



**TİTREŞİME DAYALI HAREKET EDEN ÇOK BACAKLI
ROBOTİK İLERLEME MEKANİZMASININ DENEYSEL
İNCELENMESİ**

Ayşe KAHRAMAN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TİTREŞİME DAYALI HAREKET EDEN ÇOK BACAĞI ROBOTİK
İLERLEME MEKANİZMASININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

Ayşe KAHRAMAN
0000-0001-7305-4120

Doç. Dr. Murat REİS
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA- 2021

TEZ ONAYI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TİTREŞİME DAYALI HAREKET EDEN ÇOK BACAĞI ROBOTİK İLERLEME MEKANİZMASININ DENEYSEL İNCELENMESİ

Ayşe KAHRAMAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Murat REİS

Bu çalışmada ilerleme için, ince kıl şeklinde ayakları olan PLA malzemesinden içi boş olarak üretilmiş olan robotun doğal titreşim davranışını kullanan, mikro canlıların suda ve karadaki ilerlemesine benzer bir hareket mekanizması tanıtılmaktadır. Konsol kiriş şeklinde modellenebilen ayaklı robot, güneş paneli yardımıyla mikro titreşim motorunu harekete geçirerek titreşim ile ortaya çıkan yüzme hareketi, analitik hesaplamalar ve deneyler yardımıyla doğrulanmıştır. Basit bir mikro titreşim motoru yardımıyla doğal frekansta titreşime zorlanan kıl şeklinde ayakları olan bir mikro amfibik robot, sıvı içerisinde dalgalanan bir kanat gibi itici bir kuvvet oluşturmakta ve bu yolla kirişin yönelimine bağlı olarak belirlenen yönlerde sıvı içerisinde ilerleme hareketi sağlanmaktadır. Aynı şekilde titreşim ile elastik uzuvlar bir arada kullanılarak karada ilerleme hareketi göstermektedir. Bu sayede yenilikçi ve düşük enerji tüketim değerine sahip bir ilerleme mekanizmasının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Kirişin doğal frekansına ve ilerleme performansına etki eden kiriş boyu ve açısı gibi tasarım değişkenlerinin etkileri farklı test prototipleri üzerinde deneysel olarak incelenmiştir. Robotun farklı yönlerde ilerlemesi ve kendi eksenini etrafındaki dönme hareketi güneş paneli üzerine bağlı bunan titreşim motoru ile sağlanabilmektedir. Deneysel sonuçlar, önerilen yaklaşımın ve tasarımın uygulanabilirliğini göstermiştir. Çalışmada tanıtılan ilerleme mekanizması, yön kontrolü ve düşük enerji tüketim özellikleri ile mikro amfibik robotik uygulamalarında kullanım potansiyeline sahiptir.

Anahtar Kelimeler: İlerleme, Titreşim, Yüzme, Robot, Konsol kirişi, Işık şiddeti
2021, viii +60 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF VIBRATION-BASED MULTI LEGGED ROBOTIC LOCOMOTION MECHANISM

Ayşe KAHRAMAN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Murat REİS

In this study, a movement mechanism similar to the progress of micro-livings in water and on land is introduced, using the natural vibration behavior of the robot, which is made of hollow PLA material with thin bristle feet. The legged robot, which can be modeled as a cantilever beam, activates the micro-vibration motor with the help of the solar panel, and the swimming motion that occurs with vibration has been verified with the help of analytical calculations and experiments. A micro amphibious robot with bristle-shaped feet, which is forced to vibrate at natural frequency with the help of a simple micro-vibration motor, creates a repulsive force like a flapping wing in the liquid, and in this way, the movement of progress in the liquid is provided in the directions determined depending on the orientation of the beam. In the same way, by using vibration and elastic limbs together, it shows forward motion on land. In this way, it is aimed to develop an innovative and low energy consumption progress mechanism. The effects of design variables such as beam length and angle, which affect the beam's natural frequency and propagation performance, are experimentally investigated on different test prototypes. The progress of the robot in different directions and the rotational movement around its own axis can be provided by the vibration motor attached to the solar panel. Experimental results demonstrated the feasibility of the proposed approach and design. The advance mechanism introduced in the study has the potential to be used in micro amphibious robotics applications with its directional control and low energy consumption features.

Key words: Locomotion, vibration, swimming, robot, cantilever beam
2021, viii+60 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren değerli hocam Doç Dr. Murat REİS'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, buğüne kadar bana her türlü desteği sağlayan aileme ve Semih KAHRAMAN'a içtenlikle teőekkürlerimi sunarım.

Ayşe KAHRAMAN

.../.../.....

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vvi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	6
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	18
3.1. Amfibik Mikro Roborun İlerleme Mekanizması	18
3.2. Deneysel Düzenek ve Deneyin Yapılışı	26
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	31
5. SONUÇ	58
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	65

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
t	Zaman (s);
x, y	Yatay ve düşey koordinatlar (m)
M	Hareketli yükün kütlesi;
θ	Bacakların gövde ile yaptığı açı
L_1, L_2, L_3, L_4	Bacakların uzunluğu
ρ	Eğrilik yarıçapı
E	Elastisite modülü(N/m^2)
$f(x,t)$	Yayılı yük
$y(x,t)$	Yatay yer değiştirme
$m(x)$	Birim uzunluğun kütlesi
$c(x)$	Kirişin kendi sönüm katsayısı
$\bar{c}(x)$	Akışkanın sönüm katsayısı
g	Yerçekimi ivmesi(981 m/s^2)
T	Kesme kuvveti
H	Kiriş kesitinin yüksekliği
P	Güç (watt)
I	Kiriş kesitinin alan atalet momenti
a	Motorun kalınlığı
b	Motorun çapı
A,B,C,D	Kirişin özfonksiyonkatsayıları
N	Eksenel kuvvet
n,k	Özfonksiyon numaraları (1,2,3,...)
F_w	Suyun kaldırma kuvveti
$q_n(t)$	Genelleştirilmiş koordinatlar
r	Yerdeğiştirme vektörü
r_1, r_2	Karakteristik denklem kökleri
ω_n	Kirişin doğal frekansı
v	Hareketli yükün hızı
y_0	Kirişin başlangıç eğriliği
\emptyset	Özfonksiyonları
λ	Özdeğerler

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Çeşitli ilerleme mekanizlarıyla tasarlanmış suda ve karada hareket edebilen robotlar.....	2
Şekil 3.1. İlerleme mekanizmasının basitleştirilmiş fiziksel modelinin fotoğrafı.....	19
Şekil 3.2. Metal filmin boyutları ve metal film örnekleri	19
Şekil 3.3. 20 mm en, 100 mm ve 80 mm uzunluğa sahip metal filmler için gerilim (Volt)-ilerleme hızı (mm/s) eğrileri 15 derece açı.....	21
Şekil 3.4. 20 mm en, 100 mm ve 80 mm uzunluğa sahip metal filmler için gerilim (Volt)-ilerleme hızı (mm/s) eğrileri 45 derece açı.....	21
Şekil 3.5. 20 mm en, 100 mm ve 80 mm uzunluğa sahip metal filmler için gerilim (Volt)-ilerleme hızı (mm/s) eğrileri 60 derece açı.....	22
Şekil 3.6. İlerleme mekanizmasının basitleştirilmiş fiziksel modeli ve ilerleme mekanizmasının fotoğrafı.....	23
Şekil 3.7. Amfibik robotun boyutları.....	24
Şekil 3.8. Deney düzeneği	27
Şekil 3.9. Su içerisindeki robot	27
Şekil 3.10. Deney düzeneği	28
Şekil 3.11. Mikro amfibik robot	29
Şekil 4.1. Mikro Amfibik Robotun Sol Yönde İlerlemesi (30°-45°-60°).....	32
Şekil 4.2. Mikro Amfibik Robotun Sol Yönde İlerlemesi (90° -120°-135°-150°)	33
Şekil 4.3. Mikro Amfibik Robotun Sağ Yönde İlerlemesi (30°-45°-60°-90°)	34
Şekil 4.4. Mikro Amfibik Robotun Sağ Yönde İlerlemesi (120°-135°-150°)	35
Şekil 4.5. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm,8 mm, 10 mm ayak açıları 30° olan robotun suda ve karada, sağa dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)	36
Şekil 4.6. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm,8 mm, 10 mm ayak açıları 30° olan robotun suda ve karada, sola dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)	37
Şekil 4.7. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm,8 mm, 10 mm ayak açıları 45° olan robotun suda ve karada, sağa dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)	38
Şekil 4.8. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm,8 mm, 10 mm ayak açıları 45° olan robotun suda ve karada, sola dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)	39
Şekil 4.9. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm,8 mm, 10 mm ayak açıları 60° olan robotun suda ve karada, sağa dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)	40
Şekil 4.10. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm,8 mm, 10 mm ayak açıları 60° olan robotun suda ve karada, sola dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)	41
Şekil 4.11. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm,8 mm, 10 mm ayak açıları 90° olan robotun suda ve karada, sağa dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)	42

Şekil 4.12. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm,8 mm, 10 mm ayak açıları 90° olan robotun suda ve karada, sola dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)	43
Şekil 4.13. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm,8 mm, 10 mm ayak açıları 120° olan robotun suda ve karada, sağa dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)	44
Şekil 4.14. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm,8 mm, 10 mm ayak açıları 120° olan robotun suda ve karada, sola dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)	45
Şekil 4.15. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm,8 mm, 10 mm ayak açıları 135° olan robotun suda ve karada, sağa dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)	46
Şekil 4.16. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm,8 mm, 10 mm ayak açıları 135° olan robotun suda ve karada, sola dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)	47
Şekil 4.17. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm,8 mm, 10 mm ayak açıları150° olan robotun suda ve karada, sağa dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)	48
Şekil 4.18. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm,8 mm, 10 mm ayak açıları 150° olan robotun suda ve karada, sola dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)	49
Şekil 4.19. Ayak uzunluğu 4 mm, ayak açıları 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150° olan robotun suda ve karada, sağa dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)	50
Şekil 4.20. Ayak uzunluğu 4 mm, ayak açıları 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150° olan robotun suda ve karada, sola dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)	51
Şekil 4.21. Ayak uzunluğu 6 mm, ayak açıları 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150° olan robotun suda ve karada, sağa dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)	52
Şekil 4.22. Ayak uzunluğu 6 mm, ayak açıları 30, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150° olan robotun suda ve karada, sola dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)	53
Şekil 4.23. Ayak uzunluğu 8 mm, ayak açıları 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150° olan robotun suda ve karada, sağa dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)	54
Şekil 4.24. Ayak uzunluğu 8 mm, ayak açıları 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150° olan robotun suda ve karada, sola dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)	55
Şekil 4.25. Ayak uzunluğu 10 mm, ayak açıları 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150° olan robotun suda ve karada, sağa dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)	56
Şekil 4.26. Ayak uzunluğu 10 mm, ayak açıları 30° , 45° , 60° , 90° , 120° , 135° , 150° olan robotun suda ve karada, sola dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)	57



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Mekanizma ön modelinin boyutları.....	19
Çizelge 3.2. Nihai mekanizmanın ön modelinin boyutları	25

1. GİRİŞ

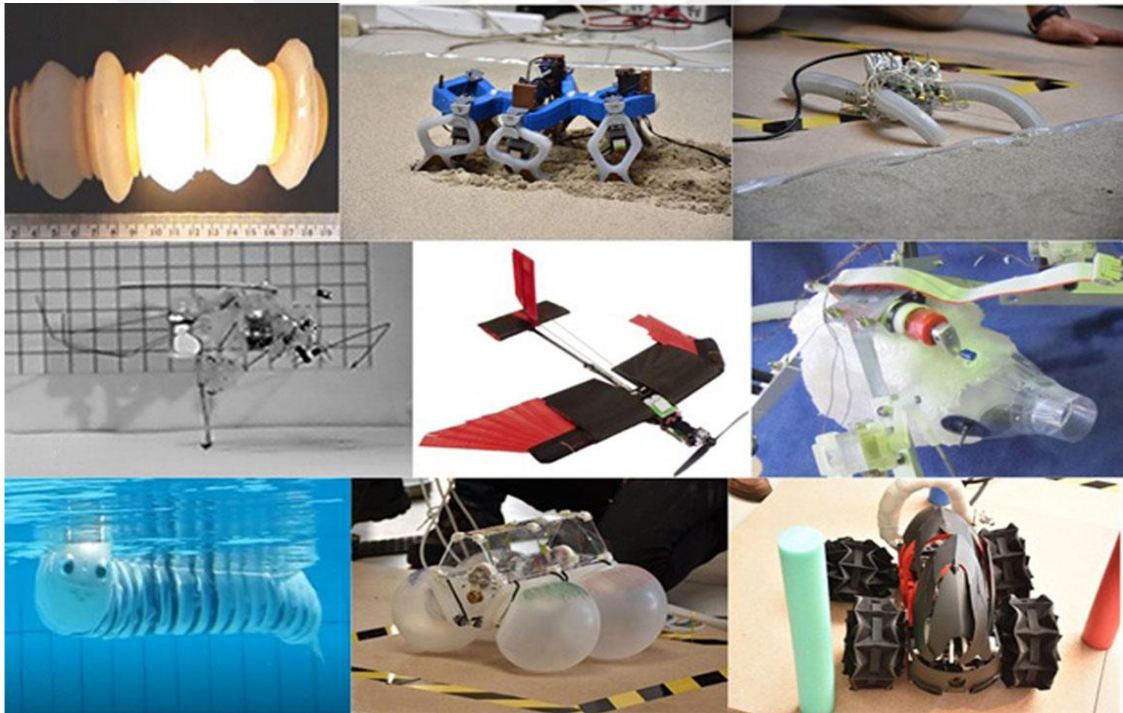
Robotu, Webster's Dictionary Normal koşullarda insanlara atfedilen işlevleri yapan veya şekilsel olarak insana benzeyen otomatik bir düzenek olarak tanımlarken, Amerika Robot Enstitüsü; Çeşitli işleri yapabilmek için programlanmış hareketlerle malzeme, parça, alet veya özel cihazları taşımak için tasarlanmış çok işlevli, tekrar programlanabilir düzenek olarak tanımlamıştır. Günümüz koşullarına baktığımızda robot kavramını sadece insan işlevleri ve şekli ile tanımlamak eksiktir. Robotlar, canlılara benzer işlevleri olan ve davranış biçimleri sergileyen mekanizmalardır.

Biyolojik sistemler, kas-iskelet sistemlerini ustaca kullanarak karmaşık ortamlarda ilerleyebilecek hareket kabiliyetine sahiptir. İlerlemek, yürümek, yüzmek ve koşmak bunların hepsi periyodik hareketlerdir. Dolayısıyla canlıların herhangi bir şekilde ilerlemek için yaptığı kas hareketi periyodik bir harekettir. Hareketlerini elastik uzuvları sayesinde yaptıkları içinde enerjilerini koruyabilmektedirler. Rijit sistemlere oranla elastik uzuvlu sistemler enerjilerini %70 kadar koruyabilmektedir. Bu düşüncelerden yola çıkarak çalışmalarda etkin ilerleme mekanizmaları ve robotik yapıları geliştirmek için canlıların hareket kabiliyeti araştırılmaya başlanmıştır.

İnsanlar hareket edebilen, üstün niteliklere sahip birçok robot tasarlamıştır. Ancak yapılan robotlar, hayvanlar ve insanlar kadar etkin şekilde hareket edememiştir. Enerjilerini verimli şekilde kullanamamışlardır. Örneğin; bu robotlar ormanda, uçurumda, çölde, deniz kıyılarında, kum, çamur, toprak gibi deforme olmuş alanlarda ilerleme gösteremedi. Bu durumda canlıların hareket mekanizmasının incelenmesini ve kas sistemini taklit eden mekanizmaların oluşturulmasını arttırdı. Çünkü robotlara aktarılması istenen ilerleme mekanizması canlıların doğuştan kazandığı hareket kabiliyetidir. Robotik çalışmalar büyük ölçüde mühendislik ve bilgisayar bilimleri alanlarının geliştirilmesine yol açmıştır. Bunun yanı sıra canlılardaki gibi enerjiyi nasıl optimum kullanacağımız hakkında bilgi sahibi olunmasını sağlamıştır. Bu araştırmalar sonucunda robot geometrisinde uzuvları biyolojik sistemlerde olduğu gibi doğal dinamik hareketlere uygun hale getirilmiş ve enerjiden tasarruf sağlanmıştır. Enerjiden sağlanan tasarruf yer değiştirme maliyetini, harcanan elektrik tüketimini ve mekanizmadaki ağırlık azaltmıştır. (Aguilar ve ark. 2016)

Ilkka Leppanen (2007) aynı şekilde hareket kabiliyetinin hayvanlar ve insanlar için doğal bir özellik olduğunu ve robotik ilerlemelerde ilk olarak biyolojik yapıların incelenmesi gerektiğini savunmuştur. Çalışmasında robotların kullanımının ilk duran ve belirli işlevi yapan robotlardan ihtiyaç durumuna göre nasıl bacaklı, tekerlekli ve hibrit robot kullanımına dönüştüğünü anlatılmıştır. Zor arazi koşullarında hareket edebilen bir robot üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

Belirli bir yürüyüşü temsil eden hayvanların hareket kabiliyeti ilkelerinin kısa bir açıklaması Calisti ve ark. (2017) tarafından yayınlanan makalede yapılmıştır. Bu belirli ilerleme gruplarının karada, suda ve havada nasıl gelişmelere sahip olduklarını, mekanizmaların ortaya çıkış süreçlerinin nasıl olduğu incelenmiştir. Farklı ilerleme yeteneğine sahip robotlara ait bazı görseller şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Çeşitli ilerleme mekanizmalarıyla tasarlanmış suda ve karada hareket edebilen robotlar

Karada, suda ve havada hareket eden robotlara ek olarak hem karada hem suda ilerleme hareketi gösteren robotlar vardır. Bu robotlara amfibik robotlar denilmektedir. Amfibi anlamı Yunancadan gelmektedir. 'amfiye' iki veya çift anlamına, 'bios' yaşam veya yaşamak anlamına gelir. Amfibi canlılar dünyanın her yerinde bulunurlar. Tatlı suda çoğalırlar. Yumurta-larva-yetişkinlik evresi olarak 3 döngüden oluşurlar. Dişi olan amfibi canlısı yumurtasını suya bırakır. Amfibi yumurtaları kuşların ve diğer hayvanların sert kabuklarına aksine kuluçkadan önce jöle benzeri bir madde ile korunur. Yani larva olarak ortaya çıkarlar. Uzuvarı olmadan sucul bir canlı gibi solungaç ve yüzgeçleri olan kurbağa yavruları gibi yaşam evresinden geçerek büyümeye başlar. Son evre olarak yani yetişkinliğe geçerken solungaçları ve yüzgeçleri yok olup akciğer ve bacaklar oluşmaya başlar. Karada yaşamaya uygun hale gelmiş olurlar. (Anonim 2019)

Amfibi canlılar 3 gruptan oluşurlar. Anura; kurbağalar, Caudata; semenderler son olarak da Caecilians; sürüngenlerdir. Bugün yaklaşık 8.000 canlı amfibi türü bilinmektedir; bunların% 88'i (~7000) kurbağa (anura), yaklaşık% 9'u (~700) semenderdir ve yaklaşık% 3'ü (> 200) sürüngenlerdir. Üç amfibi grubu görünüşte o kadar belirgindir ki hiçbir zaman birbirleriyle karıştırılmazlar. En dikkat çekici benzer özellikleri, ana solunum organı olarak işlev gören ve çoğu diğer organizmalar için zehirli olan çeşitli sekresyonlar üreten nemli bir ciltlerinin olmasıdır.

Kurbağalar çok kısa gövdeli hayvanlardır. 9 veya daha az omurları vardır. Vücutlarındaki pelvis kemiği sayesinde uzundurlar. Tüm yetişkin kurbağaların kuyrukları yoktur. Ön bacakları kısa, arka bacakları ön bacaklara nispeten daha uzundur. Ön bacaklarında 4 arkada bacaklarında 5 parmak bulunur. Ama bazen 1 veya 2 tanesi oldukça küçüktür. Arka bacaklarında 4 tane çok iyi segment vardır ve bunlar çok uzundur. Bu sayede çok yükseklere zıplayabilirler ve yüzebilirler. 2 metreyi geçen zıplamalar yapabilirler. Bununla birlikte, çoğunlukla yeraltında yaşayan birçok türün kısa bacakları vardır. Bu kurbağalarda sıçramak yerine yürümek ve oyuk açmakta iyidirler.

Semenderler tipik olarak, kara omurgalı tipine sahiptirler. Vücutları birbiriyle orantılı ve benzer uzunlukta uzuvları vardır. Bulunan uzuvları uzundur. Kuyrukları bazen vücuttan daha uzundur. Semenderler ön bacaklarında 4 den fazla parmağı olan kurbağalar gibidir

5 tane arka bacakta bulunur. Bazen kuyruklarını beşinci ayak olarak kullanıp zıplayabilirler. Bazı istisna semenderler yılan gibi uzamış ve azalmış uzuvları ile suda yaşayan amfibiye andırırlar.

Caecilians; bir nevi ayaksız amfibi canlıdır. Sürüngenlere benzerlerdir. Bacaksız, ince uzun yapıları vardır. 100'den fazla omur içerirler. Kuyrukları yoktur ancak bazı türlerinde çok kısa kuyruk bulunabilir. Gözleri neredeyse yok gibidir. Çoğu karasaldır ancak suda yaşayanları da vardır. Sert kemikli kafatası içeren kafaları ile toprağa hızlıca oyuk açabilirler. Zıplama, yürüme işlevleri diğer canlılara oranla yavaştır. Amfibi robotlar tamamen bu canlılara yapılan gözlemler sayesinde gelişme göstermiştir. (Wake ve ark.2018)

Robotlara ilham olan diğer canlılarda su böcekleri ve balıklardır. Balığın sessiz ve keskin hareket performansı, yüzgeç şekli, aerodinamik ve mukoza gövdesi gibi birçok faktöre bağlı olmaktadır. Su böceklerinin suda ilerlemesi ise bacak yapılarına bağlı olmaktadır.

Su böcekleri göllerde, derelerde, şehir göletlerinde ve hatta çamur birikintilerinde yaşamaktadırlar. Su böceklerinin en belirgin özellikleri su üzerinde hızlı şekilde zıplamaları ve boğulmadan su üzerinde bulunmalarıdır. Bunun sebebi ayaklarında mikroskobik büyüklükte bulunan kıllardır. Bu kıllar havayı hapsederek, suya direnci artırıp böceğin yüzme kabiliyetini arttırmaktadır. Bacakları öyle batmaz durumdadır ki ağırlıklarının 15 katını kaldırabilmektedirler. Yağmur, fırtına ve dalgada bile suyun üzerinde kalabilmektedirler. Bacaklarının şekli suyu dirençli şekilde itebilecek, yüzey boyunca verimli ve hızlı harekete izin verecek şekilde yapılandırılmıştır. Tüm böceklerde olduğu gibi 3 çift bacakları vardır. Ön bacakları kısadır. Orta bacaklar kürek gibi hareket ederek itme kuvveti oluştururlar. Arka bacaklar uzundur ek güç sağlar, yönlendirir ve fren yapmasını sağlar. Ancak bu olağanüstü yeteneklere sahip olan bacaklar sert yüzeylerde işe yaramamaktadır. (Anonim, 2017)

Balıklar ise suda kendilerine dalga oluşturarak ilerleme hareketi yapmaktadırlar. Sudaki hareketleri karada hareket eden bir yılanı benzer. Bu nispeten yavaş bir hareketlilik türüdür ve balığın itilmesi (hareket ettirilmesi) için çok miktarda enerji gerekir.

Gövdelerinde bulunan kuyrukları ile sağ sol hareketleri yaparak kendilerine itme oluşturan hareket eğilimdedirler. Kuyruk yüzgeci veya kuyruğu, bir balığın yüzmek için kullandığı tek yüzgeç değildir. Örneğin, hızla yüzen okyanus balıklarının vücudu üzerinde yatay olarak oturan ve yüzgeçlerin yanı sıra, pelvik kanatçıklar, balıkların su içinde hareket ederken yuvarlanmalarını engellemek için stabilizatör görevi görerek önemli bir rol oynamaktadır. Çok yavaş hareket eden veya uzun mesafeler boyunca düz bir çizgide yüzmeyen balıklarda, pektoral yüzgeçler neredeyse dikey olarak ayarlanır. Pelet kanatçıkları ile birlikte pektoral yüzgeçler, balıklara fren görevi yaparak yardımcı olur ve balıklara zor manevralarda yardımcı olmaktadır. (Stephanie Plessner,2018)

Bu tez çalışmasında mikro canlıların, böceklerin ve amfibik canlıların suda ve karadaki ilerlemesine benzer bir hareket mekanizması geliştirilmiştir. Sarkaç yardımıyla titreşime zorlanan amfibik robotun karada ve suda nasıl hareket ettiği gözlemlenmiş olup oradan ilham alınarak ilk olarak sarkaç olmadan elastik bir mekanizmanın suda titreşim ile nasıl ilerleme gösterdiği incelenmiştir. Yapılan tasarım değişkenleri ile deneyler yapılarak robotun sudaki ilerlemesi incelenmiştir. Elde edilen verilen neticesinde nihai tasarım elde edilmiş ve robotumuz suda ve karada ışık şiddeti ile titreşerek ilerleme göstermiştir.

Tezin yazım aşamasında; giriş bölümünde ilham alınan canlı türlerinin tanıtımı yapılmaktadır. Daha sonra kaynak araştırması bölümünde karasal, sucul ve amfibik robotlar anlatılmakta ve ilerleme mekanizmaları ile ilgili yapılan çalışmalar verilmektedir. Materyal ve yöntem bölümünde üzerinde çalıştığımız mekanizma, tasarım parametreleri, değişkenler, hesaplamalar anlatılmaktadır. Bir diğer bölümde deney düzeneği ve deneyin nasıl ve hangi ortamda yapıldığı açıklanmaktadır. Bulgular bölümünde, yapılan deneyin sonuçları grafikler olarak verilip değerlendirilmektedir. Tartışma ve sonuç kısmında ise yapılan deneyin sonuçlarından yola çıkarak gelecekte yapılabilecek robot türlerinden bahsedilmektedir.

2.KAYNAK ARAŞTIRMASI

Robotun tarihçesi antik yunanlılara kadar uzanmaktadır. Yunan mitolojisinde en az bir robot örneği bulunmaktadır. 1206'da El Cezire programlanabilir en eski insansı robota benzeyen otomatı geliştirmiştir.1533 yılında ise Johannes Müller von Königsberg kartala benzeyen bir otomat geliştirmiş ve uçurmuştur. 1737'de Jacques De Vaucanson ördekleri taklit eden bir otomat geliştirilmiştir. 1921 yılında Karel Capek tarafından bir oyunda robot kelimesi kullanılarak gün yüzüne çıkarılmıştır. Bu gelişmeler devam ederek 1928 yılında biyolog Makoto Nishimura tarafından biyoloji alt yapılı ilk robot tasarlanmıştır. (Anonim,2009) Robot gelişimleri her yıl bu şekilde devam etmiş karada, suda ve hem karada hem suda giden robotlar geliştirilmiştir.

Biyolojik sistemler, kas-iskelet sistemlerini oldukça iyi kullanarak düzensiz ortamlarda ilerleyebilecek hareket yeteneğine sahiptir. Araştırmacılar; ilerleme mekanizmaları ile robotik sistemleri geliştirmek için canlıların hareket sistemlerini incelemektedir. İlerleme mekanizmalarının ilk basamağını yani temelini anlamak için biyolojik canlıların yüzmeye, uçmaya, yürümeye, koşmaya, zıplama düzenlerini, el becerilerini, çevikliklerini ve verimliliklerini anlamak önem taşımaktadır. Bu amaç ile canlıların yürüyüş modellerinin incelenmesi ve sınıflandırılabilmesi için farklı yaklaşımlar sunulmuştur. Burada temel zorluk, ' karmaşık mekanik ' ve ' kontrol değişkenlerini ' belirlemek için yol gösterici ilkeler geliştirmektir. Zira, dinamik ortamlardaki ' karmaşık gövdeleri ' kontrol edebilen herhangi bir biyolojik sistem ile kıyaslandığında, modellerimiz ve robotlarımız çok basittir. Bunlara ek olarak ölçeklendirmelerin nasıl yapılacağı da net şekilde bilinmemektedir. Bu konulara çözüm bulmak için yapılan çalışmalar her geçen gün artmakta ve robotik yapılar geçmiş ile karşılaştırıldığında hayvanlara benzer doğallıkta ilerleme hareketleri göstermektedir. (Reis ve ark 2013)

Amfibik robotların geliştirilmesinde biyoloji ilham kaynağı olmuştur. Robotların hareketliliği, mekanizmaların basitleştirilmesi ve mevcut teknolojinin geliştirilmesi için biyoloji yol gösterici olmuştur. Biyolojik ilkeleri kullanarak robotlarda meydana gelen sorunları çözmek kolaylaştırılmıştır. Biyoloji sayesinde hamamböceklerinden esinlenerek Whegs™ adlı tekerlek ayaklı olarak isimlendirilen robot tanımlanmıştır. 6 tane ek güç oluşturan tekerlek ayakları olan esnek bir sistem oluşturulmuştur. Düzensiz

arazilerde yürüyebilen, tırmanabilen çamurlu ortamlarda yavaşça ilerleyebilen bir mekanizma geliştirilmiştir. Mekanizmanın basitliği kontrol sistemini de basitleştirmiştir. (Quinn ve ark. 2002)

Birçok hayvan su içinde ve su dışında yaşayabilmektedir. Semenderler, su samurları, kurbağalar, penguenler vb. birçok hayvan amfibik çevrede yaşayabilir. Kolları, bacakları sayesinde batmadan yüzmekte ve yürüyebilmektedirler. Yüzmenin yanı sıra suyun üstünde ve altında da yürüyebilen bir robot, daha önce mümkün olmayan sayısız görevi yerine getirmek için yeni bir özgürlüğe sahip olacaktır. Bu nedenle, Whegs™'ün yürümesinin yanı sıra yüzmesini sağlayacak yeni bir pervane ve bacak kombinasyonu da geliştirilmiş ve test edilmiştir. Böylelikle tekerlek bacak ekini en yaygın mühendislik suyu itici şekli olan pervane ile birleştirerek Whegs™ konseptinin işlevselliğini artırılmıştır. (Boxerbaum ve ark. 2005)

Amfibi Whegs™ benzeri başka bir robotu ise pliant energy sistemleri üretmiştir. Geliştirmiş oldukları robotun adı Venox'dur. Pliant Energy'nin Velox robotu, suyu bırakıp kum, çakıl taşları, asfalt, çimen ve hatta buzlar arasında hareket edebilecek verimli dalgalı tahrik sistemine sahip amfibik hareket edebilen bir robottur. Çift kanatçıkları sayesinde birçok hayvanın hareket etmek için gösterdiği performansı sergileyebilmektedir. Su altında kanatçıklarını yükseltip kayma hareketi ile ilerleyebilmektedir. Su altında, kutuplarda ve karadan denize hızlıca girilmesi gereken tüm uygulamalarda kullanılacak yeteneklere sahip amfibik robot olduğu göstermektedir. (Anonim 2019)

Amfibi robotlar, kaynak arama, doğal afetler, kurtarma ve keşif alanındaki geniş uygulamalar için oldukça çekicidir. Ancak robotları amfibik çevrelere uygun şekilde geliştirmek zor ve karmaşıktır. Karmaşık amfibi ortamında, amfibi robotların sert zeminde yürümek, su altında manevra yapmak ve kumlu ve çamurlu arazi gibi geçiş bölgeleri arasından geçmek için çok yetenekleri olmaları gerekmektedir. Bu yetenekler robotlar için yüksek performanslı bir tahrik mekanizması gerektirir. Karmaşık bir görevin üstesinden gelmek için, dönüştürülebilir beş bacaklı kompozit tahrik mekanizmalarına sahip yeni bir amfibi robot (AmphiHex-I) geliştirilmiştir. Beş bacaklı kompozit yapıya

sahip tahrik mekanizmalı AmphiHex-I sert ve yumuşak yzeylerde yzryebilir ve birçok manevra ile suda yzrebilir. Dnryşttrrylebilir bacaklar arasındaki dinamiği keşfetmek için hibrit model kullanılmıştır. Çeşitli eliptik şekillere sahip bacakların hareket performansı, model tahminleri ve simrylasyon sonuçları arasındaki uyumluluğu analiz edilmiştir. (Zhang ve ark. 2013). Zhang ve ark. 2018 yılında AmphiHex-I geliştirilmiş ve AmphiHex-II րretmiř ve farklı ortamlarda adaptasyonunu en iyi şekilde sağlayabilecek robotu geliştirmişlerdir. (Zhang ve ark. 2018)

Amfibik robotlara gzyzel bir rnek olacak çalışmalardan biri de perdeli ayaklarını kullanarak karada ve suda hareket edebilen rdeğin hareketinden ilham alınarak yapılan robottur. Rrdeğin suda yaptığı hareketleri incelenmiştir. Perdeli ayakları ile kuvvet oluşturup ilerleyebilmek için ayakları ile ileri geri hareketler yaptığı gzyzlemlenmiştir. Bu gzyzlem sonucuyla perdeli ayakları ile karada yzryebilirken suya girdiğinde ayaklarındaki perdeleri açarak suyun gerilimi ve suyun kaldırma kuvveti ile yzrebilecek bir robot tasarlanmıştır. (Kashem ve ark 2017)

Amfibik robotlarda bulunan tahrik sistemini değiştirip yerine piezoelektrik malzeme kullanılarak mikro robotlar րretilmiřtir. Piezoelektrik aktryatrler, hafif olmaları, yzyksek bant genişliği, yzyksek gzy րretimi, dzyşyk gzy tzyketimi ve entegrasyon basitliği nedeniyle mikro robotlar için avantajlı olmuştur. Ancak yer değiştirme ve yeterli kuvvet için yzyksek voltaj gerektirmesi dezavantaj oluşturmuştur. (Steltz ve ark. 2006) Elektrik enerjisinin% 90'ından fazlası rezonansta mekanik enerjiye dnyryşttrrylebilir. Yzyksek voltaj gerilimi yanında oluşan dinamik moddaki sıcaklık davranışıda tahrik sistemini olumsuz etkilemektedir. Burada sunulan prototip, piezo elemanına uygulanan yzyksek frekanslı bir voltajla çalıştırılır. Aktryatryryn brykylme titreşimleri, u noktalarda bacaklar tarafından enine ve boyuna titreşimlere dnyryşttrrylrylr. Yzyzen gzyvdeler de bacaklar tarafından uyarılmış olur. Bryylelikle robot harekete geçer. Asimetrik sistem rzyelliklerinden dolayı hareket yryny alıştırma frekansı ile kontrol edilebilmektedir. (Becker ve ark. 2013) Piezo-elektrik mikrobotları geliştirip brynyesine 4 tane tahrik elemanı eklenmiş ve karadan suya sudan karaya geçişi sağlayabilen ayaklı piezo amfibik robotları րretilmiřtir. Dnyryşttrrylebilir kompozit tahrik mekanizmalarıyla, sistem mikro robotları taşımak için plastik bir rafa ve hareketi sağlamak için doryrt adet hareket sağlayıcı րniteye sahiptir.

Böylelikle yürüme ve yüzme hareketlerini gerçekleştirebilmektedir. En iyi ilerlemesini karada daha sonra tırmanmada ve son olarak da yüzmede göstermiştir. (Li ve ark. 2015) Li ve ark. daha sonraki çalışmalarında bu ayaklı küresel piezo amfibik robotun hızlarını geliştirmek amacıyla küresel robotun 4 tahrik sistemine paten biçimi vererek eğimli ve pürüzsüz yüzeylerde de hareket kabiliyetini arttırmıştır. (Li ve ark. 2017). Son olarak da farklı yürüme şekillerine sahip, su jeti ile yönlendirilen yeni bir hibrit lokomasyona sahip amfibik küresel robotu ASR-III tanıtılmıştır. Bu robot, bir kaldırma ve destekleyici tekerlek mekanizması mekanik tekerlekli ayaklar ve bir su jeti iticisinin birleştirilmesi ile oluşturulmuş karma bir yapıdadır. Bu karma yapı robotun karada kayma ve yürüme, su altında ileriye itilme şeklinde lokomasyon sağlayabilmiştir. (Xing ve ark. 2018)

Amfibik robotlar hem karada hemde suda hareket kabiliyeti olan canlılardır. Amfibik robotların yanında sadece karada veya sadece suda hareket edebilen robotlar içinde araştırmalar yapılmıştır. İnsan yapımı karada hareket eden araçlar esas olarak tekerleğe dayanırken, memeliler ve böcekler için hareket esas olarak bacaklara dayanmaktadır. Tekerlekli araçların hazırlanmış yüzeylere ihtiyacı vardır. Dünyadaki kara yüzeyinin neredeyse yarısına erişebilmektedirler. Ancak bacaklı hayvanlar dünyadaki arazilerin çoğunda hareket edebilmektedir ve prensip olarak bacaklı robotlarda yapılabilmektedir. Ulaşımaya dayalı bağımlılığımız tekerlekli lokomotif doğal çevreye önemli bir zarar kaynağıyken bacaklar ayrı ayak izleri oluşturur ve doğal araziye daha az zarar vermektedirler. Bu gerçekler bacaklı robotların önemini arttırmaktadır. Karmaşık sistemlerin kontrolündeki ilerlemelerle, bacaklı robotların geliştirme çabalarını arttırmıştır. Bacaklı robotları hayata getirebilmek için ilk olarak hayvan hareketleri ve fizyolojik yapıları incelenmiştir. Hayvanlardaki biyolojik sistemlerin detaylı incelenmesi, bacaklar ile yürüyebilen, engebeli arazide dengeyi koruyabilen, daha hızlı hareket eden ve daha az enerji tüketen robotların fiziksel modellerinin tasarlanmasını sağlamıştır. (Kar ve ark. 2003)

Pasif bir dinamik yürüyücü, eğimli olan bir rampadan aşağıya yönünde yürüyün, eklemler ile birbirine kenetlenmiş yani bağlanmış rijit uzuvlardan oluşan basit bir mekanik ilerleme mekanizması ortaya konmuştur. Motor ve kontrol sistemleri bulunmamaktadır. Fakat insan yürüyüşü benzerliğinde oldukça doğal olan bir yürüme hareketi göstermektedir. Bu

robotlar diğerk robotlara kıyasla az miktarda kontrol ve enerji kullanmakta ve insan yürüyüşü doğallığında bir yürüme yapabilmektedir. Mekanik yapının ‘doğal salınım frekanslarını ‘ve ‘pasif dinamiklerini’ kullanan bu model doğal bir ilerleme şekli sunmaktadır. (Collins ve ark. 2005). Pasif dinamik koşu (PDR) yapan gerçek fiziksel iki ayaklı robot ilk kez 2010 yılında yapılmıştır. Mekanizma, bacak ve kalça eklemleri dikkatlice gözlemlenerek tasarlanmıştır. 36 adımda istikrarlı bir pasif dinamik ilerleme sağlamaktadır. Robot 0,22 rad eğimde yaklaşık 0,83 m/s hızla çalışmaktadır. (Owaki ve ark. 2010) Ancak çalışmalarda insan ve hayvan kas sistemine benzer yapılar kullanılarak yapılan sistemlerin hem çok kompleks hem maliyetinin çok yüksek olması hem de aşırı yüksek enerji tüketmesi sebebiyle kullanışlı olmamıştır. Elastik yapıda serbest titreşim kullanımı enerji tasarruflu robot hareketine yol açar, çünkü uygun şekilde tasarlanır ve kontrol edilirse enerji harcamasını önemli ölçüde azaltılabileceği gözlemlenmiştir. (Yu ve ark. 2013) Bu konuyu incelemeye alarak ‘elastik uzuvlu bacaklarda’ titreşim hareketi ile yürüme, zıplama ve koşma hareketleri gerçekleştirmiştir. Bu tasarlanan sistem hem basit bir yapı hem de düşük enerji tüketimi ortaya koymuştur. (Reis ve ark.2011)

Karada ilerleyebilen bacaklı robotlar sayesinde dünyada birçok yüzeye ulaşım gerçekleşmiştir. Böylelikle insanların giremediği tehlike arz eden noktalara bacaklı robotlar gönderilmiş ve incelemeler yapılmıştır. Aynı şekilde sucul ortamlarda da araştırmaların yapılabilmesi için sucul robotlara ihtiyaç duyulmuştur. Sucul insansız araçlara (AUV) suda yaşayan canlılar ilham olmuştur. Hareket kabiliyeti öğrenilen canlılar dikkate alınarak üretilen robotların enerji verimliliklerinin daha iyi olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, ne tür yeni robotik araştırmalarının yapılabileceğini belirlemek ve çevik ve verimli bir su robotu geliştirmemize yol açabilecek verimli bilgiler sağlamak için sucul hayvanlar araştırılmıştır. (Kwak ve ark. 2018)

Sucul alandaki ilk çalışmalardan biri Carnegie Mellon Üniversitesi Nanorobotik Laboratuvarı'nda, Basilisk kertenkelelerinden esinlenerek geliştirilen bir su robotudur. Fonksiyonel olarak robotta, su yüzeyinde hareket sağlamak için 180° özdeş dört çubuk mekanizmalı bacaklar kullanılmıştır. Dört ayaklı robot daha kolay stabilize edilmiş ve iki ayaklı robottan daha yüksek kaldırma / güç oranına sahip olmuştur. Çalışma hızındaki azalmalar ayak çapı ve ayak penetrasyon derinliğine bağlı olarak değişmektedir. (Floyd

ve ark. 2008) . Yapılan deneyler sonucunda suda hareket eden robotun ayağının periyodik olarak döndürüldüğünde, robotun su üzerinde hareket etmek için kullanabileceği büyüklükte bir sürükleme ve kaldırma kuvveti üretilebilmiştir. Bu ilerleme ile robot küçük bir sürtünme kuvveti ve büyük bir kaldırma kuvveti oluşturarak ilerleyebilmektedir. Farklı geometrilerde ayak tipleri ve farklı yürüyüşler denenmiştir. Böylelikle suda hareket eden robotlara rehberlik edecek çalışmalar ortaya koyulmuştur. (Kim ve ark. 2014) Sucul bir robotu çalıştırabilmek için enerji verimliliği ve hızlı hareket sağlanmalıdır. Daha önce yapılan çalışmalardan edinilen bilgiye göre kaldırma kuvveti robotun hareketi için önemli bir kriter olduğu düşünülmektedir. Kaldırma kuvvetinin kaybı, robotun su üzerindeki yuvarlanma stabilitesi ile ilişkilidir. Bu çalışmanın amacı, bir dengeleme kuyruğunun periyodik hareketi ile sucul bir robotun yuvarlanma stabilitesini artırmaktır. Bacak ve kuyruğun hareketini hesaplamak için kinematik analiz, kuyruk hareketinin dengeleme etkisini hesaplamak içinde statik analiz yapılmıştır. Robotik platformun kinematik ve statik sonuçlara göre dinamik performansını belirlemek için sayısal bir model önerilmiştir. Sayısal modele dayalı bir simülasyon gerçekleştirilmiş ve sonuçlar bir robot prototipinden deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarının, yuvarlanma stabilitesi açısından deneysel verilerle iyi uyum içinde olduğu gözlemlenmiş ve kaldırma kuvvetinin sadece hafif bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. (Kim ve ark. 2015) Direksiyon, mobil robotların yüksek manevra kabiliyeti için önemlidir. Bir kuyruk kullanarak manevra kabiliyetini artırmak için birçok çalışma yapılmıştır. Bu kullanılan kuyruk ile sucuk robotun yalpalanma, yönlenme hareketleri suyun kaldırma ve sürtünme hareketleri ile birlikte analizler ile incelenmiştir. (Kim ve ark. 2017)

Suda hareket edebilen robotlar sucul hayvanlardan esinlenerek çalıştırıldığında bir başarı edilebilir duruma gelmiştir. Sucul robotların sayısı son yıllarda artmaya başlamıştır. Çünkü tehlikeli ortamlarda yapılabilecek çeşitli görevlerde kullanılmaya başlanmıştır. Hatta farklı biyolojik hayvanların yerini almaya başlamışlardır. Bu durumda gereksiz enerji kaybına sebep olmaktadır. Bu yüzden doğru biyolojik ortamda doğru biyolojik bir hayvanın hareketinden esinlenilmelidir. Bu çalışmada mevcut su hayvanları incelenmiş ve hangi sucul robotların hangi biyolojik canlıdan esinlenerek yapıldığı araştırılmıştır. Sucul canlıları üç grupta incelenmiştir. (Salazar ve ark. 2018)

Bu biyolojik gruplar; boyut, hız, dayanıklılık ve tornalama yetenekleri aralığı arasından

seçim yapabilecek çok çeşitli seçenekler sunabilmektedir. Bu grupta bulunan dalgalanma hareketi ile yüzen balıktan esinlenerek sucul robotlar oluşturulmuştur. Bu tür canlıların kuyruk yüzgeci kullanarak daha hızlı yüzdükleri ve daha dayanıklı oldukları gözlemlenmiştir ve kuyruk bölgesinde yanal dalgalanmayı sınırlayan benzersiz kas-tendon mimarisine sahip oldukları için sert gövdeleri sayesinde dalgalı yüzmeye hareketi yapabilmektedirler. (Syme ve ark. 2011) Bu tür davranışı test ederek gözlemlenmek için Essex'de bir tane prototip üretilmiştir. 6 eklemi bulunmaktadır. Yani 6 adet R/C servo motor kullanılmıştır. Verimliliğini kontrol etmek için ise kontrol modülü balığa yerleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar iyi bir performans göstermiştir. (Liu ve ark. 2004)

Daha sonra bu 3D yüzmeye robotik balığı, yani MT1 (Mekanik Kuyruk) robotik balığı için yeni bir mekatronik tasarım sunulmuştur. Balık benzeri yüzmeye hareketi oluşturmak için sadece bir motor kullanan yeni bir kuyruk yapısına sahip yeni tasarım yapılmıştır. Bu tasarım, MT1'in ilk küçük boyutlu robotik balık olmasını sağlar (<0.5m uzunluğunda) ve suda 3 metreden daha derinlere dalabilmektedir. (Liu ve ark. 2005)

Aynı grupta yer alan ve dalgalanma ile yüzmeye yapan sucul hayvandan esinlenerek yapılan diğer bir robot ise titreşimli kuyruk tarafından üretilen statik itme, salınımlı Reynolds sayısı cinsinden ifade edilmiştir. Robotun gövde kabuğunda bir yük bölmesi ve bir motor bölmesi bulunmaktadır. Yük bölmesi, perde ve yuvarlanma stabilitesini artırmak ve uygun kaldırma kuvveti sağlamak için kontrol elektroniği, akü ve bir karşı ağırlık içermektedir. Yük bölmesi için su geçirmez bir sızdırmazlık sağlanmıştır ve kısmen motor bölmesini kaplayan robotun arkasına doğru uzanmaktadır. Robotu AÇMAK veya KAPATMAK için kapak uzantısında gizlenmiş bir açma / kapatma düğmesi bulunmaktadır. Motor bölmesinde, tahrik için kullanılan bir Traxxas 2065 su geçirmez servo motor bulunmaktadır. Bu şekilde tasarlanan robotun performansını ve manevra kabiliyetini araştırmak ve statik itme gücünü terminal hızıyla ilişkilendirmek için serbest yüzmeye deneyleri yapılmıştır. (Kopman ve ark. 2013) Kuyruk hareketi ile verimli hareket yapabildiği gözlemlenen sucul robotlarda eklemleri azaltma yöntemine gidilmiştir. Tek motorlu minyatür robotik balıklar üzerinde yapılan önceki çalışmalara dayanarak, temel olarak üç yönü vurgulanmaktadır; mekanik tasarım, hareket analizi ve hız kontrolü ile manevra kabiliyeti arasında bir dengeye ulaşmak için yapılan duruş kontrolüdür. Bu 3 parametre kontrol edildiğinde robot dikkat çekici şekilde hızlanmıştır. İleriye doğru

yüzmede 1,14 m / s (saniyede 3,07 gövde uzunluğuna karşılık gelir), normal dönüşlerde yaklaşık 90 ° / s dönüş hızına ve melez dönüşlerde yaklaşık 63.8 ° / s dönüş hızında ilerleyebilmektedir. (Yu ve ark. 2016)

Diğer bir grup ise yüzgeçleri ile titreşim oluşturarak yüzen sucul hayvanlardır. Yüzgeçleri ile oluşturdukları titreşim ile birlikte itme ve kararlık kontrol sağlayabilmektedirler. Hayvanlardan bazıları dalganın yönünü kontrol edebilir ve ileri ve geri yüzme kabiliyetleri veya sıfır hızda dönebilme özellikleri vardır. Tüm vücutlarına büyük esneklik kazandıran kıkırdaktan oluşmaktadırlar. Vücutları pulsu yapıya sahiptir. Göğüs yüzgeçleri, yüzme hızını arttırmak ve manevra yapmak için kısa dalgalı patlamalarda etkinleşir ve titreşim oluşturarak dalga yaratıp yüzebilmektedirler. (Rosenberger 2001) Bu tür sucul canlılardan esinlenerek oluşturulacak su altı robotunun gövdesi elektroaktif polimer aktüatörlerden biri olan iyonik polimer- metal kompozit (IPMC) olabilmektedir. Çünkü bu yapı su ile birlikte çalışabilmekte ve esnek forma sahiptir. 16 adet IPMC kanat ve elektrik devre kullanılarak su altında titreşim ile hareket eden sucul robot prototipi yapılmıştır. Kanat üzerinde moment üretmek için basit bir hareket eden dalga kontrol girişi bulunmaktadır. Deneyde, itme hızı çeşitli kontrol parametreleri altında ölçülebilmektedir. Böylece akışkan ortamdaki itme hızı araştırılmıştır. (Takagi ve ark 2006) Aynı canlı model üzerinden yola çıkılan diğer bir robotta ise alüminyum gövde kullanılmıştır. Dikey ve yatay kullanılan kuyruklar sayesinde robotun aşağı yukarı hareketi sağlanmıştır. Yanlardan bulunan yüzgeçlerin hareketi için 2 adet motor, sürücü ve derinliği anlayabilmek için basınç sensörü kullanılmıştır. Robotik balığın yüzme performansı, su derinliği 1.5 m olan bir yüzme havuzunda test edilmiştir. Deneyde, robotik balığın belirli bir hızda yüzmesini sağlamak için her iki göğüs yüzgecinde de aynı çırpma frekansı ve genliği ayarlanmıştır. Robo-Ray III titreşimle ilerleme hareketi gözlemlenmiştir. (Niu ve ark. 2012)

Son grup olarak da deniz anası benzeri hayvanlardan esinlenilmiştir. Bu tür hayvanlar suyun itme gücüyle hareket edebilmektedirler. Sinir halkaları zillerde bulunan nöronları uyarır ve uyarılma sonucunda kasların kasılması ve gevşemesi deniz anasında bulunan çanların hacminin daralması neden olmaktadır. Bu durumda su atarak hareket etmesini sağlamaktadır. (Katsuki ve ark. 2013) bir deniz anasının itme mekanizmasını ve fiziksel

görünümünü taklit eden bir sualtı aracının tasarımı, üretimi ve performansı üzerine bir analiz yapılmıştır. 0,05 mm kalınlığında ve 0,6 mm genişliğinde yay çelikleri kullanılmıştır. Her set fiziksel olarak paralel bağlanmış ancak 8 ayrı aktüatör elektriksel olarak seri bağlanmıştır. Tüm kabloları eşit bir akım dağıtıldığında çanın senkronize şekilde bir büzelme ve gevşeme sağladığı gözlenmiştir. Suda yeterli itme gücü üretebilmiş ve 17W enerji tüketimi sağlamıştır. (Villanueva ve ark. 2011) Aynı ilham ile yola çıkarak iyonik polimer metal kompozitleri kullanılarak yeni bir denizanası robotu tasarlanmış ve üretilmiştir. Esnek zili, merkezi bir göbeği ve aktüatörlerin elektrik bağlantılarının yapıldığı mekanik bir yapıya sahip olmaktadır. Ortalama hızı $1,5 \text{ mm s}^{-1}$ ortalama güç tüketimi ise 1,14 W. (Najem ve ark. 2012)

Robotların gelişiminde hayvanların biyolojik yapılarından ilham alındığı yapılan araştırmalarla tespit edilmiştir. Denemeler yapılmış ve birçok başarı elde edilmiştir. Çalışmasını yapmış olduğumuz ince metal filmin doğal titreşim davranışını kullanan, yılan ve balıkların sıvı içerisindeki ilerlemesine benzer bir hareket yapan mekanizmada nasıl hayvanların biyolojik yapısından ilham almışsa aynı şekilde konsol kirişlerin titreşimle göstermiş olduğu enerjide ilham kaynağı olmuştur.

Gün içerisinde titreşimin etkisine her alanda maruz kalmaktayız. Telefon ile konuşurken, müzik dinlerken, enstrüman aleti çalarken titreşimin etkilerini hissetmekteyizdir. Gitar çalarken gitar telinde yapmış olduğumuz her bir titreşim havada bulunan bir molekülü etkiler. Titreşen her bir molekül ses olarak meydana gelmektedir. Gün içinde her bir vücut hareketinin yapmış olduğu salınımda bir titreşim oluşturmaktadır.

Mühendislikte; üretilen parçalarda titreşim oluşması istenmemektedir. Çünkü üretilen parçada titreşimin oluşması meydana getirdiği dalgalanma gerilmesi ile yapıda yorulmaların oluşmasına sebep olabilmektedir. Oluşan mekanik yorulmalar hasara yol açabilir. Bu yüzden konsol kirişlerinde oluşan doğal titreşimin incelenmesi gerekmektedir. Birçok araştırmacı Euler- Bernoulli kiriş teorisini ve Timoshenko kiriş teorisini araştırmıştır. Araştırmacılar kirişin bir tarafında bir döner yay ile menteşelenmiş ve diğer tarafında bir öteleme yayının kısıtlayıcı etkisine maruz kalan bir kirişin serbest titreşimini araştırmıştır. (Maurizi ve ark. 1978) Kirişin üzerine yerleştirilmiş konsantre

bir kütleye sahip ve her iki ucunda dönmeye karşı elastik olarak kısıtlanmış bir kirişin titreşim problemi incelenmiştir. Laplace dönüşümleri kullanılarak çözülmüştür. Araştırmada kirişin üzerinde bulunan kütlelerin konumunun değiştirilmesi ile üretilen sistemin özfrekansları üzerindeki etkilerin neler olduğu sunulmuştur. (Goel 1976) Kare kesitli bir alüminyum konsol kirişinin serbest titreşimi, dört farklı sınır koşulu altında analitik ve sayısal olarak incelenmiştir. Analitik çözüm, Euler-Bernoulli ışın teorisi ve Newton Raphson Metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak hareket denklemleri verilmiştir. Daha sonra ilk üç modun doğal frekansları için geometrik özelliklerin ve sınır koşullarının etkilerini içeren çözümler elde edilmiştir. Bu makalede gerçekleştirilen titreşim analizinin güvenilirliğini de doğrulamak için, tüm analitik sonuçlar, ANSYS adı verilen sonlu eleman yöntemi (FEM) tabanlı yazılımdan elde edilen ilgili sayısal sonuçlarla kontrol edilmiştir. Sayısal ve analitik sonuçların iyi bir uyum olduğu görülmüştür. (Avcar ve ark. 2014)

Euler- Bernoulli teorisinin yanı sıra Timoshenko teorisi içinde araştırmalar yapılmıştır. Altı yaygın tipteki basit, sonlu kirişin eğilme titreşimleri için yeni frekans ve normal mod denklemleri sunulmuştur. Dönen atalet ve enine kesme deformasyonunun etkisini Timoshenko kiriş teorisi kullanılarak analitik çözümü yapılmıştır. (Huang 1961) Bir başka çalışmada ise, 'serbest uçta' sonlu bir kütle (M) taşıyan bir kirişin doğal frekanslarının ve model şekillerinin belirlenmesi ile ilgilidir. Farklı konsantre kütle oranları ile farklı titreşim parametrelerinde maksimum dinamik gerilimin değişimini analiz edilmiştir. (Laura ve ark 1974) Birden fazla konsantre kütle taşıyan bir kirişin özfrekans denklemini oluşturmak için yaygın olarak kullanılan iki yöntem, bu çalışmada araştırılmıştır. Aynı sistemde hem frekans determinantı yöntemleri hem de Laplace dönüşümü yöntemi incelenmiştir. (Low 2001) Son birkaç yıldır rotor sistemlerinin simülasyonu için sonlu elemanların kullanımı büyük ilgi görmüştür. Yayınlanan çalışmalar arasında dönel atalet, jiroskopik momentler, eksenel yük ve iç sönümlemenin etkileri incelenmiş fakat kesme deformasyonunu veya eksenel tork etkilerini dahil etmemiştir. Bu makale, şekil fonksiyonlarını oluşturmak için Timoshenko kiriş teorisini kullanmış böylece enine kesme etkilerini dahil ederek önceki çalışmaları genelleştirmiştir. Dönen ve dönmeyen şaftlar için klasik kapalı formda Timoshenko kiriş teorisi analizi ile sonlu eleman analizi ile yapılmış ve karşılaştırılmıştır. (Nelson 1980)

Dinamik yükler ile konsol kirişlerinde meydana gelen titreşimler Euler Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorileriyle birlikte araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Ancak malzemeye uygulanan belli yükler o parçada titreşim oluştururken bir yandan da yorulmalara sebep olmaktadır. Bu yorulmalar sonucunda malzemedeki çatlaklar gözlemlenebilir. Bu oluşan çatlaklar kirişin dinamik davranışını etkileyebilir. Bu yüzden birçok araştırmacı çatlak bulunan konsol kirişlerini araştırmıştır. Yorulmalar sonucunda kirişte meydana gelen çatlakların titreşimi etkileyerek dinamik davranışını değiştirdiği gözlemlenmiştir. (Andrew, 1996) Bir konsolda bulunan çatlak; eğilme davranışını bölgesel olarak değiştirmektedir. Çatlak nedeniyle kirişte bölgesel esneklik meydana gelmekte ve stres gerilimi değişmektedir. Bu değişim yapılan araştırma ile genelleştirilmiş ve kirişin çatlak bölümünün tam odak sertliği matrisi olduğu ifade edilmiştir. (Anifantis ve Dimaragonas, 1984). Araştırmacıların yapmış olduğu incelemeler neticesinde enine bir çatlak bulunan kirişte dinamik davranışın değiştiği bilimsel araştırmalar ile netleşmiştir. Böylelikle bir açık ve bir kapalı çatlak varsayımı yapılan bir kirişte sonlu elemanlı bir model tasarlanmıştır. Sistemde bulunan çatlakların konumu ve boyutunun titreşim üzerindeki etkisi sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. (Ostachowitz ve Krawczuk, 1990) . Ostachowitz ve ark. çalışmalarına devam ederek iki açık çatlak bulunan konsol kirişini incelemiş ve analiz yöntemi geliştirmişlerdir. (Ostachowitz ve Krawczuk, 1991).

Tek bir kenar çatlaklarına sahip düzgün bir Bernoulli-Euler kirişinin titreşim özellikleri, modifiye edilmiş bir yay modeli kullanılarak incelenmiştir. Çatlak kirişin serbest titreşimleri için yönetim matris denklemi, modifiye edilmiş hat-yay modeli ile birleştirilmiş temel standart kiriş elemanlarından oluşturulmuştur. (Yokoyama ve Chen 1998) Tek kenarlı veya çift kenarlı açık çatlaklara sahip Euler-Bernoulli kirişlerinin yanal titreşimi için ise sürekli çatlak kiriş titreşim teorisi geliştirilmiştir. (Chondros ve ark.1998) Bu geliştirilen yöntemler sayesinde matrislerin çözümleri kısaltılmış ve hesaplamalar kolaylaştırılmıştır. Açık kenar çatlaklarına sahip bir kirişin bükülme titreşimi için elde ettiğimiz hareket denklemleri ve sınır koşulları Hamilton prensibi uygulanarak geliştirilmiştir. Bu uygulamada Euler- Bernoulli kiriş teorisi kullanılmıştır. Bu kirişin doğal frekansları, Galerkin projeksiyon yöntemi ile birlikte yeni geliştirilen model kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda çatlak derinliği arttıkça kirişin

doğal frekanslarının azaldığı gözlemlenmiştir. (Behzad ve ark. 2005)

Enine çatlakları bulunan basit destekli sönümsüz konsol kirişi hareketli bir kütleyle maruz bırakıldığında dinamik davranışında meydana gelen gerilimlerin değişimlerini belirlemek için yinelemeli bir model analizi geliştirilmiştir. Çatlak varlığı daha yüksek sapmalara neden olur. Çatlak derinliği arttıkça çatlak etkileri daha belirgin hale gelir. Hareket eden kütleden kaynaklanan eylemsizlik kuvvetinin etkisi, genel olarak, niteliksel olarak benzerdir ve çatlağın etkisine katkı sağlar. Çatlak ve kütle keskin etkisi hızla, zamana, çatlak boyutuna, çatlak konumuna ve hareketli kütle seviyesine bağlıdır. (Mahmoud ve Abou Zaid 2002). Hareketli bir kütle bulunan çatlak konsol kirişinin araştırmasına ek olarak farklı yük ekstantriklikleri olan çatlak kiriş kolonlarının kırılma davranışı incelenmiştir. (Kishen ve ark. 2003) Bu çalışmalara ek olarak hareketli bir yükün etkisi altında bulunan çeşitli kiriş tiplerinin, farklı şartlar altındayken dinamik davranışları incelenmiştir. İncelenen kiriş tipleri; basit mesnetli kirişler, eğrisel konsol kirişler ve çatlak bulunan konsol kirişleridir. Tüm kirişlerinin dinamik davranışlarını etkileyen değişkenlerin sayısal değerleri modeller ile sunulmuştur. (Reis ve ark. 2009). 25 mm çapında ve 45 mm uzunluğunda 32 çatlaklı alüminyum mil 1,2,4,5 mm çatlak derinlikleri ile deneysel olarak test edilmiş ve kiriş üzerinde farklı konumlara uygulanmıştır. Konsol milindeki çatlağı simüle etmek için ANSYS- APDL (17.2) kullanan üç farklı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda çatlak derinliğini artırması frekans değerlerini etkilemiştir. Ancak küçük çatlak derinliğinde ise, çatlak konumunun frekans değerleri üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. (Saffar ve ark. 2020)

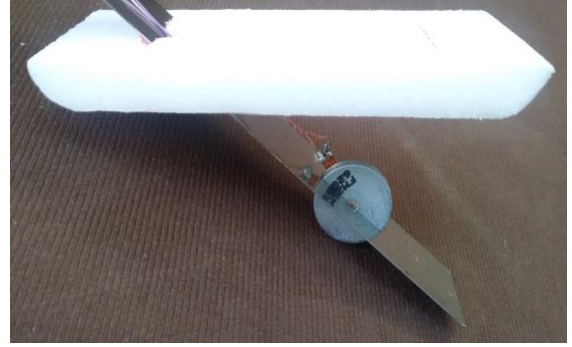
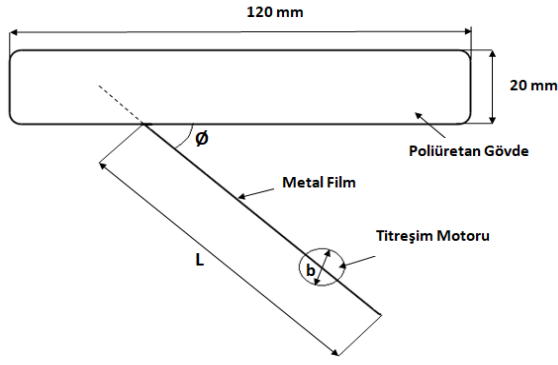
Yapılan çalışmalarda gördüğümüz üzere konsol kirişinin dinamik davranışını çatlakların derinliği, konumu ve mesnetlerin bağlanma şekli olarak incelenmiştir. Bu çalışmalara ek bulunduğu kirişin boyunun ve yönelim açısındaki değişiminin ve sarkacın dönüş yönünün dinamik davranışı nasıl etkileyeceği incelenmiştir. Kıl benzeri ayakları olan mikro amfibik robot tasarımı yapılmıştır.

3.MATERYAL VE YÖNTEM

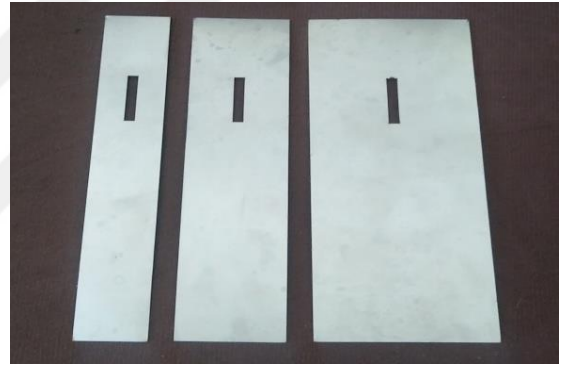
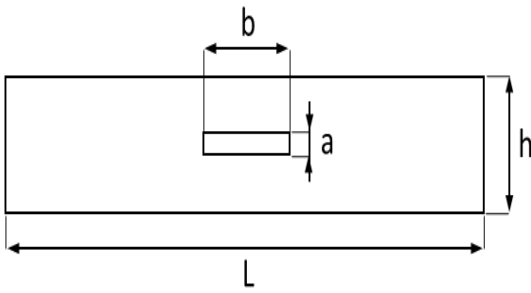
Bu bölümde basit bir mikro titreşim DC motoru tarafından suda ve karada titreşime zorlanan elastik hareketlere sahip bir ilerleme mekanizması tanıtılmaktadır. Bu bölümde yapılan 2 farklı robot prototipleri anlatılmıştır. Çalışmalara ilk olarak yılan ve balıklardan ilham alınarak başlanmış ve tasarımlar yapılmıştır. Deneyle incelendikten sonra yaşanan problemler ve elde edilen tecrübeler bizleri mikro canlıları incelemeye sevk etmiştir. Mikro canlılar ve böceklerden ilham alınarak yeni tasarım yapılmıştır. Yapılan kaynak araştırması neticesinde güneş paneline bir mikro titreşim motoru bağlayarak titreşim ile suda ve karada hareket eden bir amfibik robot tasarımına ait bir çalışma yapılmadığı gözlemlenmiştir. Mekanizmanın tasarım parametreleri, suda ve karada hızlı bir şekilde ilerlemesinde etkili olan tasarım değişkenleri ve rezonans frekansları anlatılmaktadır. Suda ve karadaki hareketini sağlayan sistem temelinde bir konsol kirişidir. Bu yüzden konsol kirişinde meydana gelen titreşim hareketleri diferansiyel denklemler ile kirişin elastik eğrisi kullanılarak gösterilmektedir.

3.1. Amfibik Mikro Robotun İlerleme Mekanizması

Amfibik mikro robotun ilerleme mekanizması aşağıdaki fotoğraflarda ve ilerleme mekanizmasının temel elemanlarının gösterildiği basit bir fiziksel model üzerinde Şekil 3.1 'de gösterilmektedir. Bu fiziksel model yardımıyla mekanizmanın 'mekanik yapısı', 'motor kontrolünün kavramsal modelleri' ve 'robotun temel ilerleme dinamiklerini' karakterize edebilmek için parametreler belirlenmiştir. Son nihai tasarımı elde etmeden önce yılan ve balıklardan esinlenerek bir mekanizma tasarlanmış ve elde edilen veriler neticesinde tasarımda değişikliğe gidilerek suda ve karada stabil bir hareket gerçekleştiren mikro robot tasarlanmıştır. İlk yapılan çalışmada dört tane parametreye odaklanılmıştır. Bunlar serbest titreşen kiriş eni, boyu, metal filmin sabitleme açısı titreşim frekansıdır. Mekanizma; basit bir 'mikro titreşim DC motoruna' sahiptir.



Şekil 3.1. İlerleme mekanizmasının basitleştirilmiş fiziksel modeli ve ilerleme mekanizmasının fotoğrafı



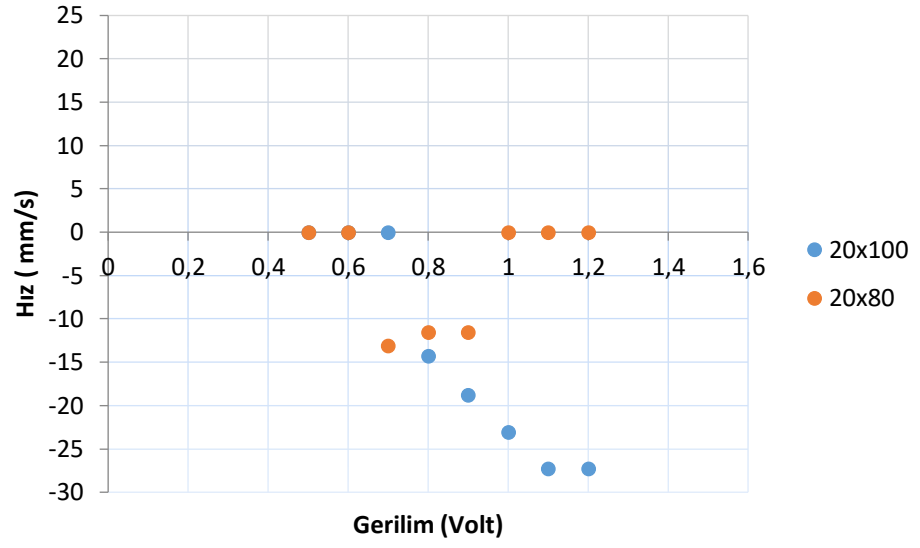
Şekil 3.2. Metal filmin boyutları ve metal film örnekleri

Çizelge 3.1. Mekanizma ön modelinin boyutları

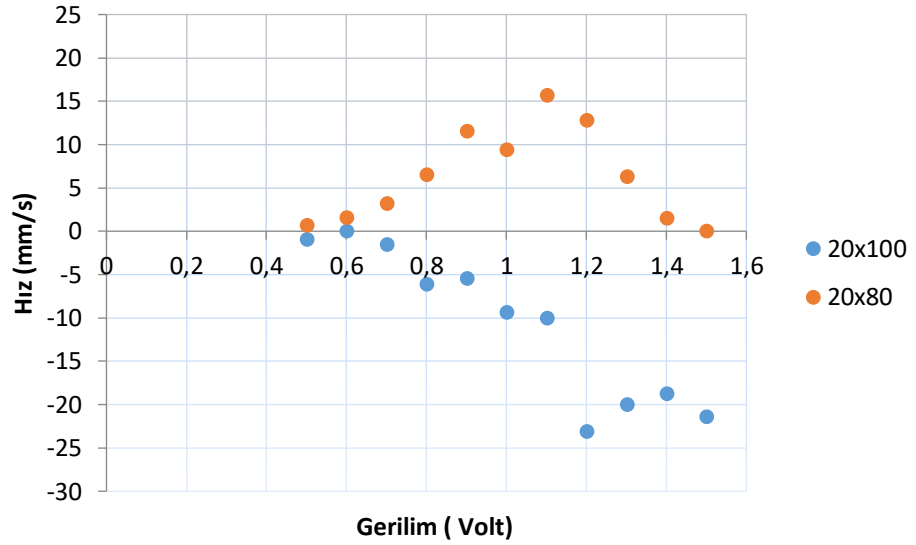
Değişken	Açıklama	Boyut
m_{motor}	Mikro motorun kütlesi	3 gr
a	Motor yuva genişliği	3.3 mm
b	Motor yuva çapı	18 mm
$h_{1,2,3,4}$	Metal film genişliği	20-30-40-50 mm
$L_{1,2}$	Metal film uzunluğu	100-80 mm
$\theta_{1,2,3,4}$	Metal filmin yerleştiği yuva açısı	15° - 30° - 45° - 60°

Şekil 3.2’de gösterilen metal film ‘poliüretan köpükten’ yapılmış gövdeye Şekil 3.1’de gösterildiği şekilde bağlanmıştır. Çizelge 3.1 ‘de Şekil 3.1 ve Şekil 3.2 ‘de gösterilen mekanizmanın boyutları anlatılmıştır. Mekanizmanın sabit ve değişken olan tüm değerleri gösterilmiştir. Çizelge 3.1 ‘de görüldüğü üzere motor kütlesi, genişliği ve çapı sabittir. Metal filmin boyutları değişken faktör olarak alınmıştır. Çelik metal film, düşük yoğunluklu ‘poliüretan köpükten’ yapılmış gövdelere $\theta = 15^\circ - 30^\circ - 45^\circ - 60^\circ$ açı yapar vaziyette sabitlenmiştir. Bunun için poliüretan gövdeler üzerine $15^\circ - 30^\circ - 45^\circ - 60^\circ$ derece açı ile yarıklar açılmış ve bu yarıklara yerleştirilecek 0,05 mm kalınlıkta, farklı genişlik ve uzunluğa sahip paslanmaz çelik filmler hazırlanmıştır. Sacın ortasında motor için bir yuva oluşturulmuştur. Şekil 3.2’de gösterilen yuvaya oturan bu titreşim motorunun çapı: $b = 18$ mm ve motor kalınlığı $a = 3,3$ mm ‘dir. Bu yuva sacın tam ortasına konumlandırılmıştır. Zira orta noktadan kaçık bir konum, robotun hareket yönünü etkileyecektir. İlerleme mekanizmasının temel elemanı olan 0,05 mm kalınlığa sahip metal film (paslanmaz çelik sac), balıkların kuyruk çırparak oluşturdukları itme kuvvetlerini meydana getirmesi için tasarlanmıştır. Sacın titreşimini üzerinde bulunan mikro titreşim motoru sağlamaktadır. Şekil 3.2’de gösterdiği şekilde Poliüretan köpük üzerine metal sac genişliği $h_{1,2,3,3,4} = 20 - 30 - 40 - 50$ (mm) ve uzunluk değerleri $L_{1,2} = 100 - 80$ mm olan saclar üzerlerinde konumlandırılmış titreşim motorları ile birlikte $15^\circ - 30^\circ - 45^\circ - 60^\circ$ derecelik açılar ile poliüretan köpük üzerine yerleştirilmiştir.

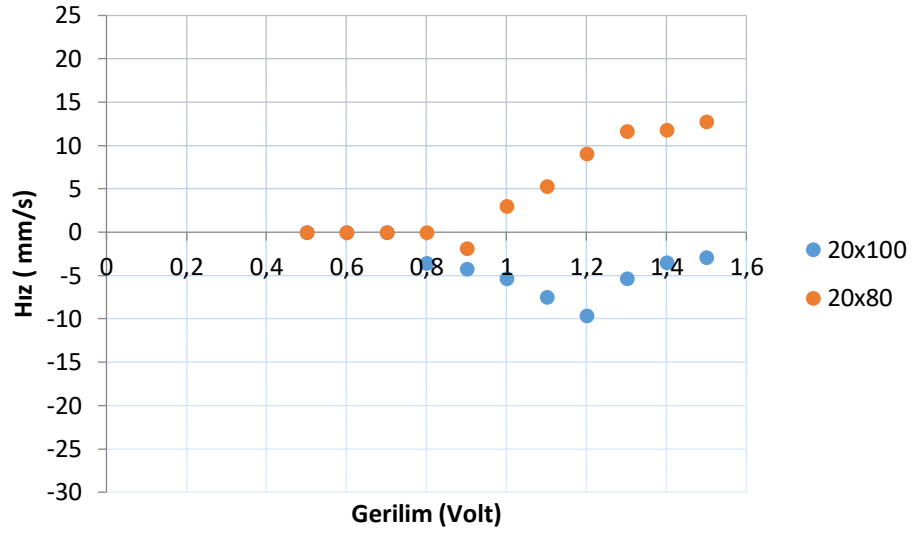
Bu çalışmada metal filmin boyutlarının ve açının ilerlemeye etkisine odaklandığı için tüm deneylerde motor yuvası sabit olarak belirlenmiştir. Titreşim motorunun frekans kontrolü dijital bir güç kaynağı kullanılarak gerilim değiştirilerek kontrol edilmekte ve her bir deney için gerilim ve ortalama akım değerleri not edilmektedir. Bu sayede motor gerilimi ve çekilen akım değerleri ile ilerleme mekanizmasının enerji tüketim değerleri hesap edilebilmektedir. Robotun, su dolu akvaryum içerisinde hızlı kamera ile 30 cm yolu kaç saniyede aldığı kayıt altına alınmıştır. DC motor gerilimi 0,1 Volt adımlarla arttırılarak ölçümler yapılmıştır. (0,5 Volt-1,5 Volt) Böylelikle hangi genişlik ve uzunlukta, hangi gerilim değerinde ve hangi açıda daha hızlı hareket ettiğini gözlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.



Şekil 3.3. 20 mm en, 100 mm ve 80 mm uzunluğa sahip metal filmler için gerilim (Volt) - ilerleme hızı (mm/s) eğrileri 15 derece açı



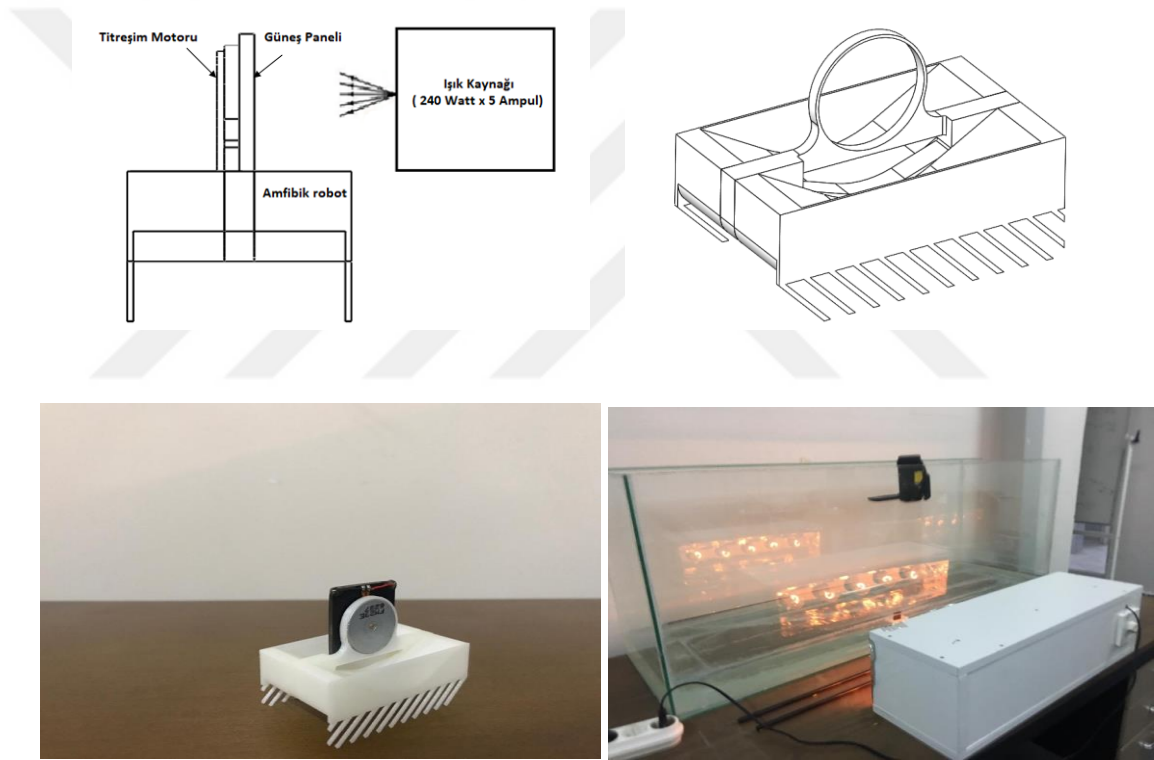
Şekil 3.4. 20 mm en, 100 mm ve 80 mm uzunluğa sahip metal filmler için gerilim (Volt) - ilerleme hızı (mm/s) eğrileri 45 derece açı



Şekil 3.5. 20 mm en, 100 mm ve 80 mm uzunluğa sahip metal filmler için gerilim (Volt) - ilerleme hızı (mm/s) eğrileri 60 derece açı

Gösterilmiş olan grafikler suda hareket eden robotun optimum hareket gösterdiği boyutlardır. Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5 grafikleri incelendiğinde deney sırasında kablolardan dolayı oluşan verimsizlikler gözlemlenmiş ayrıca motorun suda olmasından kaynaklı motor çalışmasında bozulmalar meydana geldiği ilerleme hızlarından anlaşılmaktadır. Yapılan çalışmalarda robotun küçük boyutlarından dolayı deneyler esnasında elektrik enerjisinin titreşim motoruna iletilmesi ciddi bir sorun teşkil etmekte ve deneyleri oldukça zorlaştırdığı tespit edilmiştir. Çok ince kablolar kullanıldığında bile oluşan gerilmeler ve kablo yükleri robotun hareketini etkilemektedir. Bunun yanında çok ince kablolar kullanıldığı için kablolardaki enerji kayıpları da dikkate alınmalıdır. Yapılan çalışmalar sonucunda ilerleme mekanizmasının belli gerilimlerde zıt yönlerde hareket ettiği gözlemlenmişti. Bu durumun titreşim sonucu su içerisinde oluşan girdaplardan kaynaklandığı düşünülse de motorun direk olarak su ile temas da bulunması ve belli bir süre sonra stabil çalışmasında bozukluklar meydana getirdiği tespit edilmiştir. Ek olarak ince metal filmlerin deforme olması sonucunda ilerleme hareketlerinde yavaşlamalar veya zıt yönde hareket etme eğilimi meydana gelmiştir. Elde ettiğimiz bu parametreler neticesinde tasarım değişikliğine gidilmiştir ve kabloları ve güç kaynağının meydana getirdiği olumsuzlukları önlemek içinde titreşim motoru üzerine 22x24x3 mm ölçülerinde güneş paneli yerleştirilmiştir. Böylelikle titreşim motoru bir güneş paneli

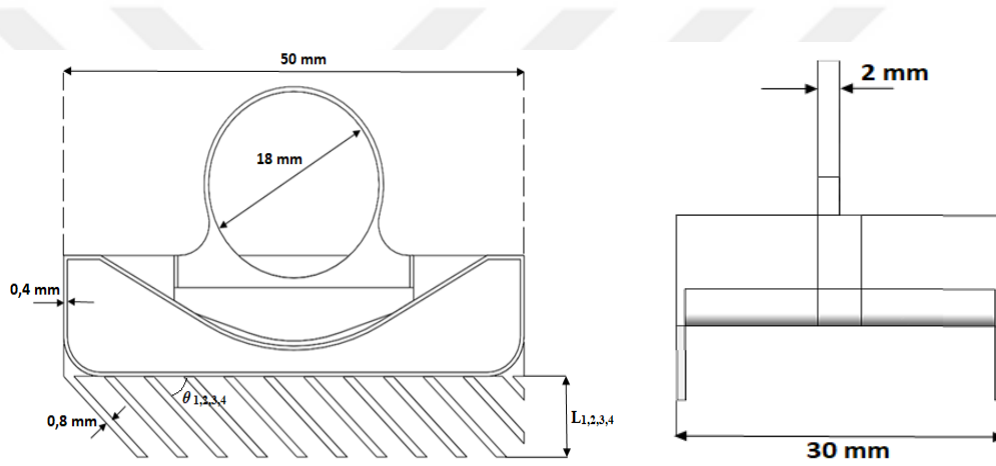
yardımıyla beslenmektedir. Titreşim motorunu ve güneş paneli daha önceki deneyimlere dayanarak robotun tam ağırlık merkezine sabitlenmiştir. İnce metal filmlerin deforme olmasını önlemek ve stabil hareketi sağlayabilmek için PLA malzemedен üretilmiş olan 30x50x0,4 mm boyutlarında bir mikro robot tasarlanmıştır. Robotun olabildiğince hafif olmasına dikkat edilmiştir. Bu robot üzerindeki değişken parametrelerimiz ince kıl ayaklarının açısı, boyutları olmuştur. Diğer değişken parametremiz ise titreşim motorunun güneş paneline olan bağlantı şekli olmuştur. Titreşim motoru robotun ağırlık merkezinde sarkaç görevi görmektedir. Sarkaçın dönüş yönü değiştirildikçe robotun hareket ettiği yönün ne şekilde değiştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.6. İlerleme mekanizmasının basitleştirilmiş fiziksel modeli ve ilerleme mekanizmasının fotoğrafı

Yüzme deneyleri bir akvaryum içerisinde yapılmıştır. Şekil 3.6’de görüldüğü üzere deney düzeneğinde ilerleme robotu, akvaryum, ışık kaynağı ve kamera bulunmaktadır. Akvaryum boyutları 150 x 70 cm olup ve deneyler kamera ile kayıt altına alınmıştır. İlerleme hızlarının değerleri ise kamera kayıtlarından elde edilmiştir. Deney 16 farklı

robot ile yapılmıştır. Robotlar 3D yazıcı kullanılarak PLA malzemesi ile üretilmiştir. Su üzerinde bulunacağı için gövde içi boş şekilde tasarlanmıştır. Motor ve güneş paneli ise gövdenin tam merkezinde olması gerektiği için motor yuvasında 2 mm hareket payı bırakılarak motorun tam ağırlık merkezine yerleştirilmesi sağlanmıştır. Robotların sağ ve sol kısmında bulunan ayaklarının açıları ve boyları değişken tutulmuştur. Motor yuvasının ölçüsü sabit kabul edilmiştir. Robotu hareket ettirebilmek için ışık şiddetini ayarlayabileceğimiz 240 Watt ampullerden oluşan bir deney düzeneği yapılmıştır. Deney düzeneğine dimmer bağlanarak ayar mekanizması oluşturulmuştur. Böylelikle robotun farklı ayak açılarında ve boylarında nasıl bir ilerleme gösterdiğini gözlemlenmiştir.



Şekil 3.7. Amfibik robotun boyutları

Şekil 3.7’de gösterildiği üzere robotun ayaklarının gövdeye $\theta = 30^\circ - 45^\circ - 60^\circ - 90^\circ$ yapar vaziyette 4 farklı grupta tasarlanmıştır. Bu grupların kendi içinde ayak boyları $L=4, 6, 8, 10$ mm olarak değiştirilmiştir. Robotu hareket ettirebilmek için ışık şiddetini ayarlayabileceğimiz 240 Watt ampullerden oluşan bir deney düzeneği yapılmıştır. Deney düzeneğine dimmer bağlanarak ayar mekanizması oluşturulmuştur. Böylelikle robotun farklı ayak açılarında ve boylarında nasıl bir ilerleme gösterdiğini gözlemlenmiştir. Şekil 3.7 ve 3.8 ‘de gösterilen yuvaya oturan bu titreşim motorunun çapı: $b = 18$ mm ve motor kalınlığı $a = 3,3$ mm ‘dir. Bu yuva gövdenin tam ortasına konumlandırılmıştır. Zira orta noktadan kaçık bir konum, robotun hareket yönünü etkileyecektir. Güneş panelinin olduğu tarafa doğru yatma eğiliminde olacaktır. Bu durumda ilerleme hareketinde

yavaşlamaya sebep verecektir. İlerleme mekanizmasının temel elemanı olan 0,4 mm kalınlığa sahip PLA malzemeden içi boş şekilde üretilmiş olan robottun iki yanında bulunan ayaklarıdır. Mikro canlıların ve böceklerin ayak yapıları incelenmiş olup ayakları ile oluşturdukları itme kuvvetlerini meydana getirmesi için ince kıl benzeri ayaklar tasarlanmıştır. Gövdenin titreşimini üzerinde bulunan mikro titreşim motoru sağlamaktadır. Motorun titreşimini de üzerinde bulunan güneş paneli sağlamaktadır.

Bu çalışmada gövde üzerinde bulunan ayakların boyutlarının ve açının ilerlemeye etkisine odaklandığı için tüm deneylerde motor yuvası sabit olarak belirlenmiştir. Titreşim motorunun frekans kontrolü 240 Watt ampullerden oluşturulmuş bir ışık kaynağı kullanılarak ayarlanmaktadır. Işık kaynağının üzerinde 1 adet dimmer ve 5 adet ampul bulunmaktadır. Dimmer yardımı ile ışık şiddeti değiştirilerek her bir deney için gerilim ve ortalama akım değerleri not edilmektedir. Bu sayede motor gerilimi ve çekilen akım değerleri ile ilerleme mekanizmasının enerji tüketim değerleri hesap edilebilmektedir. Robotun, su dolu akvaryum içerisinde hızlı kamera ile 30 cm yolu kaç saniyede aldığı kayıt altına alınmıştır. Böylelikle hangi açı ve uzunlukta, hangi gerilim değerinde daha hızlı hareket ettiğini gözlenmiştir.

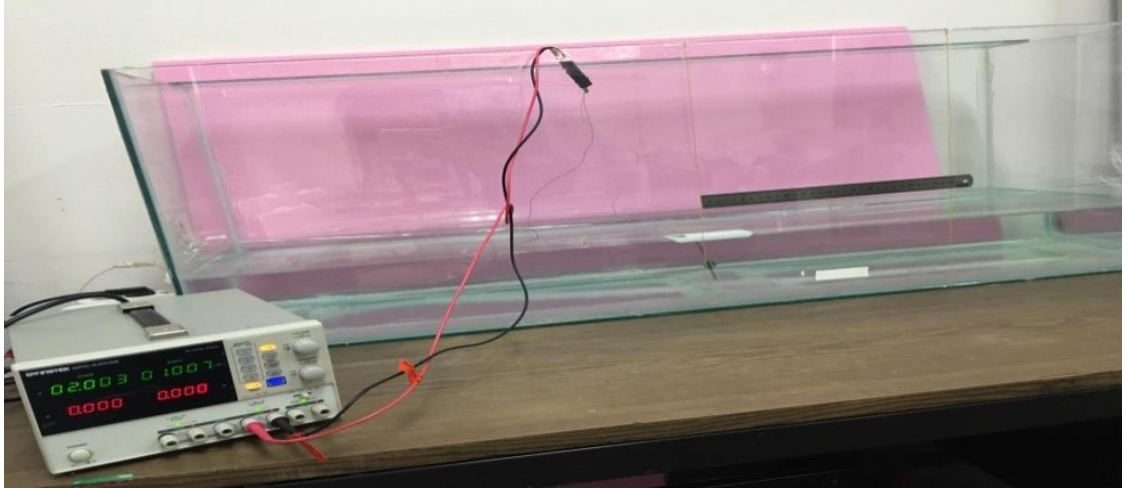
Çizelge 3.2. Nihai mekanizmanın ön modelinin boyutları

Değişken	Açıklama	Boyut
m_{motor}	Mikro motorun kütlesi	3 gr
a	Motor yuva genişliği	3.3 mm
b	Motor yuva çapı	18 mm
e	Güneş panel genişliği	22 mm
d	Güneş panelin uzunluğu	24 mm
k	Güneş panelin et kalınlığı	2 mm
$L_{1,2,3,4}$	Ayakların uzunluğu	4-6-8-10 mm
$\theta_{1,2,3,4}$	Ayakların gövdeye yaptığı açı	30° - 45° - 60° - 90°
H	Robotun uzunluğu	50 mm
S	Robotun genişliği	30 mm

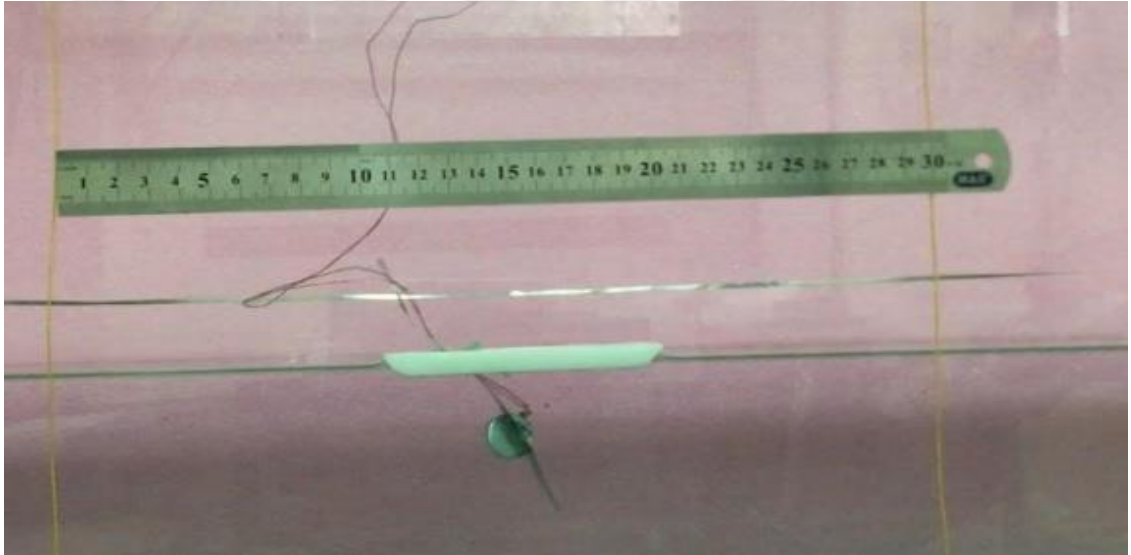
Çizelge 3.2 'de belirtilen değişkenler şekil 3.8 'de belirtilen amfibik mikro model üzerinde gösterilmiştir. Bu modeller sayesinde amfibik mikro modelin suyun içerisindeki dinamik davranışını ortaya koyan diferansiyel denklemlerin nasıl çözüleceği incelenmiştir. Temel tasarım değişkenleri ve etkilerinin neler olduğu belirlenmiştir. Belirlenen değişkenler neticesinde hareket denklemlerini çözebilmek için euler- bernoulli kiriş teorisi araştırılmıştır. Yaptığımız araştırmada Murat Reis'in hareketli yüklerin etkisi altındaki kirişlerin dinamik davranışlarını incelediği ve analizlerinde Euler-Bernoulli kiriş teorisini kullandığı gözlemlenmiştir. Farklı tip ve şartlardaki kirişlerin serbest titreşimleri tespit edilmiş ardından dikey kolonlarla desteklenen düz kirişlerin, eğrisel kirişlerin ve çatlak ihtiva eden kirişlerin hareketli yüklerin etkisi altındaki titreşimleri tespit edilmiştir. (Murat Reis, 2009) Bu çalışmada yapılan hareket denklemlerin çözümleri bizim amfibik robotumuza rehber olmuştur.

3.2. Deneysel Düzenek ve Deneyin Yapılışı

Hazırlanan iki deney düzeneği de Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde, Makine Mühendisliği Mekanik Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Deney düzeneklerinin Şekilleri 3.9 ve 3.9'de gösterilmiştir. İlk hazırlanan deney düzeneğinde poliüretan köpüğe balık hareketini anımsatan metal film farklı açı, uzunluk ve genişliklerde yerleştirilerek oluşturulan sucul bir robot bulunmaktadır. Şekil 3.9' de suyun içerisindeki robotun fotoğrafı gösterilmiştir. Bu sucul robot 150 mm uzunluğunda 70 mm genişliğinde bir akvaryumda yüzdürülmüş ve ölçümler kayıt altına alınmıştır. Robotun üzerinde bir mikro DC motor bulunmaktadır. 18 mm çapında 3,3 mm et kalınlığındadır. Bu DC motor sayesinde metal film titremekte ve robot ilerleme göstermektedir. DC motoru beslemesi ve uygulanan gerilim, akım değerlerini göstermesi için de 'Gw instek GPD- 3303S' model DC güç kaynağı kullanılmıştır. Ölçümlerin belli bir mesafede yapılması için 30 cm uzunluğunda bir cetvel akvaryum üzerine konumlandırılmıştır. Tüm bu ölçüm basamakları yüksek çözünürlüklü 'Canon EOS M50' model hızlı kamera ile kayıt altına alınmıştır.



Şekil 3.8. Deney düzeneği



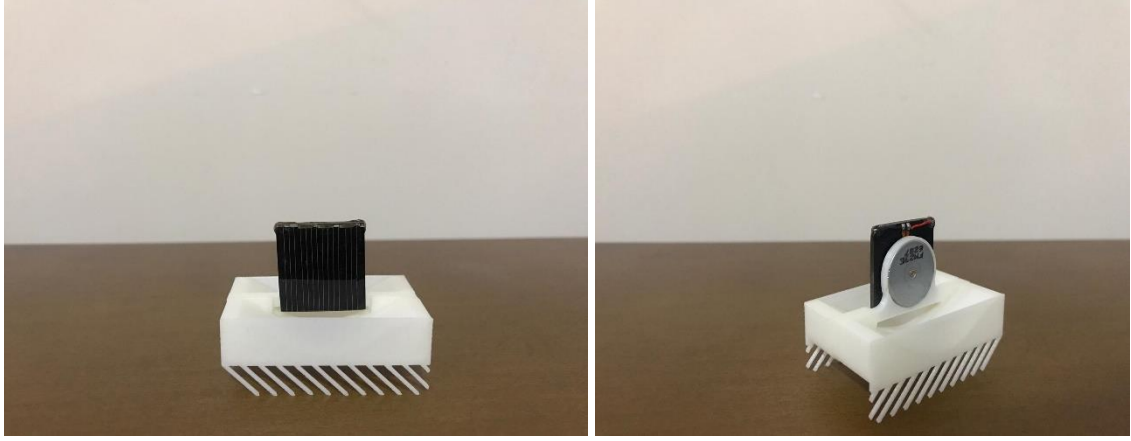
Şekil 3.9. Su içerisindeki robot

Robotun su üzerindeki ileriye doğru hareket etmesi test edilmiştir ve kamera tarafından kayıt altına alınmıştır. Mikro DC motoru besleyen güç kaynağında gerilim değerini 0,5V ile 1,5V arasında her bir 30 cm'lik yol sonunda 0,1 V olarak arttırılarak gerilimin robotun ilerleme hızını nasıl etkilediği gözlenmiştir. Gözlemler sonucunda mikro robotun tasarımında değişikliği gidilmiştir. Güç kaynağını ve kabloları mekanik yapıdan çıkarılmıştır.

Deney düzeneğinde 3D yazıcı tarafından PLA malzemeden üretilmiş 30x50x0,4 mm ölçülerinde bir robot farklı ayak boyları ve açılarında ağırlık merkezine mikro motor ve güneş paneli yerleştirilerek oluşturulan amfibik mikro bir robot bulunmaktadır. Şekil 3.10 'de suyun içerisindeki robotun fotoğrafı şekil 3.11'de ise robotun karadaki konumu gösterilmiştir. Bu sucul robot 150 mm uzunluğunda 70 mm genişliğinde bir akvaryumda yüzdürülmüş ve ölçümler kayıt altına alınmıştır. Robotun üzerinde bir mikro DC motor bulunmaktadır. 18 mm çapında 3,3 mm et kalınlığındadır. Bu DC motor sayesinde ayaklar titremekte ve robot ilerleme göstermektedir. DC motoru üzerine bağlanan bir güneş paneli tarafından beslenmektedir. ve güneş paneline enerjiyi ise 240 watt ampüllerden hazırlanmış üzerinde dimmer bulunan bir ışık kaynağı sağlamaktadır. Işık kaynağının yansımaları arttırmak için ampüllerin bulunduğu yüzeye alüminyum folyo sarılmıştır. Ölçümlerin belli bir mesafede yapılması için 30 cm uzunluğunda bir cetvel akvaryum üzerinde bulunmaktadır. Tüm bu ölçüm basamakları yüksek çözünürlüklü 'Canon EOS M50' model kamera ile kayıt altına alınmıştır.



Şekil 3.10. Deney düzeneği



Şekil 3.11. Mikro Amfibik Robot

Robotun suda ve karada ileriye doğru hareket etmesi test edilmiştir ve kamera tarafından kayıt altına alınmıştır. Mikro DC motoru besleyen ışık kaynağında ışık şiddetini her bir 30 cm'lik yol sonunda ayarlayarak zıplama frekansının robotun ilerleme hızını nasıl etkilediği gözlenmiştir. Deneyler yapılırken motorun güneş paneline bağlanma yönünün robotun hareket yönünü nasıl etkilediği incelenmiştir.

Her gerilim (V) değerinde sucul robot üzerinde bulunan DC motorun ne kadar akım (I) çektiği kayıt edilerek, ilerleme esnasında tükettiği P güç değeri tespit edilebilir.

$$P = I \cdot V \quad (3.24)$$

Amfibik mikro robot üzerinde bulunan güneş paneli ve titreşim motorunun akım ve gerilim değerleri ölçülmüştür. Deneyler hem karada hem de suda yapıldığı için akım ve gerilim değerleri her iki ortamda da ölçülmüştür. Panelin sudaki akım değeri 17 mA, karadaki akım değeri 12 mA'dır. Panelin sudaki gerilim değeri 1,25 V, karadaki gerilim değeri ise 1,5 V'dur. Panelin sudaki güç değeri 21,25 W, karadaki güç değeri ise 18 W'dır.

Amfibik robot akvaryum üzerinde konumlandırılmış 30 cm uzunluğundaki cetvel arasında hareket etmektedir. Kamera ile kayıt altına alınan ilerleme hareketi ile 30 cm'

lik yolu ne kadar sürede aldığı belirlenerek robotun ilerleme hızı hesaplanmıştır. Robotun 30 cm'lik yolu t süresi boyunca v ortalama hızı;

$$v = \frac{x}{t} \quad (3.25)$$

Yapılan deneyde en önemli amaç düşük maliyet ve düşük enerji tüketimi ile sucul robot oluşturmaktır. Bu yüzden P/v robotun birim yer değiştirme de harcadığı enerji miktarının hesaplanmasını sağlamaktadır. Yukarıdaki denklemler sayesinde amfibik mikro robotun ilerleme hızı belirlenmiştir. İlerleme hızlarına göre grafikler oluşturulmuştur. Grafikler bölüm 4'de bulgular ve tartışmalar kısmında gösterilmiştir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

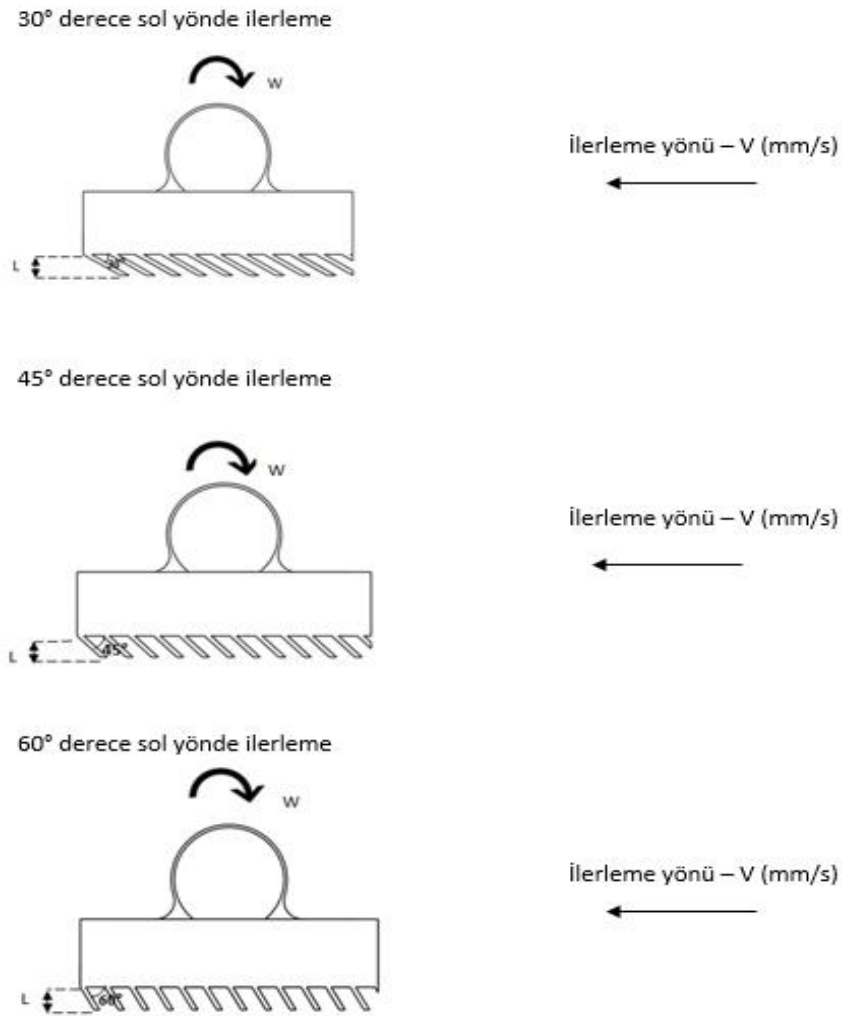
Ölçümlerde hem suda hem de karada ilerleyebilen bir mekanizma kullanılmıştır. Mekanizma Bölüm 3.1 'de detaylı olarak tanıtılmıştır. Mekanizmada farklı boy ve açılarda ayakları olan PLA malzemeden üretilmiş içi boş 16 farklı robot kullanılmıştır. İçi boş tasarlanmış olarak olabildiğince hafif üretilmiştir. Su üzerinde hızlı hareket edebilmesi için hafif bir mekanizma oluşturmak önemli bir kriterdi. Ayaklarının ince kıl şeklinde olması titreşim motoru sayesinde titreterek ilerleme gösteriyordu. Ayakların elastik yapısı periyodik bir hareket için temel kriterdir. Hayvanların ve insanların uzuvları elastik bir yapıdadır. Bu elastik yapılarını istedikleri sertlikte ayarlayabilir ve enerjilerini koruyabilmektedirler. Bu hareket sistemini en iyi kangurular yapabilmektedir. Elastik yapıları sayesinde enerjilerini %70 kadar koruyabilmektedirler.

İlerlemek, yürümek, yüzmek ve koşmak bunlar hep periyodik hareketlerdir. Yapmış olduğumuz ilerleme mekanizması titreşim ile hareket etmektedir. Titreşimde periyodik hareketlerin başında gelmektedir.

Titreşimi ve elastik uzvu birlikte bulunduran mekanizmalar enerji verimliliği iyi ölçüde sağlayabilmektedir. Ancak elastik elemanlı bir sistem yapınca titreşimi çok iyi kontrol edebilmek gerekir. Çünkü titreşimin frekansı ile ilerlemenin frekansı, koşma ve yürümenin frekansının birbiriyle örtüşmesi gerekmektedir. Örtüşmez ise verimsizlik meydana gelir. İlerlemenin meydana gelebilmesi için titreşim ile elastik uzuvların senkronize olarak çok iyi çalışabilmesi gerekmektedir.

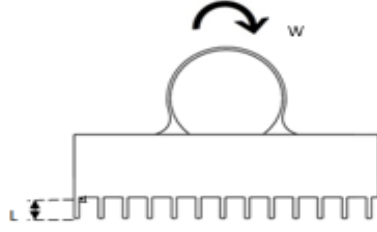
0,4 mm et kalınlığına sahip olan içi boş olarak üretilmiş olan mikro robot üzerinde bulunan güneş paneli ve titreşim motoru sayesinde rahatça titreşerek elastik bir hareket gösterip senkronize şekilde ilerleme gösterebilmektedir. Bu hareket için ayaklar ince kıl şeklinde tasarlanmıştır. Bu ayaklar farklı açılarda ve boylarda tasarlanmıştır. Yapılan deneyler ile en iyi ilerleme reaksiyonu gösteren mekanizma tespit edilmiştir. Mikro DC titreşim motoru güneş paneli ile birlikte robotun ağırlık merkezine yerleştirilmiştir. Herhangi bir merkez kaçıklığını önlemek için ise robot üzerinde 2 mm boşaltma bırakılarak motor için mekanik parça üzerinde ayar sistemi oluşturulmuştur. Suda ve karada hareket ederken motoru besleyen güç kaynağı bir ışık sistemi olmuştur. Dimmer

yardımı ile ışık şiddeti ayarlanarak motorun devri rahatça ayarlanmıştır. Işığın yansımalarını arttırmak için düzeneğe alüminyum folyo sarılmıştır. Kamera ile kayıt altına alınan her ölçümde ise mekanizmanın 30 cm' lik yolu ne kadar sürede aldığı tespit edilmiş ve hangi açıda ve hangi boyda ne kadar hızda ilerleyebildiği hesaplanmıştır. Motorun güneş paneline olan bağlantısı ters çevrilerek tüm deneyler baştan yapılmıştır. Böylelikle sarkaçın dönüş yönünün robotun hareketine etkisi incelenmiştir. Yapılan deneylerin grafikleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.1. Mikro Amfibik Robotun Sol Yönde İlerlemesi (30°-45°-60° derece)

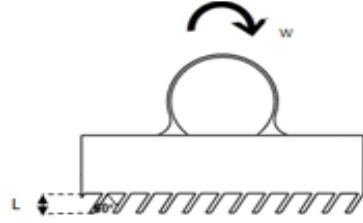
90° derece sol yönde ilerleme



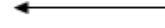
İlerleme yönü – V (mm/s)



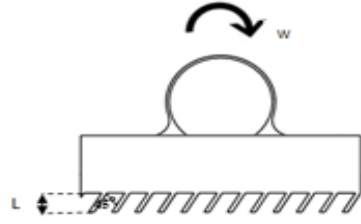
120° derece sol yönde ilerleme



İlerleme yönü – V (mm/s)



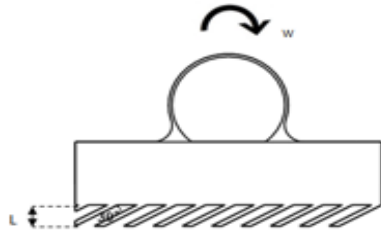
135° derece sol yönde ilerleme



İlerleme yönü – V (mm/s)



150° derece sol yönde ilerleme

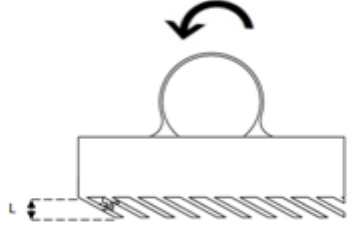


İlerleme yönü – V (mm/s)



Şekil 4.2. Mikro Amfibik Robotun Sol Yönde İlerlemesi (90°-120°-135°-150° derece)

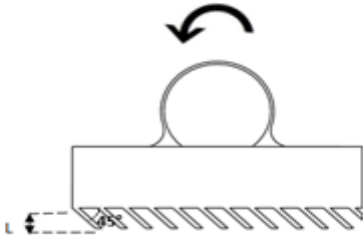
30° derece sağ yönde ilerleme



İlerleme yönü – V (mm/s)



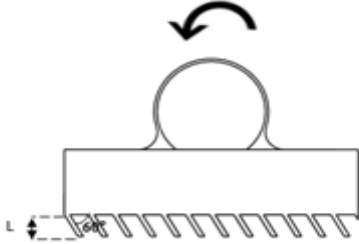
45° derece sağ yönde ilerleme



İlerleme yönü – V (mm/s)



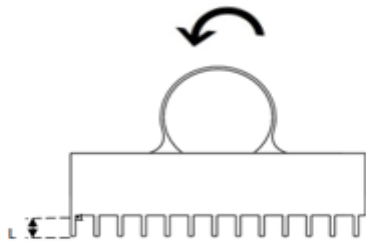
60° derece sağ yönde ilerleme



İlerleme yönü – V (mm/s)



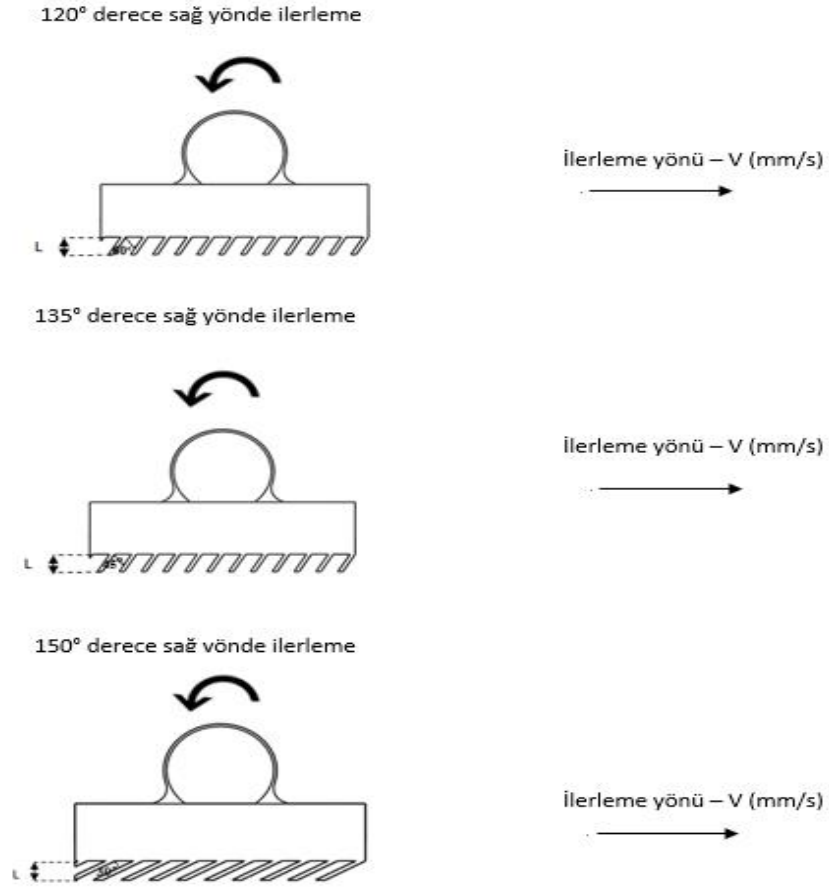
90° derece sağ yönde ilerleme



İlerleme yönü – V (mm/s)



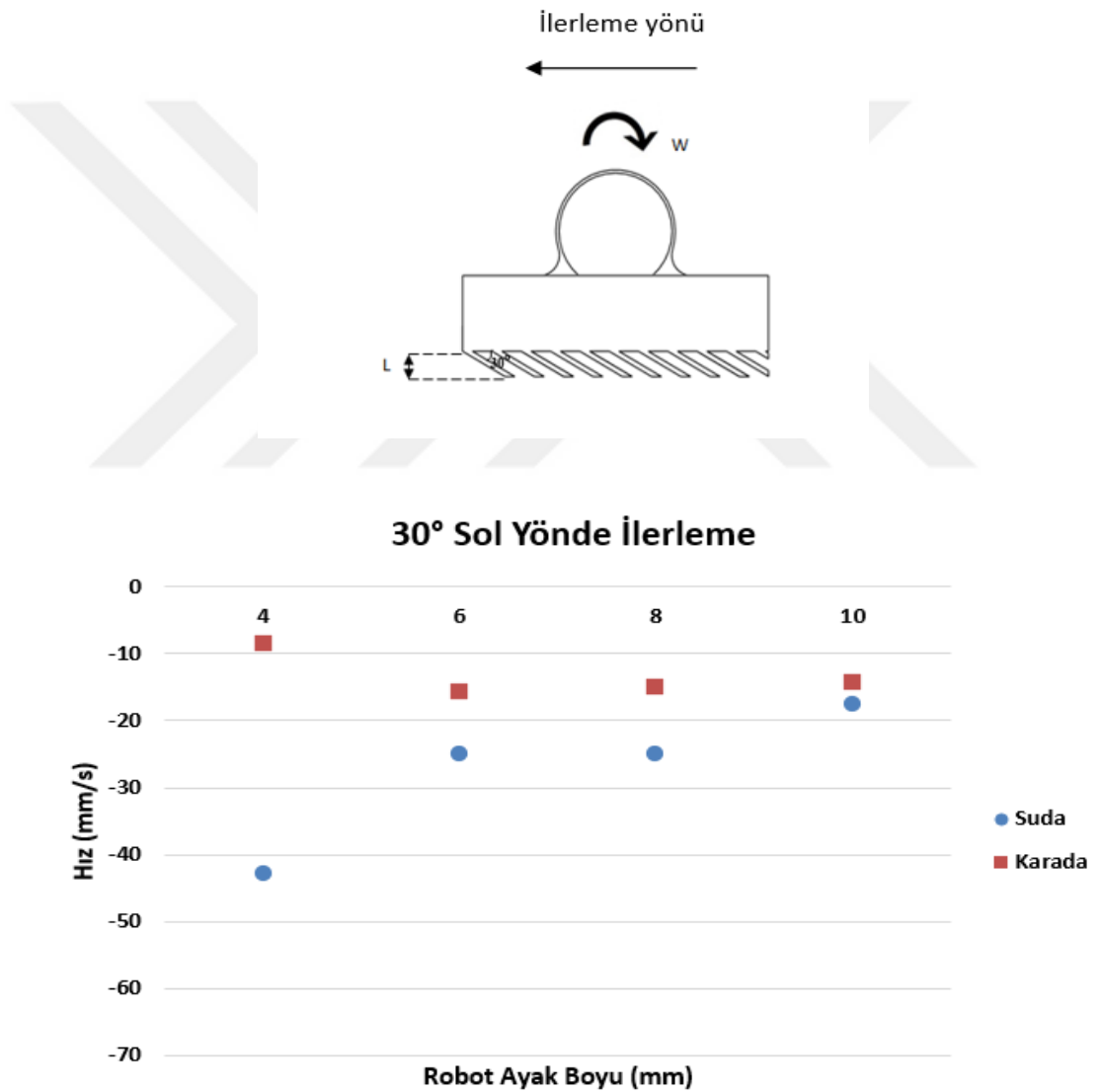
Şekil 4.3. Mikro Amfibik Robotun Sol Yönde İlerlemesi (30°-45°-60°-90° derece)



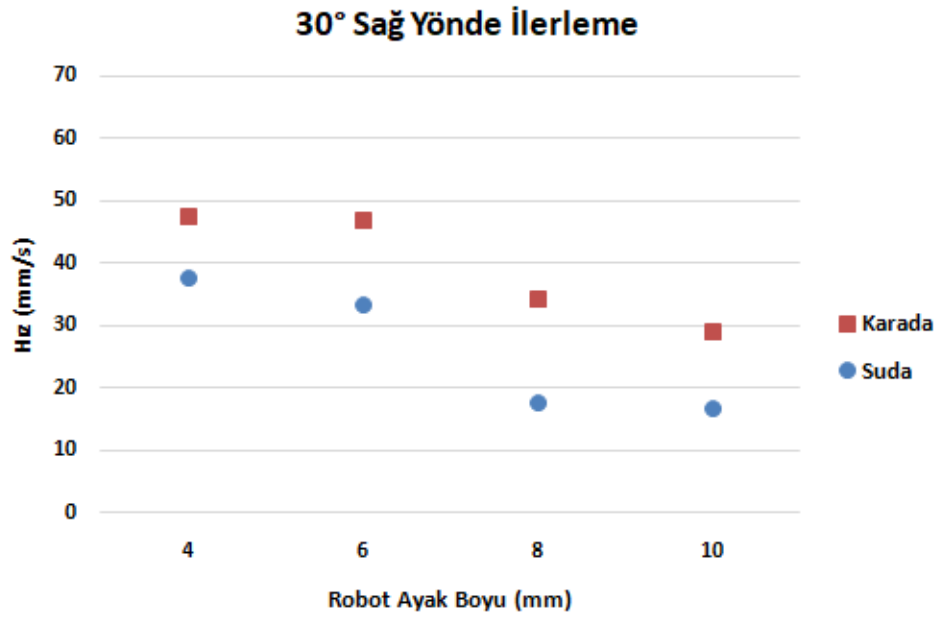
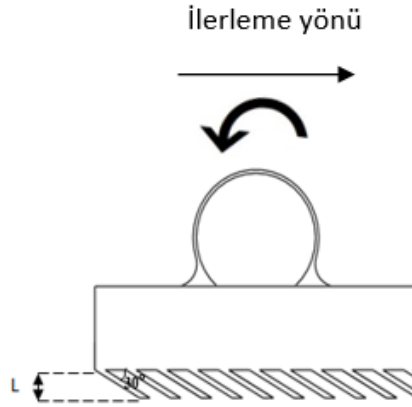
Şekil 4.4. Mikro Amfibik Robotun Sağ Yönde İlerlemesi (120°-135°-150° derece)

0,4 mm et kalınlığına sahip olan içi boş olarak üretilmiş olan mikro robot üzerinde bulunan güneş paneli ve titreşim motoru sayesinde rahatça titreşerek elastik bir hareket gösterip senkronize şekilde ilerleme gösterebilmektedir. Bu hareket için ayaklar ince kıl şeklinde tasarlanmıştır. Yukarıda Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 'de gösterildiği üzere amfibik robot sağ ve sol yönlerde hareket etmiştir. Bunun sebebi ise titreşim motorunun güneş paneline bağlantısıdır. Burada titreşim motoru sarkaç görevi görmüştür. Robot, sarkacın dönüş yönünün tersine ilerleme hareketi göstermiştir. Yukarıdaki şekillerde görüldüğü üzere amfibik robotun 8 farklı hareket kombineasyonu bulunmaktadır. 4 grup sağ 4 grup sol yönde hareket etmiştir. 120°-135°-150° dereceli ayaklara sahip robotların; 30°-45°-60° derecelerdeki robotların ters yöndeki hareketleriyle aynı hızlara ve aynı reaksiyonlara sahip olduğu gözlemlenmiştir.

İlk olarak akvaryumda denemeler 30° ayak yapısı 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm ayak boylarında yapılmıştır. Şekil 4.5 ve 4.6 'de gösterilen grafik incelediğinde sarkacın dönüş yönündeki değişiklik sadece robotun ilerleme yönünde değişikliğe sebep olmuştur. Hızında herhangi değişikliğe yol açmadığı gözlemlenmiştir. Suda daha hızla ilerleme gösteren robot karada elastik bacak yapısı gösteremediği için yavaş ilerlemiştir. En iyi ilerlemeyi 4 mm ayak yapısında göstermiştir.

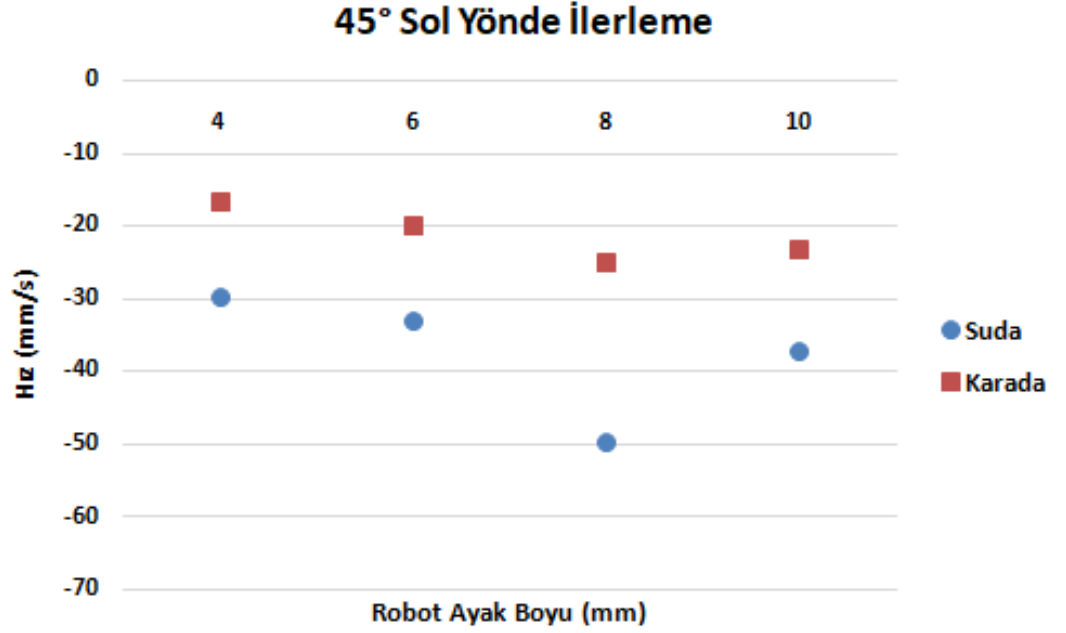
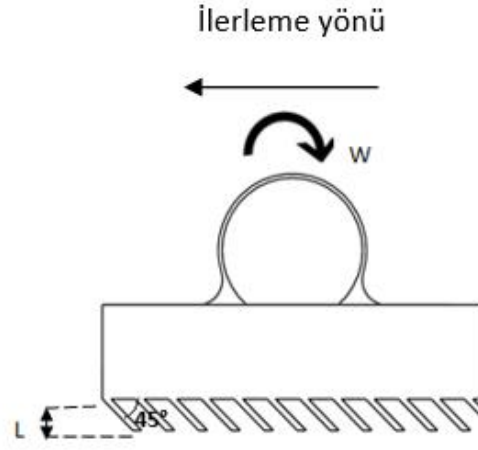


Şekil 4.5. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm ayak açıları 30° olan robotun suda ve karada, sağa dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)

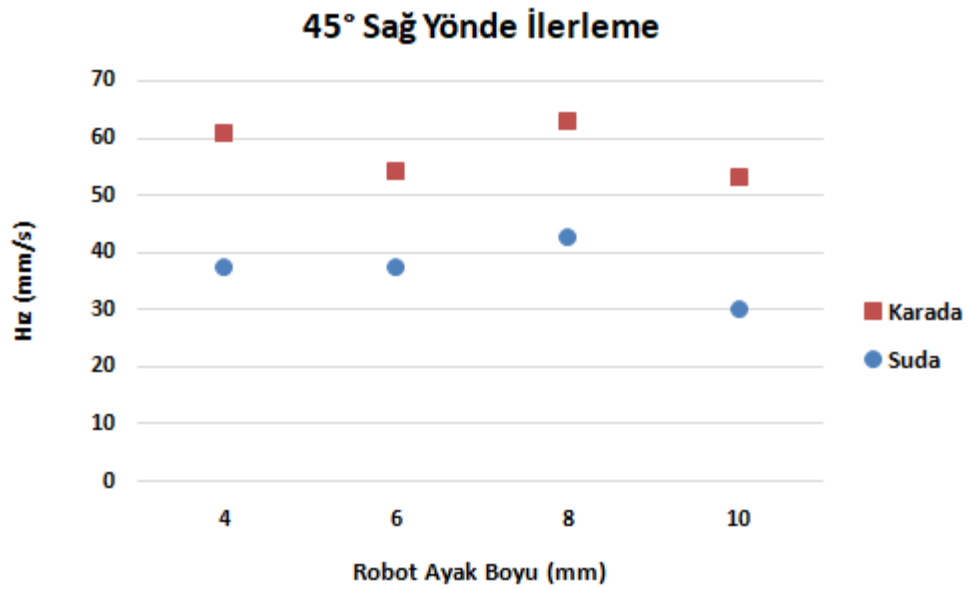
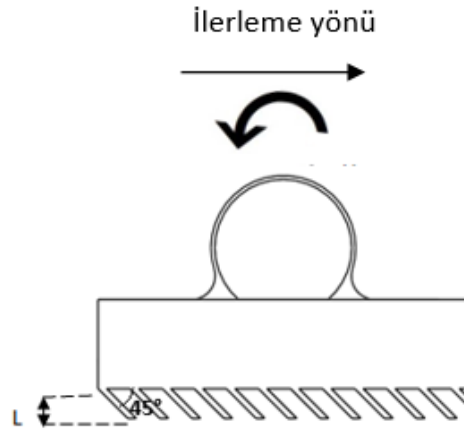


Şekil 4.6. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm ayak açıları 30° olan robotun suda ve karada, sola dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)

Şekil 4.7 ve şekil 4.8 incelendiğinde 8 mm ayak boylarında farklı açılarda hızlı ilerleme gösterdiği gözlemlenmiştir. İncelemelere göre 4 mm ayak boyu biyolojik yapı ile kıyaslandığında yürüme hareketine benzer hareket göstermiş olup 6 mm ve 8 mm ayak boyları ise koşma hareketi yapmaktadır. Suda olan hareketindeki yavaşlama ise tamamen ayaklarının duruş açısı ile ilgilidir. Yavaşlamaların meydana gelmesi lehim yapılırken oluşan deformeler kaynaklıdır.



Şekil 4.7. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm ayak açıları 45° olan robotun suda ve karada, sağa dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)

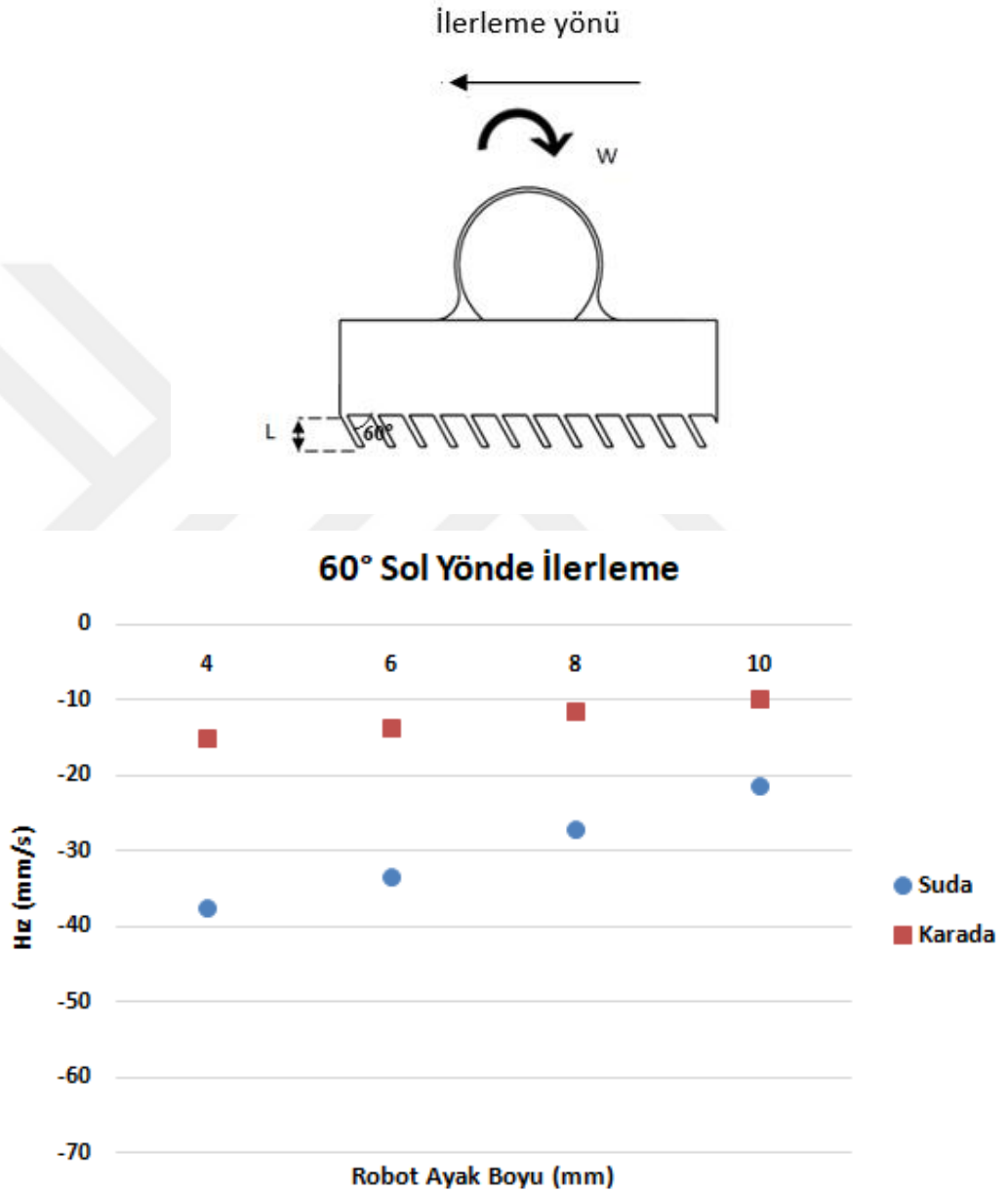


Şekil 4.8. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm ayak açıları 45° olan robotun suda ve karada, sola dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)

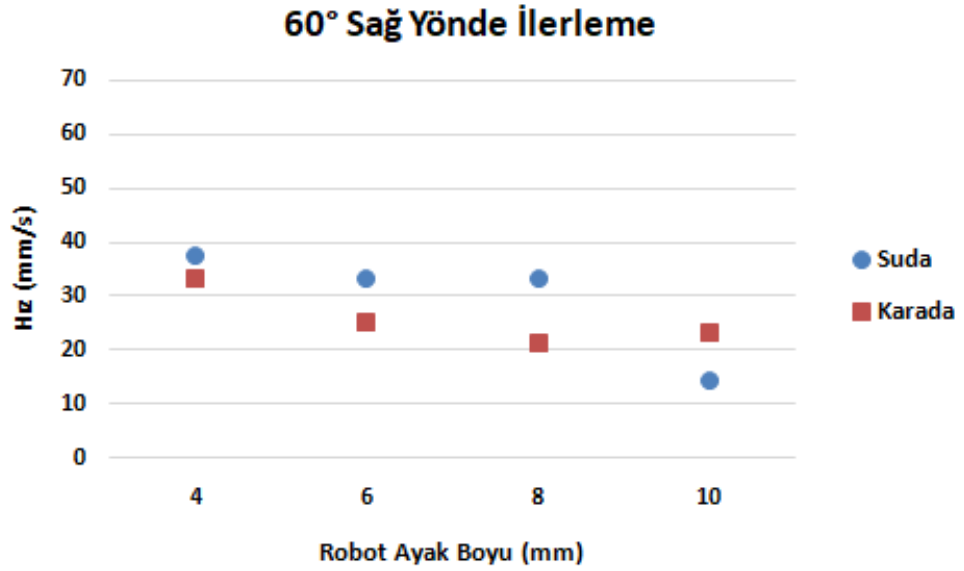
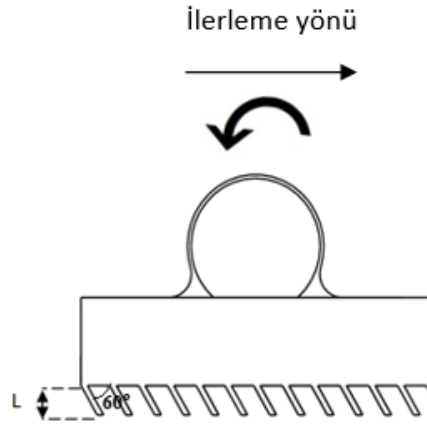
Şekil 4.7 ve şekil 4.8’de görüldüğü gibi sarkaç yönü sadece ilerleme yönünü etkilemiştir. Yavaşlamaların meydana gelmesi lehim yapılırken oluşan deformeler kaynaklıdır.

Denemeler; 30° açığa sahip ayak boylarından sonra 45° açığa sahip olan ayak boylarında yapılmıştır. İlk olarak 4 mm ayak boyunda yapılmıştır. Grafiklerde de görüldüğü gibi yürüme hareketi yapmıştır. 45° doğru bir ayak açısı formu olduğundan dolayı ilerlemesi 30° göre daha hızlı olmuştur. Sarkaç yönü 30° olduğu gibi sadece hareket yönünü

değiştirmiştir. 60° açığa sahip robotlarda ayak boyu arttıkça yavaşlama gözlemlenmiştir. Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 incelendiğinde 60° sahip ayak açısına robotun, 45° ve 30° ayak açılarna göre daha yavaş ilerlediği gözlemlenmiştir. Senkronize hareketi bozulmaya başladığı için ilerlemelerde yavaşlamalar meydana gelmiştir.



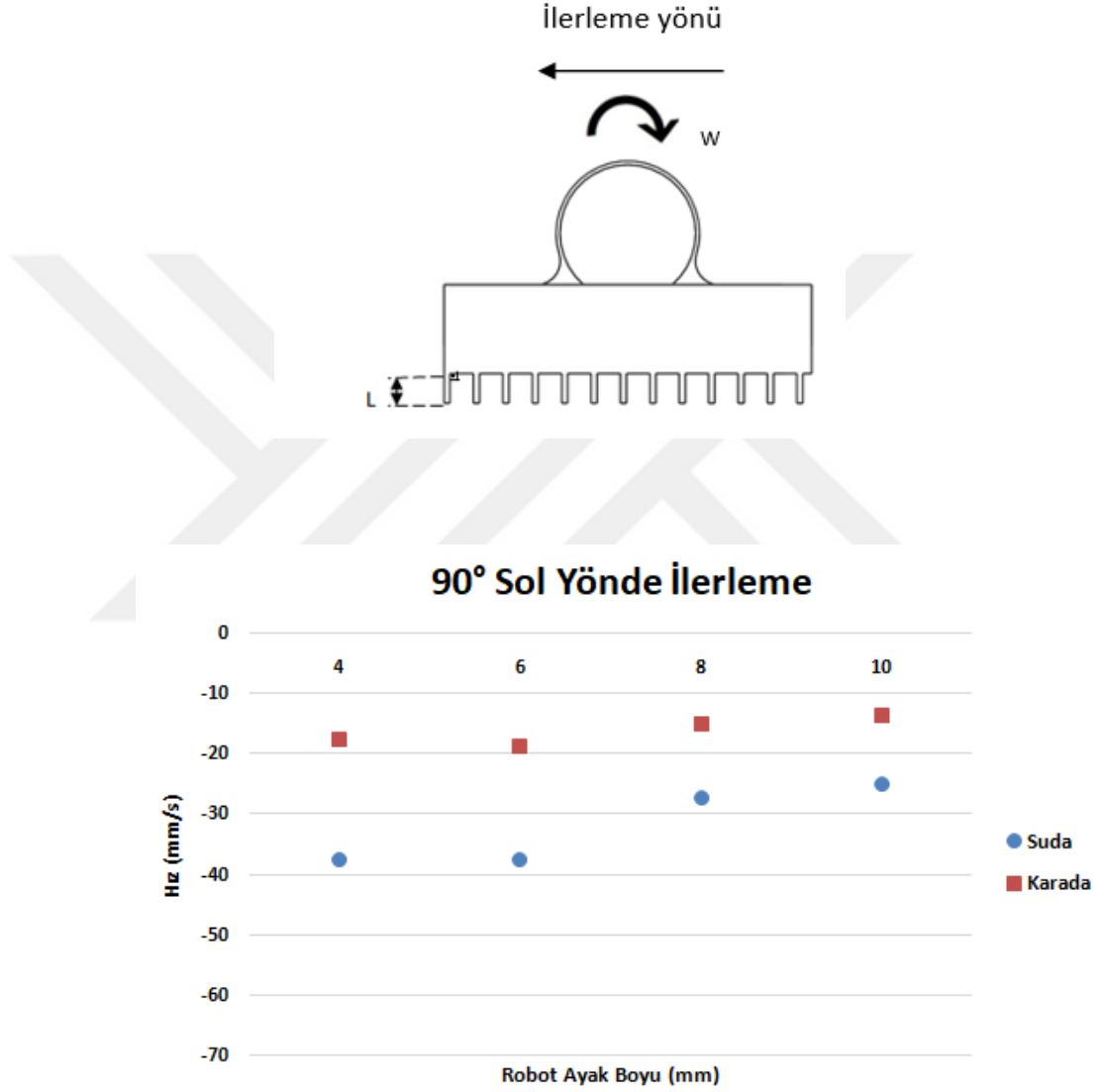
Şekil 4.9. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm ayak açılı 60° olan robotun suda ve karada, sağa dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)



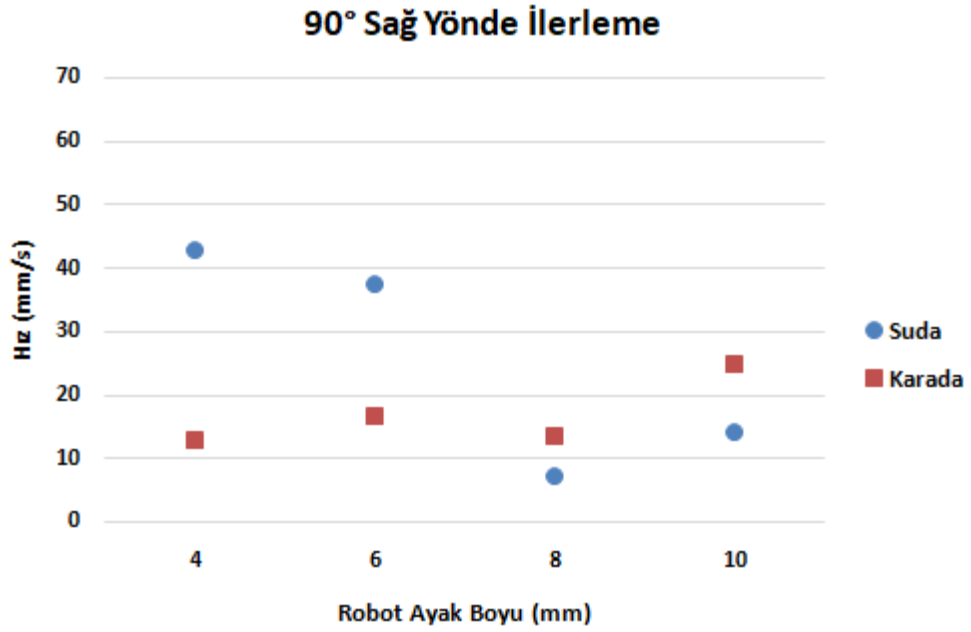
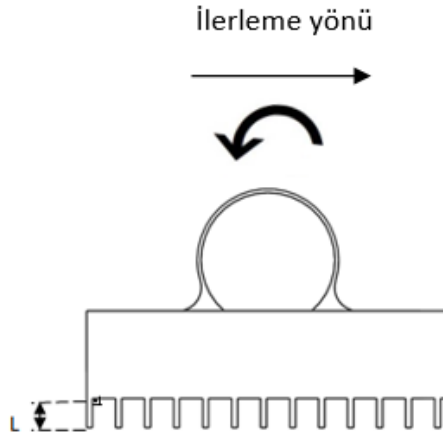
Şekil 4.10. Ayak uzunluğu 4 mm,6 mm, 8 mm, 10 mm ayak açıları 60° olan robotun suda ve karada, sola dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)

Mikro amfibik robot için doğru ayak açısı 30° ,60° değil 45° olduğu gözlemlenmiştir. 60° açıda bulunan robotlarda ayak boyları arttıkça ilerlemede yavaşlama meydana gelmiştir. Periyodik hareketler bozulmaya başlamıştır. Tüm bu ayak açılarında her zaman en iyi ilerlemeyi 8 mm ayak boyuna sahip olan robot gerçekleştirmiştir.

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 'de 90° ayak açısına sahip amfibik robotun farklı ayak boylarındaki hızları incelenmiştir. 90° ayak açısına sahip robotun diğer açılara oranla daha yavaş ilerleme gösterdiği gözlemlenmiştir. Elastik uzuvları olmayan bir formda olduğu için senkronize bir hareket gösterememiştir.



Şekil 4.11. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm ayak açıları 90° olan robotun suda ve karada, sağa dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)

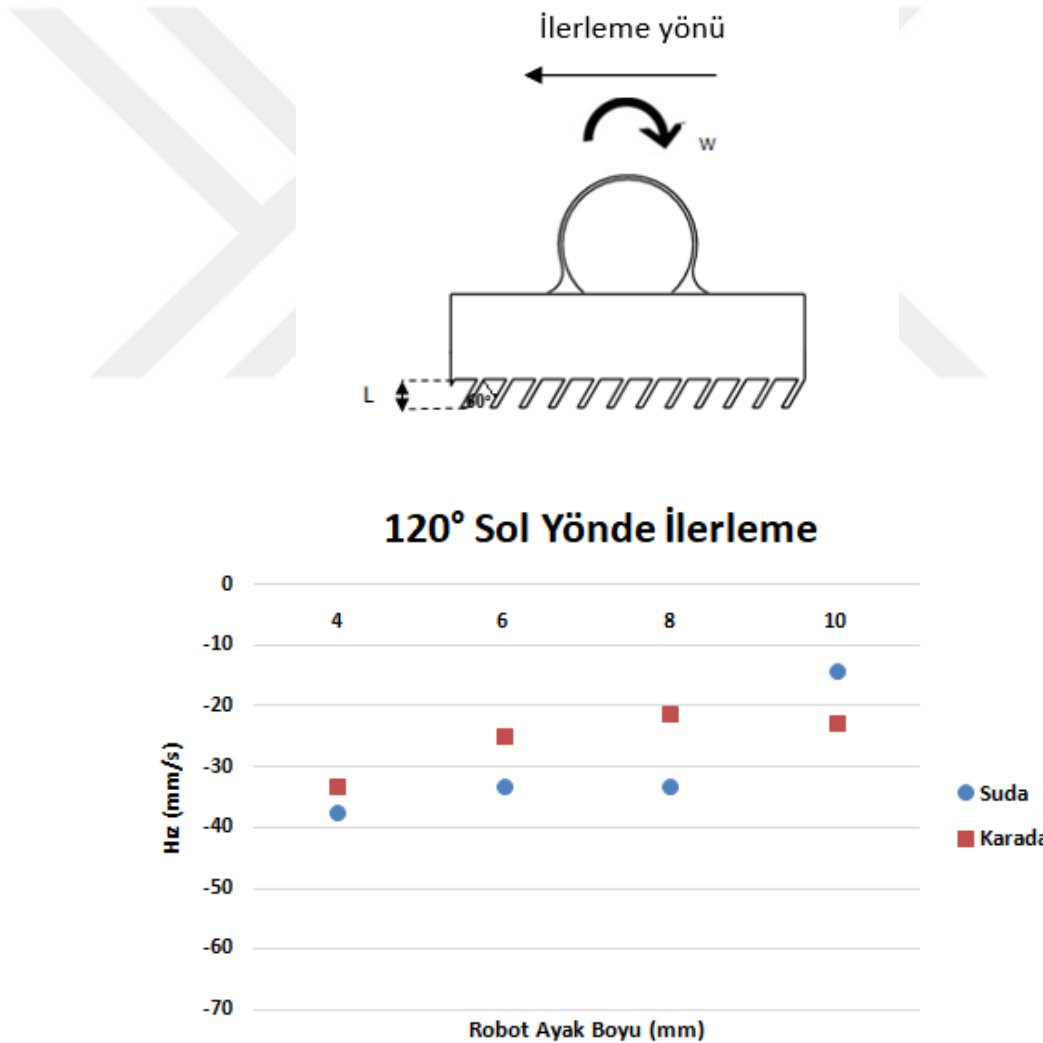


Şekil 4.12. Ayak uzunluğu 4 mm,6mm,8 mm,10 mm, ayak açıları 90° olan robotun suda ve karada, sola dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)

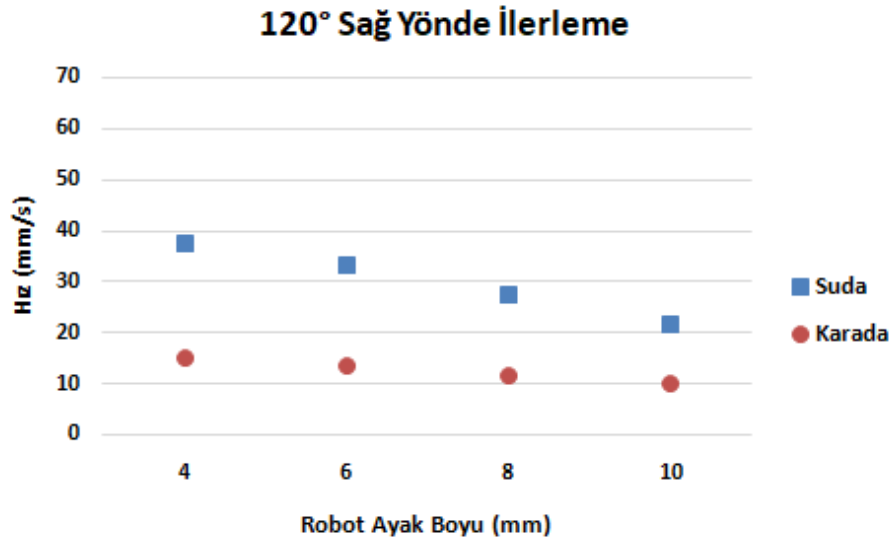
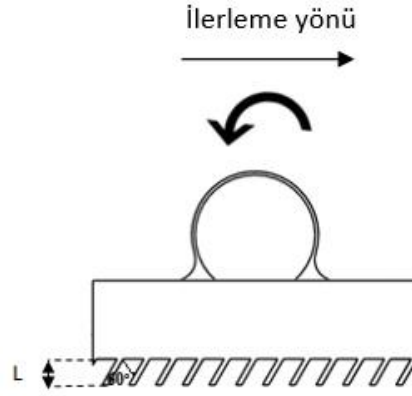
Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 ‘de incelendikten sonra en hızlı ve en stabil hareketin 45° ayak açısına sahip 8 mm ayak boyunda olduğu gözlemlenmiştir. Suda ve karada olan ilerlemesi ise bir mikro amfibik robota göre dikkat çekici şekilde hızlıdır. Titreşim frekansı ile ilerleme frekansının ortak bir geometride buluşması robotun enerjiiyi doğru kullanmasını sağlamıştır. Elde ettiği enerji ile suda ayaklarında oldukça kuvvetli itme oluştururken karadaki hareketinde ise elastik bir hareket göstererek hızlanmış ve görevini başarı ile

tamamlamıştır. Suda 50 mm/s hıza ulaşmıştır. Su için en doğru ayak yapısı bu deneyler sonucunda tespit edilmiştir.

8 mm ayak boyundan sonra 10 mm ayak boyunda yapılan denemede yavaşlamalar gözlemlenmiştir. Suda batan hacmin artması robotun yavaşlamasına sebep olmuştur. Yapılan tüm deneyler neticesinde 45° ve 30° ayak açılarının 10 mm ayak boyuna uygun olmadığı tespit edilmiştir. 10 mm ayak boyunda frekans bozulmakta ve robot yavaşlama eğilimine geçmektedir. Karada ilerleme sırasında zıplamaya yöneldiği için olması gereken frekans değerinden çıkmakta ve ilerlemeler yavaşlamaktadır.

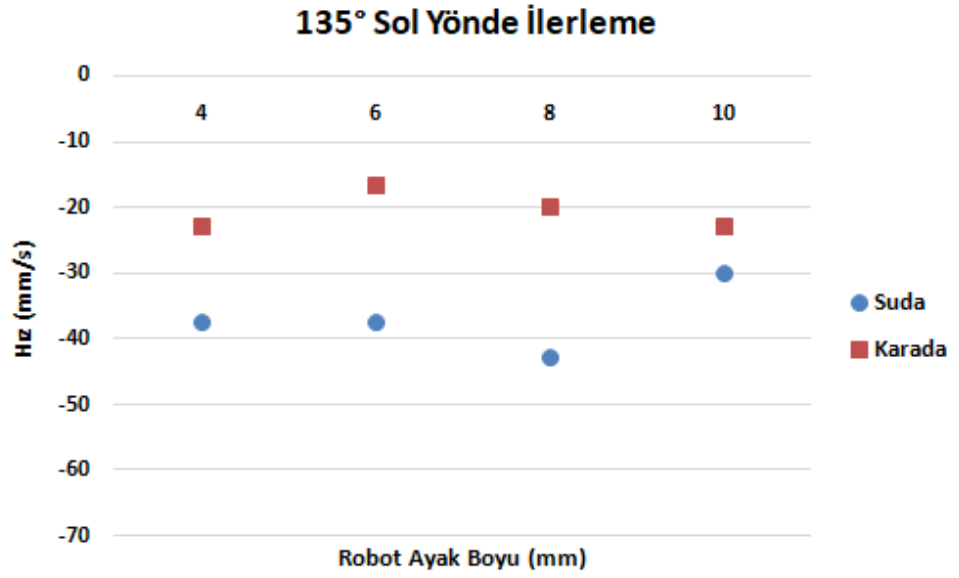
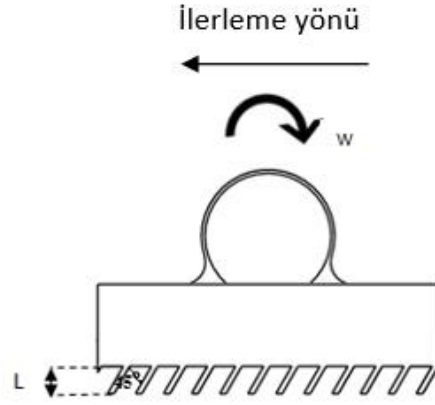


Şekil 4.13. Ayak uzunluğu 4 mm,6 mm,8 mm, 10 mm ayak açıları 120° olan robotun suda ve karada, sağa dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s),

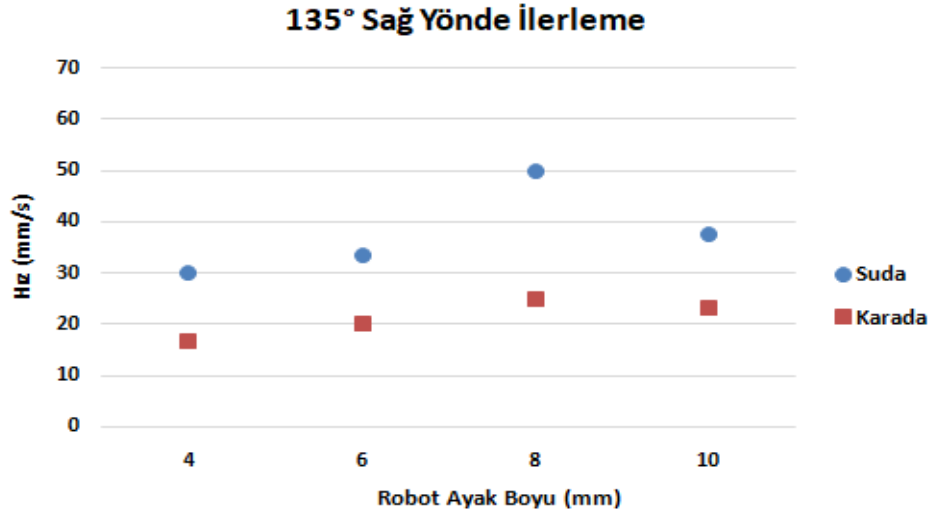
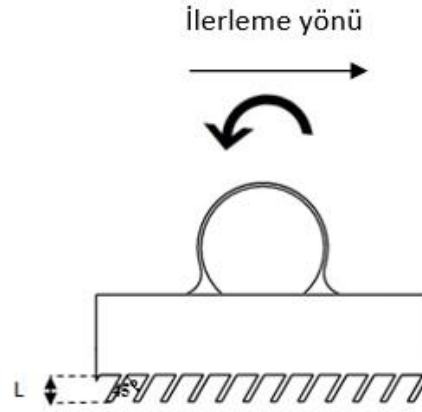


Şekil 4.14. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm ayak açıları 120° olan robotun suda ve karada, sola dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)

120° ayak açısına sahip olan robot; 60° ayak açısına sahip robot ile aynı ilerleme hızlarına sahip olmuştur. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'da görüldüğü üzere ayak boyları uzadıkça ilerleme hızlarında yavaşlama meydana gelmiştir.

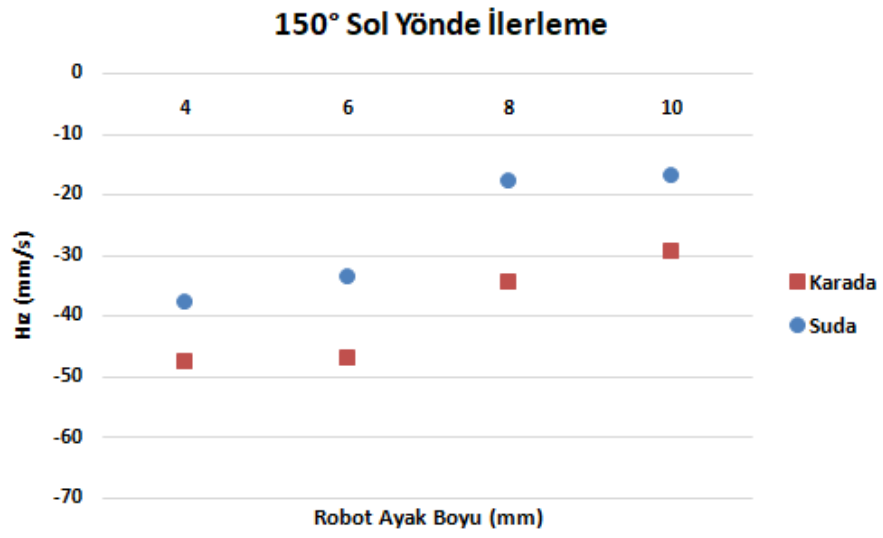
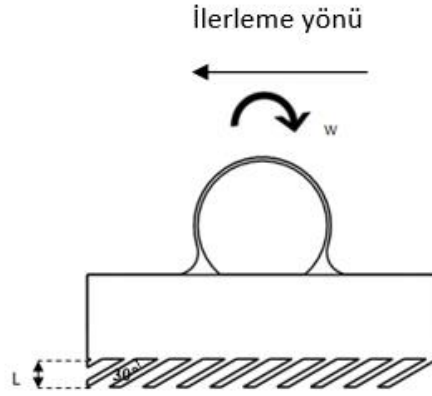


Şekil 4.15. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm ayak açıları 135° olan robotun suda ve karada, sağa dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)

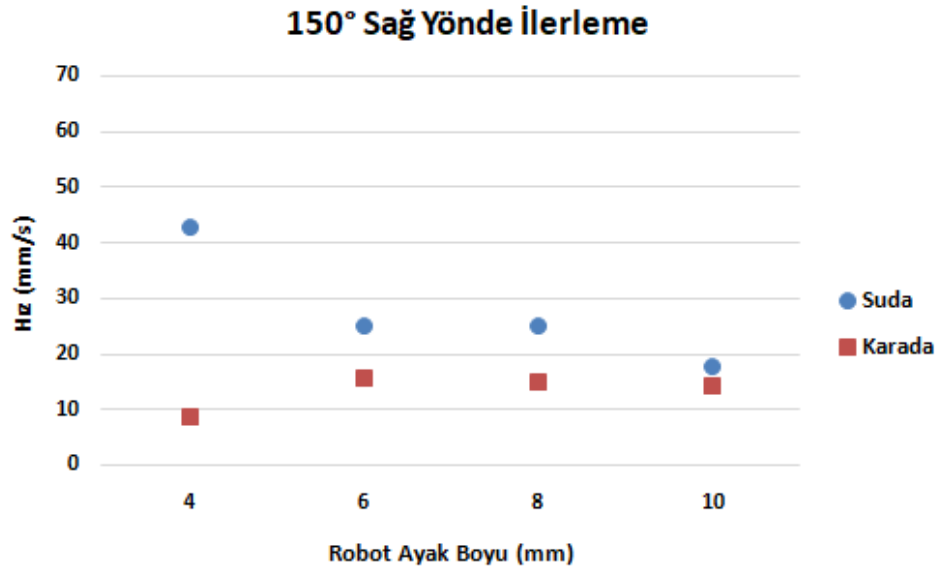
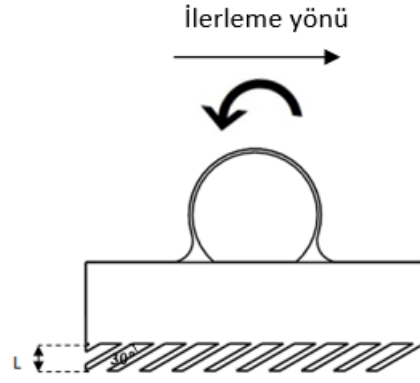


Şekil 4.16. Ayak uzunluğu 4 mm, 6mm, 8 mm, 10 mm, ayak açıları 135° olan robotun suda ve karada, sola dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s), zaman (s) eğrileri

45° derece ayak açısının amfibik robot için optimum ayak açısı olduğu yapılan deneyler ile gözlemlenmiştir. 135° derece ayak açısına sahip robotun, 45° ayak açılı robotun simetriği olduğundan Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'de gösterilen grafiklere göre de en iyi ilerleme hızlarına ulaştığı gözlemlenmiştir.

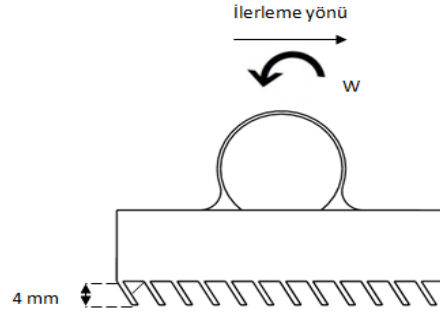


Şekil 4.17. Ayak uzunluğu 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm ayak açıları 150° olan robotun suda ve karada, sağa dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)

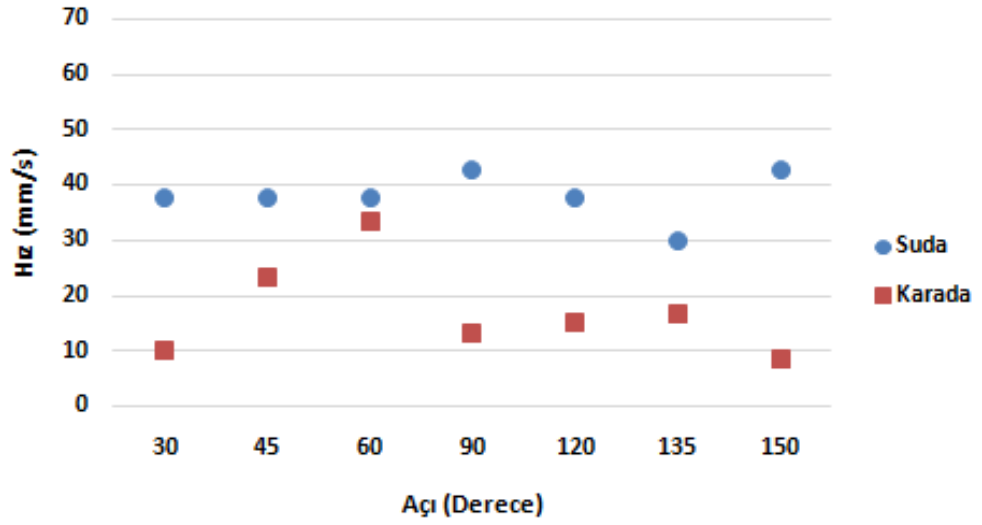


Şekil 4.18. Ayak uzunluğu 4 mm,6 mm,8 mm,10 mm ayak açıları 150° olan robotun suda ve karada, sola dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)

Açı genişlediği için eklemlerin gösterdiği elastik hareketi gösterebilecek form ortadan kalktığından frekans aktarılmasında bozulmalar oluşmuştur. Bu durumda yavaşlamaya neden olmuştur. Son olarak Şekil 4.17 ve Şekil 4.18 incelendiğinde 150° ayak açısında en fazla 45 mm/s hıza ulaştığı görülmüştür. Tüm hız değerleri 30° ayak açısına sahip robot ile aynı olmuştur. 120°-135°-150° derece ayak açılarına sahip robotlar aslında 30°-45°-60° derece ayak boylarındaki robotların simetrik hareketleridir. Motor yuvasının ters yöne takılmasıyla ilerlemeler aynı yönde oluşmuştur.

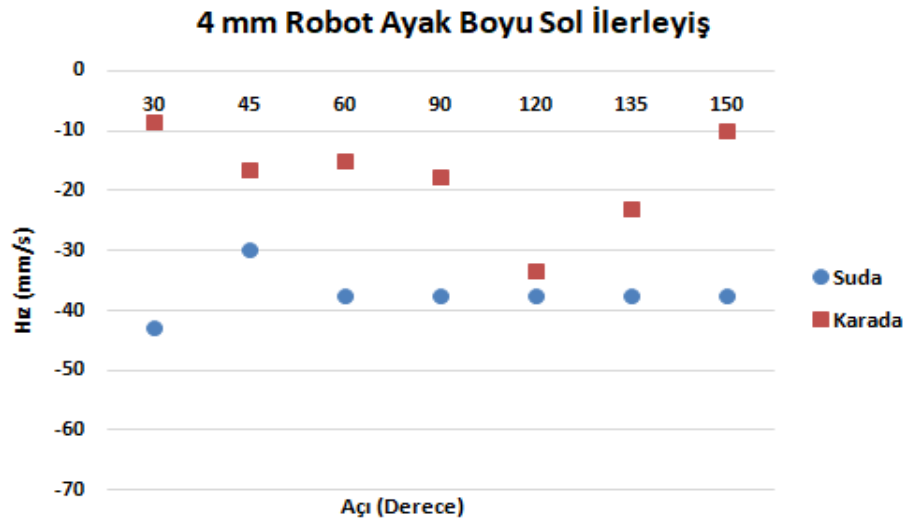
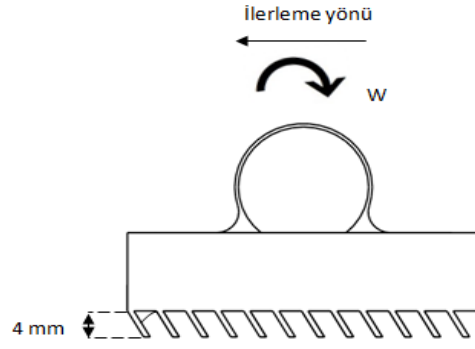


4 mm Robot Ayak Boyu Sağ İlerleyiş



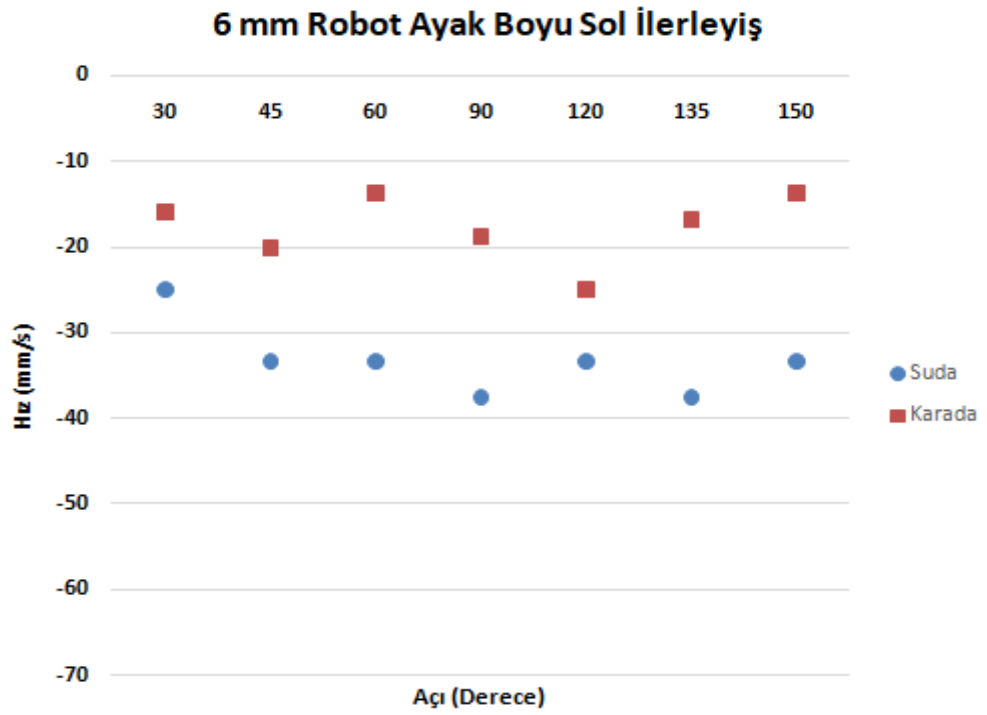
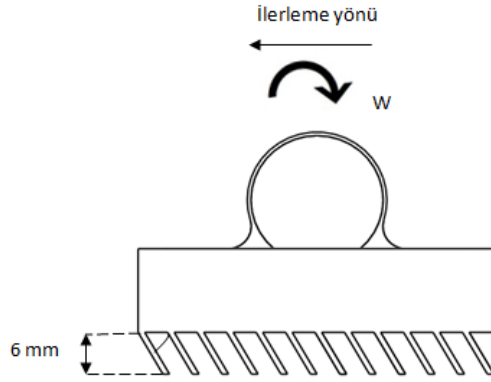
Şekil 4.19. Ayak uzunluğu 4 mm, ayak açıları 30° , 45° , 60° , 90° , 120° , 135° , 150° olan robotun suda ve karada, sola dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)

30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150° açılı ayaklara sahip robotların 4 mm ayak boyunda ilerlemeleri gözlemlenmiş ve Şekil 4.19 grafiği elde edilmiştir. En hızlı ilerlemeyi suda 150° ayak açısında sağlamıştır. Açının değişimi hareketinin hızlanmasında bir rol oynamamıştır. Ayak boyu kısa olduğundan dolayı itme kuvveti her açıda aynı olmuş ve ilerlemeye katkısı olmamıştır.

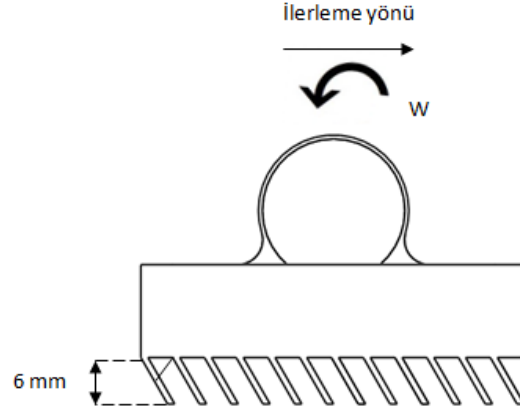


Şekil 4.20. Ayak uzunluğu 4 mm, ayak açıları 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150° olan robotun suda ve karada, sağa dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)

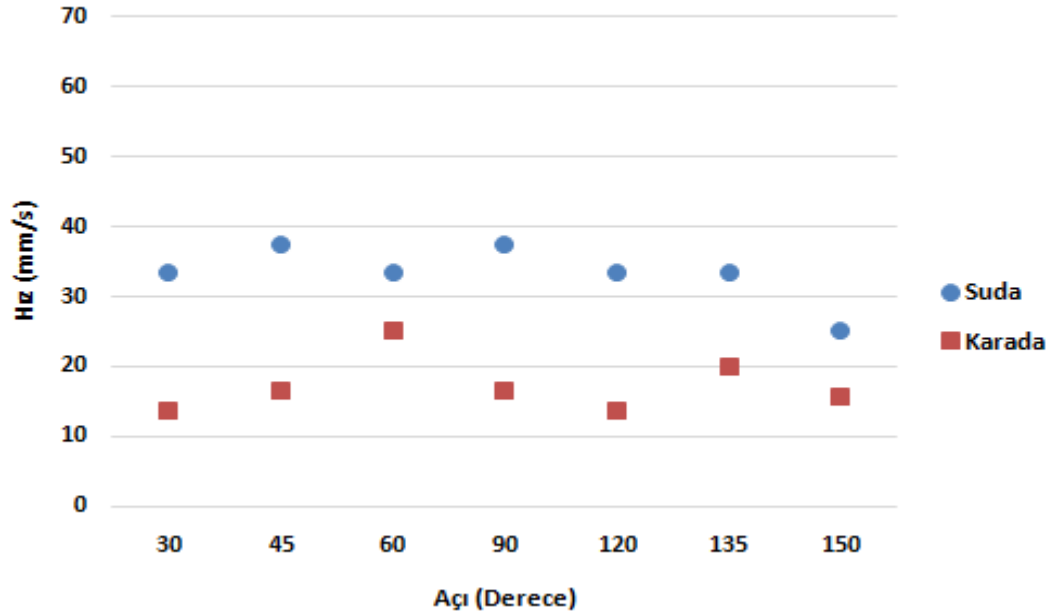
Sarkacın yönü değiştiğinden hareket yönü değişmiştir. Şekil 4.20 'de görüldüğü üzere sadece ilerleme yönü değişmiştir.



Şekil 4.21. Ayak uzunluğu 6 mm, ayak açıları 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150° olan robotun suda ve karada, sağa dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)

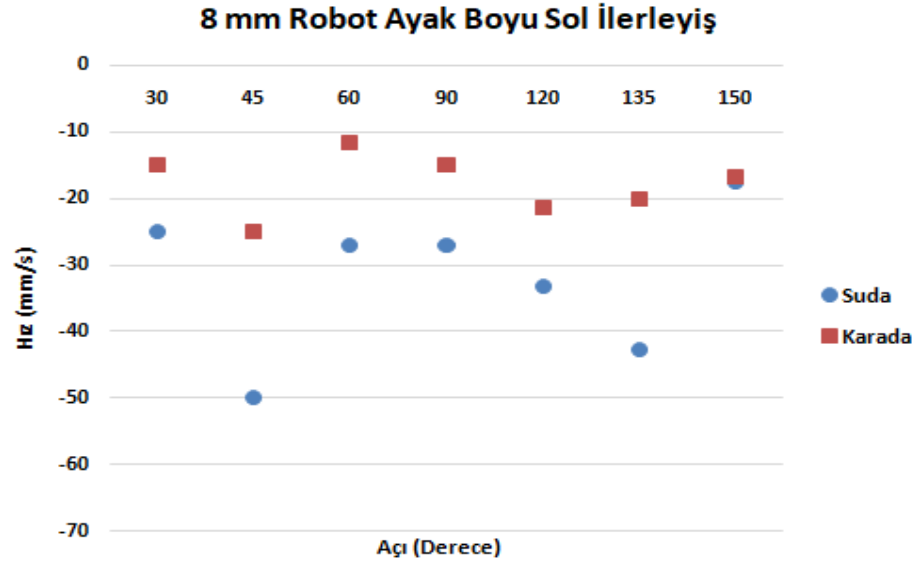
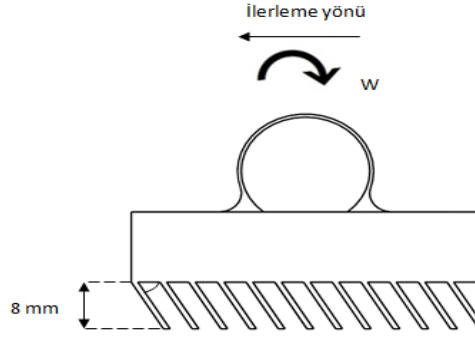


6 mm Robot Ayak Boyu Sağ İlerleyiş

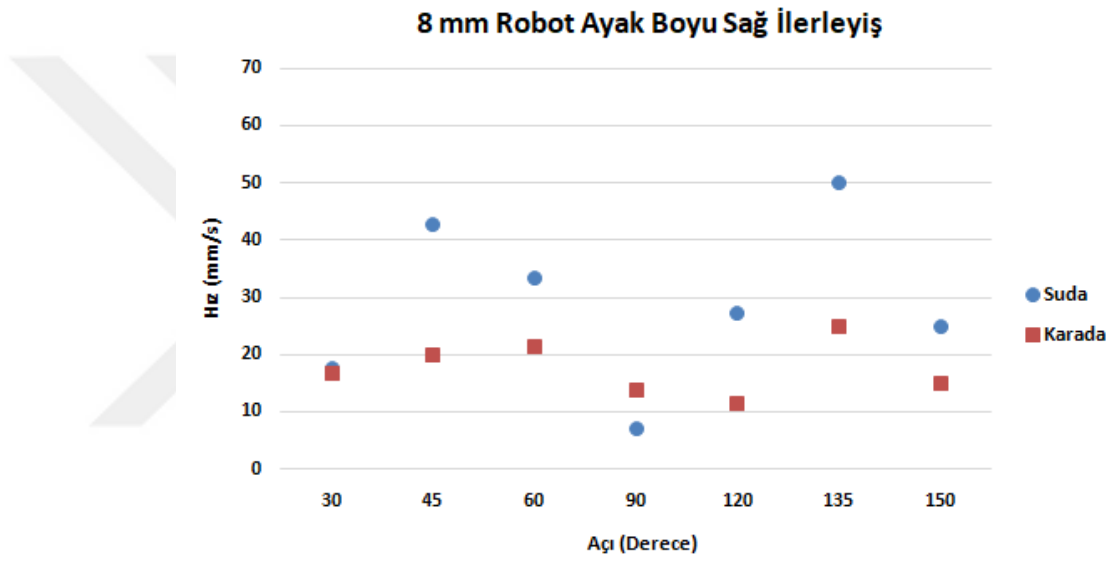
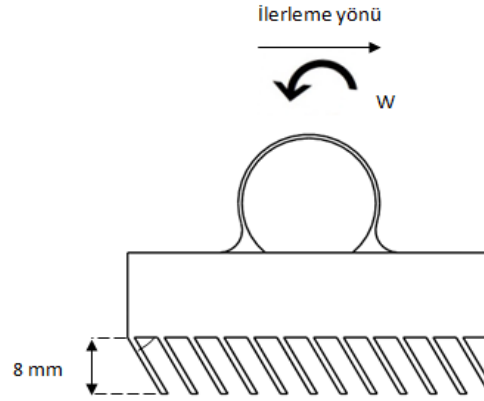


Şekil 4.22. Ayak uzunluğu 6 mm, ayak açıları 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150° olan robotun suda ve karada, sola dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)

30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150° açılı ayaklara sahip robotların 6 mm ayak boyunda ilerlemeleri gözlemlenmiş ve Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de verilen grafikler elde edilmiştir. Hızlarda meydana gelen oynamalar tamamen ışık kaynağının ısınmasından dolayı oluşmuştur. 4 mm ayak boyuna oranla daha hızlı ilerleme göstermiştir. Karada uzun ayak yapısı elastik uzuv görevi görmüştür. Suda ise itme kuvveti oluşturmuştur. Bu durumlarda robotun hızlanmasını sağlamıştır.

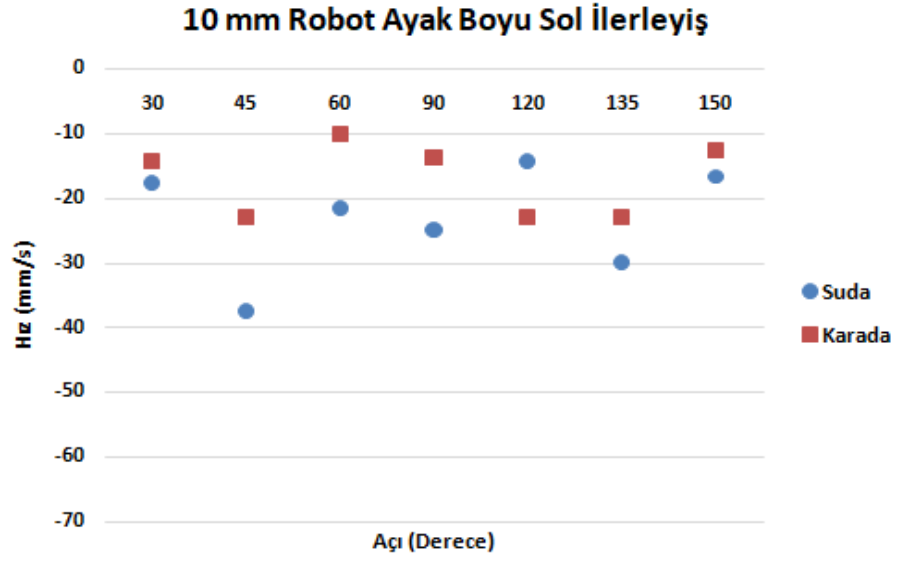
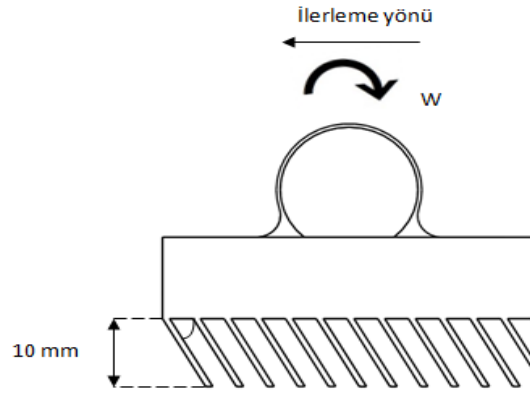


Şekil 4.23. Ayak uzunluğu 8 mm, ayak açıları 30° , 45° , 60° , 90° , 120° , 135° , 150° olan robotun suda ve karada, sağa dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s),

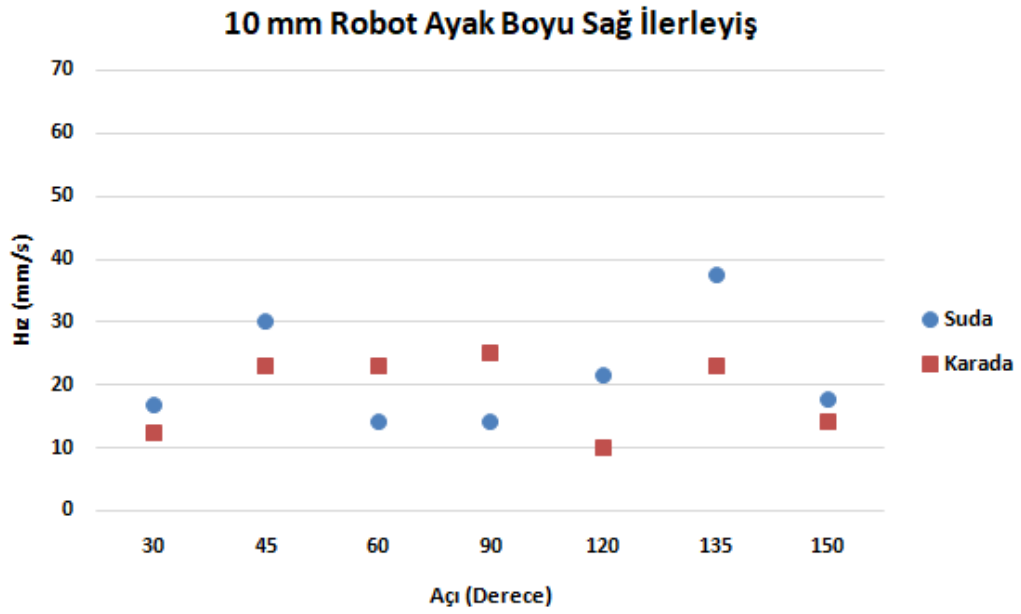
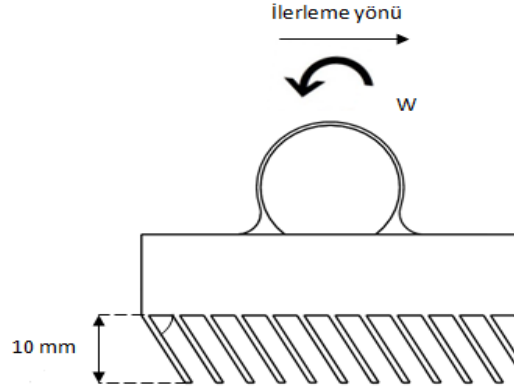


Şekil 4.24. Ayak uzunluğu 8 mm, ayak açıları 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150° olan robotun suda ve karada, sola dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)

Tüm yapılan deneyler incelendiğinde en hızlı ilerleme 45 ve 135 derece ayak açısından 8 mm ayak boyunda gözlemlenmiştir. 6 mm ve 8 mm ayak boylarının hızlarının genel olarak birbiri ile aynıdır. Şekil 4.23 ve Şekil 4.24 grafikleri incelendiğinde 8 mm ayak uzunluğu doğru bir itme ve senkronize çalışmayı sağladığından dolayı ideal ayak uzunluğu bulunmuştur.



Şekil 4.25. Ayak uzunluğu 10 mm, ayak açıları 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150° olan robotun suda ve karada, sağa dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)



Şekil 4.26. Ayak uzunluğu 10 mm, ayak açıları 30° , 45° , 60° , 90° , 120° , 135° , 150° olan robotun suda ve karada, sola dönen sarkaç hareket ile gösterdiği ilerleme hızı (mm/s)

Son olarak 30° , 45° , 60° , 90° , 120° , 135° , 150° açılı ayağa sahip olan 10 mm ayak boyundaki robot üzerinde denemeler yapılmıştır. Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 'de görüldüğü üzere robotun ilerlemesinde 10 mm ayak doğru seçim değildir. İlerlemede koşmaya benzer hareketler göstermekte ve senkronize çalışması bozulmaktadır bu durumda doğru formu elde edemediği için ilerlemesi yavaşlamıştır. Eğer ayaklar doğru pozisyonda yer almaz ise biyolojik harekete yakın hareket reaksiyonu gösterememektedir. Ayaklarda bulunan açı elastik uzuv görevi görmektedir. Bu yüzden doğru açı hem karada hem de suda hızlı ilerlemeyi sağlamıştır.

5. SONUÇ

Yapılan araştırmalarla daha önce üstünde çalışılan deneyler incelenmiştir. Titreşim frekansı ile karada ilerleme gösteren minimum düzeyde enerji tüketimine sahip karada, suda, hem karada hem de suda ilerleyen mekanizmalar tanıtılmıştır. Ancak bacaklı robotların verimli çalışma göstermediği tespit edilmiştir. Daha sonra hayvanlar ve insanların eklemleri ve kas yapısı incelendiğinde elastik elemanların kullanılması gerektiği fark edilmiştir. Doğru elastik yapı ve doğru frekans değerisi ile verimli ilerleme mekanizmaları meydana getirilmiştir.

Yapılan incelemelerde titreşime bağlı olarak hareket eden elastik karasal ilerleme sistemini (Reis ve ark. 2013) üzerinden ilham alınarak robotun su üzerinde de hareketini gerçekteşirebilmesi sağlanmış ve ilk olarak balık ve suda yaşayan böcekler incelenerek suda hareket eden bir robot tasarlanmıştır. Denemeler neticesinde yaşanan problemler ve elde edilen veriler ile mikro canlıların biyolojisi kullanılarak yeni bir mikro amfibi robotu elde edilmiştir.

Bu çalışmada, ilk olarak ilerleme için ince metal bir filmin doğal davranışını kullanan bir ilerleme mekanizması tanıtılmıştır. Çalışmada suda yaşayan canlılardan ilham alınarak balıkların yüzgeç hareketini taklit eden, ancak elastik bir kirişin titreşim hareketini kullanan, bir ilerleme mekanizmasının geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Robotun küçük boyutlarından dolayı deneyler esnasında elektrik enerjisinin titreşim motoruna iletilmesi ciddi bir sorun teşkil etmekte ve deneyleri oldukça zorlaştırmaktadır. Çok ince kablolar kullanıldığında bile oluşan gerilmeler ve kablo yükleri robotun hareketini etkilemektedir. Bunun yanında çok ince kablolar kullanıldığı için kablolardaki enerji kayıpları da dikkate alınmalıdır. Yapılan çalışmalar sonucunda ilerleme mekanizmasının belli gerilimlerde zıt yönlere hareket ettiği gözlemlenmişti. Bu durumun titreşim sonucu su içerisinde oluşan girdaplardan kaynaklandığı düşünülse de motorun direk olarak su ile temas da bulunması ve belli bir süre sonra stabil çalışmasında bozukluklar meydana getirdiği tespit edilmiştir. Ek olarak ince metal filmlerin deforme olması sonucunda ilerleme hareketlerinde yavaşlamalar veya zıt yönde hareket etme eğilimi meydana gelmiştir.

Çalışmalar daha da geliştirilmiş ve elde edilen veriler ile suda ve karada ilerleyen mikro amfibik robot elde edilmiştir. Robot hafif olması için PLA malzemeden içi boş olarak üretilmiştir. İlk olarak 3D yazıcıdan içi dolu çıktı alınmıştır. Ancak suda batan kısmın hacminin artması suda ilerlemesini yavaşlatmıştır. Daha sonra destek atarak çıktı alınmış parça %25 oranında hafifletilmiştir. Hızlanmış olmasını göz önüne alarak içini tamamen boş olacak şekilde 3D yazıcıdan çıktı alınmış ve ilk olarak sızıntı testi yapılmıştır. Herhangi bir şekilde için su sızması olmadığı tespit edildikten sonra denemeler yapılmış ve ilerleme hızının %50 oranında arttığı belirlenmiştir. Parça üzerinde hafifletme işlemleri yapılarak daha da hızı arttırılmıştır. Hafifleyen robotun suya batan hacmi azalmıştır. Bu sayede harcadığı güç azalmış enerji tasarrufu sağlanmıştır.

Mikro robotun hafifletilmesinden sonra ayaklarındaki açıların ve uzunlukların hıza etkisi incelenmiştir. Titreşim frekansı ile ilerleme gösterdiği için ayakların boylarının uzun olması daha fazla suya itme kuvveti uygulamış ve daha hızlı ilerleme göstermesini sağlamıştır. Açılar tek tek incelendiğinde ise 45 derece 8 mm ayak boyunda robotun hızlı ilerleme gösterdiği tespit edilmiştir. Titreşimi daha fazla kullanarak suda itme kuvveti oluşturmuştur. 30° , 60° , 90° , 120° , 150° açılarda bulunan ayaklarda hızlı ilerleme göstermemesinin sebebi ise senkronize çalışmaya uygun olmamasıdır. Bu durumu canlıların eklemlerini inceleyerek açıklar isek elastik uzuvların titreşimin çok iyi kontrol edilmesi gerekmektedir. Eğer periyodik şekilde titreşim frekansı ile ilerlemenin frekansı birbirini karşılamaz ise verimsizlik meydana gelir ve hızlı bir ilerleme gösteremez. Senkronize çalışmayı sağlayan açı ve boy robotun hızlı ilerlemesini sağlamıştır.

Mikro amfibik robot sudaki hareketini başarılı şekilde tamamladıktan sonra karada denemeler yapılmıştır. Karada da hızlı ilerleme gösterdiği tespit edilmiştir. Karada ilerleme sırasında ise uzun ayakların titreşim ile zıplama hareketine sebep olduğu gözlemlenmiştir. Kısa ayaklar ise titreşimi tam aktaramadığı için yürüme hareketine benzer hareket göstermiş olup 6 ve 8 mm ayak boyları koşmaya yakın ilerleme göstererek verimli sonuç elde etmemizi sağlamıştır.

Suda ve karada verimli ilerleme gösteren sistemde yapılan bir diğer iyileştirme ise güneş paneli ile titreşim motoru beslemektir. İlk yaptığımız çalışmada kabloların verimsizliğe

sebepler olduğu tespit edildiğinden dolayı son nihai tasarımımızda güneş paneli ile beslenen titreşim motoru kullanılmış ve böylelikle kablolardan oluşan verimsizliğin önüne geçilmiştir. Yapılan deneylerde enerjiyi doğru şekilde aktarabildiğimizi göstermiştir. Elde edilen olumlu veriler neticesinde titreşim motorunun güneş paneline bağlantısının ilerleme yönünü nasıl etkilediği de incelenmiştir. Titreşim motorunu robotun ağırlık merkezinde bulunan sarkaç gibi düşünebiliriz. Güneş panelinden aldığı güç ile dönmeye başlayarak ilerleme sağlamaktadır. Güneş paneline olan bağlantısı ters çevrildiğinde dönüş yönünün terse döneceğinden dolayı robotun ilerlemesinin de ters yönde olması beklenmiştir. Yapılan denemeler sonucunda titreşim motorunun ters yönde çevrime girmesi ilerlemenin yönünü terse çevirmiştir.

Yapılan araştırmalar sonucunda daha önce güneş paneli ile beslenen bir titreşim motorunun hareketiyle ilerleme gösteren mikro amfibik bir robotun ilerlemesinin yapılmadığı bu tez çalışması ile ilk defa denendiği gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

Aguilar, J., Zhang, T., Qian, F., Kingsbury, M., McInroe, B., Mazouchova, N, Li, C.,Maladen, R.,Gong,C.,Travers, M., Hatton, R.L.,Choset, H., Umbanhowar, P.B.,Goldman, D.I. 2016. A review on locomotion robophysics: the study of movement at the intersection of robotics, softmatter and dynamical systems. *Reports on Progress in Physics*, 79:1-35.

Andrew, D., Dimarogonas. 1996. Vibration of Cracked Structures: A State Of The Art Review. *Engineering Fracture Mechanics, Elsevier Science*, pp. 831-857.

Anifantis, N., Dimarogonas, A.1984. Post Buckling Behavior of Transverse Cracked Columns. *Computers and Structures*, 18:351-356.

Anonim,2019a. Pliant Enerji Sistemleri, Venox tanıtım sayfası. <https://www.pliantenergy.com/home-1->(14.12.2019).

Anonim, 2019b. How do amphibians reproduce. <https://sciencing.com/amphibians-reproduce-4568162.html>.

Anonim, 2017. 7 cool facts about water striders. <https://blog.nature.org/science/2017/04/10/7-cool-facts-water-striders-skipper-pond-skaters-weird-nature/>.

Avcar, M. 2014. Free vibration analysis of beams considering different geometric characteristics and boundary conditions. *International Journal of Mechanics and Applications*, 4(3):94-100.

Becker, F., Zimmermann, K., Volkova, T., Minchenya, V., T. 2013. An amphibious vibration- driven micro robot with a piezo electric actuator: 7. *Regular and Chaotic Dynamics*, 18 (1-2): 63-74.

Behza, M., Meghdari, A., Ebrahimi, A. 2005. A new approach for vibration analysis of a cracked beam. *International journal of Engineering*, pp.319-330.

Chondros, T.G., Dimarogonas, A.D., Yao, J. 1998. A continuous cracked beam vibration theory. *Journal of Sound And Vibration*, 215(1):17-34.

Collins, S., Ruina, A., Tedrake, R., Wisse, M. 2005. Efficient bipedal robots based on passive dynamic walkers. *Science*, 307: 1082-1085.

Floyd, S., Sitti, M. 2008. Design and development of the lifting and propulsion mechanism for a biologically inspired water runner robot. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 24, No. 3, pp. 698-709.

Goel, R.P. 1976. Free vibrations of a beam-mass system with elastically restrained ends. *Journal of Sound and Vibration*, 47: 9-14.

- Kar, D. C., Issac K. K., Jayarajan, K. 2003.** Gaints and energetics in terrestrial legged locomotion. *Mechanism and Machine Theory*, 38: 355-356.
- Kashem, S., Sufyan H. 2017.** A novel design of an aquaric walking robot having webbed feet. *International Journal of Automation and Computing*, 14(5): 576-588.
- Katsuki, T., Greenspan, R., J. 2013.** Jelly fish nervous system. *Current Biology*, 23(14), R592-R594.
- Kishen, J.M.C., Kumar, A. 2003.** Finite element analysis for fracture behavior of cracked beam-columns. *Department of Civil Engineering, Indian Institute of Science*, 256(4):591-603.
- Kim, H.G., Liu, Y., Jeong, K., Seo, T.W. 2014.** Empirical study on shapes of the footpad and walking gaits for water- running robot. *Journal of Bionic Engineering*, 11: 572-580.
- Kim, H.G., Lee, D.G., Seo, T.W. 2015.** Rolling stability enhancement via balancing tail for a water running robot. *Journal of Bionic Engineering*, 12: 395-405.
- Kim, H.G., Jeong, K., Seo, T.W. 2017.** Analysis and experiment on the steering control of a water- running robot using hydrodynamic forces. *Journal of Bionic Engineering*, 14: 34-46.
- Kopman, V., Porfiri, M. 2013.** Design, modeling and characterization of a miniature robotic fish for research and education in biomimetics and bioinspiration. *IEEE/ Asme Transactions on Mechatronics*, 18(2):471-483.
- Kwak, B., Bae, J. 2018.** Locomotion of arthropods in aquatic environment and their applications in robotics. *Bioinspiration & Biomimetics*, 13 041002:1-26.
- Leppanen, I. 2007.** Automatic Locomotion mode control of wheel-legged robots. Helsinki University of Technology Automation Technology Laboratory Series A: Research Reports No.30,September,Espoo.
- Li, M., Guo, S., Hirata, H., Ishihara, H. 2015.** Design and performance evaluation of an amphibious spherical robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 64: 21-34.
- Li, M., Guo, S., Hirata, H., Ishihara, H. 2017.** A roller-skating/walking mode-based amphibious robot. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 44: 17-29.
- Liu, J., Dukes, I., Knight, R., Hu, H. 2004.** Development of fish-like swimming behaviours for an autonomous robotic fish. *Proceedings of the Control'04, IEE, ID217, University of bath*, England.
- Liu, J., Dukes, I., Knight, R., Hu, H. 2005.** Novel mechatronics design for a robotic Fish. International Conference on Intelligent Robots and Systems, United Kingdom.

- Mahmouda, M.A., Abou Zaid, M.A. 2002.** Dynamic response of a beam with a crack subject to a moving mass. *Journal of Sound and Vibration*, 256(4):591-603.
- Maurizi, M.J., Belles, M. 1991.** Naturel frequencies of the beam-mass system: comparison of the two fundamental theories of beam vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 150:330-334.
- Najem, J., Sarles, S., A., Akle, B., Leo, D., J. 2012.** Biomimetic jell fish- inspired under water vehicle actuated by ionic polymer metal composite actuators. *Smart Materials Structures*, 21 (9), 094026.
- Nelson, H.D. 1980.** A finite rotating shaft element using timoshenko beam theory. *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol., 102/793-803.
- Niu, C., Zhang, L., Bi, S., Cai, Y. 2012.** Development and depth control of a robotic fish mimicking cownose ray. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 11-14 December , Guangzhou, China.
- Ostachowicz, W.M., Krawczuk, M. 1990.** Vibration analysis of a cracked beam. *Computers & Structures*, pp.245-250.
- Ostachowicz, W.M., Krawczuk, M.1991.** Analysis of the effect of the cracks on the natural frequencies of a cantilever beam. *Journal of Sound And Vibration*, 150:191-201.
- Owaki, D., Koyama, M., Yamaguchi, S., Kubo, S., Ishiguro, A. 2010.** A two-dimensional passive dynamic running biped with knees. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3-8 May, 2010, Alaska, USA, 5237-5242.
- Plessner S. 2018.** <https://www.floridamuseum.ufl.edu/discover-fish/fish/how-fish-swim/>).
- Reis, M., Yu, X., Maheshwari, N., Lida, F. 2013.** Morphological computation of multi-gaited robot locomotion based on free vibration. *Artificial Life*, 19:97-114.
- Reis, M., Lida, F. 2014.** An energy-efficient hopping robot based on free vibration of a curved beam. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 19:300–311.
- Reis, M. 2009.** Hareketli yüklere maruz mesnetli eğrisel kirişlerin dinamik davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Reis, M., Lida, F.2011.** Vibration based under-actuated bounding mechanism. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. 892–897.
- Rosenberger, L., J. 2001.** Pectoral fin locomotion in batoid fishes: undulation versus oscillation. *The Journal of Experimental Biology*, 204:379-394.

- Quinn, R., D., Offi, J., T., Kingsley, D., A., Ritzmann, R., E. 2002.** Improved mobility through abstracted biological principles. IEEE International Conference On Intelligent Robots and Systems, October, Lausanne, Switzerland.
- Salazar, R., Fuentes, V., Abdelkefi, A. 2018.** Classification of biological and bioinspired aquatic systems. *A review Ocean Engineering*, 148: 75-114.
- Steltz, E., Seeman, M., Avadhanula, S., Fearing, R., S. 2006.** Power electronics design choice for piezoelectric microrobots. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 9- 15 October, 2006, Beijing, China, 1322-1328.
- Syme, D. A., Shadwick, R. E. 2011.** Red muscle function in stiff-bodied swimmers: there and almost back again. *Philosophical Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci*, 366:1507-1515.
- Takagi, K., Yamamura, M., Luo, Z.,W., Onishi, M., Hirano, S., Asaka, K., Hayakawa, Y. 2006.** Development of a rajiform swimming robot using ionic polymer artificial muscles. IEEE International Conference On Intelligent Robots and Systems, 9- 15 October, Beijing, China.
- Villanueva, A., Smith, C., Priya, S. 2011.** A biomimetic robotic jellyfish (Robojelly) actuated by shape memory alloy composite actuators. *Bioinspiration & Biomimetics*, 6 (3), 036004.
- Wake, D., B., Koo, M., S. 2018.** Amphibians. *Current Biology*, 28 (21), R1237-R1241.
- Xing, H., Guo, S., Shi, L., He, Y., Su, S., Chen, Z., Hou, X. 2018.** Hybrid locomotion evaluation for a novel amphibious spherical robot. *Applied Science*, 8(156): 1-24.
- Yokoyama, T., Chen, M. C. 1998.** Vibration analysis of edge- cracked using a line-spring model, *Engineering Fracture Mechanics Elsevier Science*, pp. 403-409.
- Yu, X., Lida, F. 2014.** Minimalistic models of an energy-efficient vertical-hopping robot. *IEEE Transactions and Industrial Electronics*, 61(2):1053-1062.
- Yu, J., Senior Member. 2016.** Design and control of a single - motor- actuated robotic fish capable of fast swimming and maneuverability. *IEEE/Asme Transactions on Mechatronics*, 21(3), 1711-1719.
- Zhang, S., Liaang, X., Xu, L., Xu, M. 2013.** Initial development of a novel amphibious robot with transformable fin-leg composite propulsion mechanisms. *Journal of Bionic Engineering*, 10: 434-445.
- Zhong, B., Zhang, S., Xu, M., Zhou, Y., Fang, T., Li, W. 2018.** On a CPG-based hexapod robot: AmphiHex- II with variable stiffness legs. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 23(2): 542-551.