



T.C.

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AKILLI KOMPOZİT ÜRETİM TEKNİĞİ İLE BACAĞI ÖZGÜN
BİR ROBOTUN TASARIMI, ÜRETİMİ, TEST VE ANALİZLERİ**

Doktora Tezi

Mustafa Reşit HABOĞLU

Çorum - 2022

**AKILLI KOMPOZİT ÜRETİM TEKNİĞİ İLE BACAĞI ÖZGÜN BİR
ROBOTUN TASARIMI, ÜRETİMİ, TEST VE ANALİZLERİ**

Mustafa Reşit HABOĞLU

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Doktora Tezi

TEZ DANIŞMANI

Prof. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Onur ÖZCAN

Çorum 2022

Mustafa Reşit HABOĞLU tarafından hazırlanan “Akıllı Kompozit Üretim Tekniği ile Bacaklı Özgün Bir Robotun Tasarımı, Üretimi, Test ve Analizleri” adlı tez çalışması 21/12/2022 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Mehmet Fatih IŞIK

.....

Prof. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU

.....

Dr. Öğr. Üyesi Ferid KÖSTEKÇİ

.....

Dr. Öğr. Üyesi Nurettin Gökhan ADAR

.....

Dr. Öğr. Üyesi Sertaç SAVAŞ

.....

Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun .../.../..... tarih ve sayılı kararı ile Mustafa Reşit HABOĞLU'nun Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora derecesi alması onanmıştır.

Prof. Dr. Muhammed Asif YOLDAŞ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.

Mustafa Reşit HABOĞLU



AKILLI KOMPOZİT ÜRETİM TEKNİĞİ İLE BACAKLI ÖZGÜN BİR ROBOTUN TASARIMI, ÜRETİMİ, TEST VE ANALİZLERİ

Mustafa Reşit HABOĞLU

ORCID: 0000-0002-5778-8383

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Doktora Tezi

Aralık 2022

ÖZET

Günümüzde insanlar tarafından gittikçe daha fazla kullanılan robot teknolojisi her geçen gün gelişmeye devam etmektedir. Son yıllarda makro boyutlu robotların yanında minyatür boyutlu robotlar da araştırılmaya ve kullanılmaya başlamıştır. Minyatür robotlar literatürde boyut limitlerine göre nano ($< 1 \mu\text{m}$), mikro ($< 1 \text{ mm}$), mili ($< 10 \text{ mm}$), mini ($< 100 \text{ mm}$) ve küçük ($< 1000 \text{ mm}$) robotlar olarak adlandırılmaktadır. Bunların arasında bulunan mini robotlar özellikle insanların ulaşamayacağı boyutta olan bölgelerde veya insan sağlığı için zarar teşkil edecek alanlarda keşif amaçlı kullanılabilir. Bu çalışmada akıllı kompozit mikroyapılar (ing. Smart composite microstructuresi SCM) olarak adlandırılan üretim tekniği kullanılarak bacaklı ve özgün bir mini robot tasarlanmış, üretilmiş ve modellenmiştir. Robotun tasarım ve üretim sürecinde farklı dış iskelet yapıları, hareket mekanizmaları, bacak yapıları ve dönme mekanizmaları geliştirilmiştir. Bu geliştirme süreci iteratif bir şekilde bir önceki tasarımda karşılaşılan sorunlar giderilecek şekilde ele alınmıştır. Sonuç olarak çalışmada iki adet altı bacaklı ve bir adet dört bacaklı robot modeli ortaya çıkarılmıştır. Altı bacaklı modellerden biri şekil hafızalı alaşım ile bükülebilen bacak tasarımına sahipken diğer modeller doğadan esinlenerek oluşturulmuş olan diz eklemine sahiptir ve dizlerin bir eyleyici kullanımı olmadan bükülmesi sağlanmıştır. Şekil hafızalı alaşıma sahip bacak modelinde robotun performans isterlerini yeterince sağlamadığı görülmüştür. Bu nedenle diz eklemine sahip olan modeller daha detaylı olarak incelenmiş ve sonuçta dört bacaklı model nihai robot modeli olarak belirlenmiştir. Daha sonra "Double Actuated Soft Tendon Quadruped (DASTeQ) (tr. Çift Eyleyicili Yumuşak Tendonlu Dört Bacaklı Robot)" olarak adlandırılan ve $87.5 \times 78 \times 57.3 \text{ mm}$ boyutlarına ve 61.04 g ağırlığa sahip olan bu mini robot modeli için hareket analizi ve farklı

hızlarda yürüme modeli ortaya konulmuştur. Robotun hareketini yakalamak için görüntü işleme yazılımı geliştirilmiş ve bu sayede robotun belirli noktalarının gerçek zamanlı koordinat verileri çıkarılmıştır. Yapılan hareket analizi testleri sonucunda DASTeQ'in keşif amaçlı kullanıma uygun olacak şekilde stabil bir yürüyüşe sahip olduğu ortaya çıkarılmıştır. Buna ek olarak bacak hareketleri ile gövde hareketi yürüyüş esnasında karşılaştırmalı olarak ele alınmış ve bacakların harekete verdikleri katkılar da analiz edilmiştir. Farklı giriş hızlarında yapılan deneyler sonucunda robotun gerçek yürüme hızları belirlenmiş ve bu veri doğrusal bir modele oturtulmuştur. Ayrıca robotun dönüş hareketi yapma becerisi de test edilmiş ve zamana bağlı olarak ne kadar dönüş gerçekleştirebildiği tespit edilmiştir. Geliştirilen hız modeli ve dönüş verisi kullanılarak robotun belirli bir hızda daha önceden belirlenmiş dikdörtgen şeklindeki bir parkuru tamamlayabilme kapasitesini test etmek için yol izleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Robotun başarılı bir şekilde kendisine verilen görevleri yerine getirebildiği görülmüştür.

Anahtar Kavramlar: Mini robot; Bacaklı hareket; SCM, Robotik, Minyatür robotlar.

Bilim Kodu: 91430

A NOVEL LEGGED ROBOT USING SMART COMPOSITE MICROSTRUCTURES: DESIGN, MANUFACTURING, TEST AND ANALYSES

Mustafa Reşit HABOĞLU

ORCID: 0000-0002-5778-8383

HITIT UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL

Doctor of Philosophy Thesis

December 2022

ABSTRACT

Robot technology, which is being used more and more by humanity, continues to develop recently. Along with macro robots, small scale robots have also been researched and used in recent years. In the literature, small scale robots are classified via their size limits such as nano ($< 1 \mu\text{m}$), micro ($< 1 \text{ mm}$), milli ($< 10 \text{ mm}$), mini ($< 100 \text{ mm}$) and small ($< 1000 \text{ mm}$) robots. Among those robot classes, mini robots are especially being used as exploration devices especially in hazardous environments and places that are unreachable by humans. In this study, a novel legged mini robot was designed, manufactured and modelled using a manufacturing technique called "Smart Composite Microstructures (SCM)". During the design and production process of the robot, different exoskeleton structures, movement mechanisms, leg structures and steering mechanisms were developed. The development process was handled iteratively in a way that the problems encountered in the previous design are eliminated. As a result, two six-legged and one four-legged robot models were presented in the study. One of the six-legged models has a leg design that can be bent with shape memory alloy, while the other models have a biologically inspired knee joint which can bent without the use of an actuator. In the leg model with shape memory alloy, the result is that the robot moves very slowly. For this reason, the other two models were examined comparatively and the four-legged model was determined as the final model according to the experimental results. Then, a motion analysis and a speed model for different motor inputs were performed for the final model which was named "Double Actuated Soft Tendon Quadruped (DASTeQ)" and has the dimensions of $87.5 \times 78 \times 57.3 \text{ mm}$ along with the weight of 61.04 g . An image processing software was developed for the motion capturing of the robot. The real time position

coordinates of the certain points on the robot were gathered and recorded as experimental data. The motion analysis of the robot showed that DASTeQ has high stability gait performance which results in an availability to be used in exploration duties. In addition to that, the motions of the legs and the body were also analysed comparatively in order to determine the leg contributions to the forward motion of the robot. Moreover, the gait speed of the robot was monitored for different motor inputs and the data was fitted to a linear speed model. Besides those, the steering performance and the turning duration of the robot were also determined experimentally. Using the developed speed model along with the steering data, path tracking experiments for a certain input value were performed in a previously created rectangular parkour. The robot successfully completed the expected mission.

Key Terms: Mini robot; Legged locomotion; SCM, Robotics, Miniature robots

Science Code: 91430



Mehmet Galip Haboğlu'na

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının tamamlanmasında süreç boyunca göstermiş olduğu rehberlik ve destekleri nedeniyle danışmanım Prof. Dr. Cengiz Baykasoğlu'na, yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçların yorumlanmasında zaman gözetmeksizin desteğini esirgemeyen ikinci danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Onur Özcan'a, çalışma süresince tezime yön vermemde emeği geçen değerli tez izleme komitesi üyeleri Doç Dr. Mehmet Fatih Işık ve Dr. Öğr. Üyesi Ferid Köstekci'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca tez çalışması süresince özellikle tasarım ve üretim aşamalarında her zaman tecrübesine başvurduğum Mustafa Çağrı Özkader'e ve testleri gerçekleştirmek için görüntü işleme tecrübelerinden faydalandığım Dr. Celal Utku Deniz'e de özellikle teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışması süresince her ihtiyacım olduğunda yanımda olan, çalışma ortamımı aile ortamına dönüştüren Dr. Sertaç Samed Seyitoğlu ve Dr. Erhan Çetin'e, üniversitede sıcak arkadaşlıklarıyla motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayan Dr. Merve Tunay Tozlu, Dr. Gamze Nur Müjdecı, Ömer Faruk Tozlu ve Dr. Emir Avcıoğlu'na, ve çalışmanın çıkmaza girdiği bir zamanda tek bir cümle ile çalışmaya dokunmuş olan Dr. Mustafa Güzel'e teşekkür ederim.

Çalışmanın stresinden her uzaklaşmak istediğimde kendimi tekrar bulmamı sağlayan basketbol ve müziğe, basketbol sporunu aktif olarak yerine getirebilme imkanını bana veren ERA Basketbol Takımı oyuncularına, sahnede müzik yapmanın ve şarkı yayınlamanın hazzını bana yaşatan sevgili NORM grubu üyeleri Dr. Mehmet Nurullah Alkan, Onur Tuzcu ve Melih Şehirli'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Son ama bir o kadar önemli olarak bu günlere gelmemde en büyük pay sahibi olan babam Mehmet Galip Haboğlu ve annem Mücella Haboğlu'na, güler yüzü ve güzel kalbiyle hayatımı her zaman olabileceğinden daha iyi hale getiren değerli eşim Nazire Haboğlu'na ve evime her zaman neşe katan ikinci annem Emine Bodancı'ya teşekkürü bir borç bilirim. Ailenin hayatta en önemli unsur olduğunu bana her fırsatta gösterdikleri için kendilerine minnettarım.

En büyük teşekkürü hayatımı kendisiyle tanıştığım bir sonbahar gününden itibaren tamamıyla değiştirmiş olan, çalışmalarına ve yaşamıma anlam kazandıran ve neşesiyle başka bir boyutta cenneti yaşatan değerli oğlum Mehmet Kerem Haboğlu'na saklıyorum. Bu tez çalışmasında motivasyonumu her kaybettiğimde varlığıyla en büyük motivasyon kaynağı olan oğluma sonsuz teşekkür ederim.

Dr. Mustafa Reşit HABOĞLU

Bu tez çalışmasına, “MUH19004.17.006” numaralı ve “Akıllı Kompozit Üretim Yoluyla Bacaklı Özgün Bir Robotun Tasarımı, Modellemesi ve Üretimi” başlıklı proje kapsamında vermiş oldukları desteklerden ötürü Hitit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
TABLolar DİZİNİ.....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiv
RESİMLER DİZİNİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
GİRİŞ.....	1

1. BÖLÜM

LİTERATÜRDE KÜÇÜK BOYUTLU ROBOTLAR

1.1. Minyatür Robotların Sınıflandırılması.....	5
1.2. Doğadan Esinlenerek Üretilen Robotlar.....	5
1.3. Minyatür Robotlarda Hareket Mekanizmaları.....	7
1.4. Minyatür Robotlarda Enerji Kaynakları, Eyleyiciler ve Sensörler.....	11
1.5. Minyatür Robotlarda Üretim Teknikleri ve Kullanılan Malzemeler.....	17

2. BÖLÜM

MİNİ ROBOTUN TASARIMI VE AKILLI KOMPOZİT ÜRETİM TEKNİĞİ İLE ÜRETİM AŞAMALARI

2.1. SCM Tekniği ile Dış İskelet Tasarım ve Üretim Aşamaları.....	23
2.2. Robot Tasarımlarında Kullanılan Hareket Mekanizmaları.....	35
2.3. Robot Tasarımlarında Kullanılan Bacak Yapıları.....	38
2.4. Robot Tasarımlarında Kullanılan Dönme Mekanizmaları.....	48
2.5. Geliştirilen Mini Robot Modelleri.....	50

3. BÖLÜM

DİZ EKLEMLİ MİNİ ROBOTLARIN HAREKET TESTLERİ VE ÖN BULGULAR

	Sayfa
3.1. Robotların Boyut ve Ağırlık Analizi	55
3.2. Altı Bacaklı Robot Modelinin Hareket Testleri ve Ön Bulgular	57
3.3. Dört Bacaklı Robot Modelinin Hareket Testleri ve Ön Bulgular	59
3.4. Robotun Nihai Modelinin Belirlenmesi.....	61
3.5. Nihai Robot Modelinin Farklı Yüzeylerde Yürüme, Engel Aşma ve Yokuş Tırmanma Testleri	63

4. BÖLÜM

NİHAİ MODELİN HIZ VE HAREKET ANALİZİ

4.1. Görüntü İşleme ile Hareket Yakalama	68
4.2. Hareket Analizi.....	72
4.3. Hız Analizi.....	86
SONUÇ	95
KAYNAKLAR	98
EKLER	107
EK-1. Robotların Boyutları	108
EK-2. Görüntü İşleme Yazılımı Kaynak Kodu	110

TABLULAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
Tablo 1.1. Boyutlarına göre robotların sınıflandırılması (Fernando & Gan Lim, 2021).....	5
Tablo 3.1. Diz eklemine sahip altı ve dört bacaklı robot modellerinin boyut ve ağırlıkları.....	55
Tablo 3.2. Robot bileşenlerinin ağırlık verileri.....	56
Tablo 3.3. Tez çalışmasındaki iki modelin literatür örnekleriyle boy ve hız bakımından karşılaştırılması.....	62
Tablo 4.1. Farklı motor giriş hızlarında robotun ortalama yürüme hız değerleri.....	75



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Zıplayabilen tek bacaklı robot "Salto" (Plecnik vd., 2016).....	8
Şekil 1.2. Hoover ve arkadaşlarının tasarladığı bacak kinematiği (Aaron M. Hoover vd., 2010).....	12
Şekil 1.3. Kim ve arkadaşlarının kullandığı krank sistemi (S. Kim vd., 2006).....	13
Şekil 1.4. MEDIC isimli robotta SMA (Shape Memory Alloy) kullanımı (Kohut vd., 2011).....	14
Şekil 1.5. Özcan ve arkadaşları tarafından kullanılan geri beslemeli kontrol sistemi blok diyagramı (O. Ozcan vd., 2013).....	17
Şekil 1.6. SCM tekniğinde lazerde kesimi yapılacak 2 boyutlu geometri örneği (Haldane vd., 2015).....	20
Şekil 1.7. Lazerde kesilen 2 parçanın termal yapıştırıcı ile aşamalarıyla montaj işlemi (Haldane vd., 2015).....	21
Şekil 1.8. SCM tekniği ile robot eklemlerinin üretim aşamaları (Aaron M. Hoover & Fearing, 2008).....	22
Şekil 2.1. Alternatif tripod yürüyüşü aşamaları: a) öne gelen ayaklar yere basarken arkaya giden ayakların yerden kalkması, b) yere basan ayaklar arkaya giderken havaya kalkan ayakların öne gelmesi, c) havada öne gelen ayaklar yere basarken yerden arkaya giden ayakların havaya kalkması ve d) yere basan ayaklar arkaya giderken havaya kalkan ayakların öne gelmesi (Aaron M Hoover vd., 2008).....	24
Şekil 2.2. Robotun dış iskeletini oluşturan üst, orta ve alt plakalar.....	26
Şekil 2.3. İki boyutlu düzlemde lazer ile kesim için yerleştirilmiş robot parçaları örneği.....	26
Şekil 2.4. SCM tekniği ile üretilen eklem yapısının şematik gösterimi.....	27
Şekil 2.5. Dış iskelet üretiminde plakaların bağlantı mekanizması.....	33
Şekil 2.6. Özgün birleştirme tekniği ile üretilmiş servo motor kutusu tasarımı.....	35
Şekil 2.7. Krank biyel hareket mekanizması tasarımı.....	36
Şekil 2.8. Dişli kremayer sistemi ile oluşturulmuş hareket mekanizması tasarımı.....	38
Şekil 2.9. Nitinol eyleyici ile oluşturulan bacak tasarımları ve bilek eklemi yapılarının tasarım görünümleri.....	41

Şekil	Sayfa
Şekil 2.10. Ön ve arka diz kapağı ile tasarlanmış bacaklarda yürüme mekanizmasının şematik gösterimi.	43
Şekil 2.11. Lee ve arkadaşlarının kullandığı bükülebilir bacak modeli (J. Lee vd., 2020).....	45
Şekil 2.12. Ön diz kapağı ve lateks tendon kullanımı ile oluşturulan yürüme mekanizmasının şematik gösterimi.	48
Şekil 3.1. DASTeQ farklı yüzeylerde yürüme performansları.....	64
Şekil 4.1. Robotun yürüme sırasında ilerlediği mesafeye göre gövdesinin dikey konumu.....	72
Şekil 4.2. Robotun yer ile yaptığı açının tanımlanması.	73
Şekil 4.3. Robotun yürüme esnasında yer ile yaptığı açı değerleri.....	74
Şekil 4.4. Motor hızına bağlı olarak robotun yürüme hızı değerleri.	76
Şekil 4.5. Yürüyüş esnasında robotun gövdesi ve bacaklarının yer ile temas eden noktalarının konumu (Motor Hızı: 5.5 rad/s).....	77
Şekil 4.6. Yürüyüş esnasında robotun gövdesi ve bacaklarının yer ile temas eden noktalarının konumu (Motor Hızı: 6.5 rad/s).....	78
Şekil 4.7. Yürüyüş esnasında robotun gövdesi ve bacaklarının yer ile temas eden noktalarının konumu (Motor Hızı: 8 rad/s).....	79
Şekil 4.8. 6.5 rad/s giriş hızı için bacak ve gövde konumlarının bacakların hareket fazlarına göre incelenmesi: 1 ve 3 numaralı fazlar ön bacağın harekete katkı vermesi; 2 ve 4 numaralı fazlar arka bacağın harekete katkı vermesi.	81
Şekil 4.9. Robot gövdesinin hareketine göre yunuslama açısı: a) 5.5 rad/s, b) 6.5 rad/s ve c) 8 rad/s.	83
Şekil 4.10. Robot gövdesinin hareketine göre dikey düzlemde pozisyonu: a) 5.5 rad/s, b) 6.5 rad/s ve c) 8 rad/s.....	85
Şekil 4.11. Sabit pozisyonda askıda duran robotun çalışırken kalça eklemlerinin pozisyonları.....	87
Şekil 4.12. Bacakların kalça eklemine bağlı olarak hareketleri: a) Kısa bacak ve b) Uzun bacak.....	88
Şekil 4.13. Motor hızına göre robotun gerçek ve teorik olarak hesaplanan hız değerleri.....	89
Şekil 4.14. Robotun deneysel veriye göre oturtulmuş olan hız modeli.	90
Şekil 4.15. DASTeQ dönüş performansı testlerinin sonuçları.	92

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. 4 bacaklı olarak geliştirilmiş olan HAMR (Karpelson vd., 2014).....	7
Resim 1.2. MEDIC'in tekne biçiminde tasarlanmış gövdesi ve engel aşma dinamikleri (Kohut vd., 2011).	10
Resim 1.3. Haldane ve arkadaşları tarafından tasarlanan aerodinamik dengeleyici (Haldane vd., 2013).....	11
Resim 1.4. Lee ve Fearing tarafından tasarlanan dikenli ayak yapısı (J. S. Lee & Fearing, 2015).	11
Resim 1.5. Kim ve arkadaşlarının tasarladığı iSprawl isimli robot (S. Kim vd., 2006).....	13
Resim 1.6. Origamiden esinlenerek üretilen robotun üretim aşamaları (Onal vd., 2015).	19
Resim 2.1. Hoover ve arkadaşları tarafından tasarlanan minyatür robot (Aaron M Hoover vd., 2008).....	25
Resim 2.2. Esnek film kullanılarak üretilen dış iskelet yapısı.	28
Resim 2.3. Alüminyum bant kullanılarak üretilen dış iskelet yapısı.....	28
Resim 2.4. Kaplama filmi kullanılarak üretilen dış iskelet yapısı ve laminasyonu.	29
Resim 2.5. İki kat kaplama filmi ve dört kat alüminyum bant kullanılarak üretilen dış iskelet yapısı.....	30
Resim 2.6. Sekiz kat alüminyum bant kullanılarak üretilen dış iskelet yapısı.....	31
Resim 2.7. Kapton malzeme kullanılarak üretilen dış iskeletin laminasyonu.	32
Resim 2.8. Yun ve Fearing tarafından uygulanan yapıştırma tekniği (Yun & Fearing, 2019). ..	33
Resim 2.9. Kaptonla sarılmış kalça eklemi görünümü.....	34
Resim 2.10. Kapton malzeme kullanılarak üretilen dış iskelet yapısı.....	34
Resim 2.11. Eklemeli imalat teknolojisi ile üretilmiş olan krank biyel mekanizması.	36
Resim 2.12. Dişli kremayer ile oluşturulan hareket mekanizması ve dış iskelet ile montajı. .	38
Resim 2.13. Nitinol eyleyici.....	39
Resim 2.14. Nitinol eyleyicinin iç yapısı ve yay mekanizması modifikasyonu.....	40
Resim 2.15. Nitinol eyleyici ile oluşturulan bacak tasarımları ve bilek eklemi yapıları.....	41

Resim	Sayfa
Resim 2.16. Ön ve arka diz kapağına ve kauçuk ayak yapısına sahip bacak yapısı.....	44
Resim 2.17. Lateks malzeme kullanılarak üretilmiş olan tendon yapısı.	46
Resim 2.18. Lateks tendon ve diz ekleminden oluşan bacak yapısı: a) düz konum, b) bükülmüş konum.	47
Resim 2.19. Servo motora bağlı DC motor kullanarak oluşturulan dönme mekanizması.	49
Resim 2.20. Sürekli dönebilen servo motor kullanımı ile oluşturulan dönme mekanizması.	50
Resim 2.21. Nitinol eyleyicili bacak yapısına sahip, krank biyel sistemi ile tahrik edilen ve dış iskelet yapısında sekiz kat alüminyum bant bulunan altı bacaklı mini robot modeli.....	51
Resim 2.22. Diz eklemli bacak yapısına sahip, dişli kremayer sistemi ile tahrik edilen ve dış iskelet yapısında kapton malzemesi bulunan altı bacaklı mini robot modeli.....	52
Resim 2.23. Diz eklemli bacak yapısına sahip, dişli kremayer sistemi ile tahrik edilen ve dış iskelet yapısında kapton malzemesi bulunan dört bacaklı mini robot modeli.	52
Resim 2.24. Lateks tendon yapısına sahip dört bacaklı robot modeli.....	53
Resim 2.25. Lateks tendon yapısına sahip dört bacaklı robot modelinin iki bacak üzerinde ayakta duruşu.	54
Resim 3.1. Altı bacaklı model basit yürüme testi: a) $t = 0$ sn, b) $t = 3$ sn ve c) $t = 13$ sn.....	58
Resim 3.2. Altı bacaklı model dönme testi: a) $t = 0$ sn, b) $t = 4$ sn, c) $t = 11$ sn, d) $t = 21$ sn ve e) $t = 25$ sn.....	59
Resim 3.3. Dört bacaklı model basit yürüme testi: a) $t = 0$ sn, b) $t = 1$ sn ve c) $t = 2.1$ sn.....	60
Resim 3.4. Dört bacaklı robotun cilalı ahşap yüzeyde dönüş testleri: a) $t = 0$ sn, b) $t = 1.39$ sn, c) $t = 2.85$ sn, d) $t = 4.25$ sn ve e) $t = 5.39$ sn.	61
Resim 3.5. Robotun farklı yüzeylerde yürüme testleri: a) Cilalı ahşap yüzey, b) Karton yüzey, c) Kauçuk yüzey ve d) Akrilik yüzey.	64
Resim 3.6. DASTeQ modelinin kauçuk yüzeyde yürürken 1.7 mm yükseklikte PCB engel aşma kabiliyeti: a) $t = 0$ sn, b) $t = 2.45$ sn, c) $t = 4.03$ sn ve d) $t = 4.92$ sn..	65
Resim 3.7. DASTeQ modelinin ahşap yüzeyden 3.4 mm yükseklikte kauçuk engelin üzerine çıkma testi: a) $t = 0$ sn, b) $t = 1.62$ sn ve c) $t = 4.91$ sn.....	66

Resim	Sayfa
Resim 3.8. DASTeQ eğimli yüzeyde yokuş tırmanma testi: a) $t = 0$, eğim = 0° , b) $t = 1.86$ sn, eğim = 5° , c) $t = 4.33$ sn, eğim = 10° ve d) $t = 7.71$ sn, eğim = 15°	67
Resim 4.1. Robot yürüyüş test ortamı.	69
Resim 4.2. DASTeQ görüntü işleme modifikasyonu.	70
Resim 4.3. Görüntü işleme yazılımı ekran görüntüsü.	71
Resim 4.4. DASTeQ kauçuk yüzeyde saat yönünde dönüş performansı. a) 0° , b) 90° , c) 180° , d) 270° , e) 360°	91
Resim 4.5. DASTeQ kauçuk yüzeyde saat yönünün tersi yönde dönüş performansı. a) 0° , b) 90° , c) 180° , d) 270° , e) 360°	91
Resim 4.6. Yol izleme parkuru.	93
Resim 4.7. DASTeQ yol izleme parkuru performansı.	94

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

dX_{kisa}	Kısa bacağın yatay düzlemde yer değiştirme miktarı
dX_{uzun}	Uzun bacağın yatay düzlemde yer değiştirme miktarı
dX_{robot}	Robotun yatay düzlemde yer değiştirme miktarı
V_{robot}	Maksimum dalga boyu
T_{servo}	Servo motorun periyodu
W_{servo}	Servo motorun açısal hızı
t	Zaman

Kisaltmalar

ATM	Automatic Teller Machine
MEDIC	Millirobot Enabled Diagnostic of Integrated Circuits
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
HAMR	Harvard Ambulatory Microrobot
RoACH	Robotic, Autonomous Crawling Hexapod
RHex	Hexapod Robot
FAWSCY	Foldable Adjustable Wheeled Stringly Clumsy Robot
VelociRoACH	RoACH isimli robotun hızlı hareket eden versiyonu
RF	Radyo frekansı
SMA	Shape Memory Alloy (Şekil Hafızalı Alaşım)
Ni-Ti	Nikel-Titanyum alaşımı
PISCES	Piezoelectric Miniature Robot
SmolBot	Soft Modular Legged Robot
DC	Direct current (Doğru akım)
MinIAQ	Miniature Independently Actuated Quadruped

PDMS	Polidimetilsiloksan
PLA	Poliaktik asit
SDM	Shape deposition manufacturing
SCM	Smart composite microstructures
CAD	Bilgisayar destekli tasarım
Quadruped	4 bacaklı robot
Hexapod	6 bacaklı robot
3D	3 boyutlu
C-Quad	C Shaped Quadruped
DASH	Dynamic Autonomous High Speed Hexapod
MinRAR	Miniature Resonant Ambulatory Robot
DASTeQ	Double Actuated Soft Tendon Quadruped
PCB	Baskı devre kartı
RGB	Kırmızı, yeşil ve mavi renkler

GİRİŞ

“Robot” kelimesi çok uzun yıllardır insanların ilgisini çeken ve heyecanlandıran bir unsur olmuştur. Mühendislik olarak incelendiğinde robot kavramı bir operatöre ihtiyaç duymadan kendisine verilen görevi yerine getirebilen makineler olarak tanımlanabilmektedir. Bu tanıma göre bir torna tezgahı makine olarak isimlendirilebilirken bir sayısal kontrollü bilgisayar (CNC) tezgahı kendisine verilen görevi yerine getirebilen bir robot olarak tanımlanabilmektedir. Başka bir örnekte bir çamaşır makinesi daha önceden programlanmış olan yıkama sıcaklığı ve süresini sağlayarak çamaşırların yıkanmasını otomatik olarak gerçekleştirdiği için yine robot olarak tanımlanabilmektedir.

Bu tanıma göre robotlar, insanların hayatında uzun yıllardır ATM, otomat makinesi, termostatlı ısıtma sistemi vb. şekilde bulunmuşlardır. Yıllar boyunca bilim kurgu filmlerinde görüldüğü gibi fiziksel aktivite yapabilen mobil robotlar insanların hayali olarak kalmıştır (Aguilar vd., 2016). 20. yüzyılın sonlarından itibaren bu durum bir hayal olmaktan çıkmış ve bu alanda çalışmalar görülmeye başlanmıştır. Honda şirketinin geliştirdiği Asimo gibi insansı robotlar üretilip hareket kabiliyetleri ile ilgili çalışmalar yapılmıştır (Chestnutt vd., 2005). Robot teknolojisi sadece insansı robotlara yönelmekle kalmamış, endüstride ve özellikle savunma sanayisinde kullanılan robotlar üretilmeye başlanmıştır. Fabrikalarda kullanılan taşıyıcı sistemlerde robotlar aktif rol alırken askeri uygulamalarda da mayın tarama, bomba imha ve keşif gibi amaçlarda kullanılmaktadırlar.

Robot teknolojisi gün geçtikçe gelişmektedir. Kullanım amacına göre çeşitli boyutlarda robotlar bulunmaktadır. Özellikle endüstriyel robotlar büyük ölçekli olarak üretilebilmektedir (Abele, Weigold, & Rothenbücher, 2007; Siegwart vd., 2003). Bu tür robotlara bir örnek olarak da tarımda kullanılan robotlar verilebilir (Sakai, Iida, & Umeda, 2002). Yine endüstriyel ortamda kaynak, yük taşıma, boya gibi işlemler için kullanılan robotlar da bulunmaktadır (Bischoff vd., 2010).

Büyük ölçekli robotlar kullanım alanlarına göre teknolojik gelişmelerin sonucunda giderek yaygınlaşmaktadır. Ancak daha fazla yaygınlaşmanın önünde büyük robotların maliyetlerinin yüksek olması gibi bir engel bulunmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda sıkça kullanılan robotlar yüksek maliyetleri nedeniyle evsel ortamlarda veya günlük ihtiyaçlar için yaygın olarak kullanılamamaktadır.

Son yıllarda araştırmacılar büyük ölçekli robotların yanı sıra daha küçük boyutlu robotlar üzerinde de çalışmalar yürütmektedir (Gao, Shi, Fukuda, Li, & Huang, 2019). Robotlarda boyutlar küçüldükçe kullanım alanları da büyük ölçüde çeşitlenmektedir. Büyük ölçekli robotlar daha çok endüstriyel amaçlarla kullanılırken boyut küçüldükçe medikal, keşif, arama-kurtarma, havacılık ve uzay gibi alanlarda da kullanımı mümkün olabilmektedir (Dolghi vd.,

2011; Hu vd., 2020; Iacovacci vd., 2015; Mahkam, Bakir, & Ozcan, 2020; Teasdale, Milanovic, Chang, & Pister, 2001; J. Zhang, Ding, Zhang, Yang, & Song, 2014; Zhu, 2007).

Küçük boyutlu robotlar büyük boyutlu robotlara göre daha düşük maliyetlerle üretilebilmektedirler (Hsu, Zhao, Gaudreault, Foy, & Pelrine, 2020). Bunun sonucunda ulaşılabilirlikleri de daha yüksek olmaktadır. Bu durumun bir başka sonucu da kullanım alanlarıyla ilgili olmaktadır. Her boyuttan mobil robotlar insan sağlığına zararlı tehlikeli ortamlarda keşif veya arama-kurtarma amacıyla kullanılabilir (Casper & Murphy, 2003). Ancak küçük boyutlu robotlar bu tür ortamlarda düşük maliyetleri nedeniyle çok sayıda kullanılabilir. Maliyeti yüksek olması nedeniyle tek başına kullanılacak olan büyük boyutlu mobil bir robot yerine sürü algoritması kullanılarak sayıca fazla küçük robot kullanımı istenilen operasyonun daha başarılı olabilmesini sağlayacaktır (Andrew T. Baisch & Wood, 2011; Hsu vd., 2020). Bunun temel nedeni olarak çok sayıda robot kullanımında sistemin yedekli hale getirilmiş olması gösterilebilir. Bu sayede bir robotta arıza yaşanması durumunda kalan robotlar çalışmaya devam edebileceklerdir. Yine küçük boyutlu robotlar ulaşılması güç ortamlara daha kolay ulaşabilmeleri nedeniyle keşif operasyonlarında başarılı olabilmektedir (Birkmeyer, Peterson, & Fearing, 2009; Demir, 2021; Doshi, 2019). Büyük boyutlu robotların mağara ve yıkıntı gibi giremeyeceği alanlara küçük boyutlu robotlar ulaşabilecektir. Bununla birlikte küçük boyutları sayesinde insanlar veya araçlarla taşınarak işlem yapılacak noktaya götürülmeleri de görece daha kolay olmaktadır (Birkmeyer vd., 2009; Yun & Fearing, 2019). Bir başka kullanım alanı olarak Kohut ve arkadaşları "MEDIC (Millirobot Enabled Diagnostic of Integrated Circuits)" adında geliştirdikleri dört bacaklı robotun insanların veya büyük robotların ulaşamayacağı yerlerde elektronik devrelerdeki sorunları tespit etmek ve gidermek amacıyla kullanılabildiğini söylemişlerdir (Kohut, Hoover, Ma, Baek, & Fearing, 2011). Daha sonra Mathis ve arkadaşları da MEDIC üzerinde çalışma yapmıştır ve robotun karanlık, karışıklık içinde, sınırlı ve elektrikli ortamlarda hareket edebildiğini belirtmiştir (Mathis vd., 2012). Mini robotların kullanım alanlarına bir örnek de tıp olarak verilebilir. Iacovacci ve arkadaşları ilaç taşıyıcı olarak kullanılacak bir minyatür robot tasarlamışlardır (Iacovacci vd., 2015). Bu robot vücut içerisine (omurilik, idrar yolu, ovaryum vb.) enjekte edilerek hastalıklı bölgeye gönderilebilmekte ve taşıdığı ilacı yerinde uygulayabilmektedir. Kafa ve piston olmak üzere iki bileşenden oluşan robot demonte halde vücuda verilip güçlü bir mıknatis sayesinde hastalığın olduğu bölgede monte edilebilmektedir. Kafa ve pistonun birleşmesi sayesinde kafanın içerisinde bulunan ilaç dışarıya verilebilmektedir. Bu sayede özellikle kemoterapi tedavisinde sadece hastalıklı bölgenin ilaca maruz kalması sağlanabilmektedir. Bunun yanında tıp alanında Huda ve arkadaşları insan vücuduna düşük etkilere sahip teşhis amaçlı robotları incelemişlerdir (Huda, Yu, & Cang, 2016).

Bahsedilen avantajlara ek olarak küçük boyutlu robotlar yüksek manevra kabiliyetleri ve göreceli olarak daha basit kontrol şemaları sayesinde daha yüksek uygulanabilirliğe sahiptir (Chopra, 2018; Mahkam vd., 2020). Bu tür robotların büyük robotlara göre daha iyi konumda olduğu bir diğer konu ise küçük robotların alan/hacim oranlarının çok daha yüksek olması

nedeniyle çarpışma dayanımlarının görece daha yüksek olması olarak verilmektedir (Aaron M. Hoover, Burden, Fu, Sastry, & Fearing, 2010; Jayaram vd., 2018).

Robotlarda boyut küçüldükçe doğal olarak alan/ağırlık oranı da artmaktadır. Buna bağlı olarak alana bağlı kuvvetler, hacime bağlı kuvvetleri küçüldükçe domine etmektedir. Sonuç olarak robotun hareket dinamikleri de büyük ölçüde değişmektedir. Bu durumda ağırlığın dinamiklere etkisi azalırken yapışkanlık ve sürtünme gibi kuvvetlerin etkisi de artmaktadır (Robert J. Wood, Avadhanula, Sahai, Steltz, & Fearing, 2008).

Büyük ölçekli robotlarda eklem yerlerinin tasarımı için en önemli unsurlardan biri çalışma şartlarına göre eklemlerin dayanıklılığıdır. Bu nedenle eklemler tasarlanırken daha çok statik ve dinamik hesaplamalar göz önünde bulundurulmaktadır. Ancak mini, mili ve mikro robotların tasarımlarında bunların yanında daha farklı unsurlar göz önünde bulundurulur. Bu tür robotlarda boyutun küçük olmasından dolayı eklem tasarımlarında hareket kabiliyetinin sağlanma zorluğu en büyük sorunlardan biridir. Eklemlerde pimli bağlantılarda olduğu gibi tam tur hareket sağlanmasının zor olması araştırmacıları tasarım konusunda daha çok çalışma yapmaya teşvik etmiştir (Haldane vd., 2015). Buna ek olarak Wood ve arkadaşları minyatür robotlarda motorlar, bağlantı elemanları, rulmanlar vb. gibi bileşenlerin entegrasyonunun çok daha zorlaştığını öne sürmüştür. Bunun nedeni olarak boyutlar küçüldükçe bileşenlerdeki yüzey etkilerinin Newtonian kuvvetleri domine etmesini göstermişlerdir (R. J. Wood vd., 2005; Robert J. Wood vd., 2008).

Boyutlar küçüldükçe gelen atiklik avantajının yanında özellikle bacaklı robotlarda bacak boyu azaldıkça engellerin boyutunun bacak seviyesinden yüksekte kalması nedeniyle engelleri aşmanın zorlaşacağı da bir dezavantajdır. Bununla birlikte robot boyutu küçüldükçe robotun üzerinde kontrol ve güç üniteleri için daha az yer olacağı için tasarım zorlukları da ortaya çıkmaktadır (Birkmeyer vd., 2009).

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde küçük boyutlu robotların araştırmacılar tarafından giderek daha fazla ilgi gördüğü görülmektedir. Özellikle bacaklı mobil robotlar konusunda çalışmalar yoğunlaşmaktadır. Dünya genelinde bu alanda çalışmaların ilgi görmesine bir katkı da DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) tarafından gerçekleştirilmiştir. DARPA, 2018 yılında multi fonksiyonel mm-cm skalasında robotik platformlar için bir destek programı başlatmıştır (Defense Advanced Research Projects Agency, 2018; Hernando-García, García-Caraballo, Ruiz-Díez, & Sánchez-Rojas, 2021). Bu kapsamda desteklenen projeler sonucunda minyatür robotların savunma amaçlı da kullanılabilmesi hedeflenmiştir.

Bu tez çalışmasında bacaklı olarak hareket edebilen özgün bir mini robot tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Robotun üretiminde literatürde de sıklıkla yer almakta olan akıllı kompozit üretim tekniği (AKÜ (literatürde sıklıkla smart composite manufacturing, SCM olarak yer aldığı için tez çalışmasında bu isimle yer almaktadır)) kullanılmıştır (Amirhosseini & Najafi, 2020; Aaron M. Hoover & Fearing, 2008; Robert J. Wood vd., 2008; Yun & Fearing, 2019). Bu

Üretim tekniğinde robotun yapısal malzemesi 1.1 mm kalınlığında akrilik plakadan lazer ile kesilmiş, eklemleri oluşturması için de kapton isiminde poliimid film kullanılmıştır. Çalışmada iteratif bir Şekilde ele alınan üretim aşamaları neticesinde robotun nihai modeli ortaya konulmuştur. Bu aşamalarda robotun dış iskeleti, hareket mekanizması, bacak yapısı ve dönme mekanizması ile ilgili çalışmalar yürütülmüştür. Geliştirilen hareket mekanizmaları, krank biyel mekanizması ve dişli kremayer sistemidir. Bacaklı hareketin sağlanması için geliştirilen bacak yapılarında ise sırası ile doğadan esinlenerek oluşturulmuş olan bilek yapısı ve diz eklemi yapısı bulunmaktadır.

Üretim aşamaları sürecinde ortaya çıkarılan yöntemler neticesinde toplam üç temel robot modeli tasarlanıp üretilmiştir. Bu modellerde çalışma boyunca ortaya konulan farklı hareket mekanizmaları ve bacak yapıları kullanılmıştır. Yapılan testlerin sonucunda nihai model olarak diz eklemine sahip ve yumuşak tendon yapılı dört bacaklı özgün robot modeli belirlenmiştir. Bu model, "Double Actuated Soft Tendon Quadruped (DASTeQ)" olarak isimlendirilmiştir.

Çalışmada geliştirilmiş olan robot modelleri için belirlenen kriterler arasında robotun boyutlarının mini robot olarak sınıflandırılmasına uygun olması, bacaklı olarak yürüyebilmesi, istenilen yönde dönüş yapabilmesi ve belirli bir yolu izleyebilmesi bulunmaktadır. Bu kapsamda bu tez çalışmasında geliştirilmiş olan robotun yürüme testleri gerçekleştirilmiş, farklı hız giriş değerlerinde gerçek yürüme hızları belirlenmiş ve bir modele oturtulmuştur. Geliştirilen model baz alınarak oluşturulan parkurda robotun kendi kendine hareket etmesi sağlanmış ve modelin validasyonu ortaya çıkarılmıştır. Buna ek olarak bu tez çalışmasında geliştirilmiş olan robotun literatürde yer alan diğer çalışmalara göre farklılıkları da karşılaştırmalı olarak ele alınmiş ve çalışmanın özgünlüğü ortaya konulmuştur.

1. BÖLÜM

LİTERATÜRDE KÜÇÜK BOYUTLU ROBOTLAR

1.1. Minyatür Robotların Sınıflandırılması

Literatürde karşılaşılan minyatür robotlar çeşitli boyutlarda bulunabilmektedirler. Bu tez çalışmasına da yön verecek şekilde Fernando ve Lim çalışmalarında literatürdeki robotların boyutlarına göre ne şekilde sınıflandırılacaklarını ortaya koymuşlardır (Fernando & Gan Lim, 2021). Tablo 1.1’de verilen bu sınıflandırma durumuna bakıldığında literatürde yapılan minyatür robot çalışmalarının mini robotlar üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Nano, mikro ve milli robotların üretim aşamaları göreceli olarak mini ve küçük robotlara göre daha fazla zorluk içermektedir (Donald, Levey, McGray, Paprotny, & Rus, 2006; Douglas, Bachelet, & Church, 2012; Saranlı, Buehler, & Koditchek, 2001).

Tablo 1.1. Boyutlarına göre robotların sınıflandırılması (Fernando & Gan Lim, 2021).

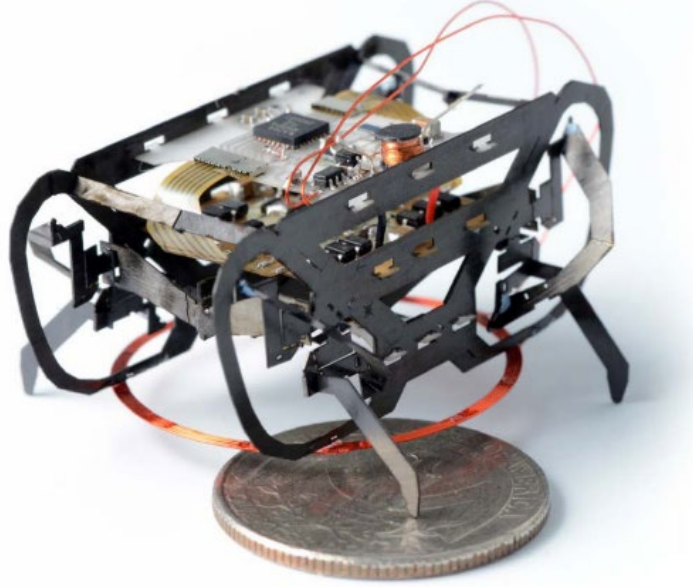
Küçük Ölçekli Robot Sınıfı	Öngörülen Yaklaşık Boyutlar
Küçük Robot	< 1000 mm
Mini Robot	< 100 mm
Mili Robot	< 10 mm
Mikro Robot	< 1 mm
Nano Robot	< 1 μ m

Bu tez çalışmasında incelenen literatür çalışmalarında ve geliştirilen özgün robotta Tablo 1.1’de verilmiş olan kriterlere göre sınıflandırma yapılmıştır. Boyutlarına göre robotlar “küçük, mini, mili, mikro ve nano” robotlar olarak adlandırılmıştır.

1.2. Doğadan Esinlenerek Üretilen Robotlar

Robotun boyutundan bağımsız olarak literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda genellikle doğadan esinlenerek yapılan tasarımlarla karşılaşmaktadır. Kim ve arkadaşları geliştirdikleri küçük robotta tasarımsal olarak çitaların hareketlerinden esinlenmiştir (D. Kim vd., 2020). Bunun yanında bir başka çalışmada Zeng ve arkadaşları tırtılların hareketlerinden esinlenerek bir mikro robot geliştirmişlerdir (Zeng, Wani, Wasylczyk, & Priimagi, 2018). Çalışmada ortaya

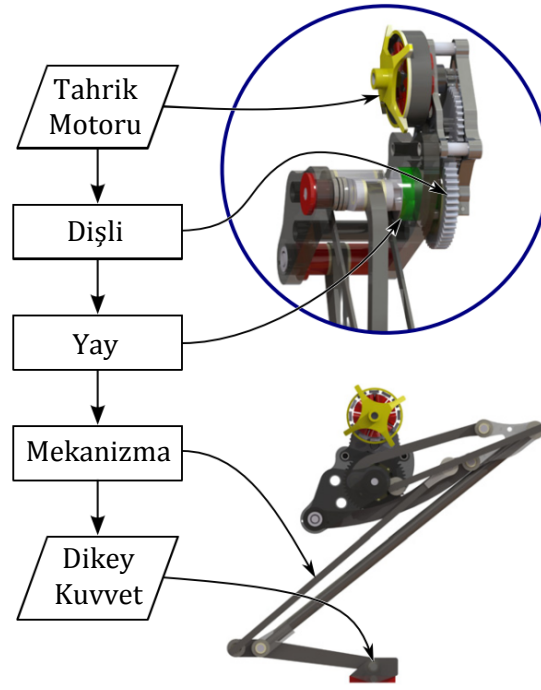
konulan tırtıl benzeri robot monolitik likid kristal elastomer kullanılarak üretilmiş ve kağıt benzeri yüzeylerde gözle görülen ışıklara maruz bırakıldığında tırtıl benzeri hareket sergilediği görülmüştür. Tırtıldan farklı olarak bir başka çalışmada Önal ve arkadaşları geliştirdikleri robotun hareketinde solucanların hareket mekanizmalarından esinlenmiştir (Onal, Wood, & Rus, 2013). Yine bir başka çalışmada Özcan ve arkadaşları su böceğinden esinlenerek geliştirdikleri minyatür robotu su üzerinde yürütmeyi başarmışlardır (Ozcan, Wang, Taylor, & Sitti, 2010, 2014). Hoffman yapmış olduğu tez çalışmasında kırkayaklardan esinlenerek tasarlayıp üretimini tamamladığı robot ile ilgili çalışmalara yer vermiştir (Katie L. Hoffman & Wood, 2013; Katie Lynn Hoffman, 2013). Hoffman tezinde bu çalışmaya yön veren faktör olarak doktorasının ilk yılında odasına girmiş olan bir kırkayaktan esinlendiğini belirtmiştir. Zhang ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği bir başka çalışmada ise istiridye ve kara kaplumbağalarının dış kabuklarından esinlenerek zıplayabilen bir robot geliştirilmiştir (J. Zhang vd., 2014). Bu tür hayvanların kabukları iç yapılarını dış darbelerden koruyabilmektedir. Ayrıca kabuklarının tam düzgün küresel bir yapıya sahip olmaması nedeniyle gövdeleri istem dışı dönme hareketlerinden de kaçınmaktadır. Bu nedenle Zhang ve arkadaşları bu yapıyı zıplayabilen robotta da kullanarak hem robotun iç yapısının zıplamaya bağlı darbelerden korunmasını sağlamış, hem de istem dışı hareketleri de önlemişlerdir. Biyolojiden ilham alınarak tasarlanan robotlar arasında havada hareket edebilenler de vardır. Wood, doktora çalışmasında çift kanatlı böceklerin yapısından ilham alarak uçabilen bir böcek robot geliştirmiştir (R.J. Wood, 2008). Bu tasarımla çift kanatlı böcekler gibi uçabilen bir minyatür robot tasarlanabileceği kanıtlanmıştır. Ancak ileriki çalışmalar için, tasarlanan bu robotta serbest uçuş için kontrol mekanizması ve yüksek enerjili bir güç kaynağının entegre edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Uçabilen mini robotlar konusunda Wood ve arkadaşlarının başka çalışmaları da bulunmaktadır (R.J. Wood, Avadhanula, Menon, & Fearing, 2003; Robert J. Wood vd., 2008). Literatürde özellikle hamam böceklerinin yürüme mekanizmasından esinlenerek geliştirilmiş çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bunlara bir örnek olarak Clark ve arkadaşları tarafından geliştirilen altı bacaklı robot verilebilir (Clark vd., 2001). Bir başka örnekte Pullin ve arkadaşları sekiz bacaklı bir robot olan OctoRoACH isimli robotu geliştirmişlerdir (Pullin, Kohut, Zarrouk, & Fearing, 2012). 13 cm uzunluğa sahip olan bu robot 100 mm skalası içerisinde, yani mini robot sınıfına dahil olarak sunulmuştur. Baisch ve Wood yaptıkları çalışmada HAMR ismini verdikleri altı bacaklı robotun tasarımında yine hamam böceklerinden esinlendiklerini söylemişlerdir (Andrew T. Baisch & Wood, 2011). Daha sonra bu robotun üzerinde yapılmış olan çalışmada HAMR geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu geliştirmeler arasında robotun bacak sayısını altı bacadan dört bacağına düşürerek daha iyi sonuç alındığını öne süren çalışmalar da mevcuttur (Andrew T. Baisch & Wood, 2013; Andrew Thomas Baisch, Ozcan, Goldberg, Ithier, & Wood, 2014; Karpelson vd., 2014; O. Ozcan, A.T. Baisch, & R.J. Wood, 2013). Dört bacaklı haliyle HAMR Resim 1.1'de görülmektedir. Minyatür robotik alanında bir bakıma öncülük görevini üstlenen HAMR başka araştırmacılar tarafından da incelenmiştir. Doshi yaptığı çalışmada HAMR için bir dinamik model geliştirmiştir (Doshi, 2019).



Resim 1.1. 4 bacaklı olarak geliştirilmiş olan HAMR (Karpelson vd., 2014).

1.3. Minyatür Robotlarda Hareket Mekanizmaları

Literatürde minyatür robotlar için farklı hareket mekanizmalar kullanılmıştır (Ng vd., 2021). Churaman yüksek lisans tezinde geliştirdiği robotun hareketi için zıplama mekanizması tasarlamıştır (Churaman, 2010). Zıplama hareketine bir örnek de Li ve arkadaşlarının çalışmasında verilmektedir (Li vd., 2012). Bu çalışmada tasarımın yanı sıra robotun zıplama hareketinin dinamiği ile ilgili teorik analizlere de yer verilmiştir. Yine bir başka çalışmada Zhang ve arkadaşları da zıplama hareketini çalışarak bir mini robot geliştirmiştir (J. Zhang vd., 2014). Başka bir çalışmada Plecnik ve arkadaşları yine zıplama hareketi yapan “Salto” adını verdikleri tek bacaklı bir robot tasarlamışlardır (Plecnik, Haldane, Yim, & Fearing, 2016). Bu çalışmada motor torkunu bir yaya aktaran dişli mekanizması ve yaydan gelen kuvveti ayağa aktararak zıplamayı sağlayan bir bacak mekanizması geliştirilmiştir. Geliştirilen robotun hareket bileşenleri Şekil 1.1’de gösterilmiştir. Tek bacaklı zıplayabilen robotlarla ilgili bir başka çalışma da Haldane ve arkadaşları tarafından yapılmıştır (Haldane, Plecnik, Yim, & Fearing, 2016). Bu çalışmada sonuç olarak robota seri elastik geçişli özel bir bacak tasarımı eklenmiş ve zıplama kapasitesini artırdığı görülmüştür. Zıplama hareketinin yanında uçabilen mini robot tasarımları da bulunmaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi Wood doktora tezinde uçabilen bir mini robot geliştirmiştir (R.J. Wood, 2008).



Şekil 1.1. Zıplayabilen tek bacaklı robot "Salto" (Plecnik vd., 2016).

Literatürde bir başka hareket yöntemi olarak tırmanma kullanılmıştır. Seitz ve arkadaşları daha önceden dört bacaklı yürüyebilen bir robot olarak tasarlanan HAMR (Harvard Ambulatory Micro Robot)'ın ayakları için farklı yapışkanlık teknikleri uygulamış ve bu robotun tırmanma hareketini çalışmışlardır (Seitz vd., 2014). Başka bir çalışmada Shen ve arkadaşları manyetik kuvvetlerin yardımıyla tırmanabilen bir robot tasarlamışlardır (Shen, Gu, & Shen, 2005). Bunlara ek olarak dönme hareketiyle ilerleyebilen bir robot tasarımı da Morrey ve arkadaşları yapmıştır (Morrey, Lambrecht, Horchler, Ritzmann, & Quinn, 2003). Robot üzerinde dört adet tasarladıkları ve "wheg" olarak adlandırdıkları üç kollu dönen mekanizma sayesinde hareket edebilen robot yaklaşık olarak bir hamamböceği boyutundadır. Yine bir başka hareket mekanizması olarak Önal ve arkadaşlarının solucan benzeri sürünme hareketini kullandıkları tasarım bulunmaktadır (Onal vd., 2013).

Literatürde en sık rastlanan mini robot hareket mekanizması yürüme ve emekleme hareketidir (Aukes, Ozcan, & Wood, 2014; Andrew T. Baisch & Wood, 2013; Birkmeyer vd., 2009; Clark vd., 2001; Katie L. Hoffman & Wood, 2011; Soltero, Julian, Onal, & Rus, 2013). Daha önce de bahsedilen HAMR, Baisch ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir (Andrew T. Baisch & Wood, 2013; Andrew Thomas Baisch, 2013; Andrew Thomas Baisch vd., 2014). Bu robot dört bacaklı yürüyebilen bir mekanizmaya sahiptir ve 1.27 g ağırlığındadır (Andrew Thomas Baisch vd., 2014). Bunun yanı sıra Hoover ve arkadaşları başka bir yürüme-emekleme hareketine sahip olan "RoACH (Robotic, Autonomous, Crawling Hexapod)" isimli robotu tasarlamışlardır (Aaron M Hoover, Steltz, & Fearing, 2008). Bu robot HAMR isimli robottan farklı olarak altı bacaklıdır

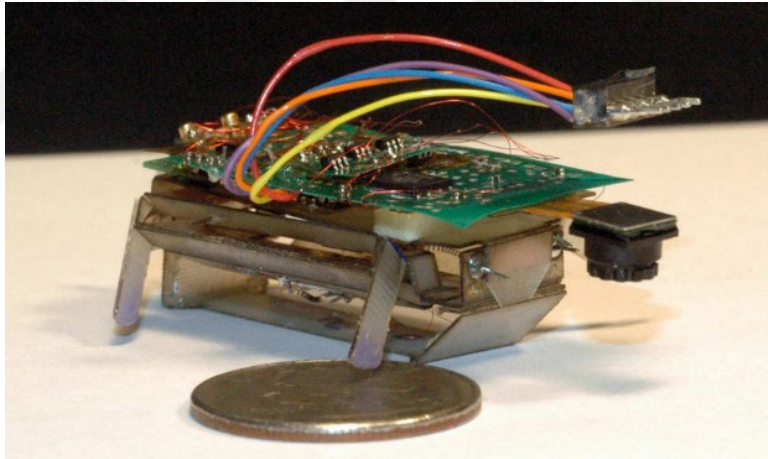
ve 2.4 g ağırlığa sahiptir. Robotun dört yerine altı bacaklı olması hareket esnasında aynı anda üç bacağın yere basarak bir tripod özelliği kazandırması nedeniyle daha kararlı bir hareket imkanı sağlamıştır. Başka bir altı bacaklı robot tasarımı da Kim ve arkadaşları tarafından yapılmıştır (S. Kim, Clark, & Cutkosky, 2006). “iSprawl” adı verilen robot, bacaklarının tasarımı sayesinde koşabilmektedir. Saranlı ve arkadaşları da “RHex” adını verdikleri robotta yine altı bacaklı tasarımı kullanmışlardır (Saranlı vd., 2001). Karydis ve arkadaşları ile Cham ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalar da altı bacaklı robot tasarımının diğer örneklerindedir (Cham, Bailey, Clark, Full, & Cutkosky, 2002; Clark vd., 2001; Karydis, Liu, Poulakakis, & Tanner, 2014). Buna ek olarak Hoffman ise doktora çalışmasında on iki bacaklı bir robot tasarlamıştır ve bu sayede robotun vücut salınımlarını kullanarak hızı artırabilmiştir ve bacaklarının yedekli yapısı sayesinde robotun bacağı kopsa veya kırılrsa bile kararlı hareketine devam etmesini sağlamıştır (Katie Lynn Hoffman, 2013). Hoffman ve Wood yine çok bacaklı robotlarla ilgili çalışmalar yapmıştır (Katie L. Hoffman & Wood, 2011, 2013). Bu çalışmalardan birinde yürüyüş formasyonunun robotun performansına etkisi araştırılmış ve düz bir yürüyüşten dalgalı bir yürüme şeklinin robotun hareketini olumlu bir şekilde etkilediği gösterilmiştir (Katie L. Hoffman & Wood, 2011). Diğer çalışmada ise çok bacaklı robotların bacak kaybı yaşaması sonucu yürüme performansları araştırılmış ve az sayıda bacak kaybının özellikle en ön ve en arka bacaklar çalışabilir durumdayken yürüyüş performansını etkilemediği öne sürülmüştür (Katie L. Hoffman & Wood, 2013). Hoffman ve Wood, en ön veya en arka bacaklar kaybedilmişse veya çok sayıda bacak kaybı yaşanmışsa yürüyüş şekli ve hızı değiştirilerek stabilize sağlanabildiğini ortaya koymuştur. Xing ve arkadaşlarının çalışmasında tasarladıkları küçük robot hem karada hem de suda hareket edebilen amfibik özelliğe sahiptir (Xing vd., 2021). Robotun boyutları yaklaşık 50 cm skalasında olmasına rağmen çalışmada minyatür robot olarak adlandırılmıştır. Başka bir çalışmada ise Kim ve arkadaşları özel bir bacak tasarımıyla ters dönse de aynı şekilde yürüyebilen MutBug adında bir robot geliştirmişlerdir (T. Y. Kim, Kim, Kim, & Jung, 2019).

Bacaklı yapıların yanında tekerlek benzeri yürüme mekanizması kullanılan çalışmalar da mevcuttur. Bunlara örnek olarak Demir tarafından geliştirilen FAWSCY isimli tekerlekli minyatür robot gösterilebilir (Demir, 2021).

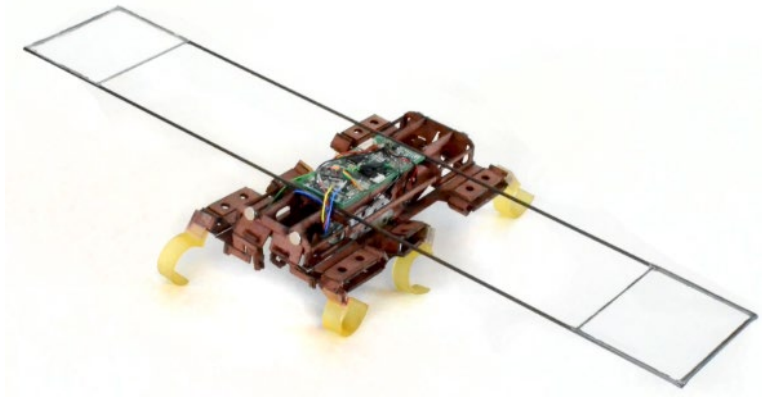
Robotun boyutları küçüldükçe hareket mekanizmasının dinamikleri robotun dengesi için gittikçe önem kazanmaktadır (Haldane, Peterson, Garcia Bermudez, & Fearing, 2013). Bu nedenle mini robotlarda dönme mekanizması mümkün olduğunca basit tasarlanmalı ve az elemandan oluşmalıdır. Buna ek olarak yine robotun daha dengeli olabilmesi için ağırlık merkezinin mümkün olduğunca robotun alt kısmına yakın olması gerekmektedir (Cham vd., 2002).

Literatürde bacaklı robotların hareketlerini daha kolay yapmalarını sağlamak için çeşitli tasarımlar mevcuttur. Kohut ve arkadaşlarının tasarlamış olduğu dört bacaklı “MEDIC” isimli robotun gövdesi Resim 1.2’de gösterildiği gibi tekne biçiminde yapılmıştır. Böylece robotun bir

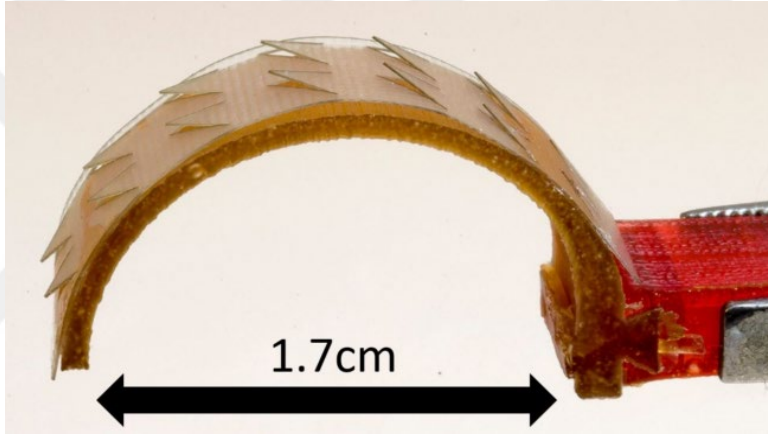
engeli daha kolay aşabiliyor olmasının yanı sıra dört bacağına birden yere basmadığı durumlarda bile dengesinin bozulmadığı belirtilmiştir (Kohut vd., 2011). Başka bir çalışmada Haldane ve arkadaşları "VelociRoACH" isimindeki altı bacaklı (hexapod) robotun hareketi esnasında daha dengeli olmasını amaçlayarak aerodinamik bir dengeleyici tasarlamış ve robota monte etmişlerdir (Haldane vd., 2013). Resim 1.3'te gösterilmiş olan bu dengeleyici sayesinde robot çevresel bozucu etkileri daha kolay bertaraf edebilmektedir. Ancak bu yapının robotun hareket kabiliyetini olumsuz etkilediği görülmüş ve bu nedenle tasarımın geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Aukes ve arkadaşları mini robotlar için iki serbestlik dereceli (ayağın aşağı/yukarı ve ileri/geri hareketi olmak üzere) bacak tasarımı sunmuşlardır (Aukes vd., 2014). Hareket kabiliyetini artırmaya yönelik bir diğer çalışma da Lee ve Fearing tarafından ortaya konulmuştur (J. S. Lee & Fearing, 2015). Bu çalışmada böceklerin ayaklarında bulunan dikenli yapılardan esinlenerek daha önce Haldane ve arkadaşları tarafından tasarlanan VelociRoACH isimli robotun ayaklarını Resim 1.4'te verildiği gibi dikenli bir yapıda tekrar tasarlamışlardır. Deneylerinin sonucunda uygulamalarının robotun daha hızlı gitmesini sağladığı ve eski ayak yapısına göre robotun 0.16 N daha fazla yük çekme kabiliyetinin olduğu bulunmuştur.



Resim 1.2. MEDIC'in tekne biçiminde tasarlanmış gövdesi ve engel aşma dinamikleri (Kohut vd., 2011).



Resim 1.3. Haldane ve arkadaşları tarafından tasarlanan aerodinamik dengeleyici (Haldane vd., 2013).



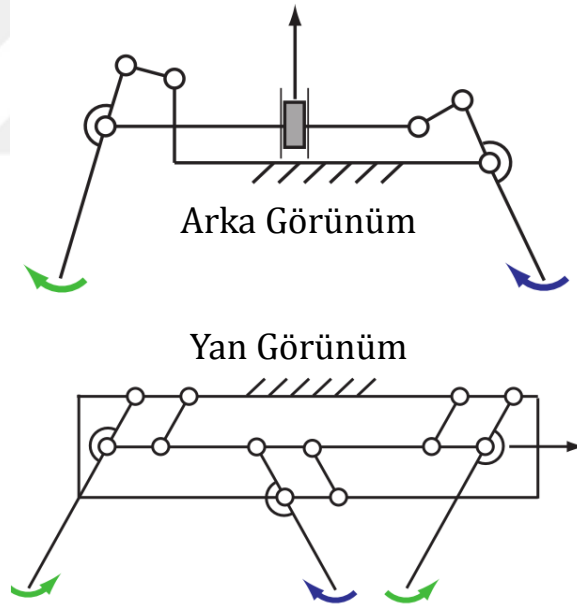
Resim 1.4. Lee ve Fearing tarafından tasarlanan dikenli ayak yapısı (J. S. Lee & Fearing, 2015).

1.4. Minyatür Robotlarda Enerji Kaynakları, Eyleyiciler ve Sensörler

Mini ve mikro robotların tasarımında karşılaşılan en büyük problemlerden bir tanesi de enerji kaynağıdır (Firebaugh, Piepmeier, Leckie, & Burkhardt, 2011; Goldberg, Karpelson, Ozcan, & Wood, 2014; Karpelson vd., 2014). Robotların boyutlarının küçük olması büyük bataryaların kullanımını engellemektedir. Bu nedenle bu robotların tasarımında enerji verimliliği ve enerji kaynağı olarak alternatif sistemlerin kullanımına gidilmesi önemli bir rol oynamaktadır. Karpelson ve arkadaşları mini robotlar için radyo frekansı (RF) sinyaliyle kablosuz güç aktarımı yapabilen bir sistem geliştirmişlerdir. Bu sayede güç aktarımını manyetik rezonans kullanımı ile sağlamışlardır (Karpelson vd., 2014). Yine kablosuz olarak güç alan bir robot da Firebaugh ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir (Firebaugh vd., 2011). Bu çalışmada global bir mekanik titreşim alanı oluşturulup bu alan üzerinden tahrik ve kontrol edilip emekleyen bir robot tasarımı sunulmuştur. Çalışmada geliştirilen robot, üzerinde bulunan bacakların

belirli bir rezonans frekansına maruz bırakılması sonucunda hareket etmektedir. Bu analizlerin simülasyonu için COMSOL programı üzerinden sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Başka bir çalışmada Bergbreiter ve Pister tasarladıkları robotun enerji kaynağı olarak güneş hücresi kullanmışlardır (Bergbreiter & Pister, 2007). Buna benzer olarak Brühwiler ve arkadaşları da kullandıkları bataryayı güneş hücresi ile destekleyerek daha uzun süre güç üretebilmesini sağlamışlardır (Bruhwiler vd., 2015).

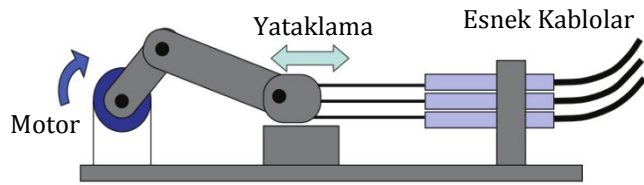
Enerji verimliliğinin çok önemli olması mini robotlarda hareket kinematığının önemini de beraberinde getirmektedir. Çünkü minimum sayıda ve az enerji tüketimine sahip eyleyicilerin kullanımı enerji tüketimini azaltacaktır. Bunu yapmak için de robotun kinematik tasarımını etkili bir şekilde oluşturmak gerekmektedir. Hoover ve Fearing eyleyici sayısını azaltmak için paralel kinematik kullanımının gerekliliğini savunmuştur (A. M. Hoover & Fearing, 2009). Bir başka çalışmada Hoover ve arkadaşları eyleyici sayısını azaltmak için paralel kinematığı de kullanarak özgün bir bacak mekanizması tasarlamışlardır (Aaron M. Hoover vd., 2010). Şekil 1.2'de de verilen sistemde bütün bacaklar ileri/geri ve aşağı/yukarı hareketlerini global olarak etki eden iki motorla yapmaktadırlar.



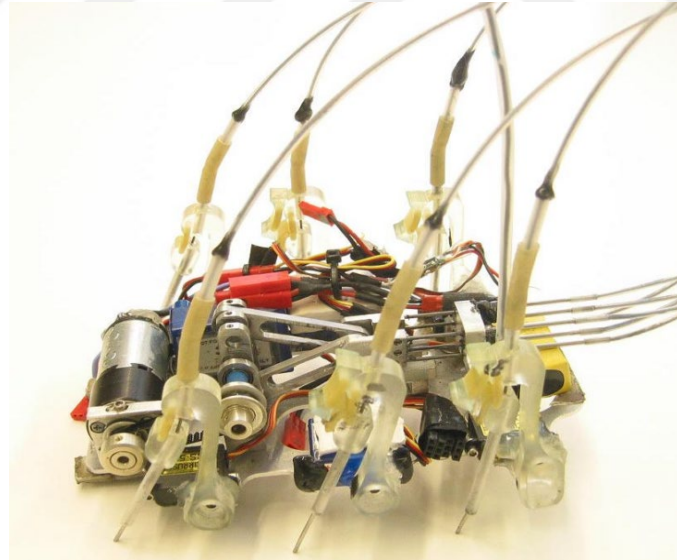
Şekil 1.2. Hoover ve arkadaşlarının tasarladığı bacak kinematığı (Aaron M. Hoover vd., 2010).

Başka bir çalışmada Kim ve arkadaşları iSprawl ismini verdikleri hexapod'un hareketi için tek motordan çıkan esnek tellerin çekilip itilmesini kullanmışlardır (S. Kim vd., 2006). Hamam böceğinden esinlendikleri kinematik tasarımında ivmeyi çoğunlukla arka bacaklar sağlarken ön bacaklar daha çok robotu yavaşlatmak için kullanılmışlardır. Tek motordan sağlanan hareket mekanizmasında Şekil 1.3'te görülen krank sisteminden faydalanılmıştır. Bacaklar

birbirine çapraz olanlar aynı gruptan olmak üzere üçerli iki gruba ayrılmış ve tahrikleri kranktan 180° faz farkıyla sağlanmıştır. Resim 1.5'te ise robotun genel görüntüsü verilmiştir.



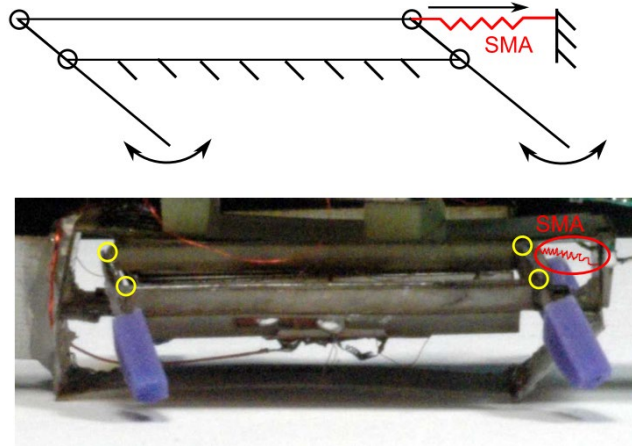
Şekil 1.3. Kim ve arkadaşlarının kullandığı krank sistemi (S. Kim vd., 2006).



Resim 1.5. Kim ve arkadaşlarının tasarladığı iSprawl isimli robot (S. Kim vd., 2006).

Literatürdeki bazı çalışmalarda özel kinematik tasarımlarının yanı sıra farklı türde eyleyicilerin kullanımına gidilerek de enerji tasarrufu sağlanmıştır (Goldberg vd., 2014; Kohut vd., 2011; Rajkowski, Gerratt, Schaler, & Bergbreiter, 2009). Rajkowski ve arkadaşlarının çalışmasında tırtıl benzeri bir robot ve tutucu robotun tasarımında eyleyici olarak şekil hafızalı

alaşım (Shape Memory Alloy, SMA) kullanılmıştır (Rajkowski vd., 2009). SMA olarak Nitinol (Nikel-Titanyum Alaşımı) kullanılan çalışmada bu alaşımların kullanımının avantajlarına değinilmiştir. Rajkowski ve arkadaşlarına göre SMA yüksek güç/ağırlık oranı, yüksek deformasyon kapasitesi ve önceden belirlenmiş bir şekli hatırlayıp ısıtıldığında o şekle geri dönmesi gibi avantajlara sahiptir. Başka bir çalışmada Kohut ve arkadaşları SMA'ların minyatür robotlarda rahatlıkla kullanılabileceğini belirtmiş ve tasarladıkları MEDIC isimli robotta eyleyici olarak kullanmışlardır (Kohut vd., 2011). Bu tasarımda bacakların hareketi SMA yardımıyla Şekil 1.4'te verildiği gibi sağlanmıştır. Başka bir çalışmada Hoover ve arkadaşları da bacakların rijitliğinin ayarlanması için SMA kullanımına başvurmuştur (Aaron M. Hoover vd., 2010). Yine bir başka çalışmada Thomas ve arkadaşları da SMA kullanımına başvurmuştur (Thomas, Germano, Martinez, & Perriard, 2021). SMA'ların yanı sıra Goldberg ve arkadaşları bir ses-bobini eyleyici tasarlamış ve robotun hareketini tahrik etmek için kullanmışlardır (Goldberg vd., 2014). Eyleyicinin üretiminde düzlemsel üretim metotları (litografi) kullanılmıştır. Eyleyicinin aktive edilmesi ile robotta bulunan magnetlerin harekete geçmesi sayesinde tahrik sağlanmaktadır. Eyleyici olarak SMA kullanımına yönelik bir başka çalışma da Sugita ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir (Sugita, Takato, Saito, & Uchikoba, 2016). Çalışmada bir mikro robot için şekil hafızalı alaşım kullanarak dairesel bir eyleyici tasarlanmıştır. SMA eyleyici kullanan bir başka çalışma da Zhakypov tarafından gerçekleştirilmiştir (Zhakypov, 2019). Yang ve arkadaşları da RoBeetle adını verdikleri mili robotun yürütülmesi için nikel titanyum (Ni-Ti) şekil hafızalı alaşım malzemesini kullanmışlardır (Yang, Chang, & Pérez-Arancibia, 2020).



Şekil 1.4. MEDIC isimli robotta SMA (Shape Memory Alloy) kullanımı (Kohut vd., 2011).

Küçük ölçekli robotlarda şekil hafızalı alaşımların yanı sıra çokça kullanılan bir başka eyleyici modeli piezoelektrik eyleyicilerdir. Hariri ve Dharmawan, çalışmalarında geliştirmiş olduğu minyatür robotlar için piezoelektrik eyleyiciler kullanmıştır (Dharmawan, Hariri, Foong, Soh,

& Wood, 2017; Dharmawan, Hariri, Soh, Foong, & Wood, 2018; Hassan H. Hariri vd., 2016; Hassan Hussein Hariri, Soh, Foong, & Wood, 2017). Geliştirme aşaması tamamlandıktan sonra PISCES adını verdikleri robotun hareket prensibi piezoelektrik eyleyiciler ile oluşturulan titreşimin rezonans nodlarının kullanımınıdır (Hassan H. Hariri, Soh, Foong, & Wood, 2019). Yine başka bir çalışmada Chopra mili robotlar için piezoelektrik eyleyici kullanımına başvurmuştur (Chopra, 2018). Ruiz-Diez ve arkadaşları da robotun boyutları nedeniyle üzerinde elektronik bileşenlerin bulunamadığı tasarımında yine piezoelektrik eyleyici kullanmıştır (Ruiz-Diez, García-Caraballo, Hernando-García, & Sánchez-Rojas, 2021). Rios ve arkadaşları da tasarladıkları 6 bacaklı robot için piezoelektrik eyleyiciler yardımıyla yürüme sağlamıştır (Rios, Fleming, & Yong, 2016). Başka bir çalışmada da Patel ve arkadaşları geliştirdikleri piezoelektrik eyleyicili robot için açılı bacak tasarımını ortaya koyarak hareketin daha sorunsuz elde edildiğini öne sürmüşlerdir (Patel, Qu, & Oldham, 2018). Piezoelektrik eyleyici robotlar için Qu ve arkadaşları da dinamik bir model geliştirmişlerdir (Qu, Teeple, Zhang, & Oldham, 2018a). Bu modelde robotun dönme hareketleri tahmin edilmeye çalışılmıştır.

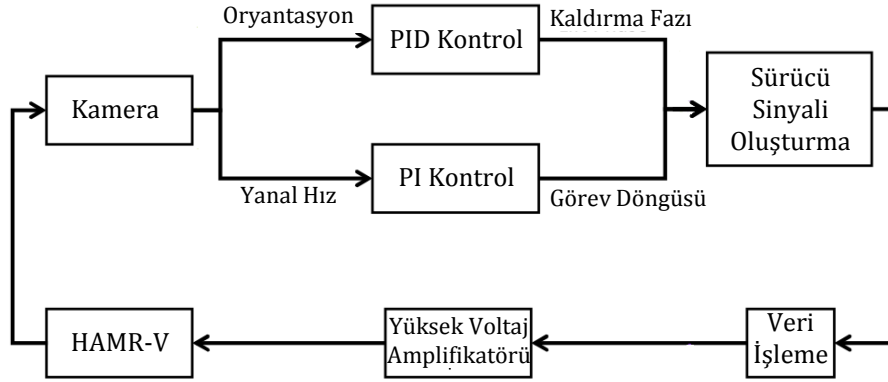
Robotun hareket mekanizması olarak titreşim teorisine başvuran başka çalışmalar da mevcuttur. Zhan ve arkadaşları Shell adını verdikleri robotta farklı frekans ve genlik değerleri verdikleri iki adet paralel osilatör kullanarak hareket sağlamışlardır (Zhan, Xu, & Fang, 2018). Rezonans frekansını kullanan bir başka robot da Rios ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir (Rios, Fleming, & Yong, 2017). Yine benzerleri gibi üzerinde elektronik bileşenleri bulundurmayan robotun göreceli olarak hızlı hareket edebildiği sonucu öne sürülmüştür. Başka bir çalışmada da Zhang ve arkadaşları tek bir eyleyici olarak bir titreşim motoru kullanarak ürettikleri motorun hem ileri hareketini, hem de dönme hareketini merkezkaç kuvveti ve salınım yoluyla sağlamışlardır (Y. Zhang, Zhu, Wu, & Wang, 2022).

Literatürde başka bir eyleyici mekanizması olarak manyetik eyleyiciler de kullanılmaktadır. Ijaz ve arkadaşları manyetik olarak tahrik edilen bir yumuşak robot tasarımı gerçekleştirmiştir (Ijaz vd., 2020). Buna ek olarak Le ve arkadaşları da üç boyutlu yazıcı ile ürettikleri minyatür robot gövdesini manyetik eyleyici ile hareket ettirmişlerdir (Le, Lee, Kim, & Shin, 2022). Buna karşılık Huda ve arkadaşları literatürde manyetik eyleyici kullanımıyla karşılaşılmasına rağmen hassas kontrol mekanizmasının yetersiz kaldığını ileri sürmüştür (Huda vd., 2016).

Bahsedilen eyleyici türlerine ek olarak literatürde dielektrik elastomerler de araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır (Berlinger vd., 2018; Duduta, Clarke, & Wood, 2017; Duduta, Hajiesmaili, Zhao, Wood, & Clarke, 2019; Ji vd., 2019). Dielektrik elastomerler elektrik enerjisini mekanik enerjiye çift yönlü olarak dönüştürebilen kas benzeri yumuşak eyleyicilerdir. Tasarımları iki elektrot arasında sandviç yapıda yerleştirilmiş ince bir elastomer plakadan oluşmaktadır. Elektrotlara uygulanan voltaj sonucunda farklı kutuplar arasındaki Coulomb kuvveti sayesinde elastomerin maruz kaldığı elektrik alanına dik olacak şekilde genişlemesi prensibiyle çalışmaktadır (Duduta, Wood, & Clarke, 2016).

Minyatür robotlarda kullanılan başka bir eyleyici türü de motorlardır. Mahkam ve arkadaşları geliştirdikleri SMoLBot isimli robotta mini DC motorlar kullanmışlardır (Mahkam & Özcan, 2021b; Mahkam, Ugur, & Ozcan, 2022). Yine Mahkam ve arkadaşları başka bir çalışmada iki farklı DC motor kullanımı sayesinde dönme hareketini ve yürüme modifikasyonlarını sağlayabilmişlerdir (Mahkam vd., 2020). Yine başka bir çalışmada Güç ve arkadaşları dört bacaklı bir quadruped için dört ayrı DC motor kullanmışlardır (Güç, Kalin, Karakadioğlu, & Özcan, 2017). Robotta kullanılan her bir DC motor üzerine manuel olarak yerleştirilmiş olan enkoderler sayesinde motorlarda pozisyon kontrolü gerçekleştirilerek hareket modifikasyonları sağlanmıştır. DC motor üzerinde enkoder kullanımına bir örnek de Askari ve arkadaşlarının çalışmalarında geliştirmiş oldukları MinIAQ-II isimli robotta mevcuttur (Askari, Karakadioğlu, Ayhan, & Özcan, 2017; Askari & Özcan, 2019a, 2019b). Askari ve arkadaşları, küçük ölçekli robotlarda yürüyüş planlamasının uygun sensörlerin yeterli özelliklerde bulunamaması nedeniyle zor olduğunu ileri sürmüştür.

Mini ölçekli robotlardaki sınırlamalardan bir tanesi de robot üzerinde sensör vb. aygıtların kullanımınıdır. Sensörlerin kullanımı ile elde edilecek geri beslemeli kontrol sistemlerinin kullanımı için sensörlerin seçimi ve robot üzerindeki konumlarına göre ağırlık etkileri önem taşımaktadır. Mathis ve arkadaşları çok düşük çözünürlüklü bir kamera kullanımı ile robotun çevresini görüp tanıyarak hareketini ona göre şekillendirmesini sağlamışlardır (Mathis vd., 2012). Mini robot üzerindeki sınırlamalar nedeni ile görüntü işleme aşaması robot üzerindeki kart ile merkezi bir ünite arasında paylaştırılmış, böylelikle robot üzerinde büyük bir işlemciye gerek kalmamıştır. Yine Kohut ve arkadaşları robotun yön bulması amacı ile kamera kullanmışlardır (Kohut vd., 2011). Geri beslemeli kontrol sistemi kullanımında Brühweiler ve arkadaşlarının çalışması da başka bir örnek olarak verilebilir (Bruhwiler vd., 2015). Çalışmada tasarlanan robot üzerine basit bir optik fare sensörü eklenmiştir ve konum belirlenerek geri besleme sinyalinde kullanılmıştır. Bu sensöre ek olarak bir jiroskop da kullanılmıştır. Geri besleme sinyali bu iki sensörün verilerinin birleştirilmesiyle oluşturulmuş ve %11'in altında bir konum hatası ile çalışma sağlanmıştır. Jiroskop kullanan bir başka çalışma da Özcan ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir (O. Ozcan vd., 2013). Çalışmada basit kontrol metodu olarak iki geri beslemeli kontrol sistemi kullanılmıştır. Geri besleme sinyali için jiroskopa ek olarak bir ivmeölçer ve bir manyetometre kullanılmıştır. Geri beslemeli kontrol sistemini kullanarak yörünge takip etme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu tür bir kontrol sistemi için kullanılan blok diyagram Şekil 1.5'te verilmiştir. Başka bir çalışmada Karydis ve arkadaşları minyatür bacaklı robotlar için yer bulma ve kontrol algoritmaları geliştirmişlerdir (Karydis, Poulakakis, & Tanner, 2017). Bunun sonucunda robotların engellerle karşılaştığında yönünü değiştirerek engellerden kaçması hedeflenmiştir. Zhang ve arkadaşları da robot üzerinde hareketi tespit etmek için piezoelektrik bir sensör tasarımı gerçekleştirmişlerdir (Qu, Teeple, Zhang, & Oldham, 2018b; B. Zhang, Qu, & Oldham, 2018).



Şekil 1.5. Özcan ve arkadaşları tarafından kullanılan geri beslemeli kontrol sistemi blok diyagramı (O. Ozcan vd., 2013).

1.5. Minyatür Robotlarda Üretim Teknikleri ve Kullanılan Malzemeler

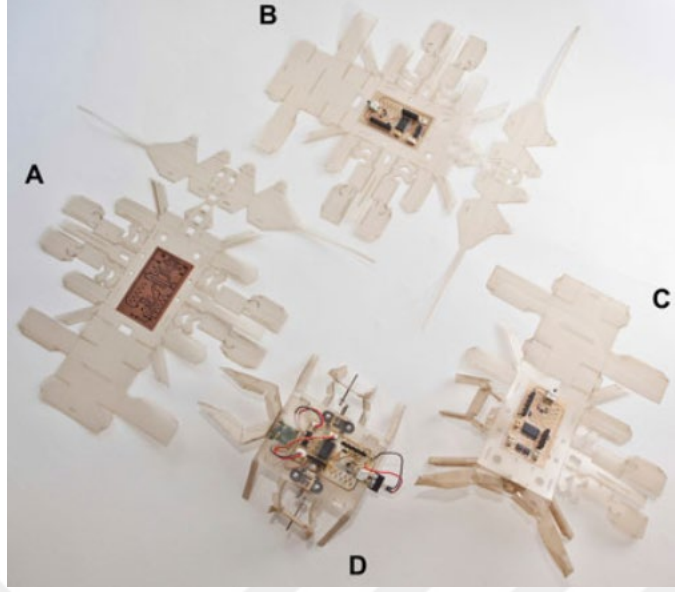
Küçük boyutlu olmayan robotlarda araştırmacılar malzeme seçimi konusunda göreceli olarak daha özgür olabilmektedirler (Sakai vd., 2002; Shen vd., 2005). Buna karşılık mikro, mili ve mini robotlarda kullanılan malzemenin hafifliği de dayanıklılığı kadar önemli konumdadır. Bu amaçla minyatür robotik alanında literatürde çeşitli üretim teknikleri geliştirilmiştir.

Bu üretim tekniklerinden bir tanesi üç boyutlu yazıcı teknolojisidir. Xia ve arkadaşları ürettikleri küçük yumuşak robotta bacakları ve gövdeyi üç boyutlu yazıcı kullanarak üretmişlerdir (Xia vd., 2021). Başka bir çalışmada da Hernando-Garcia ve arkadaşları ürettikleri robotun bacaklarını üç boyutlu yazıcı teknolojisiyle elde etmişlerdir (Hernando-García, García-Caraballo, Ruiz-Díez, & Sánchez-Rojas, 2020).

Literatürde karşılaşılan bir başka üretim teknolojisi de Polidimetilsiloksan (PDMS) kullanımıyla oluşturulmaktadır. Bu malzemenin kullanımı daha çok yumuşak robotlarda görülmektedir (Mahkam vd., 2020). Robotun bacaklarının bu yöntemle üretildiği Kalın ve arkadaşlarının çalışmasında üretimin nasıl yapıldığı ayrıntılarıyla anlatılmıştır (Kalın vd., 2020). Çalışmada üretilen robot aynı ölçüler ve özelliklerle katı bir malzeme olan Poliaktik Asit (PLA) kullanılarak da üretilmiştir. Böylece yumuşak robotun avantajları ve dezavantajları daha net bir şekilde ortaya koyulabilmektedir. Bu yöntemle benzer şekilde literatürde biriktirme imalat prosesi (ing. Shape Deposition Manufacturing, SDM) tekniği de kullanılmaktadır (Cham vd., 2002). Bu yöntemde robotun elektronik bileşenleri bir kalıp içerisine yerleştirilip üzerine yumuşak bir malzeme dökülerek birleşmesi sağlanmaktadır. Bu şekilde biyolojiden esinlenmiş sert iskeletin etrafında yumuşak doku yapısına sahip bir robot elde edilebilmektedir.

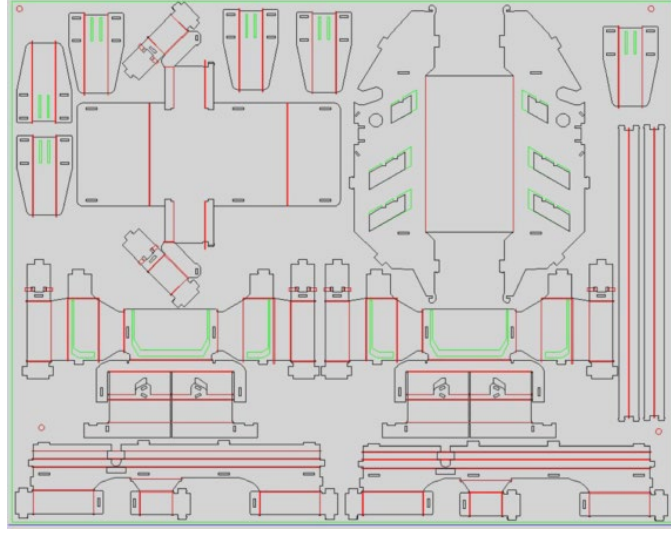
Minyatür robotlarda literatürde karşılaşılan en yaygın üretim metodu Akıllı Kompozit Üretim Tekniği (Smart Composite Microstructures (SCM)) ismiyle adlandırılan, robotun dış iskeletinin

iki veya daha fazla malzeme kullanarak üretildiği tekniktir (Aaron M. Hoover & Fearing, 2008; R.J. Wood vd., 2003). Örneğin mukavemeti sağlamak için karbon fiberden yapılmış bir iskeletin ara katmanı olarak özel kumaşlar kullanılabilen ve bu şekilde eklemlerdeki esneklik sağlanabilmektedir (Haldane vd., 2015). Bu metodun gelişmesindeki bir neden de piyasadaki rulman, civata gibi makine elemanlarının küçük boyutlarda kolay bulunamaması ve hassasiyetlerinin azalmasıdır (Haldane vd., 2015). Buna ek olarak küçük boyutlarda sürtünmenin etkisi artmakta ve yağlanma tam olarak yapılamamaktadır. Bu nedenle rulman gibi makine elemanları verimsizleşmektedir. Akıllı kompozit üretimi tekniğinin gelişmesiyle mini ve mikro robotların tasarımı ve üretimi daha kolaylaşmıştır. Birkmeyer ve arkadaşları bu teknik sayesinde üretim hızının arttığını, robot boyutunun istenildiği gibi ayarlanabildiğini ve çok hafif robotların üretilebildiğini söylemiştir (Birkmeyer vd., 2009). Yine aynı çalışmada SCM tekniği ile üretilen robotların düşmeye bağlı darbelerde yüksek enerji emilimleri sayesinde daha dayanıklı ve alan-ağırlık oranlarının daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Birkmeyer vd., 2009). Bunun temel nedeni küçük boyutlarda atalet değerinin çok düşmesi ve buna bağlı olarak etkisinin çok azalmasıdır. Çünkü, atalet değeri, uzunluk değerinin dördüncü kuvvetiyle orantılı olduğu için boyut küçüldükçe değeri çok daha fazla düşmektedir. Bu tekniğe benzer olarak Önal ve arkadaşları Japon kağıt katlama sanatı "Origami" den esinlenerek basılabilir küçük robotlar için üretim metodu olarak kullanmışlardır (Onal, Tolley, Wood, & Rus, 2015; Onal vd., 2013). Önal ve arkadaşlarının origamiden esinlenerek geliştirdiği robotun üretim aşamaları Resim 1.6'da gösterilmiştir. Bir başka çalışmada Firouzeh ve arkadaşları yine bu tekniği kullanmış ve "Robogami (Robotik Origami)" olarak adlandırmışlardır (Firouzeh & Paik, 2015). SCM tekniğinin beraberinde getirdiği bir avantaj da ucuz olması nedeniyle iteratif bir robot tasarımına olanak sağlamasıdır. Tasarlanan robotun üretimi yapıp denemeleri gerçekleştirildikten sonra geliştirilmesi gereken parçaların tekrar tasarlanıp yeni prototiplerin üretilmesi ve son ürünün tasarımının bu şekilde iteratif olarak gerçekleştirilebilmesi mümkün olabilmektedir. Mehta ve arkadaşları yaptıkları çalışmada robot tasarımlarının denemeye-yanılma şeklinde iteratif olarak çok daha kolay bir şekilde yapılabileceğini öne sürmüştür (Mehta, Delpreto, Shaya, & Rus, 2014).



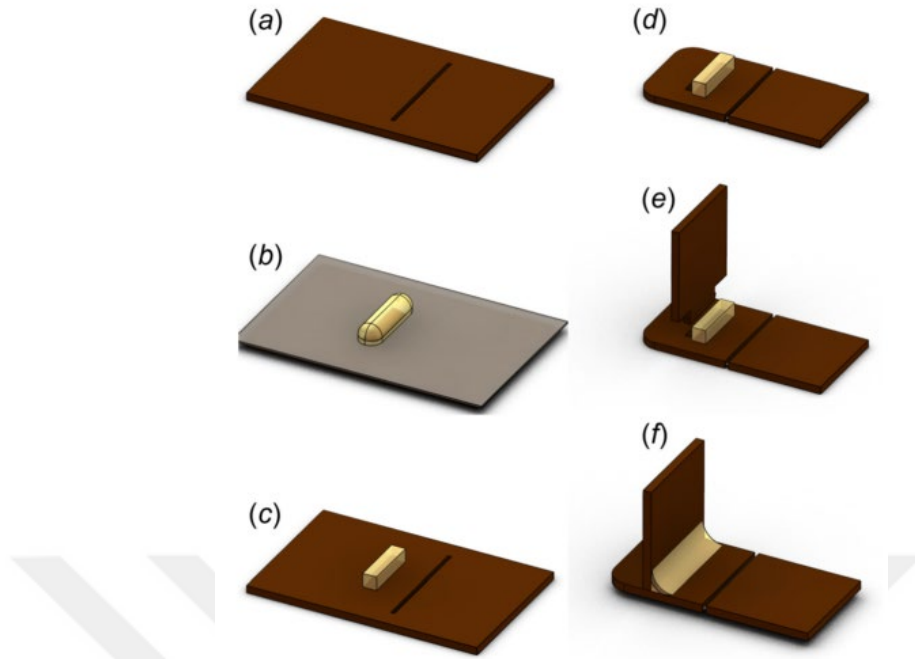
Resim 1.6. Origamiden esinlenerek üretilen robotun üretim aşamaları (Onal vd., 2015).

Haldane ve arkadaşları yaptıkları çalışmada “SCM” ile robot tasarlamının aşamalarını anlatmışlardır (Haldane vd., 2015). Bu çalışmada ortaya konulan metodolojide ilk olarak eklem yerleri tasarlanmıştır. Daha sonra eklemlerin 3 boyutlu geometrisi belirlenmiş ve bunu haritalayan 2 boyutlu geometri oluşturulmuştur. Bu aşamadan sonra 2 boyutlu geometrinin CAD modeli üretilmiştir. Eklemlerin çerçeveleri çizilmiş ve esnek bölgelerin birbirine montajı için dikdörtgen şeklinde oyuklar eklenmiştir. Bu oyukların tasarımı pim bağlantılarından farklı davranışları sebebiyle önemlidir. Çünkü bu bağlantı şeklinde eklemler tam dönme hareketi yapamamaktadır, ayrıca basmaya ve burulmaya karşı dayanıksızdır (Robert J. Wood vd., 2008). Son olarak bağlantı yerleri ve yapışkan eklenecek yerler belirlenmiştir. Oluşturulan bu 2 boyutlu geometri lazer kesim cihazı kullanılarak üretilip montajı yapılmıştır. Haldane ve arkadaşlarının oluşturduğu bu 2 boyutlu geometri Şekil 1.6’da gösterilmiştir.



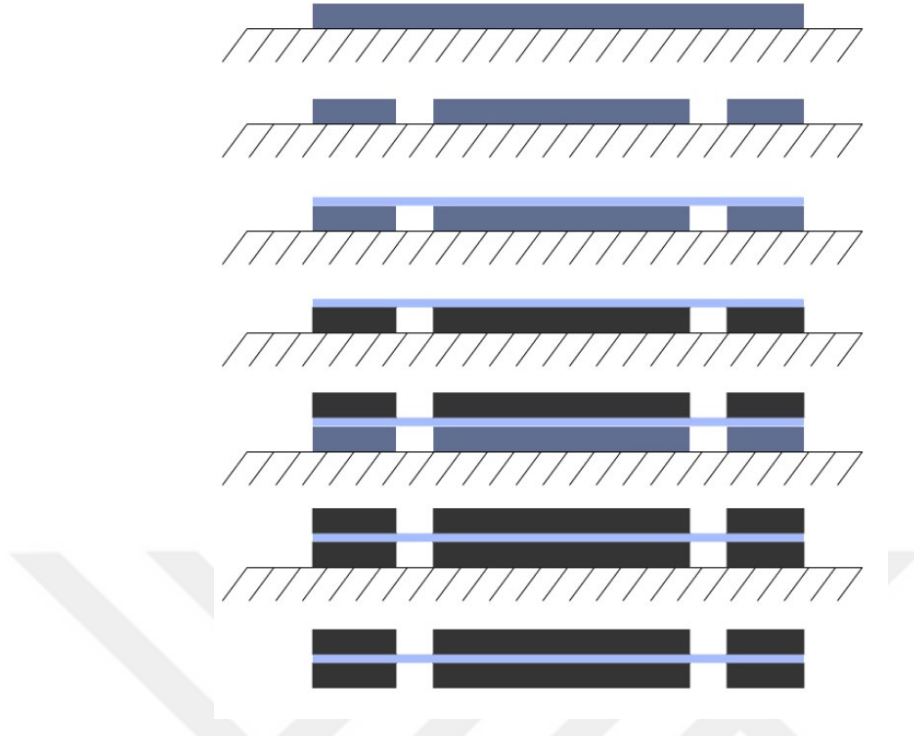
Şekil 1.6. SCM tekniğinde lazerde kesimi yapılacak 2 boyutlu geometri örneği (Haldane vd., 2015).

Haldane ve arkadaşları lazer kesiminden çıkan parçaların montajı için termal yapıştırıcı kullanmışlardır (Haldane vd., 2015). Bu işlemde önce zemindeki parçanın üzerinde montaj yapılacak bölgeye kesik atılmıştır. Daha sonra zemin parçası üzerine teflon şablon üzerinde termal yapıştırıcı uygulanmıştır. Daha sonra teflon şablon kaldırılarak termal yapıştırıcı parça üzerinde bırakılmıştır. Daha sonra eklenecek parçanın çerçevesi zemin parçası üzerinde lazerle kesilmiştir. Bu kesik üzerine parça monte edildikten sonra yapıştırıcıyla birlikte fırınlanmıştır. Sonuç olarak montaj tamamlanmıştır. Bu duruma örnek uygulama Şekil 1.7'de aşama aşama gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Lazerde kesilen 2 parçanın termal yapıştırıcı ile aşamalarıyla montaj işlemi (Haldane vd., 2015).

SCM tekniği mini, mili ve mikro robotik alanında sıklıkla kullanılmaktadır. Literatürde bu teknik ile üretilmiş çeşitli robotlar bulunmaktadır (Amirhosseini & Najafi, 2020; A. M. Hoover & Fearing, 2009; Aaron M. Hoover vd., 2010; Kohut vd., 2011; Mahkam vd., 2022; Robert J. Wood vd., 2008). Hoover ve Fearing yaptıkları çalışmada SCM tekniğinde kullanılan 2 farklı malzemenin birleştirme aşamalarını göstermişlerdir (Aaron M. Hoover & Fearing, 2008). Bu gösterim Şekil 1.8'de verilmiştir. Hoover ve Fearing başka bir çalışmasında milirobot tasarımının robotun elektroniğinin ve enerji kaynağının boyutu ve ağırlığından çok etkilendiğini, bu nedenle SCM tekniği kullanarak daha kolay tasarım yapılabileceğini söylemişlerdir (A. M. Hoover & Fearing, 2009).



Şekil 1.8. SCM tekniği ile robot eklemlerinin üretim aşamaları (Aaron M. Hoover & Fearing, 2008).

Literatürde yer alan üretim teknikleri arasında bu tez çalışmasında da üretim metodu olarak SCM tekniği kullanılmıştır.

2. BÖLÜM

MİNİ ROBOTUN TASARIMI VE AKILLI KOMPOZİT ÜRETİM TEKNİĞİ İLE ÜRETİM AŞAMALARI

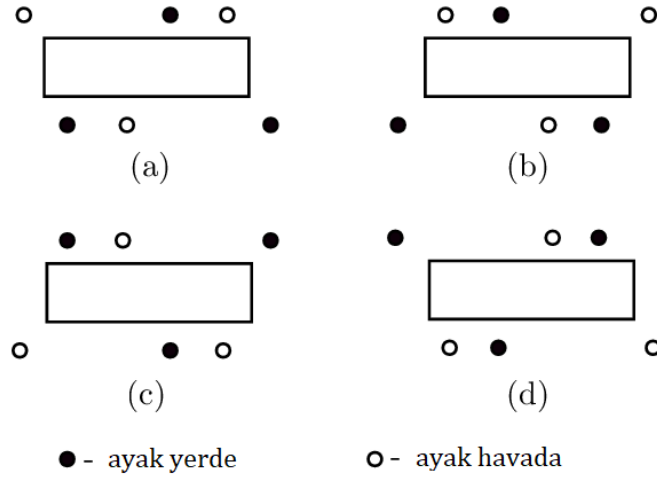
Önceki bölümde tartışıldığı gibi SCM tekniği ile üretim yaklaşımı minyatür robotlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada literatürdeki örneklerden de esinlenerek SCM tekniği kullanılarak minyatür robot üretimi gerçekleştirilmiştir. Robotun tasarım aşamaları sürecinde robota son hali verilene kadar farklı revizyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu aşamalar sürecinde üç farklı robot modeli tasarlanıp üretilmiştir. Robotun revizyon aşamaları sürecinde tasarım bileşenleri optimize edilerek nihai özgün robot versiyonu ortaya konulmuştur. Bu bölümde robotun tasarımı ve üretiminde kullanılan yöntemler, revizyon aşamaları ve tasarlanıp üretilen robot modelleri tartışılmıştır.

Tasarımsal olarak yapılan denemelerde robotun altı bacaklı (hexapod) veya dört bacaklı (quadruped) olarak geliştirilmesi hedeflenmiştir. Geliştirilecek olan robotun literatürden de alınan örneklerle karşılaştırmalı olarak maksimum 100 mm boyunda, en fazla 100 g ağırlığında ve minimum 30 mm/s hızla stabil şekilde hareket edebilen bir robot olması hedeflenmiştir.

Bu bölümde sırasıyla robotun dış iskelet üretimi ve esnek malzeme yapısı, geliştirilip uygulanan tahrik mekanizmaları (krank sistemi ve dişli kremayer sistemi), tasarlanan bacak modelleri (eyleyicili bilek eklemi, ön ve arka diz kapağına sahip diz eklemi ve ön diz kapağı ve yumuşak tendonlu diz eklemi), robotun dönme mekanizmaları (DC motorlu ve servo motorlu) ve son olarak üretimi tamamlanmış robot modelleri (altı bacaklı bilek eklemli, altı bacaklı diz eklemli ve dört bacaklı diz eklemli robot modelleri) sunulmuştur.

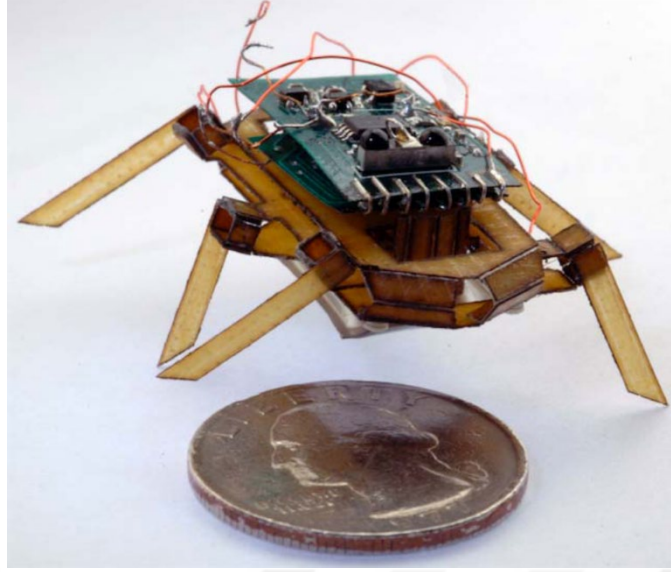
2.1. SCM Tekniği ile Dış İskelet Tasarım ve Üretim Aşamaları

Dış iskelet tasarımı için öncelikle altı bacaklı robot modelinin tasarım çalışmaları yapılmıştır. Bu tasarımda literatürde “alternatif tripod yürüyüşü (alternating tripod gait)” olarak geçen bir mekanizmanın robot tasarımında test edilerek kullanılması amaçlanmıştır. Bu mekanizmada robotun hareketi esnasında ileri doğru hareketi sağlayan üç bacak yere temas ederken diğer üç bacak yerden kalkmaktadır. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi yere basan ayaklar her döngüde bir tripod gibi davranmaktadır. Bu sayede robotun yürüyüşünün daha stabil olması hedeflenmiştir.



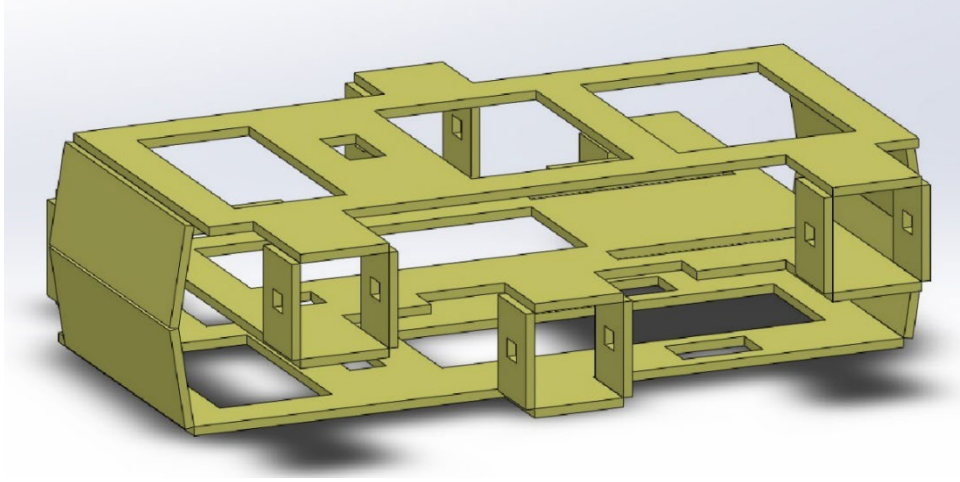
Şekil 2.1. Alternatif tripod yürüyüşü aşamaları: a) öne gelen ayaklar yere basarken arkaya giden ayakların yerden kalkması, b) yere basan ayaklar arkaya giderken havaya kalkan ayakların öne gelmesi, c) havada öne gelen ayaklar yere basarken yerden arkaya giden ayakların havaya kalkması ve d) yere basan ayaklar arkaya giderken havaya kalkan ayakların öne gelmesi (Aaron M Hoover vd., 2008).

Dış iskeletin tasarım sürecinde sonraki bölümlerde tartışılacak olan hareket mekanizmasının da tasarımı göz önünde bulundurulmuştur. Tasarım süreçlerinin SCM tekniği uygulanarak gerçekleştirilmesi aşamalarında elde edilen bulgular nihai versiyonun ortaya konulmasında yol gösterici olmuştur. Literatürden de esinlenilerek oluşturulan robot tasarımlarının ortak noktası bacakların gövdeye bağlandığı bölümlerde bir kalça eklemi kullanılmış olmasıdır. Bu tasarımlarda kullanılan kalça modeli, sonraki bütün robot versiyonlarında kullanılmış olup Hoover ve arkadaşlarının tasarlayıp üretimini gerçekleştirdiği ve Resim 2.1’de gösterilen “RoACH” isimli robotun kalça modeline benzemektedir (Aaron M Hoover vd., 2008).



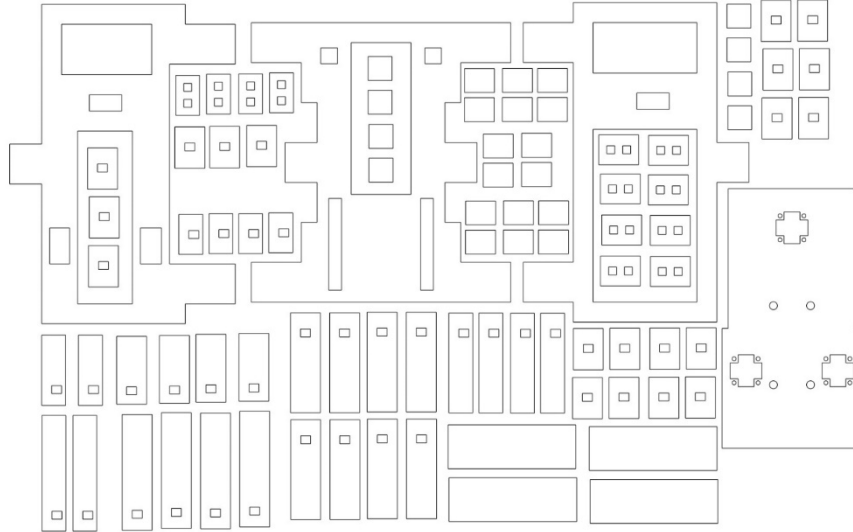
Resim 2.1. Hoover ve arkadaşları tarafından tasarlanan minyatür robot (Aaron M Hoover vd., 2008).

Robotun dış iskelet tasarımı için belirlenen hedeflerden ilki robotun ileri hareketinin tek bir eyleyici ile sağlanabilmesidir. Bunu sağlamak için yatay düzlemde sabit olacak şekilde yataklanmış alt ve üst plakalar tasarlanmıştır. Bu plakalar kalça eklemi vasıtasıyla ortada bulunan ve yatay düzlemde hareket edebilecek şekilde yataklanmış olan orta plakaya bağlanmıştır. Bu sayede ortadaki plaka yatay düzlemde hareket ettiğinde üst ve alt plakalara bağlı olan kalça eklemleri aralarında 180° faz farkı oluşacak şekilde farklı yönlerde hareket etmektedir. Bu yöntemle birlikte, tek bir servo motor tarafından tahrik edilecek olan orta plakanın hareketiyle bacakların farklı yönlerde hareket edebilmesi sağlanmıştır. Robotun dış iskeletinin bilgisayar destekli tasarımının görünümü Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Robotun dış iskeletini oluşturan üst, orta ve alt plakalar.

Tasarlanan dış iskelet yapısının üretimi için bu tez çalışmasındaki hedefler doğrultusunda SCM tekniği kullanılmıştır. Bu doğrultuda tasarlanan sistemin bileşenleri lazer kesim cihazı kullanılarak 1.1 mm kalınlığındaki akrilik plakadan kesilerek Şekil 2.3'te gösterildiği gibi elde edilmiştir. Bu noktada, robot bileşenleri akrilik plakaların optimum kullanılabileceği şekilde yerleştirilmiş ve bu sayede minimum miktarda akrilik plaka kullanılarak üretim gerçekleştirilmiştir.

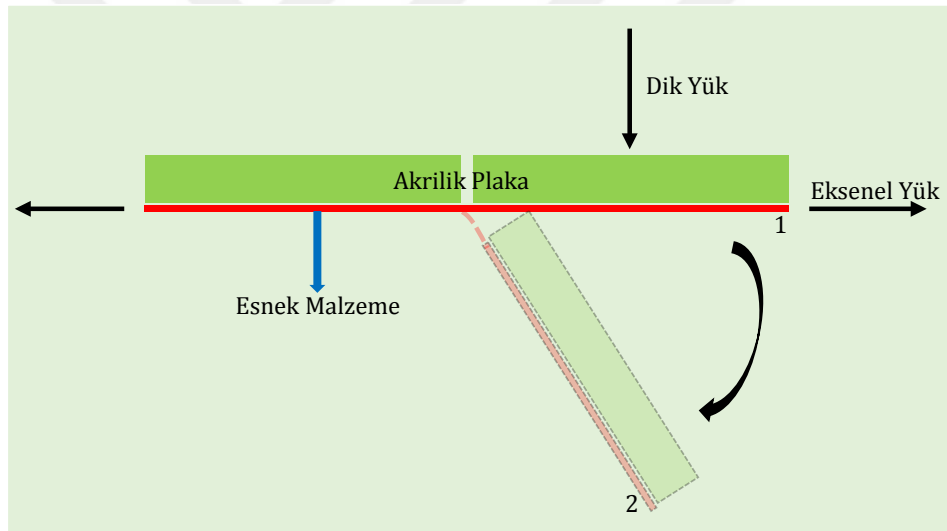


Şekil 2.3. İki boyutlu düzlemde lazer ile kesim için yerleştirilmiş robot parçaları örneği.

Akıllı kompozit üretim tekniğinde kullanılan akrilik malzemenin yanında eklemleri oluşturacak olan esnek malzemenin doğru olarak belirlenmesi de robotun hareketinin

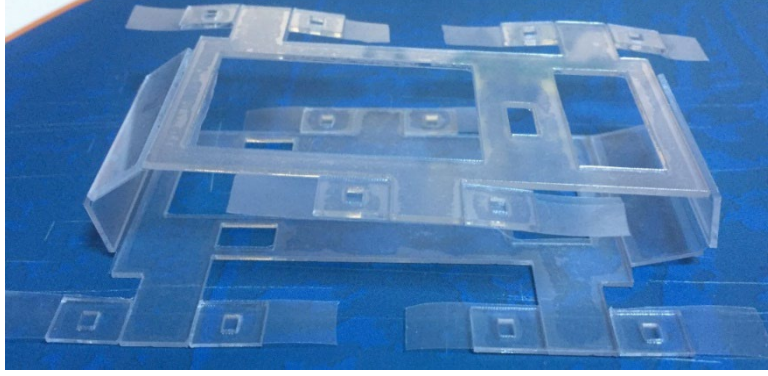
sağlanabilmesi için önem teşkil etmektedir. Bu çalışmada geliştirilen robotun dış iskeletinin üretiminde eklemlerin yapısı için farklı kombinasyonlarda çeşitli esnek malzeme türleri denenmiştir. SCM tekniğinin uygulanmasında lazer ile kesilen akrilik malzeme ile esnek malzemenin lamine şekilde yapıştırılması gerekmektedir. Bu nedenle öncelikle bant tipi yapışkanlık özelliği barındıran malzemeler esnek malzeme olarak denenmiştir.

Şekil 2.4'te SCM tekniği ile üretilen eklem yapısının şematik görünümü verilmiştir. Buna göre eklem yapısının "1" konumundan "2" konumuna gelmesini maruz kaldığı dik yük sağlamaktadır. Esnek film malzemesinin kullanımından çıkarılan sonuçlardan biri de eklem yapıda görüldüğü gibi bir aksel yüküne maruz kaldığında elastik davranışının düşük olması gerekliliğidir. Bu bağlamda geliştirilecek olan eklem yapısının maruz kaldığı dik yüklerle karşı eğilme rijitliğinin arzu edilen hareketi sağlayacak şekilde düşük, aksel yüküne karşı ise dayanımının yüksek olması gerekmektedir. Bu şekilde seçilecek uygun bir tasarımla eklemler istenilen hareketi sağlayacak şekilde fonksiyonunu yerine getirebilecektir.



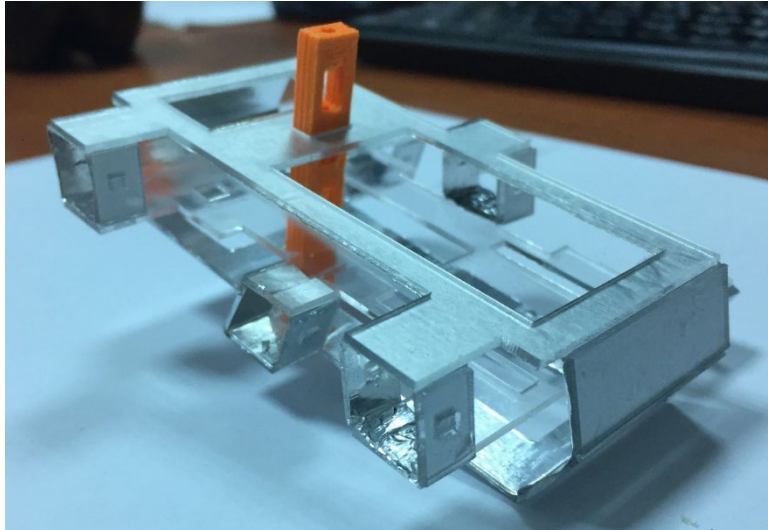
Şekil 2.4. SCM tekniği ile üretilen eklem yapısının şematik gösterimi.

Esnek malzeme yapısında ilk olarak esnek cam filmi kullanılmıştır. Bu malzemenin kullanımı ile üretilmiş olan dış iskelet yapısı Resim 2.2'de gösterilmiştir. Bu malzemenin laminasyonu ile oluşturulan eklem yapısının malzemenin yapışkanlık özelliğinin yetersiz olması nedeniyle zamanla delaminasyona uğradığı ve dış iskeletin yeterli rijitliğe sahip olmadığı gözlenmiştir. Buna ek olarak cam filminin aksel yük karşısında dayanımının düşük olduğu görülmüştür. Eklem yapısında denemesi gerçekleştirilmiş olan bu malzemede elde edilmiş sonuçlar bu tez çalışmasında SCM tekniğinin uygulanmasında dikkat edilmesi gereken hususların ortaya çıkarılmasına katkı sağlamıştır.



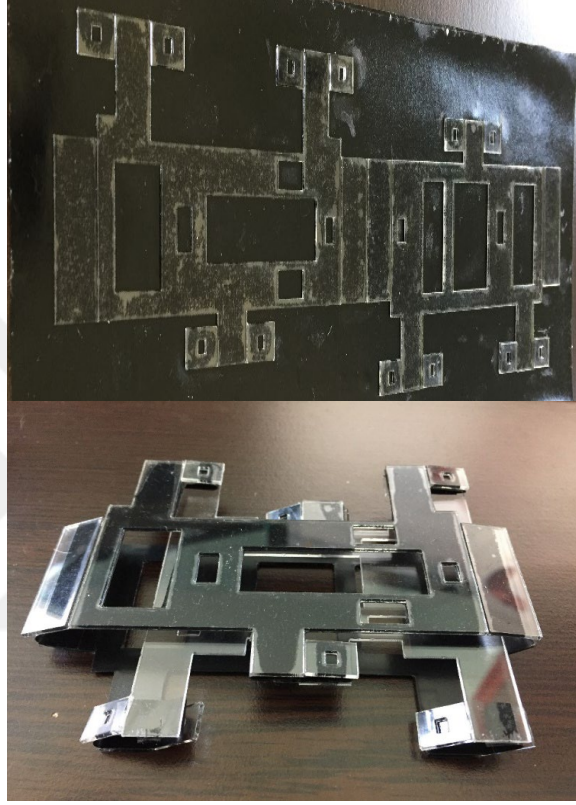
Resim 2.2. Esnek film kullanılarak üretilen dış iskelet yapısı.

Eklem yapısında kullanılacak esnek malzemenin aksel yük karşısında esneme yapmaması gerektiği göz önünde bulundurularak esnek film kullanımına son verilerek alüminyum bant ile yüz kaplaması uygulaması yapılmıştır. Yapışkanlık derecesi de esnek cam filmine göre daha yüksek olan alüminyum bant kullanımı ile oluşturulan ve Resim 2.3'te gösterilen dış iskelet ile daha stabil bir eklem yapısının elde edildiği gözlenmiştir. Bununla birlikte bu yapının kullanımı ile aksel olarak esneme miktarı daha düşük olduğu için eklem hareketleri de daha düzgün bir şekilde elde edilebilmektedir. Ancak yapılan ön testlerde robotun uzun süreli çalışmalarında bacakların maruz kalabileceği yanal yükler nedeniyle ortaya çıkan kesme kuvvetlerine alüminyum bant malzemesinin dayanıklılığının düşük olduğu ve eklemlerde yırtılmalar meydana geldiği gözlenmiştir.



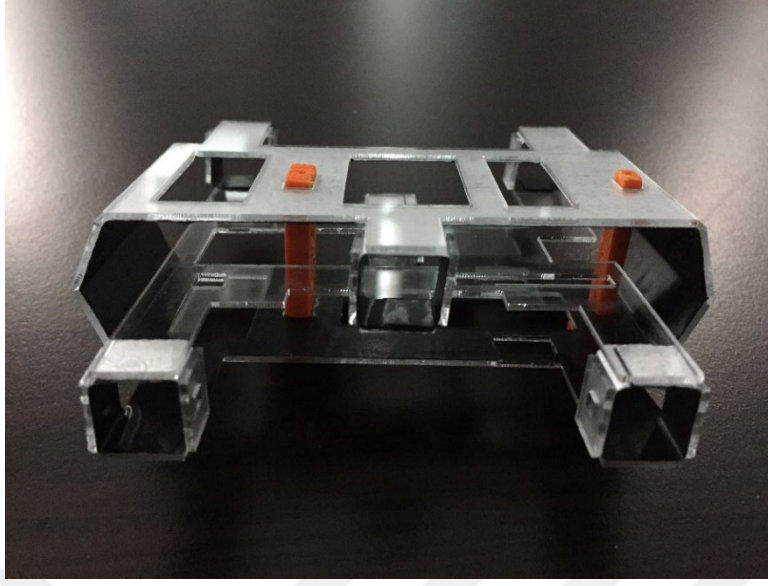
Resim 2.3. Alüminyum bant kullanılarak üretilen dış iskelet yapısı.

Alüminyum bant malzemesinin yırtılma probleminin ortaya çıkması nedeniyle eklem yapısında alternatif olarak Resim 2.4'te gösterilen kaplama filmi kullanılmıştır. Üretimi tamamlanan dış iskelet yapısı incelendiğinde bu malzemenin alüminyum banta göre yırtılmaya karşı daha dayanıklı olduğu görülmüş olsa da eklem yapısının malzeme ile akrilik plaka arasında meydana gelen delaminasyon nedeniyle düzgün oluşmadığı sonucuna ulaşılmıştır.



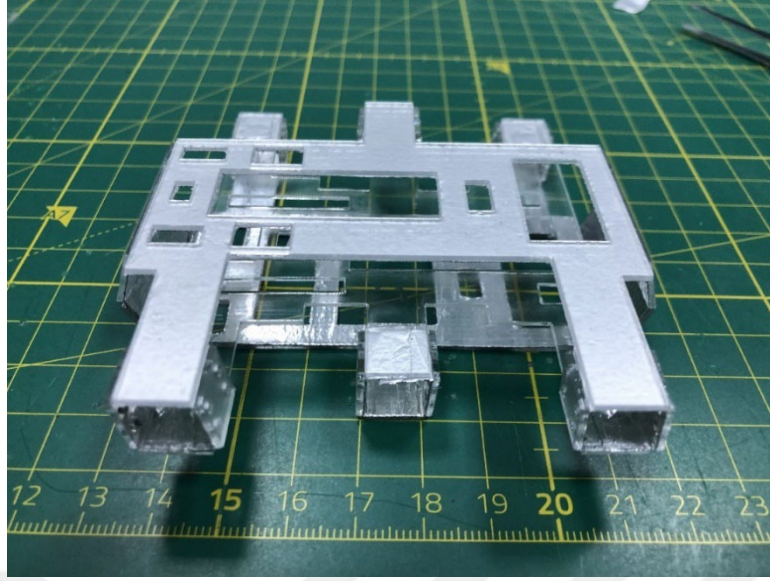
Resim 2.4. Kaplama filmi kullanılarak üretilen dış iskelet yapısı ve laminasyonu.

Esnek yapıya sahip kaplama filminin uygulamasında görülen eksiklikler sonucunda bu malzemenin alüminyum bant ile birlikte hibrit bir yapıda kullanılarak dış iskelet modelleri oluşturulmuş ve denemeler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle iki kat kaplama filmi üzerine iki kat alüminyum bant uygulanmış ve akrilik parçalar üzerine yapıştırılmıştır. Bu uygulama ile eklem yerlerinde önceki denemelere göre az yırtılma gözlemlenmiştir. Bu durumu daha da iyileştirmek amacı ile iki kat kaplama filmi üzerine dört kat alüminyum bant uygulaması denenmiştir. Bu şekilde üretilen dış iskeletin önceki denemelere göre Resim 2.5'te görüldüğü gibi daha rijit bir yapıda olduğu gözlemlenmiştir.



Resim 2.5. İki kat kaplama filmi ve dört kat alüminyum bant kullanılarak üretilen dış iskelet yapısı.

Kaplama filmi ile birlikte hibrit yapıda kullanılan alüminyum bant ile oluşturulan eklem yapısında kısa süreli çalışmalarda hasar görülmemiştir. Ancak robotun uzun süreli çalışmasında eklemlerdeki hareketin döngü sayısı arttıkça yine kaplama filminden kaynaklanan delaminasyonların meydana geldiği gözlenmiştir. Bu nedenle daha sonra alüminyum bant malzemesinin tek başına kullanımıyla oluşturulan dış iskelet yapılarında yırtılmayı önlemek için malzeme öncelikle dört kat lamine şeklinde kullanılmıştır. Bu şekilde üretilen dış iskeletin uzun süreli çalıştırılması sonucunda eklemlerde tek katlı kullanıma göre daha az olsa da yine yırtılmalar meydana gelmiştir. Son olarak aynı malzemenin sekiz kat lamine şeklinde kullanımıyla oluşturulan Resim 2.6'da görülen dış iskelet yapısında uzun süreli kullanım durumları da dahil olmak üzere deformasyona rastlanmamıştır.



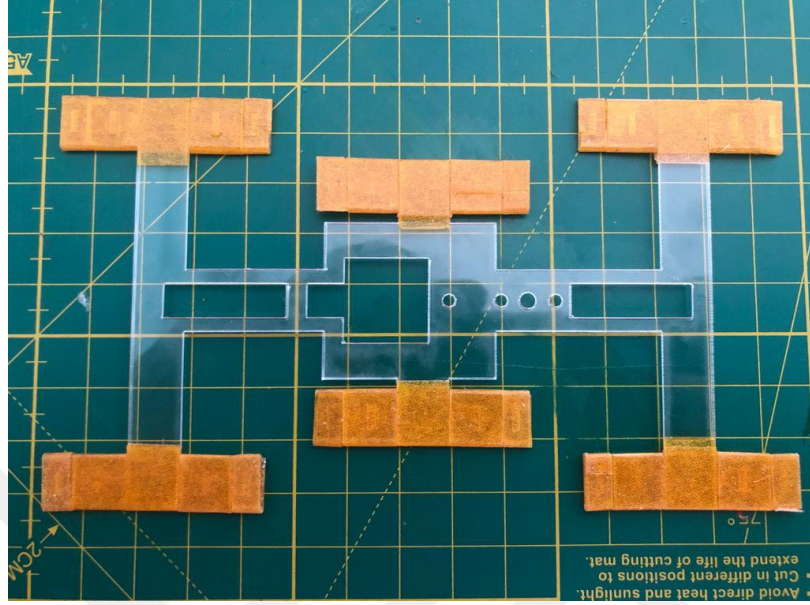
Resim 2.6. Sekiz kat alüminyum bant kullanılarak üretilen dış iskelet yapısı.

Robotun dış iskeletinin üretiminde kullanılan sekiz kat alüminyum bant yapısının dayanıklı olmasının yanında eklem yapısının düzgün oluşturulabilmesi de bu yapının avantajları arasındadır. Ancak malzemenin sekiz kat kullanımı eklemlerde belirgin bir şekilde hareket direnci oluşmasına yol açmıştır. Eklem yapısı bu şekilde oluşturulduğunda Şekil 2.4'te görülmekte olan eklem hareketinin sağlanması hususunda hareket mekanizmasının daha fazla zorlandığı sonucuna ulaşılmıştır.

Robotun eklem yapısında son olarak kapton adı verilen bir poliimid film malzemesi kullanılmıştır. Daha çok esnek elektronik devrelerde yalıtım ve koruma malzemesi olarak kullanılan kapton, yüksek ve düşük sıcaklıklarda yapısının bozulmaması ile tercih edilen bir malzemedir. Buna ek olarak bu malzeme uzay teknolojisinde de kullanılmaktadır. Özellikle uydu ve uzay teleskoplarının yansıtıcı yüzeylerinde koruyucu malzeme olarak kullanılan kapton, uzay araçlarının güneş panellerinde ve yapısal yüzeylerinde de termal koruyucu olarak kullanılmaktadır. Eklem yapısını oluşturan kapton malzemesi öncelikle üç ve dört katlı olacak şekilde birleştirilmiştir. Daha sonra bu şekilde oluşturulan eklemlerde alüminyum bandın sekiz katlı kullanımına benzer şekilde hareket direnci olduğu gözlemlenmiş ve malzeme tek kat olarak kullanılmıştır. Alüminyum banta göre yırtılma direncinin çok daha yüksek olduğu gözlemlenmiş olan kapton malzemesinin yapışmasını sağlamak amacıyla 3M® çift taraflı bant kullanılmıştır. Yapışma seviyesi yüksek olan bu malzeme sayesinde eklemlerde delaminasyon oluşmadığı gözlemlenmiştir.

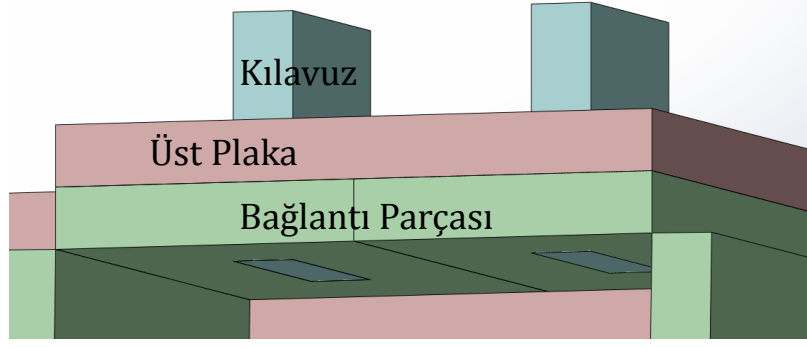
Robotun dış iskeletinde kullanılan esnek malzemenin tek görevi robotun kalça eklemlerinin işlevsel bir şekilde oluşmasını sağlamaktır. Bu nedenle kapton malzemesinin kullanımında

robot gövdesinin tamamını bu malzeme ile kaplamak yerine sadece eklem yerlerini kaplayacak şekilde üretim yapılmıştır.



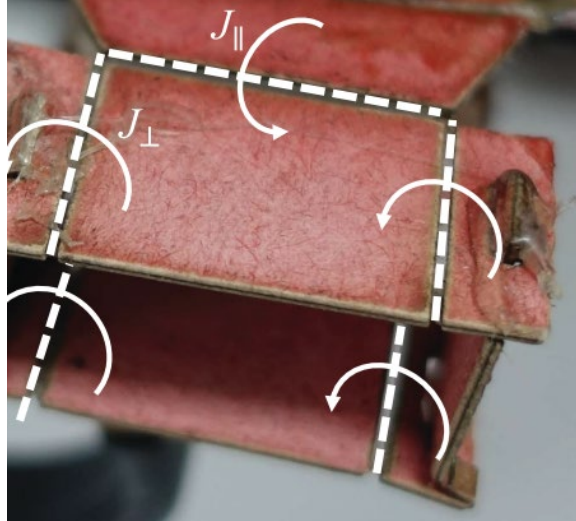
Resim 2.7. Kapton malzeme kullanılarak üretilen dış iskeletin laminasyonu.

Kapton malzemesinin kullanımı ile oluşturulan dış iskeletin laminasyon yapısı Resim 2.7'de gösterilmektedir. Önceki dış iskelet yapılarında üst ve alt plakaların da esnek malzeme ile kaplanması ve plakaların bağlantılarının bu malzemenin yapıştırılmasıyla sağlanmış olduğu görülmektedir. Ancak bu aşamada robotun üretiminde temel olarak kullanılan SCM tekniğinde modifikasyon gerçekleştirilmiş ve plaka bağlantılarının daha rijit şekilde oluşturulması amacıyla plakalar bağlantı elemanları ile Şekil 2.5'te gösterildiği gibi birleştirilmiştir. Bu modifikasyonda eklemi oluşturan parçaların tümünün orta plakaya bağlantıları Resim 2.7'de görüldüğü gibi sağlanmış ve en dışta kalan parçalar mekanik kılavuzlama yöntemiyle üst ve alt plakalara bağlanmıştır. Bu bağlantı şeklinin mekanik olarak sağlanabilmesi amacıyla SCM tekniği ile orta plakaya eklenmiş olan bağlantı parçalarının üst plaka ile bağlantıları sağlanmış ve kılavuz ile temas eden yüzeyler yapıştırılmıştır.



Şekil 2.5. Dış iskelet üretiminde plakaların bağlantı mekanizması.

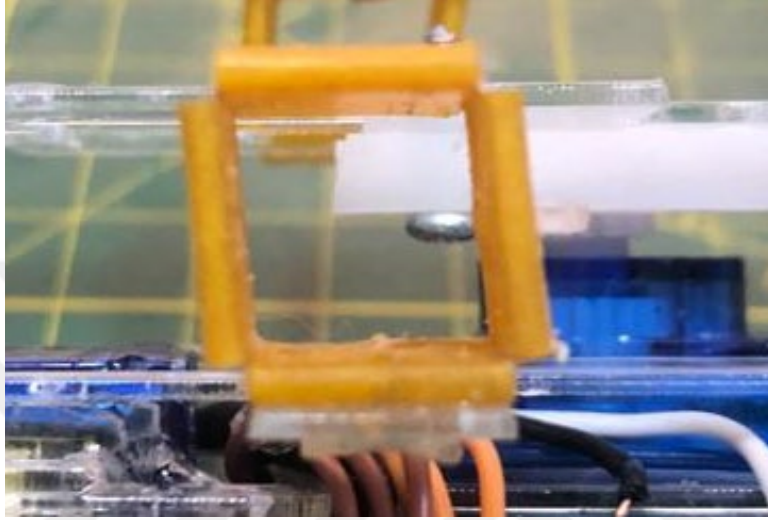
Geliştirilmiş olan plakalar arası bağlantı şekli bu tez çalışmasında SCM tekniğinin uygulanmasına özgün bir yapı kazandırmaktadır. Literatürde SCM tekniğinin uygulandığı çalışmalar incelendiğinde bu bağlantı şekline benzer bir yapının Yun ve Fearing'in çalışmasında kullanıldığı görülmektedir (Yun & Fearing, 2019). İlgili çalışmada Resim 2.8'de görüldüğü gibi benzer şekilde iki parçanın mekanik olarak bağlantısı sağlanarak yapıştırıcı ile birleştirilmesi örneği görülmektedir. Bu bağlantı şekli Haldane ve arkadaşlarının çalışmasında önermiş olduğu SCM tekniğinin bir uygulamasıdır (Haldane vd., 2015). Ancak bu tez çalışmasında iki parçanın birleştirilmesi kılavuz yardımıyla gerçekleştirildiği için bahsedilen çalışmalardan farklılık göstermektedir.



Resim 2.8. Yun ve Fearing tarafından uygulanan yapıştırma tekniği (Yun & Fearing, 2019).

Kapton ile oluşturulan kalça eklemi yapısında delaminasyon nedeniyle bozulmaları tamamen ortadan kaldırmak amacıyla fazladan bir kat kapton malzemesi ile parçalar sıkı bir şekilde

sarılmıştır. Bunun sayesinde kalça eklemlerinde oluşturulan laminasyon yapısı, yapışkan bandın yanı sıra kapton malzemesi kullanımı ile mekanik olarak da sağlanmıştır. Yapılan denemelerde uzun süreler çalışmasına rağmen eklem yapısının korunduğu gözlenmiştir. Kaptonla sarılmış eklem görünümü ve üretilmiş dış iskelet yapısı sırasıyla Resim 2.9 ve Resim 2.10'da görülmektedir.



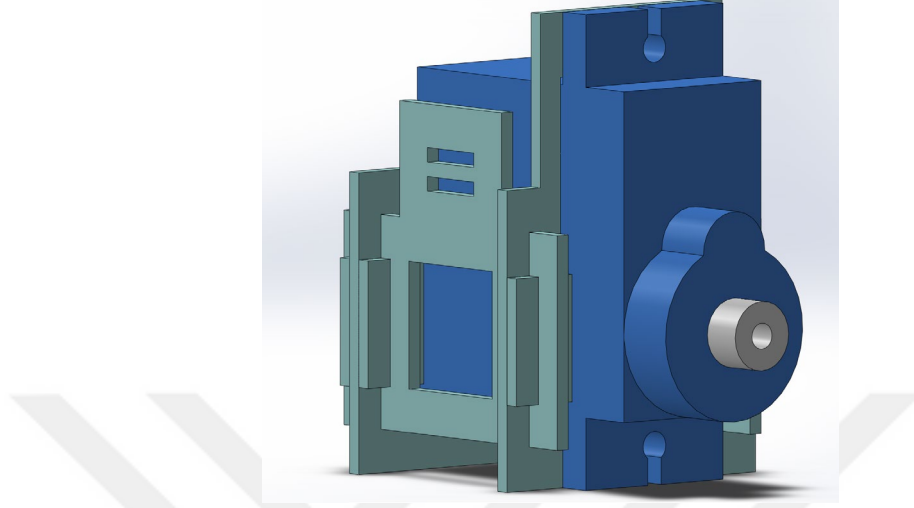
Resim 2.9. Kaptonla sarılmış kalça eklemi görünümü.



Resim 2.10. Kapton malzeme kullanılarak üretilen dış iskelet yapısı.

SCM tekniğinin uygulamasında eklem yapısına benzer bir şekilde oluşturulmuş olan servo motor kutusu da yine yapıştırmanın yanında mekanik olarak bağlantı sağlanabilen bir yapıdadır. Bu yöntemde yapıştırma işlemine ek olarak malzemenin çift taraflı olacak şekilde pinler yardımıyla mekanik bir şekilde de bağlanmıştır. Bu yöntemde göre malzemeye dik olarak bağlanması gereken plakada malzeme kalınlığı göz önünde bulundurularak lazer yardımıyla oluklar açılmış ve malzemenin içinden geçtiğinde iki tarafına da Şekil 2.6'da görüldüğü gibi

pinler bağlanarak mekanik bağlantı oluşturulmuştur. Aynı yöntem ana gövde imalatında da kolonların montajı sırasında kullanılmıştır.



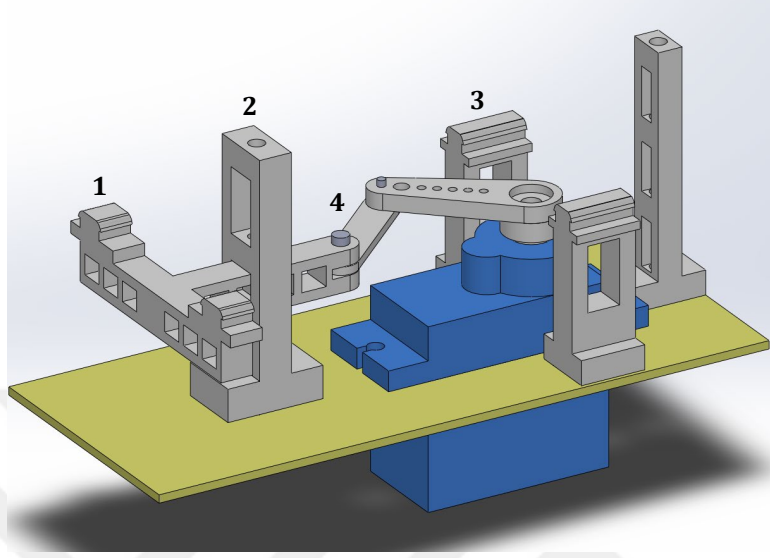
Şekil 2.6. Özgün birleştirme tekniği ile üretilmiş servo motor kutusu tasarımı.

2.2. Robot Tasarımlarında Kullanılan Hareket Mekanizmaları

Robotun hareket mekanizması ortaya çıkarılırken ileri hareketin tek bir eyleyici ile sağlanacak olması tasarımın temelini oluşturmaktadır. Önceki bölümde ortaya çıkarılmış olan dış iskelet yapılarının hepsinde hareketli bir orta plakanın üst ve alt plakalara kalça eklemi ile bağlantısının sağlanması ile robotun yürütülmesi planlanmıştır. Bu kapsamda orta plakanın hareketini sağlamak için tek eyleyici olarak kullanılan servo motorun dairesel hareketini doğrusal harekete çevirmek için hareket mekanizmaları tasarlanmıştır.

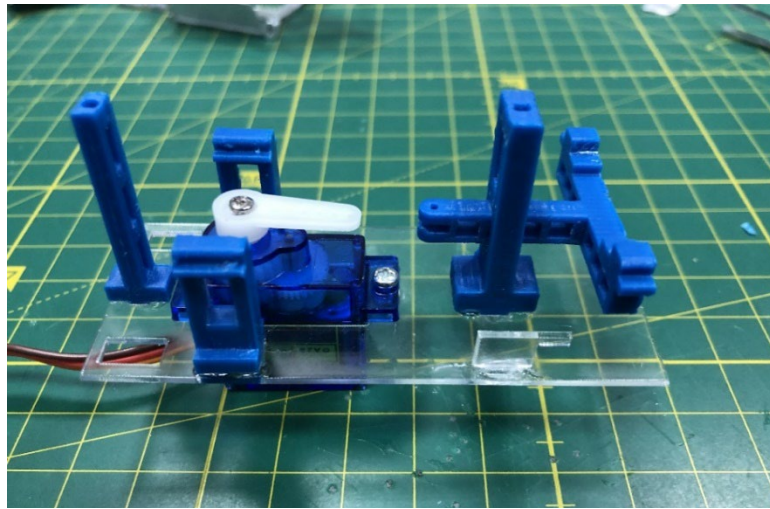
Bu tez çalışmasında iki ayrı hareket mekanizması kullanılmış ve uygun tasarım belirlenmiştir. Tasarım metodolojisi olarak farklılık gösteren bu iki mekanizmadan ilki basit bir krank biyel mekanizmasıdır. Bu mekanizmada, eyleyici olarak kullanılan servo motorun dairesel hareketini aktarmak için Şekil 2.7'de görüldüğü gibi bir krank biyel mekanizması tasarlanmıştır. Bu mekanizmada servo motora bağlanmış olan şaftın dönme hareketini doğrusal harekete çevirmek için yatak içerisinde hareket edebilen ve şekilde "4" numaralı olarak gösterilen bir tahrik kolu tasarlanmıştır. Bu parçanın üzerinde ise dış iskelette bulunan orta plakayı hareket ettirmek için "1" numara ile gösterilmiş pinler bulunmaktadır. Bu pinlerin orta plakaya montajı sonucunda orta plakanın doğrusal hareketi sağlanmıştır. Tahrik kolunun hareketinin yataklanması için "2" numara ile gösterilen kolon içerisinde oluk bulunmaktadır. Bu tasarımda orta plakanın hareketinin arzu edilen şekilde sağlanabilmesi için servo motorun iki yan tarafında "3" numara ile gösterildiği şekilde orta plakayı yataklayacak kolonlar bulunmaktadır. Bu kolonların tasarımsal katkısı orta plakanın yere paralel bir şekilde

hareketinin sağlanması ve bu sayede hareket mekanizmasında yaşanabilecek potansiyel kasılmaların önlenmesidir.



Şekil 2.7. Krank biyel hareket mekanizması tasarımı.

Tasarlanmış olan krank biyel mekanizması polilaktik asit (PLA) polimer malzeme kullanılarak eriyik yığıma modelleme (ing. fused deposition modelling, FDM) eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiştir. Üretimi yapılan parçaların robot üzerine yapıştırılması ile elde edilen tasarım Resim 2.11’de gösterilmiştir.

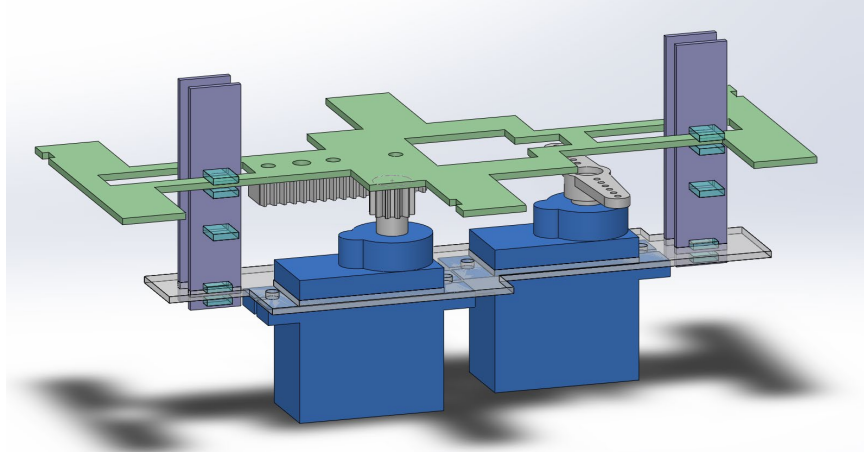


Resim 2.11. Eklemeli imalat teknolojisi ile üretilmiş olan krank biyel mekanizması.

Eklemeli imalat teknolojisi ile üretilmiş olan hareket mekanizmasının robot üzerinde performansının incelenmesi noktasında çeşitli testler yapılmıştır. Bu hareket mekanizması mekanik tasarımın limitleri nedeniyle servo motorun limitleri olan 0°-180° aralığında çalışmamaktadır. Bu tasarımda servo motor 45°-135° aralığında dönme hareketi döngüsünü tamamlamaktadır. Bu durum servo motorun daha verimli kullanımını önlemektedir. Buna ek olarak robotun boyutlarının küçük olması nedeniyle Resim 2.11’de görülen yataklama sisteminin boyunun yeterince uzun olmamasından kaynaklanacak şekilde hareket mekanizmasının çalışmasında kasılmalar olduğu gözlenmiştir. Bu durumun oluşmasında etkisi olan bir başka neden de parçaların eklemeli imalatla üretilmiş olması ve temas yüzeylerinin pürüzlülüğünün yüksek olmasıdır. Bunun sonucunda tahrik kolu yatak içerisinde hareket ederken sürtünme kuvvetinden kaynaklanan bir dirençle karşılaşmaktadır. Ayrıca, üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş olan hareket mekanizması parçalarının robot üzerinde belirgin bir ağırlık yükü oluşturduğu gözlenmiştir.

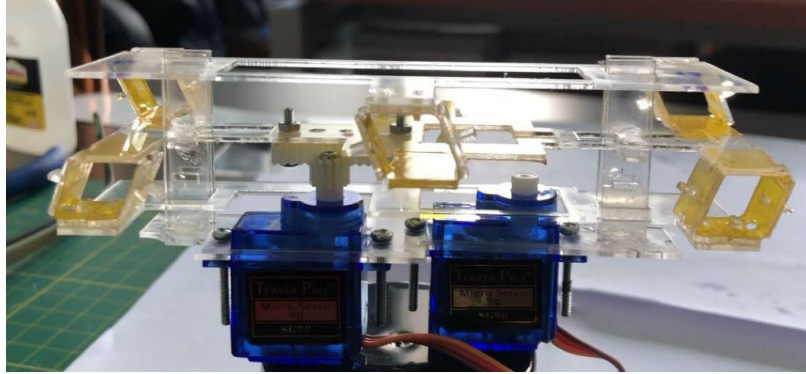
Bu tez çalışmasında krank biyel mekanizmasının yanında yine tek bir eyleyici olan servo motordan tahriklenen bir dişli kremayer mekanizması da tasarlanmıştır. Diğer hareket mekanizması tasarımında olduğu gibi bu mekanizmanın kullanımındaki en temel amaç motorun dairesel hareketinin doğrusal harekete efektif şekilde dönüştürülmesidir. Bu doğrultuda yapılan tasarımda servo motora bağlanmış olan bir dişli parçasının doğrusal hareket etmesi gereken orta plakaya monte edilmiş bir kremayeri hareket ettirerek mekanizmayı oluşturması sağlanmıştır.

Bu tasarım oluşturulurken krank biyel sistemiyle oluşturulmuş olan mekanizmada 3D yazıcı ile üretilmiş olan parçaların dezavantajları da göz önünde bulundurularak robotun dış iskeletinde de kullanılmış olan akrilik malzeme kullanılmıştır. Hareket mekanizmasını oluşturan parçaların amaçlarından biri de orta plakanın hareketi esnasında yataklanmasını ve üst ve alt plakaların yatay düzlemde sabitlenmesini sağlamaktır. Bu bağlamda, lazer kesici kullanılarak kesilen akrilik parçaların kullanımı ile oluşturulan kolon yapısı ve kolonların belirli noktalarına monte edilen pinler yardımı ile bu görevlerin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Dişli kremayer sistemi kullanılarak geliştirilmiş hareket mekanizması tasarımı Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Şekilde mekanizma üzerinde görülmekte olan ikinci bir servo motor bulunmaktadır. Bu ikinci motor bu tasarımda robotun dönme işlemini gerçekleştirmek için kullanılmıştır.



Şekil 2.8. Dişli kremayer sistemi ile oluşturulmuş hareket mekanizması tasarımı.

Hareket mekanizmasında krank biyel mekanizması yerine dişli kremayer sisteminin kullanılması robotun tasarımına sadelik kazandırmaktadır. 3D yazıcı kullanılarak oluşturulmuş olan krank biyel sistemine göre daha az parçadan oluşan bu sistemin çalışmasının da göreceli olarak daha sorunsuz olduğu gözlenmiştir. Oluşturulan hareket mekanizması Resim 2.12’de görüldüğü şekilde dış iskelet yapısı ile birleştirilmiş, performansı uzun süreli çalışma periyotlarında test edilmiştir ve dış iskeletin hareketini planlandığı gibi sağlayabildiği gözlenmiştir.



Resim 2.12. Dişli kremayer ile oluşturulan hareket mekanizması ve dış iskelet ile montajı.

2.3. Robot Tasarımlarında Kullanılan Bacak Yapıları

Bu tez çalışmasında tasarlanmış ve üretilmiş olan robotların ileri hareketleri için tek bir servo motor kullanılmıştır. Bacaklı yürüme hareketinin sağlanabilmesi amacıyla bacak hareketleri 180° açılık faz farkıyla oluşturulan iki ayrı salınım hareketiyle sağlanmaktadır. Bu durumda bacaklardan bir kısmı ileri harekete katkı verirken diğer bacaklar istenmeyen ters yönlü

harekete neden olabilmektedir. Bunu önlemek için hareket esnasında bacakların ters yönde harekete katkı vermeleri durumunun minimize edilmesi gerekmektedir. Bu durumu sağlamak için bu tez çalışmasında ortaya çıkarılmış olan bacak tasarımlarında iki farklı yaklaşım dikkate alınmıştır.

Bacak tasarımında benimsenmiş olan ilk yaklaşım bacakların harekete katkı vermelerinin istenmediği durumlarda yerden kaldırılmasını sağlayacak bir eyleyici kullanımudur. Minyatür robotlarda boyutlar küçük olduğu için bacakların yerden kaldırılması görevini gerçekleştirecek geleneksel eyleyicilerin robota entegre edilmesi tasarımsal olarak zorluklar içermektedir. Bu nedenle bu çalışmada bacakların yer ile temasının kesilmesi ilk olarak şekil hafızalı alaşım (ing. shape memory alloy, SMA) kullanımı ile sağlanmaya çalışılmıştır.

Şekil hafızalı alaşım yüksek sıcaklıklarda ön gerilmeli olarak sahip oldukları şekilleri şoklama ile soğutulduklarında hatırlama özelliğine sahiptirler. SMA malzemeleri, normal şartlar altında tepki vermezken çok yüksek olmayan sıcaklıklara (yaklaşık 60 C°) ulaşacak şekilde ısıtıldıklarında şekil değiştirerek hafıza kazandırılmış olan yapıya geçmektedirler. SMA'lar bu özellikleri sayesinde minyatür robotlarda eyleyici olarak kullanılabilirler.

Bu çalışmada şekil hafızalı alaşım olarak nikel-titanyum (nitinol) malzemesi kullanılmıştır. Bacak yapısında doğadan esinlenerek oluşturulmuş olan bilek eklemine hareket ettirilmesi için farklı geometrilerde hafıza kazandırılmış olan nitinol teller kullanılmıştır. Düz, eğimli ve yay şeklinde hafıza kazandırılmış nitinol tellerin bilek eklemine açıp kapaması hedeflenmiştir. Nitinol malzemesine hafıza kazandırma çalışmalarında literatürdeki çalışmalar dikkate alınmıştır (Gilbert & Webster, 2016; Pelton, Russell, & DiCello, 2003).

Yapılan denemelerde tel ve yay şeklinde hafızaya sahip nitinol malzemesinin eyleyici olarak kullanılmasında kontrol mekanizmasının robot tasarımını karmaşık hale getirdiği görülmüştür. Bu nedenle kontrol bileşeninin de üzerinde yer aldığı hazır nitinol eyleyici kullanımı tercih edilmiştir. Resim 2.13'te görülmekte olan nitinol eyleyicinin iç yapısında sargı şeklinde bulunan nitinol tel bulunmaktadır. Normal şartlar altında lineer doğrultuda uzun halde bulunan nitinol eyleyici elektrik akımına maruz kaldığında 4 mm kısalmaktadır.



Resim 2.13. Nitinol eyleyici.

Nitinol eyleyicinin kısılması elektriksel olarak kontrol edilebilmektedir. Ancak eyleyicinin tekrar eski konumuna gelmesini sağlayacak bir mekanizma bulunmamaktadır. Bacakların yerden kaldırılıp harekete katkı vermesi gerektiği durumlarda da tekrar yer ile temasının sağlanması gerekmektedir. Bu nedenle eyleyicinin mekanik kuvveti iletebilmesi amacıyla uç kısmına bir bağlantı elemanı monte edilmiştir. Daha sonra eyleyicinin hareket döngüsünün sağlanması için deaktif olduğunda geri uzamasını sağlamak amacıyla tasarlanmış olan bağlantı elemanı da kullanılarak iç kısmına bir yay mekanizması eklenmiştir. Eklenen yay sayesinde eyleyicinin uzama-kısılma döngüsünün tamamlanması sağlanmıştır. Bu mekanizmanın monte edildiği eyleyici modelinin iç yapısı Resim 2.14'te görülmektedir. Bu noktada eklenmiş olan yay eyleyicinin kısılmasını engelleyecek kadar bir direnç uygulamazken eyleyici deaktif olduğunda tekrar uzamasını sağlamaktadır.

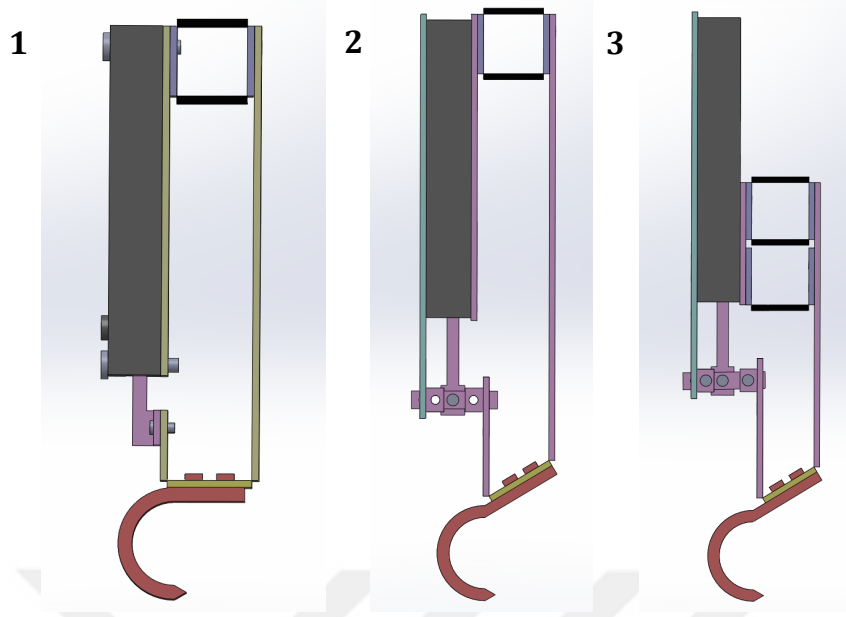


Resim 2.14. Nitinol eyleyicinin iç yapısı ve yay mekanizması modifikasyonu.

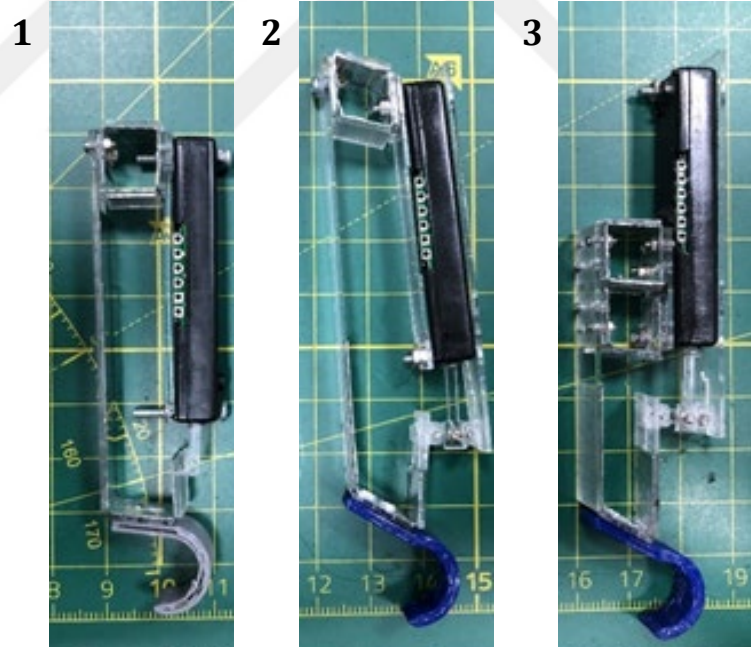
Eyleyicinin modifikasyonu sonucunda oluşan sistem ile yapılan testler sonucunda uzun haldeki eyleyici aktif edildiğinde yaklaşık 0.5 saniyede kısa duruma gelirken deaktif edildiğinde ise yaklaşık 1 saniyede eski hale dönebildiği görülmüştür.

Eyleyiciye eklenen yay mekanizmasının eyleyicinin döngüsünün tamamlanmasının yanında bir avantajı daha bulunmaktadır. Robotun hareketi esnasında oluşan dinamik yükler de dahil olmak üzere robotun ağırlığını yaylar taşımaktadır. Bu durum ayaklarda esneklik sağlamanın yanında aynı zamanda yürüme esnasında bir engele takılma durumunda robotun daha kolay ilerlemesini sağlayabilmektedir.

Kullanılan nitinol eyleyicinin boyutları ve hareket kabiliyeti göz önünde bulundurularak farklı yapılarda bacak tasarımları oluşturulmuş ve denemeleri gerçekleştirilmiştir. Tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiş olan bacak yapılarından örneklerin tasarım görünüşleri ve üretilmiş modelleri sırasıyla Şekil 2.9 ve Resim 2.15'te gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Nitinol eyleyici ile oluşturulan bacak tasarımları ve bilek eklemi yapılarının tasarım görünümleri.



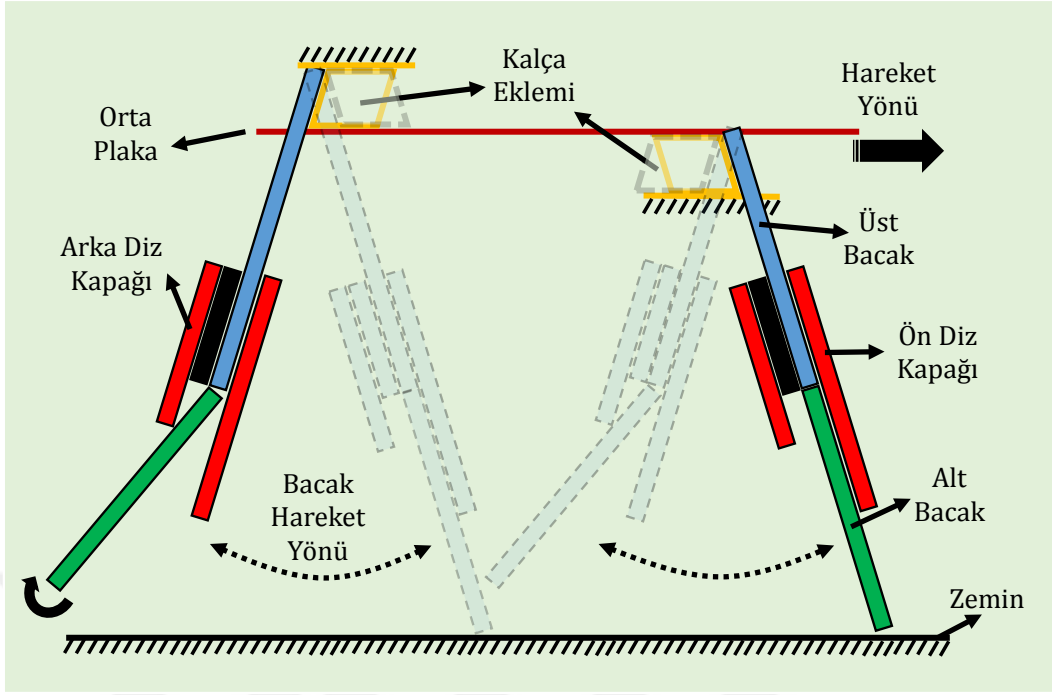
Resim 2.15. Nitinol eyleyici ile oluşturulan bacak tasarımları ve bilek eklemi yapıları.

Ortaya çıkarılmış olan nitinol eyleyicili bacak tasarımlarında doğadan esinlenerek bir bilek yapısı oluşturulmuştur ve ayakların yer ile temasının kesilmesi için nitinol eyleyicinin hareketinden yararlanılmıştır. Şekil 2.9 ve Resim 2.15'te görülen örneklerde tasarımsal gelişim iteratif bir şekilde ele alınmıştır. İlk olarak şekil üzerinde "1" numaralı olarak adlandırılmış

olan bacak modeli üretilmiş ve bilek eklemindeki yer değişim uzunluğunun yetersiz kalması nedeniyle tasarımda revizyonlar yapılarak “2” ve “3” numaralı alternatif bacak modelleri tasarlanmıştır. Revize edilen modellerde “1” numaralı modelden farklı olarak eyleyicinin aktarmış olduğu hareket miktarını artırmak amacıyla bilek ekleminde bir kuvvet kolu bulunmaktadır. 4 mm hareket kabiliyetine sahip eyleyicinin bu kuvvet kolu sayesinde bilek eklemini 8 mm kaldırabilmesi sağlanmıştır. “2” numaralı bacak tasarımının kullanımında karşılaşılmış olan problem bilek eklemini kalça eklemine bağlayan akrilik parçada esneme olmasıdır. Bunu önlemek amacıyla “3” numaralı bacak modelinde eyleyicinin kalça eklemine daha aşağıda bulunan bir noktadan bağlanması sağlanmıştır. Bunun sonucunda nitinol eyleyici kullanılan bacak yapısında “3” numaralı model nihai olarak kullanılmıştır.

Bacak tasarımlarında benimsenmiş olan bir diğer yaklaşım ise bacakların bir eyleyici kullanılmadan hareket fonksiyonunu sağlamasıdır. Teorik olarak robotun yürüyebilmesi için ileri konumdan geri konuma gelen bacaklar hareketi yere aktarırken geri konumdan ileri konuma gelen bacakların hareketi yere aktarmaması gerekmektedir. Bunu sağlamak için önceki bacak tasarımında hareketi aktarmaması gereken bacakların yerden kaldırılması için nitinol eyleyici kullanılmıştır. Bacak tasarımındaki bu diğer yaklaşımda ise daha basit bir tasarım şekliyle bacakların yere hareket aktarımının eyleyici kullanılmadan kontrol edilebilmesi planlanmıştır.

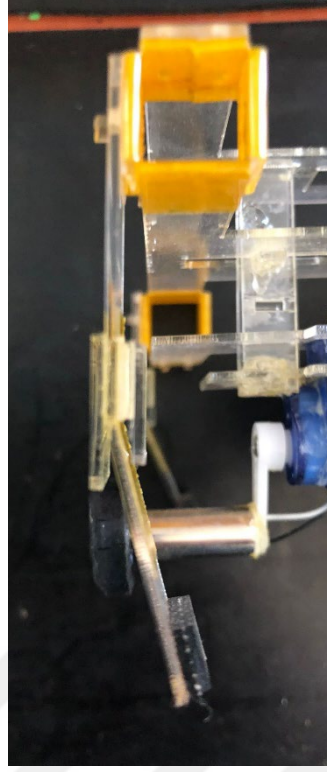
Bu çalışmada tasarlanmış olan robotun özgünlüğüne katkı veren eyleyicisiz bacak yapısında insanlarda bulunan diz eklemlerinden esinlenilmiştir. İnsanlarda bulunan diz eklemının birincil görevi kalça ekleminden tahriklenen yürüme hareketinde yürümeye katkı veren ayağın yer ile temasını sağlarken diğer ayağın yerden kaldırılmasını sağlamaktır. Bu kapsamda tasarlanan diz ekleminde robotun ileri hareketini tahrikleyen bacak yer ile temas ederken diğer bacak bir eyleyici kullanmaksızın hareket esnasında diz ekleminden bükülmektedir. Daha sonra tekrar yer ile temas etmesi yine bacağın hareketi esnasında maruz kaldığı kuvvet sayesinde sağlanmaktadır. Şekil 2.10’da robotun ileri yönlü hareketinin bu tasarımla sağlanma sistemi şematik olarak gösterilmiştir. Bu tasarımda göz önünde bulundurulmuş bir problem, bacağın gereğinden fazla bükülmesi durumunda, maruz kaldığı doğal kuvvet yardımıyla tekrar düz konuma gelememesi durumudur. Bu problemin önlenmesi noktasında bacağı arka diz kapağı eklenerek bükülmesi belirli bir noktada limitlenmiştir.



Şekil 2.10. Ön ve arka diz kapağı ile tasarlanmış bacaklarda yürüme mekanizmasının şematik gösterimi.

Bacak tasarımında bulunan ön diz kapağı sayesinde ileri konumdan geri konuma giden bacakta hareketin yere aktarılması esnasında maruz kaldığı kuvvetler kapton malzemesi yerine mekanik olarak diz kapağı ile absorbe edilmektedir. Bu diz kapağı üst bacak kısmına yapışık durumdayken alt bacakla bir bağlantısı bulunmamaktadır. Bunun sayesinde diz eklemine bir yönde kilit görevi üstlenirken diğer yönde bükülmesini engellemektedir. Bu durum hem diz eklemine uzun ömürlü olmasını sağlamakta, hem de hareketin tamamıyla yere aktarılmasına katkı vermektedir.

Robotun ileri yönlü hareketine katkı vermesi için kullanılan bir başka yöntem de ayakların arka yüzeyine kauçuk malzeme eklenmesidir. Bu yöntem sayesinde ayaklar ileri konumdan geri konuma gelirken yere daha iyi tutunmakta ve bacağın hareket yönündeki yüzeyi akrilik olan yer ile temas etmemesi gereken bacaklara göre daha fazla hareket aktarımı sağlamaktadır. Kauçuk malzeme eklenmiş bacak yapısı Resim 2.21’de görülmektedir.

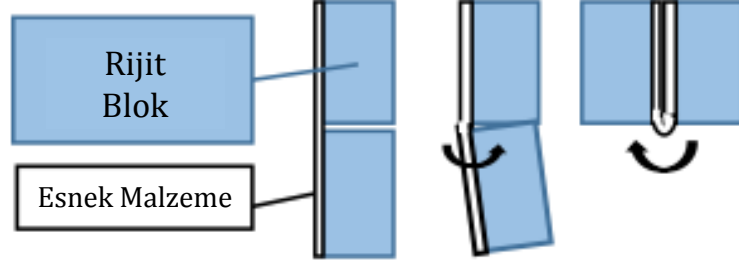


Resim 2.16. Ön ve arka diz kapağına ve kauçuk ayak yapısına sahip bacak yapısı.

Eyleyici kullanmadan bacakların açılıp kapanmasının hedeflendiği bu bacak tasarımı yaklaşımında yapılan denemelerde karşılaşılan temel problem bacakların bükülme mekanizmasının sağlanabilmesine rağmen tekrar açık konuma gelmelerinin kontrol edilebilir olmamasıdır. Bu durumda bacakların bükülme mekanizması bacak hareketi ile ilişkilendirilebilirken düzleşme mekanizmasının öngörülebilir olmadığı, yürüme esnasında düzleşemeyen bacaklar nedeni ile yürümenin stabil bir şekilde sağlanamadığı görülmüştür. Bunun sonucunda bu probleme çözüm üretmek için bacak tasarımı revize edilmiştir.

Bacak yapısında bahsedilen revizyonda Lee ve arkadaşlarının çalışmasında geliştirdikleri bacak yapısından esinlenilmiştir (J. Lee vd., 2020). İlgili çalışmada geliştirilen robotun bacak yapısının bu tez çalışmasında önerilen ve Şekil 2.10'da verilmiş olan yapı ile benzer noktaları bulunmaktadır. İlgili çalışmada, bu çalışmadan farklı olarak robotun ileri hareketini sağlayan bacakların kilitlenmesi mekanizmasında bir diz kapağı yapısı bulunmazken bu kilitlenmeyi bacakların kalınlığını yüksek tutarak sağlamaya çalışılmıştır. Bu tez çalışmasında geliştirilen son bacak yapısına ilham verecek şekilde Lee ve arkadaşları tarafından kullanılan başka bir yöntem de bacakların büküldükten sonra tekrar düz konuma gelebilmesi için kullanılan malzemedir. Şekil 2.11'de verilmiş olan bacak yapısında bacakların bağlantısı için esnek bir malzeme kullanılmıştır. Bu esnek malzeme sayesinde bacağın eski konumuna dönebildiği belirtilmiştir. Ancak bu çalışmada yapılan testler neticesinde bacaklara lamine olarak yapıştırılan esnek malzemenin bacakların yapısını tamamen düz konuma getirilmesinde

yeterli olmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle bacak eklemine bu çalışmada önerilmiş olan diz kapağı yapısının kullanımının bu fonksiyonun yerine getirilmesi için gerekli olduğu görülmüştür.



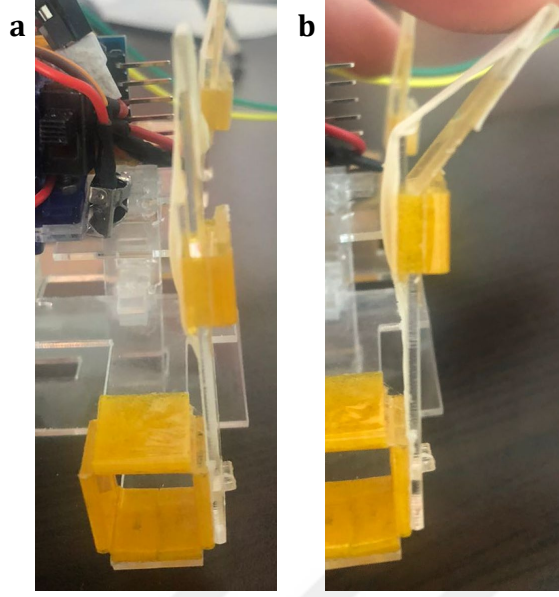
Şekil 2.11. Lee ve arkadaşlarının kullandığı bükülebilen bacak modeli (J. Lee vd., 2020).

Önceki tasarımda yürüyüş esnasında karşılaşılan temel problemin bacakların bükülmesinden sonra tekrar düzleşmesinin sağlanamaması olduğu görülmüştür. Bu sorunun çözümü için yine insanlardaki diz eklemi yapısından esinlenilmiştir. Daha önce bahsedildiği üzere robotun diz yapısı mekanik olarak insanlardaki diz ekleminden esinlenilerek tasarlanmıştır. Buna ek olarak insanlarda diz eklemi tahriki üst baldır kaslarına bağlı olan çapraz bağlar yardımıyla sağlanmaktadır. Bu çalışmada tasarlanan robotta diz eklemine bükülmesi için bir eyleyici kullanılmadığı için bir tahrik mekanizması bulunmamaktadır. Ancak bacağın doğal salınım hareketi esnasında bükülen bacağın tekrar doğal düz konumuna gelmesi için çapraz bağlara benzer yapıda yapay bir tendon yapısı tasarıma entegre edilmiştir. Lateks malzemeden oluşan bu tendon yapısı sayesinde bacaklar büküldükten sonra ön konuma geldiklerinde tekrar düz şekle dönebilmektedirler.



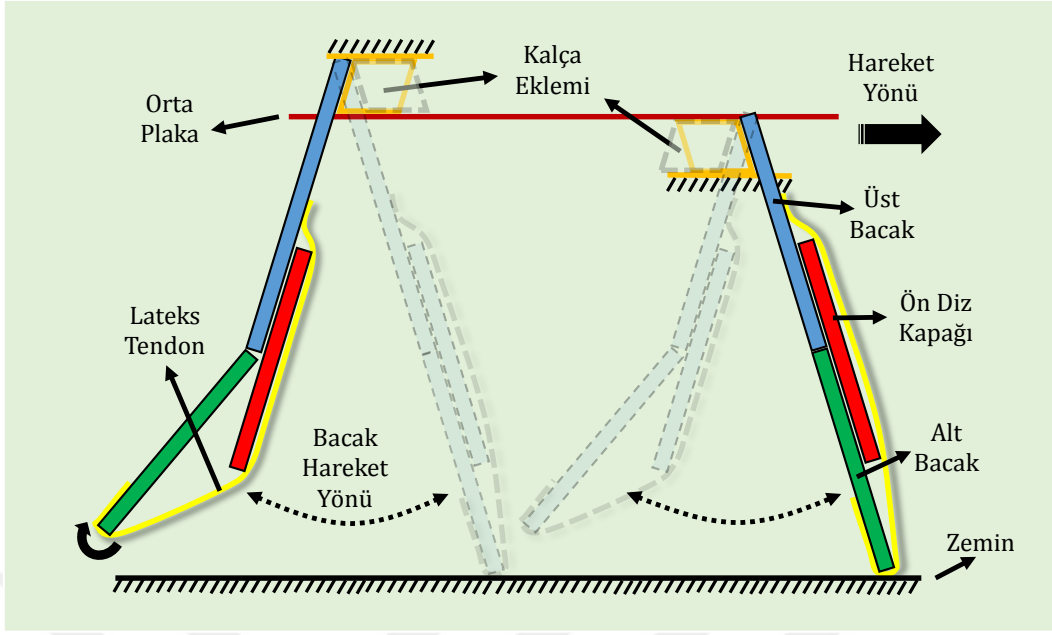
Resim 2.17. Lateks malzeme kullanılarak üretilmiş olan tendon yapısı.

Resim 2.17’de lateks malzeme kullanılarak üretilmiş tendon yapısı görülmektedir. Lateks malzemenin lamine olacak şekilde kesilmesi sonucunda elde edilen parçalar öncelikle tendonların uzunluğuna denk gelecek şekilde kesilmiştir. Daha sonra malzemenin üst ve alt kısmına 3M çift taraflı bant yapıştırılmıştır. Bu aşamadan sonra iki parça halinde oluşturulmuş olan lamine parçalar üst üste çift taraflı bant yardımıyla yapıştırılmıştır. Bunun nedeni üretilen tendonun önceki denemelerde tek kat olduğunda daha kolay kopmasının gözlemlenmesidir. İki katlı laminasyon sonucunda üretilen tendon malzemesi üzerine bir kat daha çift taraflı bant yapıştırılmıştır. Bunun sonucunda tendonun bacaklara yapışması sağlanmıştır. Tendon ile ön ve arka diz kapaklarını içeren bacak yapısı Resim 2.18’de gösterilmiştir.



Resim 2.18. Lateks tendon ve diz ekleminden oluşan bacak yapısı: a) düz konum, b) bükülmüş konum.

Lateks tendonla oluşturulmuş olan diz eklemine arka diz kapağının işlevselliği de incelenmiştir. Arka diz kapağı yapısının görevi bacakların diz ekleminden bükülmesi sırasında gereğinden fazla bükülmesini engellemektir. Bu sayede bacağın tekrar düz konuma gelmesinin kolaylaşması hedeflenmiştir. Ancak tendonlu bacak yapısında bacağın düz konuma gelmesini tendon sağlamaktadır. Ayrıca tendonda bacak büküldükçe artan gerilme kuvveti sayesinde bacaklar gereğinden fazla bükülmemektedirler. Bu nedenle tendonlu bacak yapısında arka diz kapağının bulunmasına gerek olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Bunun yanında tendon malzemesinin bacağın yer ile temas eden noktalarına sarılarak bağlanmış olması, yer ile bacaklar arasında oluşması gereken sürtünme kuvvetine de katkı vermektedir. Bu nedenle önceki bacak tasarımında kullanılan kauçuk malzemedan oluşan ayak yapısının bu tasarımda kullanılmasına gerek duyulmamıştır. Geliştirilen bu bacak tasarımına göre robotun yürüme mekanizması Şekil 2.12'de gösterildiği gibi oluşturulmuştur. Önceki bacak versiyonuna benzerlik gösteren bu yürüme mekanizmasında bacağın açılması aynı prensipte gerçekleştirilirken kapanma mekanizması yumuşak tendon yapısı sayesinde sağlanmaktadır.



Şekil 2.12. Ön diz kapağı ve lateks tendon kullanımı ile oluşturulan yürüme mekanizmasının şematik gösterimi.

Bu tez çalışmasında geliştirilen bacak tasarımlarında son olarak ortaya konulmuş olan lateks tendonlu özgün bacak tasarımıyla SCM tekniği ile yumuşak robotlar hibrit bir şekilde üretilebilmiştir.

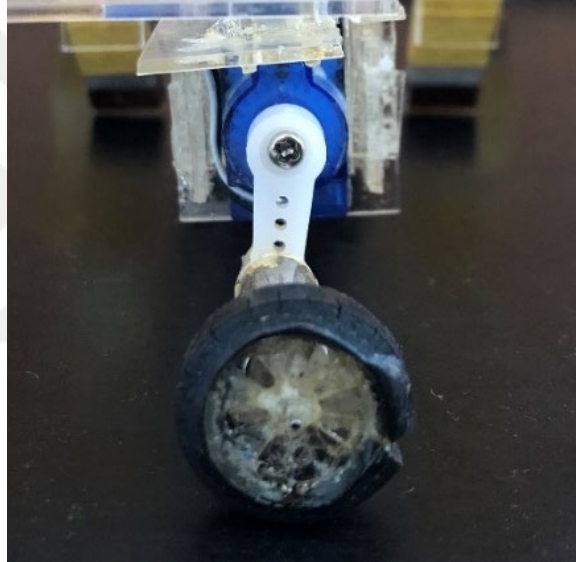
2.4. Robot Tasarımlarında Kullanılan Dönme Mekanizmaları

Bu tez çalışmasında ortaya konulmuş olan mini robot modellerinin ileri hareketlerinin yanında dönme hareketi de yapabiliyor olmaları hedeflenmiştir. Bunun en önemli nedeni özellikle keşif görevlerinde kullanılacak olan mini robotun kendisine verilecek yol görevini yerine getirmesini sağlama gerekliliğidir.

Bu çalışmada robot tasarımında kullanılan bacak yapısı yaklaşımlarına göre şekillenmiş dönme hareketi mekanizmaları tasarlanmıştır. Buna göre nitinol eyleyici kullanımı ile bacakların yer ile temasının aktif olarak kontrol edildiği bacak yapısında dönme işlemi için fazladan bir eyleyici kullanmak yerine bu işlemin yazılımsal olarak sağlanması hedeflenmiştir. Nitinol eyleyicili bacak yapısına sahip robotun dönme işlemi için bacakların harekete katkı verdiği hareket fazları kontrol edilmiştir. Buna göre robotun bir yöne dönmesi gerektiğinde dönüş yönüne ters tarafta bulunan ve harekete ters yönde katkı veren geri konumdan ileri konuma geçmekte olan bacakların yer ile temas etmesi sağlanmıştır. Bu şekilde robotun dönüş hareketi yapabilmesi hedeflenmiştir. Bu dönme mekanizması paletli hareket eden kara araçlarının dönme mekanizmaları ile ilişkilendirilebilir.

Bacakların bükülmesinin bir eyleyici ile sağlanmadığı diğer bacak tasarımlarında dönme işlemi ilave bir eyleyici kullanımı gerekmektedir. Bu durumda iki farklı dönme mekanizması üzerinde çalışma yapılmıştır. Bu iki mekanizma da robotun ön tarafına yerleştirilmiş bir eyleyicinin yer ile temas ederek robotun ön bacaklarının yer ile temasını kesmesi ve robotun arka bacaklarını mesnet olarak kullanarak dönüş yapma prensibine dayanmaktadır.

Yapılan ilk tasarımda Resim 2.19'da gösterildiği şekilde robotun ön tarafına yerleştirilmiş bir servo motor yardımıyla bu motora monte edilmiş bir DC motorun yer ile teması sağlanmaktadır. DC motora bağlı olan tekerlek yapısı yer ile temas ettiğinde robotun istenilen yöne doğru dönmesini sağlamaktadır. Robotun dönme işlemi tamamlandığında servo motor tekrardan tekerleğin yerden kalkmasını sağlayarak robotun ön bacaklarının yere basmasını sağlamaktadır.



Resim 2.19. Servo motora bağlı DC motor kullanarak oluşturulan dönme mekanizması.

Robotun dönme mekanizmasında kullanılan diğer yaklaşımda ise DC motorun kullanımına gerek duymadan direkt olarak servo motorun hareketi ile dönmenin sağlanması hedeflenmiştir. Bunun için klasik servo yerine sürekli servo kullanımının dönme işlemi için yeterli olacağı görülmektedir. Bu durumda kullanılan servo, klasik servodan farklı olarak verilen giriş değerlerinde belirli hızlarda ve belirli bir yönde sürekli dönebilmektedir. Bu yaklaşımda DC motor kullanılan dönme mekanizmasına göre karşılaşılabilecek bir dezavantaj dönme şaftının yer ile temas etme mekanizmasının kontrol edilemeyecek olmasıdır. Buna rağmen bu kullanımın getirdiği avantajlar da bulunmaktadır. Öncelikle robotun kontrolü için basit bir mikrodenetleyici kullanıldığı göz önünde bulundurulursa DC motoru sürmek için fazladan bir sürücü devre eklemesinin yapılması gerekmektedir. Bununla birlikte dönme

işlemi için hali hazırda bir servo motor kullanılırken DC motorun da kullanımı ile toplamda iki adet eyleyici kullanılmış olacaktır. Bu da ileri hareket için tek bir eyleyici kullanılan robot tasarımının toplamda üç adet eyleyici ile kontrol edilmesine neden olmaktadır. Bu durum hem enerji tüketimi, hem de ağırlık ve boyut açısından dezavantajlı olmaktadır.

Dönme işlemini gerçekleştirmesi için servo motorun dönme şaftına monte edilmek üzere bir dönme aparatı tasarlanıp 3D yazıcı ile üretilmiştir. Bu dönme aparatının robotun dönmesini sağlayacak servo motorun şaftına montajlanmış hali Resim 2.20'de gösterilmiştir.



Resim 2.20. Sürekli dönebilen servo motor kullanımı ile oluşturulan dönme mekanizması.

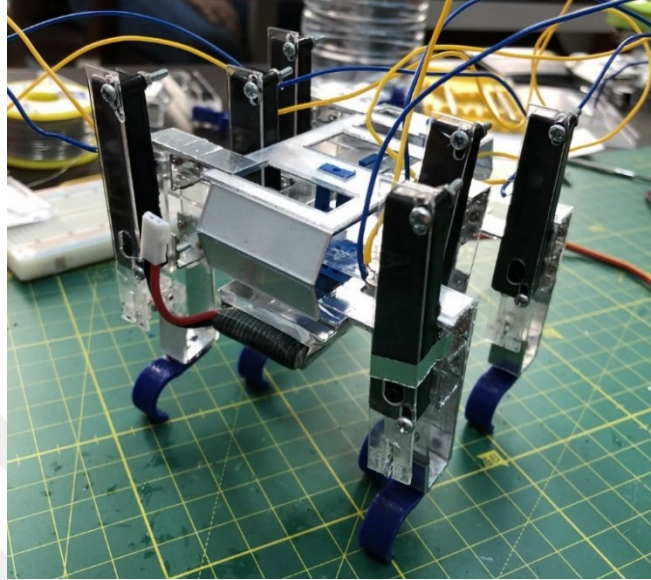
Robotun dönme işlemini gerçekleştirebilmesi için dönme aparatı iki kollu olarak tasarlanmıştır. Bu sayede dönme motoru çalıştığında her turda iki kez yer ile temas sağlanarak robotun dönme işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Motor şaftına monte edilecek şekilde bir dönme aparatı tasarlanmasının temel amacı da dönme esnasında mekanizmanın bacak boylarını da dikkate alarak yer ile temas edebilmesini sağlamaktır.

2.5. Geliştirilen Mini Robot Modelleri

Bu tez çalışmasında ortaya konulmuş dış iskelet üretimleri, hareket mekanizmaları, bacak ve dönme mekanizmaları SCM tekniğinin mini robot üretiminde uygulanmasında iteratif bir şekilde geliştirilerek ortaya konulmuştur. Bu nedenle robotun bileşenlerinin iteratif tasarım ve üretim serüveninde farklı aşamalardaki tasarımlar kullanılarak farklı mini robotlar oluşturulmuş ve test edilmiştir. Bunlardan değişik tasarımsal bileşenlere sahip olup yürüme fonksiyonunu yerine getirebilen üç tipik robot modeli aşağıda tartışılmıştır.

Bu örneklerden ilki nitinol eyleyici ile bacakların yerden kaldırılmasının hedeflendiği altı bacaklı modeldir. Bu robotta dış iskelet üretiminde esnek malzeme olarak sekiz kat alüminyum bant kullanılmıştır. Bununla birlikte hareket mekanizması da 3D yazıcı ile üretilmiş olan krank biyel sisteminden oluşmaktadır. Bacak yapısı nitinol eyleyici ile bükülebilen bilek ekleminde

oluştugu için dönme mekanizması olarak da fazladan bir eyleyici kullanımına başvurulmamıştır.

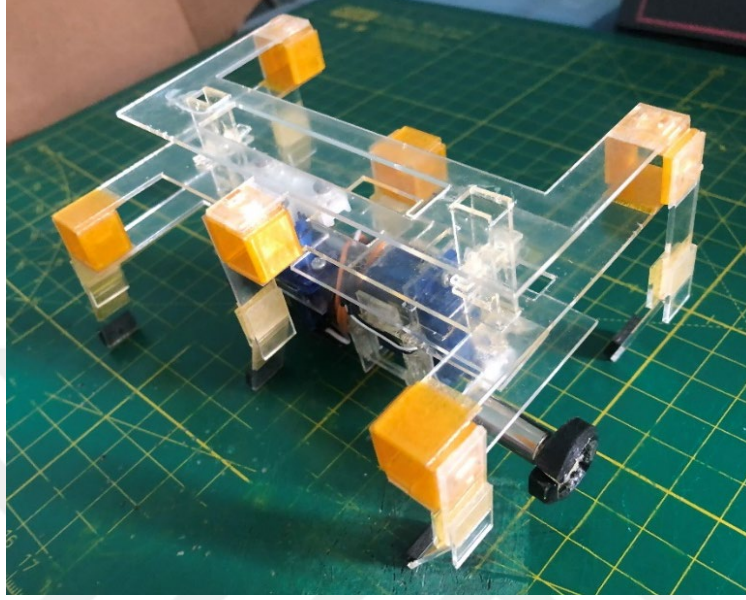


Resim 2.21. Nitinol eyleyicili bacak yapısına sahip, krank biyel sistemi ile tahrik edilen ve dış iskelet yapısında sekiz kat alüminyum bant bulunan altı bacaklı mini robot modeli.

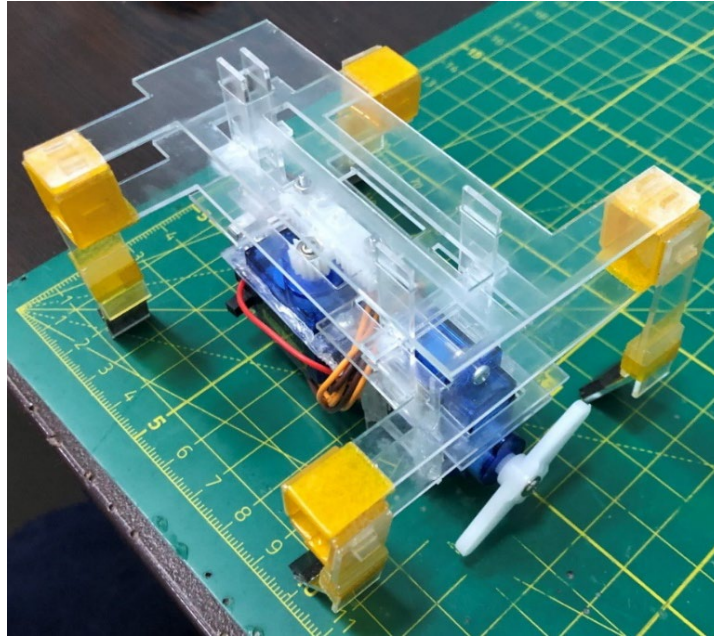
Resim 2.21’de prototipi görülen nitinol eyleyicili bilek eklemli altı bacaklı mini robot modeli daha önceki bölümlerde bahsedilen tasarımsal problemlerin büyük bir çoğunluğunun gözlemlendiği ve nihai tasarımın revizyonlarla ortaya konulmasına temel oluşturan modeldir. Bu model ile her ne kadar yürüme fonksiyonu sağlanmış olsa da gerek yürüme hızı, gerekse de stabilite ve dayanıklılık konusunda hedeflenen performans ölçütlerini sağlayamadığı görülmüştür. Yapılan ilk testlerde bu robotun yaklaşık 2 mm/s hızda ilerleyebildiği, dönme işlemini gerçekleştiremediği ve engel aşamadığı görülmüştür. Bu bağlamda, bu modelle ilgili detaylı hareket testleri sonraki bölümlerde sunulmamıştır.

Tasarlanıp üretimi yapılan robot örneklerinden diğer ikisi doğadan esinlenerek ortaya çıkarılan diz eklemine sahip modellerdir. Bu modellerden bir tanesi altı bacaklı, diğeri ise dört bacaklı robot modelidir. Tasarımsal olarak benzer bileşenlere sahip olan bu iki robot arasındaki başlıca fark bacak sayısı ve buna bağlı tasarım yapısıdır. Bu robot modellerinin ikisinde de hareket mekanizması olarak dişli kremayer sistemi kullanılmıştır. Yine benzer şekilde bu modellerin dış iskelet yapıları da kapton malzemesinin kullanımı ile oluşturulmuştur. Öte yandan bu iki modelde kullanılan dönme mekanizmaları farklıdır. Altı bacaklı modelde DC motor ile oluşturulan dönme mekanizması kullanılırken dört bacaklı modelde sürekli dönebilen servo motor kullanılmıştır. Bu robot modellerinin karşılaştırmalı testlerinin tutarlı olabilmesi için iki modelde de ön ve arka diz kapağına sahip diz eklemli ve

kauçuk ayaklı bacaklar kullanılmışken daha sonra dört bacaklı modelde lateks malzeme ile oluşturulan tendon yapısı kullanılmıştır. Aynı diz eklemine sahip altı ve dört bacaklı modeller sırasıyla Resim 2.22 ve Resim 2.23'te gösterilmiştir.

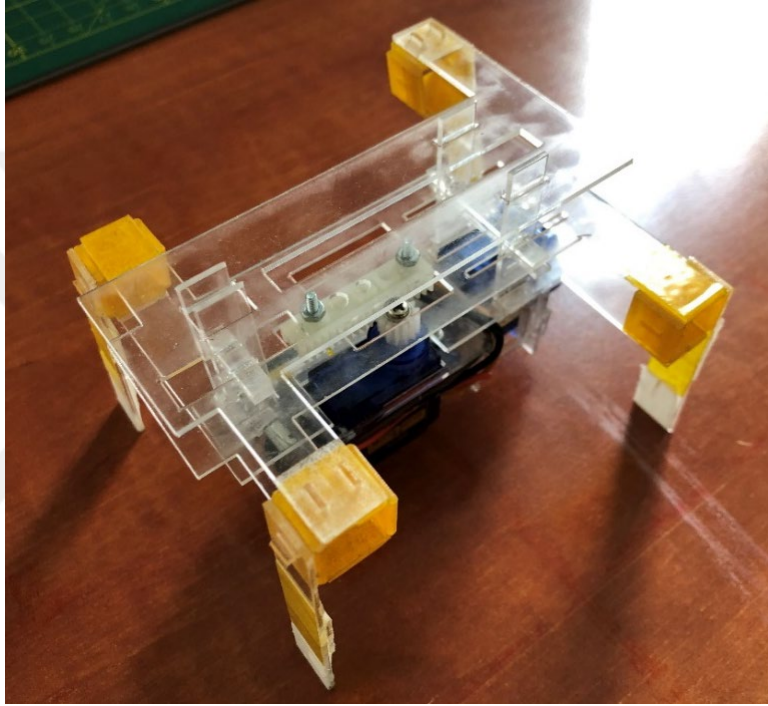


Resim 2.22. Diz eklemlili bacak yapısına sahip, dişli kremayer sistemi ile tahrik edilen ve dış iskelet yapısında kapton malzemesi bulunan altı bacaklı mini robot modeli.



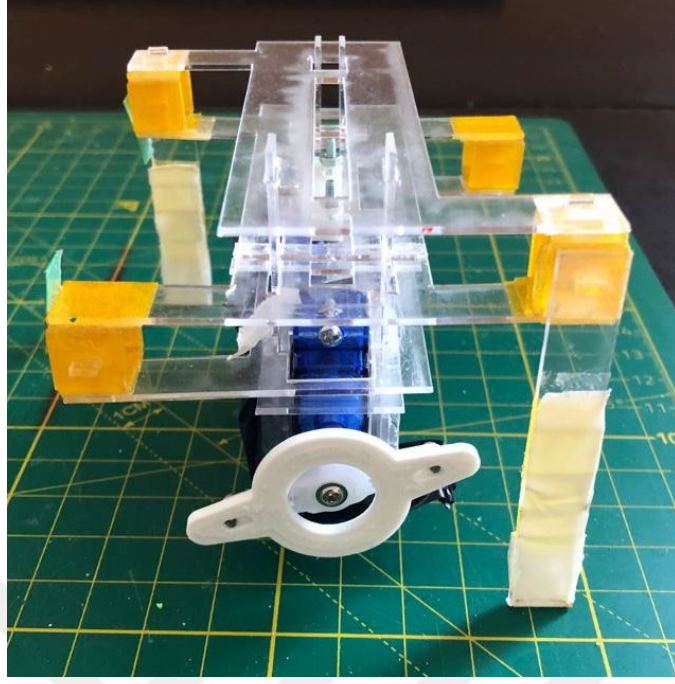
Resim 2.23. Diz eklemlili bacak yapısına sahip, dişli kremayer sistemi ile tahrik edilen ve dış iskelet yapısında kapton malzemesi bulunan dört bacaklı mini robot modeli.

Robotun dört bacaklı modelinde Şekil 2.1'de görülen alternatif tripod yürüyüşünün ortadan kalktığı görülmektedir. Ancak göz önünde bulundurulması gereken bir konu da özgün olarak ortaya konulmuş olan diz eklemi yapısı sayesinde bacakların hareket esnasında yerden tamamen kaldırılmıyor olmasıdır. Bu nedenle bu tasarımda tüm bacaklar robotun ayakta durmasına katkı verir pozisyonda bulunmaktadır ve hareket esnasında devamlı yere basan bir tripod yapısına ihtiyaç kalmamaktadır.



Resim 2.24. Lateks tendon yapısına sahip dört bacaklı robot modeli.

Yapılan yürüme testlerinin sonuçlarına göre lateks tendon yapısının robotun yürüme performansını ciddi ölçüde artırdığı görülmüştür. Bu nedenle dört bacaklı modelin son prototipinde lateks tendon yapısına sahip diz eklemi kullanılmıştır. Resim 2.24'te prototipi görülmekte olan bu robot modelinin iki bacak üzerinde ayakta durabilecek şekilde dengeli olduğu da yine Resim 2.25'te verilmiş olan görselde görülebilmektedir.



Resim 2.25. Lateks tendon yapısına sahip dört bacaklı robot modelinin iki bacak üzerinde ayakta duruşu.

Geliştirilmiş olan dört ve altı bacaklı diz eklemlili robot modellerinin boyutları EK-1'de gösterilmiştir.

3. BÖLÜM


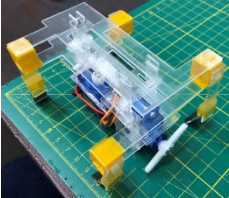
DİZ EKLEMLİ MİNİ ROBOTLARIN HAREKET TESTLERİ VE ÖN BULGULAR

Tez çalışmasının bu bölümünde önceki bölümde tasarım ve üretim aşamaları tartışılmış olan ve başarılı bir şekilde yürümesi sağlanan iki robot modelinin ön yürüme test sonuçlarına yer verilmiştir. Bu iki model doğadan esinlenerek oluşturulan diz eklemi yapısına sahip dört ve altı bacaklı modellerdir. Bu bölümde sunulan yürüme testlerinde dört ve altı bacaklı modellerin aynı bacak yapısında karşılaştırması yapılmış ve önceki bulgular da dikkate alınarak nihai model belirlenmiştir.

3.1. Robotların Boyut ve Ağırlık Analizi

Yürüme testlerinin sonuçlarına geçmeden önce yürümesi sağlanan bu iki robot modelinin boyut ve ağırlıkları karşılaştırılmıştır. Tablo 3.1 incelendiğinde iki robotun da mini robot olarak sınıflandırılabilceği görülürken altı bacaklı versiyonun dört bacaklı versiyondan yaklaşık %26 daha uzun, %7 daha yüksek ve %16 daha ağır olduğu görülmektedir.

Tablo 3.1. Diz eklemine sahip altı ve dört bacaklı robot modellerinin boyut ve ağırlıkları.

Robot Modeli	Boy [mm]	En [mm]	Yükseklik [mm]	Ağırlık [g]
 Diz eklemli ve 6 bacaklı	110	78	61.3	70.84
 Diz eklemli ve 4 bacaklı	87.5	78	57.3	61.04

Minyatür robotlarda ağırlık önemli kriterlerden biridir. Ağırlık arttıkça robotun hareket kabiliyeti azalmakta ve buna bağlı olarak harcanan enerji miktarı artmaktadır. Buna ek olarak,

minyatür robotlarda yürüme mekanizmasını oluşturan elemanların (eklem ve bacaklar gibi) mekanik dayanımları düşüktür. Bu bağlamda robot ağırlığının artmasıyla bu bölgelerde çalışma periyotları sürecinde daha erken aşamalarda lokal hasarlar meydana gelebilmektedir.

Bu çalışmada tasarlanan ve üretilen minyatür robotun bahsedilen iki modeli için de bileşenlerinin ağırlıklarını gösteren bilgiler Tablo 3.2’de verilmiştir. Bu değerler ağırlık optimizasyonu için önem taşımaktadır. Örneğin yüksek kapasiteli bir batarya daha uzun dayanacağından tercih edilebilir. Ancak daha yüksek ağırlığa sahip olacağı için tercih edilmemektedir.

Tablo 3.2. Robot bileşenlerinin ağırlık verileri.

Robot Bileşeni	Ağırlık [g]
410 mAh batarya	9.6275
Arduino Pro Mini	2.3739
Mini servo	10.2324
Dönme motor şaftı	0.3219
Dişli	0.1515
Krameyer	0.65
Montaj civatası (6 parça için)	2.7876
Dönme motor ek parça (3D yazıcı üretimi)	1.094
Akrilik plaka (1 mm ² için)	1.3175 x 10 ⁻³
Mini DC motor (6 bacaklı versiyon)	2.9478

Robotun altı bacaklı modelinin üretiminde kullanılan akrilik plakaların tamamı 20284.31 mm² alana sahiptir. Tablodan bakıldığında bu yüzey alanı toplam 26.725 g ağırlığa denk gelmektedir. Robotun bu altı bacaklı modelinde dış iskelette kullanılan akrilik plaka dışında 1 adet 410 mAh batarya, 1 adet Arduino Pro Mini, 2 adet mini servo, 1 adet dönme motor şaftı, 1 adet dişli ve krameyer, 6 adet montaj civatası ve 1 adet mini DC motor bulunmaktadır. Bu durumda akrilik plaka dışındaki diğer bileşenlerin toplam ağırlığının 39.325 g ağırlığa sahip olduğu düşünülürse geriye 4.79 g değerinde bir ağırlık miktarı kalmaktadır. Bu miktar da kablo, yapıştırıcı, devre elemanları vb. bileşenlerin ağırlığını oluşturmaktadır.

Robotun dört bacaklı modelinin üretiminde kullanılan akrilik plakaların tamamı ise 15656.1 mm² alana sahiptir. Bu yüzey alanı toplam 20.627 g ağırlığa denk gelmektedir. Bu versiyonda akrilik plaka haricinde 1 adet 410 mAh batarya, 1 adet Arduino Pro Mini, 2 adet mini servo, 1 adet dönme motor şaftı, 1 adet dişli ve krameyer, 6 adet montaj civatası ve 1 adet dönme

motoru için üretilen ek parça bulunmaktadır. Buna göre robotun bu modelinde akrilik plaka dışındaki diğer bileşenlerin toplam ağırlığı 37.4712 g 'dır. Geriye kalan 2.94 g ağırlığı ise kablolar, yapıştırıcı, devre elemanları vb. bileşenlerin oluşturmaktadır.

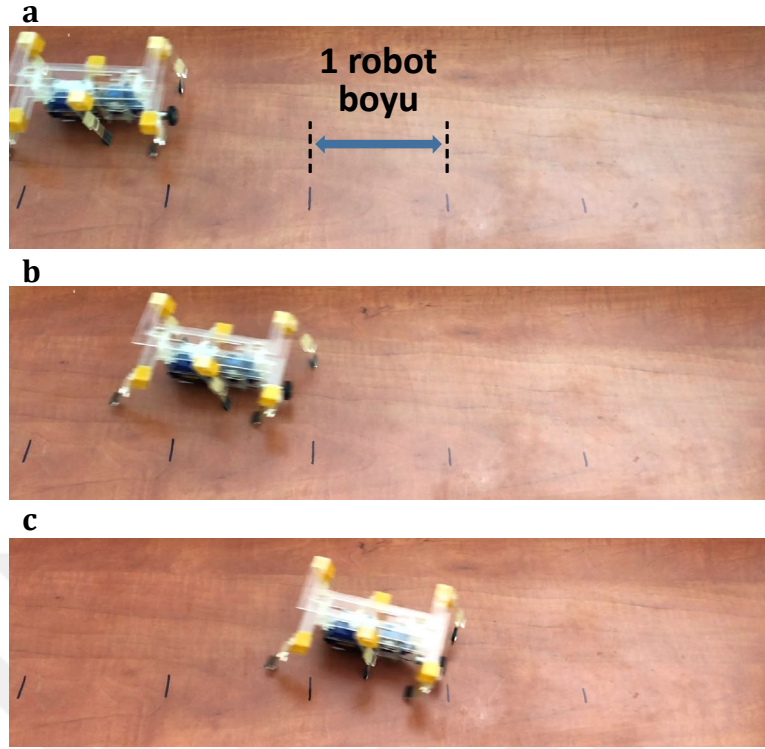
3.2. Altı Bacaklı Robot Modelinin Hareket Testleri ve Ön Bulgular

Tasarlanıp üretimi tamamlanan altı bacaklı robotun yürüme performansını incelemek ve dört bacaklı modelle karşılaştırmak amacıyla yürüme ve dönme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu karşılaştırmanın amacı robotun ileri testlerini gerçekleştirmek için nihai modelin hangisi olduğuna karar verebilmektir. Bu nedenle robota giriş hızı olarak iki versiyonun testlerinde de aynı değerler uygulanmıştır. Böylelikle iki modelin hareket performansları tutarlı bir şekilde karşılaştırılabilmektedir.

Robotun yürüme testi için cilalı ahşap (mobilya) yüzey tercih edilmiştir. Test düzeneği için sabit bir kamera kullanılmıştır. Sabit açığa yerleştirilen kamera ile çekilmiş olan robot yürüme videosu yardımıyla hareket analizi gerçekleştirilmiştir. Bu videoların çekimi sırasında robotun yürütüldüğü yüzeye robot boyunu gösterecek şekilde aralıklarla işaretler konulmuştur.

İlk olarak robotun yüzeyde ilerleme hızını tespit etmek amacıyla yürüme deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde robotun hangi zaman aralığında kaç boy ilerleyebildiği tespit edilmiştir. Resim 3.1'de görüldüğü gibi robotun yaklaşık 13 saniye sürede yaklaşık olarak 2 boy ilerleyebildiği görülmektedir.

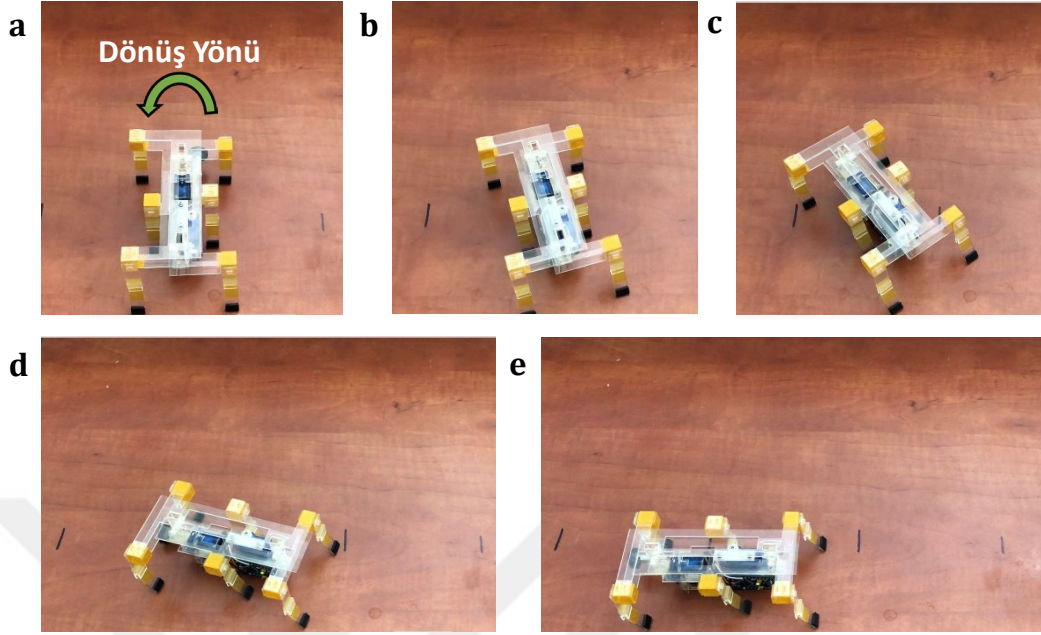
Yapılan testlerin ortalamaları alındığında robotun verilen giriş değerine göre yürüme hızı 0.17 boy/s olarak elde edilmiştir. Robotun bu versiyonunun boyunun 110 mm olduğu göz önünde bulundurularak robotun ortalama hızı 18.7 mm/s olarak hesaplanmıştır. Literatürde önerilen minyatür robotların yürüme hızı performanslarıyla karşılaştırıldığında elde edilen hız değerinin düşük seviyede olduğu görülmektedir (bkz. Tablo 3.3).



Resim 3.1. Altı bacaklı model basit yürüme testi: a) $t = 0$ sn, b) $t = 3$ sn ve c) $t = 13$ sn.

Yürüme testinin yanında robotun dönme mekanizması da test edilmiştir. Bu test için yine cilalı ahşap yüzeyde dönme işlemi gerçekleştirilen robot için sabit bir kamera ile video çekimi yapılmış ve ne kadar sürede kaç derece dönebildiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte robotun dönmesinin sabit noktada dairesel olup olmadığı da incelenmiştir.

Resim 3.2’de robotun altı bacaklı versiyonunun dönme testinden kesitler gösterilmiştir. Deneylerin sonuçlarına göre robot 90° dönme hareketini yaklaşık olarak 25 saniye gibi uzun bir sürede gerçekleştirmektedir. Bu yavaşlığın temel nedeni elektronik limitlerdir. Bu robot modelinin dönme mekanizması için önceki bölümde tartışıldığı gibi bir mini DC motor kullanılmaktadır. Testleri gerçekleştirilen bu modelde DC motor için ayrı bir sürücü devresi kullanılmamıştır. Çalışma akım değerleri minimum 300 mA olan DC motorun doğrudan kullanılan mikrodenetleyici ile sürülmesi hedeflenmiştir. Kullanılan mikrodenetleyici olan Arduino Pro Mini sahip olduğu her pin için 40 mA çıkış akımı değerine sahiptir. Bu nedenle DC motorun tek bir pinden sürülmesi mümkün olmamaktadır. Motorun minimum çalışma değerini sağlamak için mikrodenetleyicinin 8 adet çıkış pini birbirine paralel olarak bağlanmıştır. Bunun sonucunda DC motorun mikrodenetleyici ile doğrudan sürülmesi sağlanmıştır. Ancak minimum çalışma değeri olan 300 mA akım değeri, motorun robotu döndürmeye yetecek miktarda tork üretmesi için yetersiz kalmaktadır. Bunu sağlamak için daha yüksek akım değerlerinin elde edilmesi gerekmektedir.



Resim 3.2. Altı bacaklı model dönme testi: a) $t = 0$ sn, b) $t = 4$ sn, c) $t = 11$ sn, d) $t = 21$ sn ve e) $t = 25$ sn.

DC motorun tork değerinin yetersiz kalması nedeniyle bu robot modelinin önünde bulunan dönme mekanizması yer ile temas ettiğinde motor dönüş sağlayamamıştır. Bu durumda dönme işleminin sağlanması için DC motor havada iken çalıştırılmış ve yere daha sonra temas ettirilmiştir. Ancak yer ile temas ettiği anda robota bir miktar dönme sağlayabilse de daha sonra yine durmaktadır. Bu durumu kompanse etmek için de dönme işleminde robot istenilen pozisyona gelene kadar DC motorun yerden defalarca kalkıp inmesi gerekmektedir. Robotun kontrol algoritması dönme işlemi için bahsedilen işlemi gerçekleştirecek şekilde düzenlenmiştir. Bu kontrol algoritması da dönme işleminin yavaş olmasına neden olmaktadır. Buna ek olarak bu durum DC motorun yer ile temasını kontrol eden mini servo motorun gereksiz yere çok fazla çalışmasına neden olduğu için daha fazla enerji tüketimine yol açmaktadır.

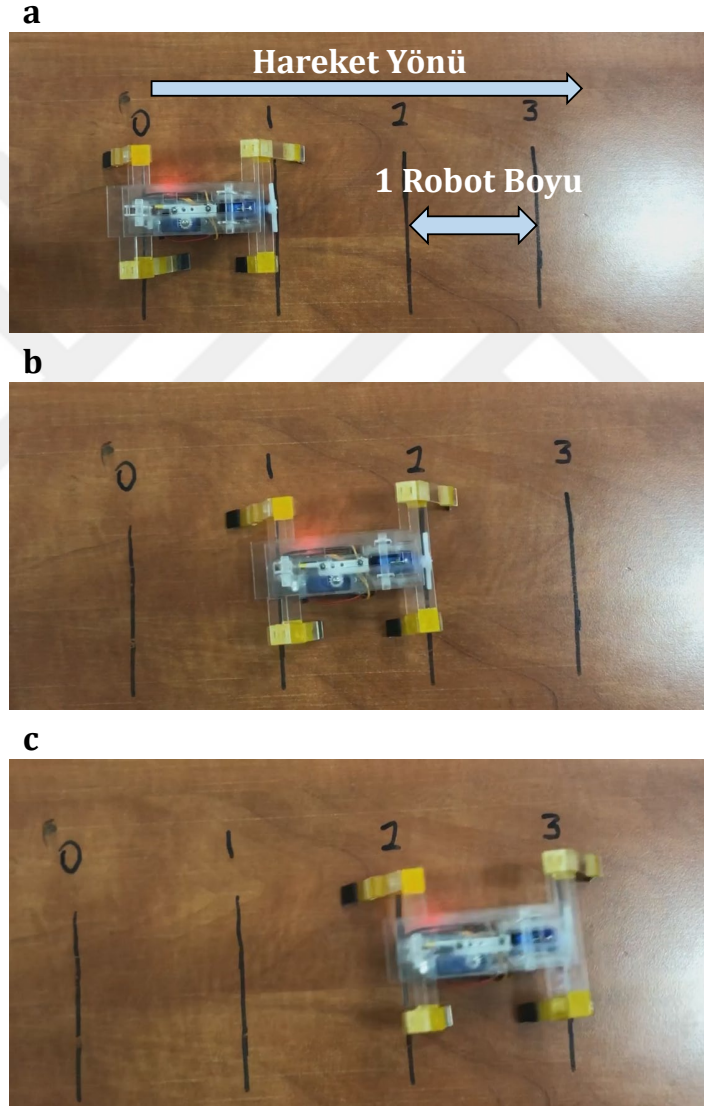
3.3. Dört Bacaklı Robot Modelinin Hareket Testleri ve Ön Bulgular

Bu bölümde robotun diz eklemlili dört bacaklı modelinin ön testlerine yer verilmiştir. Bu testlerin sonuçları bir önceki altı bacaklı modelin sonuçları ile nihai modelin belirlenmesi noktasında karşılaştırılmıştır.

İlk olarak bir önceki model olan altı bacaklı robot modeli ile benzer şekilde cilalı ahşap yüzeyde yürüme ve dönme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler için robotun bacak yapısının bir

önceki modelle aynı yapıda olmasına önem verilmiştir. Buna ek olarak robotun hız giriş verisi de bir önceki modelin testlerinde kullanılan değerle aynı olarak belirlenmiştir.

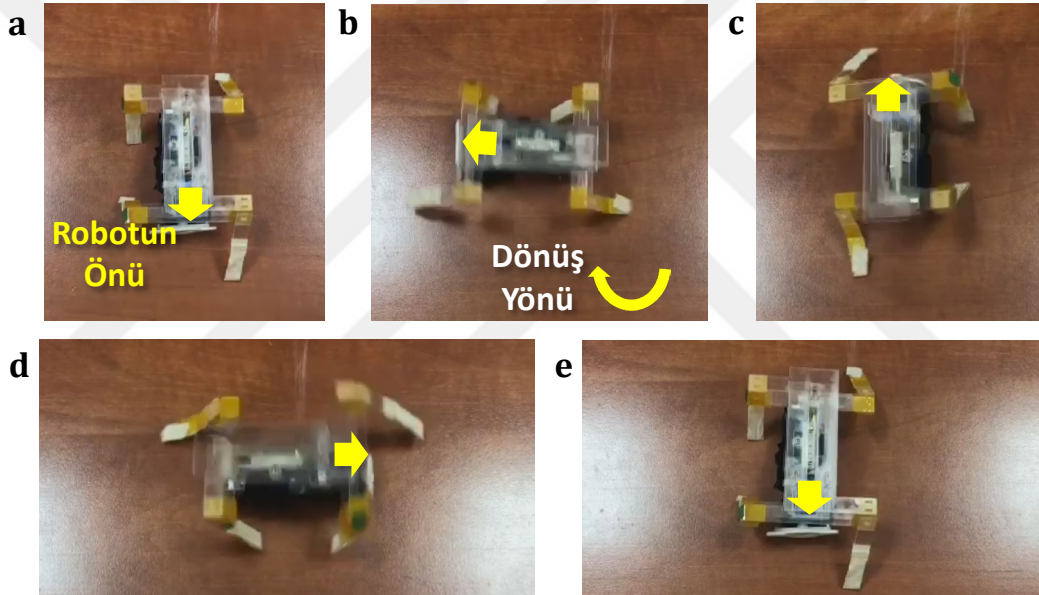
Resim 3.3'te verilen test sonucuna göre dört bacaklı robotun yaklaşık 2.1 saniye sürede yaklaşık olarak 2 robot boyu ilerleyebildiği görülmektedir. Yapılan testlerin sonuçlarına göre robotun ortalama yürüme hızının 0.91 boy/s olduğu tespit edilmiştir. Robotun boyunun 87.5 mm olduğu göz önüne alındığında yürüme hızının yaklaşık 79.6 mm/s olduğu hesaplanmıştır. Bu sonuçlar robotun dört bacaklı modelinin altı bacaklı robota göre yürüme hızının yaklaşık 4.2 kat daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.



Resim 3.3. Dört bacaklı model basit yürüme testi: a) $t = 0$ sn, b) $t = 1$ sn ve c) $t = 2.1$ sn.

Resim 3.4'te robotun dört bacaklı modelinin cilalı ahşap yüzeyde tam tur dönme testlerinden kesitler gösterilmiştir. Bu modelin de altı bacaklı model ile benzer olarak tam dairesel dönüş

gerçekleştirebildiği görülmektedir. DC motor yerine direkt olarak servo motorun gücüyle gerçekleştirilen dönme hareketinde robotun 5.39 saniye sürede tam bir turu tamamladığı deneysel olarak belirlenmiştir. Altı bacaklı model bir çeyrek turu yaklaşık 25 saniye sürede tamamlarken aynı dönme mesafesini 4 bacaklı modelin 1.39 saniyede tamamladığı görülmektedir. Robotun dönme deneyleri, testleri gerçekleştirilen iki modelde de yürüme pozisyonunda bacaklar tam açık konumdayken gerçekleştirilmiştir. Daha sonra nihai modelin yol izleme deneyleri için gerçekleştirilen dönme testlerinde bacaklar yer ile 90° açı yapacak şekilde kullanılmış ve yol izleme yazılımında dönme esnasında bacakların aynı konumda olması sağlanmıştır. Bu nedenle daha sonra yapılan testlerle modelleri karşılaştırmak için yapılan testler arasında hız farkı bulunmaktadır. Bacaklar tam açık konumdayken dönme şaftının yer ile daha fazla temas ettiği için böyle bir fark ortaya çıkmaktadır.



Resim 3.4. Dört bacaklı robotun cilalı ahşap yüzeyde dönüş testleri: a) $t = 0$ sn, b) $t = 1.39$ sn, c) $t = 2.85$ sn, d) $t = 4.25$ sn ve e) $t = 5.39$ sn.

3.4. Robotun Nihai Modelinin Belirlenmesi

Aynı yüzeyde, aynı hız giriş verileri ile ve aynı bacak yapısıyla yapılan test sonuçlarına göre robotun dört bacaklı modelinin altı bacaklı modeline göre 4.2 kat daha hızlı yürüyebildiği görülmektedir. Bu durumun temel nedeni bacak sayısının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Altı bacaklı yapıda robotun ağırlık merkezinin ortada olması nedeniyle orta kısımdaki bacaklar yürüyüşü domine etmektedir. Bunun sonucunda önde ve arkada bulunan bacaklar işlevlerini yitirmekte, bu nedenle de harekete yeterli katkı sağlayamamaktadırlar. Bunun nedeni robotun ağırlığının büyük bir kısmının orta bacaklar tarafından taşınıyor olmasıdır. Bu durum da hareketin sorunsuz bir şekilde sağlanmasına engel

olup, sonuçta robotun yavaş ilerlemesine neden olmaktadır. Buna ek olarak dört bacaklı robotun düz bir çizgiyi altı bacaklı robota göre daha kararlı şekilde takip edebildiği gözlenmiştir. Bu durum yine altı bacaklı robot modelinde orta bacakların dominant hale gelmesiyle açıklanabilmektedir. Çünkü altı bacaklı robotun tasarımı dolayısıyla orta kısımda bir adet kısa ve bir adet uzun bacak bulunmaktadır. Uzun bacakların yere daha fazla hareket aktardığı göz önünde bulundurulursa sadece orta bacakların dominantlığında oluşan harekette uzun bacağın bulunduğu tarafın ters yönüne doğru bir dönme eğilimi olması hareketin fiziksel doğal bir sonucudur.

Robotun iki versiyonunun da ön yürüme ve dönme testlerinin sonucunda diz eklemlili dört bacaklı robot modeli nihai model olarak belirlenmiştir. Tablo 3.3'te literatürde yer alan bazı modeller ile bu tez çalışmasında ortaya konulmuş iki modelin boy ve hız değerleri verilmiştir. Bu tabloda görülen hız değerleri bu çalışmada üretilmiş robotların ortalama motor hızı giriş değerleri için elde edilen hız değerleridir. Bu bağlamda motor hızına bağlı olarak daha yüksek robot hızlarına da ulaşılabilir. Tablodaki veriler incelendiğinde dört bacaklı robotun yürüme hızının literatürdeki minyatür robotlarla karşılaştırılabilir seviyede olduğu görülmektedir. Sonraki bölümde robotun dört bacaklı nihai versiyonu için yürüme hızları daha detaylı bir şekilde verilmiştir.

Tablo 3.3. Tez çalışmasındaki iki modelin literatür örnekleriyle boy ve hız bakımından karşılaştırılması.

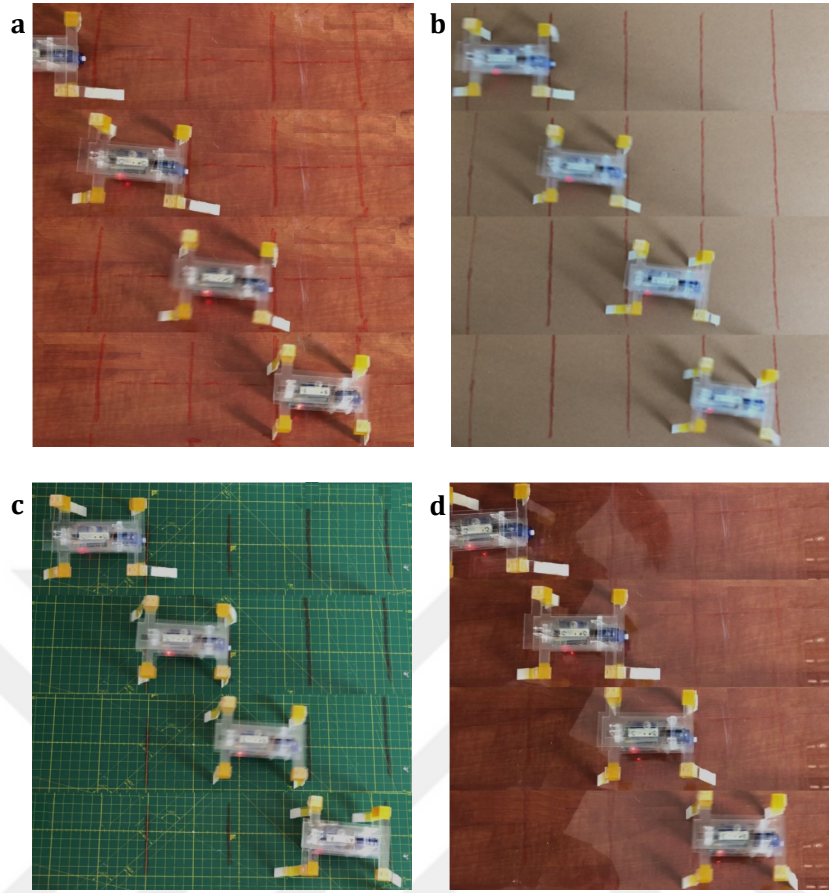
Robot Modeli	Boy [mm]	Yürüme Hızı [mm/s]
HAMR (Andrew Thomas Baisch vd., 2014)	48	42
Hariri 1 (Hassan Hussein Hariri, Soh, Foong, Wood, & Otto, 2015)	50	40
MinRAR V1 (Rios vd., 2017)	55	520
RoACH (Aaron M Hoover vd., 2008)	30	30
C-Quad (Güç vd., 2017)	103	277
DASH (Birkmeyer vd., 2009)	100	1100
MutBug (T. Y. Kim vd., 2019)	100	530
Bu çalışmada üretilen diz eklemlili altı bacaklı model	110	19
Bu çalışmada üretilen diz eklemlili dört bacaklı model	87.5	80

Robotun nihai dört bacaklı versiyonu DASTeQ (Double Actuated Soft Tendon Quadruped) olarak isimlendirilmiştir. Bu aşamadan sonra çalışmada yer alan "Robot" veya "DASTeQ" ifadeleri diz eklemine sahip lateks tendon yapılı dört bacaklı robot modelini temsil etmektedir.

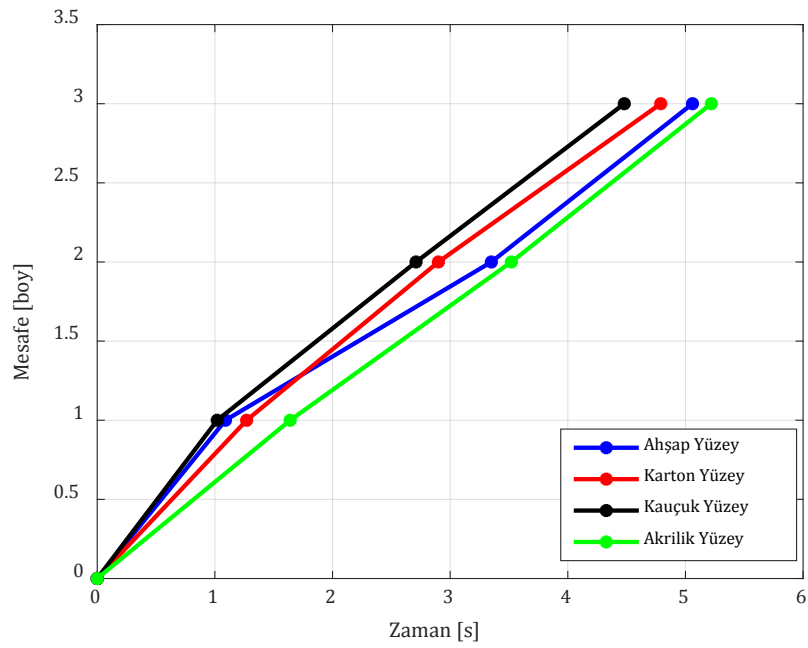
3.5. Nihai Robot Modelinin Farklı Yüzeylerde Yürüme, Engel Aşma ve Yokuş Tırmanma Testleri

Bu aşamadan sonra gerçekleştirilmiş olan farklı yüzeylerde yürüme, yokuş tırmanma ve engel aşma testleri için robotun diz eklemlili dört bacaklı modeli kullanılmıştır. Öncelikle robotun ileri hız testlerinin gerçekleştirilmesi için optimum yürüme yüzeyinin bulunması amacıyla farklı yüzeylerde ön yürüme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu test sonuçları ile ilgili göz önünde bulundurulması gereken bir başka husus da robotun en son halinin kullanılmış olmasıdır. Robotun Resim 3.3'te görülen yürüme testinde bir önceki modelin bacak yapısı kullanılırken bundan sonraki aşamalarda tendonlu bacak yapısı kullanılmıştır. Buna ek olarak Bölüm 3.2 ve Bölüm 3.3'te yapılmış olan testler robotun modellerini karşılaştırmak için gerçekleştirilirken bu bölümde farklı giriş hızı değerleri kullanılarak ideal yürüyüş yüzeyi belirlenmesi amacıyla testler yapılmıştır.

Robotun yürüyüş testleri için ideal yüzeyi belirlemek için sırasıyla cilalı ahşap, karton, kauçuk ve akrilik olmak üzere dört farklı yüzeyde 3 robot boyu uzunluğunda düz bir parkuru tamamlama deneyleri Resim 3.5'te gösterildiği şekilde gerçekleştirilmiştir. Cilalı ahşap, karton, kauçuk ve akrilik yüzeylerin sürtünme katsayıları sırasıyla 0.3, 0.5, 0.6 ve 0.2'dir (IMO/ILO/UNECE, 2014). Şekil 3.1'de gösterilmiş olan sonuçlara göre beklenildiği gibi robotun en yavaş olarak akrilik yüzeyde yürüyebildiği görülmektedir. Bunun temel nedeni akrilik malzemenin düşük pürüzlü yapısı nedeniyle hareketi yere aktarmada göreceli olarak daha başarısız olunmasıdır. Robot bu yüzeyde 3 boyluk parkuru 5.22 saniyede tamamlarken cilalı ahşap yüzeyde 5.06 saniyede tamamlamaktadır. Bu iki yüzeye göre daha pürüzlü yapıya sahip olan kartona yüzeyde daha hızlı yürüme elde edilmiştir. Bu noktada, robotun karton yüzeyde parkurunu 4.79 saniyede tamamladığı görülmektedir. Kauçuk yüzey ise robotun parkuru 4.48 saniyede tamamladığı ve sonuç olarak en iyi yürüme performansı gösterdiği yüzeydir. Bu durum kauçuğun yüzey pürüzlülüğüyle birlikte malzeme yapısı gereği ayakların yere daha iyi tutunmasından kaynaklanmaktadır.



Resim 3.5. Robotun farklı yüzeylerde yürüme testleri: a) Cilalı ahşap yüzey, b) Karton yüzey, c) Kauçuk yüzey ve d) Akrilik yüzey.

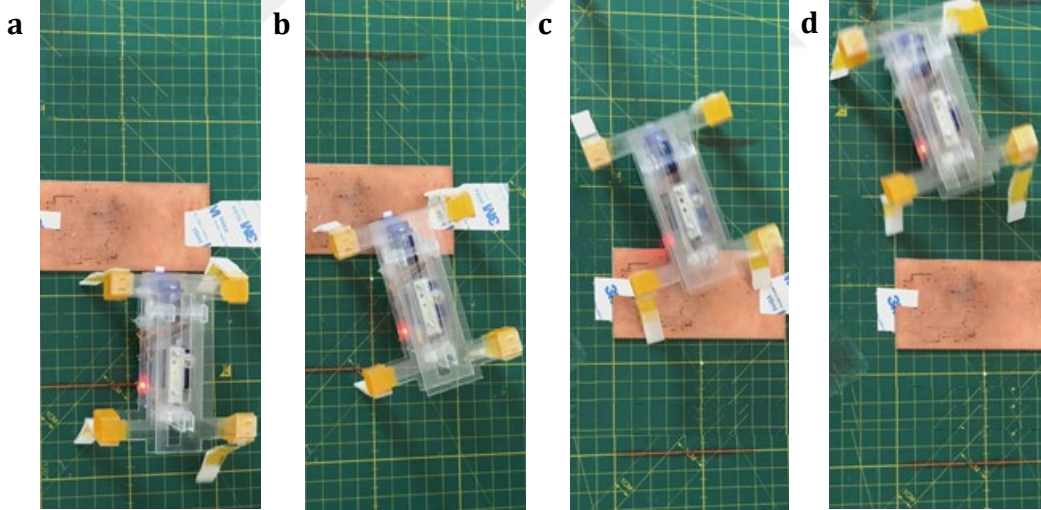


Şekil 3.1. DASTeQ farklı yüzeylerde yürüme performansları.

Ön yürüyüş parkuru deneylerinin sonucuna göre bu aşamadan sonra robotun ideal yürüme ortamı olarak kauçuk yüzey belirlenmiştir ve sonraki deneyler kauçuk yüzey üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Mini robotlarda yürüme kabiliyetinin yanında engel aşma becerisi de literatürde karşılaşılan ve önem verilen konulardan biridir. Bu çalışmada ortaya konulmuş olan DASTeQ modeli için de basit engelleri aşma kabiliyetini belirleme testleri gerçekleştirilmiştir.

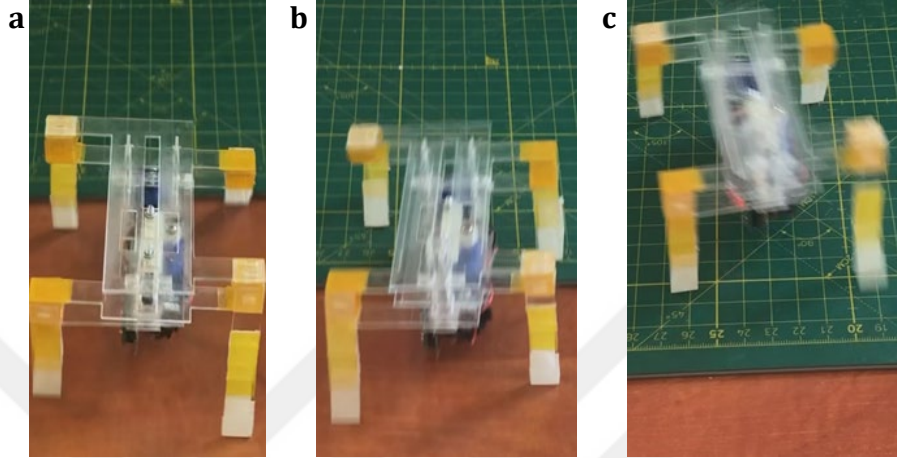
İlk olarak 1.7 mm yüksekliğe sahip olan bir PCB kart engel olarak kullanılmıştır. Bu testi gerçekleştirmek için robotun kauçuk yüzeyde yürüdüğü yöne PCB kart yerleştirilmiş ve yüzeye sabitlenmiştir. Daha sonra robot yürütülmüş ve engeli aşma kabiliyeti test edilmiştir. Resim 3.6'da gösterilmiş olan test görüntülerine göre robotun başarılı bir şekilde engeli aşabildiği gözlemlenmiştir. Buna göre robotun engeli tamamen aşması 4.92 saniye sürerken engelin üzerine ilk adımını 2.45 saniye içerisinde attığı görülmüştür. Engeli aşma işleminin robotun normal yürümesinden farklı olması beklenen bir durumdur. Bu testte de robotun engeli aşması esnasında saat yönünün tersi yönde hafif dönmüş olduğu gözlemlenmektedir. Bunun nedeni engelle karşılaştığında bacakların eşit tepkiler vermemiş olmasıdır. Yani özellikle ön bacaklardan biri engelin üzerine çıkabildiğinde diğeri daha sonra çıkmış olduğundan robotun hareket doğrultusunun değişmiş olması normal karşılanmaktadır.



Resim 3.6. DASTeQ modelinin kauçuk yüzeyde yürürken 1.7 mm yükseklikte PCB engel aşma kabiliyeti: a) $t = 0$ sn, b) $t = 2.45$ sn, c) $t = 4.03$ sn ve d) $t = 4.92$ sn.

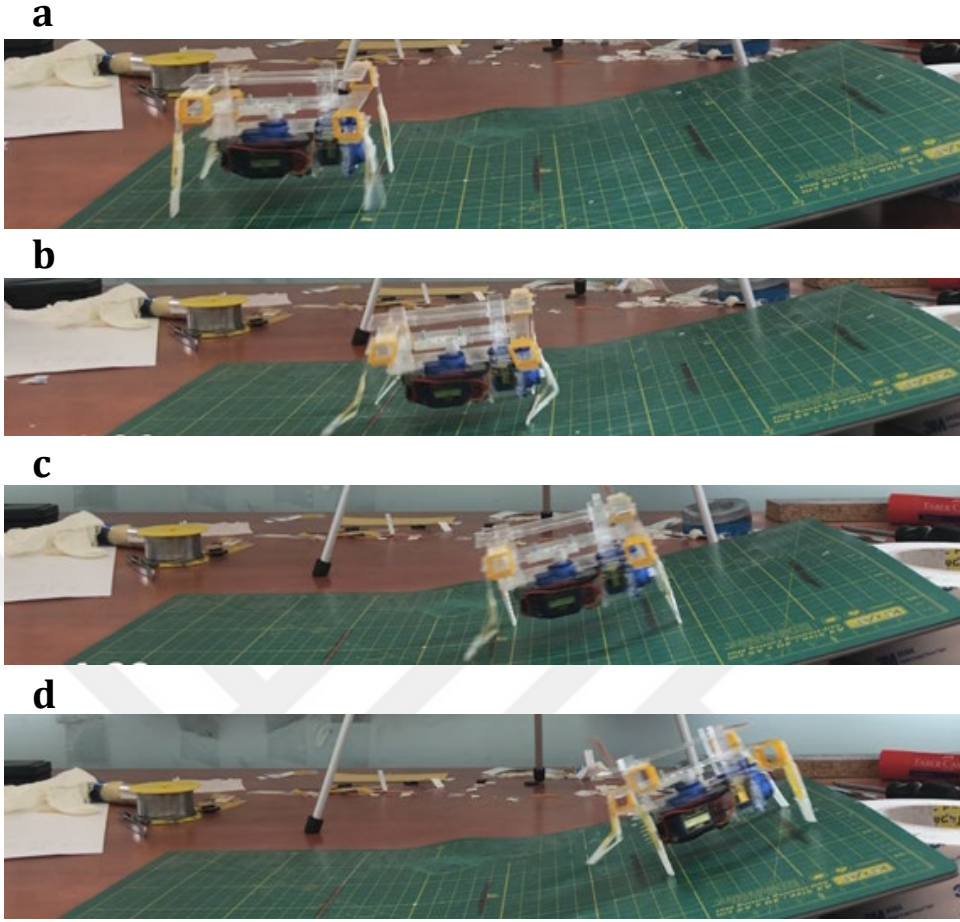
Diğer bir engel aşma testinde robot cilalı ahşap yüzeyden kauçuk yüzeyin üzerine çıkarılmaya çalışılmıştır. Bunun için robot ahşap yüzeyde yürütülmüş ve önüne konulan 3.4 mm yükseklikteki kauçuk plakanın üzerine çıkması test edilmiştir. Yapılan denemelerde robotun bu engelin üzerine başarılı bir şekilde çıkabildiği görülmektedir. Resim 3.7'de verilmiş olan test

görsellerine göre robotun kauçuk üzerine ilk adımı atması 1.62 saniye sürerken üzerine tamamen çıkması 4.91 saniye sürmüştür. Robotun engel aşma kabiliyeti tendonlu bacak yapısı sayesinde daha başarılı olabilmektedir. Tendon yapısından dolayı önüne gelen engelde bacaklar normalden daha fazla bükülmekte ve engelin aşılması kolaylaşmaktadır.



Resim 3.7. DASTeQ modelinin ahşap yüzeyden 3.4 mm yükseklikte kauçuk engelin üzerine çıkma testi: a) $t = 0$ sn, b) $t = 1.62$ sn ve c) $t = 4.91$ sn.

Robotun literatürde kendine yer bulabileceği başka bir özelliği de yokuş tırmanma kabiliyetidir. Bunu test edebilmek amacı ile basit bir şekilde giderek artan bir eğimle robotun tırmanma işlemi gerçekleştirebileceği bir parkur oluşturulmuştur. Bu parkurda robotun ön yürüme testlerinde olduğu gibi yine 3 boy ilerlemesi test edilmiştir. Resim 3.8'de tırmanma parkuru ve aşamalarıyla hangi zamanda kaç boy ilerleme kaydedildiği gösterilmiştir. Yapısı gereği giderek dikleşen bir yapıda oluşturulan parkurda robotun 1 boy uzaklığa ulaşması 1.86 saniye sürerken 2 boy uzaklığa ulaşması 4.33 saniye, 3 boy uzaklığa ulaşması da 7.71 saniye sürmüştür.



Resim 3.8. DASTeQ eğimli yüzeyde yokuş tırmanma testi: a) $t = 0$, eğim = 0° , b) $t = 1.86$ sn, eğim = 5° , c) $t = 4.33$ sn, eğim = 10° ve d) $t = 7.71$ sn, eğim = 15° .

Yine aynı resimde robotun tırmanma işlemini gerçekleştirirken bacak yapısındaki değişimler açık bir şekilde görülebilmektedir. Tırmanma işlemi sırasında yere hareket aktarmaması gereken bacakların normalde olduğundan çok daha fazla büküldüğü görülmektedir. Ancak yine tendon yapısı sayesinde yere hareket aktarmaları gerektiği pozisyona geldiklerinde tekrar tam düz konuma gelebilmektedirler.

4. BÖLÜM

NİHAİ MODELİN HIZ VE HAREKET ANALİZİ

Önceki bölümde robotun nihai modeli yapılan denemeler sonucunda belirlenmiştir. Daha sonra robotun temel özelliklerini belirlemek amacı ile video çekimi ile çeşitli deneyler yapılmış ve robotun farklı yüzeylerde yürüme, engel aşma ve eğimli yüzey tırmanma kabiliyetleri incelenmiştir.

Bu bölümde robotun farklı hızlarda yürüme performansları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu yapıda deneyler literatürde hareket yakalama sistemleriyle gerçekleştirilmektedir (Mahkam & Özcan, 2021a). Bu tez çalışmasında robotun hareketini yakalamak için görüntü işleme sistemi geliştirilmiştir. Daha sonra motora verilen farklı hız değerleri sonucunda robotun yürüme hızları belirlenmiştir. Belirlenen hız verileri robotun teorik olarak ulaşması gereken maksimum yürüme hızlarıyla karşılaştırılmıştır. Daha sonra hız verileri için bir model elde edilmiştir. Bu modelin belirlenmesindeki temel amaç robotun kendisine verilen giriş değerlerine nasıl tepki vereceğini önceden belirlemektir. Bu sayede robotun kullanımı öncesinde kendisine verilen yol izleme görevlerini ne şekilde gerçekleştirebileceği önceden tahmin edilebilecektir.

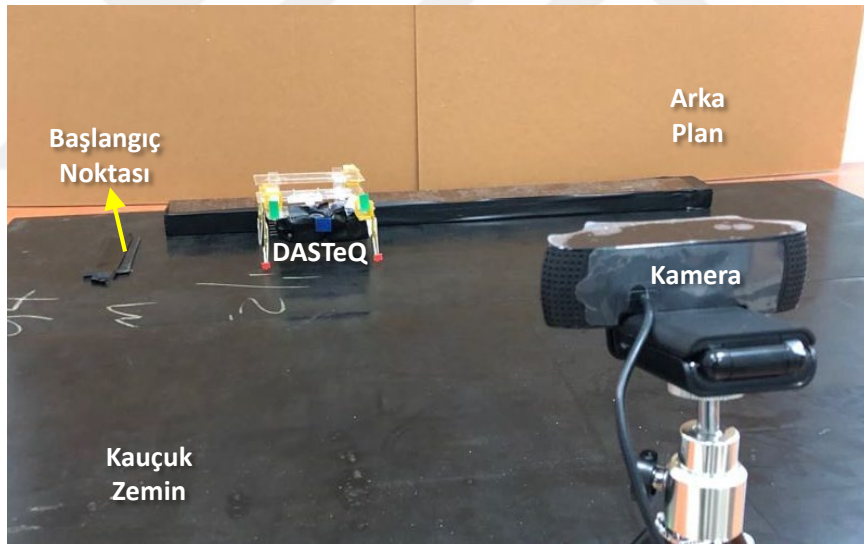
Bu tez çalışmasında nihai robot modeli olarak üretilen DASTeQ'in yürüyüş mekanizması göz önünde bulundurulduğunda kuvvet analizi ile çıkarılmış bir yürüyüş modelinin elde edilmesi zor olacaktır. Bunun en büyük nedeni yumuşak bacaklardaki kuvvetlerin teorik olarak hesaplanmasının oldukça güç olmasıdır. Bu çalışmada yapılmış olan model çalışmasının temel motivasyonu tasarlanmış ve üretilmiş olan robotun hareketinin öngörülebilir olması gerekliliğidir. Bu kapsamda robotun dönüş yapma verileri de göz önünde bulundurularak farklı hızlarda yol izleme testleri gerçekleştirilmiştir.

4.1. Görüntü İşleme ile Hareket Yakalama

Bu tez çalışmasında görüntü işleme metotları kullanılarak robotun gerçek zamanlı videosu üzerinden hareket analizlerinin yapılabilmesi sağlanmıştır. Bu doğrultuda bir görüntü işleme yazılımı geliştirilmiştir. Bu yazılımın geliştirilmesinde Matlab yazılımının görüntü işleme kütüphanesi kullanılmıştır. Geliştirilen program, video çekimi sırasında renkli objeleri takip edip iki boyutlu düzlemde koordinatlarını zamana bağlı veri şeklinde kaydedebilmektedir. Bu yazılım kullanılarak belirli noktalarına renkli etiket yapıştırılmış robot daha önceden belirlenmiş bir parkurda yürütülmüş ve robot gövdesinin, kalça eklemlerinin ve bacak hareketlerinin zamana bağlı pozisyon değişim grafikleri elde edilmiştir. Başka bir deyişle geliştirilen yazılım ile robotun koordinat değişimleri gerçek zamanlı olarak takip edilmiştir.

Görüntü işleme programında renk skalası olarak ana renkler (Kırmızı, Yeşil, Mavi, ing. RGB) kullanılmıştır. Renklerin işlenmesi ayrı ayrı matrisler oluşturularak sağlanmıştır. Elde edilen görüntü, renk kodlarıyla birlikte üç tane üst üste bindirilmiş matrisle temsil edilmiştir. Yazılım, kırmızı, yeşil ve mavi renk verilerini bu üç boyutlu matristen ayıklayarak ayrı ayrı taramaktadır. Renklere ait belirlenmiş obje verileri olası gürültüleri engellemek amacıyla etraflarındaki piksellerin de benzer olması için filtre işlemine tabi tutulmuşlardır. Buradaki temel amaç tek bir pikselde tanımlanabilecek olan hatalı renkli obje tespitlerini engellemektir. Buna ek olarak geliştirilen yazılımda tanımlanabilecek olan renkli objelerin büyüklükleri de ayarlanabilmektedir. Yazılım kaynak kodlarında yapılan değişikliklerle belirlenmiş boyutlardan daha küçük objelerin tespit edilmesi de önlenmiştir.

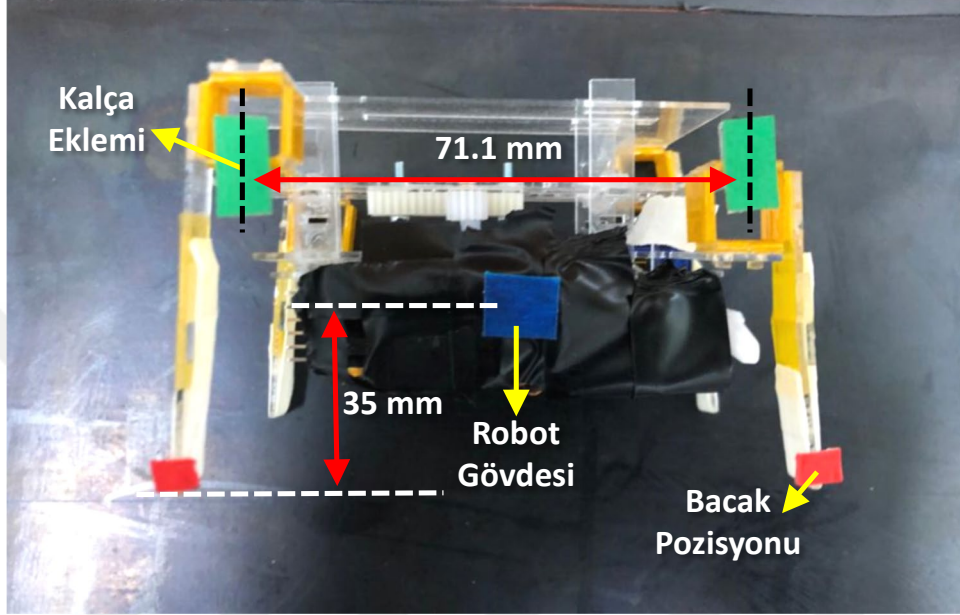
Başka bir özellik olarak renkli objelerin hatasız bir şekilde tanımlanabilmesi için kamerada görünen renklerin tonları da optimize edilmiştir. Bu işlem de yazılımın renk tanıma hassasiyetini belirlemektedir. Bu optimizasyondaki temel amaç ışık açıları gibi çevresel faktörlerden kaynaklanan ufak çaplı renk değişikliklerinin alınan veride gürültüye neden olmasını önlemektir.



Resim 4.1. Robot yürüyüş test ortamı.

Robotun yürüme parkurunda da görüntü işlemeye uygun hale getirmek amacıyla değişiklikler yapılmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi robotun hız testlerini gerçekleştirmek için kauçuk zemin tercih edilmiştir. Önceki denemelerde üzerinde deneme yapılmış olan kauçuk zemin yeşil renklidir. Bu bölümde yapılan testlerde siyah kauçuk zemin tercih edilmiştir. Bunun temel nedeni zeminin görüntü işleme yazılımı için uygunluğunu sağlamaktır. Zemin rengi olarak önceki testlerde kullanılan yeşil renk denendiğinde görüntü işleme yazılımının yanlış veri topladığı görülmüştür.

Buna ek olarak test ortamında RGB renklerine yakın olmayacak şekilde bir arka plan oluşturulmuştur. Resim 4.1'de görüldüğü gibi karton malzemeden oluşturulan arka plan sayesinde test aşamasında alınan görüntülerde istenmeyen renkli objelerin yakalanmasının önüne geçilmiştir.



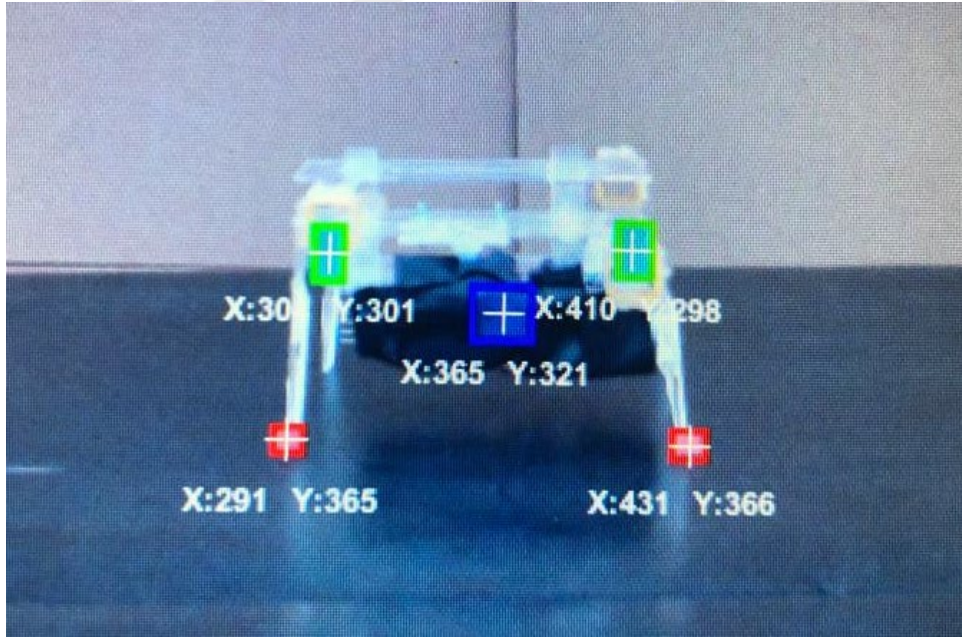
Resim 4.2. DASTeQ görüntü işleme modifikasyonu.

Görüntü işleme operasyonunun yapılabilmesi için robotta da modifikasyon yapılmıştır. Öncelikle robotun özellikle elektronik bileşenlerinin renklerinin görünmemesi için robot gövdesi siyah bant ile kaplanmıştır. Daha sonra robot üzerinde pozisyonlarının belirlenmesi gereken bölgelere farklı renklerde kağıtlar yapıştırılmıştır. Resim 4.2'de gösterildiği üzere robot gövdesinin orta noktasına mavi renkli bir kağıt yapıştırılmıştır. Bu işlemdeki amaç robotun hareketi esnasında gövdenin hem ileri yönde pozisyonunun belirlenmesi, hem de yürüme esnasında robotun dikey düzlemde ne kadar yer değiştirdiğinin tespit edilmesi gereksinimidir. Bununla birlikte robotun bacaklarında da yer ile temas eden noktalara kırmızı renkli kağıtlar yapıştırılmıştır. Bu sayede yürüme esnasında bacak hareketleri de gözlemlenebilmiştir. Bir başka modifikasyon olarak robotun kalça eklemlerine de iki adet yeşil renkli kağıt yapıştırılmıştır. Hareketin analiz edilmesinde önemli bir rol üstlenen bu işlem sayesinde hem kalçaların hareketi veri olarak toplanabilmiş, hem de görüntü işlemede toplanan tüm verinin gerçek konum analizi yapılabilmiştir. Görüntü işleme yazılımı, çekilen videodaki fotoğraf karelerinden veri topladığı için elde edilen konum verileri kadrada bulunan pikseller olarak toplanmaktadır. Piksel verisinin gerçek konum verisi olan milimetre birimine dönüştürülmesi için robotun üzerinde mesafesi bilinen bölgeler kullanılmıştır. Tasarlanan robotta kalça eklemlerinin orta noktaları arasında bulunan mesafe 71.1 mm'dir. Robotun

yürmesi esnasında görüntü işleme ile tespit edilen yeşil objelerin piksel verileri arasındaki fark değerleri, aralarındaki gerçek mesafe olan 71.1 mm değeri ile karşılaştırılarak her pikselin ne kadar mesafeye karşılık geldiğini bulmak için kullanılmıştır.

Bu noktada göz önünde bulundurulmuş olan bir başka husus da kamera açısına bağlı olarak robotun hareketi esnasında robot ilerledikçe sabit noktalar arasındaki piksel mesafelerinin aynı kalmamasıdır. Bir başka deyişle yeşil objeler arasındaki mesafe robot kameranın tam karşısındayken maksimum olurken robot fotoğraf karesinin en sağında veya en solunda iken minimum olmaktadır. Bu durumu kompanse etmek için görüntü işleme yazılımında robotun fotoğraf karesinde bulunduğu bütün yeşil obje pozisyonları dikkate alınmış ve elde edilen piksel verilerinin ortalamaları alınmıştır. Daha sonra 71.1. mm değeri bu ortalama değere bölünerek alınan görüntüdeki her bir pikselin kaç milimetre mesafeye denk geldiği bulunmuştur. Elde edilen son değer alınan verinin gerçek mesafeye çevrilmesi için kullanılmıştır. Görüntü işleme yazılımının kaynak kodları EK-2’de verilmiştir.

Resim 4.3’te görüntü işleme sürecinde alınan bir ekran görüntüsü görülmektedir. Ekran görüntüsünden de anlaşılacağı gibi görüntü işleme ile tespit edilen renkli objelerin orta noktalarının pozisyonları veri olarak kaydedilmektedir. Ekranda görünen veriler ilgili noktaların piksel pozisyonlarını vermektedir.

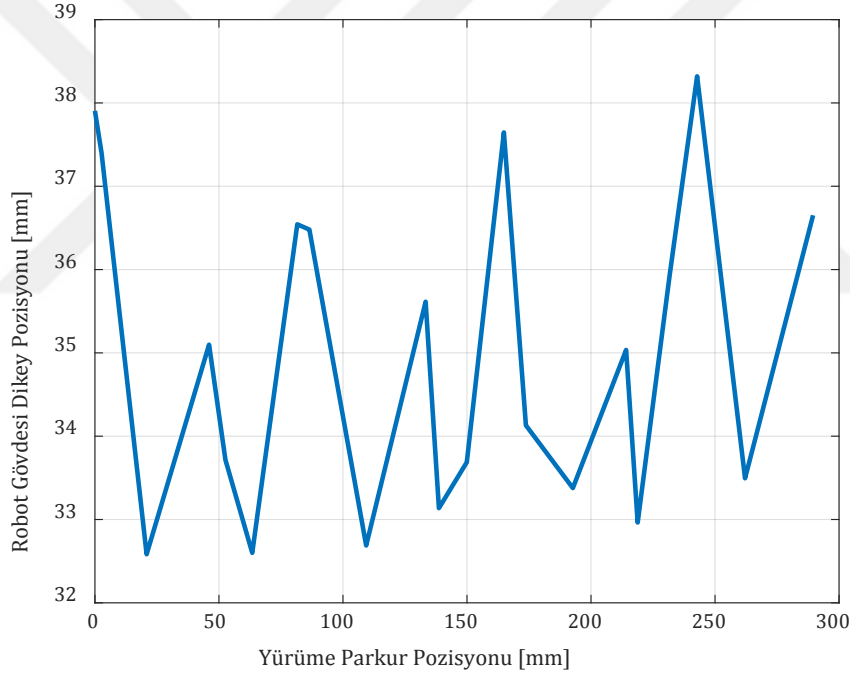


Resim 4.3. Görüntü işleme yazılımı ekran görüntüsü.

4.2. Hareket Analizi

Tez çalışmasının bu bölümünde robotun yürümesi esnasında belirlenmiş noktaların pozisyonlarındaki değişimler incelenmiştir. Bu incelemeler neticesinde robotun ne şekilde hareket ettiği, hareketi sırasında ana gövdenin ne kadar salınım yaptığı, kalça eklemlerinin ve bacakların harekete ne ölçüde katkı verdiği gibi analizler gerçekleştirilmiştir. Bunun için yapılan testlerde robotun giriş hız değerinin incelenmesinden ziyade ortalama hız değerlerinde yürüyüş davranışı göz önünde bulundurulmuştur. Bu nedenle bu deneylerde motor giriş hızı olarak 8 rad/s değeri kullanılmıştır.

İlk olarak literatürdeki çalışmalar da dikkate alınarak robotun stabil bir şekilde yürüyüp yürümediğinin ortaya konulması için gövdenin dikey düzlemde ne kadar yer değiştirdiği incelenmiştir.

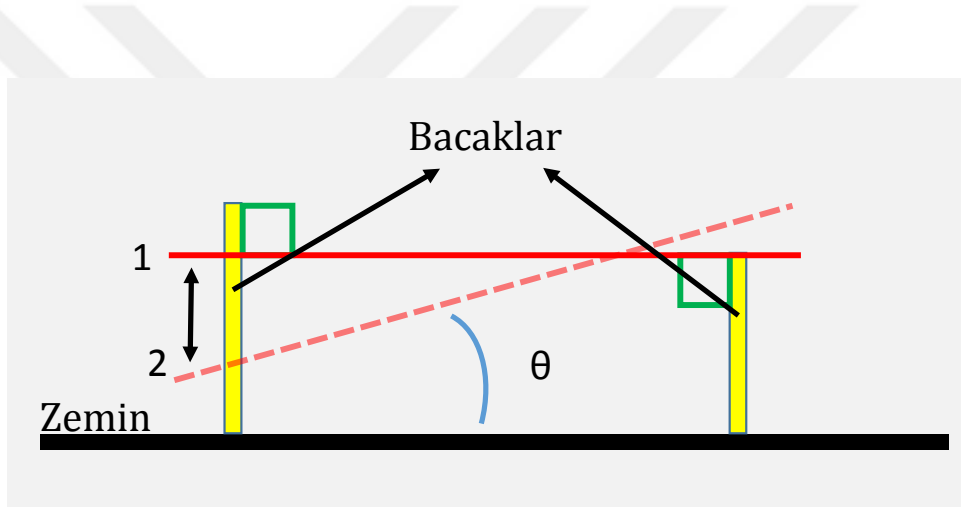


Şekil 4.1. Robotun yürüme sırasında ilerlediği mesafeye göre gövdesinin dikey konumu.

Şekil 4.1’de verilen grafikte robotun yürümesi esnasında gövdesinin dikey düzlemde ne kadar yer değiştirdiği gösterilmektedir. Bu bağlamda, robotun yürüme esnasında robotun gövdesinin dikey doğrultuda hareketsiz konumuna göre maksimum 3 mm yer değiştirdiği görülmektedir (bkz. Resim 4.2). Burada kaydedilen konum verisi Resim 4.2 ve Resim 4.3’te görülmekte olan mavi renkli bölümün orta noktasının pozisyonudur. Grafikte görülen veriye göre robot

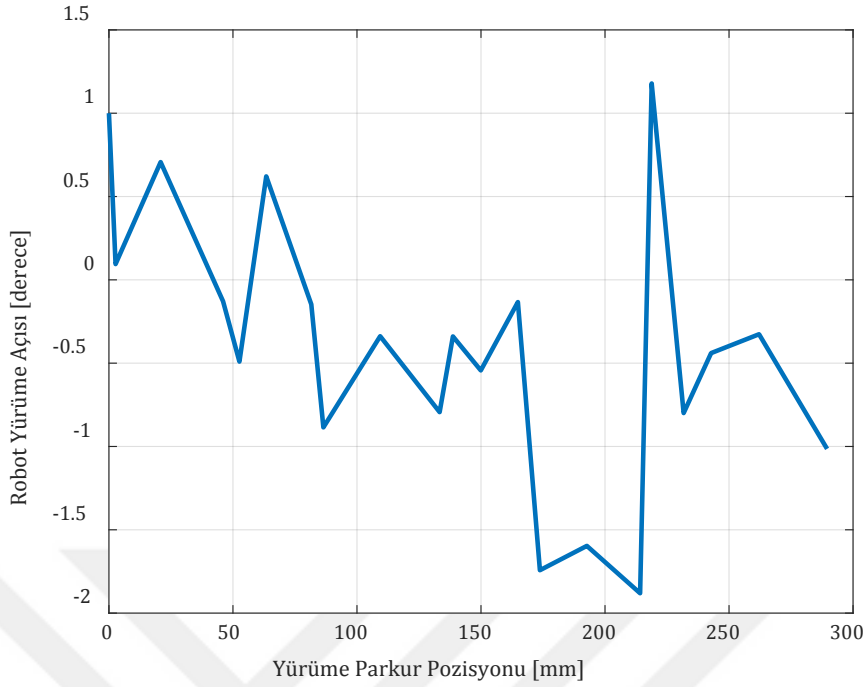
gövdesinin dikey pozisyonunun maksimum ve minimum değerleri arasındaki fark ise yaklaşık 5 mm'dir.

Robotun stabil yürüyüp yürümediğini gösteren bir başka kriter de literatürde karşılaşılan “yunuslama” açısıdır. Yunuslama hareketi robotun yürüyüşü esnasında ön ve arka kısımlarının yükselip alçalmasıyla yunus benzeri bir hareketin görülmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu hareketin minimize edilmesi robotun stabilitesini de olumlu yönde etkilemektedir. Bu hareketi analiz etmek için robotun yer ile yaptığı açıya bakılmaktadır. Şekil 4.2’de “ θ ” ile gösterilen açı değeri robotun gövde çizgisinin “1” numaralı konumdan “2” numaralı konuma geldiğinde yürüyüş yapılan zemin ile yapmış olduğu açıyı temsil etmektedir. Yürüyüş esnasında bu açı değeri ne kadar az değişkenlik gösterirse robotun stabilitesi de o ölçüde yüksek olmaktadır. Başka bir deyişle robot yürüyüş esnasında gövdesinin zemin ile paralellliğini koruyabiliyorsa stabilitesi yüksek olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 4.2. Robotun yer ile yaptığı açının tanımlanması.

Robotun yunuslama davranışını incelemek için yine görüntü işleme verisinden faydalanılmıştır. Robotun kalça eklemlerine yerleştirilmiş olan Resim 4.2’de görülen yeşil kağıtlar yardımıyla kalça eklemlerinin yürüyüş esnasında yatay ve dikey pozisyonları kaydedilmiştir. Yine aynı resimde görülebileceği üzere bu kağıt parçaları yapıştırılırken kalça eklemlerinin dikey olarak pozisyon farklılıkları göz önünde bulundurulmuş ve kağıt parçaları yukarıda bulunan eklemin alt tarafına yerleştirilirken aşağıda bulunan eklemin de üst tarafına yerleştirilmiştir. Böylelikle iki kalça ekleminin de dikey pozisyonları eşit şartlarda kaydedilebilmiştir.



Şekil 4.3. Robotun yürüme esnasında yer ile yaptığı açı değerleri.

Şekil 4.3'te robotun yürümesi sırasında yer ile yapmış olduğu açının değerleri gösterilmektedir. Grafikten çıkarılan sonuca göre robotun tüm hareketi boyunca yer ile büyük oranda paralel ilerlediği ve maksimum açının 1.8° olduğu görülmektedir. Bu durum robotun “yunuslama” hareketini minimum seviyede tutarak ilerlediğini göstermektedir.

Robotun stabil yürüyebildiği yapılan görüntü işleme analizleri sonucunda ortaya konulmuştur. Bacaklı robotlarda yürüyüşün stabil sağlanabiliyor olması önemli bir kriterdir. Özellikle keşif amaçlı kullanılabilen bu tür robotlarda stabilite yüksekliği olası bir kamera entegrasyonu için avantaj sağlamaktadır. Bu çalışmada ortaya konulan robotun stabilitesinin yüksek olması, üzerine kamera yerleştirilerek görüntü alabilen bir keşif robotu olarak kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır.

Robotun stabilitesinin yanında kendisine verilen farklı giriş hızı değerlerinde gerçek hızının ne şekilde değişiklik gösterdiği de önemli bir özelliktir. Bu tez çalışmasında DASTeQ isimli robota minimum hız değerinden maksimum ulaşabileceği hız değerine kadar belirli aralıklarla değişecek şekilde giriş hızları verilmiştir. Bunun sonucunda yürüyüş testleri gerçekleştirilmiş ve robotun hangi giriş değerlerinde hangi hızda yürüyebildiği elde edilmiştir.

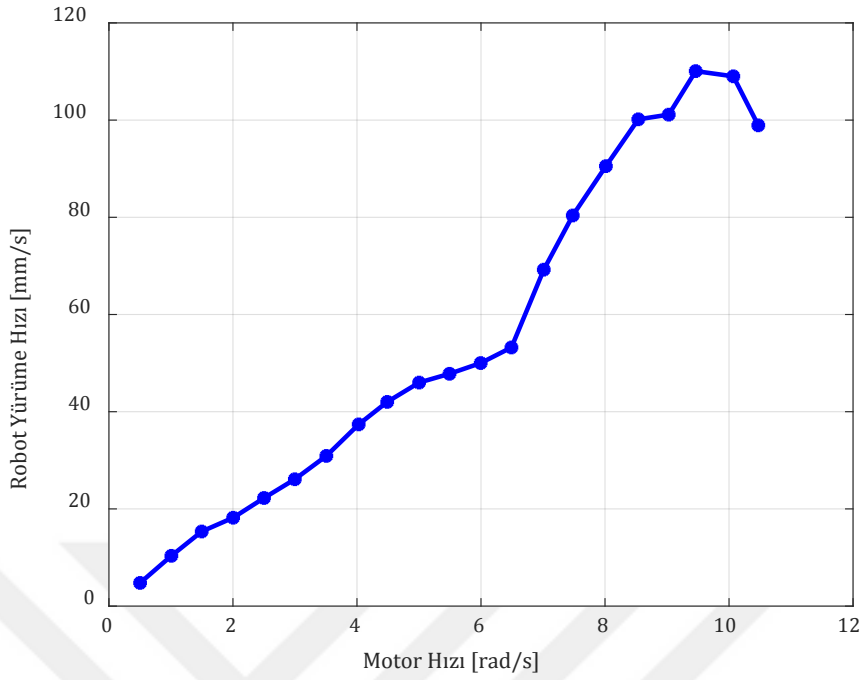
Robotun hız deneyleri için geliştirilen metodolojide robotun yürümesini sağlayan servo motorun giriş değerleri baz alınmıştır. Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi robotun ileri hareketi için bir adet mini servo motor kullanılmaktadır. Kullanılan servo motor maksimum olarak yaklaşık 10.5 rad/s hız değerine ulaşabilmektedir. Bu değer göz önünde bulundurularak

minimum 0.5 rad/s hız değerinden başlamak kaydı ile 10.5 rad/s hız değerine kadar 0.5 rad/s aralıklarla giriş değerleri belirlenmiştir. Belirlenen her giriş değerinde robot yürütülerek gerçek hız değeri görüntü işleme metodu ile ölçülmüştür. Toplanan verinin güvenilirliği açısından her hız değerinde 10 adet deney yapılmıştır. Sonuç olarak deney yapılan her hız değeri için yapılmış olan 10 adet deneyin ortalamaları alınarak robotun gerçek hızı belirlenmiştir.

Bahsedildiği gibi deneyler servo motora 0.5 rad/s hızdan 10.5 rad/s hıza kadar giriş değerleri belirlenerek gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.1 ve Şekil 4.4 de deney giriş hız değerleri ve sonuçta ölçülmüş olan ortalama robot yürüyüş hızı değerleri verilmiştir.

Tablo 4.1. Farklı motor giriş hızlarında robotun ortalama yürüme hız değerleri.

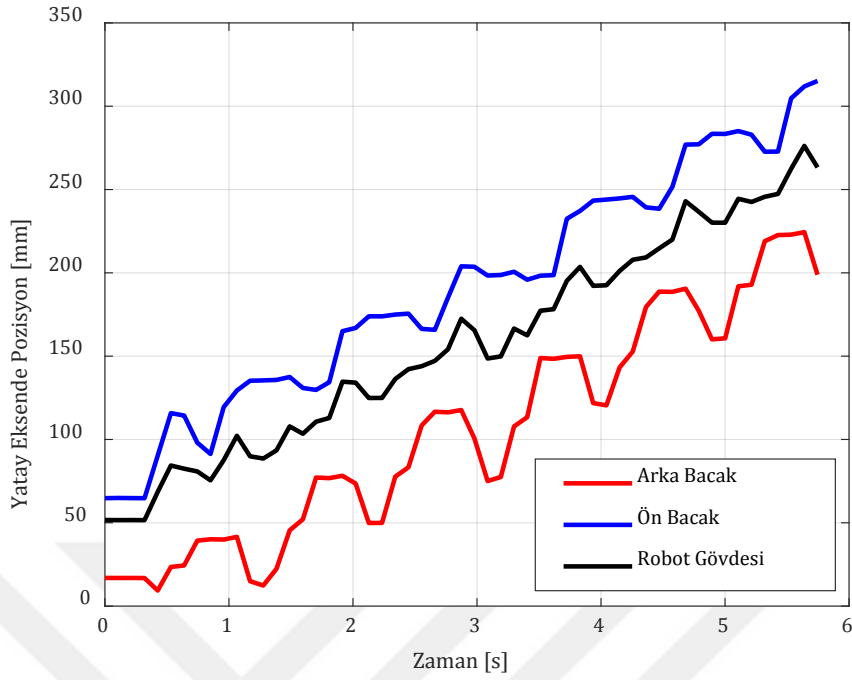
Motor Hızı [rad/s]	Robot Ortalama Yürüme Hızı [mm/s]
0.5	4.77
1	10.35
1.5	15.35
2	18.19
2.5	22.25
3	26.1
3.5	30.91
4	37.39
4.5	42.02
5	46
5.5	47.8
6	50.01
6.5	53.22
7	69.23
7.5	80.38
8	90.53
8.5	100.16
9	101.12
9.5	110.08
10	109.01
10.5	98.92



Şekil 4.4. Motor hızına bağlı olarak robotun yürüme hızı değerleri.

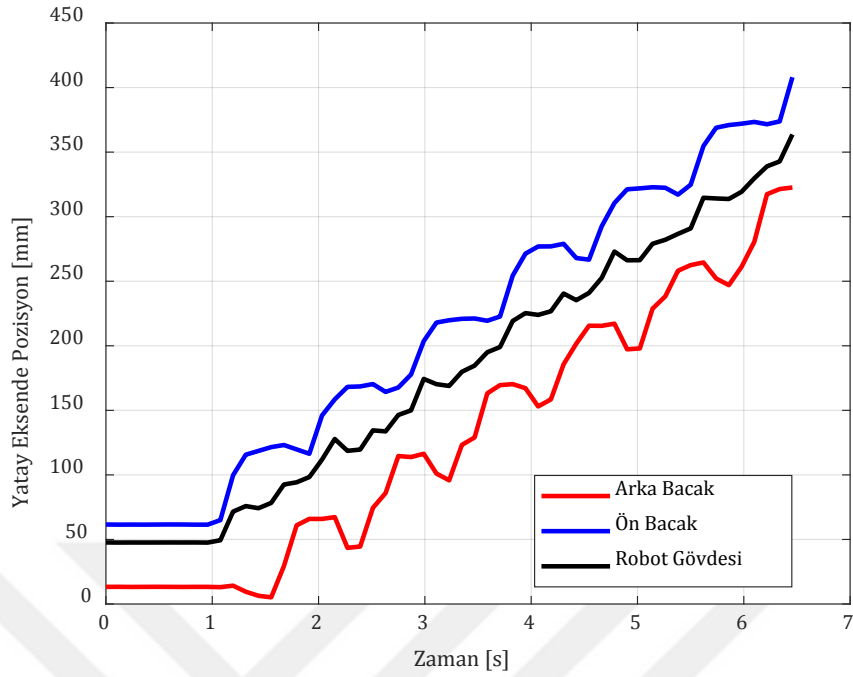
Tablo 4.1 ve Şekil 4.4 incelendiğinde beklenildiği gibi robotun giriş hız değerleri arttıkça yürüme hızının da arttığı görülmektedir. Robotun farklı hızlarda yürüme davranışları dört bölgede incelenebilmektedir. 0 rad/s ile 5 rad/s arasındaki düşük giriş hızlarında robotun yürüme hızının da aynı oranda arttığı görülmektedir. Daha sonra 5 rad/s ile 6.5 rad/s arasında robotun yürüme hızındaki artışın daha düşük bir eğimde gerçekleştiği görülmektedir. Bunun en temel nedeni olarak robotun bacaklarında hız artışına bağlı olarak yere tutunma kabiliyetinin azaldığı gösterilebilir. Bu aşamadan sonra 6.5 rad/s ile 8.5 rad/s giriş hızlarında robotun yürüme hızına bakıldığında tekrar artış eğiminin yükseldiği görülmektedir. Bundan sonraki daha yüksek giriş hızı değerlerinde servo motorun da limit hız değerlerine yaklaşıldığı için robotun yürüyüş hızındaki artış yavaşlamış, hatta son hız değerlerinde düşüş eğilimi de gözlenmiştir.

Hız testlerinde robotun özellikle 6.5 rad/s giriş hızı değerinin etrafında gözlenen farklı tepkisi ile ilgili yorumlamanın daha doğru bir şekilde yapılabilmesi için 5.5 rad/s, 6.5 rad/s ve 8 rad/s giriş hızı değerlerine ait deneylerde ortaya çıkmış olan ortalama hız değerleri baz alınarak daha detaylı olarak inceleme gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.5. Yürüyüş esnasında robotun gövdesi ve bacaklarının yer ile temas eden noktalarının konumu (Motor Hızı: 5.5 rad/s).

İlk olarak Şekil 4.5'te gösterildiği gibi 5.5 rad/s motor giriş hızında robotun gövdesinin ve bacaklarının pozisyonları incelenmiştir. Bu sonuçlarda bacak pozisyonları yine Resim 4.2 ve Resim 4.3'te görüldüğü şekilde kırmızı kâğıt parçalarının yapıştırıldığı noktaların koordinatları belirlenerek elde edilmiştir. Etiketlerin yapıştırıldıkları noktalar bacakların yer ile temas ettiği noktalar olduğu için bu noktalar bacakların harekete katkı vermesi durumunu göstermesi açısından önem teşkil etmektedir. Elde edilen sonuçlara göre robot gövdesi şekilden de görülebileceği gibi sürekli olarak ileri yönde hareket etmemektedir. Grafik üzerinde robot gövdesinin pozisyonlarına bakıldığında zaman zaman yatay eksende negatif yönde az da olsa hareket ettiği görülmektedir. Bu durum açıkça ortaya koymaktadır ki bu hız değerinde ileri harekete katkı veren bacaklarda kayma durumu oluşmaktadır. İleri harekete katkı veren bacaklarda kayma durumu olduğunda harekete katkı vermemesi gereken bacakların az da olsa hareketi etki ederek robot gövdesinde ters yönde bir harekete neden olduğu görülmektedir.

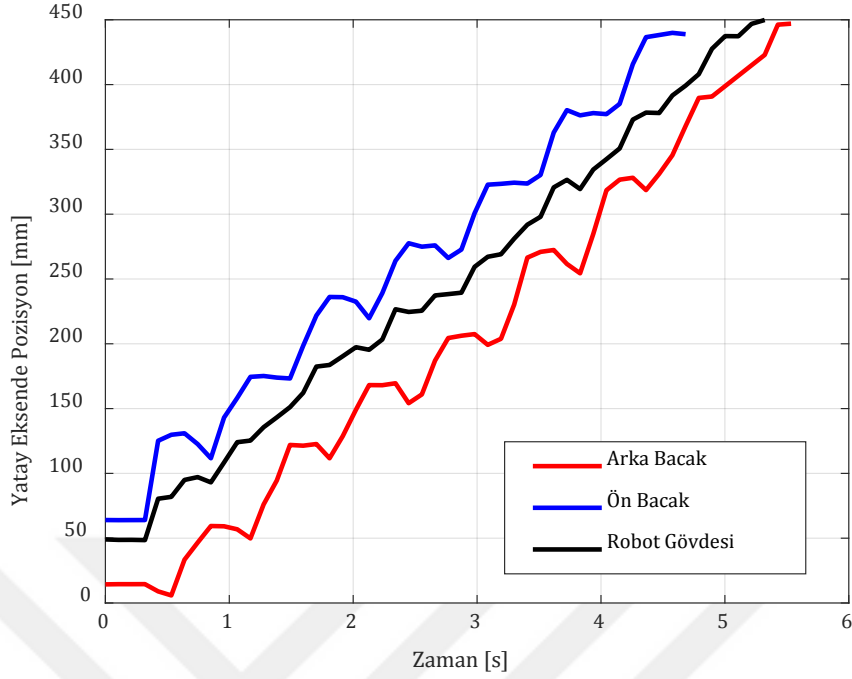


Şekil 4.6. Yürüyüş esnasında robotun gövdesi ve bacaklarının yer ile temas eden noktalarının konumu (Motor Hızı: 6.5 rad/s).

Buna ek olarak Şekil 4.6'da gösterilen 6.5 rad/s motor giriş hızındaki sonuçlar incelendiğinde 5.5 rad/s giriş değerinde olduğu gibi yine robot gövdesinde ters yönde hareket gözlenen noktalar mevcuttur.

Bunların yanında 8 rad/s giriş hızı verildiğinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde robot gövdesinde kaymaya bağlı negatif yönlü hareketin göreceli olarak daha az olduğu görülmektedir. Şekil 4.7'de verilmiş olan grafikte robot gövdesinin diğer iki hız değerine göre daha düzgün bir ilerlemeye sahip olduğu sonucuna ulaşılabilmektedir.

Bu durumun ana nedeni robotun bacaklarının hareketleri hızlandıkça gövdenin daha sürekli bir rejimde hareket etmesidir. Bu noktada, robotun bacakları bir konumdan diğer konuma gittiğinde giriş hızına bağlı olarak tekrar hareket etmesi için düşük hızlarda bir bekleme süresi bulunmaktadır. Bu durum da robotun hareketinin sürekli olmasını engelleyebilmektedir. Robotun giriş hızı yükseldikçe hareketin daha sürekli olduğu görülmüştür. Bunun sonucunda bacaklardan biri harekete daha az katkı verdiğinde hemen sonrasında daha fazla katkı veren bacak harekete katıldığı için robotun negatif yönlü hareketinin daha fazla kompanse edildiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca giriş hızı arttıkça literatürde de gözlemlenen rezonans benzeri davranışlar robot hızına etki edebilmektedir.



Şekil 4.7. Yürüyüş esnasında robotun gövdesi ve bacaklarının yer ile temas eden noktalarının konumu (Motor Hızı: 8 rad/s).

Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilen grafikler birlikte incelendiğinde dikkat çeken bir başka husus da bacakların pozisyonları arasındaki uyumdur. Bacakların pozisyon değerleri gövde pozisyonuyla bağıl olarak değerlendirildiğinde belirli bir periyotta salınım hareketi yaptıkları görülmektedir. Bununla birlikte grafiklerde bacakların hareketleri arasındaki faz farkı da net bir şekilde görülmektedir. Bacaklardan biri ileri giderken diğerinin geri gittiği grafik üzerinde açıkça görüldüğünden bu durum deneylerde elde edilen sonuçların güvenilirliğini de ayrıca göstermektedir.

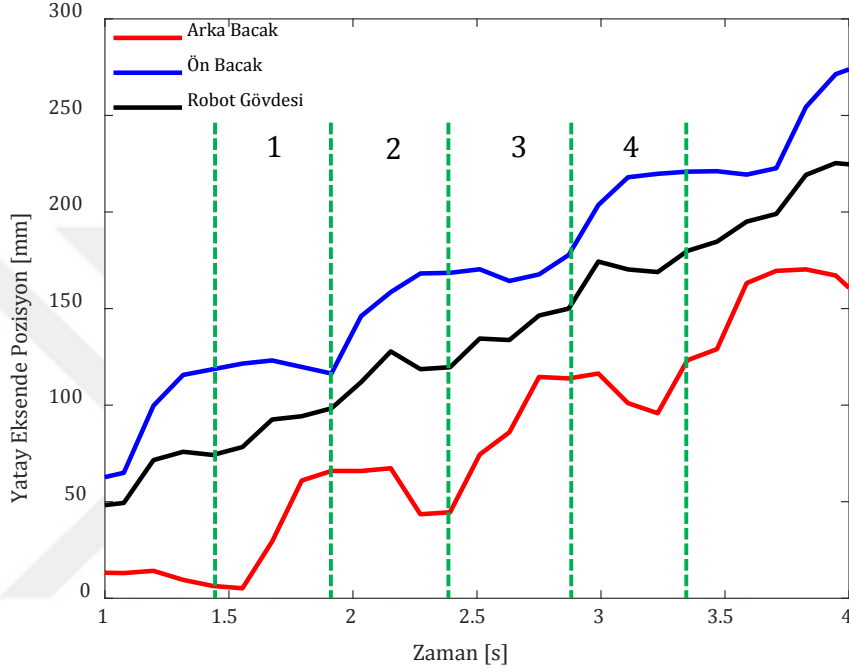
Robotun hareket mekanizması göz önünde bulundurulduğunda bacakların ileri konumdan geri konuma gelirken harekete katkı verdiği bilinmektedir. Bu durumda grafikler üzerinde bacak pozisyonlarının ileri yönde hareket etmediği durumlarda gövde hareketine katkı verdiği sonucuna ulaşılmaktadır. Grafiklerde ön bacakların harekete katkı verdikleri durumlar daha plato şeklinde bir eğime sahipken arka bacakların harekete katkı verdiği durumlarda negatif yönde konumlarının değiştiği gözlenmektedir. Görüntü işleme ile elde edilen veride kaydedilmiş olan pozisyon bilgilerinin bağıl olmadığı, yani gerçek pozisyon verisi olduğu göz önünde bulundurulduğunda robot ilerlerken bacağın gerçek konumunun bacak hareketinin yanında gövde hareketine bağıl olarak da değiştiği sonucuna ulaşılmaktadır. Bu durumda bacak ileri konumdan geri konuma doğru hareket ederken gövde hareketine de aynı zamanda katkı verdiği için gövde bir bütün olarak ileri hareket etmekte ve gövdeye bağıl olan bacak da aynı ölçüde ileri hareket etmektedir. Bu aşamada gövde üzerinde de konumu değişen bacağın

gerçek konumu gövdenin konum değişimi ile bacağın gövde üzerindeki konum değişiminin farkıdır. Robotun tasarımı gereği Resim 4.2 üzerinde de görüldüğü gibi görüntü alınan tarafta robotun ön bacağı arka bacağından kısadır. Bu durum bacaklar aynı açı ile yer değiştirdiğinde ön bacağı arka bacağına göre yer ile temas ettiği noktada daha az yer değiştirmesine neden olmaktadır. Gözlenen bu sonuçlara göre ön bacak negatif yönde daha az hareket ettiği için gövdenin hareketi ile birleştiğinde mutlak konum olarak negatif yönde daha az hareket ederken arka bacağı mutlak konumu göreceli olarak daha fazla negatif yönde yer değiştirmektedir.

Bu durum başka açıdan incelendiğinde bacakların harekete katkılarının da farklı olduğu sonucuna ulaşılabilmektedir. Robot gövdesinin hareketini sağlayan katkı, bacakların yer ile temas ettikleri noktaların konum değişimi ile sağlanmaktadır. Bu durumda bir bacak yer ile temas ettiği noktada ne kadar yer değiştiriyorsa teorik olarak robotun da o miktarda yer değiştirmesi gerekmektedir. Bu durumda, aslında negatif yönlü hareketin fazla olduğu arka bacağı da grafik üzerinde ön bacağına benzer şekilde davranması beklenen bir durumdur. Buna rağmen arka bacakta negatif yönlü hareketin daha fazla miktarda görünmesi ön bacağı robotun hareketine daha fazla katkı verebildiği sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Bu durumun en büyük nedeni olarak robotun ön tarafında konumlandırılmış olan ve dönme işlemini sağlayan servo motorun varlığı gösterilebilir. Ön kısımda bulunan servo motor nedeniyle robotun ağırlık merkezi ön kısmına daha yakın olarak konumlanmaktadır. Bu nedenle önde bulunan bacaklarda yer ile oluşturulan sürtünme kuvveti daha fazla oluşacağından ön bacaklarda kayma mekanizması arka bacaklara göre daha az ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilen grafiklerde gövde konumu ile bacakların konumlarına bakıldığında önerilen bu sonucu destekleyecek şekilde bir davranış görülebilmektedir. Robot gövdesinde negatif yönlü hareket gözlenen durumlar incelendiğinde büyük bir çoğunluğunun arka bacağı negatif yönlü hareketi sırasında ortaya çıktığı görülmektedir. Bacakların ileri yönde hareket etmediği durumların harekete katkı verdikleri durumlar olduğu göz önünde bulundurulduğunda kayma mekanizmasının arka bacaklarda daha fazla yaşandığı sonucuna ulaşılmaktadır.

6.5 rad/s giriş hızında elde edilen bacak ve gövde konumları daha detaylı incelendiğinde yine ön ve arka bacakların harekete ne ölçüde katkı verebildikleri analiz edilebilmektedir. Şekil 4.8'de gösterilmiş olan grafikte bacak ve gövde konumlarında bacakların harekete katkı verdiği fazlar incelenmiştir. Robotun hareket mekanizmasından kaynaklanacak şekilde grafik üzerinde bacakların ileri yönde hareket etmediği durumlarda harekete katkı verdiği görülmektedir. Buna göre şekilde 1 ve 3 numaralı fazlar ön bacağı harekete katkı verdiği durumları gösterirken 2 ve 4 numaralı fazlar arka bacağı harekete katkı verdiği durumları göstermektedir. Robot gövdesinin hareketi bu fazlarda incelendiğinde robotun 1 ve 3 numaralı fazlarda sırasıyla 50.48 mm/s ve 63.6 mm/s hızlarla ilerlediği, 2 ve 4 numaralı fazlarda ise sırasıyla 44.41 mm/s ve 62.55 mm/s hızlarla ilerlediği görülmüştür. Robotun veri alınan tarafında ön bacağı kısa, arka bacağı uzun olduğu düşünülürse teorik olarak arka bacağı

harekete daha fazla katkı vermesi beklenmektedir. Ancak şekilden çıkarılan sonuçlara göre ön bacağın harekete katkı verildiği fazlarda robot hızının daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, daha önce de önerildiği gibi, ön bacakların robot hareketine arka bacaklara göre daha verimli bir şekilde katkı verdiği ve yine benzer şekilde arka bacaklarda daha fazla kayma durumunun gözlemlendiği görülmektedir.



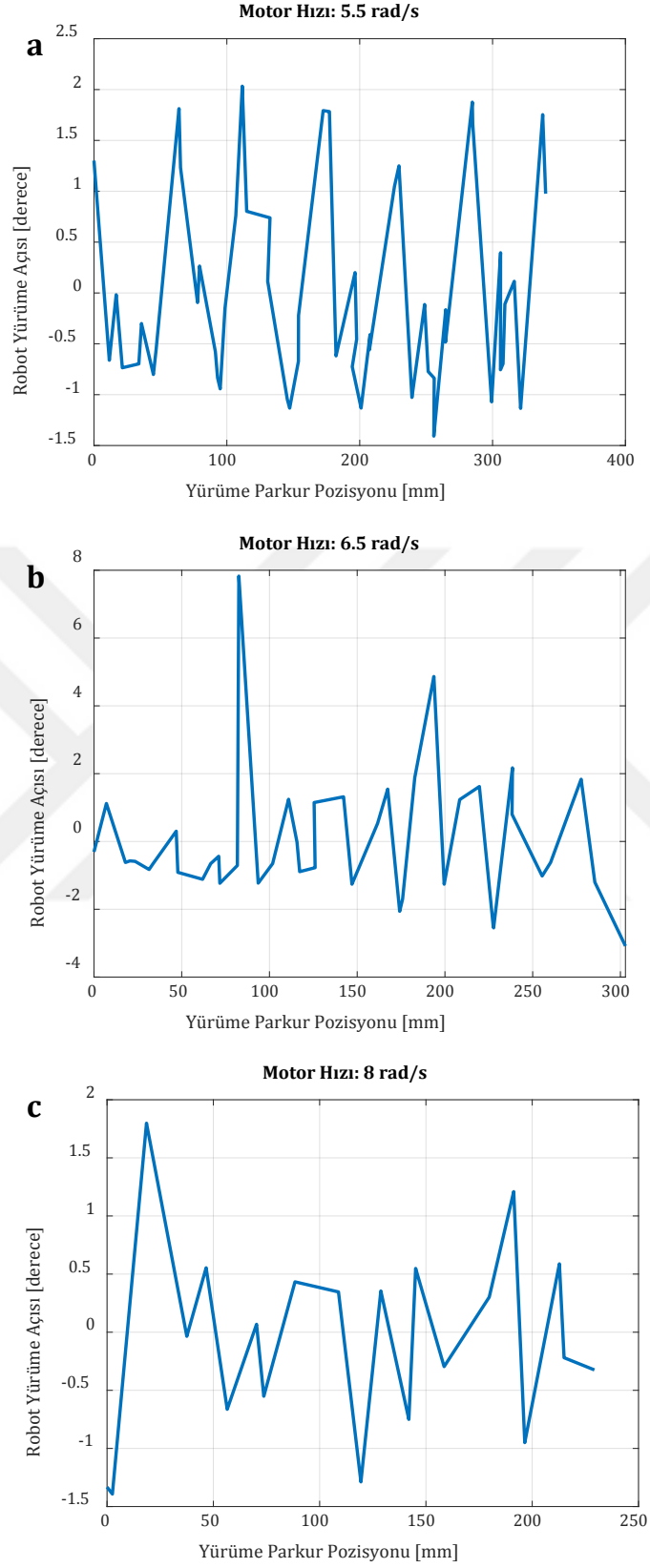
Şekil 4.8. 6.5 rad/s giriş hızı için bacak ve gövde konumlarının bacakların hareket fazlarına göre incelenmesi: 1 ve 3 numaralı fazlar ön bacağın harekete katkı vermesi; 2 ve 4 numaralı fazlar arka bacağın harekete katkı vermesi.

Şekil 4.4'te 6.5 rad/s giriş hızı değerinde meydana gelen hız yükselişindeki yavaşlamayı açıklamak için robotun 5.5 rad/s, 6.5 rad/s ve 8 rad/s değerlerinde meydana gelen yunuslama açıları ve dikey düzlemdeki gövde hareketleri de incelenmiştir. Öncelikle robotun bahsedilen giriş hızı değerlerinde pozisyonuna göre Şekil 4.9'da verilmiş olan yunuslama açıları incelendiğinde 8 rad/s giriş hızında görülen hareketin diğer hızlara göre daha stabil olduğu görülmektedir. Grafiklere göre elde edilen bu stabilite farkı robotun yürüme hızındaki artış hızının artmasını da bir ölçüde açıklamaktadır. 5.5 rad/s ve 6.5 rad/s giriş hızı değerlerinde robotun bacaklarında yürüme esnasında meydana gelen kaymalar nedeniyle robotun yer ile yapmış olduğu açının daha fazla değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

Şekil 4.4'te verilmiş olan yürüme hızı grafiğinde artışın yavaşlamaya başladığı giriş hızı değeri 5.5 rad/s, artış oranının en yavaş olduğu giriş hızı değeri ise 6.5 rad/s olarak gözlemlenmiştir.

Şekil 4.9’da verilen grafiklere göre robotun yer ile yaptığı açı değişiminin en fazla olduğu giriş hızı değeri de yine 6.5 rad/s’dir. Bu durum, robotun yürüme hızını olumsuz etkilediği için bu giriş hızı değerinde robot hızındaki artış oranını düşürmektedir. Giriş hızı değerinin 5.5 rad/s olduğu durumda yer ile yapılan açı, 8 rad/s giriş hızında görülen açı değişimine göre daha fazla olsa da 6.5 rad/s giriş hızında ortaya çıkan değişimden daha düşük olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, robotun yer ile yaptığı açının pozisyona göre değişiminin bahsedilen üç farklı giriş hızı değerinde incelenmesi sonucunda 8 rad/s giriş hızı değerinde diğer hızlara göre daha kararlı bir yürüme işleminin gerçekleştirildiği görülmüştür. Bu durum da Şekil 4.4’te görülen yürüme trendindeki değişimi açıklamaktadır.



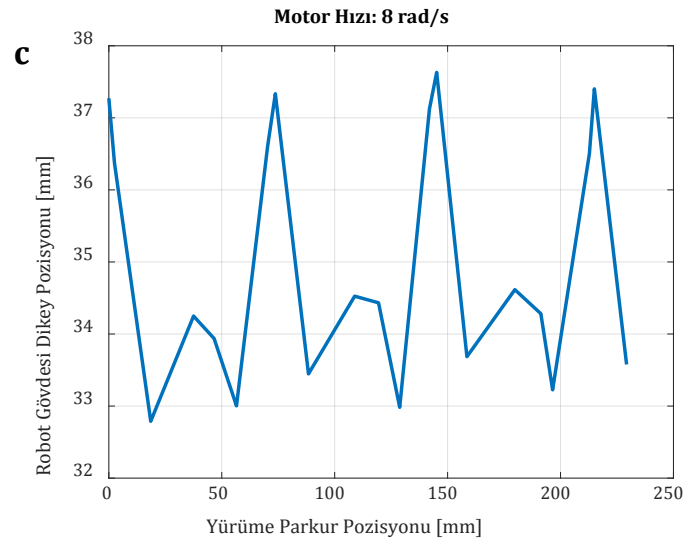
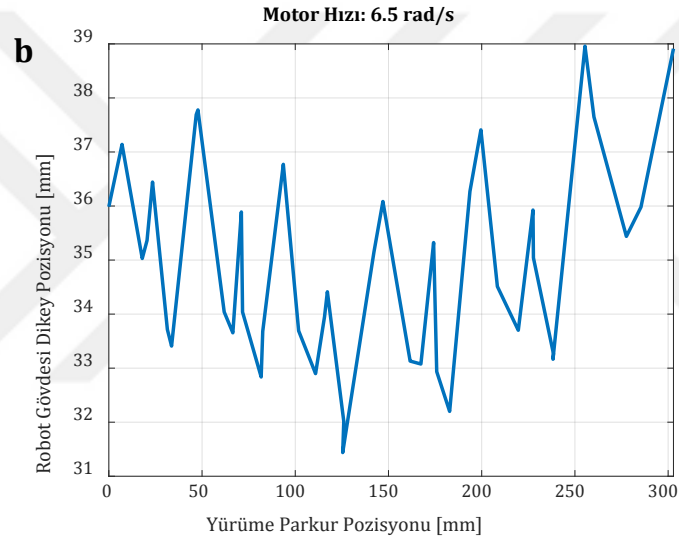
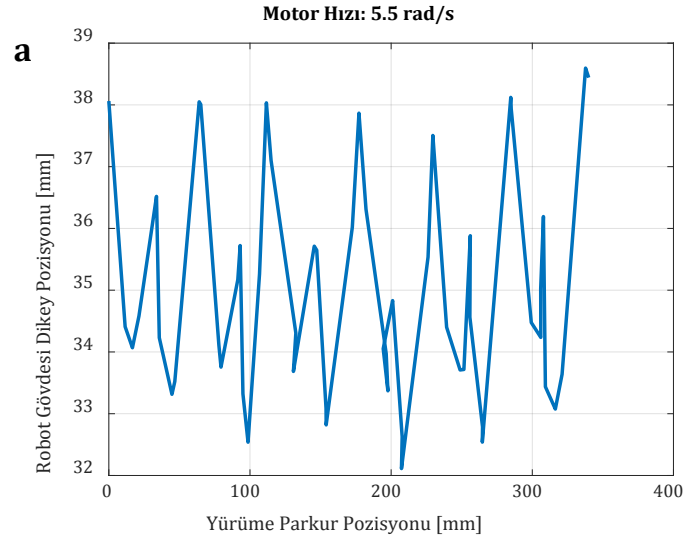


Şekil 4.9. Robot gövdesinin hareketine göre yunuslama açısı: a) 5.5 rad/s, b) 6.5 rad/s ve c) 8 rad/s.

Yunuslama açısının değişimine ek olarak robot gövdesinin bahsedilen üç farklı hız değerinde yürüme esnasında dikey düzlemde ne kadar yer değiştirdiğine de yapılan analizde yer verilmiştir.

Şekil 4.10'da verilmekte olan sonuçlara göre robotun üç farklı hızda da dikey düzlemde belirgin farklı davranışının bulunmadığı görülmektedir. Bu durumda hız değişiminin robotun dikey düzlemde daha fazla veya daha az yer değiştirdiğine neden olmadığı sonucuna ulaşılmaktadır.

Robotun yürüme hızındaki artışın bahsedilen üç farklı hızda değişkenlik gösterdiği düşünöldüğünde bu durumun robotun dikey pozisyonundaki değişim farklılıklarıyla açıklanamayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Ancak robotun yunuslama açısında görölmüş olan farklılıklar daha önce yapılan önermeye katkı vermektedir. 8 rad/s giriş hızı değerinde 5.5 rad/s ve 6.5 rad/s giriş hızı değerlerinde olduğundan daha stabil bir yürüyüş gerçekleştirilebildiği için robotun yürüme hızındaki artışın daha yüksek olması bu şekilde açıklanabilir.



Şekil 4.10. Robot gövdesinin hareketine göre dikey düzlemde pozisyonu: a) 5.5 rad/s, b) 6.5 rad/s ve c) 8 rad/s.

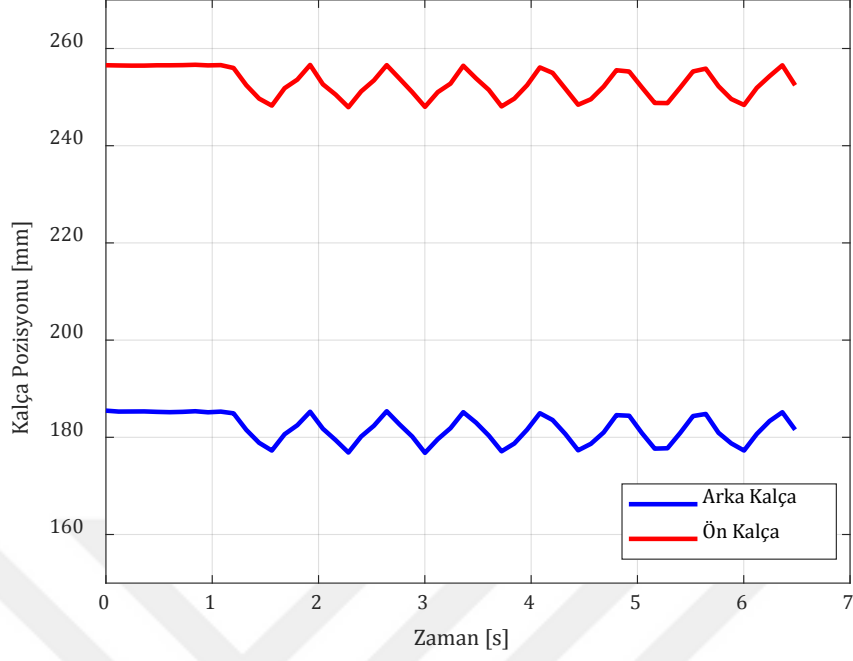
4.3. Hız Analizi

Robotun kullanımı esnasında hareketinin ne şekilde gerçekleşeceğini önceden tahmin edilebilir olması gerekmektedir. Bunu sağlamak için robotun hangi giriş değerinde hangi hızda yürüyeceği, ne kadar zamanda dönüş yapabileceği gibi bilgilerin edinilmesi gerekmektedir. Bu nedenle robotun Şekil 4.4'te verilmiş olan hız grafiği baz alınarak kendisine verilen giriş hız değerine bağlı olarak hangi hızda gideceğinin önceden tespit edilebilmesi için matematiksel bir model oluşturulmuştur.

Robotun yürüyüş hız modelini incelemeyen önce tasarımsal olarak her giriş hızı için teorik maksimum yürüyüş hızının belirlenmesi hem Şekil 4.4'teki hız grafiğini daha iyi analiz etmek için, hem de hız modelinin doğruluğunu belirlemek için önem teşkil etmektedir.

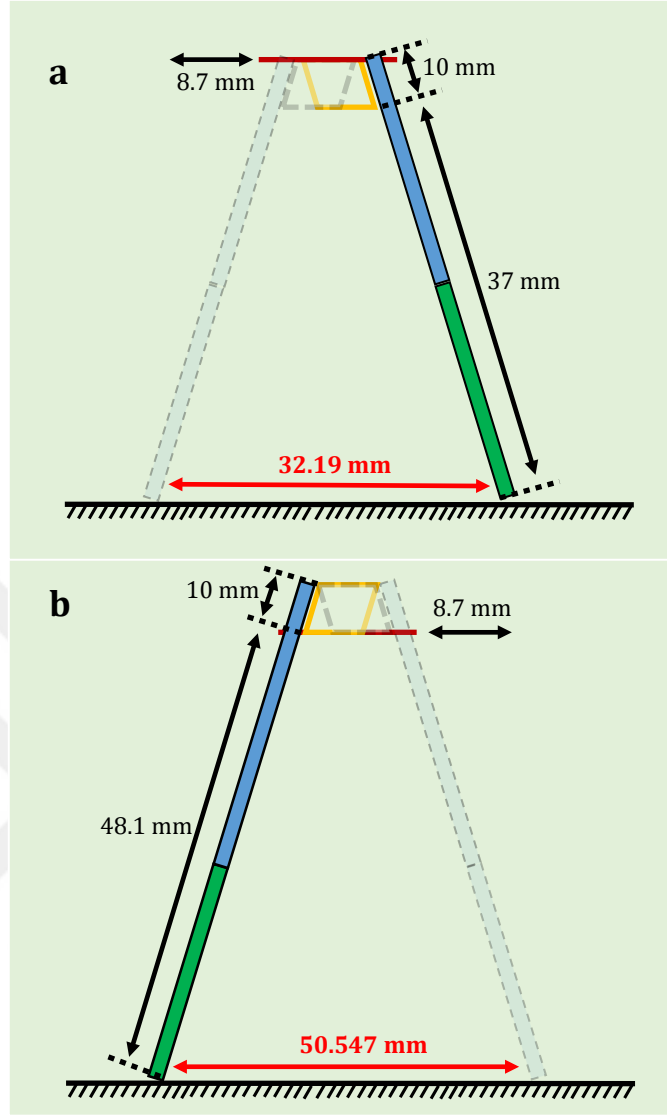
Robotun tasarımı gereği servo motorun bir tam turunda teorik olarak ne kadar yer değiştirme sağlanabileceği geometrik olarak belirlenebilmektedir. Bu belirlemenin gerçekleştirilebilmesi için robotun kalça eklemlerinin motor hareketine göre ne kadar yer değiştirdiğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için görüntü işleme düzeneği kullanılarak robot askıda çalıştırılmış ve kalça eklemlerinin pozisyonları kaydedilmiştir. Daha sonra elde edilen veride kalça eklemının yer değiştirme miktarı belirlenmiştir. Elde edilen verinin güvenilirliğini artırmak amacıyla deneyler 10 kez tekrar edilmiştir. Belirlenen yer değiştirme miktarı tekrar edilen deneylerin ortalamaları alınarak ortaya çıkarılmıştır.

Kalça eklemlerinin robot sabit pozisyonda askıda çalışırken yer değiştirmelerini gösteren grafik Şekil 4.11'de verilmiştir. Elde edilen verilere göre robotun kalça eklemının pozisyonu 8.7 mm büyüklüğünde bir genlik değerine sahiptir. Bu değer robot üzerinde bulunan üst plakaya işaret koyularak motorun pozisyonları değiştirildiğinde işaretli noktaların robot üzerinde sabit bir nokta referans alınarak ölçülen mesafeleri ile de teyit edilmiştir.



Şekil 4.11. Sabit pozisyonda askıda duran robotun çalışırken kalça eklemlerinin pozisyonları.

Robotun kalça eklemlerinde hareket esnasında meydana gelen yer değişimi kullanılarak bacakların motorun bir tam turunda harekete teorik olarak ne kadar katkı vermeleri gerektiği hesaplanmıştır.



Şekil 4.12. Bacakların kalça eklemine bağlı olarak hareketleri: a) Kısa bacak ve b) Uzun bacak.

Şekil 4.12’de kısa ve uzun bacaklar için kalça eklemine 8.7 mm değerindeki hareketi esnasında yer değiştirmelerinin hesaplandığı serbest cisim diyagramı verilmiştir. Geometrik olarak uygulanan benzerlik teoremi ile bacakların servo motorun bir tam turunda yer değiştirmeleri uzun ve kısa bacak için sırasıyla 50.547 mm ve 32.19 mm olarak hesaplanmıştır.

Robotun ileri hareketini sağlayan servo motorun bir tam turunda hem kısa, hem de uzun bacak birer kez harekete katkı vermektedir. Bu durumda motorun bir tam turunda robotun teorik olarak ilerlemesi gereken mesafe Denklem 1’de verildiği şekilde dx_{robot} olarak gösterilmekte ve kısa ve uzun bacakların ilerlemesi gereken mesafe olan $dx_{kısa}$ ve dx_{uzun} değerlerinin toplamına eşit olmaktadır.

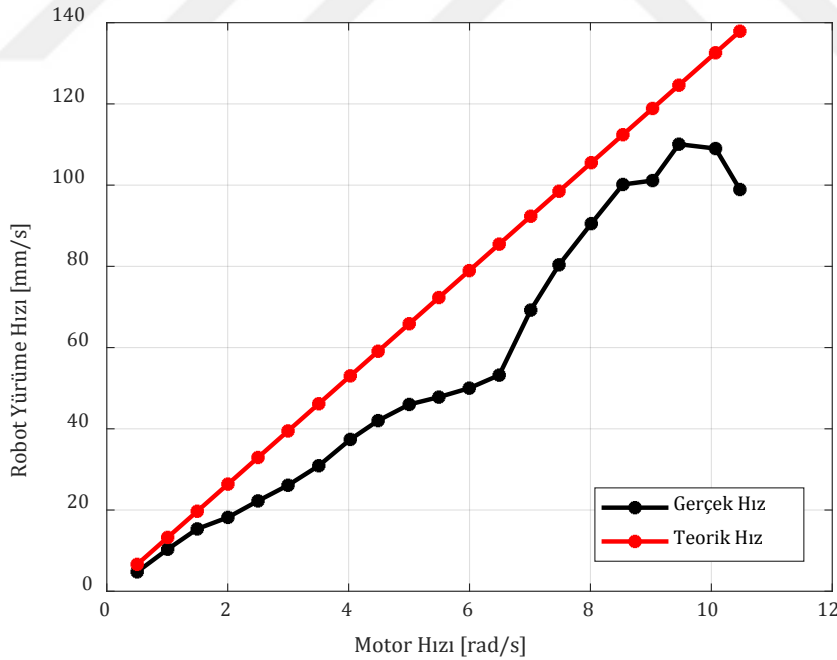
$$dx_{robot} = dx_{kisa} + dx_{uzun} \quad (1)$$

Denklem 1 kullanılarak elde edilen 82.737 mm değerinin kullanımıyla motora verilen giriş hızı değerleri göz önünde bulundurularak her bir giriş hızı için olması gereken teorik maksimum yürüme hızı hesaplanmıştır. Bu hesaplama yapılırken bacakların yere hareketi hiçbir kayıp yaşamadan aktardıkları ideal durum göz önünde bulundurulmuştur. Bu nedenle bu değer maksimum yürüme hızı olarak adlandırılmıştır. Bu hesaplama Denklem 2'de verilmektedir.

$$v_{robot} = \frac{dx_{robot}}{T_{servo}} \quad (2)$$

Verilen denklemde v_{robot} robotun mm/s biriminde hızını gösterirken, T_{servo} ise servo motorun 2π radyan açığı ne kadar sürede kat ettiğini gösteren periyot değerini göstermektedir.

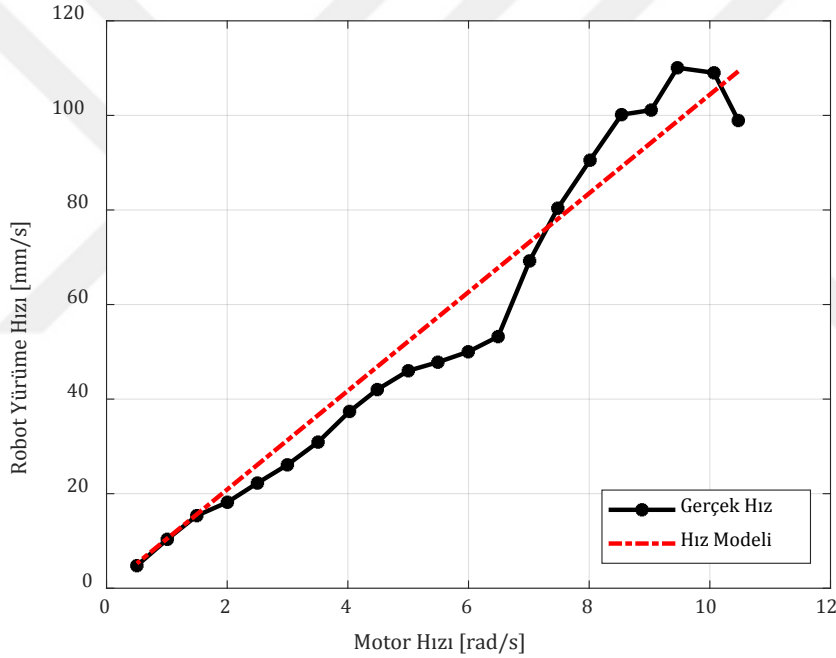
Denklem 2 kullanılarak elde edilen teorik hız değerleri robotun gerçek hız değerleri ile karşılaştırılabilmesi açısından aynı grafik üzerinde Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Motor hızına göre robotun gerçek ve teorik olarak hesaplanan hız değerleri.

Robotun teorik olarak ilerlemesi gereken hız değerleri incelendiğinde deneysel olarak elde edilen hız değerlerinin tutarlı sonuçlar verdiği görülmektedir. Deney verisinin teorik olarak hesaplanan veriden düşük çıkması beklenen bir durumdur. İki değer arasındaki fark büyük ölçüde hareketin yere aktarılamadığı durumlar olan sürtünme kayıplarından kaynaklanmaktadır. Deney sonuçlarının doğru bir şekilde kaydedildiğini kanıtlayacak şekilde oluşan bu grafikte giriş hızının servo motorun limitlerine ulaştığı değerlerde teorik hızla deneysel hızın birbirinden beklenildiği gibi uzaklaştığı görülmektedir.

Robotun teorik hız verileri ile gerçek verilerin karşılaştırılması sonucunda deney sonuçlarının tutarlı olduğu belirlendikten sonra robotun gerçek hızının verisi kullanılarak lineer bir model oluşturulmuştur. Hız modeli oluşturulurken gerçek hız verisinde fazla düşüşün yaşandığı değer olan 10.5 rad/s giriş hızına karşılık gelen gerçek hız değeri veriden çıkarılmıştır. Bu sayede denklem robotun hareketini daha iyi temsil edebilecektir.



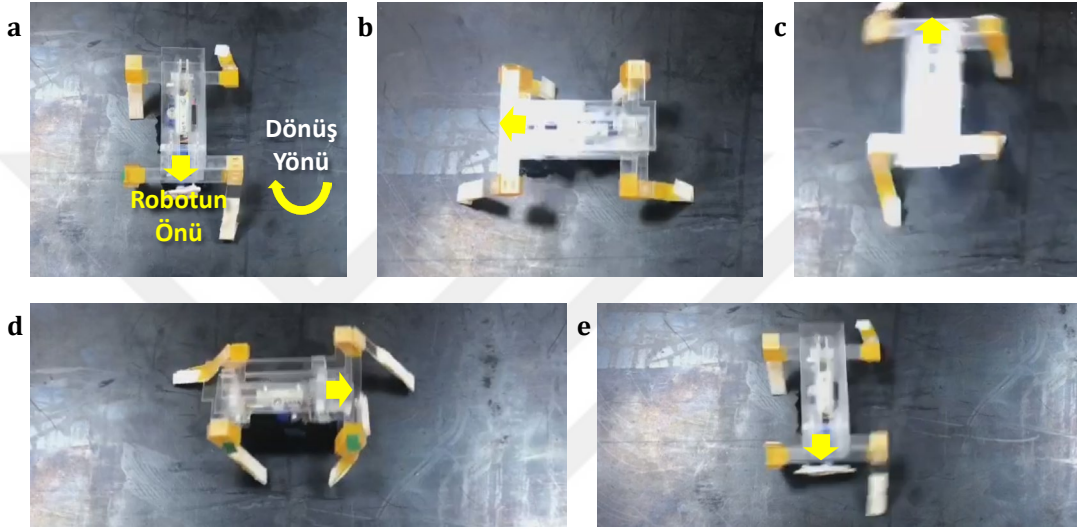
Şekil 4.14. Robotun deneysel veriye göre oturtulmuş olan hız modeli.

Robotun hız modelinin grafiği Şekil 4.14'te gösterilmektedir. Grafik üzerinde gösterilen model verisi gerçek veri ile %95.6 oranında uyumluluk göstermektedir. Robotun giriş hızı değerine göre gerçek hızının nasıl değiştiği Denklem 3 ile ifade edilmiştir. Bu denklem, Şekil 4.14'te deneysel veri üzerine oturtulmuş grafiğin denklemi olarak elde edilmiştir.

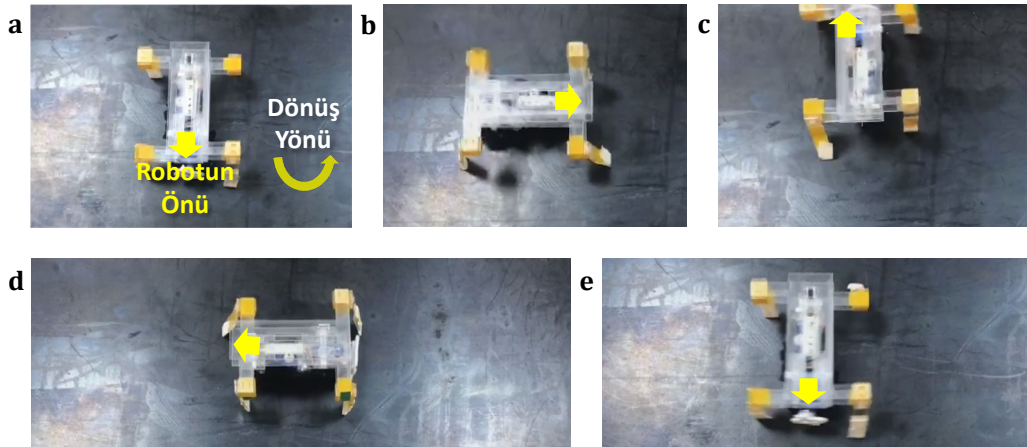
$$v_{robot} = 10.441 \times w_{servo} \quad (3)$$

Modelde w_{servo} değeri ilerlemeyi sağlayan servo motorun açısal hızını temsil etmektedir.

Robotun hız modeli ilerlemesi gereken yolu katetmesi için belirlenecek giriş değerleri için önem teşkil etmektedir. Yürüyüşün tam anlamıyla tahmin edilebilir olması için robotun dönme hareketinin de tahmin edilebilir olması gerekmektedir. Bu nedenle yürüme testlerinin yapıldığı kauçuk yüzeyde robotun ne ölçüde dönme işlemini gerçekleştirebileceği de modele dahil edilmelidir. Bu doğrultuda kauçuk yüzeyde saat yönünde ve saat yönünün tersi yönde dönme işlemi gerçekleştirilmiş ve robotun dönüş hızı belirlenmiştir.

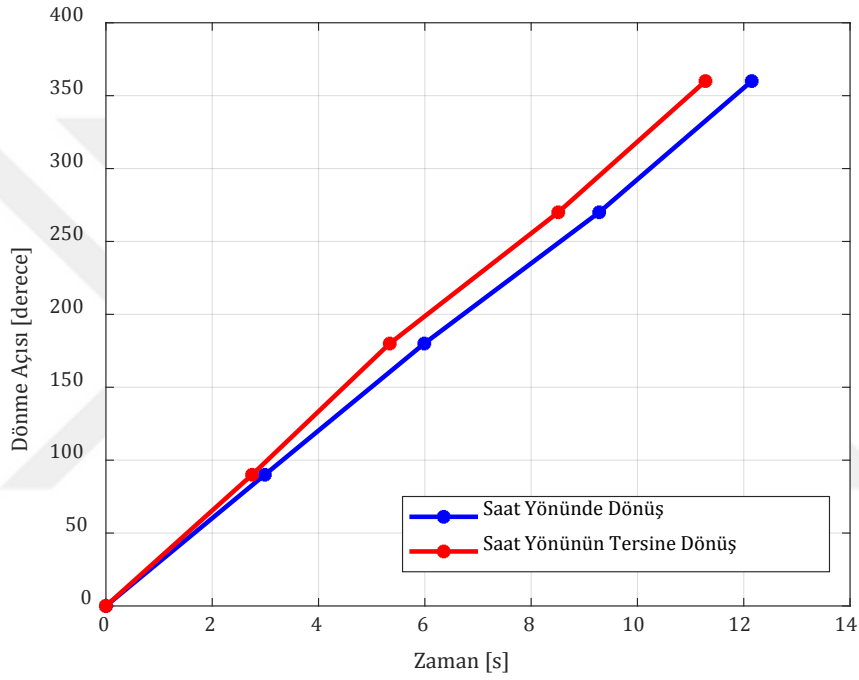


Resim 4.4. DASTeQ kauçuk yüzeyde saat yönünde dönüş performansı. a) 0°, b) 90°, c) 180°, d) 270°, e) 360°.



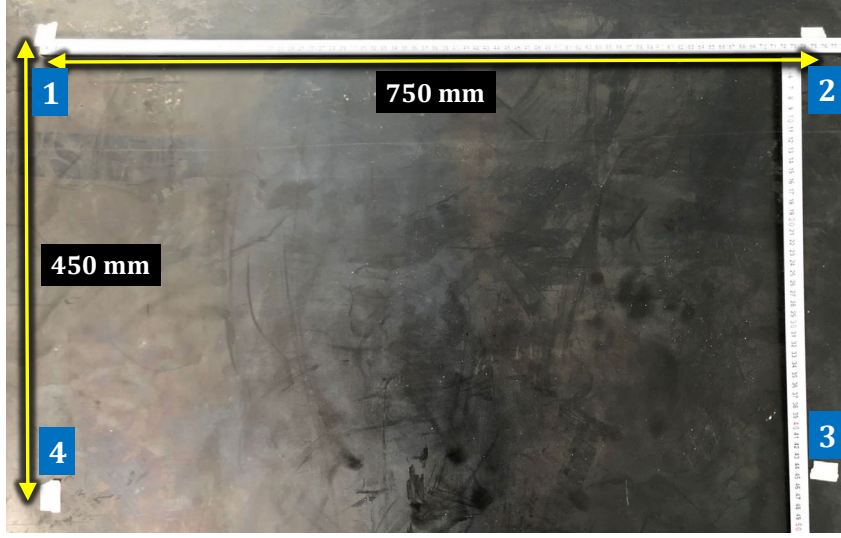
Resim 4.5. DASTeQ kauçuk yüzeyde saat yönünün tersi yönde dönüş performansı. a) 0°, b) 90°, c) 180°, d) 270°, e) 360°.

Resim 4.4. DASTeQ kauçuk yüzeyde saat yönünde dönüş performansı. a) 0o, b) 90o, c) 180o, d) 270o, e) 360o. Resim 4.4 ve Resim 4.5'te sırasıyla robotun saat yönünde ve saat yönünün tersi yönde dönme testlerinin ne şekilde yapıldığı görülmektedir. Bu testlerin Şekil 4.15'te görülmekte olan sonuçlarına göre robotun 90° açılık bir dönüşü yaklaşık 3 saniyede tamamladığı belirlenmiştir. Buna ek olarak, dönüş performansı sonuçlarında robotun saat yönünde veya saat yönünün tersi yönünde gerçekleştirdiği dönüşlerinin benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Dönüş performans sonuçları robotun model çalışmasında dikkate alınmış ve modelin validasyonu için gerçekleştirilen yol izleme testlerinde dönüş parametresi olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.15. DASTeQ dönüş performansı testlerinin sonuçları.

Yol izleme testleri için öncelikle parkur oluşturulmuştur. Robotun yol izleme kabiliyetinin sağlıklı bir şekilde ölçülebilmesi için düz bir yol yerine dönme işleminin de test edilebileceği bir parkur oluşturulmuştur.



Resim 4.6. Yol izleme parkuru.

Resim 4.6'da gösterilmekte olan yürüme parkuru 750x450 mm boyutlarında bir dikdörtgen şeklinde oluşturulmuştur. Robotun başlangıç noktası olan "1" noktasından sırasıyla "2", "3" ve "4" numaralı noktalara ulaşarak en son tekrar "1" noktasına dönmesi hedeflenmiştir. Robotun giriş verileri Denklem 3'te verilen model kullanılarak oluşturulmuştur. Kullanılan mikroişlemcinin zaman kaydetme limitleri nedeniyle giriş hızı 9 rad/s olacak şekilde belirlenmiştir. Bu değer Denklem 3'te yerine yazıldığında robotun model hızı 93.969 mm/s olmaktadır. Bulunan hız değerine göre 750 mm uzunluğundaki bölümü yaklaşık 8 saniyede, 450 mm uzunluğundaki bölümü ise yaklaşık 4.8 saniyede tamamlaması ön görülmüştür.

Bulunan zaman değerleri kullanılarak robotun yol izleme parkurunu tamamlamasını sağlayacak şekilde hareket kodu yazılmıştır. Yazılımda dönme işlemi için daha önceden belirlenmiş olan süre dikkate alınmıştır. Robotun yaklaşık 3 saniye sürede 90° dönüş yapabildiği göz önüne alındığında parkurda her bir dönüş noktası için 3 saniyelik süre belirlenmiştir.

Yapılan testlerde robotun belirlenen parkuru takip edebildiği görülmüştür. Resim 4.7'de parkur tamamlama deneyi sırasında çekilen videoya ait ekran görüntüleri gösterilmektedir. Resimde de görüldüğü üzere robotun küçük hatalarla kendisine verilen görevi yerine getirdiği belirlenmiştir.

Parkur ekran görüntülerinde dikkat çeken bir başka husus da robotun dönüş noktalarındaki performansdır. Robot tasarımı gereği dönme işlemi neredeyse dairesel olarak gerçekleştirebilmektedir. Ancak arka bacak üzerinde mesnetli bir şekilde dönüş işlemi gerçekleştirildiği için robot dönerken doğrultusunda az da olsa kaymalar meydana gelmiştir. Bu durum özellikle parkur üzerindeki "2" ve "3" numaralı dönüş noktalarında açık şekilde

görülmektedir. Bu sonuçlar, DASTeQ'in yürüme parkuru deneylerinde istenilen pozisyonlara düşük bir hata payı ile ulaşabildiğini göstermektedir.



Resim 4.7. DASTeQ yol izleme parkuru performansı.

SONUÇ

Bu tez çalışmasında bacaklı, özgün bir mini robot tasarlanmış, üretilmiş ve testleri gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen robotun üretiminde SCM tekniği kullanılmıştır. Robotun tasarımı başlangıcından son aşamasına gelene kadar iteratif bir şekilde ele alınmış ve bu aşamalar ayrıntılı şekilde tartışılmıştır. Kullanılan SCM tekniğinde tasarimsal süreç boyunca dikkate alınan özgün yöntemler geliştirilen robotun yenilikçi yönlerini ortaya koymaktadır. Bunlardan ilki geliştirilen parça birleştirme tekniğidir. Bu parça birleştirme tekniğinde literatürden farklı olarak mekanik pinlerin yardımıyla yapıştırma sağlanmıştır. Çalışmada ortaya konulan başka bir özgünlük de robotun yürüme mekanizmasıdır. Bu noktada, ileri hareket için sadece tek bir eyleyici kullanımı literatürdeki çalışmalar incelendiğinde yenilikçi bir yaklaşımdır. Ayrıca, bacakların yürüme esnasında yerden kaldırılması için bir eyleyici kullanılmaması ve kendi salınımları ile harekete katkı vermeleri de diğer bir özgünlük konusudur. Son olarak robot prototipinde insan diz yapısından esinlenerek geliştirilen özgün diz eklemi, diz kapağı ve yumuşak tendon yapısı tasarımları kullanılmıştır.

Robotun tasarimsal geliştirme aşamaları sürecinde ortaya üç temel robot modeli çıkarılmıştır. Bu modellerden bir tanesi bilek eklemine bulunan nitinol eyleyici ile ayakların yerden kaldırılmasının hedeflendiği altı bacaklı robot modelidir. Bu modelde hareket mekanizması olarak 3D yazıcı ile üretilmiş olan krank biyel sistemi kullanılmıştır. Yapılan testlerde bu robot modelinin performans isteklerini sağlamadığı görülmüştür. Bu nedenle nihai modelin belirlenmesi için yapılan testler diğer iki robot modeli üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bacakları bükme için bir eyleyicinin kullanılmadığı diz eklemine sahip bu iki modelden bir tanesi altı bacaklı olarak üretilmişken diğeri dört bacaklı olarak üretilmiştir. Daha sonra geliştirilen bu iki robot modelin aynı şartlarda hareket performansları karşılaştırılmıştır. Test sonuçları dört bacaklı modelin altı bacaklı modele göre daha üstün bir yürüyüş performansı ortaya koyduğunu göstermiş ve bu nedenle bu model nihai robot modeli olarak kabul edilmiştir. Bu dört bacaklı robot modeli DASTeQ (Double Actuated Soft Tendon Quadruped) olarak ayrıca isimlendirilmiş ve yürüyüş analizi ve hız modellemesinin yapıldığı testler bu model dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

DASTeQ için yürüyüş analizi yapılmadan önce optimum olarak yürüyebildiği yüzeyin belirlenmesi amacıyla farklı yüzeylerde ön yürüyüş testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin sonucunda en uygun yüzeyin kauçuk yüzey olduğu belirlenmiş ve daha sonraki testler kauçuk yüzey üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Robotun hareket analizini ve hız modelini deneysel olarak ortaya koyabilmek için bir görüntü işleme yazılımı geliştirilmiştir. Bu yazılım kullanılarak robotun üzerine yapıştırılan renkli kağıtlar sayesinde robotun belirli noktalarının hareketleri düzlemsel veri olarak kaydedilmiştir. Bu şekilde literatürde hareket yakalama olarak kullanılan deney yöntemine de alternatif olacak bir yöntem geliştirilmiştir.

Görüntü işleme yazılımı kullanılarak öncelikle robotun hareket analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde ilk olarak robotun gövdesinin yürüme esnasında dikey düzlemde ne kadar yer değiştirdiğine bakılmış ve dikey düzlemde kayda değer bir yer değiştirme görülmemiştir. Bu durum robotun stabil yürüdüğünü destekleyen bir unsurdur. Başka bir performans göstergesi olarak robotun yürürken yer ile yaptığı açıdaki değişim incelenmiştir. Bunun için robotun kalça eklemlerinin dikey pozisyonları yürüyüş boyunca test edilmiş ve iki kalça eklemi arasında oluşturulan vektörün yer ile yaptığı açı değeri belirlenmiştir. Literatürde yunuslama açısı olarak geçen bu değerın yapılan testlerde düşük mertebelerde olduğu gözlemlenmiştir. Bu testler sonucunda ulaşılan sonuç da robotun kayda değer bir seviyede stabil yürüdüğünü ortaya koymaktadır.

Görüntü işleme ile elde edilen bir başka veri de robotun farklı giriş hızı değerlerinde yürüyüş hızlarıdır. Bu doğrultuda yapılan testler sonucunda robotun yürüme hızının giriş hızının artmasıyla yükseldiği sonucuna ulaşılmıştır. Yürüyüş hızının yükselme eğilimi belirli hızlarda değişkenlik göstermiştir. Düşük hızlarda lineer bir artış gözlenirken orta değerlerde artış hızı düşmüş ve sonra daha yüksek giriş hızı değerlerinde tekrar yükselmiştir. Robotun giriş hızlarına göre yürüme hız grafiğinde görülen bu değişimi açıklamak için robotun yer ile yaptığı açının değişimi farklı hız değerlerinde yapılan testlerle de incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda robotun belirli bir giriş hızı değerinden daha hızlı durumlarda daha stabil yürüdüğü sonucuna varılmıştır. Özellikle yürüme hızındaki artışın yavaşladığı hız değerlerinde robotun yunuslama açısının daha fazla olduğu görülmüştür. Bu değişimin nedenini incelemek için yapılan başka bir testte de bacakların yer ile temas eden noktaları ile robot gövdesinin yürüyüş boyunca pozisyonları farklı yürüme hızlarında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, robotun belirli bir hız değerine kadar düşük giriş hızlarında hız artışının sabit olduğu görülmüştür. Ancak belirli bir hızdan sonra hız artışı yavaşlamış ve hız eğrisinde plato benzeri bir davranış görülmüştür. Daha yüksek giriş hızlarında robotun hız artış oranının tekrar yükseldiği görülmüştür. Bu değerlendirmeler sonucunda robotun ilgili giriş hızı değerlerinde bacaklarının harekete daha fazla katkı verebildiği sonucuna ulaşılmıştır. Bacakların harekete daha az katkı verdiği durumlarda yapılan görüntü işleme analizlerinde bacaklarda kayma oluştuğu gözlenmiştir.

Robotun farklı hızlarda yürüme test sonuçları ayrıca geometrik olarak oluşturulan teorik yürüme hızlarıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre robotun yürüme hız değişim eğrisinin teorik olarak belirlenen maksimum yürüme hız değişimiyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Son olarak robotun farklı giriş hızları için yürüme hızının teorik olarak belirlenebilmesi için matematiksel bir model oluşturulmuştur. Bu modele robotun dönme performansları da dahil edilerek hareketinin önceden simüle edilmesi hedeflenmiştir. Oluşturulan model kullanılarak robotun yol izleme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler sonucunda robotun kendisi için simüle edilen parkuru başarılı bir şekilde tamamladığı görülmüştür.

Bu tez çalışmasında tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen robotun hareket analizinin yapıldığı deneyler gerçekleştirilmiştir. Literatürde genellikle keşif amaçlı kullanım için geliştirilen minyatür robotların kullanım alanına uygunluğu da önem teşkil etmektedir. Daha sonraki çalışmalarda kullanılabilirliği kanıtlanmış olan DASTeQ üzerinde modifikasyonlar gerçekleştirilebilecektir. Özellikle stabil yürüyebilen DASTeQ için ilerideki çalışmalarda kamera entegrasyonu ile görüntü alma testleri gerçekleştirilebilecektir. Buna ek olarak robotun keşif amaçlı kullanılabileceği durumlar dikkate alınarak oluşturulacak yeni test ortamlarında hareket analizleri ve modelleme yapılabilecektir.

DASTeQ'in yürüme parkuru deneylerinde istenilen pozisyonlara yaklaşık %10 hata payı ile ulaşabildiği görülmektedir. Bu hata payı literatürdeki örneklerle karşılaştırıldığında kabul edilebilir büyüklüktedir. Gelecek çalışmalarda DASTeQ üzerine entegre edilecek sensörler ve kamera yardımıyla ulaşılması planlanan noktalarla ilgili geri beslemeli kontrol algoritmaları oluşturulup parkur deneylerini daha düşük hata payı ile tamamlaması sağlanabilecektir. Bunu sağlamak için daha yüksek kapasiteye sahip mikrodenetleyicilerin kullanımı ile robot üzerinde basit görüntü işleme algoritmaları oluşturulduğunda hedef noktalar tespit edilerek robotun o noktalara ulaşması sağlanabilecektir.

Yine gelecek çalışmalarda robotun altı bacaklı versiyonunun tasarımında revizyonlar gerçekleştirilerek ağırlığın daha düzenli dağılımı sağlanabilecek ve yumuşak tendonlu diz ekleminin entegre edilmesiyle daha iyi performans göstermesi sağlanabilecektir.

KAYNAKLAR

- Abele, E., Weigold, M., & Rothenbücher, S. (2007). Modeling and identification of an industrial robot for machining applications. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(1), 387–390. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.090>
- Aguilar, J., Zhang, T., Qian, F., Kingsbury, M., McInroe, B., Mazouchova, N., ... 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*, 1–61. Tarihinde adresinden erişildi <http://arxiv.org/abs/1602.04712>
- Amirhosseini, H., & Najafi, F. (2020). Design, Prototyping and Performance Evaluation of a Bio-inspired Walking Microrobot. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Mechanical Engineering*, 44(3), 799–811. <https://doi.org/10.1007/s40997-019-00281-4>
- Askari, M., Karakadioğlu, C., Ayhan, F., & Özcan, O. (2017). MinIAQ-II: A miniature foldable quadruped with an improved leg mechanism. İçinde *2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2017* (C. 2018-Janua, ss. 19–25). <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2017.8324388>
- Askari, M., & Özcan, O. (2019a). Dynamic modeling and gait analysis for miniature robots in the absence of foot placement control. İçinde *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* (C. 2019-May, ss. 9754–9760). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8793533>
- Askari, M., & Özcan, O. (2019b). Dynamic modeling and gait analysis for miniature robots in the absence of foot placement control. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2019-May*, 9754–9760. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8793533>
- Aukes, D. M., Ozcan, O., & Wood, R. J. (2014). Monolithic design and fabrication of a 2-DOF bio-inspired leg transmission. İçinde *Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems, Springer International Publishing* (C. 8608 LNAI, ss. 1–10). https://doi.org/10.1007/978-3-319-09435-9_1
- Baisch, Andrew T., & Wood, R. J. (2011). Design and fabrication of the Harvard ambulatory micro-robot. *Robotics Research, Springer*, 715–730. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19457-3_42
- Baisch, Andrew T., & Wood, R. J. (2013). Pop-up assembly of a quadrupedal ambulatory MicroRobot. İçinde *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* (ss. 1518–1524). Tokyo, Japan. <https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6696550>
- Baisch, Andrew Thomas. (2013). *Design , Manufacturing , and Locomotion Studies of Ambulatory Micro-Robots*. Harvard University.
- Baisch, Andrew Thomas, Ozcan, O., Goldberg, B., Ithier, D., & Wood, R. J. (2014). High speed locomotion for a quadrupedal microrobot. *The International Journal of Robotics Research*, 33(8), 1063–1082. <https://doi.org/10.1177/0278364914521473>
- Bergbreiter, S., & Pister, K. S. J. (2007). Design of an autonomous jumping microrobot. İçinde *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* (ss. 447–453). Roma, Italy. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2007.363827>

- Berlinger, F., Duduta, M., Gloria, H., Clarke, D., Nagpal, R., & Wood, R. (2018). A Modular Dielectric Elastomer Actuator to Drive Miniature Autonomous Underwater Vehicles. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, c, 3429–3435. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8461217>
- Birkmeyer, P., Peterson, K., & Fearing, R. S. (2009). DASH: A dynamic 16g hexapedal robot. İçinde *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (ss. 2683–2689). St. Louis, USA. <https://doi.org/10.1109/IROS.2009.5354561>
- Bischoff, R., Kurth, J., Schreiber, G., Koeppe, R., Albu-Schaffer, A., Beyer, A., ... Others. (2010). The KUKA-DLR Lightweight Robot arm-a new reference platform for robotics research and manufacturing. İçinde *Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK)* (ss. 1–8). <https://doi.org/10.1108/01439910710774386>
- Bruhweiler, R., Goldberg, B., Doshi, N., Ozcan, O., Jafferis, N., Karpelson, M., & Wood, R. J. (2015). Feedback control of a legged microrobot with on-board sensing. İçinde *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* (C. 2015-Decem, ss. 5727–5733). Hamburg, Germany. <https://doi.org/10.1109/IROS.2015.7354190>
- Casper, J., & Murphy, R. R. (2003). Human-robot interactions during the robot-assisted urban search and rescue response at the World Trade Center. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 33(3), 367–385. <https://doi.org/10.1109/TSMCB.2003.811794>
- Cham, J. G., Bailey, S. a, Clark, J. E., Full, R. J., & Cutkosky, M. R. (2002). Fast and Robust: Hexapedal Robots via Shape Deposition Manufacturing. *The International Journal of Robotics Research*, 21(10), 869–882. <https://doi.org/10.1177/0278364902021010837>
- Chestnutt, J., Lau, M., Cheung, G., Kuffner, J., Hodgins, J., & Kanade, T. (2005). Footstep planning for the Honda ASIMO humanoid. İçinde *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* (ss. 629–634). <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570188>
- Chopra, S. (2018). *Piezoelectric actuators with embedded strain sensors for micro robotic applications A Thesis submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree Master of Science in Engineering Sciences (Mechanical Engineering) by Shivam Chopra Committ.* University of California San Diego.
- Churaman, W. A. (2010). *Novel Integrated System Architecture for an Autonomous Jumping Micro-Robot.* University of Maryland.
- Clark, J. E., Cham, J. G., Bailey, S. a., Froehlich, E. M., Nahata, P. K., Full, R. J., & Cutkosky, M. R. (2001). Biomimetic design and fabrication of a hexapedal running robot. İçinde *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (ss. 3643–3649). <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2001.933183>
- Defense Advanced Research Projects Agency. (2018). Developing Microrobotics for Disaster Recovery and High-Risk Environments. Tarihinde adresinden erişildi <https://www.darpa.mil/news-events/2018-07-17>
- Demir, D. F. (2021). *Design , Manufacturing , and Rough Terrain Analysis of a Collision Resilient, Foldable , Adjustable Wheeled Miniature Robot : FAWSCY.* Bilkent University.
- Dharmawan, A. G., Hariri, H. H., Foong, S., Soh, G. S., & Wood, K. L. (2017). Steerable miniature legged

- robot driven by a single piezoelectric bending unimorph actuator. İçinde *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* (ss. 6008–6013). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989710>
- Dharmawan, A. G., Hariri, H. H., Soh, G. S., Foong, S., & Wood, K. L. (2018). Design, analysis, and characterization of a two-legged miniature robot with piezoelectric-driven four-bar linkage. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 10(2). <https://doi.org/10.1115/1.4038970>
- Dolghi, O., Strabala, K. W., Wortman, T. D., Goede, M. R., Farritor, S. M., & Oleynikov, D. (2011). Miniature in vivo robot for laparoendoscopic single-site surgery. *Surgical Endoscopy*, 25(10), 3453–3458. <https://doi.org/10.1007/s00464-011-1687-0>
- Donald, B. R., Levey, C. G., McGray, C. G., Paprotny, I., & Rus, D. (2006). An untethered, electrostatic, globally controllable MEMS micro-robot. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 15(1), 1–15. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2005.863697>
- Doshi, N. D. (2019). *Model-based Design , Control , and Planning for Legged Microrobots*. Harvard University.
- Douglas, S. M., Bachelet, I., & Church, G. M. (2012). A logic-gated nanorobot for targeted transport of molecular payloads. *Science*, 335(6070), 831–834. <https://doi.org/10.1126/science.1214081>
- Duduta, M., Clarke, D. R., & Wood, R. J. (2017). A high speed soft robot based on dielectric elastomer actuators. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4346–4351. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989501>
- Duduta, M., Hajiesmaili, E., Zhao, H., Wood, R. J., & Clarke, D. R. (2019). Realizing the potential of dielectric elastomer artificial muscles. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(7), 2476–2481. <https://doi.org/10.1073/pnas.1815053116>
- Duduta, M., Wood, R. J., & Clarke, D. R. (2016). Multilayer Dielectric Elastomers for Fast, Programmable Actuation without Prestretch. *Advanced Materials*, 28(36), 8058–8063. <https://doi.org/10.1002/adma.201601842>
- Fernando, A. H., & Gan Lim, L. A. (2021). Model-Based Simulation of a Mini Differential Drive Robot. İçinde *2021 IEEE 13th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management, HNICEM 2021* (ss. 21–24). IEEE. <https://doi.org/10.1109/HNICEM54116.2021.9731981>
- Firebaugh, S., Piepmeier, J., Leckie, E., & Burkhardt, J. (2011). Jitterbot: A mobile millirobot using vibration actuation. *Micromachines*, 2(2), 295–305. <https://doi.org/10.3390/mi2020295>
- Firouzeh, A., & Paik, J. (2015). Robogami: A Fully Integrated Low-Profile Robotic Origami. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 7(2), 1–8. <https://doi.org/10.1115/1.4029491>
- Gao, Z., Shi, Q., Fukuda, T., Li, C., & Huang, Q. (2019). An overview of biomimetic robots with animal behaviors. *Neurocomputing*, 332, 339–350. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.12.071>
- Gilbert, H. B., & Webster, R. J. (2016). Rapid, Reliable Shape Setting of Superelastic Nitinol for Prototyping Robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 1(1), 98–105.

<https://doi.org/10.1109/LRA.2015.2507706>

Goldberg, B., Karpelson, M., Ozcan, O., & Wood, R. J. (2014). Planar fabrication of a mesoscale voice coil actuator. İçinde *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* (ss. 6319–6325). Hong Kong, China. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907791>

Güç, A. F., Kalin, M. A. I., Karakadioğlu, C., & Özcan, O. (2017). C-Quad: A miniature, foldable quadruped with C-shaped compliant legs. İçinde *2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2017* (C. 2018-Janua, ss. 26–31). <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2017.8324389>

Haldane, D. W., Casarez, C., Karras, J., Lee, J., Li, C., Pullin, A., ... Fearing, R. S. (2015). Integrated Manufacture of Exoskeleton and Sensing for Folded Millirobots. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 7(2), 1–19. <https://doi.org/10.1115/1.4029495>

Haldane, D. W., Peterson, K. C., Garcia Bermudez, F. L., & Fearing, R. S. (2013). Animal-inspired design and aerodynamic stabilization of a hexapedal millirobot. İçinde *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* (ss. 3279–3286). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2013.6631034>

Haldane, D. W., Plecnik, M. M., Yim, J. K., & Fearing, R. S. (2016). Robotic vertical jumping agility via series-elastic power modulation. *Science Robotics*, 1(1).

Hariri, Hassan H., Prasetya, L. A., Foong, S., Soh, G. S., Otto, K. N., & Wood, K. L. (2016). A tether-less Legged Piezoelectric Miniature Robot using bounding gait locomotion for bidirectional motion. İçinde *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* (C. 2016-June, ss. 4743–4749). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2016.7487676>

Hariri, Hassan H., Soh, G. S., Foong, S., & Wood, K. L. (2019). A highly manoeuvrable and untethered under-actuated legged piezoelectric miniature robot. İçinde *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference* (C. 5B-2019). <https://doi.org/10.1115/DETC2019-97353>

Hariri, Hassan Hussein, Soh, G. S., Foong, S., & Wood, K. (2017). Locomotion study of a standing wave driven piezoelectric miniature robot for bi-directional motion. *IEEE Transactions on Robotics*, 33(3), 742–747. <https://doi.org/10.1109/TRO.2017.2656902>

Hariri, Hassan Hussein, Soh, G. S., Foong, S., Wood, K., & Otto, K. N. (2015). Miniature piezoelectric mobile robot driven by standing wave. İçinde *2015 IFToMM World Congress Proceedings, IFToMM 2015*. <https://doi.org/10.6567/IFToMM.14TH.WC.OS13.060>

Hernando-García, J., García-Caraballo, J. L., Ruiz-Díez, V., & Sánchez-Rojas, J. L. (2020). Motion of a legged bidirectional miniature piezoelectric robot based on traveling wave generation. *Micromachines*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/mi11030321>

Hernando-García, J., García-Caraballo, J. L., Ruiz-Díez, V., & Sánchez-Rojas, J. L. (2021). Comparative study of traveling and standing wave-based locomotion of legged bidirectional miniature piezoelectric robots. *Micromachines*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/mi12020171>

Hoffman, Katie L., & Wood, R. J. (2011). Passive undulatory gaits enhance walking in a myriapod millirobot. İçinde *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* (C. 2, ss. 1479–1486). <https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6048268>

- Hoffman, Katie L., & Wood, R. J. (2013). Robustness of centipede-inspired millirobot locomotion to leg failures. İçinde *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* (ss. 1472–1479). <https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6696543>
- Hoffman, Katie Lynn. (2013). *Design and Locomotion Studies of a Miniature Centipede-Inspired Robot*. Harvard University.
- Hoover, A. M., & Fearing, R. S. (2009). Analysis of off-axis performance of compliant mechanisms with applications to mobile millirobot design. İçinde *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2009* (ss. 2770–2776). <https://doi.org/10.1109/IROS.2009.5354374>
- Hoover, Aaron M., Burden, S., Fu, X. Y., Sastry, S. S., & Fearing, R. S. (2010). Bio-inspired design and dynamic maneuverability of a minimally actuated six-legged robot. İçinde *2010 3rd IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, BioRob 2010* (ss. 869–876). <https://doi.org/10.1109/BIOROB.2010.5626034>
- Hoover, Aaron M., & Fearing, R. S. (2008). Fast scale prototyping for folded millirobots. İçinde *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* (ss. 886–892). <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543462>
- Hoover, Aaron M, Steltz, E., & Fearing, R. S. (2008). RoACH: An autonomous 2.4 g crawling hexapod robot. İçinde *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (ss. 26–33). Nice, France.
- Hsu, A., Zhao, H., Gaudreault, M., Foy, A. W., & Pelrine, R. (2020). Magnetic Milli-Robot Swarm Platform: A Safety Barrier Certificate Enabled, Low-Cost Test Bed. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), 2913–2920. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2974713>
- Hu, M., Ge, X., Chen, X., Mao, W., Qian, X., & Yuan, W. E. (2020). Micro/nanorobot: A promising targeted drug delivery system. *Pharmaceutics*, 12(7), 1–18. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12070665>
- Huda, M. N., Yu, H., & Cang, S. (2016). Robots for minimally invasive diagnosis and intervention. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 41, 127–144. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.03.003>
- Iacovacci, V., Lucarini, G., Ricotti, L., Dario, P., Dupont, P. E., & Menciassi, A. (2015). Untethered magnetic millirobot for targeted drug delivery. *Biomedical Microdevices*, 17(63), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10544-015-9962-9>
- Ijaz, S., Li, H., Hoang, M. C., Kim, C. S., Bang, D., Choi, E., & Park, J. O. (2020). Magnetically actuated miniature walking soft robot based on chained magnetic microparticles-embedded elastomer. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 301, 111707. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111707>
- IMO/ILO/UNECE. (2014). *IMO/ILO/UNECE Code of Practice for Packing of Cargo Transport Units (CTU-Code)*. International Maritime Organization (IMO), the International Labour Organization (ILO) and the United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) (C. 4).
- Jayaram, K., Mongeau, J. M., Mohapatra, A., Birkmeyer, P., Fearing, R. S., & Full, R. J. (2018). Transition by head-on collision: mechanically mediated manoeuvres in cockroaches and small robots. *Journal of the Royal Society Interface*, 15(139). <https://doi.org/10.1098/rsif.2017.0664>

- Ji, X., Liu, X., Cacucciolo, V., Imboden, M., Civet, Y., Haitami, A. El, ... Shea, H. (2019). An autonomous untethered fast soft robotic insect driven by low-voltage dielectric elastomer actuators. *Science Robotics*, 4(37). <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aaz6451>
- Kalın, M. A. I., Aygul, C., Turkmen, A., Kwiczak-Yigitbas, J., Baytekin, B., & Ozcan, O. (2020). Design, Fabrication, and Locomotion Analysis of an Untethered Miniature Soft Quadruped, Squad. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(3), 3854–3860. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2982354>
- Karpelson, M., Waters, B. H., Goldberg, B., Mahoney, B., Ozcan, O., Baisch, A., ... Wood, R. J. (2014). A wirelessly powered, biologically inspired ambulatory microrobot. İçinde *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* (ss. 2384–2391). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907190>
- Karydis, K., Liu, Y., Poulakakis, I., & Tanner, H. G. (2014). A template candidate for miniature legged robots in quasi-static motion. *Autonomous Robots*, 38(2), 193–209. <https://doi.org/10.1007/s10514-014-9401-4>
- Karydis, K., Poulakakis, I., & Tanner, H. G. (2017). A Navigation and Control Strategy for Miniature Legged Robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 33(1), 214–219. <https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2623343>
- Kim, D., Carballo, D., Di Carlo, J., Katz, B., Bledt, G., Lim, B., & Kim, S. (2020). Vision Aided Dynamic Exploration of Unstructured Terrain with a Small-Scale Quadruped Robot. İçinde *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* (ss. 2464–2470). <https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9196777>
- Kim, S., Clark, J. E., & Cutkosky, M. R. (2006). ISprawl: Design and tuning for high-speed autonomous open-loop running. *International Journal of Robotics Research*, 25(9), 903–912. <https://doi.org/10.1177/0278364906069150>
- Kim, T. Y., Kim, C., Kim, S. H., & Jung, G. P. (2019). MutBug: A lightweight and compact crawling robot that can run on both sides. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2), 1409–1415. <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2895896>
- Kohut, N. J., Hoover, A. M., Ma, K. Y., Baek, S. S., & Fearing, R. S. (2011). MEDIC : A Legged Millirobot Utilizing Novel Obstacle Traversal. İçinde *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (ss. 802–808). Shanghai, China.
- Le, Q. H., Lee, W., Kim, Y., & Shin, B. (2022). Miniaturized double-legged robot utilizing perpendicular-axes electromagnetic actuator. *Microsystem Technologies*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s00542-022-05291-y>
- Lee, J., Jung, G. P., Baek, S. M., Chae, S. H., Yim, S., Kim, W., & Cho, K. J. (2020). CaseCrawler: A Lightweight and Low-Profile Crawling Phone Case Robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(4), 5858–5865. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.3010205>
- Lee, J. S., & Fearing, R. S. (2015). Anisotropic Collapsible Leg Spines for Increased Millirobot Traction. İçinde *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (ss. 4547–4553). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139829>
- Li, F., Liu, W., Fu, X., Bonsignori, G., Scarfogliero, U., Stefanini, C., & Dario, P. (2012). Jumping like an insect:

- Design and dynamic optimization of a jumping mini robot based on bio-mimetic inspiration. *Mechatronics*, 22(2), 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2012.01.001>
- Mahkam, N., Bakir, A., & Ozcan, O. (2020). Miniature Modular Legged Robot with Compliant Backbones. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(3), 3923–3930. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2982362>
- Mahkam, N., & Özcan, O. (2021a). A framework for dynamic modeling of legged modular miniature robots with soft backbones. *Robotics and Autonomous Systems*, 144, 103841. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103841>
- Mahkam, N., & Özcan, O. (2021b). Gait and locomotion analysis of a soft-hybrid multi-legged modular miniature robot. *Bioinspiration and Biomimetics*, 16(6). <https://doi.org/10.1088/1748-3190/ac245e>
- Mahkam, N., Ugur, M., & Ozcan, O. (2022). Effect of Feet Failure and Control Uncertainties on the Locomotion of Multi-Legged Miniature Robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(2), 5568–5574. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3157945>
- Mathis, A., Russell, J., Moore, T., Cohen, J., Satterfield, B., Kohut, N., ... Fearing, R. S. (2012). Autonomous Navigation of a 5 Gram Crawling Millirobot in a Complex Environment. İçinde *International Conference on Climbing and Walking Robots* (ss. 121–128).
- Mehta, A. M., Delpreto, J., Shaya, B., & Rus, D. (2014). Cogeneration of mechanical, electrical, and software designs for printable robots from structural specifications. İçinde *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* (ss. 2892–2897). Chicago, IL, USA. <https://doi.org/10.1109/IROS.2014.6942960>
- Morrey, J. M., Lambrecht, B., Horchler, A. D., Ritzmann, R. E., & Quinn, R. D. (2003). Highly mobile and robust small quadruped robots. İçinde *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (ss. 82–87). Las Vegas, USA. <https://doi.org/10.1109/IROS.2003.1250609>
- Ng, C. S. X., Tan, M. W. M., Xu, C., Yang, Z., Lee, P. S., & Lum, G. Z. (2021). Locomotion of Miniature Soft Robots. *Advanced Materials*, 33(19), 1–24. <https://doi.org/10.1002/adma.202003558>
- O. Ozcan, A.T. Baisch, & R.J. Wood. (2013). Design and Feedback Control of a Biologically Inspired Miniature Quadruped. İçinde *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* (ss. 1438–1444). Tokyo, Japan.
- Onal, C. D., Tolley, M. T., Wood, R. J., & Rus, D. (2015). Origami-Inspired Printed Robots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(5), 2214–2221. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2014.2369854>
- Onal, C. D., Wood, R. J., & Rus, D. (2013). An origami-inspired approach to worm robots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(2), 430–438. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2012.2210239>
- Ozcan, O., Wang, H., Taylor, J. D., & Sitti, M. (2010). Surface tension driven water strider robot using circular footpads. İçinde *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* (ss. 3799–3804). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2010.5509843>
- Ozcan, O., Wang, H., Taylor, J. D., & Sitti, M. (2014). STRIDE II: A water strider-inspired miniature robot with circular footpads. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 11(85), 1–11. <https://doi.org/10.5772/58701>

- Patel, K., Qu, J., & Oldham, K. R. (2018). Tilted Leg Design for a Rapid-Prototyped Low-Voltage Piezoelectric Running Robot. İçinde *MARSS 2018 - International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales* (ss. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MARSS.2018.8481223>
- Pelton, A. R., Russell, S. M., & DiCello, J. (2003). The physical metallurgy of Nitinol for medical applications. *Jom*, 55(5), 33–37. <https://doi.org/10.1007/s11837-003-0243-3>
- Plecnik, M. M., Haldane, D. W., Yim, J. K., & Fearing, R. S. (2016). Design exploration and kinematic tuning of a power modulating jumping monopod. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 9(1), 1–13. <https://doi.org/10.1115/1.4035117>
- Pullin, A. O., Kohut, N. J., Zarrouk, D., & Fearing, R. S. (2012). Dynamic turning of 13 cm robot comparing tail and differential drive. İçinde *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* (ss. 5086–5093). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2012.6225261>
- Qu, J., Teeple, C. B., Zhang, B., & Oldham, K. R. (2018a). Passive Steering of Miniature Walking Robot Using the Non-Uniformity of Robot Structure. İçinde *MARSS 2018 - International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales* (ss. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MARSS.2018.8481167>
- Qu, J., Teeple, C. B., Zhang, B., & Oldham, K. R. (2018b). Passive Steering of Miniature Walking Robot Using the Non-Uniformity of Robot Structure. *MARSS 2018 - International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales*, 0–5. <https://doi.org/10.1109/MARSS.2018.8481167>
- Rajkowski, J. E., Gerratt, A. P., Schaler, E. W., & Bergbreiter, S. (2009). A multi-material milli-robot prototyping process. İçinde *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2009* (ss. 2777–2782). <https://doi.org/10.1109/IROS.2009.5354068>
- Rios, S. A., Fleming, A. J., & Yong, Y. K. (2016). Design and characterization of a miniature monolithic piezoelectric hexapod robot. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM, 2016-Septe*, 982–986. <https://doi.org/10.1109/AIM.2016.7576897>
- Rios, S. A., Fleming, A. J., & Yong, Y. K. (2017). Miniature Resonant Ambulatory Robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(1), 337–343. <https://doi.org/10.1109/LRA.2016.2614837>
- Ruiz-Díez, V., García-Caraballo, J. L., Hernando-García, J., & Sánchez-Rojas, J. L. (2021). 3D-Printed Miniature Robots With Piezoelectric Actuation for Locomotion and Steering Maneuverability Applications. *Actuators*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/act10120335>
- Sakai, S., Iida, M., & Umeda, M. (2002). Heavy material handling manipulator for agricultural robot. İçinde *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation* (ss. 1062–1068). Washington DC, USA. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2002.1013496>
- Saranli, U., Buehler, M., & Koditchev, D. E. (2001). RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot. *The International Journal of Robotics Research*, 20(7), 616–631. <https://doi.org/10.1177/02783640122067570>
- Seitz, B. F., Goldberg, B., Doshi, N., Ozcan, O., Christensen, D. L., Hawkes, E. W., ... Wood, R. J. (2014). Bio-inspired mechanisms for inclined locomotion in a legged insect-scale robot. İçinde *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE ROBIO 2014* (ss. 791–796). Bali, Indonesia. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2014.7090428>

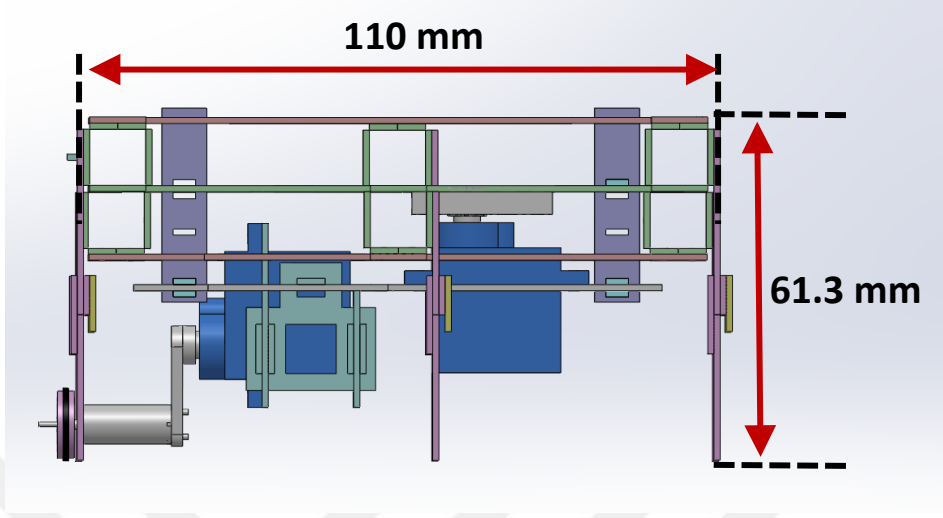
- Shen, W. S. W., Gu, J., & Shen, Y. S. Y. (2005). Proposed wall climbing robot with permanent magnetic tracks for inspecting oil tanks. İçinde *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation* (ss. 2072–2077). Niagara Falls, Canada. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2005.1626882>
- Siegwart, R., Arras, K. O., Bouabdallah, S., Burnier, D., Froidevaux, G., Greppin, X., ... Tomatis, N. (2003). Robox at Expo.02: A large-scale installation of personal robots. *Robotics and Autonomous Systems*, *42*, 203–222. [https://doi.org/10.1016/S0921-8890\(02\)00376-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8890(02)00376-7)
- Soltero, D. E., Julian, B. J., Onal, C. D., & Rus, D. (2013). A lightweight modular 12-DOF print-and-fold hexapod. İçinde *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* (ss. 1465–1471). Tokyo, Japan. <https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6696542>
- Sugita, K., Takato, M., Saito, K., & Uchikoba, F. (2016). Mechanical structure for high speed locomotion of MEMS microrobot using SMA rotary actuator. İçinde *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)* (ss. 6146–6151). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793930>
- Teasdale, D., Milanovic, V., Chang, P., & Pister, K. S. J. (2001). Microrockets for smart dust. *Smart Mater. Struct.*, *10*(6), 1145–1155. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/10/6/303>
- Thomas, S., Germano, P., Martinez, T., & Perriard, Y. (2021). An untethered mechanically-intelligent inchworm robot powered by a shape memory alloy oscillator. *Sensors and Actuators A: Physical*, *332*, 113115. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.113115>
- Wood, R. J., Avadhanula, S., Steltz, E., Seeman, M., Entwistle, J., Bachrach, A., ... Fearing, R. S. (2005). Design, fabrication and initial results of a 2g autonomous glider. İçinde *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)* (ss. 1870–1877). Raleigh, NC, USA. <https://doi.org/10.1109/IECON.2005.1569190>
- Wood, R.J. (2008). The First Takeoff of a Biologically Inspired At-Scale Robotic Insect. *IEEE Transactions on Robotics*, *24*(2), 341–347. <https://doi.org/10.1109/TRO.2008.916997>
- Wood, R.J., Avadhanula, S., Menon, M., & Fearing, R. S. (2003). Microrobotics using composite materials: the micromechanical flying insect thorax. İçinde *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (ss. 1842–1849). Taipei, Taiwan. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2003.1241863>
- Wood, Robert J., Avadhanula, S., Sahai, R., Steltz, E. E., & Fearing, R. S. (2008). Microrobot design using fiber reinforced composites. *Journal of Mechanical Design*, *130*(5), 052304. <https://doi.org/10.1115/1.2885509>
- Xia, B., Fu, J., Zhu, H., Song, Z., Jiang, Y., & Lipson, H. (2021). A Legged Soft Robot Platform for Dynamic Locomotion. İçinde *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* (C. 2021-May, ss. 11812–11819). Xian, China: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRA48506.2021.9561018>
- Xing, H., Shi, L., Hou, X., Liu, Y., Hu, Y., Xia, D., ... Guo, S. (2021). Design, modeling and control of a miniature bio-inspired amphibious spherical robot. *Mechatronics*, *77*(June), 102574. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2021.102574>
- Yang, X., Chang, L., & Pérez-Arancibia, N. O. (2020). An 88-milligram insect-scale autonomous crawling robot driven by a catalytic artificial muscle. *Science Robotics*, *5*(45), 1–14. <https://doi.org/10.1126/SCIROBOTICS.ABA0015>

- Yun, D., & Fearing, R. S. (2019). Cockroach Milli-Robot With Improved Load Capacity. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 11(3). <https://doi.org/10.1115/1.4042626>
- Zeng, H., Wani, O. M., Wasylczyk, P., & Priimagi, A. (2018). Light-Driven, Caterpillar-Inspired Miniature Inching Robot. *Macromolecular Rapid Communications*, 39(1), 1–6. <https://doi.org/10.1002/marc.201700224>
- Zhakypov, Z. (2019). *Design Methodology for Engineering Multifunctional Mesoscale Robots Thèse N ° 7265*. Ecole Polytechnique Federale De Lausanne.
- Zhan, X., Xu, J., & Fang, H. (2018). A vibration-driven planar locomotion robot - Shell. *Robotica*, 36(9), 1402–1420. <https://doi.org/10.1017/S0263574718000383>
- Zhang, B., Qu, J., & Oldham, K. R. (2018). Experimental evaluation of piezoelectric self-sensing during terrestrial locomotion of a miniature legged robot. İçinde *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM* (C. 2018-July, ss. 718–723). Auckland, New Zealand: IEEE. <https://doi.org/10.1109/AIM.2018.8452388>
- Zhang, J., Ding, K., Zhang, Y., Yang, X., & Song, G. (2014). Modeling and simulation of a bio-inspired symmetrical jumping robot. İçinde *2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, IEEE ICMA 2014* (ss. 1353–1358). Tianjin, China. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2014.6885896>
- Zhang, Y., Zhu, R., Wu, J., & Wang, H. (2022). SimoBot: An Underactuated Miniature Robot Driven by a Single Motor. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1–12. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2022.3189218>
- Zhu, C. (2007). In-pipe robot for inspection and sampling tasks. *Industrial Robot*, 34(1), 39–45. <https://doi.org/10.1108/01439910710718432>

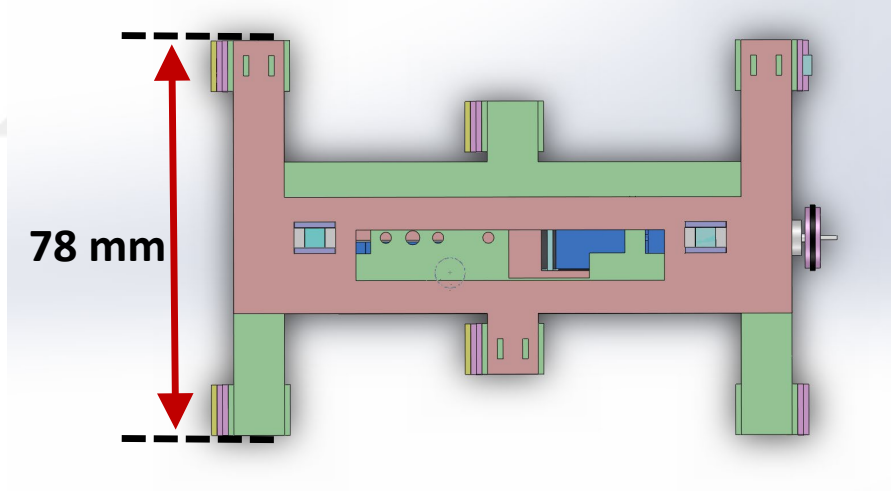
EKLER



EK-1. Robotların Boyutları

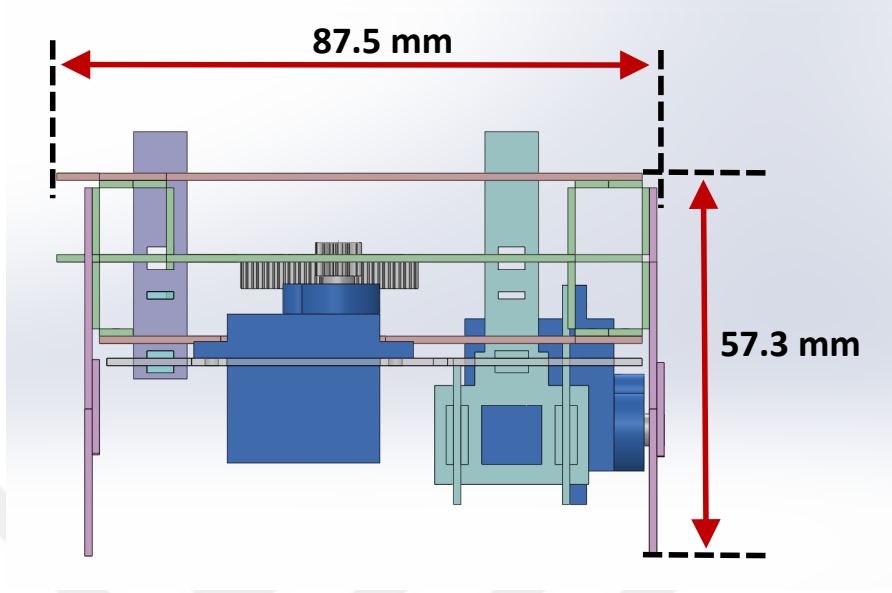


Şekil Ek-1.1. Altı bacaklı robotun yükseklik ve boy uzunlukları.

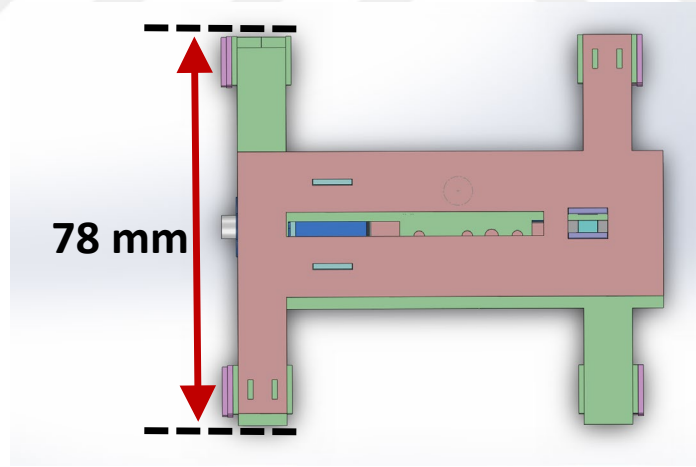


Şekil Ek-1.2. Altı bacaklı robotun en uzunluğu.

EK-1. Robotların Boyutları (Devam)



Şekil Ek-1.3. Dört bacaklı robotun yükseklik ve boy uzunlukları.



Şekil Ek-1.4. Dört bacaklı robotun en uzunluğu.

EK-2. Görüntü İşleme Yazılımı Kaynak Kodu

```
%% VIDEO BASLATMA
clear all
clc
vid = videoinput('winvideo',2,'YUY2_640x480'); %laptop kamerasini
input olarak tanımlamak için

vidDevice = imaq.VideoDevice('winvideo', 2, 'YUY2_640x480', ... % Input
video yayinini baslatiyor
    'ROI', [1 1 640 480], ...
    'ReturnedColorSpace', 'rgb');

% Videonun ozellikleri belirlenir
set(vid, 'FramesPerTrigger', Inf); %Her triggerda sonsuz frame al
set(vid, 'ReturnedColorspace', 'rgb'); %Renkler RGB (Red, Green, Blue)
vid.FrameGrabInterval = 4; % 3 frame de 1 ini alip isliyor
%vid.ROIPosition = [80 0 640 480];%use this to restrict ROI to 640by480

%video baslatiliyor
start(vid)
*****

%% GORUNTU YAKALAMA DONGUSU

Frame_Sayisi=55;

red_Thresh = 0.10; %renk duyarliliklari ayarlaniyor
green_Thresh = 0.10;
blue_Thresh = 0.25;

red_Pixel = 50; %gormesi gereken objenin boyutu ayarlaniyor
green_Pixel = 50;
blue_Pixel = 50;
veri=[];

nFrame=0;
tic
while(nFrame < Frame_Sayisi) % Frame yakalamak için belirlenen frame
sayisi kadar dongu tanımlaniyor
    % Anlik frame in goruntusu aliniyor
    data = getsnapshot(vid);

    RI=imref2d(size(data)); % Goruntuyu 2 boyutlu olarak tanımliyor
    RI.XWorldLimits=[1 640]; % x ekseni 640 piksel
    RI.YWorldLimits=[1 480]; % y ekseni 480 piksel
    imshow(data,RI); hold on
```

EK-2. Görüntü İşleme Yazılımı Kaynak Kodu (Devam)

```
%KIRMIZI OBJE TANIMA
%goruntuden kirmizi renkli bileşenleri ayıklıyor
diff_im_red = imsubtract(data(:,:,1), rgb2gray(data)); %matrixteki 1
rakami kirmizi pikseli temsil ediyor (ona bakacak bu düzlemde)

diff_im_red = medfilt2(diff_im_red, [3 3]); %gurultu olmaması
acişından 3x3 luk filtre uygulanıyor
diff_im_red = imbinarize(diff_im_red,red_Thresh); %tanımlanan renk
duyarlılığını uyguluyor
diff_im_red = bwareaopen(diff_im_red,red_Pixel); %tanımlanan pixel
sayısından küçük objeleri elimine ediyor
bw_r = logical(diff_im_red); %Tanımlanan kirmizi objeleri 1-0
şeklinde logic sistemde tanımlıyor
stats_r = regionprops(bw_r, 'BoundingBox', 'Centroid'); %objenin
etrafına kutucuk çizimi ve koordinat olarak orta noktasının alınması

%YESİL OBJE TANIMA

diff_im_green = imsubtract(data(:,:,2), rgb2gray(data)); %matrixteki
2 rakami yeşil pikseli temsil ediyor (ona bakacak bu düzlemde)
diff_im_green = medfilt2(diff_im_green, [3 3]);
diff_im_green = imbinarize(diff_im_green,green_Thresh);
diff_im_green = bwareaopen(diff_im_green,green_Pixel);
bw_g = logical(diff_im_green);
stats_g = regionprops(bw_g, 'BoundingBox', 'Centroid');

%MAVİ OBJE TANIMA
diff_im_blue = imsubtract(data(:,:,3), rgb2gray(data)); %matrixteki
3 rakami mavi pikseli temsil ediyor (ona bakacak bu düzlemde)
diff_im_blue = medfilt2(diff_im_blue, [3 3]);
diff_im_blue = imbinarize(diff_im_blue,blue_Thresh);
diff_im_blue = bwareaopen(diff_im_blue,blue_Pixel);
bw_b = logical(diff_im_blue);
stats_b = regionprops(bw_b, 'BoundingBox', 'Centroid');

for object_r = 1:length(stats_r)
    bb_r = stats_r(object_r).BoundingBox;
    bc_r = stats_r(object_r).Centroid;
    rectangle('Position',bb_r,'EdgeColor','r','LineWidth',2)%
    kutucuğu çiziyor
    plot(bc_r(1),bc_r(2), '-w+', 'MarkerSize',10) %kirmizi kutucuğun
    orta noktasını çiziyor
    a_r=text(bc_r(1)-35,bc_r(2)+20, strcat('X: ',
    num2str(round(bc_r(1))), ' Y: ', num2str(round(bc_r(2)))));
    set(a_r, 'FontName', 'Arial', 'FontWeight', 'bold', 'FontSize',
    8, 'Color', 'white');
    veri(end+1,:)= [nFrame 1 object_r stats_r(object_r).Centroid];
end
```

EK-2. Görüntü İşleme Yazılımı Kaynak Kodu (Devam)

```
for object_g = 1:length(stats_g)
    bb_g = stats_g(object_g).BoundingBox;
    bc_g = stats_g(object_g).Centroid;
    rectangle('Position',bb_g,'EdgeColor','g','LineWidth',2)
    plot(bc_g(1),bc_g(2), '-w+', 'MarkerSize',10)

    a_g=text(bc_g(1)-35,bc_g(2)+20, strcat('X: ',
num2str(round(bc_g(1))), ' Y: ', num2str(round(bc_g(2)))));
    set(a_g, 'FontName', 'Arial', 'FontWeight', 'bold', 'FontSize',
8, 'Color', 'white');
    veri(end+1,:)=[nFrame 2 object_g stats_g(object_g).Centroid];
end

for object_b = 1:length(stats_b)
    bb_b = stats_b(object_b).BoundingBox;
    bc_b = stats_b(object_b).Centroid;
    rectangle('Position',bb_b,'EdgeColor','b','LineWidth',2)
    plot(bc_b(1),bc_b(2), '-w+', 'MarkerSize',10)
    a_b=text(bc_b(1)-35,bc_b(2)+20, strcat('X: ',
num2str(round(bc_b(1))), ' Y: ', num2str(round(bc_b(2)))));
    set(a_b, 'FontName', 'Arial', 'FontWeight', 'bold', 'FontSize',
8, 'Color', 'white');
    veri(end+1,:)=[nFrame 3 object_b stats_b(object_b).Centroid];
end

nFrame=nFrame+1;
hold off;
end

delete(vid)

izlenen_Sure = toc;

veri(:,1)=veri(:,1)/izlenen_Sure;
```

