



**SU YÜZEYİNDE TİTREŞİME DAYALI HAREKET İLE  
GİDEBİLEN YENİ BİR ROBOT TASARIMI**

**Ahmed Burak TAPAN**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SU YÜZEYİNDE TİTREŞİME DAYALI HAREKET İLE GİDEBİLEN YENİ  
BİR ROBOT TASARIMI**

**Ahmed Burak TAPAN**  
0000-0001-8696-9741

Doç. Dr. Murat REİS  
0000-0001-5853-488X  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2019

## TEZ ONAYI

Ahmed Burak TAPAN tarafından hazırlanan “SU YÜZEYİNDE TİTREŞİME DAYALI HAREKET İLE GİDEBİLEN YENİ BİR ROBOT TASARIMI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç. Dr. Murat REİS  
0000-0001-5853-488X

**Başkan:** Doç. Dr. Murat REİS  
0000-0001-5853-488X  
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik  
Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Üye** : Doç. Dr. Elif Erzan TOPÇU  
0000-0002-6115-3110  
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik  
Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Nurettin Gökhan ADAR  
0000-0001-6888-5755  
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve  
Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik  
Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN  
Enstitü Müdürü

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

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**12/09/2019**

**Ahmed Burak TAPAN**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### SU YÜZEYİNDE TİTREŞİME DAYALI HAREKET İLE GİDEBİLEN YENİ BİR ROBOT TASARIMI

**Ahmed Burak TAPAN**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Doç. Dr. Murat REİS

Bu çalışmada, titreşime dayalı hareket aracılığı ile ilerleyebilen yeni bir amfibi robot tasarımı tanıtılmaktadır. Tasarım daha önceden geliştirilmiş ve titreşime dayalı hareketi test edilmiş bir karasal robot örnek alınarak yapılmıştır. Bu robot yapısı, U şeklinde elastik kavisli bir giriş ile omurganın merkezine monte edilmiş ve tüm robotun serbest titreşim yapmasına neden olan küçük dönen bir kütlede oluşmaktadır. Mekanizma serbest titreşime dayalı zıplama yaparak ilerleme davranışı göstermektedir. Yeni tasarlanan robotun karasal zeminde ve su yüzeyinde zıplama yaparak enerji verimli bir şekilde ilerlemesi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Farklı titreşim frekanslarının mekanizmanın ilerleme hızına ve yer değiştirme maliyetine (CoT) etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca deneyler yarı eliptik ve üçgen ayak modellerinde üretilen altı farklı ayak yapısı için de tekrarlanmış ve ayak modellerinin karasal ve sucul ilerlemelerdeki performansı tartışılmıştır. Tasarlanmış robot için elde edilen yer değiştirme maliyeti literatürdeki bazı robotlar ve canlıları ile karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Amfibi robot mekanizması, Titreşime dayalı ilerleme, Enerji verimli ilerleme, Farklı ayak modelleri ile ilerleme

**2019, ix + 54 sayfa.**

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

**A NOVEL ROBOT DESIGN OF VIBRATION BASED LOCOMOTION ON WATER SURFACE**

**Ahmed Burak TAPAN**

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

**Supervisor:** Assoc. Prof. Dr. Murat REİS

In this study, a novel amphibious robot design which has vibration based locomotion is presented. The design was done by using an example of a terrestrial robot based on vibration that was previously developed and tested. This robot structure consists of a U-shaped elastic curved beam and a small rotating mass, mounted on the center of the spine, that induces free vibration of the entire robot body. The mechanism exhibits hopping locomotion behavior based on free vibration. The energy efficient hopping locomotions of the newly designed robot both on terrestrial and water surfaces were successfully accomplished. The effect of different vibration frequencies on the locomotion velocity and the Cost of Transport (CoT) of the mechanism were investigated experimentally. In addition to these, experiments were also repeated for six different foot structures produced in semi-elliptic and triangular models, and the locomotion performance of foot models both on terrestrial and water surfaces was discussed. The Cost of Transport of the designed robot was compared with that of some robots and creatures in the literature.

**Key words:** Amphibious robot mechanism, Vibration-based locomotion, Energy efficient locomotion, Locomotion with different foot models  
**2019, ix + 54 pages.**

## TEŐEKKÖR

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

Ayrıca, bugüne kadar bana her türlü desteği sağlayan aileme içtenlikle teşekkür ederim.

Ahmed Burak TAPAN

12/09/2019



## İÇİNDEKİLER

|   | Sayfa |
|---|-------|
| ÖZET.....   | i     |
| ABSTRACT.....   | ii    |
| TEŞEKKÜR.....   | iii   |
| İÇİNDEKİLER .....   | iv    |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....  | v     |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....  | vii   |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....   | ix    |
| 1. GİRİŞ .....  | 1     |
| 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....   | 6     |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM .....   | 15    |
| 3.1. Amfibi İlerleme Mekanizması .....  | 15    |
| 3.1.1. Karasal İlerleme Modeli.....   | 16    |
| 3.1.2. Sucul İlerleme Modeli.....   | 20    |
| 3.2. Deneysel Düzenek ve Deneyin Yapılışı.....  | 23    |
| 4. BULGULAR .....   | 25    |
| 5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....  | 41    |
| KAYNAKLAR .....   | 44    |
| EKLER .....   | 48    |
| EK 1. İlerleyebilme yeteneğine sahip günümüz robotlarının tarihsel gelişimi.....  | 49    |
| EK 2. U- şeklindeki elastik çubuğun karasal ilerleme hareketi için burulma ve boyuna rezonans frekanslarının eldesi ..... | 51    |
| EK 3. Mekanizmanın eliptik ve üçgen ayak modellerine sahip ayak yapıları ile birlikte su üzerindeki görünümleri .....     | 53    |
| ÖZGEÇMİŞ .....  | 54    |



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

| Simgeler             | Açıklama  |
|----------------------|---|
| $t$                  | Zaman (s)   |
| $x, y$               | Yatay ve düşey koordinatlar (m)   |
| $\ddot{x}, \ddot{y}$ | İvmenin yatay ve düşey bileşenleri ( $m/s^2$ )                          |
| $x_f, x_h$           | Ön ve arka ayakların yatay konumları (m)                                |
| $y_f, y_h$           | Ön ve arka ayakların düşey konumları (m)                                |
| $m_{top}$            | Mikro dc motor, dişli ve omurganın toplam kütlesi (kg)                  |
| $m_f, m_h, m_R$      | Ön, arka ayakların ve sarkacın kütleleri (kg)                           |
| $V_f, V_h$           | Ön ve arka ayakların hacimleri ( $m^3$ )                                |
| $M$                  | Robotun toplam kütlesi (kg)   |
| $P$                  | Güç (Watt)  |
| $I$                  | Akım (Amper)  |
| $V$                  | Gerilim (Volt)  |
| $a$                  | Elastik çubuğun et kalınlığı (m)  |
| $b$                  | Elastik çubuğun genişliği (m)   |
| $L_h$                | Sırt genişliği (m)  |
| $L_v$                | Ön ve arka bacak boyları (m)  |
| $L_0$                | Yüksüz durumda bacakların boyları (rad)                                 |
| $L_p$                | Poliüretan ayak boyu (m)  |
| $R$                  | Sarkaç yarıçapı (m)   |
| $\theta_f, \theta_h$ | Ön ve arka bacakların salınım esnasındaki sapma açıları (rad)           |
| $\theta_0$           | Yüksüz durumda bacakların açısı (rad)                                   |
| $\beta$              | Sarkacın yer ile yaptığı açı (rad)                                      |
| $\beta_0$            | Sarkacın başlangıçta yer ile yaptığı açı (rad)                          |
| $k_\theta, d_\theta$ | Burulma sertliği ve sönüm sabiti (Nm/rad, Nsm/rad)                      |
| $k_L, d_L$           | Boyuna sertlik ve sönüm sabiti (N/m, Ns/m)                              |
| $\omega$             | Sarkacın dönme açısal hızı veya açısal frekansı (rad/s)                 |
| $\omega_\theta$      | U-şeklindeki elastik çubuğun burulma rezonans frekansı (1/s)            |
| $\omega_L$           | U-şeklindeki elastik çubuğun boyuna rezonans frekansı (1/s)             |
| $F$                  | Dönen kütlelerin oluşturduğu merkezci kuvvet (N)                        |
| $v$                  | Robotun ilerleme hızı (m/s)   |
| $\mathbf{a}_A$       | Sucul model için robotun ivmesi ( $m/s^2$ )                             |
| $\mathbf{a}_B$       | Sucul model için sarkacın ivmesi ( $m/s^2$ )                            |
| $E$                  | Elastisite modülü ( $N/m^2$ )   |
| $g$                  | Yerçekimi ivmesi ( $m/s^2$ )  |
| $F_w$                | Suyun kaldırma kuvveti (N)  |
| $D_w$                | Suyun direnci (N)   |
| $d_f, d_h$           | Sucul ilerlemede ileri ve geri yönlerde hidrodinamik direnç katsayıları |
| $k$                  | Suya batma miktarı ile lineer değişmeyen katsayı                        |
| $n, m$               | Non-lineer üst değerleri  |
| $\mathcal{L}$        | Lagrangian (J)  |

## Kısaltmalar Açıklama

CoT Canlılar ve makineler için yer değiştirme verimliliğini ölçmek için kullanılan birimsiz bir büyüklüktür.  $(CoT = \frac{P}{mgv} = \frac{VI}{mgv})$



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

|  |    |
|--|----|
| Şekil 1.1. Çeşitli hareket modelleri için tasarlanmış ilerleyebilen robot örnekleri.....   | 2  |
| Şekil 1.2. Amfibi canlı çeşitleri: (a) kurbağa, (b) semender, (c) sürüngen.....  | 3  |
| Şekil 3.1. Amfibi ilerleme mekanizmasının karada ve su yüzeyinde fotoğrafları.....   | 15 |
| Şekil 3.2. Basitleştirilmiş karasal ilerleme modeli.....   | 18 |
| Şekil 3.3. Basitleştirilmiş sucul ilerleme modeli.....   | 21 |
| Şekil 3.4. Sucul ilerleme modeli için serbest cisim diyagramları.....  | 21 |
| Şekil 3.5. Ölçümlerin gerçekleştirildiği deneysel düzenek.....   | 23 |
| Şekil 4.1. Karasal ve sucul ilerleme hızlarının sarkacın açısız frekansı ile değişimi.....   | 25 |
| Şekil 4.2. Karasal ve sucul yer değiştirme maliyetlerinin (CoT) sarkacın açısız frekansına bağlı değişimi.....                         | 26 |
| Şekil 4.3. Çeşitli mekanizmalar ve biyolojik organizmalar için vücut kütlelerine göre yer değiştirme maliyeti (Tucker diyagramı). .... | 28 |
| Şekil 4.4. Poliüretan ayak modelleri; (a) eliptik ayak modeli, (b) üçgen ayak modeli...  | 29 |
| Şekil 4.5. Farklı ayak modellerinin fotoğrafı.....   | 29 |
| Şekil 4.6. 4 mm eliptik ayak için karasal ve sucul ilerleme hızlarının açısız frekansa bağlı değişimi.....                             | 30 |
| Şekil 4.7. 4 mm eliptik ayak için karasal ve sucul yer değiştirme maliyetlerinin açısız frekansa bağlı değişimi.....                   | 30 |
| Şekil 4.8. 12 mm eliptik ayak için karasal ve sucul ilerleme hızlarının açısız frekansa bağlı değişimi.....                            | 31 |
| Şekil 4.9. 12 mm eliptik ayak için karasal ve sucul yer değiştirme maliyetlerinin açısız frekansa bağlı değişimi.....                  | 31 |
| Şekil 4.10. Eliptik ayak yapıları için karasal ilerleme hızlarının açısız frekansa bağlı değişimi.....                                 | 32 |
| Şekil 4.11. Eliptik ayak yapıları için sucul ilerleme hızlarının açısız frekansa bağlı değişimi.....                                   | 32 |
| Şekil 4.12. 4 mm üçgen ayak için karasal ve sucul ilerleme hızlarının açısız frekansa bağlı değişimi.....                              | 33 |
| Şekil 4.13. 4 mm üçgen ayak için karasal ve sucul yer değiştirme maliyetlerinin açısız frekansa bağlı değişimi.....                    | 33 |
| Şekil 4.14. 8 mm üçgen ayak için karasal ve sucul ilerleme hızlarının açısız frekansa bağlı değişimi.....                              | 34 |
| Şekil 4.15. 8 mm üçgen ayak için karasal ve sucul yer değiştirme maliyetlerinin açısız frekansa bağlı değişimi.....                    | 34 |
| Şekil 4.16. 12 mm üçgen ayak için karasal ve sucul ilerleme hızlarının açısız frekansa bağlı değişimi.....                             | 35 |
| Şekil 4.17. 12 mm üçgen ayak için karasal ve sucul yer değiştirme maliyetlerinin açısız frekansa bağlı değişimi.....                   | 35 |
| Şekil 4.18. Üçgen ayak yapıları için karasal ilerleme hızlarının açısız frekansa bağlı değişimi.....                                   | 36 |
| Şekil 4.19. Üçgen ayak yapıları için sucul ilerleme hızlarının açısız frekansa bağlı değişimi.....                                     | 37 |
| Şekil 4.20. Üçgen ayak yapıları için karasal yer değiştirme maliyetlerinin açısız frekansa bağlı değişimi.....                         | 37 |
| Şekil 4.21. Üçgen ayak yapıları için sucul yer değiştirme maliyetlerinin açısız frekansa bağlı değişimi.....                           | 38 |

|  |    |
|--|----|
| Şekil 4.22. 4 mm ve 12 mm üçgen model ayak yapılarının sucul ilerleme esnasındaki fotoğrafları.....  | 38 |
| Şekil 4.23. Üçgen model ayak yapıları için sucul ve karasal ilerlemelerde en düşük yer değiştirme maliyet değerleri.....                       | 39 |
| Şekil 4.24. Eliptik model ayak yapıları için sucul ve karasal ilerlemelerde en düşük yer değiştirme maliyet değerleri.....                     | 39 |
| Şekil 4.25. Mevcut mekanizmada 12 mm üçgen ayak kullanılması sonucu düşen sucul yer değiştirme maliyetinin Tucker diyagramında gösterimi ..... | 40 |
| Şekil E.2.1. Elastik kirişin (a) burulma ve (b) boylamasına titreşimlerinin abartılı bir gösterimi .....                                       | 51 |



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

|   |    |
|---|----|
| Çizelge 3.1. Mekanizma ön modelinin boyutları ..... | 16 |
|---|----|

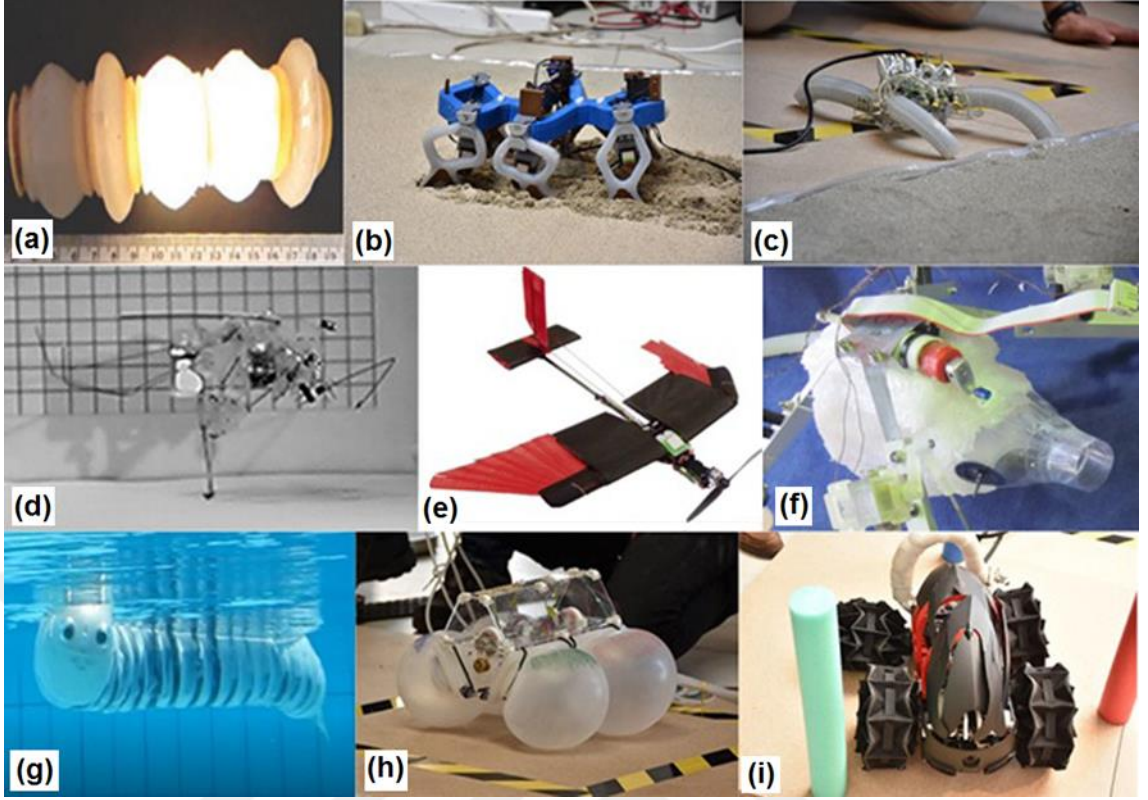


## 1. GİRİŞ

Robotların özellikle insanlar ve canlılar için riskli olabilecek bölgelerde kullanılabilmesi, onların ilerleyebilme kabiliyetine sahip olmasını gerektirmektedir. Bu durum, robotların ilerleyebilme kabiliyetleri üzerine araştırmaların artmasına neden olmuştur/olmaktadır. alışmalara ilk olarak robotların hareket kabiliyetlerini arttıran ve sınırlayan temel prensipler üzerinde araştırmalar yapılarak başlanmıştır. Basitleştirilmiş teorik modeller ve sahip olunan teknolojiler kullanılarak hareketli robot sistemleri üretilmiş ve kontrollü laboratuvar ortamlarında robotların ilerlemesi gerçekleştirilmiştir.

Ancak ilk robotlar, hayvanların yaptığı gibi farklı doğal ortamlarda bağımsız ve verimli bir şekilde koşabilen, manevra yapabilen mekanizmalara sahip değildi. Bunların yanı sıra, operasyonel ve askeri alanda kullanılacak robotlar her türlü zorlu koşullara dayanabilen, farklı ortamlara göre davranabilen ve engelleri aşabilen mekanizmalara sahip olması gerekmektedir. Bu durum hayvanların hareket mekanizmaları üzerine çalışmaların artmasına ve hayvanların kas hareketlerini taklit ederek ilerleme yapabilen mekanizmalara sahip robotların geliştirilmesine yol açmıştır. Bu tür çalışmalar, robotların ilerlemesinde çok önemli olan mekanik, geometrik ve sistemi harekete geçirme özelliklerinin yanı sıra optimum performans üzerine de bilgi edinmemizi sağlamıştır. Çünkü biyolojik sistemler robotik sistemlerden daha evik olmakla birlikte, daha verimli olarak ilerleyebilmektedir. İlerleme esnasında robotun enerji israfını azaltmak ve onu enerji verimli hale getirebilmek için robot geometrisinde, robotik uzuvların doğal dinamiklerinde ve harekete neden olan motordaki elektrik tüketimini en aza indiren dişli oranlarında optimizasyon yapılmıştır. Bu enerji tasarrufu, gereken yakıt depolama sisteminin ağırlığını ve dolayısı ile robotun yer değiştirme maliyetini azaltmaktadır (Aguilar ve ark. 2016).

Karada, suda ve havada farklı ilerleme modellerine sahip robotların gelişim ve yapım süreçleri Calisti ve ark. (2017) tarafından yapılan bir makalede ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Çeşitli hareket modelleri için tasarlanmış ilerleyebilen robotlara ait bazı örnekler şekil 1.1' de gösterilmiştir.



**Şekil 1.1.** Çeşitli hareket modelleri için tasarlanmış ilerleyebilen robot örnekleri: (a) emekleyerek, (b) yürüyerek, (c) yürüyerek ve emekleyerek, (d) zıplayarak, (e) uçarak, (f) kanat hareketi yardımı ile uçarak, (g) yüzerek, (h) titreşime dayalı hareket ederek ve (i) tekerlek yardımı ile ilerleyebilen robotlar

Karasal ve sucul robotların yanı sıra hem karada hem de suda hareket kabiliyetine sahip robotlara amfibi robotlar denilmektedir. Bir amfibi robot, kendisinin karada ve suda ilerleyebilmesini sağlayacak uygun hareket mekanizmasına sahip olması gerekmektedir. Bu özelliğinden dolayı amfibi robotlar daha belirgin kullanım alanlarına sahiptirler. Bir örnek olarak, Mart 2011 tarihinde Fukushima Nükleer Santrali'nde meydana gelen kaza sonrası bölgede halen canlılar için çok tehlikeli radyasyon seviyesi mevcuttur. 2021' de başlayacak bölgeyi temizleme programı öncesinde, reaktör havuzu içerisinde etrafa yayılmış nükleer yakıtın tespiti amacı ile Toshiba firması tarafından *Little Sunfish* isimli bir amfibi robot üretilmiştir. Bu robot reaktöre bir uzaktan kumanda sistemi ile gönderilerek, reaktör havuzu içerisine girmiş ve yakıtın mevcut durumunu tespit ederek 15 saat video kaydı gerçekleştirmiştir. Ayrıca temizleme çalışmalarında da amfibi robotlar kullanılması düşünülmektedir.

Amfibi canlılar hem karada hem de suda hareket ve yaşam yeteneğine sahip hayvanlardır. Antarktika dışında Dünya'nın her yerinde bulunurlar ve yumurta-larva-yetişkin yaşam döngüsüne sahiptirler. Yumurtalarını suyun içerisine bırakırlar. Kabukları veya zarları olmayan, suya dayanıklı olan yumurtalardan larva olarak çıkarlar. Larva halinde uzuvları olmadan suda solungaçları ile oksijen alarak yaşadıkları sucul dönem içerisinde, solungaçlar yavaş yavaş yok olur ve bacaklar büyümeye başlar. Sonunda, akciğer veya derisi ile hava soluyabilen karada yaşamaya uygun bir yetişkin formuna geçerler. Sucul dönemdeki kurbağalara iribaş adı verilir. Amfibiler genellikle pürüzsüz ve çıplak bir cilde sahiptir. Derilerinde bulunan mukus salgı bezleri nedeniyle ciltleri daima nemlidir, salgılanan sıvı hayvanı bakteriler ve mantar enfeksiyonlarından korur. Amfibiler soğukkanlı hayvanlardır. Kendi vücut ısısını üretemezler, bu nedenle vücut sıcaklıkları ortam sıcaklığına bağlı olarak değişir. Aşırı güneş ve rüzgâr hayvanın derisinin kurumasına ve ölmesine neden olur. Çevre şartları değiştiğinde ilk yok olan canlılar amfibilerdir.

Amfibi canlılar kendi aralarında üçe ayrılırlar: Anura (kurbağalar), Caudata (semenderler), ve Gymnophiona (sürüngenler). AmphibiaWeb' in güncel veritabanına göre 8,043 amfibi canlı türü bulunmaktadır (Temmuz, 2019). Bunlardan 7,100 tanesini kurbağalar (%88), 731 tanesini semenderler (%9) ve 212 tanesini de sürüngenler (%3) oluşturmaktadır (Anonim 2019a).



**Şekil 1.2.** Amfibi canlı çeşitleri: (a) kurbağa, (b) semender, (c) sürüngen

Kurbağalar kuyruksuz amfibileri içeren Anura çeşidine aittir. Antarktika dışında tüm kıtalarda ve ortamlarda yaşayabilen en çok türü olan amfibilerdir. Kısa gövdeli, boynu yok denecek kadar küçük ve gelişmiş bacakları olan bir hayvandır. Büyük ve kaslı arka bacaklarından dolayı diğer dört ayaklı amfibilerden farklıdır. Güçlü arka bacakları ön



bacaklardan 2-3 kat daha büyüktür, yüzmelerini ve çok yükseklere zıplayabilmelerini sağlar. Rana Dalmatina adı verilen kurbağa üç metrelik zıplamalar yapabilir. Ergen dönemlerinde kuru ortamlarda yaşamaya adapte olan kara kurbağaları vardır. Kurbağalar, iyi gelişmiş seslere sahipken, diğer iki amfibi çeşidi ancak öksürük ve homurdanma gibi sesler çıkartabilir.

Semenderler ikinci en fazla türe sahip, görünür kuyruklu amfibileri içeren Caudata çeşidine aittir. Genellikle ılıman bölgelerde yaşarlar. Başlıca ayırt edici özellikleri uzun gövdeli, uzun kuyruklu ve genellikle zayıf bacaklara sahip olmasıdır. Sadece birkaç karasal semender kertenkele gibi hızlı koşabilir ve kuyruklarını beşinci ayak gibi kullanarak zıplayabilir. Bilinen en büyük amfibi, iki metre uzunluğa kadar ulaşabilen Çin'deki Dev Salamander *Andrias Davidianus*' tur. Farklı semender türleri yaşamlarının çeşitli evrelerinde farklı şekilde nefes alırlar. Siren semenderleri, yaşamları boyunca nefes almak için solungaçları kullanırken, kaplan semenderleri sadece sucul dönemde solungaçları ile ergenlik döneminde ise gelişen akciğerleri ile nefes alırlar. Çoğu semender yok olan solungaçları ve gelişmeyen ciğerleri nedeni ile ağız ve boğazında bulunan deriler ve zarları kullanarak nefes alır.

Üçüncü amfibi çeşidi *Gymnophiona*'lardır. Bacaksız, ince, uzun ve halkalı yapıya sahip olup, solucan ve yılan benzeri sürüngendirler. Sadece tropikal veya yarı-tropikal bölgelerde yaşarlar. Diğer amfibilere kıyasla daha ilkel bir vücut yapıları vardır. Sert kemikli kafatası içeren kafaları ile toprağa kolaylıkla oyuk açabilirler. Karasal sürüngenin derisi keratinize deri kıvrımlardan oluşur oysa amfibi sürüngenlerin derileri daha çok balıklara benzer ve mineralize nodüller ile kaplanmış lif tabakalarından oluşur. Burun deliği ile gözleri arasında bulunan ve kimyasal sensör işlevi gören benzersiz bir duyu organına sahiptirler. Amfibi robotlar üzerine çalışan araştırmacılar, amfibi canlıların vücut yapıları ve hareket yeteneklerinden ilham almaktadırlar.

Bu tez çalışmasında, daha önceden geliştirilmiş olan ve katı zeminler üzerinde titreşime dayalı hareket sonucu ilerleyebilen bir karasal robotun, aynı hareket yöntemi ile su yüzeyinde de verimli bir şekilde ilerleyebilen bir amfibi robot olduğu gösterilmiştir. Bu amaçla, elastik mekanizmanın su üzerinde de ilerleyebilmesine olanak sağlayacak şekilde

gerekli değişiklikler yapılmıştır. Basit bir sarkaç tarafından titreşime zorlanan elastik mekanizmanın karada ve su üzerinde gerçekleştirdiği ilerleme hareketleri incelenmiştir. İlerlemeye etki eden tasarım değişkenlerini ve etkilerini belirlemek için kara ve su için iki farklı fiziksel model geliştirilmiştir.

Tezin yazım aşamaları şu şekilde yapılandırılmıştır; Kaynak Araştırması bölümünde, karasal ve sucul robotlar tanıtılmakta ve ilerleme mekanizmaları ile ilgili yapılan çalışmalar verilmektedir. Ayrıca hem karada ve hem de suda ilerleyebilme kabiliyetine sahip amfibi robotlar tanıtılmakta ve bu konuda yapılan çalışmalardan örnekler verilmektedir. Materyal ve Yöntem bölümünde üzerinde çalıştığımız elastik ilerleme mekanizmasının genel tanıtımı, tasarım parametreleri, karasal ve sucul ilerleme modelleri ile mekanizmanın karasal ilerlemesinde etkili olan rezonans frekansları ve sucul ilerleme hareketini ifade eden eşitlikler verilmektedir. Sonrasında, deney düzeneği tanıtılarak deneyin yapılışı anlatılmaktadır. Bulgular bölümünde, yapılan deneyin sonuçları verilmekte ve bu sonuçların değerlendirilmesi yapılmaktadır. Tartışma ve Sonuç bölümünde ise genel değerlendirmeler ve mevcut çalışmanın sonuçlarından yola çıkarak gelecekte yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmektedir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Temel olarak robotların ilerleyebilmesi; bünyesinde bulundurduğu mekanizmayı kullanarak kendisini bir yerden başka bir yere taşıyabilmesi şeklinde tanımlanabilir. Ancak bu ilerlemenin az enerji tüketilerek düşük maliyetle gerçekleşmesi istenir. Yer değiştirme enerji maliyeti ya da kısaca yer değiştirme maliyetini (Cost of Transport), bir kütlenin bir yerden başka bir yere taşınmasındaki enerji verimliliği belirler. Çeşitli canlılar ve makinelerin karada, suda ve havada birim kütle başına minimum yer değiştirme maliyetleri boyutsuz birer sayı olarak hesaplanmış ve sonuçlar ilk olarak Tucker tarafından bir diyagram üzerinde gösterilmiştir (Tucker 1975).

Tekerleğin icadı ile insanoğlu karasal ilerlemenin oldukça verimli bir yolunu bulmuştur. Ancak tekerlekli araçların ulaşamadığı farklı ortamlarda ilerleme ihtiyacı bilim insanlarını canlıları taklit eden ilerleme mekanizmaları geliştirmeye zorlamıştır. Zira dünya yüzeyinin çok küçük bir bölümü tekerlekli araçların ulaşımına uygun iken bacak fizyolojisine bağlı olarak canlılar dünya yüzeyinin neredeyse tamamına ulaşabilmektedir. Günümüzde robotlar canlıları taklit eden yürüme, koşma, sıçrama ve yüzme gibi farklı yer değiştirme hareketlerini yapabilmektedirler. Ancak günümüz robotları bu yer değiştirme hareketlerini yüksek enerji tüketerek gerçekleştirebilirken, canlılar çok daha az kontrol girdisi ve enerji kullanarak daha karmaşık fakat kararlı yer değiştirme hareketleri yapabilmektedir. Bunun yanı sıra bacaklı robotlar tekerlekli robotlara göre oldukça yüksek enerji tüketim değerlerine sahiptir. Bu nedenle düşük enerji tüketim değerlerine sahip robotlar geliştirmek için hayvan hareketinin prensiplerini anlamak oldukça önemlidir. Bu konuda yapılan çalışmalar özellikle hayvanların yürüyüş biçimlerine bağlı olarak yer değiştirme esnasında tükettikleri enerjiye odaklanmıştır (Kar ve ark. 2003, Armour ve ark. 2007, Zhang ve ark. 2016, Hanan ve ark. 2018, Kelasidi ve ark. 2018). Robotların ilerleme hareketleri üzerine yapılan çalışmalar esas olarak hayvanların hareketlerinin detaylı bir şekilde incelenmesi ve bu hareketlerin fiziksel modellerinin ortaya konulması şeklinde olmuştur (Alexander 2006).

Pasif dinamik yürüme veya koşma hareketi yapabilen robotlar, diğerlerine göre daha az kontrol girdisine ihtiyaç duyarlar ve daha az enerji tüketimi ile hareketlerini

gerçekleştirirler. Bu tür robotlar herhangi bir hareket sağlayıcı motor veya kontrol birimi olmaksızın daha doğal yürüme yapabildikleri için insan ve hayvanların ilerlemeleri için kullanışlı bir model olarak gösterilebilirler (McGeer 1990, Collins ve ark. 2005, Owaki ve ark. 2010). Çünkü, bir sistemin şekil, sertlik, sürtünme, ağırlık dağılımı gibi yapısal özelliklerinden yararlanarak onun kontrol tasarımını basitleştirmek ve enerji verimli ilerleyişini sağlamak mümkündür. Bu durum herhangi bir tahrik sistemi olmadan yokuş aşağı yürüyebilen bir pasif dinamik yürüyücü robot kullanılarak gösterilmiştir (McGeer 1990). Daha sonra eğimde koşu hareketini insan koşmasına benzer enerji verimli bir şekilde yapabilen pasif dinamik koşu mekanizmalarına sahip robotlar geliştirilmiştir. Ancak bu robotların ortak bir özelliği hareketlerinde çevreye olan aşırı bağımlılıkları ve davranışsal çeşitlilik eksikliği olmuştur (Owaki ve ark. 2010).

Zıplayarak ilerleme hareketi, hayvanlar tarafından özellikle yüksek hızlara ihtiyaç duyulduğunda kullanılmaktadır. Hayvanlar ayrıca hareket kabiliyetlerini arttırabilmek için vücut uzuvlarının sertliğini ve şeklini değiştirmektedirler. Zıplayan robotlar üzerine yapılan çalışmalarda, özellikle zıplama ve ilerleme hareketleri esnasındaki sertlik ve şekil değiştirebilme yetenekleri üzerine araştırmalar yapılmaktadır (Kühnel ve ark. 2016). Zıplayan robotlar ile ilgili ilk çalışmalar 1980 'lerde MIT Bacak Laboratuvarı'nda (Leg Laboratory) yapılmaya başlanmıştır (Raibert 1986). Bu çalışmalar sonucunda bacakları üzerinde zıplayarak iki ve üç boyutlu hareketler yapabilen robot mekanizmaları geliştirilmiş, ancak bu mekanizmalar karmaşık yapıları ve aşırı enerji tüketim değerleri nedeniyle kendilerine kullanım alanı bulamamıştır. Sadece uygun şekilde tasarlanmış elastik uzuvlu mekanizmalar, doğal titreşim davranışları manipüle edilerek daha düşük yer değiştirme maliyetine sahip bacaklı robotların geliştirilmesine imkân sağlamaktadır (Yu ve Iida 2014, Geyer ve ark. 2005).

Robotlarda elastik uzuv kullanımı enerji verimliliği beraberinde bir dizi kontrol güçlüğü problemi getirmektedir. Bu güçlük elastik uzuvların doğal frekansı ile robotun periyodik ilerleme hareketinin frekansları örtüşürülerek giderilebilmektedir. Reis ve ark. (2011, 2013, 2014) tarafından doğal titreşim modlarını kontrol girdisi olarak kullanarak yürüme, koşma, sürünme, zıplama hareketlerinin her birini gerçekleştirebilen ve oldukça düşük enerji tüketimine sahip elastik bir ilerleme mekanizması geliştirilmiştir. Elastik cisimlerin

doğal gövde dinamiklerini kullanmak, zıplama yaparak ilerleme esnasında çarpma ve sönümleme kayıplarını azaltmaktadır. Ayrıca elastik gövdenin titreşimi, rezonans frekanslarında çok daha az bir güç ile sağlanabilmektedir. Bununla birlikte son yıllarda elastik uzuvlu pek çok robotik sistem üzerine çalışmalar yapılmıştır. Örneğin Bhatti ve ark. (2017) tek ayaklı ve elastik uzuvlu bir hidrolik robot için sıçrama yüksekliği, adım uzunluğu ve dolayısı ile uçuş süresini değiştirebilecek basit ama etkili bir kontrol ünitesi geliştirmiştir.

İlerleyebilme yeteneğine sahip karasal robotların gelişimi tarihsel süreçte incelediğinde (bakınız Ek 1), 1940 yılında üretilen ilk ilerleyebilen robot *Machina Speculatrix*' den insansı görünüme sahip günümüz robotları *Asimo* ve *Sofia*' ya kadar tasarım ve üretim teknolojisinde büyük bir aşama kaydedildiği görülmektedir. Karasal robotlarda olduğu gibi sucul robotların da ilerleme hareketleri üzerine yapılan çalışmalarda, suda yaşayan canlıların hareketlerinin incelenmesi ve fiziksel modellerinin ortaya konulması efektif sucul robotların geliştirilmesinde önemli bir yere sahip olmuştur (Salazar ve ark. 2018). Ancak suda ilerleme mekanizmasına sahip robotların geliştirilmesi ve üretilmesi, ilerleyebilen karasal robotlar kadar kolay olmamıştır. Yeni teknolojilerle birlikte, farklı ilerleyebilme mekanizmalarına sahip sucul robotların gelişimi son yıllarda hız kazanmıştır.

Suda ilerleme mekanizmaları genel olarak dört ana gruba ayrılabilir. Bunlardan birincisi, su tabanı ile temas halinde olarak ilerleme şeklidir. Yengeç, ıstakoz ve ağır su altı hayvanlarının su tabanında yürüyerek ilerlemesi bu şekildedir. Robotların ilerlemesi ilk olarak, karasal ilerleme mekanizmasına sahip robotların su tabanında kullanılması ile gerçekleştirilmiştir. Ancak enerji verimli bir ilerleme elde edebilmek için, hayvanların su tabanında ilerleme hareketlerinden yola çıkılmış ve su altında emekleme, yürüme ve sürünme mekanizmasına sahip robotlar üretilmiştir (Albitar ve ark 2014, Kwak ve Bae 2018). Bu tür robotlar genellikle su altı temizleme robotları olarak kullanılmaktadır.

İkinci ilerleme şekli ise su altında ancak su tabanına temas etmeyecek şekilde gerçekleşen ilerlemedir. Balıklar ve denizaltılar bu şekilde ilerler. Balıklarda ilerleme, genellikle yüzgeçlerin hareket ettirilmesi sonucu gerçekleşir. Kuyruk bölgesinde, yanlarda, sırt ve

göğüs bölgesinde yüzgeçlere sahip olan çok yüzgeçli kirpi balığı detaylı incelenerek, farklı yerlerde bulunan yüzgeçlerin su altında ilerlemeye etkisi ortaya konmuştur (Li ve ark. 2018). Balıklardan ilham alınarak geliştirilen ve birçok uygulama alanına sahip enerji verimli su altı robotları, Scaradozzi ve ark. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada ayrıntılı olarak verilmektedir.

Üçüncü ilerleme şekli, yapının bir kısmının su içerisinde kalan kısmın ise su dışında olduğu ilerleme şeklidir. Gemilerin, insanların ve kuşların suda yüzerek ilerlemesi bu şekildedir. Yüzme esnasında karşılaşılan hidrodinamik kuvvetleri ve yüzücünün gerçek hızını doğru bir şekilde belirlemek için ölçümler yapılarak ayrıntılı deneysel veriler elde edilmiştir. Yüzücünün hızın ve verimliliğin farklı akıntı koşullarında artırılması konusunda çalışmalar yapılmıştır (Takagi ve ark. 2015). Suda bacakları tarafından gerçekleştirilen itme sonucu ilerleyebilen farklı kuş gruplarının iskelet ve kas yapıları incelenmiş ve sucul kuşların tahrik mekanizmasının, su altında itici güç üretmek için fiziksel zorlukları aşmaya uygun yapıda olduğu gözlenmiştir (Clifton ve ark. 2017).

Dördüncü ilerleme şekli ise hafif sucul canlılar ve mikro-robotların su yüzeyinde ve suya batmadan kendilerini iterek, yürüyerek ve zıplayarak yaptıkları ilerleme hareketidir. Sıvılar, molekülleri arasında oluşan güçlü kohezyon kuvveti nedeniyle yüzey gerilimine sahiptir. Yüzey gerilimi, sıvının yüzey katmanının esnek bir zar gibi davranmasına yol açar ve birim uzunluk başına düşen kuvvet olarak tanımlanır. 20°C sıcaklığındaki suyun yüzey gerilim değeri yaklaşık 72.8 dyn/cm' dir. Bu değer, santimetre başına 0.075 g kütlenin oluşturacağı gravitasyonel kuvvete karşılık olup, daha hafif sucul canlıların ve mikro-robotların esnek zarı kırmadan su yüzeyinde kalabileceklerini ifade eder. Suyun yüzey gerilim kuvveti, miligram mertebesinde vücut kütlesine sahip bazı sucul canlılarının ağırlığından yaklaşık on kat kadar daha fazladır. Bu durum sucul böceklerin su yüzeyinde oldukça hızlı hareket etmesine hatta su yüzeyinde zıplamasına imkân sağlar (Koh ve ark. 2015). Dalış sinekleri (Breugel ve Dickinson 2017) ve dalış böcekleri (Whittlesey 2011) olarak adlandırılan hafif su böcekleri ise, yüzey gerilimini kırmaya yetecek kadar kuvvet üretebilirler ve suyun içerisine dalarak yumurtalarını bırakırlar.

*Hemiptera* (yarım kanatlılar) sınıfından *Gerridae- Water striders* böcek ailesine ait su koşucular olarak adlandırılan sucul canlılar, su yüzeyindeki ilerlemeye güzel ve ilginç bir örnektir. Gölet veya akarsularda görülen su koşucular, su yüzeyinde kayma, koşma ve zıplama yaparak ilerleyebilmektedir. Genellikle ince, koyu renkli ve 5 ila 10 mm civarında uzunluğa sahip olan su koşucuların toplamda 751 çeşidi bulunmaktadır. Boyları 25 mm' ye kadar ulaşabilen iri su koşucular da nadir olarak görülmektedir (Henry 2009). Böyle bir su koşucunun ağırlığına sahip çoğu böcek hızla suya batar. Su koşucunun bacakları ise kendi vücut ağırlığının 15 katına kadar batmadan su yüzeyinde kalabilmesini sağlar (Anonim 2019b). Bacaklar, aralarında düzenli boşluklar bulunan binlerce mikroskobik kıl toplulukları ile kaplanmıştır. Mikroskobik kıl toplulukları arasına hapsedilen hava, bacaklarının suya karşı direncini ve su üzerinde durabilme kabiliyeti arttır. Mikroskobik kıllar *süperhidrofobik* denilen suyu üzerinde barındırmama özelliğine sahip olduğundan, bacaklar daima kuru kalır ve kohezyon kuvveti oluşmaz. Bu durum su tutucunun bacağı ile su yüzeyi arasında bir hava yastığı oluşmasına ve su yüzeyinde kayabilme yeteneğini verir (Hu ve ark 2003, Gao ve Jiang 2004). Bacakların ıslanması halinde böcek suya batar ve tekrar yüzeye çıkması oldukça zordur.

Bacakların görevi böceği sadece su üzerinde tutmak ve kaydırmak değil, aynı zamanda böceğin su yüzeyinde hızlı ve enerji verimli bir şekilde ilerlemesini sağlamaktır. Tüm böceklerde olduğu gibi, su koşucuların da üç çift bacağı vardır. Çok daha kısa olan ön bacaklar avın hızlı bir şekilde yakalanmasını sağlar. Orta bacaklar kürek çekme hareketi yaparak böceği ileriye doğru iter. Vücut boyunun iki katına kadar ulaşabilen arka bacaklar en uzun olanlardır. Böceğin hareketine katkıda bulunarak, yön değiştirmesini ve fren yapmasını sağlar (Anonim 2019b). Su koşucuların tahrik mekanizmasının tam olarak anlaşılması uzun bir zaman almıştır (Brinkhurst 1960, Andersen 1976, Caponigo ve Eriksen 1976, Suter ve ark. 1997, Keller 1998, Hu ve ark. 2003, Hu ve Bush 2010, Gao ve Feng 2011). Su koşucular su yüzeyinde kendilerini ilerletmek için Newton' un üçüncü yasası (etki-tepki) gereği, momentumunu sıvıya aktarmalıdır. Momentum aktarımı ortadaki bacakların kürek hareketi yapması sonucu suda oluşan girdaplar ve dalgalar üzerinden gerçekleştirilir. Suter ve ark. (1997) ve Keller (1998) tarafından yapılan deneylerde yüzey gerilimi ve sudaki dalgalanmaların toplam itme kuvvetinin küçük bir kısmını oluşturduğu gözlenmiştir. Su koşucunun dalgalar üzerinden suya transfer

edebileceği yatay momentum, toplam yatay momentumun ancak  $1/3'$  ü olabilmektedir (Buhler 2007). Su koşucuların ardında oluşan girdaplar, itme kuvvetinin ana kaynaklarıdır. Girdapların dinamikleri üzerine yapılan kapsamlı bir deney, girdapların su koşucunun toplam yatay momentumunun %90 kadarını alabildiğini ortaya çıkarmıştır (Akira 2012).

Su koşucuların tahrik mekanizması anlaşılrsa da itme kuvvetinin formülasyonu tam olarak yapılamamış, ancak deneysel olarak büyüklüğü tahmin edilebilmiştir (Hu ve ark. 2007, Akira 2012). Zheng ve ark. (2015) yakın zamanda su koşucuların itilmelerini ifade eden hidrodinamik bir model geliştirmiş ve su koşucular tarafından üretilen girdapların kinematığını açıklamışlardır. Momentum teoremi ve su koşucular ile akışkan arasındaki momentum dengesi gereğince, bacak ivmesi ve girdap hacmiyle ilişkili olan ortalama itme kuvveti formüle edilmiştir. Bir su koşucunun daha büyük bir su girdabı üretmesi sonucu onu daha büyük bir ivme ile geriye doğru itebildiği ve daha büyük bir tepki kuvveti elde edebildiği gösterilmiştir. Bir su koşucu hızını 26 cm/s'den 72 cm/s'ye çıkarırken, hızlanma süresine bağlı olarak akışkan içinde oluşturduğu girdapların su koşucunun momentumunu %64 ile %90 arasında alabildiğini göstermiştir (Zheng ve ark. 2015). Su koşucular, durgun halden saniyeler içerisinde hızlanarak vücut boylarının yüzlerce katı mesafeyi kat edebilirler. Hızları, orta boylu bir insanın saatte 650 km yol almasına eşdeğerdir. Ancak tahrik mekanizmaları gereği su koşucuların bacakları sert yüzeylerde, dolayısı ile karada işe yaramaz hale gelir ve koşamazlar.

Su koşucular tarafından verimli bir şekilde gerçekleştirilen zıplama hareketi mekaniğini anlamak için de çalışmalar sürmektedir. Su koşucular, zıplama esnasında yukarı doğru itme kuvveti oluşturmak için su yüzeyini bacakları ile itmektedirler (Li ve ark. 2005, Hu ve Bush 2010, Burrows 2013). Suyun yüzeyi ile yapılan momentum transferinin temel prensibi kullanılarak, zıplayan bir su koşucu robot üretilmiştir (Koh ve ark. 2015). Robot tasarımında, su koşucunun bacakları ile su yüzeyi arasındaki etkileşmenin basit mekanik modeli kurulmuştur. Su koşucuların optimum zıplama performansı için koşulların tahminini sağlayan teorik bir bacak hareket modeli geliştirilmiştir (Yang ve ark. 2016). Bacak boyutları farklı su koşucu türlerin, su yüzeyinin izin verdiği maksimum zıplama hızına ulaşmak için bacak dönme hızlarını ayarladığı gösterilmiştir. Yapılan bir çalışmada



ise, su koşucuların düz, dalgalı ve köpüklü su yüzeylerden zıplamaları incelenmiştir (Jimenez ve ark. 2017). Dalgalı ve köpüklü yüzeylerden yapılan zıplamalarda kalkış açılarının ve ulaşılan yüksekliklerin azaldığı, harcanan enerjinin ise arttığı gösterilmiştir.

Suyun yüzeyinde hızlı ve enerji verimli bir şekilde yürüebilme (Kashem ve Sufyan 2017) ve koşmaya (Kim ve ark. 2016a) uygun bacak yapısına ve tahrik mekanizmalarına sahip robotların geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca, su yüzeyindeki küçük canlıların hareket tasarım modellerini ve zıplama hareketleri ile ilgili temel mekanizmaları içeren, ilerleme teknolojisinin gelişimine katkıda bulunan bir matematiksel ifade geliştirilmiştir (Kim ve ark. 2017). Su yüzeyinden zıplama, doğada bilinen bir hareket türüdür. Su koşucu (Yang ve ark. 2016), örümcek (Suter 2013), karınca (Yanoviak ve Frederick 2014) ve su kertenkelesi (Floyd ve Sitti 2008) gibi hayvanlar su yüzeyinde hızlanarak zıplayabildiği gibi, su altında kanatlarını kullanarak hızlanan penguen (Au ve Weihs 1980) ve dalgalanma hareketi yaparak hızlanan yunus balığı da (Wilson ve ark. 1992) kendisini sudan yukarıya doğru fırlatabilmektedir. Bu hayvanların zıplama mekanizmaları üzerine yapılan çalışmalarda esas amaç, sucul robotlarda daha enerji verimli bir ilerleme elde etmeye yöneliktir.

Hem karada hem de suda ilerleyebilme özelliğine sahip olan robotlar ile ilgili yapılan çalışmalar oldukça popüler bir araştırma alanı olarak görülmektedir. Perdeli ayak yapısına sahip bacaklı bir karasal robotun, suya girdiğinde ayaklarındaki perdelerini açarak ve suyun yüzey geriliminden yararlanarak, su üzerinde yürüeyebilen bir robota dönüşmesi amfibi robotlara güzel bir örnektir (Kashem ve Sufyan 2017). Amfibi özelliğe sahip küçük hacimli robotlar su yüzeyindeki hareketlerinde suyun yüzey gerilim kuvvetinin yanında kaldırma kuvvetini de kullanmaktadır.

Tahrik sistemi piezo-elektrik malzeme kullanılarak yapılan amfibi mikro robotlar, piezo-mikro robotlar olarak isimlendirmektedir (Steltz ve ark. 2006). Tahrik sisteminin oluşturduğu titreşim ile düz sert zeminlerde ve su yüzeyinde ilerleyebilen piezo-mikro robotlar, yüksek enerji verimine sahiptirler. Piezo-elektrik sistemde elektrik enerjisinin yaklaşık %90' ı mekanik enerjiye dönüşmektedir (Becker ve ark. 2013). Yakın zamanda, karada ve su üzerinde yürüeyebilen ve bu yüzeyler arasındaki geçişi sağlayabilen dört

ayaklı piezo-amfibi mikro robotlar geliştirilmiştir (Chen ve ark. 2018). Bu amfibi mikro robotlar, ilerlemek ve manevra yapmak için ayaklarının üzerine yerleştirilmiş pasif kanatları kullanmaktadır. Bu robotların diğer bir özelliği ise, ayaklarında bulunan elektro ıslanma sistemi yardımı ile su yüzeyinden kontrollü bir dalış yaparak suyun altında inebilmeleri ve su içerisinde de ilerleyebilmeleridir. Ancak mikro-robotlar hafif olmaları nedeni ile oldukça sınırlı uygulama alanına sahiptirler. Bu çalışmalara paralel olarak, esas amacı mikro robotları görev alanına taşımak olan, yük taşıma kapasitesine sahip, daha büyük küresel amfibi robotlar da geliştirilmiştir (Li ve ark. 2015). Bu robotlar, iki çeyrek küresel kabuk ve plastik bir dairesel plakadan oluşan yarım küre biçimindeki amfibi robotlardır. Güncel çalışmalarda bu yapının hız performansını eğimli ve nispeten pürüzsüz yüzeylerde arttırmak amacı ile küresel robotun her ayağına pasif bir tekerlek takılarak paten-kayma hareketi yapması sağlanmıştır (Li ve ark. 2017). Son olarak bir su jeti eklenerek su altında ileriye itilmesi ve yönlendirilmesi sağlanan bu karma yapı, bir hibrit amfibi küresel robot halini almıştır (Xing ve ark. 2018).

Son zamanlarda dikkatleri üzerine çeken amfibi robotlar altı bacaklı bir amfibi robot olan AmphiHex-II (Zhong ve ark. 2018) ve bir vatoz gibi silikon yüzgeçlerini kullanarak hareket edebilen Velox' dur (Anonim 2019c). AmphiHex-II farklı ortamlara adaptasyon sağlayabilmek için tasarlanmış ayarlanabilir ayak sertlikleri ile yüksek ilerleme performansına sahiptir. Velox ise esnek yapıdaki dalgalı tahrik sistemi ile buzlu ya da karlı zeminde bile rahatlıkla ilerleyebilmekte ve aynı zamanda yüzgeçleri sayesinde etkin bir yüzme performansı göstermektedir.

Amfibi robotların birçoğunun hareket ve ilerleme mekanizmaları canlıların hareketlerinden ilham alınarak geliştirilmiştir. Amfibi hayvanların sinir sistemleri incelenmiş ve sinir sistemleri merkezi model jeneratörü ile taklit edilmiştir. Bu şekilde yürüme, solunum ve yüzme gibi hareket modellerini kontrol edebilen bir robot hareket kontrol sistemi geliştirilmiş ve çok ayaklı bir amfibi robota uygulanmıştır (Matsuo ve ark. 2008). Bunun yanında, amfibi kaplumbağalardan ilham alınarak, amfibi küresel bir robot geliştirilmiş (Shi ve ark. 2013) ve bu robot yapısı üzerine yukarıda belirtilen geliştirmeler (Li ve ark. 2015, Li ve ark. 2017, Xing ve ark. 2018) yapılarak, robotun hareket ve ilerleme performansı arttırılmıştır. Suyun üzerinde koşabilme yeteneği ile tanınan basilisk

kertenkelesinden ilham alınarak tasarlanan, altı pedallı amfibi robot (Kim ve ark. 2016b), suda yürüeyebilen ve yüzebilen bir tür kuyruklu kurbağa cinsi semenderden ilham alınarak tasarlanan, dört bacaklı Salamandra robot (Crespi ve ark 2013) ve son olarak, hamamböceğinden ilham alınarak tasarlanan, karma ilerleme mekanizmasına sahip altı bacaklı amfibi robot olan AmphiHex-I (Zhang ve ark. 2013) doğayı taklit eden robot örneklerinin en bilinenleridir.

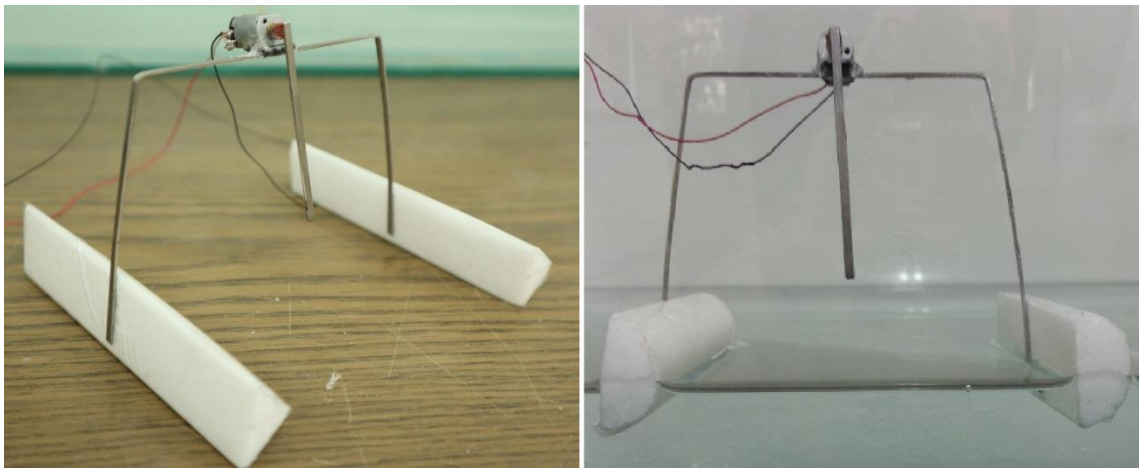


### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, basit bir sarkaç tarafından titreşime zorlanan elastik bir ilerleme mekanizması tanıtılmaktadır. Mekanizmanın tasarım parametreleri, karasal ve sucul ilerleme modelleri ile karasal ilerlemesinde etkili olan rezonans frekansları ve sucul ilerleme hareketini ifade eden eşitlikler verilmektedir. Sonrasında deney düzeneği tanıtılarak deneyin yapılışı anlatılmaktadır.

#### 3. 1. Amfibi İlerleme Mekanizması

Amfibi ilerleme mekanizması, basit bir mikro DC motor, batmaya karşı poliüretan köpükten yapılmış kanat şeklindeki iki duba ayak ve U şekli verilerek bükülmüş elastik bir çubuktan oluşmaktadır. Yay çeliğinden üretilmiş 0.8 mm x 2 mm lama kesite sahip elastik çubuk, robotun bacaklarını ve omurgasını oluşturmaktadır. Omurganın merkezine monte edilmiş mikro motora küçük bir sarkaç bağlanmıştır. Sarkaç robotun tahrik sistemi olup sarkacı tahrik eden mikro motor, 1/90 çevrim oranına sahip plastik bir dişli kutusuna sahiptir. Robotun karada ve su yüzeyinde hareketini sağlayabilmek için çok düşük yoğunluklu malzemeden üretilmiş iki ayak tarafından desteklenmektedir. Yarım elips kesitine sahip poliüretan ayaklar %50 oranında suya batmak suretiyle robotun 7,5 gr'lık kütlelerini statik olarak taşımaktadır. Deneysel için geliştirilen mekanizmanın fotoğrafı Şekil 3.1' de, boyutları Çizelge 3.1' de verilmektedir.



Şekil 3.1. Amfibi ilerleme mekanizmasının karada ve su yüzeyinde fotoğrafları

**Çizelge 3.1.** Mekanizma ön modelinin boyutları

| <b>Değişken</b> | <b>Açıklama</b>                     | <b>Boyut</b>   |
|-----------------|-------------------------------------|----------------|
| $m_{motor}$     | Mikro motorun kütlesi               | 3 gr           |
| $m_f, m_h$      | Ön ve arka ayakların kütlesi        | 0,4 gr, 0,4 gr |
| $m_R$           | Sarkacın kütlesi                    | 0,7 gr         |
| $M$             | Robotun toplam kütlesi              | 7,5 gr         |
| $L_v$           | Ön ve arka bacakların uzunlukları   | 75 mm          |
| $L_h$           | Omurganın uzunluğu                  | 85 mm          |
| $R$             | Sarkaç çubuğunun uzunluğu           | 25 mm          |
| $r_1$           | Ayak kesit yüzeyinin düşey yarıçapı | 10 mm          |
| $r_2$           | Ayak kesit yüzeyinin yatay yarıçapı | 8 mm           |
| $L_p$           | Ayakların uzunluğu                  | 100 mm         |
| $a$             | Elastik çubuğun et kalınlığı        | 0,8 mm         |
| $b$             | Elastik çubuğun genişliği           | 2 mm           |

Amfibi ilerleme mekanizmasının temel ilerleme dinamiklerini karakterize edebilmek için karasal ve sucul ilerleme hareketleri için basitleştirilmiş iki farklı fiziksel model geliştirilmiştir. Yukarıda belirtilen değişkenler karasal ve sucul modeller üzerinde (Şekil 3.2 ve Şekil 3.3) gösterilmiştir. Bu modeller sayesinde elastik mekanizmanın karada ve suda dinamik davranışına etki eden temel tasarım değişkenleri ve etkileri anlaşılabilir.

### **3.1.1. Karasal İlerleme Modeli**

Karasal ilerleme modelinde, robot mekanizmasının omurga ile bacakları birbirlerine elastik dönme yayları ile bağlı olup, bacaklardaki boylamasına titreşimler doğrusal yaylar ile modellenmiştir. Mekanizmanın yayılı kütlesi üç adet noktasal kütleyle indirgenmiştir. Gövdenin merkezine yerleştirilen sarkacın salınım frekansı, bu yayların doğal frekanslarına ayarlandığında robotun çok düşük enerji tüketim değeri ile oldukça kararlı bir ilerleme hareketi ortaya koyduğu görülmüştür. Bu mekanizmanın kendi kendisini organize ederek gerçekleştirdiği ilerleme, herhangi bir merkezi otoriteye, algısal geri

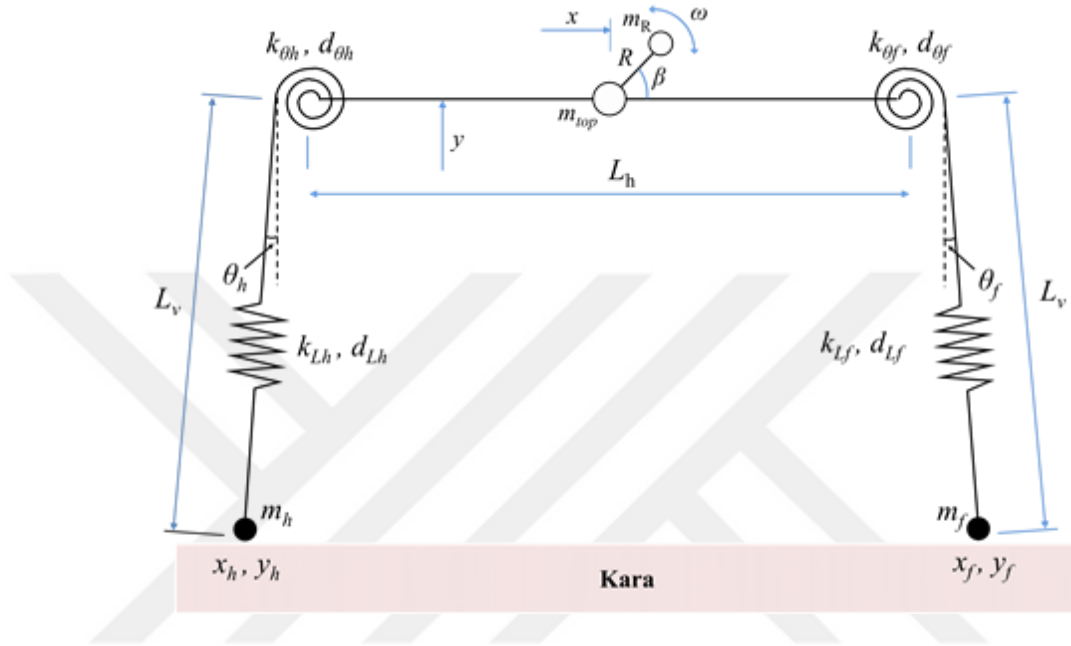
bildirime veya planlanmış bir harekete neden olan harici bir elemana ihtiyaç duymamaktadır (Reis ve ark. 2013).

Mekanizmanın karada ilerlemesinin sistematik bir analizini yapabilmek ve karasal hareket için fiziksel bir model oluşturabilmek için şu varsayımlar yapılmıştır;

- Robotun davranışı sagittal düzlemde analiz edilebilir ve ayakların her birinin zemin ile teması bir noktasal temas olarak değerlendirilebilir.
- Robotun omurgası ve bacakları birbirlerine elastik dönme yayları ve sönümleyiciler ile bağlı elemanlar olarak kabul edilebilir.
- Bacaklardaki boylamasına titreşim doğrusal yay ve sönümleyiciler ile modellenilebilir.
- Omurga ve mikro motorun kütleleri omurganın merkezinde birleşik bir nokta kütle olarak alınabilir.
- Bacakların kütleleri ihmal edilebilir ve ayakların her biri birer noktasal kütle olarak alınabilir.
- Titreşimi esnasında robotun gövde yapısında kalıcı şekil değişimlerin olmadığı kabul edilmektedir.

Bu varsayımlara dayanarak karasal ilerleme hareketi için oluşturulan basitleştirilmiş fiziksel model Şekil 3.2' de gösterilmektedir. Karasal model yay-sönümleyici elemanlar ile birbirine bağlı üç farklı yapıdan oluşmaktadır. Bu elemanların yayılı kütleleri şekilde gösterildiği gibi noktasal kütlelere indirgenmiştir. Bu noktasal kütlelerden ilki eyleyici ve omurga kütlelerini temsil eder ve omurganın merkezinde yer almaktadır ( $m_{top}$ ). Diğer iki kütle ise ön ve arka ayak kütlelerini temsil eden  $m_f$  ve  $m_h$ ' dir. Omurganın uzunluğu  $L_h$  ile, ön ve arka bacakların uzunlukları  $L_v$  ile ve bacak ile omurgaya dik olan çizgi arasındaki açılar  $\theta_f$  ve  $\theta_h$  ile ifade edilmektedir. Elastik çubuğun herhangi bir sıkışma veya uzama etkisinde kalmadığı durumda, simetrik haldeki robotun bacaklarının doğal uzunlukları ile açılar  $L_0$  ve  $\theta_0$  ile gösterilir. Omurga ve bacaklar, burulma sertliği  $k_\theta$  ve sönümleme katsayısı  $d_\theta$  olan elastik dönme yayları ile bağlanır. Robotun bacakları, sertliği  $k_L$  ve sönümleme katsayısı  $d_L$  olan doğrusal yaylar olarak modellenmiştir. Omurganın merkezine sabitlenmiş motor, ucuna  $m_R$  kütlesi bağlanmış  $R$  uzunluğundaki bir çubuğu  $\omega$  açısal hız (veya frekans) ile döndürmekte olup, çubuğun omurga ile yaptığı

açı  $\beta$  ile verilmektedir. Sonuç olarak, bu basit model 13 mekanik tasarım parametresinden ( $k_{\theta}, d_{\theta}, k_L, d_L, \theta_0, \theta_{h0}, L_h, L_v, m_f, m_h, m_{top}, R$  ve  $m_R$ ), bir kontrol parametresinden ( $\omega$ ) ve 16 durum değişkeninden ( $x_f, y_f, x_h, y_h, L_v, \theta_f, \theta_h, \beta$  ve bunların zamana göre birinci türevleri) oluşmaktadır (Reis ve ark. 2013).



**Şekil 3.2.** Basitleştirilmiş karasal ilerleme modeli

Robotun karasal hareketi rezonans frekanslarına bağlı olarak ortaya çıkan yüksek genlikteki şekil değişimleri ile oluşmaktadır. İki boyutlu bu yapıda ayakların burulması ve boylamasına sıkışıp uzaması şeklinde iki baskın titreşim hareketi ortaya çıkmaktadır ve basit fiziksel model bu iki harekete izin verecek şekilde özel olarak seçilmiştir. İlk titreşim modu daha düşük bir salınım frekansında ( $\omega_0$ ) ortaya çıkmaktadır ve robotun ters sarkaç hareketi sonucu robot yürüme hareketi yapmaktadır. İkinci titreşim modu daha yüksek bir salınım frekansında ( $\omega_L$ ) gerçekleşir ve bacakların boyuna titreşimleri sonucu robot zıplayarak ilerler. Farklı gövde oranları için ara frekans değerlerinde robot sürünerek ve koşarak ilerleme yapabilmektedir.

Robot ön modelinin burulma (torsiyonel) rezonans frekansı  $\omega_0$  ile boyuna rezonans frekansı  $\omega_L$  hem deneysel hem de analitik olarak elde edilmiştir. Sarkacın açılma frekansı

elastik gövdenin doğal frekanslarına ayarlanarak serbest titreşim modları görsel olarak kolayca belirlenebilmektedir. Bu değerler doğrusal ve dönme yaylarının sertlik değerleri ölçülerek de hesaplanabilmektedir. Burada, kullanılan elastik yay çeliğinde sönüm katsayısının çok küçük olduğu, her iki bacağın başlangıç boylarının  $L_0$ , başlangıç açılarının ise sıfıra eşit olduğu varsayılmaktadır ( $\theta_0 = 0$  (rad)).

Basitleştirilmiş modelde rezonans frekansları için en basit analitik çözümlerden biri, elastik robotu birbirine dönme yayları ile bağlı paralel çubuk mekanizması, bacakları ise doğrusal yaylar olarak kabul ederek yapılabilir.  $\theta_f = \theta_h = \theta$  ve  $L_v = L$  olmak üzere U-şeklindeki elastik çubuğun burulma rezonans frekansı ( $\omega_\theta$ )

$$\omega_\theta = \sqrt{\frac{2k_\theta - m_{top}gL}{m_{top}L^2}} \quad (3.1)$$

ve boyuna rezonans frekansı ( $\omega_L$ )

$$\omega_L = \sqrt{\frac{2k_L}{m_{top}}} \quad (3.2)$$

olarak basitçe ifade edilebilir (Reis ve ark. 2013). Burada  $k_\theta$  ve  $k_L$  sırası ile Şekil 3.2' de gösterildiği gibi omurga ile bacaklar arasındaki birleşme noktasında çubuğun burulma sertliğini ( $k_\theta$ ) ve bacakların boyuna sertliğini ( $k_L$ ) temsil etmektedir. (Elastik çubuğun burulma ve boyuna rezonans frekans ifadelerinin elde edilişi Ek 2'de verilmiştir.)

Robotu titreşime zorlayarak ilerlemesini sağlayan tahrik sistemi herhangi bir algısal geri bildirimle sahip olmayan basit bir mikro motor ve sarkaçtan ibarettir. Sarkacın açısal frekansı, motora uygulanan gerilim ile değiştirilebilir. Dönen kütle için açısal frekansının sabit olduğu varsayılarak  $F(t)$  merkezci kuvveti, açısal frekans  $\omega$ , dönen kütle  $m_R$  ve dönme yarıçapı  $R$  cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$F(t) = m_R \omega^2 R \quad (3.3)$$



Bu ifadeden, robotun titreşiminde açısal frekansının yanında dönen kütle ve dönme yarıçapı gibi diğer tasarım parametrelerinin de etkili olduğunu anlaşılmaktadır

### 3.1.2. Sucul İlerleme Modeli

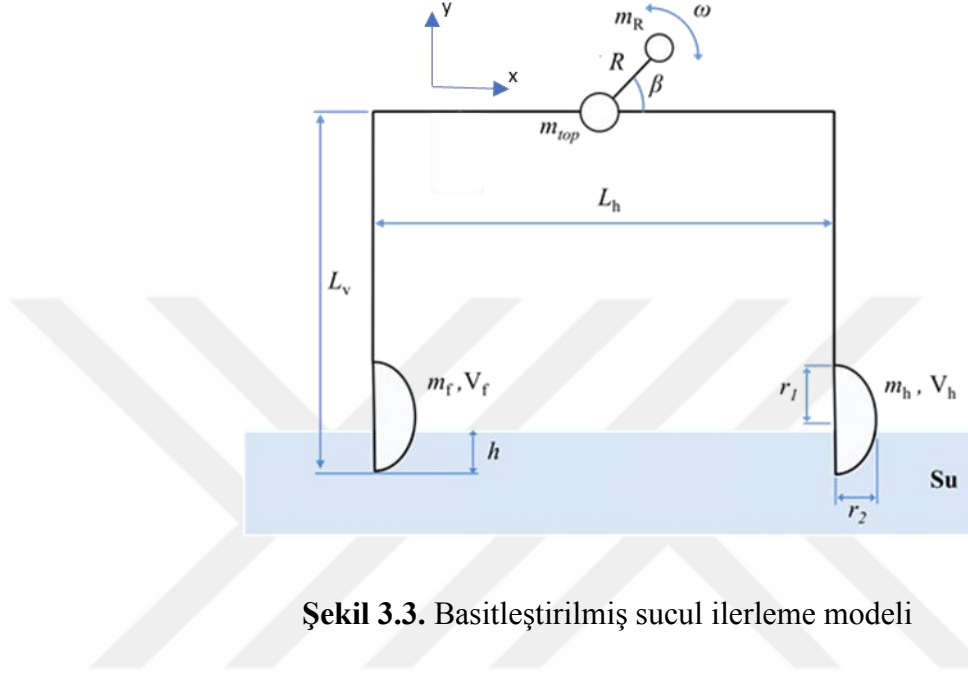
Sucul ilerleme modelinde ise robot su üzerinde rijit bir cisim gibi davranmakta ve kayda değer bir şekil değişimi ve dönme hareketi yapmamaktadır. Bu sayede robot gövdesinin tamamı bir noktasal kütle, sarkaç ise bu kütle etrafında salınım yapan ikinci bir noktasal kütle olarak modellenenmektedir. Omurganın merkezine yerleştirilmiş sarkaç harekete geçirildiğinde, robot gövdesi ile birlikte kanat şeklindeki ayaklar su içerisinde dikey yönde salınım hareketi yapmaktadır. Bu hareket nedeniyle ön ve arka yüzeyler arasında oluşan basınç farkı ve sarkacın oluşturduğu merkezkaç kuvvetinin etkisiyle elastik mekanizma su üzerinde planlanan yönde ilerleme hareketi yapabilmektedir. Bu sayede aynı mekanizmanın hem karada hem de su üzerinde ilerleyebilmesine sağlanarak, robotik uygulamalar için bacaklı amfibi bir ilerleme mekanizması geliştirilmiştir. Mekanizma katı yüzeylerde elastik gövdenin farklı rezonans modları tahrik edilerek yürüme, koşma, zıplama ve sürünme benzeri karasal ilerleme hareketleri yapabilirken, geliştirilen ayak yapısı sayesinde su üzerinde de ilerleyebilmektedir.

Mekanizmanın su üzerindeki ilerlemesini ifade eden basit bir fiziksel model kurmak için aşağıdaki kabuller yapılmaktadır;

- Robot su içerisinde rijit bir cisim gibi davranmakta, elastik gövde kayda değer bir şekil değişimi göstermemektedir.
- Robotun su içerisinde dönme hareketi yapmadığı x ve y eksenlerinde ötelenme hareketi yaptığı kabul edilmektedir. Böylece robot gövdesinin tamamı bir noktasal kütle, sarkaç ise ana gövdeye bağlı ikinci bir noktasal kütle indirgenebilmektedir.

Deneysel çalışmalarda ve sonrasında izlenen kamera kayıtlarında doğruluğu gözlenmiş bu kabullere dayanarak oluşturulan robotun fiziksel modeli Şekil 3.3' de gösterilmektedir. Sucul ilerleme modelinde robot rijit cisim olarak ele alınmakta olup, robot gövdesinin tamamı bir noktasal kütle  $m_{top}$ , sarkaç ikinci bir noktasal kütle  $m_R$  olarak temsil edilmektedir. Omurga uzunluğu  $L_h$ , rijit bacakların uzunlukları  $L_v$ , ayakların uzunlukları

$L_p$ , eliptik ayak kesit yüzeyinin düşey ve yatay yarıçapları sırası ile  $r_1$  ve  $r_2$  ile ifade edilmektedir. Ön ve arka ayakların kütleleri  $m_f$  ve  $m_h$ , hacimleri ise  $V_f$  ve  $V_h$  ile verilmektedir. Özet olarak, sucul ilerleme modeli 12 mekanik tasarım parametresinden ( $L_h, L_v, L_p, r_1, r_2, V_f, V_h, m_f, m_h, m_{top}, R$  ve  $m_R$ ) oluşmaktadır.

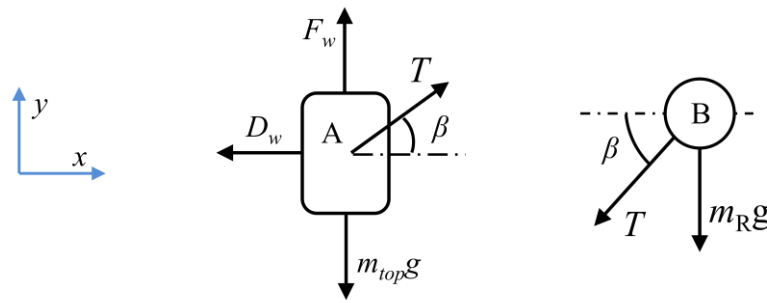


Şekil 3.3. Basitleştirilmiş sucul ilerleme modeli

Yukarıda tanımlanan ve Şekil 3.4’de gösterilen iki noktasal A ve B kütleleri ele alınarak, su üzerinde dönmeden ötelenen robot için ivme ifadeleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\mathbf{a}_A = \ddot{x}\mathbf{i} + \ddot{y}\mathbf{j} \quad (3.4.a)$$

$$\mathbf{a}_B = [\ddot{x} - R\omega^2 \cos\beta]\mathbf{i} + [\ddot{y} - R\omega^2 \sin\beta]\mathbf{j}, \quad \dot{\beta} = \omega, \quad \ddot{\beta} = 0 \quad (3.4.b)$$



Şekil 3.4. Sucul ilerleme modeli için serbest cisim diyagramları

Şekil 3.4' de gösterilen iki noktasal kütlelerin serbest cisim diyagramları yardımı, 3.4.a ve 3.4.b nolu denklemlerde verilen ivme ifadelerinin kullanılması ile sucul ilerleme için aşağıdaki hareket denklemleri elde edilmiştir.

$$D_w + T \cos \beta = m_{top} \ddot{x} \quad (3.5.a)$$

$$F_w - m_{top} g + T \sin \beta = m_{top} \ddot{y} \quad (3.5.b)$$

$$-T \cos \beta = m_R [\ddot{x} - R \omega^2 \cos \beta] \quad (3.5.c)$$

$$-T \sin \beta - m_R g = m_R [\ddot{y} - R \omega^2 \sin \beta] \quad (3.5.d)$$

$$\beta = \beta_0 + \omega t \quad (3.5.e)$$

Burada,  $T$  sarkaç kuvvetini,  $F_w$  suyun kaldırma kuvvetini,  $D_w$ , ise suyun direncini ifade etmektedir. Ayaklar basit bir geometriye sahip olmadığı için batan hacim miktarı batma miktarı ile lineer olmayan bir şekilde değişmektedir ve bu ilişki non-lineer bir  $F_w$  fonksiyonu ile ifade edilmiştir.

$$F_w = k \cdot y^n \quad (3.5.f)$$

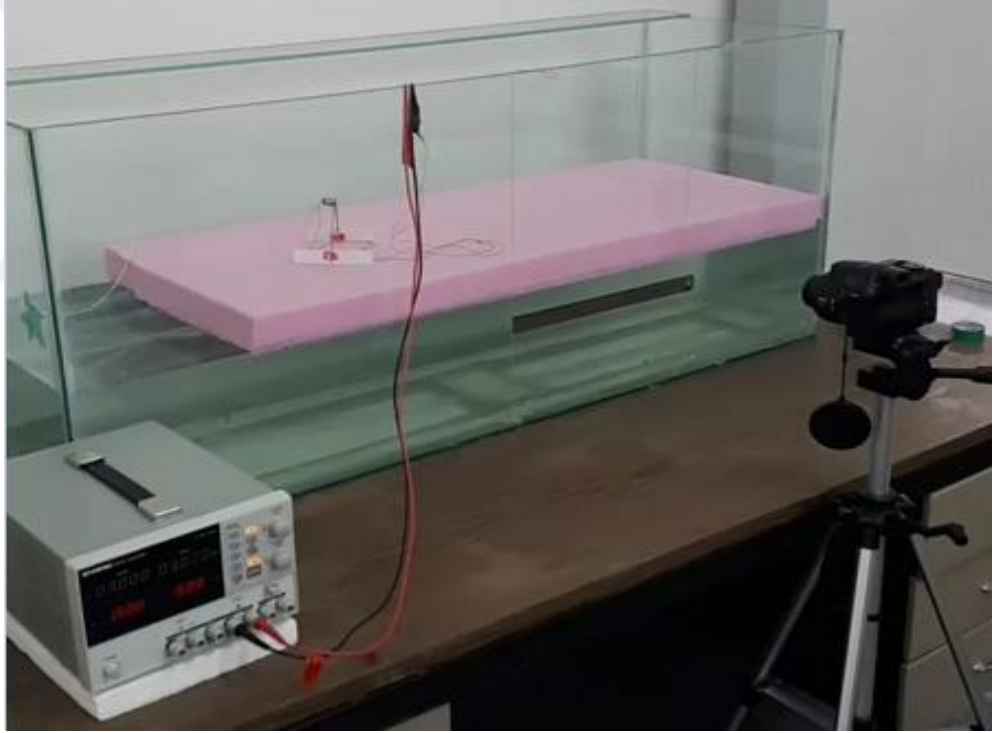
Burada  $k$  suya batma miktarı ile lineer değişmeyen katsayı,  $y$  suya batma miktarı ve  $n$  non-lineer üst değeridir. Benzer lineer olmayan ilişki  $D_w$  direnci için de geçerlidir.

$$D_w = d_f \cdot \frac{|\dot{x}|^m}{2} \cdot \frac{|\dot{x}|}{\dot{x}} \cdot (-1) \cdot \left[ \frac{|\dot{x}|}{\dot{x}} + 1 \right] + d_h \cdot \frac{|\dot{x}|^m}{2} \cdot \frac{|\dot{x}|}{\dot{x}} \cdot \left[ \frac{|\dot{x}|}{\dot{x}} - 1 \right] \quad (3.5.g)$$

Burada  $d_f$  ve  $d_h$  sırası ile ileri ve geri yönlerde hidrodinamik direnç katsayıları,  $m$  non-lineer üst değeridir. Bu denklemler bir adet bağımsız değişken (zaman;  $t$ ), bir adet kontrol parametresi ( $\dot{\beta} = \omega$ ), altı adet bağımlı değişken ( $x$ ,  $y$ ,  $T$ ,  $F_w$ ,  $D_w$ ,  $\beta$ ) ve türevlerini ihtiva etmektedir. Tüm katsayılar deneysel olarak eğri uydurma tekniği ile belirlenebilir. Bu nedenle denklemler ancak analitik olarak çözülebilir. Bu tez çalışmasında denklemlerin analitik çözümü yapılmamış, geliştirilen tasarımın performansı deneysel olarak incelenmiştir.

### 3.2. Deneysel Düzenek ve Deneysin Yapılışı

lmler Mühendislik Fakültesinde, Makine Mühendisliği Robotik Araştırma Laboratuvarı'nda kurulan deneysel düzenekte gerçekleştirilmiştir. Deneysel düzeneğinin fotoğrafı Şekil 3.5' de gösterilmiştir. Düzenekte üzerinde ölümler yapılan amfibi robot, motoru besleyen ve bu esnada uygulanan gerilimi ve motor tarafından çekilen akımı gösteren Gw instek GPD-3303S model DC g c kaynağı, mesafe kaydı için cetvel, robotun ilerlemesini kaydeden ve bu esnada zaman kaydını saniyede 120 kare çekim ile yapabilen yüksek z n rl kl  Canon EOS M50 model hızlı kamera, karasal ilerleme hareketindeki ölümler için kullanılan strafor zemin ve su üzerindeki ölümler için kullanılan 1,5 m uzunluğa 0,7 m genişliğe sahip bir su tankı bulunmaktadır.



Şekil 3.5. lmlerin gerçekleştirildiği deneysel düzenek

Robotun karada ve su üzerindeki ilerleme hareketleri kontrollü bir Şekilde gerçekleştirilmiş ve kamera tarafında kaydedilmiştir. Sarkacı tahrik eden mikro motora uygulanan  $V$  gerilimi ile sarkacın  $\omega$  dönme açısal frekansı kontrol edilerek, kademeli gerilim değişimi ile kademeli açısal frekans değişimi sağlanmıştır. Motora uygulanan DC

gerilim değerleri ile motor tarafından çekilen akım  $I$  değerleri de kaydedilerek, robotun ilerleme esnasında harcadığı  $P$  gücü belirlenir.

$$P = I.V \quad (3.6)$$

Kamera kayıtları kullanılarak mekanizmanın işaretli noktalar arasında ilerlemesi esnasında sarkacın kaç tur döndüğü ve robotun bu mesafeyi ne kadar sürede kat ettiği belirlenerek sarkacın açısal frekansı ve robotun ilerleme hızı hesaplanmıştır. Robotun  $x$  yatay koordinatında  $t$  süresi boyunca  $v$  ortalama hızı;

$$v = \frac{x}{t} \quad (3.7)$$

olmak üzere  $P/v$  robotun birim yer değiştirme başına harcadığı enerji miktarını vermektedir. İfadeyi kütleden bağımsız hale getirmek için robot ağırlığına bölerek, birim kütle ve birim yer değiştirme başına harcanan enerji yani robotun yer değiştirme maliyetini ( $CoT$ ) veren birimsiz ifade elde edilir.

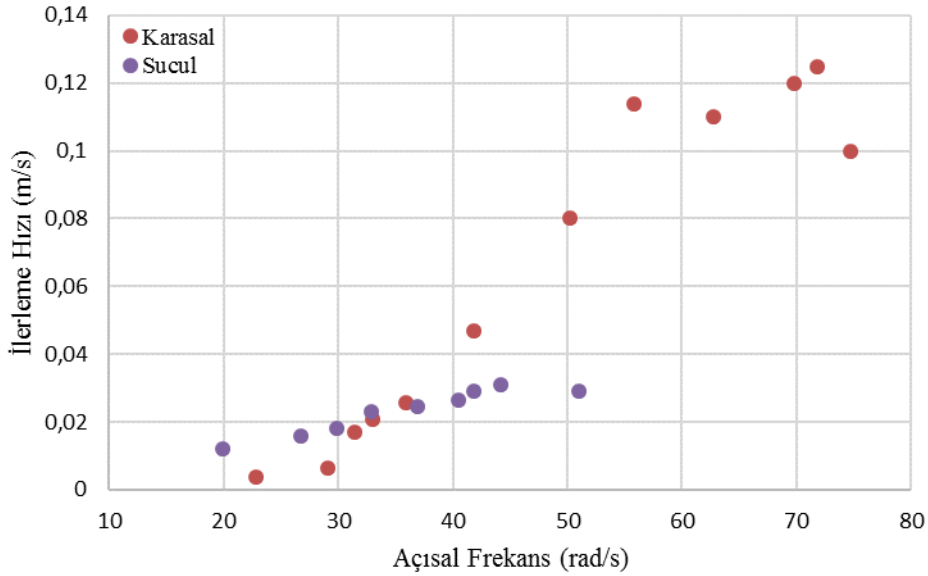
$$CoT = \frac{P}{v.W} = \frac{I.V}{v.m_{top}.g} \quad (3.8)$$

Sarkacın dönme açısal frekansı, hızlı kamera kayıtlarından yararlanarak hesaplanabilmektedir. Böylece robotun ortalama ilerleme hızı ve yer değiştirme maliyeti değerleri sarkacın farklı açısal frekans değerleri için elde edilmiştir.

#### 4. BULGULAR

Deneyleerde, Bölüm 3.1' de tanıtılan titreşime dayalı, elastik bir amfibi ilerleme mekanizması kullanılmıştır. Mikro motora uygulanan DC gerilim ile birlikte dönmeye başlayan sarkaç, elastik mekanizmanın titreşmesine ve zıplama hareketi yaparak ilerlemesine neden olmaktadır. Mikro motora karasal hareket için 0,7 Volt' dan, sucul hareket için ise 1,0 Volt' dan başlayarak 0,1 V aralıklarla artan DC gerilimler uygulanarak sarkacın açısal hızı değiştirilmiş ve bu esnada motor tarafından çekilen akım değerleri kaydedilmiştir. Sarkacın dönmesi sonucu ilerleyen robotun ortalama ilerleme hızı ve sarkacın dönme açısal frekansı kamera kayıtlarından hesaplanmıştır.

Mekanizmanın çalıştırılması ve karasal zeminde ilerleme hareketi ile ilgili ölçümler önce karasal zemin olarak bir strafor üzerinde yapılmıştır. Daha sonra sucul ilerleme için aynı ölçümler bir su tankı içerisindeki su yüzeyinde gerçekleştirilmiştir. Robotun karasal ve sucul ortalama ilerleme hızlarının sarkacın dönme açısal frekansına bağlı olarak değişimi Şekil 4.1' de görülmektedir.

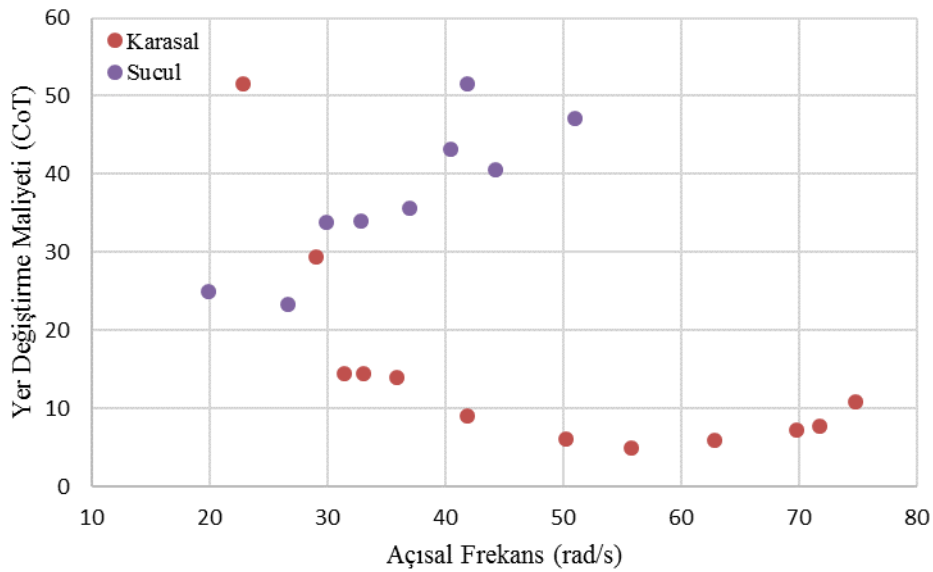


Şekil 4.1. Karasal ve sucul ilerleme hızlarının sarkacın açısal frekansı ile değişimi

Artan açısal frekansla birlikte mekanizmada oluşan titreşim ve zıplama hareketi daha belirgin hale gelmekte ve mekanizma daha hızlı ilerleme yapmaktadır. Hızdaki bu artış,

robot karasal zeminde iken 71,8 rad/s ve su üzerinde iken 44,2 rad/s açısal frekans değerlerine kadar devam etmekte ve bu değerlerde robot en yüksek yer değiştirme hızına ulaşmaktadır. En yüksek hız değerleri karasal ve sucül ilerlemeler için sırası ile 0,125m/s ve 0,030 m/s olup, karasal zeminde mekanizma yaklaşık 4 kat daha hızlı ilerleyebilmektedir. Bu değerlerden sonra mekanizmanın titreşim düzeni bozulmakta, ilerleme hızında kararsızlıklar başlamakta ve bu da ortalama hızda azalmaya neden olmaktadır. Grafiğin dışında kalan açısal frekans değerlerinde ise robot kayda değer kararlı bir yer değiştirme hareketi yapamamaktadır.

Robotun yer değiştirme maliyetleri (CoT) Bölüm 3.2 de verilen yöntem kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 4.2' de robotun karasal ve sucül yer değiştirme maliyetlerinin sarkacın açısal frekansına bağlı olarak değişimi verilmektedir. Görüldüğü üzere robot en düşük yer değiştirme enerji maliyet değerlerine karasal zeminde 55,8 rad/s ve su üzerinde ise 26,7 rad/s açısal frekans değerlerinde ulaşmaktadır. En düşük yer değiştirme maliyet değerleri karasal ve sucül ilerlemeler için sırası ile 5,01 ve 23,38 olup, karasal zeminde mekanizma yaklaşık 5 kat daha verimlidir. Bazı ölçümler için, ilerleme hızındaki artış ile mikro motorun harcadığı güç miktarının yakın oranlarda artması, belli aralıklarda birim kütle başına enerji tüketimini birbirine yakın değerlerde tutmaktadır. Bu durum karasal ilerleme için 40 ile 70 rad/s açısal frekans değerleri arasında açıkça görülmektedir.



**Şekil 4.2.** Karasal ve sucül yer değiştirme maliyetlerinin (CoT) sarkacın açısal frekansına bağlı değişimi

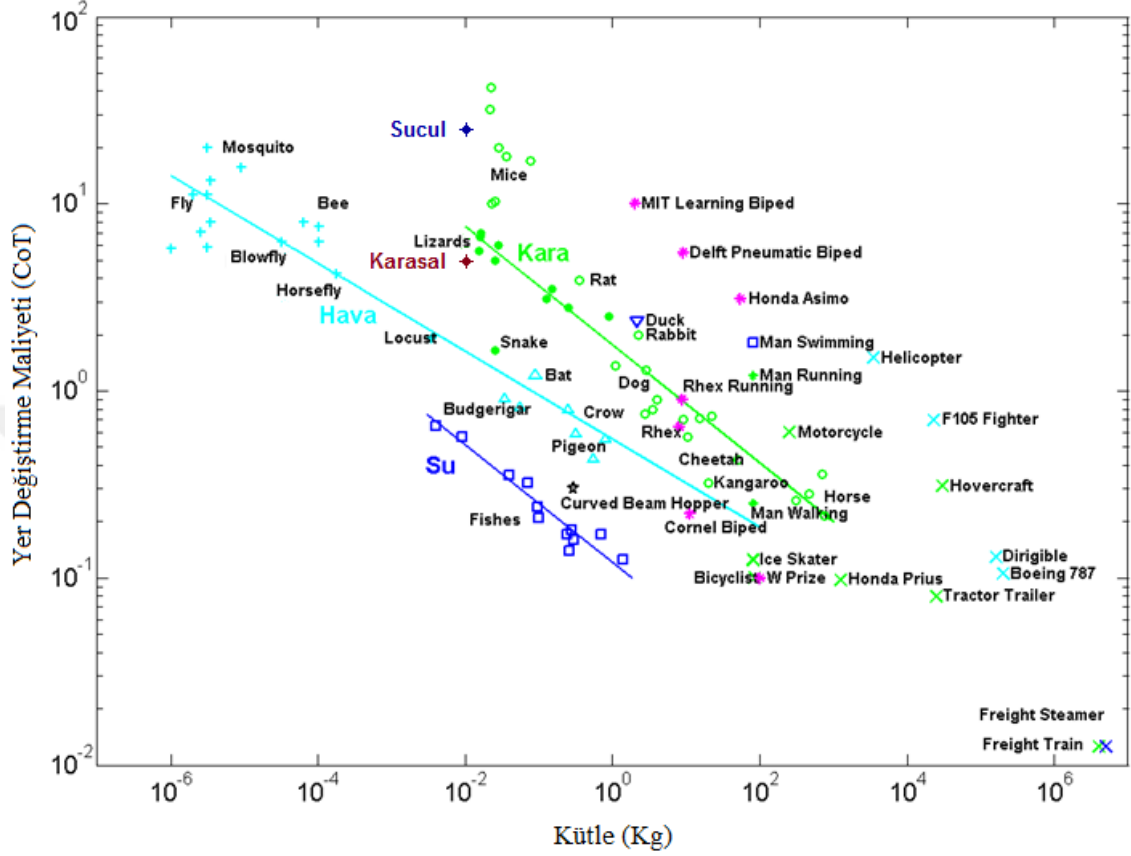
Şekil 4.1 ve Şekil 4.2' den görüldüğü üzere mekanizma, düşük ilerleme hızlarına sahip olduğu küçük açısal frekans değerlerinde daha yüksek yer değiştirme maliyet değerlerine sahiptir. Ayrıca mekanizma, büyük açısal frekans değerlerinde yüksek ilerleme hızlarına sahip olmasına rağmen, yüksek güç tüketimi nedeni ile büyük yer değiştirme maliyetine sahiptir. Küçük yer değiştirme maliyetleri her iki hareket için de en yüksek hız değerinde değil, minimum güç tüketimine karşılık gelen en verimli ilerleme hızının elde edildiği açısal frekans değerine karşılık gelmektedir.

Mekanizma mevcut tasarımı ile, karadan suya ve sudan karaya geçişleri başarılı bir şekilde gerçekleştirmiştir. Ancak bu geçişler, Şekil 4.1' de görülen karasal ve sucul her iki ilerlemenin gerçekleştiği 22,8 rad/s ile 51,6 rad/s arasındaki ortak açısal frekans bölgesi içerisinde olmaktadır. Mekanizma 35 rad/s açısal frekans değerinde her iki ortamda da yaklaşık aynı hız değerlerine sahip olduğu için, karadan suya veya sudan karaya geçişler esnasında hız kaybı olmamaktadır. Bu ortak bölge içerisinde kalan diğer sabit açısal frekans değerlerindeki geçişlerde hız değişimi görülmektedir. Ancak enerji verimli ilerleme açısından bakıldığında, 30 rad/s ile 40 rad/s arasındaki ortak açısal frekans bölgesi içerisinde küçük yer değiştirme maliyetine sahip geçişler olmaktadır (Şekil 4.2).

Şekil 4.3' de çeşitli mekanizmalar ve biyolojik organizmalar için birim kütle başına yer değiştirme maliyetinin değişimini veren Tucker diyagramı görülmektedir (Tucker 1975). Tüm değerlerin tek bir eğri üzerinde gösterilebilmesi logaritmik bir eğri kullanımını zorunlu kılmaktadır. Canlı organizmalar dâhil olmak üzere, tüm türlerde kütle arttıkça birim kütle başına yer değiştirme enerjisi ihtiyacı hızlı bir şekilde azalmaktadır. Su canlıları yer değiştirmek için en az enerjiye ihtiyaç duyan tür olarak görülmektedir. Buna karşılık tasarımı yapılan titreşime dayalı olarak ilerleyen elastik mekanizmanın sucul ilerlemeler için enerji tüketim değeri oldukça yüksektir. Diyagram üzerinde mevcut mekanizmanın karasal zemindeki en düşük yer değiştirme maliyeti kahverengi yıldız sembolü ile, su üzerindeki en düşük yer değiştirme maliyeti ise mavi yıldız sembolü ile gösterilmiştir. Karasal ilerlemeler için mevcut mekanizmanın enerji tüketim değeri benzer kütleli kara canlılarının enerji tüketim değerlerine oldukça yakındır. Mevcut mekanizmanın daha büyük kütleli versiyonlarında aynı enerji tüketimi ile sucul ilerleme



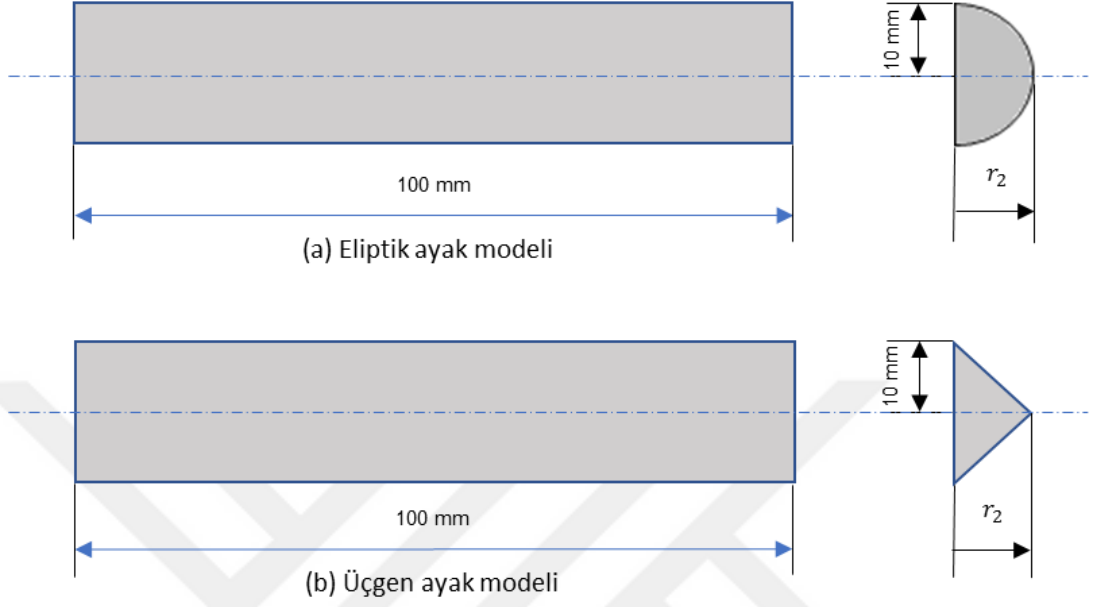
gerçekleştirebilmesi halinde, birim kütle başına yer değiştirme enerjisi ihtiyacı logaritmik olarak azalacak ve literatürdeki robotların seviyesine inecektir.



**Şekil 4.3.** Çeşitli mekanizmalar ve biyolojik organizmalar için vücut kütlelerine göre yer değiştirme maliyeti (Tucker diyagramı). Kahverengi ve mavi yıldız sembolleri, çalışmada tanıtılan mekanizmanın karasal ve sucul ilerlemeleri için diyagramdaki yerlerini göstermektedir

Yukarıdaki ölçümler ön model olarak tasarlanan ve uzunluğu  $L_p = 100$  mm, eliptik ayak kesit yüzeyinin düşey ve yatay yarıçapları sırası ile  $r_1 = 10$  mm ve  $r_2 = 8$  mm olan poliüretan köpükten yapılmış eliptik bir kanat profilli şeklindeki ayak modeli için gerçekleştirilmiştir. Aynı poliüretan malzeme kullanılarak Şekil 4.4 (a)' da görülen eliptik ayak modeli üzerinde  $r_1 = 10$  mm olarak sabit tutularak,  $r_2 = 4$  mm ve 12 mm olacak şekilde iki adet eliptik ayak ve Şekil 4.4 (b)' de görülen üçgen ayak modeli üzerinde yine  $r_1 = 10$  mm sabit tutularak,  $r_2 = 4$  mm, 8 mm ve 12 mm olmak üzere üç adet üçgen ayak daha üretilmiştir. 5 farklı ayak yapısı (Şekil 4.5) mekanizmaya tek tek monte edilerek ölçümler tekrarlanmış, ilerleme hızı ve yer değiştirme maliyetlerinin sarkacın açılal

frekansına bağlı değişimleri elde edilmiştir. Böylece malzeme aynı kalmak suretiyle farklı ayak modellerinin hız ve yer değiştirme maliyetleri üzerine etkileri incelenmiştir.



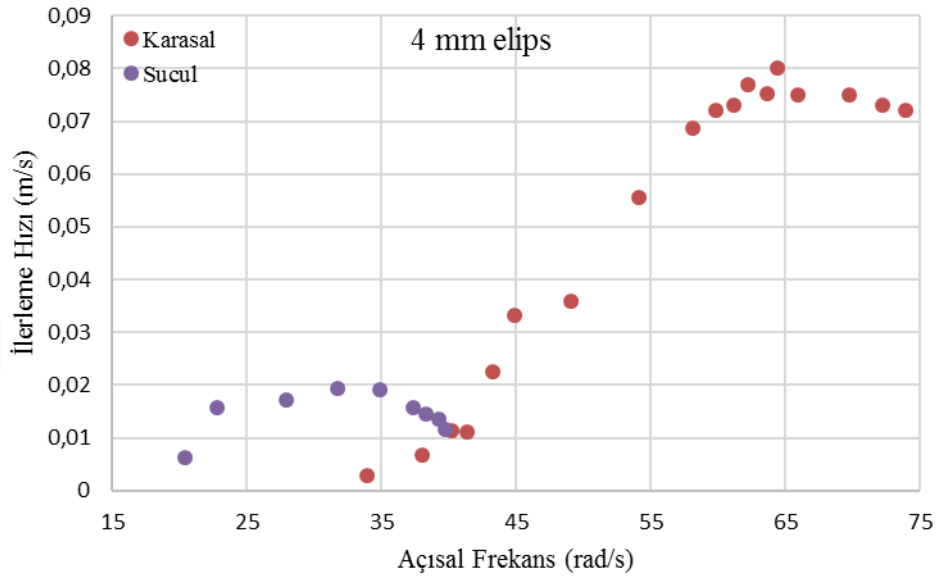
**Şekil 4.4.** Poliüretan ayak modelleri; (a) eliptik ayak modeli, (b) üçgen ayak modeli



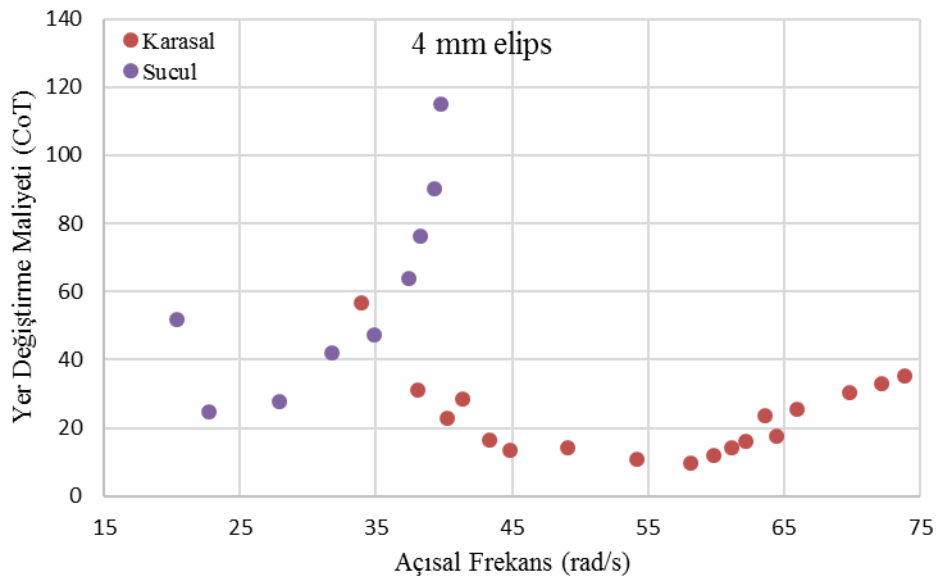
**Şekil 4.5.** Farklı ayak modellerinin fotoğrafı

İlk olarak eliptik ayak modeli için  $r_2 = 4$  mm ve 12 mm yatay yarıçaplara sahip ayaklar kullanılarak ölçümler yapılmıştır. Bu ayaklar için ilerleme hızı ve yer değiştirme maliyetlerinin sarkacın açisal frekansına bağlı değişimleri elde edilmiş ve sonuçlar sırası

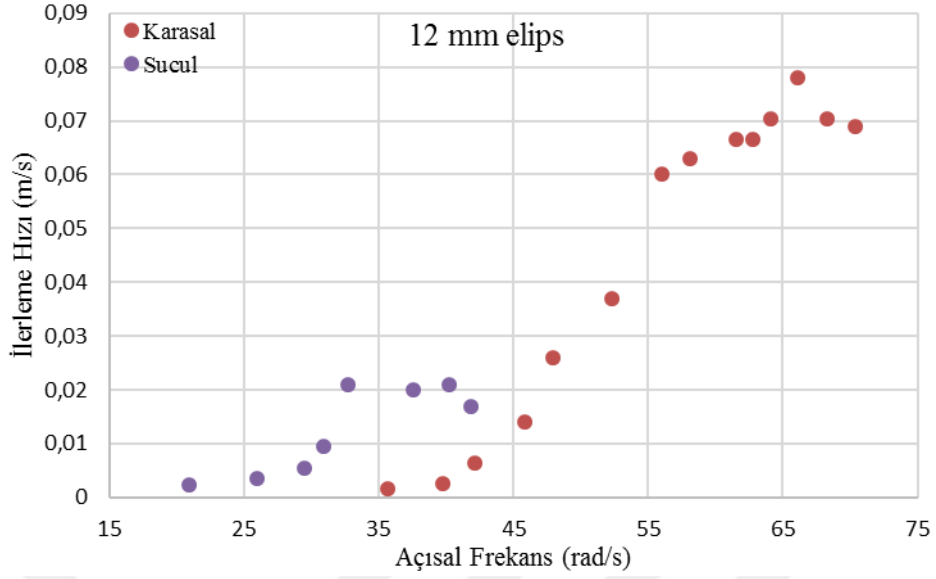
ile 4 mm yatay yarıçaplı ayak için Şekil 4.6 ve Şekil 4.7' de, 12 mm yatay yarıçaplı ayak için ise Şekil 4.8 ve Şekil 4.9' da gösterilmiştir. Mekanizmanın ilerleme hızı sarkacın açısal frekans artışına bağlı olarak artmakta ve mekanizmanın rezonans frekansına yakın olduğu durumlarda (65 rad/s) en yüksek değerini almaktadır. Sonrasında frekans uyuşmazlığı mekanizmanın titreşim düzenini bozmakta ve yavaşlamasına yol açmaktadır.



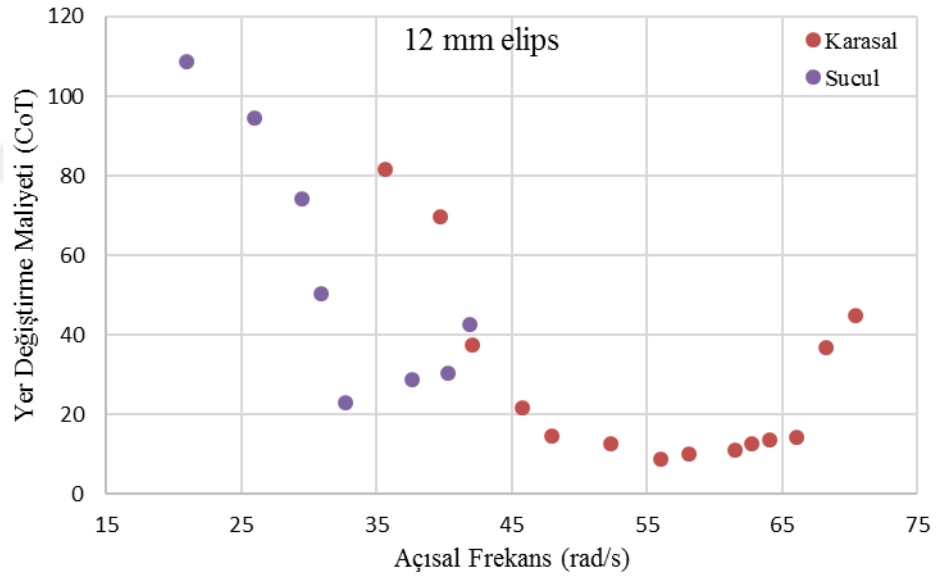
**Şekil 4.6.** 4 mm eliptik ayak için karasal ve sucul ilerleme hızlarının açısal frekansa bağlı değişimi



**Şekil 4.7.** 4 mm eliptik ayak için karasal ve sucul yer değiştirme maliyetlerinin açısal frekansa bağlı değişim



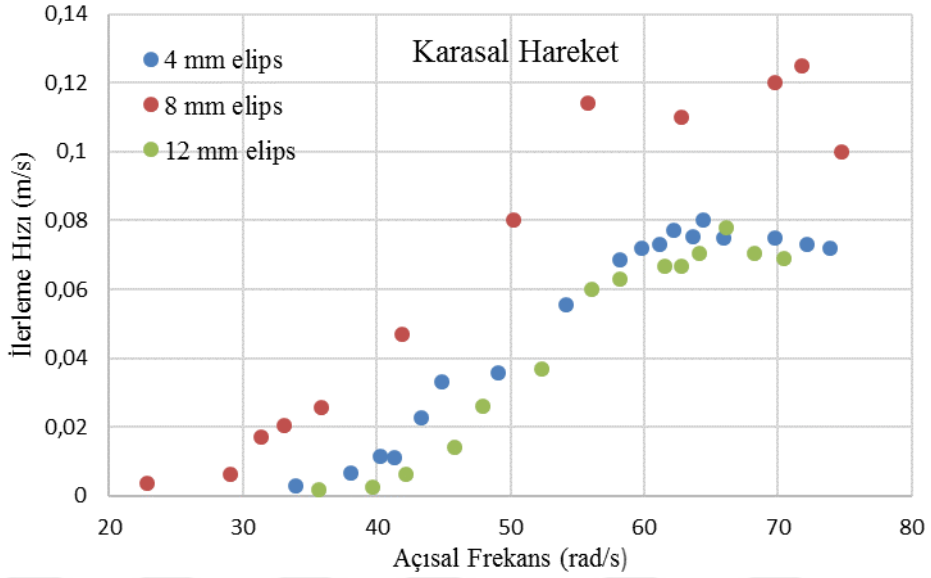
**Şekil 4.8.** 12 mm eliptik ayak için karasal ve sucul ilerleme hızlarının açısal frekansa bağlı değişimi



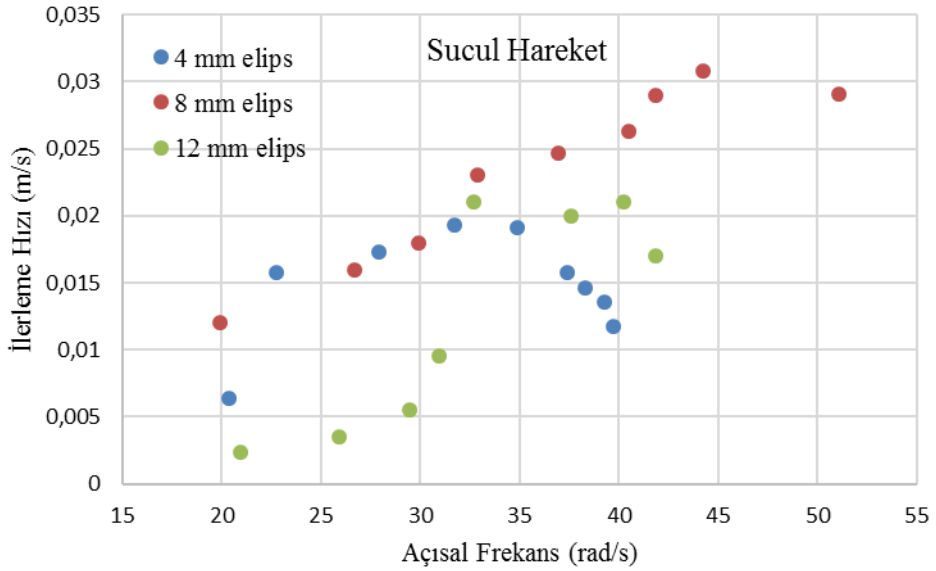
**Şekil 4.9.** 12 mm eliptik ayak için karasal ve sucul yer değiştirme maliyetlerinin açısal frekansa bağlı değişimi

Mekanizmanın 4 mm ve 12 mm eliptik ayak yapılarında karasal ve sucul ilerlemeleri 8 mm eliptik ayak yapısı ile gerçekleştirilen ilerlemeye (Şekil 4.1) oldukça benzerlik göstermektedir. Ancak mekanizmanın karasal zeminde ilerlemeye başlama frekansı ayakların yatay yarıçaplarına bağlı olarak değişmektedir. Şekil 4.10' da görüldüğü gibi

mekanizma, 8 mm eliptik ayak yapısında daha düşük frekansta dolayısı ile daha az güç harcayarak ilerlemeye başlamakta ve daha yüksek hız değerlerine ulaşabilmektedir. Sucul harekette ise, ilerleme 3 eliptik ayak yapısında da yaklaşık aynı frekansta başlamakta olup 8 mm' lik eliptik ayak diğer ayaklardan az da olsa daha avantajlı görülmektedir (Şekil 4.11).

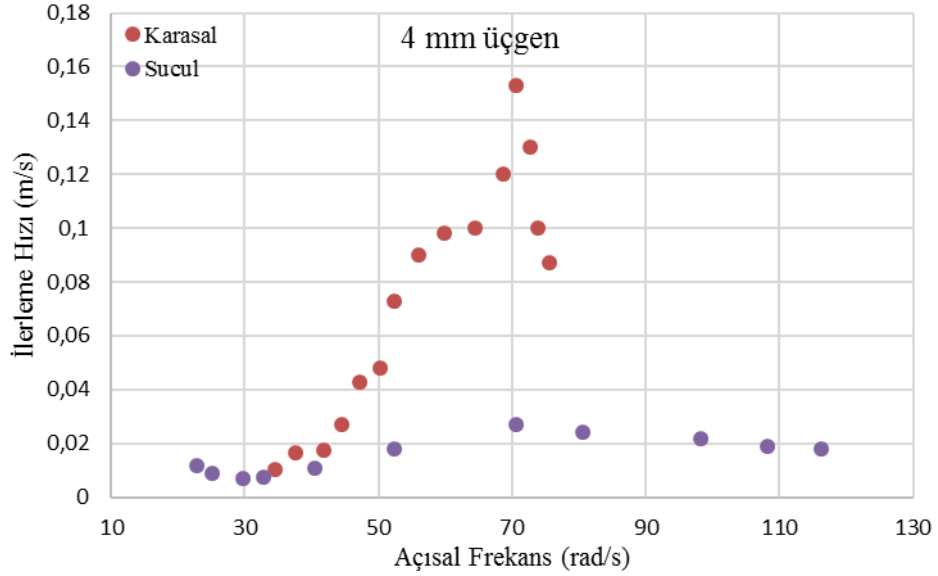


Şekil 4.10. Eliptik ayak yapıları için karasal ilerleme hızlarının açısal frekansa bağlı değişimi

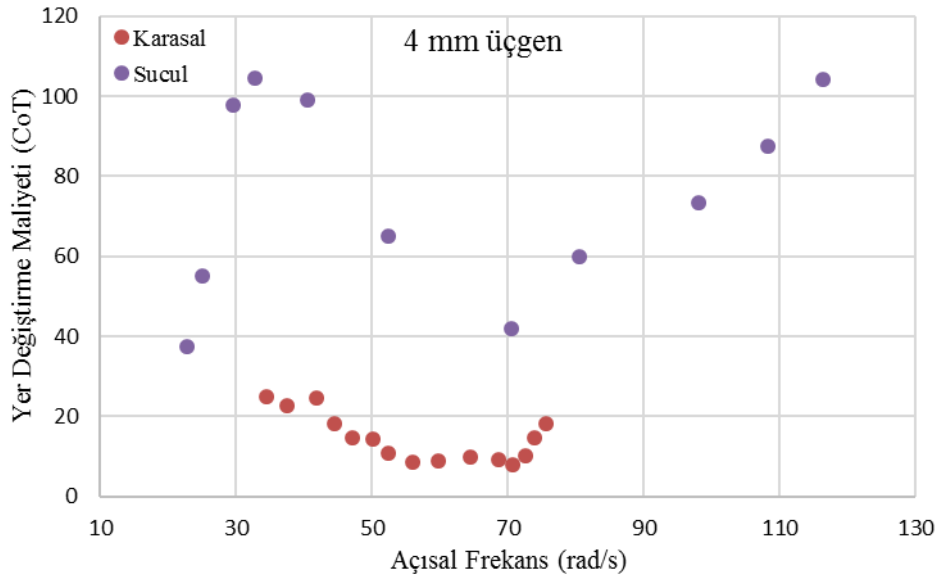


Şekil 4.11. Eliptik ayak yapıları için sucul ilerleme hızlarının açısal frekansa bağlı değişimi

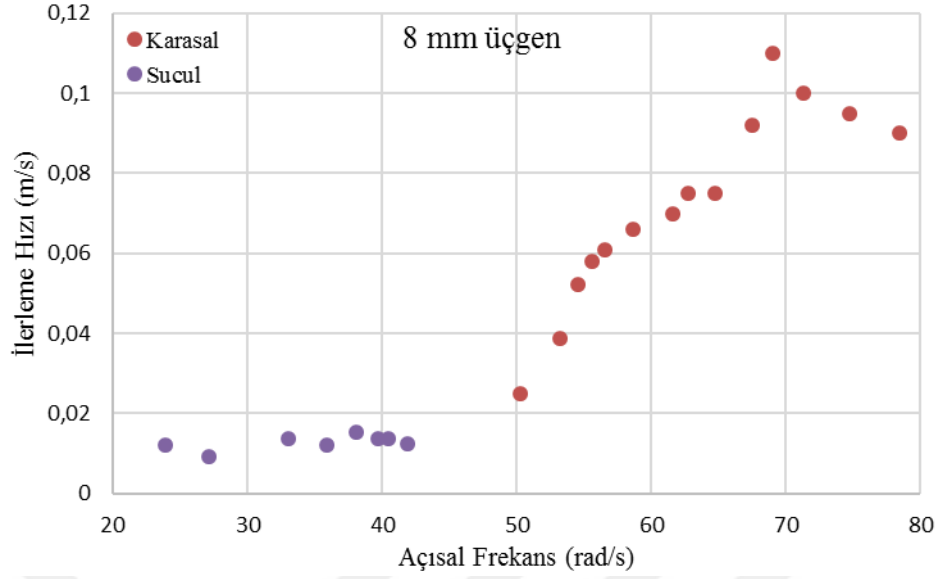
Üçgen ayak modeli için  $r_2 = 4$  mm, 8 mm ve 12 mm yatay uzunluklara sahip ayaklar kullanılarak aynı ölçümler tekrarlanmıştır. İlerleme hızı ve yer değiştirme maliyetlerinin sarkacın açısız frekansına bağlı değişimleri elde edilmiş ve sonuçlar sırası ile 4 mm yarıçaplı ayak için Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’ de, 8 mm yarıçaplı ayak için Şekil 4.14 ve Şekil 4.15 de ve 12 mm yarıçaplı ayak için ise Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’ de gösterilmiştir.



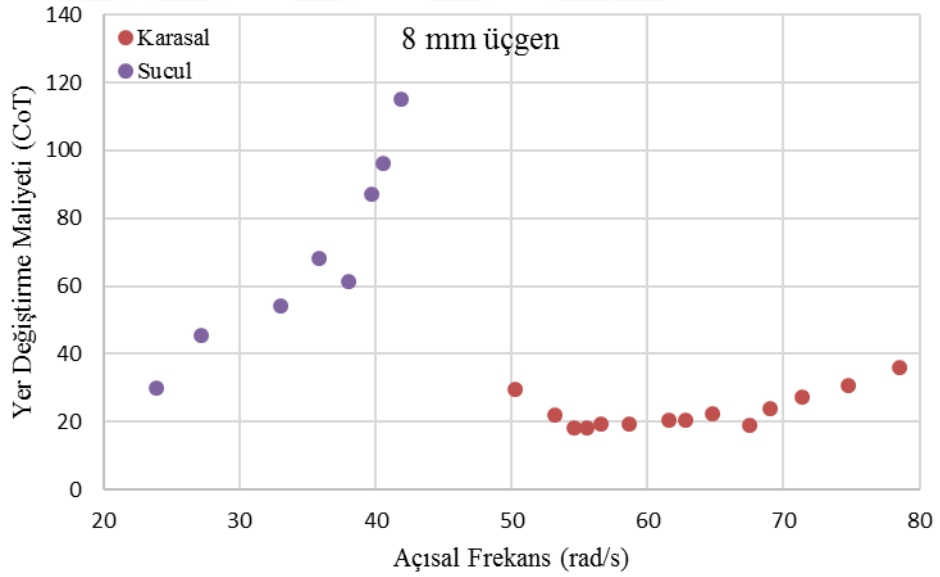
**Şekil 4.12.** 4 mm üçgen ayak için karasal ve sucül ilerleme hızlarının açısız frekansa bağlı değişimi



**Şekil 4.13.** 4 mm üçgen ayak için karasal ve sucül yer değiştirme maliyetlerinin açısız frekansa bağlı değişimi

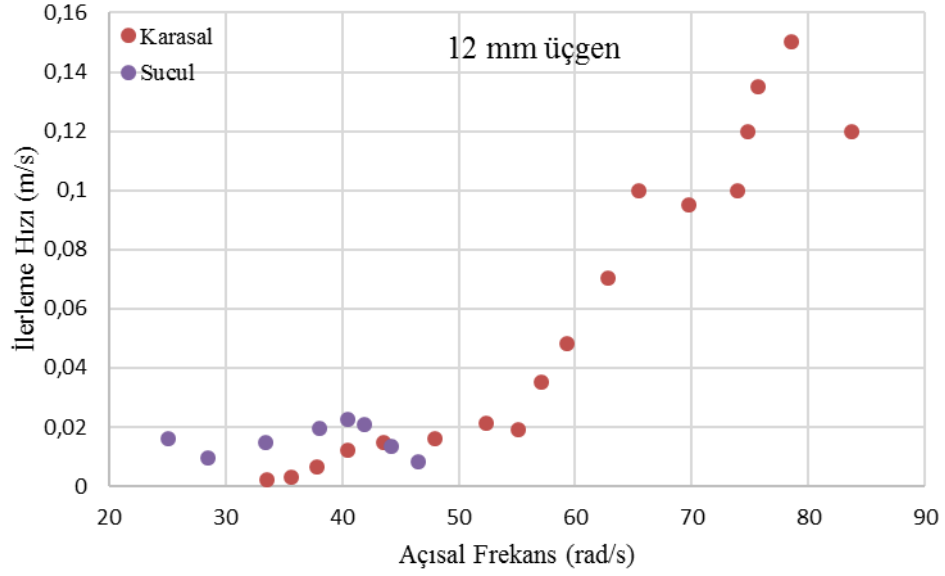


**Şekil 4.14.** 8 mm üçgen ayak için karasal ve sucul ilerleme hızlarının açısal frekansa bağlı değişimi

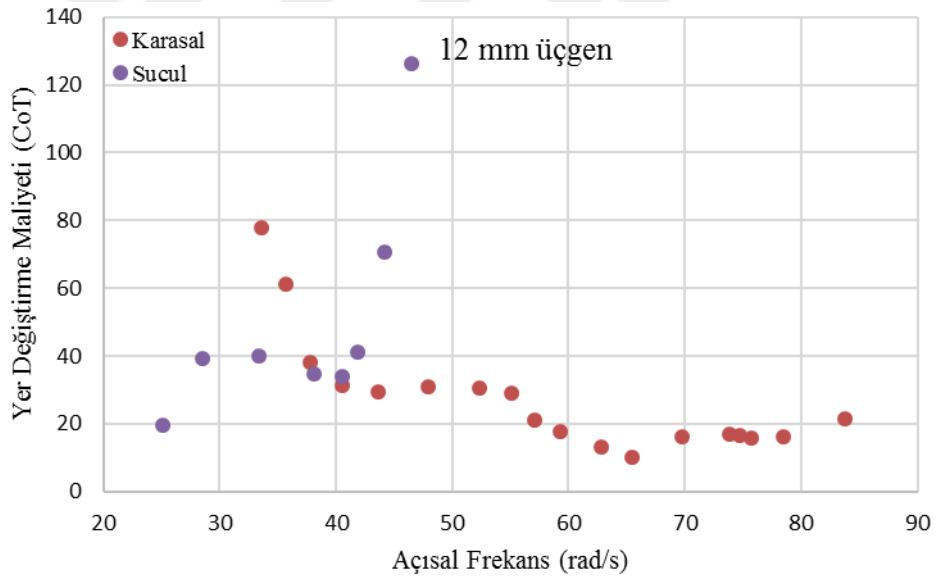


**Şekil 4.15.** 8 mm üçgen ayak için karasal ve sucul yer değiştirme maliyetlerinin açısal frekansa bağlı değişimi

Dikkat edilirse 8 mm üçgen ayak yapısında karasal ve sucul ilerlemenin gerçekleştiği ortak açısal frekans bölgesi yoktur. Sucul hareket için ölçümlerde, mekanizma 40 rad/s açısal frekans değerinden itibaren durmuş ve geriye doğru hareket etmeye başlamıştır. Karasal hareket ölçümlerinde ise mekanizma 50 rad/s açısal frekans değerine kadar olduğu yerde zıplamış ancak ilerleme kaydedilememiştir.



**Şekil 4.16.** 12 mm üçgen ayak için karasal ve sucul ilerleme hızlarının açısal frekansa bağlı değişimi

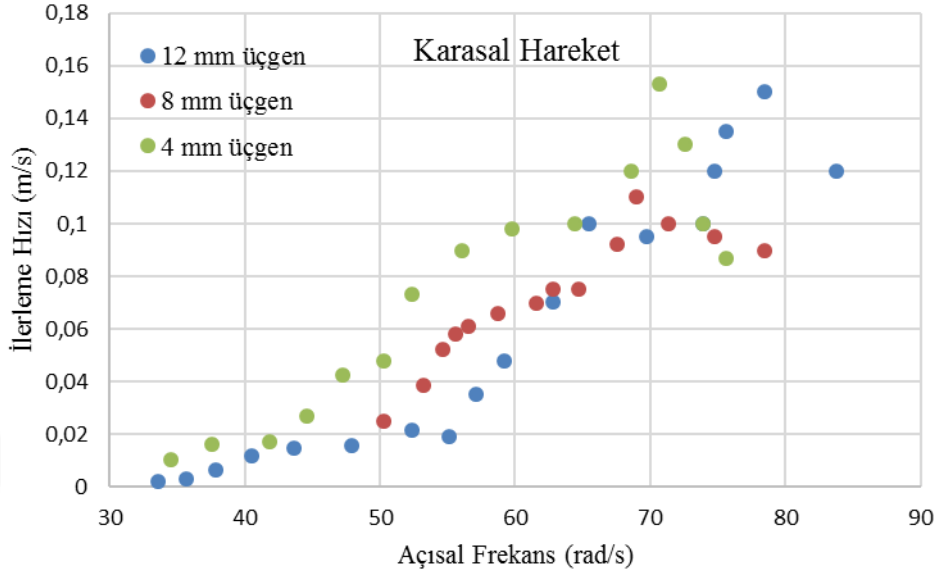


**Şekil 4.17.** 12 mm üçgen ayak için karasal ve sucul yer değiştirme maliyetlerinin açısal frekansa bağlı değişimi

Üçgen ayak modelindeki tüm ayaklarla gerçekleştirilen karasal ilerlemelerde, eliptik modele sahip ayaklarda olduğu gibi, açısal frekansın artması ile birlikte mekanizma hızlanmakta ve belli bir frekansta en yüksek hız değerine ulaşmaktadır. Frekansın artması ile birlikte mekanizmanın hızı tekrar azalmaktadır. Şekil 4.18' de görüldüğü gibi,



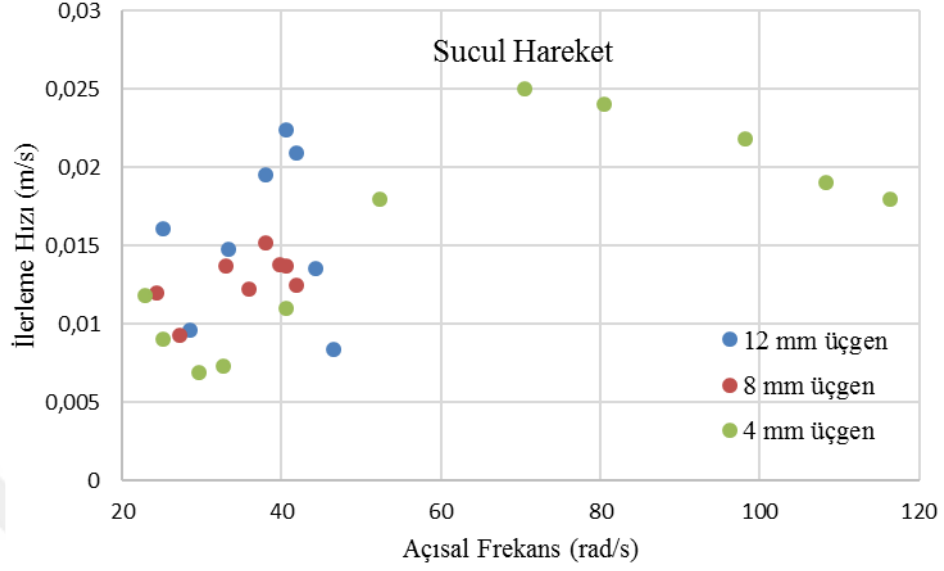
mekanizmanın karasal zeminde ilerlemeye başlama frekansı ayakların yatay uzunluklarına bağlı olarak değişmektedir. Mekanizma 4 mm üçgen ayak yapısında daha düşük frekanslarda diğerlerinden daha yüksek hız değerlerine ulaşabilmektedir.



**Şekil 4.18.** Üçgen ayak yapıları için karasal ilerleme hızlarının açısal frekansa bağlı değişimi

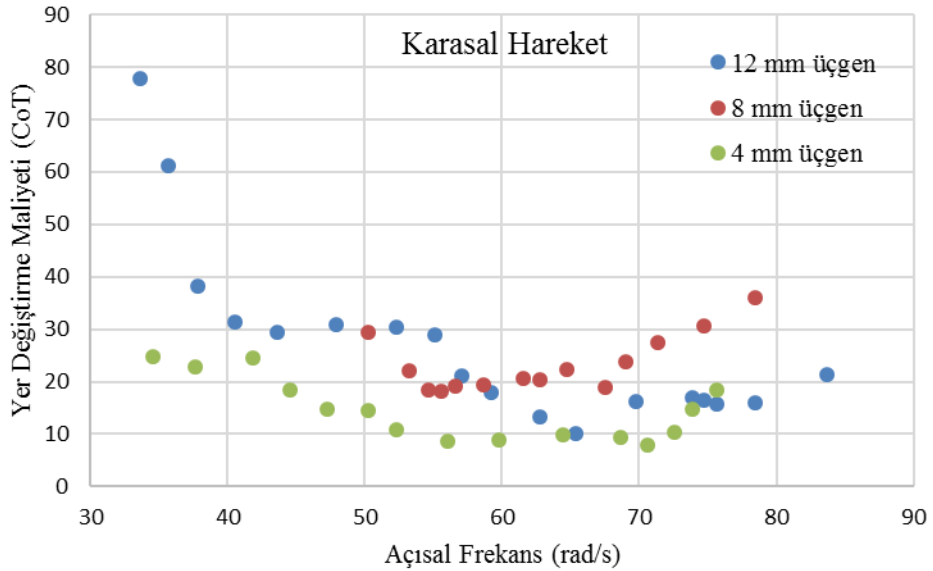
Sucul harekette ise mekanizma eliptik modele sahip ayaklarda olduğu gibi tüm üçgen ayak yapısında yaklaşık aynı açısal frekans (25 rad/s) civarında ilerlemeye başlamaktadır. Ancak şimdiye kadar görülenin aksine mekanizma ilerlemeye düşük hızlardan değil dikkate değer bir hızla başlamaktadır (Şekil 4.19). Tüm üçgen ayak yapıları için düşük frekans değerinde belli bir hızla ilerlemeye başlayan mekanizma frekansın artması ile birlikte yavaşlayıp minimum hız değerinden yaklaşık aynı açısal frekans (28 rad/s) civarında geçip tekrar hızlanmaktadır. Frekansın daha da artması ile mekanizma en yüksek hız değerine ulaşmakta, sonra tekrar yavaşlayarak ilerleme frekans bölgesinden çıkmaktadır. Mekanizma 12 mm' lik yatay uzunluğa sahip ayak ile, diğer ayaklardan daha düşük frekansta en yüksek hız değerine ulaşabilmektedir. 4 mm' lik yatay uzunluğa sahip ayakta ise mekanizma, daha geniş bir frekans aralığında ilerlemesini sürdürebilmekte ve diğerlerinden daha yüksek hız değerine ulaşabilmektedir. Ancak ulaşılan en yüksek hız, yüksek frekans ve yüksek güç tüketim değerlerine karşılık gelmektedir. Mekanizma 8 mm'lik yatay uzunluğa sahip ayak ile birlikte, daha önce belirtildiği gibi 40 rad/s' lik

açısal frekans değerinden sonra geri gitmeye başladığı için oldukça dar bir ilerleme frekans aralığına sahiptir.

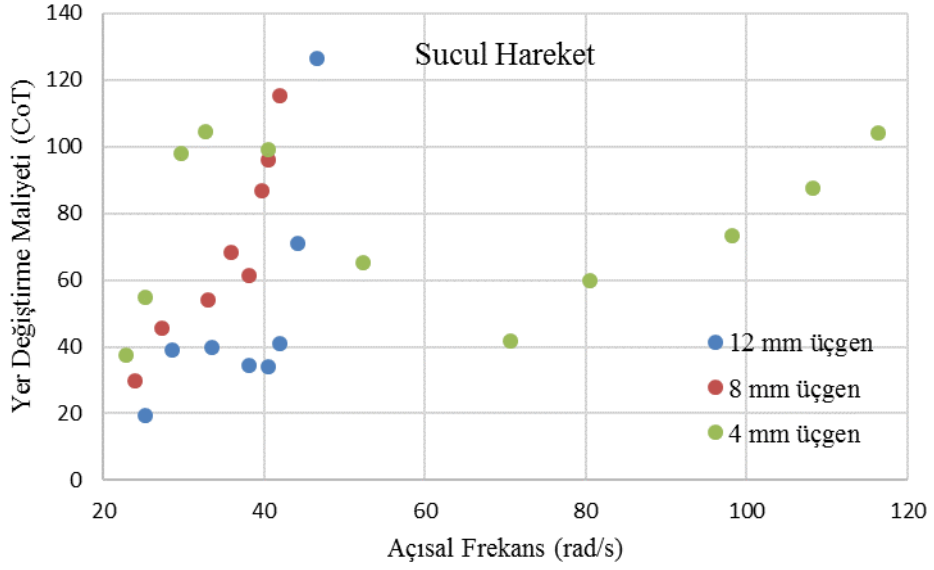


**Şekil 4.19.** Üçgen ayak yapıları için sucul ilerleme hızlarının açısal frekansa bağlı değişimi

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21' de tüm üçgen ayak yapıları için karasal ve sucul yer değiştirme maliyetlerinin açısal frekansa bağlı değişimleri verilmektedir.

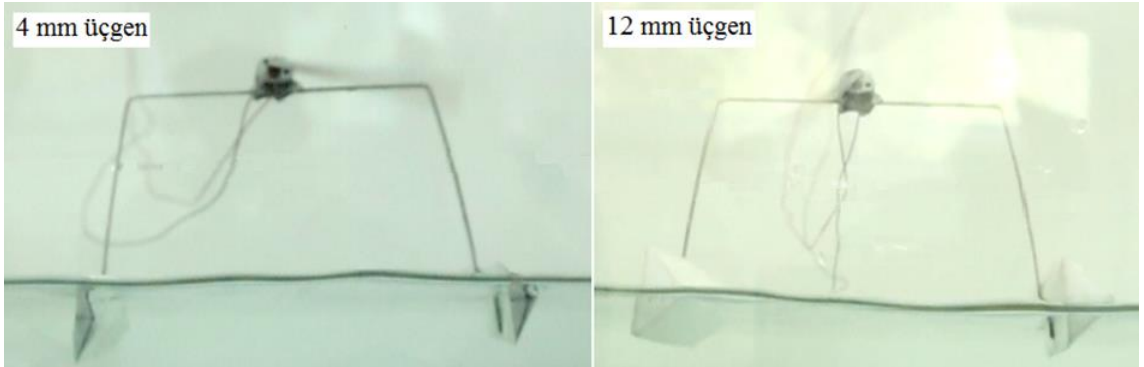


**Şekil 4.20.** Üçgen ayak yapıları için karasal yer değiştirme maliyetlerinin açısal frekansa bağlı değişimi



**Şekil 4.21.** Üçgen ayak yapıları için sucul yer değiştirme maliyetlerinin açısal frekansa bağlı değişimi

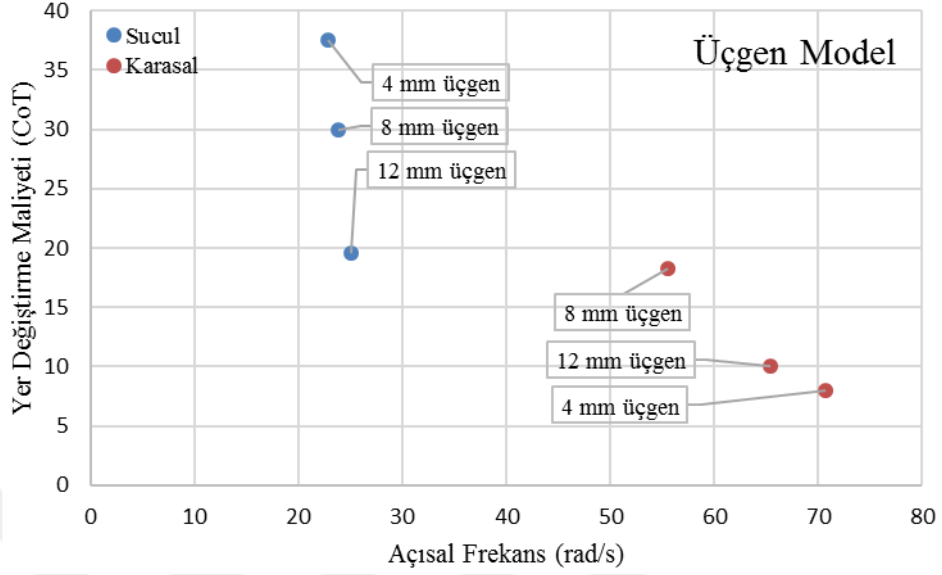
Görüldüğü üzere karasal ilerlemeler için küçük kütleli 4 mm' lik ayak daha düşük yer değiştirme maliyet değerine sahiptir. Sucul ilerlemelerde ise karasal ilerlemenin tersine daha büyük kütleli ayaklar daha düşük yer değiştirme maliyet değerleri vermektedir. Mekanizmanın ilerlemesi esnasında küçük kütleli ayakların neredeyse tamamı su içerisine batmakta (Şekil 4.22) ve bu durum mekanizmayı yavaşlatarak daha fazla güç harcamasına neden olmaktadır.



**Şekil 4.22.** 4 mm ve 12 mm üçgen model ayak yapılarının sucul ilerleme esnasındaki fotoğrafları

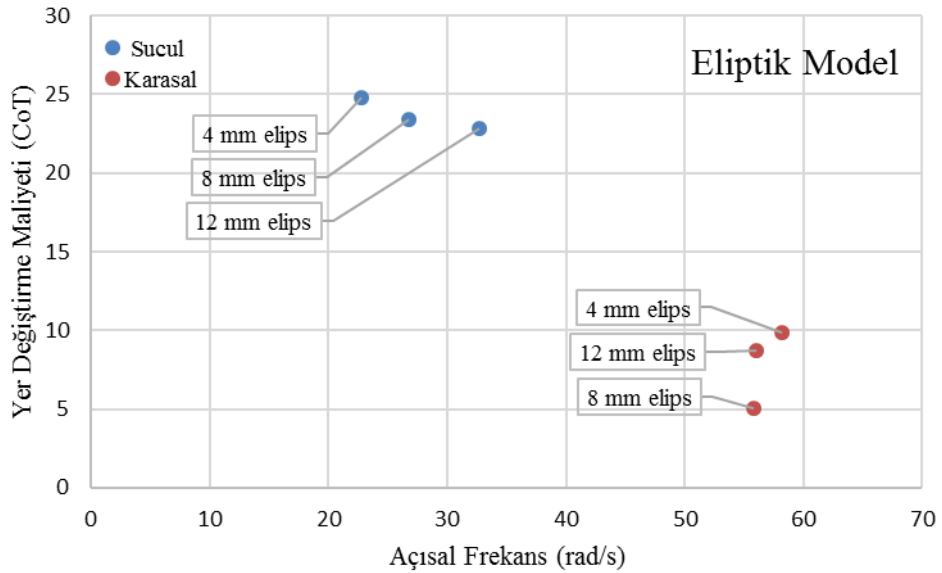
Bu nedenle sucul yer değiştirme maliyeti en düşük değerini büyük kütleye sahip 12 mm' lik ayak yapısında, en yüksek değerini ise küçük kütleye sahip 4 mm' lik ayak yapısında

almaktadır. Bu durum sucul ve karasal ilerlemelerde en düşük yer değiştirme maliyet değerlerinin verildiği Şekil 4.23' de açıkça görülmektedir.



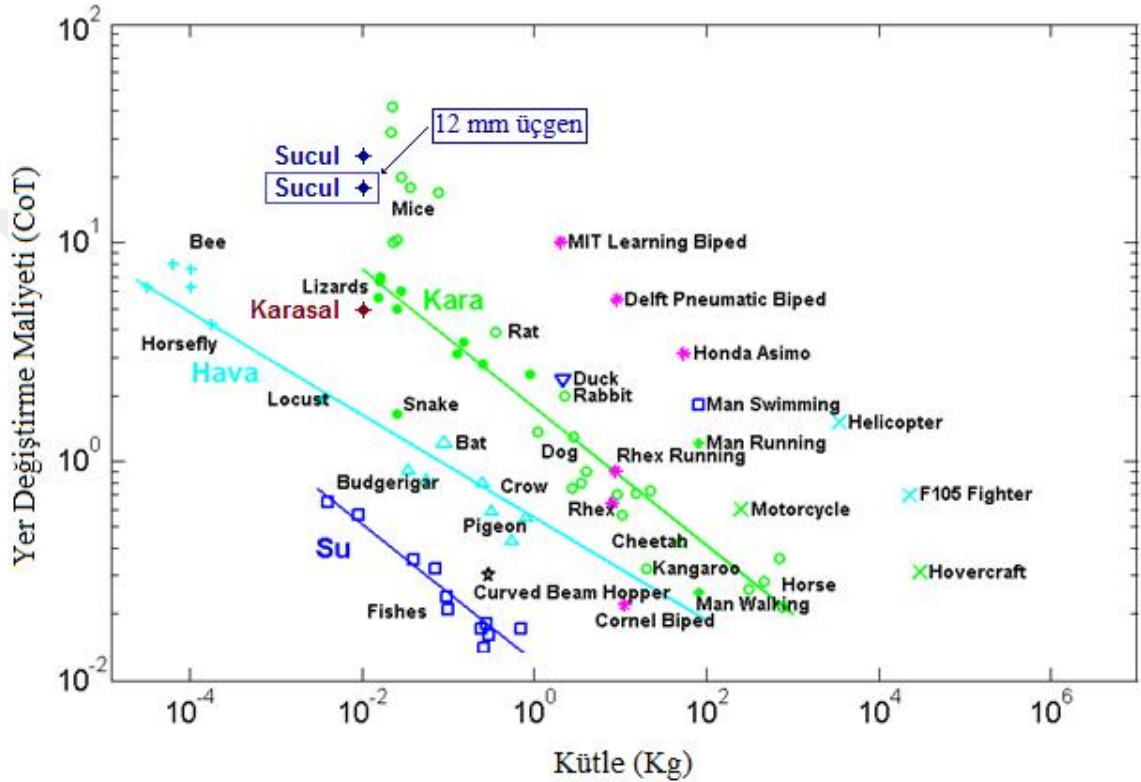
**Şekil 4.23.** Üçgen model ayak yapıları için sucul ve karasal ilerlemelerde en düşük yer değiştirme maliyet değerleri

Eliptik ayak modelindeki üç farklı ayak yapısı için de yer değiştirme maliyet değerlerindeki değişimler üçgen ayak modelindeki ayaklar ile benzerlik göstermektedir (Şekil 4.24).



**Şekil 4.24.** Eliptik model ayak yapıları için sucul ve karasal ilerlemelerde en düşük yer değiştirme maliyet değerleri

Yapılan deneyler sonucunda en düşük yer değiştirme maliyet değerleri karasal ilerlemeler için 8 mm' lik eliptik ayak modelinde, sucul ilerlemeler için ise 12 mm' lik üçgen ayak modelinde elde edilmiştir. Böylece mevcut mekanizmanın 8 mm'lik eliptik ayağa sahip ön modeli için Tucker diyagramında (Sekil 4.3) gösterilen en düşük yer değişme maliyeti değerleri, sucul ilerlemeler için daha büyük kütleli ve farklı ayak modeli kullanılarak düşürölmüştür. Bu yeni durum şekil 4.25 ile verilen Tucker diyagramında gösterilmiştir.



şekil 4.25. Mevcut mekanizmada 12 mm üçgen ayak kullanılması sonucu düşen sucul yer değiştirme maliyetinin Tucker diyagramında gösterimi

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Daha önce yapılan çalışmalarda, titreşime dayalı olarak karada ilerleyen, oldukça düşük enerji tüketimine sahip ve farklı titreşim frekanslarında farklı ilerleme şekilleri gösteren mekanizmalar tanıtılmıştır. Bacaklı robotların, genellikle yüksek enerji tüketim değerleri nedeniyle pratikte çok kullanışlı olmadıkları görülmüştür. Ancak bu durum karasal robotlarda elastik elemanların kullanılması ile birlikte sonlandırılmış ve enerji tüketim değerleri biyolojik organizmaların seviyesine yaklaşmıştır.

Yapılan çalışmada titreşime dayalı olarak hareket eden enerji verimli bir elastik karasal ilerleme mekanizması (Reis ve ark. 2013) üzerinde gerekli değişiklikler yapılarak, mekanizmanın su yüzeyinde de hareketini gerçekleştirebilmesi sağlanmış ve yeni bir amfibi ilerleme mekanizması elde edilmiştir. Bu amaçla robotun boyutları yeniden belirlenerek, eliptik bir kanat profilli ayaklara sahip bir ön model üretilmiş ve deneylerde kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda uygun geometri ve ayak yapısına sahip titreşime zorlanan basit bir elastik çubuğun enerji verimli bir amfibi ilerleme mekanizması olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.

Farklı ayak modelleri üzerine yapılan çalışmalarda eliptik ve üçgen şeklinde modellerde üretilmiş 6 ayak yapısı mekanizmaya monte edilerek karasal ve sucul ilerlemeler için ölçümler yapılmıştır. Ölçümü yapılan her iki ayak modelinde mekanizmanın, karasal ilerlemesini sucul ilerlemeye göre daha hızlı ve daha enerji verimli bir şekilde gerçekleştirdiği gözlenmiştir. Karasal hareket için küçük kütleli ve ince ayaklar, sucul harekette ise büyük kütleli kalın ayaklar daha verimli ilerleme performansı sergilemişlerdir

Karasal ilerlemelerde her iki modeldeki büyük kütleli ayaklar gereksiz yük barındırmakta ve mekanizmanın fazladan enerji tüketmesine yol açmaktadır. Bu nedenle küçük kütleli ayaklar ile daha verimli karasal ilerleme sağlanabilmektedir. Sucul ilerlemelerde aynı malzemedan yapılmış farklı ayaklar, kütlesi sabit olan mekanizmayı su üzerinde taşıyabilmek için eşit hacimlerde suya batmaktadır. Ancak bu durum küçük kütleli ayakların daha büyük bir oranda suya batmalarına neden olmaktadır (bakınız Ek 3).

Ayakların suya daha fazla batması sucul ilerleme esnasında mekanizmayı yavaşlatarak daha fazla güç harcamasına neden olmaktadır. Böylece her iki ayak modeli için sucul yer değiştirme maliyeti en düşük değerini büyük kütleye sahip 12 mm' lik ayak yapılarında, en yüksek değerini ise küçük kütleye sahip 4 mm' lik ayak yapılarında almaktadır.

Mekanizmanın karasal ilerlemede eliptik ayak modeli ile sucul ilerlemede ise üçgen ayak modeli ile daha enerji verimli ilerleme yaptığı görülmüştür. İlerleyen dönemlerde, benzer kütle ve ayak modelleri için farklı malzeme kullanılarak üretilecek ayaklar için ölçümler tekrarlanarak, suda daha hızlı ve verimli ilerlemeyi sağlayacak bir ayak yapısının geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu sayede yer değiştirme maliyetinin düşürülmesi ve su canlılarının ilerleme maliyetine daha yakın değerlere ulaşılması amaçlanmaktadır.

Suya batmayan bir robotun titreşim ile ilerlemesi için geliştirilecek ayak yapısı aynı zamanda robotun karadan suya ve sudan karaya kolaylıkla geçişini sağlayabilecek şekilde olmalıdır. Bu geçişi enerji verimli bir şekilde gerçekleştirecek ayak yapısının, karasal ve sucul ilerlemeyi ortak açısal frekans bölgesi içerisinde ve küçük yer değiştirme maliyetine sahip açısal frekans değerlerinde yapması gerekmektedir. Ayrıca geçişler esnasında hız değişiminin az olmasına da dikkat edilmelidir. Her ne kadar mevcut ayak modelleri ile bu geçişler sağlanmışsa da mekanizmanın farklı yüzeyler arasındaki geçiş performansını arttırmaya yönelik çalışmalar devam etmektedir.

Mevcut ilerleme mekanizması hem karada hem de suda ilerleyebilme yeteneğinin yanı sıra ölçeklenebilirliği sayesinde çok küçük veya çok büyük boyutlarda üretilebilme özelliğine sahiptir. Ancak sucul ilerlemeler için, hidro-statik yüzey gerilmelerinin yardımı ile su yüzeyinde kalabilecek kadar boyutta küçük robotların üretimi mümkün olmaktadır. Gram mertebesinde kütleye sahip bir robota bağlanmış motora elektrik enerjisinin iletilmesi de oldukça problemli ve zor bir iştir. Zira, çok ince kablolar kullanılmasına rağmen kablolarda oluşan gerilmeler robotun hareketini etkilemekte ve kısıtlamaktadır. Bu problem ayrıca ileride üzerinde çalışılması gereken konulardan bir tanesi olarak durmaktadır. Bunların yanında motor, robotun dinamik modelinin önemli bir parçası olup enerji verimli bir ilerleme sağlamak için elektrik tüketimini en aza indiren dişli oranlarına sahip olmalıdır. Tanıtılan mekanizmada sarkacı tahrik eden mikro motor 1/90 çevrim

oranına sahip plastik bir dişli kutusuna sahiptir. Mekanizmanın boyutlarında yapılacak değişikliklerde uygun dişli kutusuna sahip motorların seçilmesi enerji verimliliği bakımından önemlidir.

Bunlara ilave olarak, mevcut mekanizmayı daha fazla enerji verimli hale getirebilmek için simülasyon yönteminden yararlanılabilir. Bunun için önce elimizdeki mevcut mekanizmanın karasal ve sucul hareketleri ANSYS simülasyon yazılımı kullanılarak analiz edilebilir. Daha sonra su yüzeyinde zıplayabilen amfibi karınca, su koşucu ve su kertenkelesi gibi hayvanların yanı sıra, karada zıplayarak ilerleyen tavşan, kanguru gibi hayvanların da ilerleme esnada yaptıkları tüm kemik ve kas hareketleri literatürden detaylı olarak incelenerek kaydedilebilir. Böylelikle farklı yoğunluklara sahip yüzeyler üzerinde zıplama esnasında kemik ve kas hareketlerine ait veri tabanı oluşturulabilir. Bu veriler ve kullandığımız mekanizmaya ait veriler *Robot Expert* gibi mevcut robotik simülasyon programlarına aktarılır. Böylece istenilen hareket türüne göre tasarım üzerinde değişiklikler yapılarak, mekanizma daha enerji verimli hale getirilebilir.



## 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, soft matter and dynamical systems. *Reports on Progress in Physics*, 79: 1-35.
- Akira, R. 2012.** Vortical dynamics in the wake of water strider locomotion. *Journal of Visualization*, 15:145-153.
- Albitar, H., Ananiev, A., Kalaykov, I. 2014.** In-water surface cleaning robot: concept, locomotion and stability. *Int. J. Mechatronics and Automation*, 4(2): 104-115.
- Alexander, R. N. 2006.** Principles of animal locomotion. Princeton Üniversitesi Basımı. Princeton, USA, 384 pp.
- Andersen, N. M. 1976.** A comparative study of locomotion on the water surface in semiaquatic bugs (Insecta, Hemiptera, Gerromorpha). *Vidensk. Meddr dansk naturh. Foren.*, 139: 337–396.
- Anonim, 2019a.** AmphibiaWeb. <https://amphibiaweb.org/>-(Erişim tarihi: 07.08.2019).
- Anonim, 2019b.** 7 Cool Facts About Water Striders. <https://blog.nature.org/science/2017/04/10/7-cool-facts-water-striders-skipper-pond-skaters-weird-nature/>-(Erişim tarihi: 07.08.2019).
- Anonim, 2019c.** Pliant Enerji Sistemleri, Velox tanıtım sayfası. <https://www.pliantenergy.com/home-1/>-(Erişim tarihi: 07.02.2019).
- Armour, R., Paskins, K., Bowyer, A., Vincent, J., Megill, W. 2007.** Jumping robots: a biomimetic solution to locomotion across rough terrain. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2: 565-582.
- Au, D., Weihs, D. 1980.** At high speeds dolphins save energy by leaping. *Nature*, 284: 548-550.
- Becker, F., Zimmermann, K., Volkova, T., Minchenya, V.T. 2013.** An amphibious vibration-driven microrobot with a piezoelectric actuator: 7. *Regular and Chaotic Dynamics*, 18(1–2): 63-74.
- Bhatti, J., Hale, M., Irvani, P., Plummer, A., Sahinkaya, N. 2017.** Adaptive height controller for an agile hopping robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 98: 126-134.
- Breugel, F.V., Dickinson, M. H. 2017.** Superhydrophobic diving flies (Ephydrahians) and the hypersaline waters of Mono Lake. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 114: 13483-13488.
- Brinkhurst, R. O. 1960.** Studies on the functional morphology of *Gerris najas* degeer (Hem. Het. Gerridae). *Proceedings of the Royal Society of London*, 133: 531-559.
- Buhler, O. 2007.** Impulsive fluid forcing and water strider locomotion. *Journal of Fluid Mechanics*, 573:211-236.
- Burrows, M. 2013.** Jumping from the surface of water by the long-legged fly *Hydrophorus* (Diptera, Dolichopodidae). *Journal of Experimental Biology*, 216: 1973-1981.
- Calisti, M., Picardi, G., Laschi, C. 2017.** Fundamentals of soft robot locomotion. *Journal of Royal Society Interface*, 14: 1-16.
- Caponigro, M. A., Eriksen, C. H. 1976.** Surface film locomotion by the water strider, *Gerris remigis* Say. *American Midland Naturalist*, 95:268-278.

- Chen, Y., Doshi, N., Goldberg, B., Wang, H., Wood, R.J. 2018.** Controllable water surface to underwater transition through electro wetting in a hybrid terrestrial aquatic microrobot. *Nature Communications*, 9(2495): 1–11.
- Clifton, G., Carr, J., Biewener, A. 2017.** Comparative hindlimb myology of foot-propelled swimming birds. *Journal of Anatomy*, 232(1):105-123.
- Collins, S., Ruina, A., Tedrake, R., Wisse, M. 2005.** Efficient bipedal robots based on passive dynamic walkers. *Science*, 307: 1082–1085.
- Crespi, A., Karakasiliotis, K., Guignard, A., Ijspeert, A.J. 2013.** Salamandra Robotica II: An Amphibious Robot to Study Salamander-Like Swimming and Walking Gaits. *IEEE Transactions on Robotics*, 29(2): 308-320.
- 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*, 24(3): 698-709.
- Gao, X. F., Jiang, L. 2004.** Water-repellent legs of water striders. *Nature*, 432: 36–36.
- Gao, P., Feng, J. J. 2011.** A numerical investigation of the propulsion of water walkers. *Journal of Fluid Mechanics*, 668: 363–383.
- Geyer, H., Blickhan, R., Seyfarth, A. 2005.** Spring-mass running: simple approximate solution and application. *Journal of Theoretical Biology*, 232: 315-328.
- Hanan, U. B., Weiss, A., Zaitsev, V. 2018.** Jumping efficiency of small creatures and its applicability in robotics. *Procedia Manufacturing*, 21: 243-250.
- Henry, T. J. 2009.** Biodiversity of Heteroptera. *Insect Biodiversity: Science and Society*, Wiley – Blackwell, United Kingdom, Footitt R., Adler P. (editörler), Kitap Bölümü: 223–263, 632 s.
- Hu, D. L., Chan, B., Bush, J. W. M. 2003.** The hydrodynamics of water strider locomotion. *Nature*, 424: 663–666.
- Hu, D. L., Prakash M., Chan, B., Bush, J. W. M. 2007.** Water-walking devices, *Experiments in Fluids*, 43:769-778.
- Hu, D. L., Bush, J. W. M. 2010.** The hydrodynamics of water-walking arthropods. *Journal of Fluid Mechanics*, 644: 5-33.
- Jimenez, V. M. O., Rabenau, L., Dudley, R. 2017.** Escape jumping by three age-classes of water striders from smooth, wavy and bubbling water surfaces. *Journal of Experimental Biology*, 220: 2809-2815.
- Kar, D.C., Kurien, I.K., Jayarajan, K. 2003.** Gaits and energetics in terrestrial legged locomotion. *Mechanism and Machine Theory*, 38: 355–366.
- Kashem, S., Sufyan, H. 2017.** A novel design of an aquatic walking robot having webbed feet. *International Journal of Automation and Computing*, 14(5): 576-588.
- Kelasidi, E., Jesmani, M., Pettersen, K. Y., Gravdahl, J. T. 2018.** Locomotion efficiency optimization of biologically inspired snake robots. *Applied Science*, 8: 1-23.
- Keller, J.B. 1998.** Surface tension force on a partly submerged body. *Physics of Fluids*, 10:3009-3010.
- Kim, H.G., Lee, S.H., Lim, E., Jeong, K., Seo, T.W. 2016a.** Comparative study of leg mechanisms for fast and stable water-running. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 17(3): 379-385.
- Kim, H.G., Lee, D.G., Liu, Y., Jeong, K., Seo, T.W. 2016b.** Hexapedal Robotic Platform for Amphibious Locomotion on Ground and Water Surface. *Journal of Bionic Engineering*, 13: 39–47.
- Kim, H.Y., Amauger, J., Jeong, H.B., Lee, D.G., Yang, E., Jablonski, P.G. 2017.** Mechanics of jumping on water. *Physical Review Fluids*, 2 100505:1-10.

- Koh, J. S., Yang, E., Jung, G. P., Jung, S. P., Son, J. H., Lee, S. I., Cho, K. J. 2015.** Jumping on water: Surface tension-dominated jumping of water striders and robotic insects. *Science*, 349(6247): 517-521.
- Kühnel, D.T., Helps, T., Rossiter, J. 2016.** Kinematic Analysis of VibroBot: A Soft, Hopping Robot with Stiffness and Shape-Changing Abilities. *Frontiers in Robotics AI*, 3(60): 1-11.
- Kwak, B., Bae, J. 2018.** Locomotion of arthropods in aquatic environment and their applications in robotics. *Bioinspiration & Biomimetics*, 13 041002:1-26.
- Li, J., Hesse, M., Ziegler, J., Woods, A.W. 2005.** An arbitrary Lagrangian Eulerian method for moving-boundary problems and its application to jumping over water. *Journal of Computational Physics*, 208: 289-314.
- Li, L., Li, G., Li, R., Xiao, Q., Liu, H. 2018.** Multi-fin kinematics and hydrodynamics in pufferfish steady swimming. *Ocean Engineering*, 158: 111-122.
- 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.
- Matsuo, T., Yokoyama, T., Ueno, D., Ishii, K. 2008.** Biomimetic Motion Control System Based on a CPG for an Amphibious Multi-Link Mobile Robot. *Journal of Bionic Engineering Suppl.*, 91-97.
- McGeer, T. 1990.** Passive dynamic walking. *The International Journal of Robotics Research*, 9(2): 62-82.
- 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.
- Raibert, M.H. 1986.** Legged robots. *Communications of the ACM*, 29 (6): 499-514.
- Reis, M., Iida, F. 2011.** Hopping robot based on free vibration of an elastic curved beam. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 892-897.
- Reis, M., Yu, X., Maheshwari, N., Iida, F. 2013.** Morphological computation of multi-gaited robot locomotion based on free vibration. *Artificial Life*, 19: 97-114.
- Reis, M., Iida, F. 2014.** An energy-efficient hopping robot based on free vibration of a curved beam. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 19: 300-311.
- Salazar, R., Fuentes, V., Abdelkefi A. 2018.** Classification of biological and bioinspired aquatic systems: A review. *Ocean Engineering*, 148: 75-114.
- Scaradozzi, D., Palmieri, G., Costa, D., Pinelli, A. 2017.** BCF swimming locomotion for autonomous underwater robots: a review and a novel solution to improve control and efficiency. *Ocean Engineering*, 130: 437-453.
- Shi, L., Guo, S., Mao, S., Yue, C., Li, M., Asaka, K. 2013.** Development of an Amphibious Turtle-Inspired Spherical Mother Robot. *Journal of Bionic Engineering*, 10: 446-455.
- 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.
- Suter, R. B., Rosenberg, O., Loeb, S., Wildman, H., Long, J. H. 1997.** Locomotion on the water surface: propulsive mechanisms of the fisher spider *Dolomedes triton*. *Journal of Experimental Biology*, 200:2523-2538.
- Suter, R.B. 2013.** Spider locomotion on the water surface: biomechanics and diversity. *The Journal of Arachnology*, 41: 93-101.

- Takagi, H., Nakashima, M., Sato, Y., Matsuuchi, K., Sanders, R. 2015.** Numerical and experimental investigations of human swimming motions. *Journal of Sports Sciences*, 34(16):1-17.
- Tucker, V.A. 1975.** The Energetic Cost of Moving About: Walking and running are extremely inefficient forms of locomotion. Much greater efficiency is achieved by birds, fish and bicyclists. *American Scientist*, 63(4): 413-419.
- Whittlesey, R. W. 2011.** Wake-based unsteady modeling of the aquatic beetle *Dytiscus marginalis*. *Journal of Theoretical Biology*, 291: 14–21.
- Wilson, R. P., Wilson, M.-P. T., Nöldeke, E. C. 1992.** Pre-dive leaps in diving birds; Why do kickers sometimes jump. *Marine Ornithology*, 20: 7-16.
- 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.
- Yang, E., Son, J.H., Lee, S., Jablonski, P.G., Kim, H.Y. 2016.** Water striders adjust leg movement speed to optimize take off velocity for their morphology. *Nature Communications*, 7(13698): 1-9.
- Yanoviak, S.P., Frederick, D.N. 2014.** Water surface locomotion in tropical canopy ants. *The Journal of Experimental Biology*, 217: 2163-2170.
- Yu, X., Iida F. 2014.** Minimalistic models of an energy-efficient vertical-hopping robot. *IEEE Transactions and Industrial Electronics*, 61(2): 1053-1062.
- Zhang, S., Liang, 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.
- Zhang, Z., Chen, D., Chen, K., Chen, H. 2016.** Analysis and comparison of two jumping leg models for bioinspired locust robot. *Journal of Bionic Engineering*, 13: 558-571.
- Zheng, J., Yu, K., Zhang, J., Wang, J., Li, C. 2015.** Modeling of the propulsion hydrodynamics for the water strider locomotion on water surface. *Procedia Engineering*, 126: 280-284
- 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.

## **EKLER**

- EK 1** İlerleyebilme yeteneğine sahip karasal robotların tarihsel gelişimi.
- EK 2** U- şeklindeki elastik çubuğun karasal ilerleme hareketi için burulma ve boyuna rezonans frekanslarının eldesi.
- EK 3** Mekanizmanın eliptik ve üçgen ayak modellerine sahip ayak yapıları ile birlikte su üzerindeki görünüşleri.



## **EK 1.** İlerleyebilme yeteneğine sahip karasal robotların tarihsel gelişimi

**1940** yılında Burden Nöroloji Enstitüsü'nde, William Grey Walter tarafından ışığa yönelerek ilerleyen ilk robot *Machina Speculatrix* geliştirildi.

**1948 ve 1949** yıllarında Burden Nöroloji Enstitüsü'nde, William Grey Walter tarafından *Elsie* ve *Elmer* adlarında robotlar geliştirildi. Kaplumbağa benzeri oval şekilli bu robotlar üç tekerlek üzerinde hareket ediyor ve yön değiştirmesi iki motorla sağlanıyordu.

**1968** yılında Stanford Araştırma Enstitüsü'nde *Shakey* isimli görme yeteneği olan ilk ilerleyebilen robot üretildi.

**1979** yılında Stanford Üniversitesi'nde geliştirilen *Stanford Cart* isimli ilerleyen robot, üzerine monte edilmiş kameradan aldığı görüntüleri bilgisayara aktararak, engellerle dolu bir odayı çarpmadan boydan boya geçti

**1984** yılında Stanford Araştırma Enstitüsü tarafından *Shakey*' den daha gelişmiş bir ilerleyen robot olan *Lakey* üretildi.

**1993** yılında Amerikan Deneysel Bilgi Sistem Laboratuvarı'nda *ERRATIC* ve *PIONEER1* isimli ilerleyen robotlar üretildi. Bu robotlarda sensor motorlar kullanılarak robotların çevresini keşfetmelerini sağlayan bir öğrenme mekanizması geliştirilmiştir.

**1998** yılında Tiger Elektronik tarafından ışığa ve sese duyarlı robot oyuncak *FURBY* üretildi.

**1999** yılında Sony tarafından oyuncak robot köpek *Aibo* piyasaya sürüldü.

**2000** yılında Honda tarafından yeni insan görünümlü robot *Asimo* dünyaya tanıtıldı.

**2003** yılında NASA'nın ikiz gezginleri *Spirit* ve *Opportunity* Mars yüzeyine indirildiler.

**2008** yılında NASA'nın gezgin *Phoenix* robotu Mars yüzeyine indirildi.

**2012** yılında *Curiosity* gezgini Mars yüzeyine indirildi.

**2014** yılında insan görünümlü bir robot Japonya’da haber bülteni sundu.

**2015** yılında insan gibi görünüp rol yapabilmesi için özel olarak tasarlanan *Geminoid F* isimli bir robot, Sayonora filminde “Leona” adlı karakteri canlandırarak tarihe geçti.

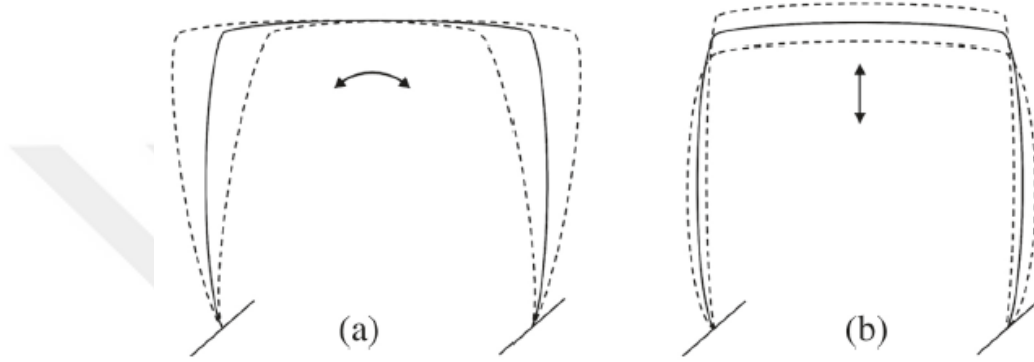
**2016** yılında Boston Dynamics, iki ayak üzerinde yürüyen dünyanın en gelişmiş engebeli arazi ve iş robotlarından *Atlas*’ ı tanıttı.

**2016** yılında Hanson Robotics tarafından insan görünümlü *Sofia* adlı robot tanıtıldı.



**EK 2.** U- şeklindeki elastik çubuğun karasal ilerleme hareketi için burulma ve boyuna rezonans frekanslarının eldesi

Karasal ilerleme hareketi için oluşturulan fiziksel model Şekil 3.2' de gösterilmiştir. Burada her iki bacağın başlangıç boylarının  $L_0$ , ve başlangıç açılarının ise sıfıra eşit olduğu varsayılmaktadır,  $\theta_0 = 0$  (rad). Elastik kirişin burulma ve boylamasına titreşimlerinin abartılı bir gösterimi Şekil E.2.1' de verilmektedir.



**Şekil E.2.1.** Elastik kirişin (a) burulma ve (b) boylamasına titreşimlerinin abartılı bir gösterimi

Burulma (torsiyonel) rezonans frekansı için en basit analitik çözümlerden biri, elastik robotu birbirine dönme yayları ile bağlı paralel çubuk mekanizması olarak kabul edilerek hesaplanabilir. Bu durumda, açılar ve bacak boyları  $\theta_f = \theta_h = \theta$  ve  $L_v = L$  olarak alınarak, Lagrangian  $\mathcal{L}$  aşağıdaki gibi türetilir.

$$\mathcal{L} = m_{top}gL\cos\theta + \frac{1}{2}m_{top}(L\dot{\theta})^2 + k_{\theta}(\theta - \theta_0)^2 + k_l(L - L_0)^2 \quad (E.1)$$

İfadenin  $\theta$  burulma açısına göre diferansiyeli alınarak, hareketin burulma denklemi şu şekilde yazılabilir:

$$0 = -m_{top}gL\sin\theta + m_{top}L^2\ddot{\theta} + 2k_{\theta}(\theta - \theta_0) \quad (E.2)$$

$$\ddot{\theta} + \frac{2k_{\theta}\theta - m_{top}gL\sin\theta}{m_{top}L^2} = \frac{2k_{\theta}\theta_0}{m_{top}L^2} \quad (E.3)$$



Eşitlik E.3, küçük açı değişimleri için ( $\sin\theta \approx \theta$ ) doğrusal hale getirilebilir ve U-şeklindeki elastik çubuğun burulma rezonans frekansı ( $\omega_\theta$ ), bu diferansiyel denklemin homojen kısmı kullanılarak elde edilebilir:

$$\ddot{\theta} + \omega^2\theta = 0 \quad (\text{E.4})$$

$$\omega_\theta = \sqrt{\frac{2k_\theta - m_{top}gL}{m_{top}L^2}} \quad (\text{E.5})$$

Burada  $k_\theta$ , Şekil 3.2' de gösterildiği gibi omurga ile bacaklar arasındaki birleşme noktasında çubuğun burulma sertliğini temsil etmektedir.

Benzer şekilde boyuna rezonans frekansının çözümü için, elastik robotun bacakları doğrusal yaylar olarak kabul edilir. Eşitlik E.1'deki Lagrangianın,  $L$  bacak uzunluğuna göre diferansiyeli alınarak,

$$0 = m_{top}g + m_{top}\ddot{L} + 2k_L(L - L_0) \quad (\text{E.6})$$

$$\ddot{L} + \frac{2k_L}{m_{top}}L = \frac{2k_LL_0 - m_{top}g}{m_{top}} \quad (\text{E.7})$$

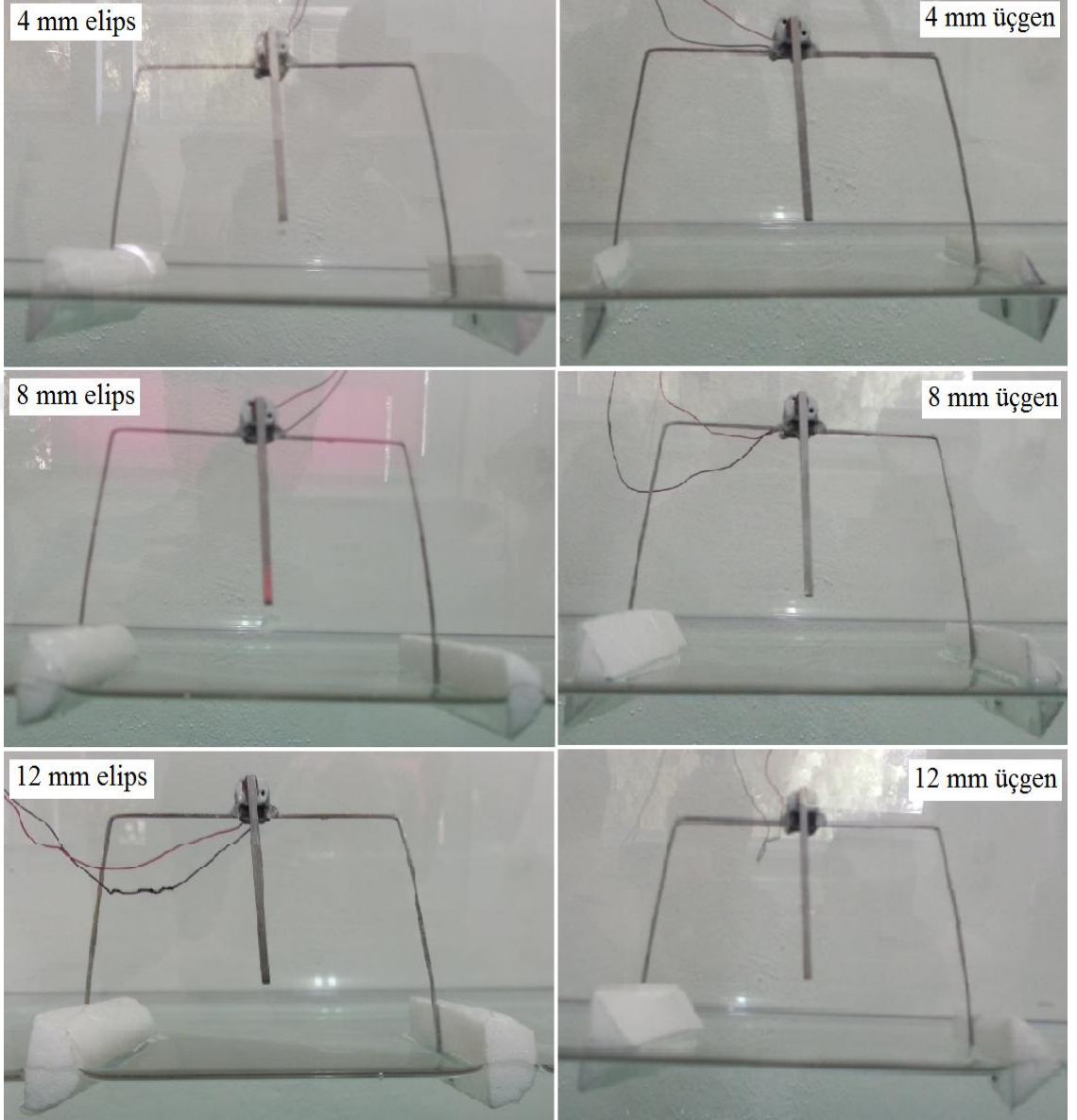
elde edilir. Elastik kirişin boyuna rezonans frekansı ( $\omega_L$ ), bu diferansiyel denklemin homojen kısmı kullanılarak elde edilebilir:

$$\ddot{L} + \omega_L^2L = 0 \quad (\text{E.8})$$

$$\omega_L = \sqrt{\frac{2k_L}{m_{top}}} \quad (\text{E.9})$$

Burada  $k_L$ , Şekil 3.2' de gösterildiği gibi, bacakların boyuna sertliğini temsil etmektedir.

**EK 3.** Mekanizmanın eliptik ve üçgen ayak modellerine sahip ayak yapıları ile birlikte su üzerindeki görünümü



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ahmed Burak Tapan  
Doğum Yeri ve Tarihi : Bristol-İngiltere, 12.02.1994  
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu  
Lise : Özel Bursa Meltem Lisesi (2012)  
Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Bölümü (2016)  
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Elektronik Mühendisliği Bölümü (2017)  
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı (2016-...)

Çalıştığı Kurum : TOFAS Türk Otomobil Fabrikası A.Ş.

İletişim (e-posta) : ahmedburaktapan@gmail.com

Yayımları :

**Tapan, A.B., Reis M. 2018.** Robotik uygulamalar için su üstünde titreşime dayalı hareket eden yenilikçi bir ilerleme mekanizması. 6th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, 09-11 Kasım, 2018, Antalya.