olarak 2 saniyede ulaşmaktadır. Şekil 5.14'de Yan sarma hareketi için set_point grafiklerine, motorlara gönderilen değere karşılık gelen maksimum, minimum ve ortalama değerler görülmektedir.

Series name	Samples Count	Minimum	Maximum	Average
/snake/joint_1_position_controller/state/set_point	500	-0.785000	0.785000	0.141300
/snake/joint_2_position_controller/state/set_point	500	-0.785000	0.785000	0.141300
/snake/joint_3_position_controller/state/set_point	501	-0.785000	0.785000	-0.142585
/snake/joint_4_position_controller/state/set_point	501	-0.785000	0.785000	-0.142585

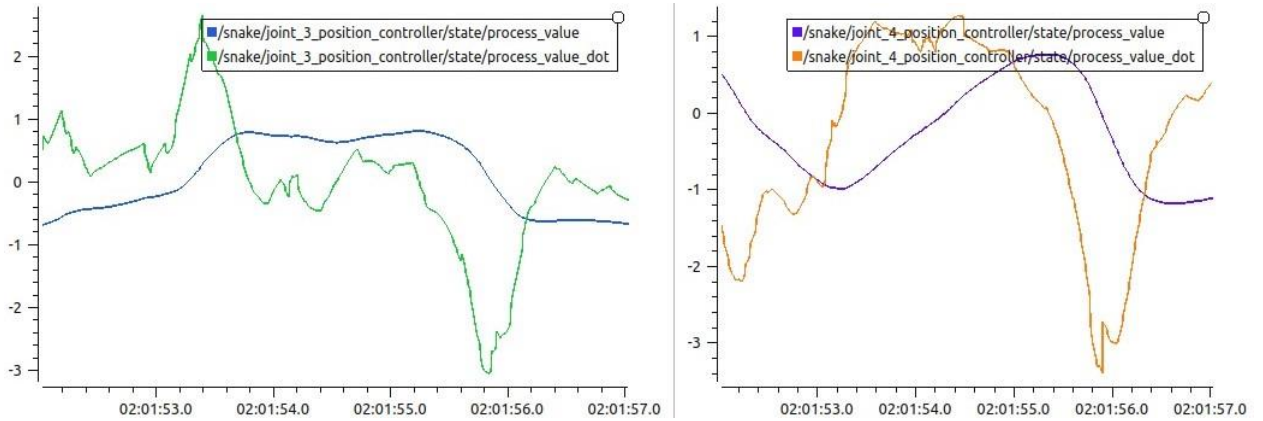
Şekil 5.14. Yan sarma hareketi için set_point grafiklerine anlık olarak gelen değerler.

Yan sarma hareketi için 4 motora ait process_value ve process_value_dot grafikleri Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Yan sarma hareketi için process value ve dot grafiği.

Şekil 5.15 de motor 1 ve 2 için process_value (gerçek konum) ve process_value_dot (hız) değerleri görülmektedir. Motor 1 ve Motor 2'deki process_value ve process_value_dot grafiklerindeki değerler Motor 3 ve Motor 4'deki process_value_dot değerleri ile zıt yönde birbirlerine benzerdir.

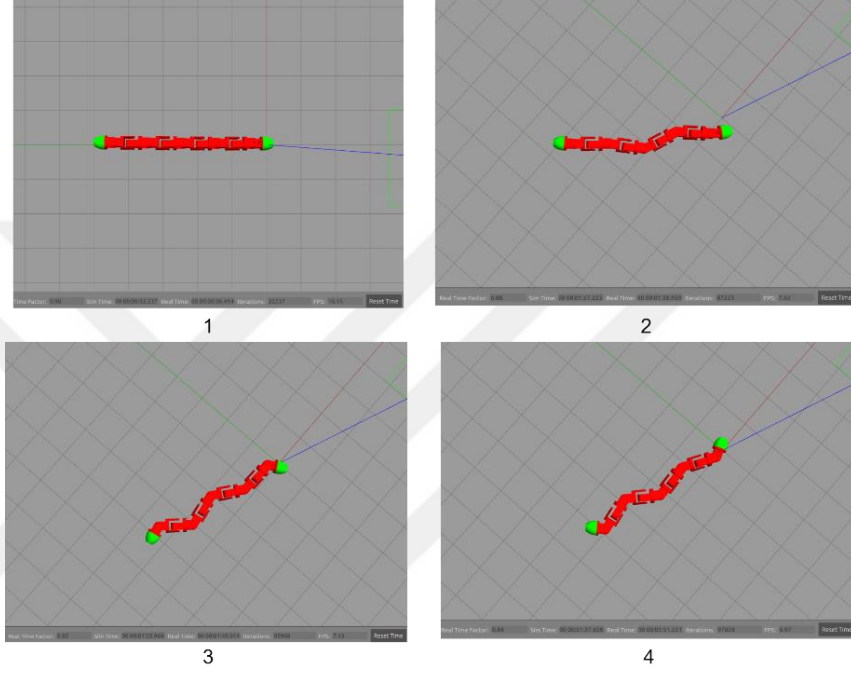


Şekil 5.16. Yan sarma hareketi için process value ve dot grafiği.

Şekil 5.16 de motor 3 ve 4 için process_value (süreç değeri) ve process_value_dot (süreç değerinin zamana göre ilk türevi) değerleri gösteriliyor. Motor 3 ve 4

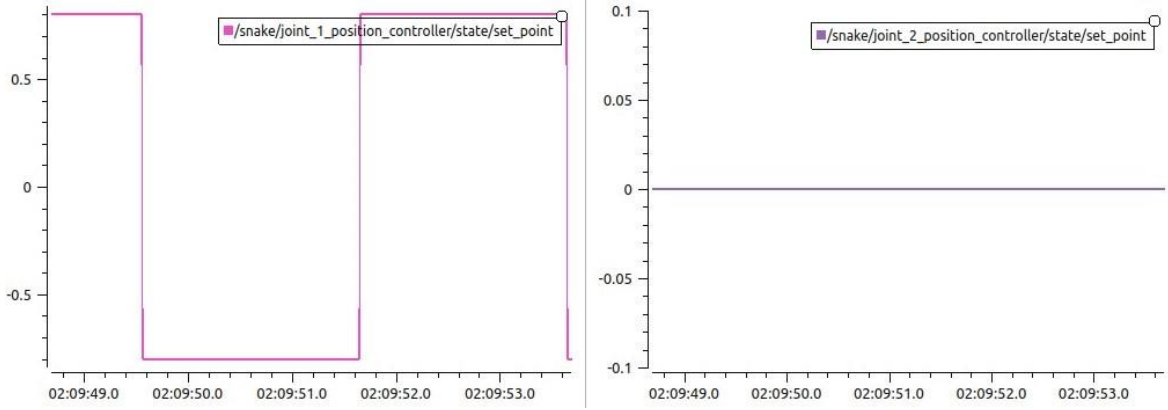
set_point'e ulaşması motor 1 ve 2 ye göre daha uzun sürmektedir aynı zamanda dalgalanma bu iki motorda daha yüksektir.

Akordiyon hareketinin Gazebo ortamında farklı zaman aralıklarında hareket görünümü aşağıda Şekil 5.17'de verilmiştir.



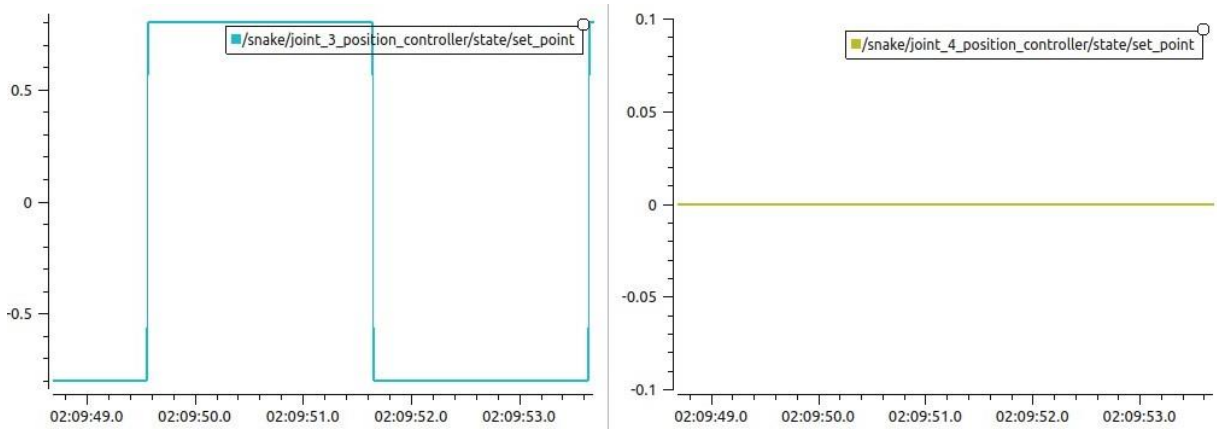
Şekil 5.17. Akordiyon hareketinin Gazebo ortamında hareketi

Akordiyon hareketinde motorlara gönderilen komutların zamana göre dönüş açılarını gösteren grafikler aşağıda (Şekil 5.18 ve Şekil 5.19) verilmiştir. Bu hareketi sağlamak için 1,3,5,7,9 numaralı motorlar hareket etmektedir. Bu hareketi yanal dalgalanma hareketinden ayıran en temel özellik yılanın kafa kısmının 90° derece sağ veya sol tarafa döndürülmesidir.



Şekil 5.18. 1 ve 2 numaralı motorların zaman açığı grafiği

Grafikte gösterilen (Şekil 5.18 ve Şekil 5.19) dört motorun hedef konumu 0.800 olarak belirlenmiştir. Dört motorda belirlenen hedef konumlara varmaktadır. Motor 1 Gazebo ortamında hedef açığa yaklaşık olarak 2 saniyede ulaşmaktadır.1. Motor hedef açığa eriştikten sonra sabit bir konumda kalmaktadır. Motor 2'ye ise hareket kabiliyeti verilmediği için herhangi bir hareket set_point grafiğinde 0 harici veri gözlenmemiştir.



Şekil 5.19. 3 ve 4 numaralı motorların zaman açığı grafiği

Motor 3 Gazebo ortamında hedef açığa yaklaşık olarak 2 saniyede ulaşmaktadır. Zamanlama olarak Motor 1 ile aynıdır. Motor 4'e ise hareket kabiliyeti verilmediği için herhangi bir hareket set_point grafiğinde 0 harici veri gözlenmemiştir.

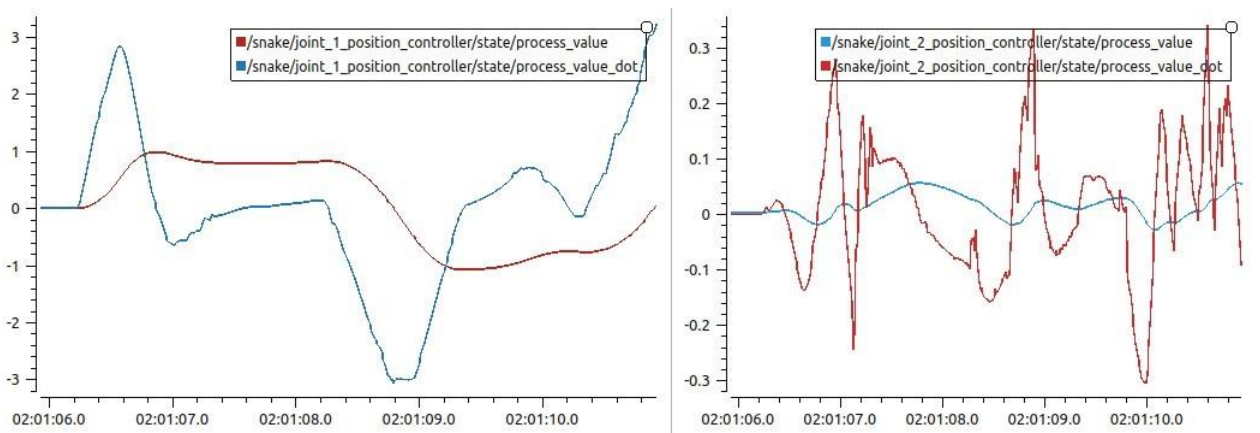
Akordiyon hareketi için set_point grafiklerine anlık olarak gelen değerler Şekil 5.20'de verilmiştir.

Series name	Samples Count	Minimum	Maximum	Average
/snake/joint_1_position_controller/state/set_point	498	-0.800000	0.800000	-0.044980
/snake/joint_2_position_controller/state/set_point	499	0.000000	0.000000	0.000000
/snake/joint_3_position_controller/state/set_point	498	-0.800000	0.800000	0.048193
/snake/joint_4_position_controller/state/set_point	499	0.000000	0.000000	0.000000

Şekil 5.20. Akordiyon hareketi için set_point grafiklerine anlık olarak gelen değerler

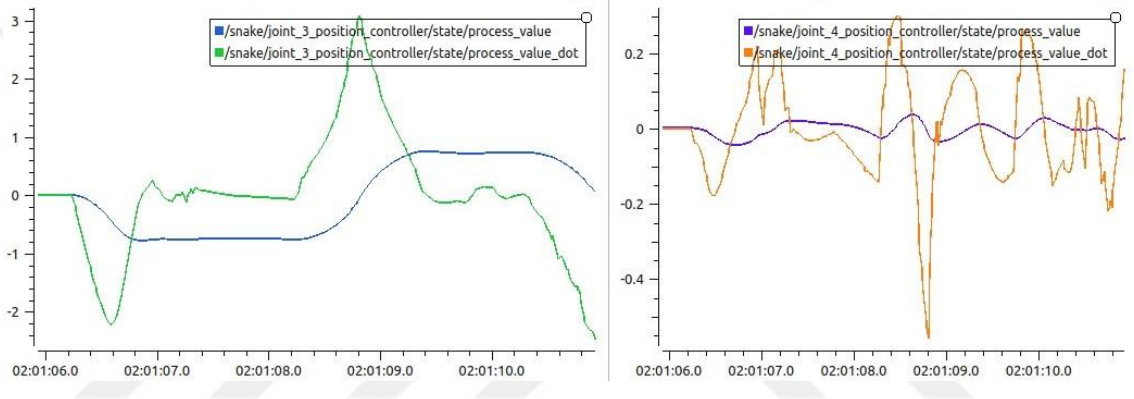
Yukarıdaki Şekil 5.20'de akordiyon hareketi için set_point grafiklerine, motorlara gönderilen değere karşılık gelen maksimum, minimum ve ortalama değerler görülmektedir.

Akordiyon hareketi process_value ve process_value_dot değerleri, motorların anlık hareket değişimini gösteren grafikler aşağıda ki gibidir (Şekil 5.21 ve Şekil 5.22).



Şekil 5.21. Akordeon hareketi için process value ve dot grafiği,

Grafikte gösterilen (Şekil 5.21, Şekil 5.22) dört motorun da process_value (süreç değeri) ve process_value_dot (süreç değerinin zamana göre ilk türevi) değerleri gösteriliyor. Dört motorda belirlenen hedef değerlere ulaşmaktadır. Yanal Dalgalanma hareketinde olduğu gibi Motor 1 ve Motor 3'e ait process_value ve process_value_dot değerleri motorlara verilen ters açılardan mütevellî grafikleri birbirinin zıttı şeklindedir. Motor 2 ve Motor 4 grafiklerinde ise belirli bir değer aralığında rastgele hareket ettiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise Motor 1 ve Motor 3'e verilen hareket kabiliyetinde gördükleri etkiden dolayı olmasıdır.



Şekil 5.22. Akordeon hareketi için process value ve dot grafiği,

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, biyomimetik yılanı robot tasarlanmış ve imal edilmiştir. Yılan robot dokuz eklemlili olup bir adet kafa ve bir adet kuyruk yapısına sahip olacak şekilde tasarlanıp 11 parça olarak imal edilmiştir. Biyomimetik yılan robotun toplam ağırlığı 1520 g uzunluğu ise 947 mm dir. Yapılan literatür çalışmasıyla ilk olarak yılan robotun hareket kabiliyetleri belirlenmiştir. Bunlar: yanal dalgalanma, doğrusal hareket, akordiyon hareket ve yanal sarmadır. Bunların dışında biyolojik yılanların tatbik edemediği iki hareket türü daha biyomimetik yılanı robota etrafında dönme ve küre içi vidalı hareket kazandırılmıştır. Yapılan tasarım çalışmalarıyla birlikte, yılan robotun tasarımı optimize edilmiş topoloji optimizasyonu neticesinde hem hareket kabiliyeti artırılmış hem de ağırlıktan kazanım elde edilerek malzeme tüketimi azaltılmış ve ağırlığın azaltılmasıyla birlikte enerji tasarrufu sağlanmıştır.

Bu çalışmada, yılan robot için gerekli olan dinamik ve statik hesaplamalar yapılarak sunulmuştur. Biyolojik ve robot yılanların hareketleri ve hareket kabiliyetleri karşılaştırılmıştır. Biyomimetik yılanı robotların avantajları, dezavantajları, kullanım alanları ve çalışma konseptleri değerlendirilmiştir.

Uygulanan biyomimetik yılanı robotun, literatürde bulunan diğer çalışmalara arasındaki temel fark pasif tekerleklere yer verilmemiş olmasıdır. Biyolojik yılanı daha yakın bir sonuç elde etmek için robotta tekerlek kullanılmayıp, yılan robotun hareketi kuru sürtünme ile sağlanılmıştır. Tekerlekli mekanizmaya sahip olan yılan robotların bazı çevre koşullarında örneğin çimen, taş ve yükselti gibi yerlerde hareket kabiliyetlerini kaybettikleri gözlemlenmiş olup tezimizde tasarlanan biyomimetik yılanı robot ile bu çevre şartlarında da hareketin devam ettiği gözlemlenmiştir.

Biyomimetik yılanı robotun eklem sayısını arttırmanın hem biyolojik yılanı olan benzerliği hem de hareket kabiliyetini arttırmakta olduğu saptanmıştır. Fakat yapılan

çalışmaların neticesinde optimal eklem sayısının 8 ile 10 arasında olduğu tespit edilmiş ve 9 eklemlilik bir robot uygulanmıştır. Eklem sayısının artırılması ise toplam ağırlığı ve bununla birlikte tork ihtiyacı arttırmakta ve artan tork miktarı ile enerji güç tüketiminin de arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan bu çalışmayla eklem sayısının görev konseptine uygun olarak belirlenmesinin uygun olacağı saptanmıştır.

Sonuç olarak bu tezde imal edilen biyomimetik yılanlı robotun, enkaz altında kalmış insanlar için arama kurtarma faaliyetlerinde, askeri alanda gözlem ve keşif için, boru içi denetimde, tıbbi uygulamalarda ve endüstriyel tesislerde kullanabileceği düşünülmektedir.



KAYNAKÇA

- [1] Ş. GÜLER, “Mimarlık Eğitiminde Biyomimikri Kavramı: Ktün Mimarlık Örneği,” Konya Teknik Üniversitesi Mimarlık Anabilim Dalı, 2022.
- [2] C. ÖZARPA, S. A. Kara, and M. GÖKMEN, “Suggestion of Car Shell Design Based on Underwater Habitat Models By a Biomimetic Approach,” *Int. KHAZAR Sci. Res. Conf. - IV*, no. March, pp. 288–295, 2023.
- [3] M. Duman, “Tasarım Sürecinde Biyomimikri Yaklaşımın Araştırılması: Fordex Doküman İnceleme Cihazı,” Başakşehir Üniversitesi Endüstriyel Tasarım ve İnovasyon Yönetimi, 2021.
- [4] KUDAY İrmak, “Tasarım Sürecini Destekleyici Faktör Olarak Biyomimikri Kavramının İncelenmesi,” Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- [5] T. Ş. YILMAZ, “Mimaride ‘Biçim Üretme’ Sürecinde ‘Biyomimikri’ Yaklaşımın İncelenmesi,” Konya Teknik Üniversitesi Mimarlık Anabilim Dalı, 2021.
- [6] B. ENDER, “Biyomimikri ve Modern Mimari,” Haliç Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2022.
- [7] H. Yıldız, “Endüstri Ürünleri Tasarımı Kapsamında Biyomimetik Tasarımın ve Metodolojisi,” İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- [8] M. T. DEMİR, “Biyomimetik Taklaşım ile Aerodinamik Jant Tasarımı ve bir Uygulaması,” Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [9] İ. İLERİTÜRK, “Mimarlık Eğitiminde Doğa ile İlişki Bağlamında Biyomimikri,” Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- [10] M. ÖZDEMİR, “Rüzgar Türbini Kanadının Biyomimetik Olarak Deneysel ve Sayısal Metotlarla Tasarlanması,” Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021.
- [11] A. B. A. KIRAKOYA, “Snake-like Robot Design and Proposed Control System for Trajectory Generataion,” Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.

- [12] A. KILIÇARSLAN, “Yılan Tipi Hareket Mekaziması ve Hareket Kontrolü,” İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
- [13] P. PATEL, “Design and Testing of Snake Robot,” Texas A&M University, 2018.
- [14] K. P. H. H. Mudiyansele, “Design , Realization and Control of an Aquatic Snake robot,” Politecnico Milano, 2020.
- [15] E. YAŞAR, “Yılan Tipi Robot Tasarımı, Prototipi ve Yörünge Analizi,” Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- [16] E. ÇAĞLAYAN, “A Snake-Like Robot for Searching Cleaning Passages From Debris and Dragging Victims,” Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [17] B. ATAKAN, “3-D Grasping During Serpentine Motion With a Snake-Like Robot,” Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
- [18] E. KURTULMUŞ, “Locomotion and Control of a Modular Snake Like Robot,” Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 2010.
- [19] Q. Fu, “Snake and snake robot locomotion in complex 3-D terrain,” 2023.
- [20] D. Rollinson, “Control and Design of Snake Robots,” Carnegie Mellon University, 2014.
- [21] B. R. L. R. Venkata, “Wave-like locomotion of a snake robot: Mathematical modelling and simulation,” *Int. J. Mech. Prod. Eng. Res. Dev.*, vol. 7, no. 6, pp. 285–296, 2017.
- [22] J. Liu, Y. Tong, and J. Liu, “Review of snake robots in constrained environments,” *Rob. Auton. Syst.*, vol. 141, p. 103785, 2021.
- [23] M. P. A. van Bergen, “Multiple framework modelling and controller design of 4 link snake robot Internship,” The University of ADELAIDE, 2019.
- [24] A. A. Transeth and K. Y. Pettersen, “Developments in snake robot modeling and locomotion,” *9th Int. Conf. Control. Autom. Robot. Vision, 2006, ICARCV '06*, no. May 2014, 2006.
- [25] İ. KOCAER, “Reconfigurable Modular Snake Robot Locomotion Via Learning Based Hybrid Motion Control System Architecture,” Bilkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2022.
- [26] J. Bae *et al.*, “Review of the Latest Research on Snake Robots Focusing on the Structure, Motion and Control Method,” *Int. J. Control. Autom. Syst.*, vol. 20, no. 10, pp. 3393–3409, 2022.
- [27] K. KEDİKLİ, B. YILDIZ, K. TOKA, and A. GENÇ, “Deprem Enkazı

- Sonrasında Keşif için Radyo Frekansıyla Uzaktan Kontrollü Sürünge Robot Prototipinin Gerçekleştirilmesi,” *Gazi J. Eng. Sci.*, vol. 8, no. 1, pp. 41–48, 2022.
- [28] V. Arun Kumar, B. Adithya, and P. T. Bijoy Antony, “Snake Robots for Rescue Operation,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1055, no. 1, p. 012001, 2021.
- [29] S. S. Dalu and P. S. Dalu, “Design and Development of Modular Snake Robot and Implementation of Locomotive Gaits,” *2019 IEEE Pune Sect. Int. Conf. PuneCon 2019*, pp. 1–5, 2019.
- [30] X. Yang *et al.*, “The snake-inspired robots: a review,” *Assem. Autom.*, vol. 42, no. 4, pp. 567–583, 2022.
- [31] G. Seeja, A. S. A. Doss, and V. Berlin Hency, “A Survey on Snake Robot Locomotion,” *IEEE Access*, vol. 10, no. October, pp. 112100–112116, 2022.
- [32] Serkan KARAÇÖL, “Biyomimetik Bir Yılanı Robotun Tasarımı ve Gerçekleşmesi,” Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021.
- [33] T. Takemori, M. Tanaka, and F. Matsuno, “Ladder Climbing with a Snake Robot,” *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, pp. 8140–8145, 2018.
- [34] D. Rollinson, A. Buchan, and H. Choset, “Virtual chassis for snake robots: Definition and applications,” *Adv. Robot.*, vol. 26, no. 17, pp. 2043–2064, 2012.
- [35] Y. BAYSAL, “Yılan Robotun Öğrenme Tabanlı Adaptif Hareket Kontrolü,” Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi, 2022.
- [36] Z. Mu, H. Wang, W. Xu, T. Liu, and H. Wang, “Two types of snake-like robots for complex environment exploration: Design, development, and experiment,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 9, no. 9, pp. 1–15, 2017.
- [37] L. Chen, S. Ma, Y. Wang, B. Li, and D. Duan, “Design and modelling of a snake robot in traveling wave locomotion,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 42, no. 12, pp. 1632–1642, 2007.
- [38] A. KILIÇASLAN, “Topoloji Optimizasyonu Yöntemi ile Ağırlığı Azaltılmış, Yeni Bir Araç Taşıyıcı Yüksek Konteyner Kavramsal Tasarımı,” İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- [39] T. TEZ, “İki ayaklı yürüyen robot dinamiğinin deneysel ve teorik araştırılması,” Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Ünivesitesi, 2017.
- [40] P. KESLER, “Arduino-Arm Uyumlu Esnek Yapılı Mikrodenetleyici Eğitim Seti Tasarımı ve Uygulaması,” Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021.

ÖZGEÇMİŞ

Murat GÖKMEN ilkokul, ortaokul ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 2016 yılında yüksek öğrenimi için Karabük Üniversitesinde Otomotiv Mühendisliği bölümüne başlayıp 2022 yılında üniversiteden mezun oldu. Mezuniyetten sonra Şahin Metal adlı otomotiv firmasında proje mühendisi olarak görev almıştır. Aynı üniversitede 2022 yılında makine mühendisliği alanında yüksek lisansa başladı. Yüksek lisans eğitimi süresince 5 adet sempozyum makalesi yayınlamıştır. Yalın üretim, proje yönetimi, robotik, elektrikli araçlar teknolojileri ve piroliz alanlarında çalışmalar yapmıştır.