



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**DÖRT AYAKLI YÜRÜYEN BİR ROBOTUN**  
**TEK BACAĞI İÇİN ARI ALGORİTMASI**  
**KULLANILARAK KONTROLCÜ TASARIMI**

**Abdullah YÖNGÜL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Ağustos-2019**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Abdullah YÖNGÜL tarafından hazırlanan “DÖRT AYAKLI YÜRÜYEN BİR ROBOTUN TEK BACAĞI İÇİN ARI ALGORİTMASI KULLANILARAK KONTROLCÜ TASARIMI” adlı tez çalışması 05/08/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Prof. Dr. Mehmet Fatih BOTSALI

#### Danışman

Prof. Dr. Mete KALYONCU

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ümit ÖNEN

### İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

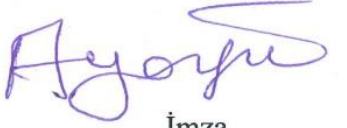
Prof. Dr. Hakan KARABÖRK  
Enstitü Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



İmza

Abdullah YÖNGÜL

Tarih: 05/08/2019

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS

## DÖRT AYAKLI YÜRÜYEN BİR ROBOTUN TEK BACAĞI İÇİN ARI ALGORİTMASI KULLANILARAK KONTROLCÜ TASARIMI

Abdullah YÖNGÜL

Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mete KALYONCU

2019, 66 Sayfa

Jüri  
Prof. Dr. Mete KALYONCU  
Prof. Dr. Fatih Mehmet BOTSALI  
Dr. Öğrt. Ü. Ümit ÖNEN

Bu çalışmada, mekanik özellikleri katır anatomisine benzer dört bacaklı bir robotun iki uzuvlu bir bacağı için PID tabanlı hibrit kuvvet/yörünge empedans kontrolcü tasarımı ve optimizasyonu yapılmıştır. İlk olarak dört bacaklı mobil robot için kullanılabilir, iki serbestlik dereceli bir bacak model tasarımı yapılmıştır. Fiziksel parametreler, robotun yürüme kabiliyetini sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Tasarıma ait üç boyutlu katı model oluşturulmuştur. Model içerisinde sisteme ait malzeme bilgisi ve mafsal serbestlik dereceleri belirlenerek simülasyon için gerekli ön hazırlık yapılmıştır. Sistemin kinematik ve dinamik denklemleri matematiksel olarak belirtilmiş, daha doğru sonuçlar için uzuvlara ait dinamik parametreler ve malzeme bilgisini içeren üç boyutlu katı model kullanılmıştır. Daha sonra MATLAB/Simulink ortamında simülasyon oluşturulmuştur.

Sistemin kontrolü için öncelikle empedans çalışmalarına temel teşkil etmek için standart PID kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Temel PID kontrolcüden elde edilen tecrübe doğrultusunda, PID tabanlı hibrit kuvvet/yörünge empedans kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Kuvvet yörünge kontrolünü geliştirmek amacıyla, kontrolcü kazançları ve empedans katsayılarının Arı algoritması optimizasyonu ile ayarlaması gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar grafiksel formda sunulmuş, empedans kontrolcünün etkinliği, optimizasyon öncesi ve sonrasında elde edilen kazanç ve katsayılara göre incelenmiştir.

Sonuç olarak, sistemin ayakucunun yüzey etkileşimli kuvvet/yörünge kontrolü için başarılı bir empedans tabanlı kontrolcü elde edilmiş ve parametreleri optimize edilerek, performansı geliştirilmiştir. Elde edilen sonuç ve öneriler, yedinci bölümde değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Arı Algoritması, Dört Bacaklı Robot, Empedans Kontrol, Kuvvet/Konum Kontrol, Optimizasyon, Yörünge Takibi.

**ABSTRACT**

**MS THESIS**

**CONTROLLER DESIGN FOR A QUADRUPED WALKING ROBOT LEG  
USING THE BEES ALGORITHM**

**Abdullah YÖNGÜL**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Mechanical Engineering**

**Advisor: Prof.Dr. Mete KALYONCU**

**2019, 66 Pages**

**Jury**

**Advisor Prof. Dr. Mete KALYONCU  
Prof. Dr. Fatih Mehmet BOTSALI  
Assist. Prof. Dr. Ümit ÖNEN**

In this study, PID-based hybrid force/trajectory impedance controller design and optimization for a two-limb leg of a quadruped robot whose mechanical properties are similar to the mule anatomy is performed. Firstly, a two degree of freedom leg model is designed for the quadruped mobile robot. The physical parameters are determined to provide the walking ability of the robot. A three-dimensional solid model of the design is created. Material information and joint degrees of freedom of the system are determined in the model and necessary preliminary preparation is made for the simulation. The kinematic and dynamic equations of the system are specified mathematically. For more accurate results, three-dimensional solid model including dynamic parameters and material information of limbs is used. Then, simulation was created in MATLAB/Simulink environment.

To control the system, first of all, a standard PID controller is designed to provide the basis for impedance studies. PID based hybrid force/trajectory impedance controller is designed in accordance with the experience gained from the basic PID controller. In order to improve the force / trajectory control, the controller gains and impedance coefficients are adjusted with the Bees Algorithm optimization. The results are presented in graphical form and the efficiency of the impedance controller is analyzed according to the gains and coefficients obtained before and after optimization.

Consequently, a successful impedance-based controller for surface contact force/trajectory control of the foot of the system is obtained, parameters are optimized, and performance is improved

**Keywords:** The Bees Algorithm, Quadruped Robot, Impedance Control, Force/Position Control, Optimization, Trajectory Tracking.

## ÖNSÖZ

Bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyerek çalışmalarına önemli katkılar sunan, karşılaştığım zorluk ve sorunlarda yol gösterici olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mete KALYONCU'ya, her konuda yardımcı olan, Sayın Öğr. Gör. Veli BAKIRCIOĞLU'na, Sayın Arş. Gör. Muhammed Arif ŞEN'e ve her zaman desteklerini benden esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Abdullah YÖNGÜL  
KONYA-2019



# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>viii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Tezin Amacı .....	1
1.2. Tezin Önemi .....	1
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>4</b>
<b>3. EMPEDANS KONTROL</b> .....	<b>18</b>
3.1 Anlık Empedans Kontrol .....	19
3.2 Uyarlamalı Empedans Kontrol .....	19
3.3 Hibrit Empedans Kontrol.....	20
3.4. Genişletilmiş Empedans Kontrol .....	20
3.5. Uzaysal Empedans Kontrol .....	20
<b>4. DÖRT AYAKLI BİR ROBOTUN BİR BACAĞININ MODELLENMESİ</b> .....	<b>21</b>
4.1. Sistem Tanımı ve Fiziksel Modeli .....	21
4.2. İleri ve Ters Kinematik Analiz .....	25
4.3 Dinamik Analiz.....	29
4.4. MATLAB/Simmechanics Modeli.....	32
<b>5. KONTROLCÜ TASARIMI VE OPTİMİZASYONU</b> .....	<b>34</b>
5.1 PID Kontrolcü ile Ayakucu Yörünge Kontrolü .....	34
5.2. PID Tabanlı Hibrit Kuvvet/Yörünge Empedans Kontrolcü Tasarımı .....	36
5.3. Hibrit Kuvvet/Konum Kontrolcüye ait PID Kazançlarının ve Empedans Katsayılarının Arı Algoritması ile Optimizasyonu .....	40
<b>6. SAYISAL UYGULAMALAR</b> .....	<b>44</b>
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>53</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>55</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>58</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

A:	Genlik	
a:	Kalça eklem uzunluğu	(m)
B:	Sönüm katsayısı	(Ns/m)
b:	Kalça Eklem boyut değişkeni	
e:	Kalça eklem buyut değişkeni	
C( $\theta$ ):	Silindir uzunluğu	(m)
d:	Parametrik uzunluk	(m)
F:	Kuvvet	(N)
f:	Kuvvet	(N)
itr:	İterasyon Sayısı	
J:	Tork	(Nm)
K:	Yay sabiti	(N/m)
L:	Lagrange denlem	
M:	Kütle	(kg)
m:	En uygun bölge sayısı	
n:	Kaşif arı sayısı	
nep:	En iyi bölgeye gönderilen arı sayısı	
nsp:	Kalan bölgeye gönderilen arı sayısı	
ng:	Bölge boyutu	
r:	Konum	(m)
T:	Kinetik enerji	(J)
$q$ :	Açı	( $^{\circ}$ )
U:	Potansiyel enerji	(J)
$\theta$ :	Açı	( $^{\circ}$ )
$\varepsilon$ :	Bağlantı açısı	( $^{\circ}$ )
$\omega$ :	Frekans	(1/s)

### Kısaltmalar

BCG:	Merkezi Kalıp Üreticine Bağımlı
CAD:	Bilgisayar destekli tasarım
DARPA:	Savunma İleri Araştırma Projeleri
D-H:	Denavit Hartenberg Tablosu
LIDAR:	Lazer Mesafe Sensörü
LQR:	Doğrusal İkinci Dereceli Kontrolcü
Pegasus:	Akıllı Yürüyüş Kontrol Sistemleri
PID:	Oransal İntegral Türevsel Kontrolcü



## 1. GİRİŞ

### 1.1. Tezin Amacı

Günümüzde ayaklı robotların çoğunluğu, gelişmiş hareket, denge kabiliyetlerine sahip olsa da özellikle gerçek çevre şartlarında, yüzey ile fiziksel etkileşime geçtiği durumlarda, bacağın dinamik davranışının kontrolü büyük öneme sahiptir. Örneğin dört ayaklı bir robotun bir engele çarptığı durumlarda veya dışarıdan bir dış kuvvet uygulandığında ayağın uyumlu bir şekilde davranması beklenilir. Bu sebeple kontrolcü tasarımında yüzey ile etkileşim anında kuvvet/yörünge kontrolü sağlayabilecek, PID tabanlı empedans kontrolcü tasarımı ve optimizasyonu üzerine durulmuştur.

Bu çalışmada, mekanik özellikleri yük taşıyabilen katır anatomisine benzer dört bacaklı bir robotun, iki serbestlik dereceli bir bacağı için, PID tabanlı hibrit kuvvet/yörünge empedans kontrolcü tasarımı ve Arı Algoritması ile optimizasyonu yapılmıştır. Ayrıca bacaklı robotlar hakkında literatür araştırması sunulmuştur.

Bu tezin amacı; dört ayaklı robotlara temel teşkil edecek bacak tasarımı geliştirmek, ayakucunun yüzey etkileşimi anında kuvvet/yörünge kontrolünü sağlayacak PID tabanlı empedans kontrolcü tasarlamak, gelişmiş optimizasyon tekniklerinden biri olan Arı Algoritması ile PID kazançları ve Empedans kontrolcü katsayılarını optimize edilerek kontrolcü performansını iyileştirmek, çalışmada önemli bir yer tutmaktadır.

### 1.2. Tezin Önemi

Mobil robotlarda, geçmişten başlayıp günümüzde de devam eden sınırlı hareket kapasitelerine sahip geleneksel tekerlekli, paletli ve ray sistemli araçların tasarım, hareket, dengeleme gibi özelliklerinin geliştirilmesi için yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Yapılan güncel çalışmalarda, biyolojik canlılardan esinlenerek (biyomimetik) mobil robotlara yeni tasarımlar eklemektedir. Geliştirilen bacaklı sistemler, bilinen tekerlekli, raylı, paletli tasarımlara kıyasla gelişmiş hareket kabiliyetine ve çok yönlülüğe sahiptirler. Bu amaçla son yıllarda mobil robotlar üzerine yapılan çalışmaların büyük oranda bacaklı robotlar üzerine olmuştur.

Bacaklı robotların en önemli özelliği her türlü arazi şartlarına uygun hareket kabiliyetinin olması ve istenilen şartları yerine getirebilmesidir. Bu nedenle tekerlekli ya da paletli makinelerin aşamadığı, hareket sıkıntısı yaşadığı durumlarda engelleri aşmak

için yürüeyebilen (bacaklı) robotlar ön plana çıkmaktadır. Bacaklı robotların diğer avantajı ise; sahip olduğu kontrolcü ile dinamik bir denge sistemine sahip olmasıdır. Ayrıca kum çakıl engebe çamur, eğim, kaygan zemin gibi arazi şartlarında hız ve performansı, dengede kalabilme kabiliyeti daha yüksektir.

Günümüzde gelişmeye oldukça açık olan mobil robotlar uzay sanayisinde, savunma sanayisinde ve arama kurtarma çalışmalarında aktif görev alabilmeleri amaçlanmaktadır. Bu kapsamda savunma sanayisinde ve endüstriyel uygulamalarda kullanılacak dört bacaklı yürüeyebilen robotların tasarımı konusundaki çalışmalar her geçen gün hız kazanmakta ve yoğun ilgi görmektedir. Bu sebeple dört bacaklı robotların kullanım alanları;

1. Tsunami, toprak kayması, çığ gibi afet bölgelerinde arama kurtarma işlemleri,
2. Afet bölgelerine gıda, ilk yardım gibi acil durum malzeme taşıma,
3. İnsanlara savaş bölgelerinde takviye güç,
4. Denetimi tehlikeli görevler,
5. Orman yangınlarında arama kurtarma ekibi olarak sayılabilir.

Son yıllarda geliştirilen ayaklı robotlar, tekerlekli, raylı, paletli tasarımlara kıyasla, her türlü arazi şartlarına uygun, hareket kabiliyeti yüksek dinamik bir yapıya sahiptirler. Bu özelliklerinden dolayı kum, çakıl, engebe, eğim, kaygan zemin gibi gerçek çevre şartlarında; hızı, performansı, dengede kalabilme kabiliyeti daha yüksektir.

Ayaklı robotik araştırmaları öncelikli olarak zorlu ve karmaşık ortamlarda gezinebilen çalışmalar olarak planlanmıştır. Bu bağlamda, temas kuvvetlerinin kontrolü, ayakucu yörünge takibi, dengede kalabilme, yük taşıyabilme, statik, dinamik yürüyüş vb. kabiliyetlerinin çevre şartlarına uyumlu olması açısından son derece önemlidir. Bu sebeple, uygun kontrolcü tasarımı gerekmektedir. Hogan tarafından geliştirilen, kuvvet/konum kontrolünden daha çok, etkileşimli kontrol teorisi tez çalışmamızda kontrolcü tasarımı seçiminde öncelik etmiştir.

Hogan'a göre empedans kontrolünün amacı; kontrol tasarımının yalnızca yörünge takibine göre değil, aynı zamanda bacak tasarımının mekanik empedansını ayarlayacak şekilde tasarlanmasıdır. Empedans kontrolü, konum ve kuvvet tabanlı olarak uygulanmaktadır. Konum tabanlı empedans kontrol yöntemi konum geri beslemeli robotik sistemlerde kuvvet ve etkileşim kontrolü sağlayabilmek için uygun bir seçenektir. Ortaya çıkan temas kuvvetlerinin empedans kuralına göre robot referans konumuyla gerçek konumu arasında bir fark ortaya çıkaracak şekilde kontrol yöntemi

tasarımı olarak tanımlanabilir. Empedans kontrolü aynı zamanda çevre ile temas halindeki bacağıın dinamik davranışını modellemek ve kontrol etmektir.

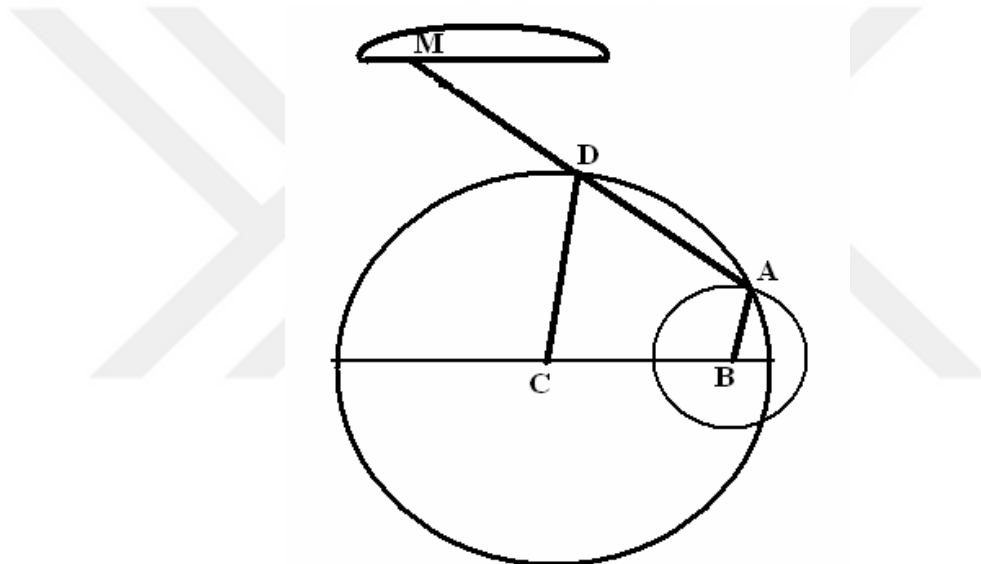
Bu çalışmada dört ayaklı robotun bir bacağıın PID tabanlı empedans kuvvet/yörünge kontrolü ve optimizasyonu üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Tezin önemi, robot ayakucunun, yüzey ile temas anındayken dinamik davranışını modellemek ve kontrol etmektir. Aynı zamanda Arı algoritması optimizasyon tekniğiyle PID kazançları ve empedans katsayıları optimize edilerek, optimizasyon tekniklerinin iyileştirmede önemi vurgulanmıştır.



## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bacaklı robotlar üzerine yapılan çalışmalar, 19. y.y'da Muybridge, hayvanların koşma, yürüme hareketlerini anlamada önemli çalışmalar gerçekleştirdi. Çalışmalarını at köpek, fil, insan vb. canlılar üzerine yoğunlaştırdı. İnsan gözünün yakalamayacağı hareketleri fotoğraf kareleriyle ortaya çıkardı. Burada amaç ayakların dinamik hareketlerini incelemektir. Bu çalışma ile Muybridge, ilk yürüyebilen hareket mekanizması geliştirdi (Muybridge 1887). Modelde, ayakları adım sırasına göre aşağı yukarıya hareket ettirebilen kinematik bir zincir kullanarak, gövdeyi düz bir yatay ekseninde hareket ettirebildi (Şekil 2.1).



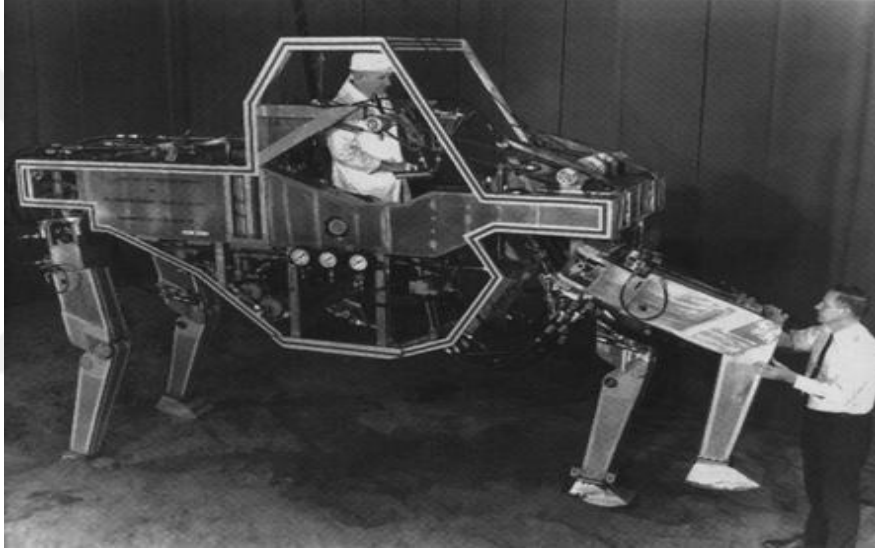
Şekil 2.1. İlk yürüyen makinenin hareket mekanizması (Muybridge 1887)

1960 yılında Shigley, bacaklı robotlar için bağlantı mekanizması üzerine çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalarda, yürüyen makineler üzerine birçok bacak tasarımı önerdi. Bu makineler dört çubuk bağlantıları, kam bağlantıları ve pantograf gibi vb. mekanizmalar içermektedir. Ayrıca dört çubuk şeklinde ayakları olan bir araç geliştirdi. Ayaklar bir çift içinde hareket ediyor ve statik dengeyi sağlamak için bacak uzunlukları yetersizdi. Ayakların hareketi çift kayar mesnetler ile sağlandı. Ancak ayakların uniform hızı için düz dişli gerekiyordu ama bu pratik bir çözüm olarak kabul görmedi (Owen 1989).

1960 yılların başlarında Space General şirketi iki yürüme makinesi tasarladı. Ay yüzeyinde gezinme amaçlı bir projeydi. Bunlar, harici gücünü dışarıdan alan altı bacaklı

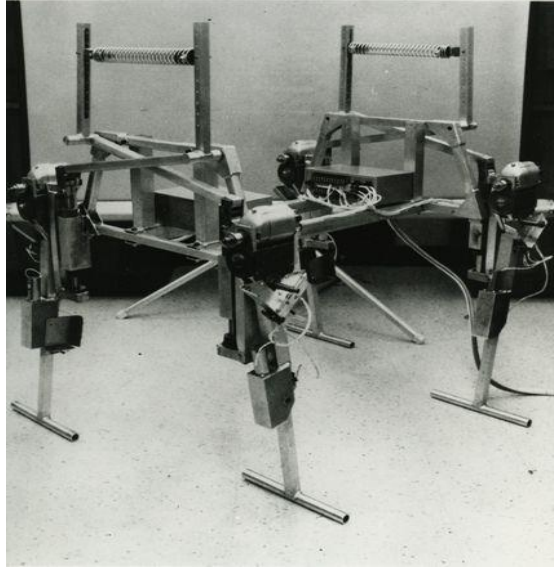
robot ile gücü kendine yetebilen sekiz bacaklı robottu. Her iki makinede de ayak hareketleri kamlar ile koordine edilip, bağlantı elamanları üzerinden aktarıldı. Bu araçlar tasarım hedeflerini gerçekleştirirde oldukça etkindi. Serbestlik derecesi az olduğu için yeterli kabiliyete sahip olmayıp arazi şartlarına uygun değildi (Owen 1989).

1960 ortalarında Mosher ve Liston General Electric şirketiyle beraber yürüyebilen taşıyıcı robot geliştirdi. Mosher, 3,3 m boyunda 1400 kg ağırlığında hidrolik tahrikli bir robottu (Şekil 2.2). Operatörün her bir uzvu (el ve ayakları) robotun dört ayağının kontrolünü sağlamak amacıyla bir kol veya pedala bağlandı. Kontrol her ne kadar insan ağırlıklı olsa da bu yürüyen makinelere ilerleyen dönemler için büyük ışık tutmuştur (Owen 1989).



Şekil 2.2. Dört ayaklı Mosher (Owen 1989)

1966'da McGhee ve Frank, Phony Pony isiminde 50 kg ağırlığında dört ayaklı robot üretti (Şekil 2.3). Her bir uzuvları döner mafsalla ile bağlanmış iki serbestlik dereceli bacak elektrik motorlar ile tahrik edildi. Ayakların ters T şeklinde tasarlayarak ön düzlemde dengeyi sağladı. Her bağlantı üzerindeki bir dizi sensörler sayesinde eklemin ileri geri hareketini ve kilitli olup olmadığını belirleyen üç tip komutla kontrolü sağlandı. Bu üç farklı durumdan Flip Flop tabanlı elektronik mantığını kullanarak altı farklı durum elde edildi. Phony Pony robot, ayaklı robotlar için dönüm noktası oldu (Gonzalez-de-Santos ve ark 2006).



Şekil 2.3. Dört ayaklı phony pony (Gonzalez-de-Santos ve ark 2006)

1977 de OSU tarafından üretilen Hexapod (altı ayaklı) robot, ilk bilgisayar kontrollü olarak tarihe geçti. Böcek bacağından esinlenilerek geliştirilen ve üç döner uzuvdan oluşan bacaklar, elektrik motorları tarafından tahrik edildi (Şekil 2.4). Bu çalışma robot kontrolü, güç dağılımı algoritmaları, yürüyüş formlarının oluşturulması konuları hakkında bilimsel olarak çok sayıda deneysel çalışmalarına kaynak oluşturdu (Hirose ve ark 2009).



Şekil 2.4. Hexapod (Hirose ve ark 2009)

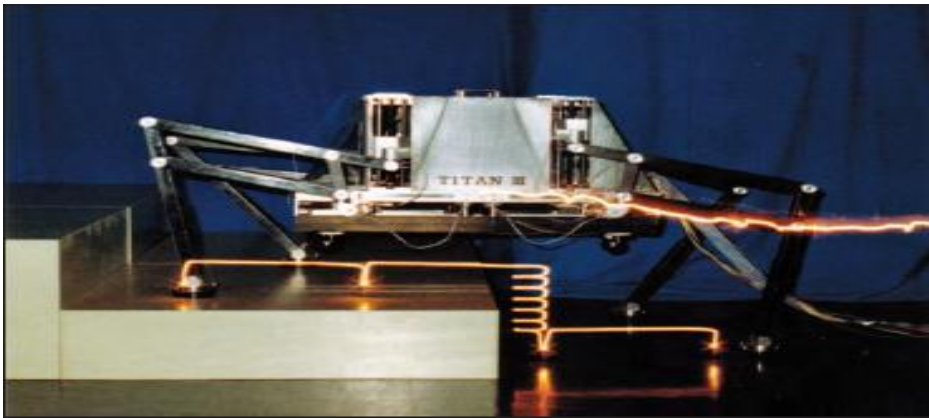
Kumo I, 1976'da yürüeyebilen bacaklı robotların ilk modelidir. Bacak uzunluğu 1,5 m ve ağırlığı 14 kg idi (Şekil 2.5). Robot saggital düzlemde sekiz serbestlik derecesine sahipti. Her ayağın sadece bir eyleyicisi ve robotun toplam ağırlığını azaltmak için debriyaj kavrama mekanizması kullanıldı. Eyleyicilerin sınırlı güce sahip

olması nedeniyle hareket kabiliyeti yetersizdi. Sonuç olarak gösteriyor ki basit bir hayvan taklidi ile ilerleyen zamanlarda yürüyen robotların geliştirilmesi yetersiz kalacaktı (Hirose ve ark 2009).



Şekil 2.5. Kumo I (Hirose ve ark 2009)

Titan III'de bacağın ağırlığını azaltmak, çalışma alanını artırmak ve hareket kabiliyetini geliştirmek amacıyla 3D pantograf (Pantomec) mekanizması kullanıldı. Bacak boyu 1,2 m, ağırlığı 80 kg'dır. Karbon fiber kompozit malzeme kullanılarak robotun ağırlığı azaltıldı (Şekil 2.6). Titan III'de, whisler sensörleri ve sinyal işleme sistemi ve aynı zamanda hyper elastic özelliklere sahip alaşım kullanıldı. Ayrıca posture (duruş sensörü) ile birlikte, arazi şartlarına uygun ilgili kararları vermek amacıyla Akıllı Yürüyüş Kontrol Sistemi (PEGASUS) denilen denetim sistemi ile donatıldı (Hirose ve ark 2009).



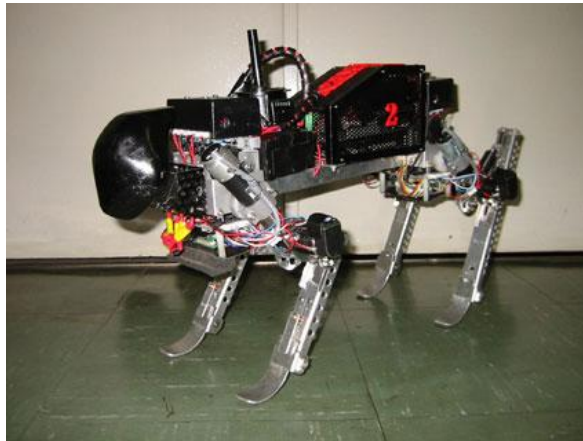
Şekil 2.6. Titan III (Hirose ve ark 2009)

1990'lı yılların sonunda Martin Böhler, McGill Üniversitesinde, Scott I isminde ayaklı robotlar üzerine çeşitli çalışmalar yaptı ve daha sonra on yıllık çalışma içerisinde 1999 yılında Scott II isminde mekanik tasarımı çok basit dinamik olarak kararlı dört ayaklı robot geliştirdi. 27 kg ağırlığında, 0,55x0,48x0,27 m boyutlarında tasarlandı. Bacakları uyumlu bir şekilde prizmatik eklem meydana getirerek yay destekli yapıya sahipti (Şekil 2.7). 1,3 m/s hıza ulaşarak yürüme gerçekleştirdi (Poulakakis ve ark 2005).



Şekil 2.7. Scott II (Poulakakis ve ark 2005)

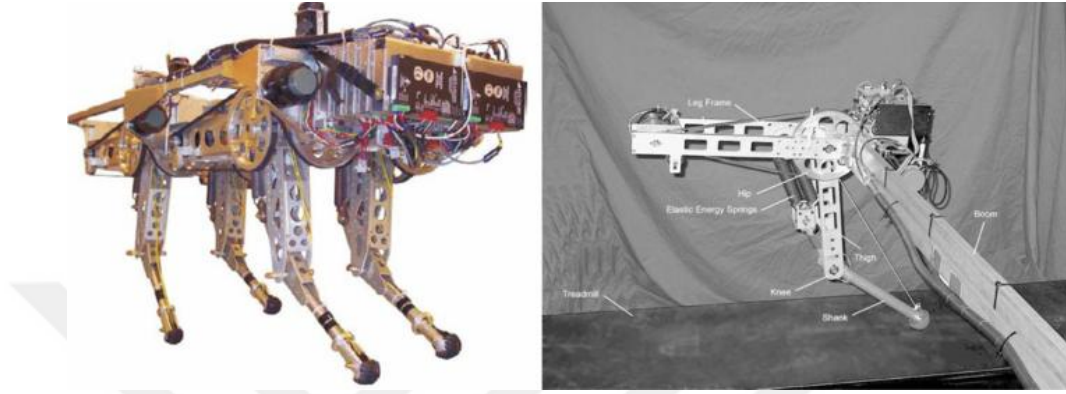
Tekken II robotunu Hiroshi ve Kimura, 0,3 m uzunluk ve 4,3 kg ağırlığında tasarladı (Şekil 2.8). Eklemleri mekanik yaylarla destekliydi. Eklem hareketlerine bağlı denetleyici ve BCG Based On Control Pattern Jenerators kullandı. Kimura ayrıca, mekanik sistem üzerinde doğal dinamik hareketleri inceleyerek dört bacaklı robotlarda zıplama hareketi üzerine çalıştı (Kimura ve ark 2007).



Şekil 2.8. Tekken II (Kimura ve ark 2007)



Kolt robotu, Kenneth Waldron tarafından Ohio State Üniversitesi ve Stanford Üniversitesi iş birliğiyle geliştirildi. Robotta mekanik yaylarla uyumlu elektrikli eyleyiciler bulunmaktaydı. 80 kg ağırlığında 1,75x0,6x0,8 m boyutlarında tasarlandı (Şekil 2.9). Kolt robotu bant üzerinde 1,1 m/s hız ile istikrarlı bir şekilde yürütüldü (Estremera ve J. Waldron 2008).



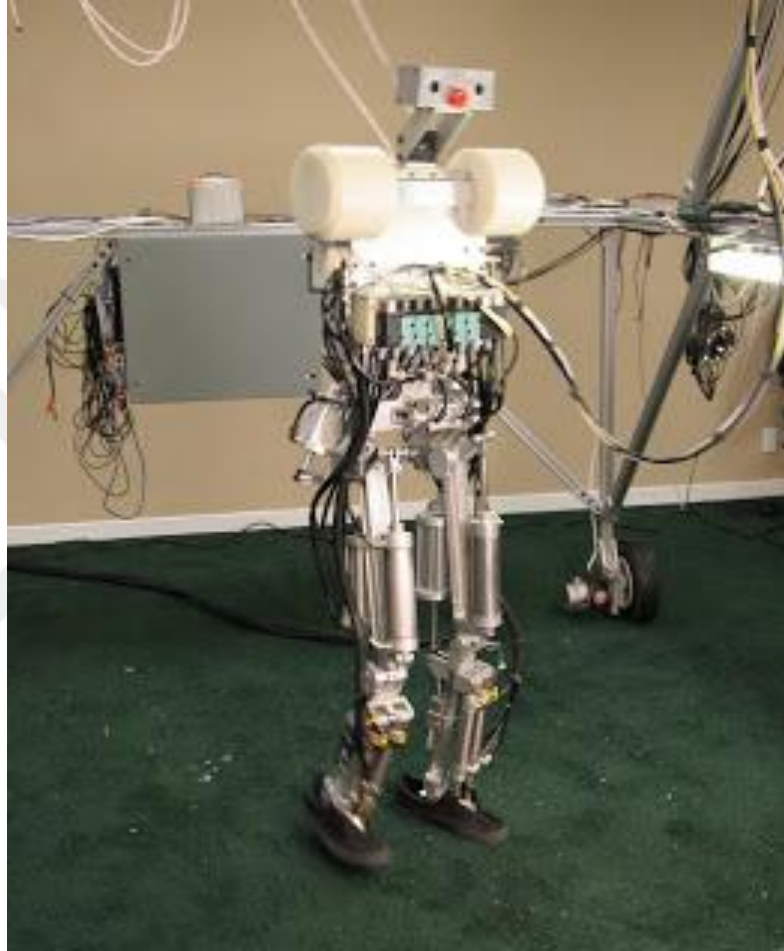
Şekil 2.9. Kolt (Estremera ve J. Waldron 2008)

Airhopper, Hirose laboratuvarında Tokyo Teknoloji Enstitüsü'nde geliştirildi. Bu robot afet alanlarına malzeme taşımak için tasarlandı. 1,29x1,2x0,6 m boyutlarında, 34,6 kg ağırlığındaydı (Şekil 2.10). Robotta dört barlık üç adet tek silindirik pnömatrik eyleyici bulunuyordu. Robotun hafifliğinden dolayı dikeyde güçlü bir zıplamaya olanak sağladı. Aynı zamanda, 0,85 m kadar zıplayabiliyordu ve 0,6 MPa basınçla çalışmaktaydı. Robot teker kullanılabilir şekilde geliştirilmiş olup genel olarak düz yüzeyde hareket etme amaçlı tasarlanmıştı (Tanaka ve Hirose 2008).



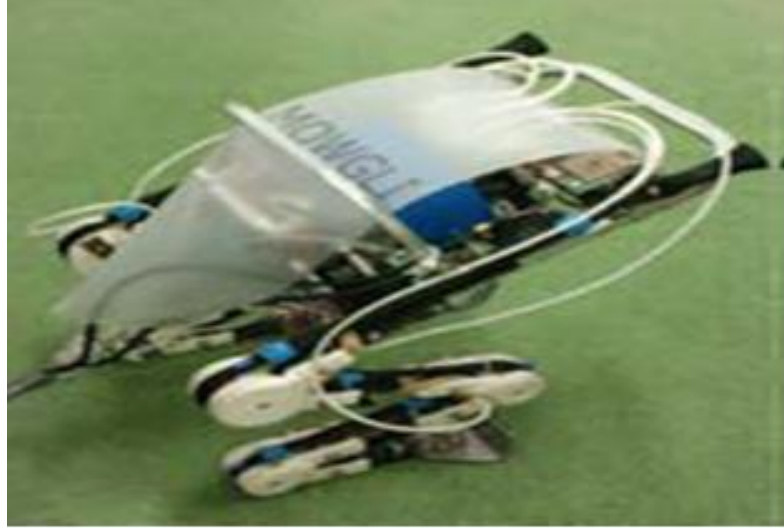
Şekil 2.10. Airhopper (Tanaka ve Hirose 2008)

Dexter, biped (iki ayaklı) robot Anybots şirketi tarafından tasarlandı. 1,78 m boyunda 61 kg ağırlığında iki ayak üzerinde yürüme atlama işlevlerini yerine getirip dinamik olarak kendini dengede tutabilmekteydi (Şekil 2.11). Dikeyde 0,2 m yüksekliğe sıçrayabilirken ve aynı zamanda yeniden dengesini kaybetmeden ayakları üzerinde durabilmekteydi (AnybotsInc. 2010).



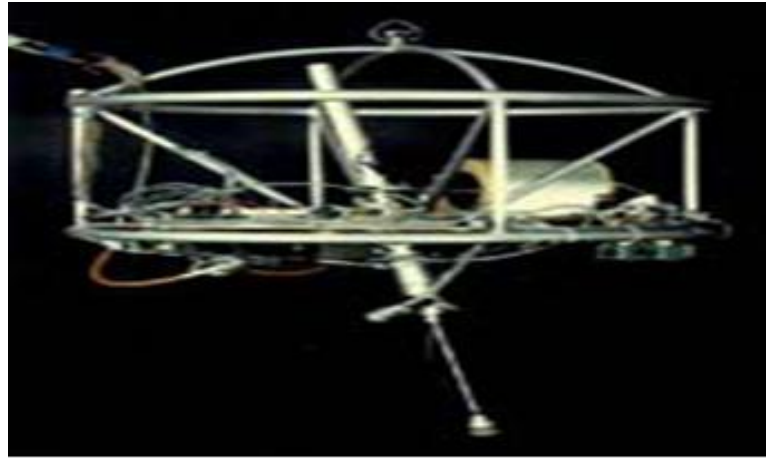
Şekil 2.11. Dexter biped (AnybotsInc. 2010)

Mowgli, Tokyo üniversitesinde Mowgli Bilişim Laboratuvarı'nda yapıldı. Her bacağı üç serbestlik dereceli olup, üç pnömatik eyleyici ile tahrik edilen bacaklı robottur. Son derece dinamik hareketlere sahip olup 3 kg ağırlığında, 0,26 m'ye kadar zıplayabilmekteydi (Şekil 2.12). Sonuç olarak pnömatik eyleyiciler hidrolik eyleyicilere göre daha düşük güç ağırlık oranına sahip iken, koşma, zıplama vb. durumlar için çok yönlü değillerdi (Niiyama ve ark 2007).



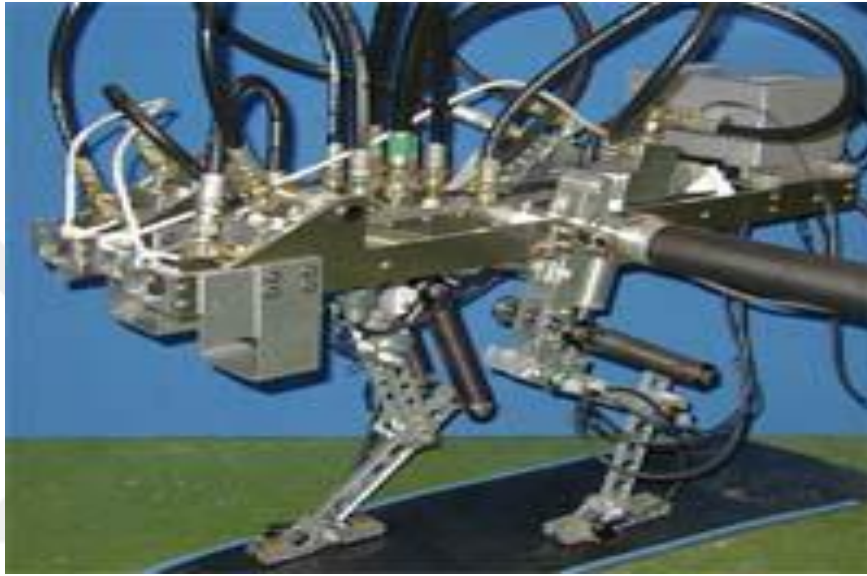
Şekil 2.12. Mowgli (Niiyama ve ark 2007)

Mark Raibert ve arkadaşları Cornegie Mellon Univesity ve Masachusetts Teknoloji Enstitüsü ile zıplayabilen ve koşabilen robot geliştirdiler. Aktif dengede kalma kontrolü üzerine öğrenme amaçlı çalışmalar yaptı. İlk olarak Monopod isimli robotu geliştirdi. Düzlem üzerinde noktasal hareketinin yanında hız ve pozisyon kontrolü yapıldı. Bu çalışmanın amacı, bacağın davranışını kontrol altına almaktı. 2,2 m/s hızla koşabiliyor dışarıdan darbe anında kendini dengeleyebiliyordu (Şekil 2.13). Atlama yüksekliği her atlama anında itme gücüne göre ayarlandı. İlk başta belirli yüksekliğe zıplama hareketi olsa da vücudu dengede tutma problemi vardı. Ek olarak robota yan taraflara hareketi sağlayan mafsalları yerleştirildi. Böylece yanlara ve ileri geriye doğru hareketi, ek bir mekanik düzenek olmadan sağlandı (Raibert ve ark 1986).



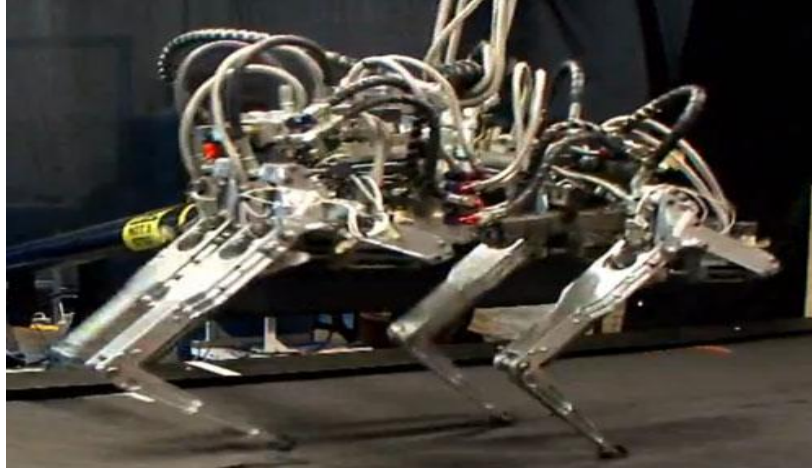
Şekil 2.13. Monopod (Raibert ve ark 1986)

Kenken, 1998 yılında Tokyo üniversitesinde Sang-Ho Hyon Koleji'nde hidrolik iki bacaklı robot olarak geliştirdi. İlham olarak köpeğin arka bacakları örnek alındı. Bacak hareketleri İki tane hidrolik eyleyici ile tahrik edildi (Şekil 2.14). Ayrıca eklemlerin hareket kolaylaştırılması için yaylar kullanıldı. Bacaklardaki yay elemanların kinetik enerjiyi depolayıp potansiyel enerjiye dönüştürülmesi sağlandı. Kenken robotunda, amfirik denetleyici, yaylar, ivmeölçer basınç sensörleri ve servo amplifikatörler kullanıldı (Hyon ve ark 2003).



Şekil 2.14. Kenken (Hyon ve ark 2003)

Cheetah, Boston Dynamics şirketinin Amerika Birleşik Devletleri Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA) ile beraber yürüttüğü proje çerçevesinde geliştirildi. Biyomimetik (canlı-taklitçilik) teknolojisinden faydalanılarak, çita hayvanından esinlenilerek tasarlanan Cheetah, hareketli omurga, kafa ve boyun yapısına sahipti (Şekil 2.15). Geliştirilen Dört bacaklı robotlardan ayıran en önemli özelliği, canlı anatomisinde olduğu gibi, hareket anında, omurga yapısını oynatacak şekilde hareketini tüm vücuda yayma prensibine dayalı olarak tasarlandı. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneylerde, saatte 80 km hıza ulaştığı ölçülmüştür. Geliştirici firma açıklamasında Cheetah robotun geçmiş projelerdeki gibi askeri amaçlı tasarlandığı belirtilmiştir (BostonDynamicsCorp 2013).



Şekil 2.15. Cheetah (BostonDynamicsCorp 2013)

Bigdog, DARPA tarafından, katır gibi yük taşıyabilen canlılardan esinlenerek tasarlandı. Engebeli, karlı, çamurlu, kaygan zemin vb. ortamlarda dengede kalabilme ve yük taşıyabilme kapasitesine sahipti. Arazide, askerlere eşlik etmesi amacıyla geliştirildi. Bigdog, 100x75 cm boyutlarında ve 108 kg ağırlığında, engebeli arazide saatte 6,5 km yol alabilmekte, aynı zamanda 35° eğimli arazide 1,4 m/s hızla tırmanabilmektedir. Sıcaklık, hareket, basınç, eklem ve radar sensörleri başta olmak üzere 69 sensöre sahiptir (Şekil 2.16). Bir bacağı, 4 eklemden oluşmakta, toplamda 16 adet eyleyici bulunmaktadır. Operatör tarafından giyilebilen elektronik donanımlı yelek sayesinde LIDAR (Lazer darbeleri kullanılarak bir nesne veya bir yüzeyin uzaklığını anlamaya yarayan teknoloji) radar teknolojisi kullanılarak kolayca kumanda edilebilir. Bigdog, 2008 yılında Boston Dynamics firması tarafından geliştirilen sonraki askeri amaçlı çalışmalara temel oluşturmuştur (BostonDynamicsCorp 2008, Raibert ve ark 2008).



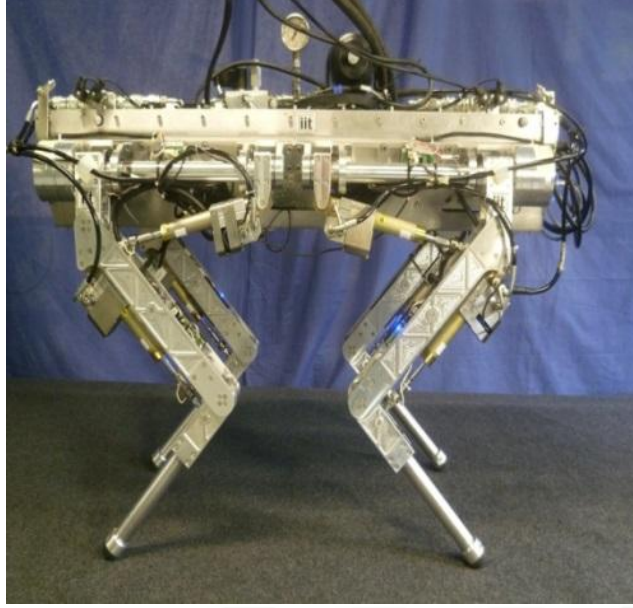
Şekil 2.16. Bigdog (Raibert ve ark 2008)

Alphadog, DARPA tarafından desteklenmiştir. Bigdog robotunun üst versiyonu olup, Bigdog'dan 10 kat sessiz çalışabilen, yük taşıyabilen, operatörünü LIDAR radar teknolojisiyle takip edebilen askeri amaçlı bir çalışmadır. Üzerinde bulunan gelişmiş sensörler sayesinde araziye algılayabilir engellerden kaçabilir. Toplamda 12 eyleyicisi bulunan robot 1,7 m boyunda ve 590 kg ağırlığında olup hidrolik eyleyicili bir tasarıma sahiptir (Şekil 2.17). 24 saat boyunca 32 km yol alabilir, aynı zamanda 182 kg yük taşıyabilir. Üzerinde bulunan gelişmiş sensörler sayesinde araziye algılar ve engellerden kaçabilir (BostonDynamicsCorp 2013).



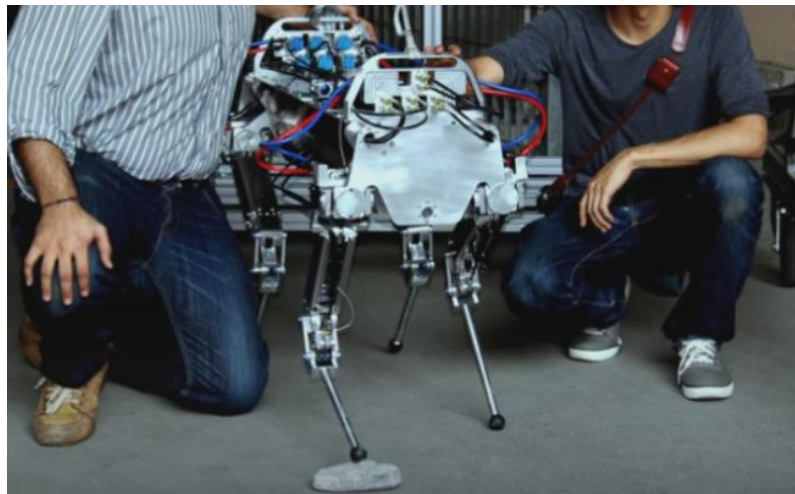
Şekil 2.17. Alphadog (DVIDS 2014)

2008 yılında Claudio Semini ve arkadaşları ilk olarak, Istituto Italiano Tecnologia Enstitüsü'nde, HyQ için ayak prototipiyle ilk çalışmasını gerçekleştirmiştir. 2010 yılında, HyQ projesi tamamlanmıştır. HyQ robotunun amacı, yüksek dinamik denge kabiliyetinin yanında, BIGDOG gibi yük taşıyabilen, askeri alanlarda kullanılabilen, nükleer santrallerin temizlenmesinde, uzay ve havacılık sanayisinde, arama kurtarma, ormancılık ve inşaat sektörü gibi insan hayatını kolaylaştıracak durumlar için geliştirilmiştir. HyQ, 80 kg ağırlığında, yaklaşık 1 m uzunluğunda ve 0,98 m genişliğinde olup alüminyum alaşım ve paslanmaz çelikten imal edilmiştir (Şekil 2.18). 12 serbestlik derecesine sahip olan robot 8 adet hidrolik silindir ve 4 adet servo motor tarafından harekete geçirilmektedir. Görüntü işleyici kameralar ve LIDAR radar sensörleri sayesinde denge yürüme becerilerini geliştirmiştir (Semini 2010).



Şekil 2.18. HyQ tasarımı (Semini 2010)

MiniHyQ, Claudio Semini ve arkadaşları tarafından 2015’de geliştirildi. Geliştirilen tasarımın en önemli özelliklerinden biri, optimize edilen ve isogram mekanizması geliştirilen bacak tasarımı sayesinde, bacağın açılma konum çalışma aralığını  $220^\circ$ ’ye kadar çıkarılmıştır. Bu da ayak boyunda kapalı konumda % 15 kısalma sağlamıştır. Bu özelliğiyle beraber yerden kalkabilme yeteneğinin yanında daha esnek bir yapıya sahiptir. Boyutsal ve donanımsal olarak optimize edilmesinden dolayı, ağırlığı 24 kg, uzunluğu 85 cm, yerden yüksekliği ise 75 cm’dir (Şekil 2.19). Bu özelliği robota taşınabilirlik kolaylığı sağlamıştır (Khan 2015).



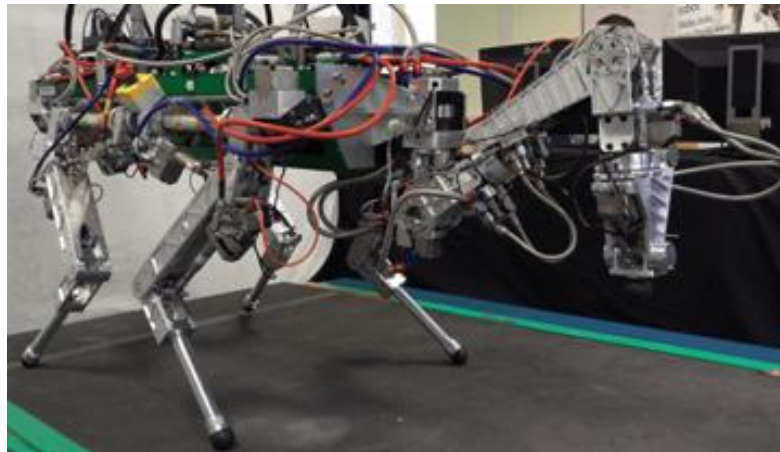
Şekil 2.19. MiniHyQ (Khan 2015)

HyQ2Max, HyQ ailesinden olup, geliştirilmiş çalışmalarındandır. Amaç olarak tasarımın optimize edilmesinin yanında, eklemlerin çalışma aralığını büyüterek, kabiliyet yeteneğini maksimuma çekmek için çalışmalar yapılmıştır (Şekil 2.20). Alüminyum alaşımdan (7000 serisi) imal edilmiştir (Semini ve ark 2015).



Şekil 2.20. HyQ2Max (Semini ve ark 2015)

HyQ-Centaur, HyQ2Max robotuna iki adet tutucu tasarımı eklenerek, arama kurtarma tutabilme, taşıma, kapı açabilme vb. el becerileri kazandıracak özellikte tasarlanmıştır. 6 serbestlik dereceli tutucu 12,5 kg ağırlığında ve hidrolik eyleyicili olup 74 cm uzayabilmekte, 10 kg ağırlık taşıyabilmektedir (Şekil 2.21). Mobil robotların giremeyeceği, insan hayatını tehlikeye sokacak ortamlarda, arama-kurtarma faaliyetlerini gerçekleştirmesi amacıyla geliştirilmiştir. Bu özellikleriyle dört ayaklı robotlardan farklı olarak yeni görevlerde yerini alabilecektir. (Ur Rehman ve ark 2017).



Şekil 2.21. HyQ-Centaur (Ur Rehman ve ark 2017)



Anymal, ETH Zurich ve ANYbotics tarafından geliştirilmiştir. Zorlu arazi koşullarında zıplama, koşma dengede kalabilme yeteneklerine sahiptir. Lazer sensörler ve kameralar sayesinde, robot sürekli haritalar oluşturarak çevresini doğru bir şekilde algılayabilmektedir. 0,5 m yüksekliğinde, ağırlığı 30 kg'dan az olan Anymal, 5-10 kg arasında yük taşıyabilmektedir (Şekil 2.22). Tasarımında malzeme olarak karbon fiber kullanılmış ve dinamik hareket kabiliyetini sağlamak amacıyla yüksek performanslı eyleyiciler kullanılmıştır. 280W'lık pilleriyle 2 saat çalışabilme özelliğine sahiptir (Hutter ve ark 2016).



Şekil 2.22. Anymal (Hutter ve ark 2016)

Spotmini, Boston Dynamics şirketi tarafından geliştirildi. Ofiste, evde rahatça gezebilen robot, bir tutucuya sahiptir. 0,84 m boyunda, 25 kg ağırlığında, kol mekanizması ile birlikte 30 ağırlığındadır (Şekil 2.23). Tutucu kol, 14 kg ağırlık taşıyabilmekte olup elektrik motorlarıyla hareket edebilen 5 serbestlik derecesine sahiptir (BostonDynamicsCorp 2013).



Şekil 2.23. Spotmini (BostonDynamicsCorp 2013)

### 3. EMPEDANS KONTROL

Hogan tarafından geliştirilen empedans kontrol yöntemi, kuvvet kontrol yönteminden daha çok bir etkileşim kontrol yöntemi olarak bilinir. Hogan'a göre empedans kontrolünün temel felsefesi manipülatör kontrol tasarımının yalnızca yörünge takibine göre değil, aynı zamanda manipülatörün mekanik empedansını ayarlayacak şekilde tasarlanmasıdır. Empedans kontrolü, literatürde konum ve kuvvet tabanlı olarak uygulanmaktadır. Konum tabanlı empedans kontrol yöntemi, geleneksel pozisyon denetleyicilerine sahip robotik sistemlerde, kuvvet ve etkileşim kontrolü gereksinimini karşılayabilmek için uygun ve gerçekleştirilebilir bir seçenektir.

Empedans kontrol, ortaya çıkan temas kuvvetlerinin empedans kuralına göre robot referans konumuyla gerçek konumu arasında bir fark ortaya çıkaracak biçimde kontrol edilmesi olarak tanımlanabilir.

Kuvvet-hareket ilişkisine göre, empedans kontrol tasarımı sıfır, bir ve ikinci dereceden bir dinamik model kullanılarak yapılabilir. İkinci dereceden kütle-yay-damper sistemiyle ifade edilen mekanik empedans, (3.1) denklemi ile tanımlanır. M, B ve K matrisleri atalet sönüm ve sertlik değerleridir.

$$M_d(\ddot{x} - \ddot{x}_d) + B_d(\dot{x} - \dot{x}_d) + K_d(x - x_d) = F \quad (3.1)$$

Sırasıyla M kütle, B sönüm katsayısını, K yay sabitini, F tepki kuvvetini, x robotun gerçek konumunu ve  $x_d$  ise robotun referans konumunu temsil etmektedir.

Empedans kontrolcü, robot ayakucunun istenilen yörüngeyi takip ederken çevreyle temas kurduğu noktada konum-kuvvet etkisinin etkileşimini düzenler. Gerçek sistemlerde bu etkileşim belli bir aralıkta tutulup temas kuvveti ve ayakucunun izleyeceği yol empedans kontrolcü aracılığıyla regüle edilerek çarpışmalar önlenir. Ayrıca, ölçülen temas kuvvetleri, kontak durumunun anında geri bildirimini sağlamak için denetleyiciye dahil edilmiştir. Kuvvet geri beslemeli sistemde, herhangi bir kuvvetle karşılaşmadığında yörünge takip edilir. Yörünge üzerinde yüzey ile temas anında bir tepki kuvveti oluştuğunda kuvvet sınırlandırılır ve empedans kontrolcü robotun dinamik davranışını kontrol edecektir.

Empedans kontrol, kuvvet/konum kontrolünde olduğu gibi istenilen yörüngeyi takip etmekten ziyade, yüzey etkileşim kuvvetleri ve robot konumu arasında yeni bir yörünge oluşturarak düzenler. Empedans kontrolün amacı, robotun dinamik

davranışlarının (mekanik empedans) revize edilmesi üzerinedir. Kuvvet geri beslemeli kontrolcüde robot yüzey ile etkileşim haline geçtiğinde mekanik empedans meydana gelir.. Empedans kontrolörü ayrıca, robotun yörünge takibide kontrol eder ve temas kuvvetleriyle ilişkilerini ayarlayarak, istenilen aralıkta temas kuvveti kontrolü sağlanır. Empedans kontrolcü, konum ve kuvvet kontrolü için parametre değişikliğine gerek kalmadan kontrolü sağlar. Empedans kontrolcüde temas halinde olacak yüzey ile ilgili bilgiye ihtiyacı yoktur. Sistem ve yüzey arasındaki dinamik etkileşim empedans yoluyla ayarlanılır. Bu sebeple empedans kontrol, özellikle etkileşim durumlarında, daha faydalıdır. Empedans kontrolcü, robotun yüzey ile temas anında robotun pozisyonunu, hızını, temas kuvvetini ölçüp geri besleme yoluyla istenen mekanik empedansa karar verir (Hogan 1985, Güney 2010).

### **3.1 Anlık Empedans Kontrol**

Anlık empedans kontrol, belirsiz çevre modeline karşı, robot dinamiklerini ayarlamak ve pozisyon tabanlı yöntemi uyarlamak için tasarlanmıştır. Dinamik tabanlı yaklaşım ve pozisyon tabanlı yaklaşım olmak üzere literatürde iki tip empedans kontrol uygulaması mevcuttur İkinci yöntem ilk yöntemin dinamik modele karşı hassasiyetini ve doğal duyarlılığını bertaraf etmek için ortaya konulmuştur. Fakat bunda da robotun gerçek pozisyon bilgisiyle modelden alınan veriler farklı olursa bu durum empedans hatası olarak bize geri dönmektedir. Empedans kontrol uygulamasıyla ilgili, iyi bir şekilde empedans takip edebilme kapasitesine sahip olan pozisyon kontrolcülerinin hatalarını giderebilecek şekilde tasarlanmış yeni yöntem kaynaklarda verilmiştir. Anlık empedans kontrol, empedans modeli robotun en güncel pozisyonunda yeniden başlatır bundan dolayı modelde pozisyon hataları birikmemiş olur (Hogan 1985, Güney 2010).

### **3.2 Uyarlamalı Empedans Kontrol**

Pratikte parametresel uyumsuzluklar her zaman yer alır ve değişken yük durumlarında bazı parametrelerin mevcut duruma göre değiştirilmesi gerekebilir. Böyle durumlarda, dinamik parametreleri hata miktarlarıyla ilişkili olarak doğrudan güncelleyerek tahmin eden uyarlamalı mekanizmalara başvurmak mümkündür. Bu amaca yönelik olarak, uyarlamalı kuvvet ve pozisyon kontrol yapıları geliştirilmiştir (Güney 2010).

### **3.3 Hibrit Empedans Kontrol**

Hibrit empedans kontrol, empedans kontrolü ve kuvvet geri beslemesini birleştirerek tek stratejiye indirgeyen bir yapı olarak kullanılmıştır. Melez empedans kontrolcüsü, manipülatörün dinamik özelliklerinin doğrusallaştırılması ve ayırım (decoupling) görevleri için dahili bir çevrim daha kullanır. Empedans kontrol, melez kontrol alt uzayında kullanılan pozisyon kontrol yerine de kullanılabilir. Bu durumda, arzu edilen manipülatör dinamiği sisteme kabul ettirilmiş olur (Güney 2010).

### **3.4. Genişletilmiş Empedans Kontrol**

Melez kontrol ve genişletilmiş empedans kontrol diye adlandırılan iki kontrol yapısı, gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörler için uyumlu hareket halini sağlamak için geliştirilmişlerdir. Esnek ve çarpışma önleyici kontrol yöntemi ayrıca sunulmuştur. Gereğinden fazla serbestlik dereceli manipülatörler için şu anki bilgisayar sistemlerinde daha verimli kullanılabilen uyumlu kontrol yöntemi önerilmiştir. Gereğinden fazla serbestlik dereceli manipülatörlerde esnek hareketin uygulanması için en uygun algoritma, algılamada ve kontrol çevrimindeki gecikme zamanını düşüren empedans kontrol yöntemi olarak önerilmiştir (Güney 2010).

### **3.5. Uzaysal Empedans Kontrol**

Uzaysal parametreler, örneğin dönüştürülebilir esnemezliğin başlıca yönleri, sezgisel ve uzaysal dönüşüm özellikleri robotun etkileşim halinde olacağı nesne konfigürasyonuna bağlı olarak seçilebilirler. Uzaysal uyumluluk kontrolü, sezgisel yolla parametrize edilmiş uyumlu kontrolün öklid geometriksel şeklidir (Güney 2010).

## 4. DÖRT AYAKLI BİR ROBOTUN BİR BACAĞININ MODELLENMESİ

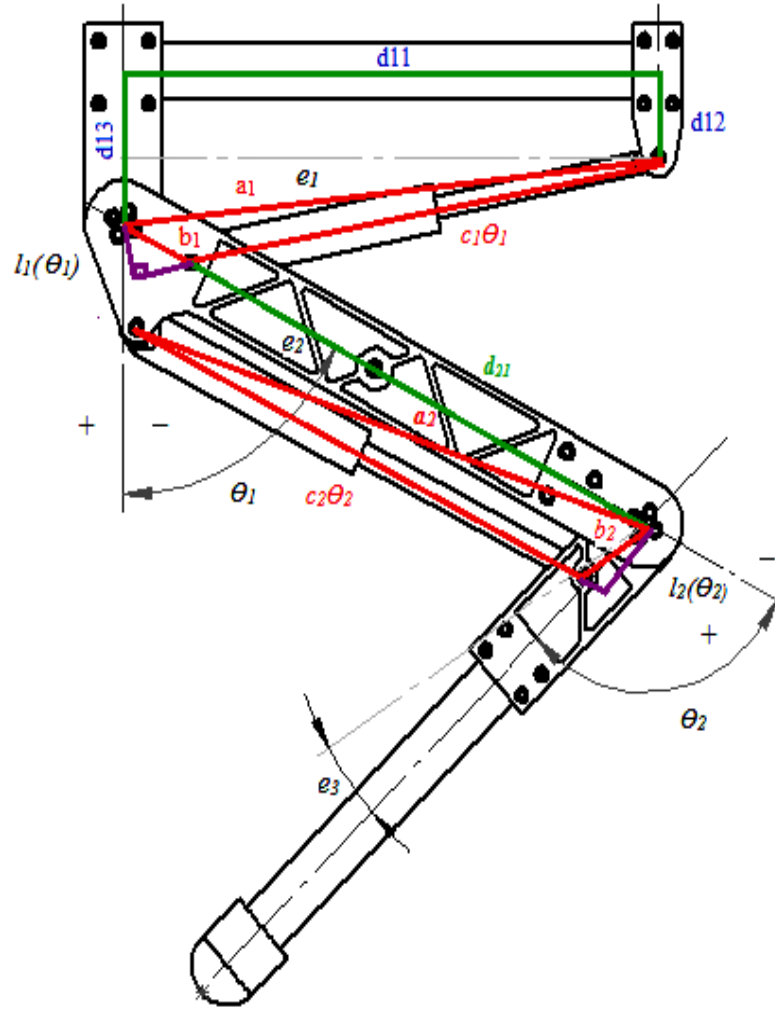
### 4.1. Sistem Tanımı ve Fiziksel Modeli

Öncelikli olarak herhangi bir mekanik tasarıma başlamadan önce, tasarımın amacı ve teknik özelliklerini tanımlamak gerekir. Tasarlanacak modelin, ilk prototipi için başlangıç spesifikasyonları genellikle belirsizdir. Tasarım süresince kademeli olarak ayarlanır. Genel olarak bacaklı robot tasarımları, doğadaki canlılardan esinlenilerek geliştirilmiştir. İstenilen özelliklere göre tasarım için eyleyici seçimi yapılır. Tasarım boyutlandırmasında, sistemden istenen görevler önemlidir. Dengede kalabilme, yük taşıyabilme, belirli hızlara ulaşabilme vb. özelliklere sahip olması istenen bacaklı robotlarda, malzeme seçimi önemlidir. Malzeme olarak, hafif ve yük taşıyabilen yapıya sahip olması için, havacılık sanayisinde yaygın olarak kullanılan mukavemet ağırlık oranı yüksek alüminyum alaşımı (Al 7075) seçilmiştir.

Üzerinde çalıştığımız model, 12 serbestlik dereceli dört ayaklı robotun bir bacağının tasarımı üzerine yapılan çalışmadır. İncelenen yük taşıyabilen hayvan anatomisinden esinlenilerek ayağın katı modeli oluşturulmuştur. Katı model oluşturulmasında CAD yazılımından faydalanılmıştır. Bu model dört ayaklı bir robotta kullanılacak olmasından dolayı hareket kabiliyeti ve ağırlığı göz önüne alınarak tasarlanmıştır. Eyleyici olarak hidrolik silindirler seçilmiştir.

İki serbestlik dereceli bacak modeli sabit gövde, iki hareketli parça (üst uzuv, alt uzuv) ve 2 adet hidrolik silindirden oluşmaktadır. Kinematik ve dinamik analizi çıkarılarak sistem tasarımı yapılmıştır. Şekil 4.1.'de gösterilen  $d_{11}$ ,  $d_{12}$ ,  $d_{13}$  parametrik değerler, bacağın gövde kısmını oluşturur. Burada  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$  ( $\theta_1$ ) e1, kalça eklem olarak bilinen (üst uzuv) değişkenlerini,  $a_2$ ,  $b_2$ ,  $c_2$  ( $\theta_2$ ),  $e_2$  diz eklem olarak bilinen (alt uzuv) değişkenlerini temsil etmektedir.

$c_1$  ( $\theta_1$ ),  $c_2$  ( $\theta_2$ ), silindirin açık konumunu,  $e_1$ ,  $e_2$  ise silindir bağlantı noktasının yaptığı açıdır.  $l_1$  ( $\theta_1$ ),  $l_2$  ( $\theta_2$ ) ise hareket eden kol koludur.  $q_1$  ve  $q_2$  değişkenleri mafsalların çalışma aralıklarıdır.



Şekil 4.1. Bacak tasarımı geometrik parametreleri

Dört ayaklı robotun tek bacağına konum analizi yapılarak değişken ve parametrelere ait denklemler aşağıda verilmiştir. Denklemlerin çıkarılışında trigonometrik ve kosinus teoremlerinden yararlanılmıştır. Bacakın konum analizi (4.1-4.7) denklemleriyle hesaplanmaktadır.

$$a_1 = \sqrt{d_{11}^2 + (d_{13} - d_{12})^2} \quad (4.1)$$

Burada  $a_1$  uzunluğu, üst silindirin gövde bağlantı noktası ile üst uzuv bağlantı noktası arasındaki uzaklıktır. Denklem dik üçgenlerde Pisagor bağıntısından yararlanılarak çıkarılmıştır.

$$e_1 = \arctan\left(\frac{(d_{13} - d_{12})}{d_{11}}\right) \quad (4.2)$$

$e_1$ , silindir bağlantı noktasının  $d_{11}$  gövde uzunluğuyla ilgili açıdır.

$$c_1(\theta_1) = \sqrt{a_1^2 + b_1^2 - 2 \cdot a_1 b_1 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1 + e_1\right)} \quad (4.3)$$

$c_1(\theta_1)$  değeri üst silindir uzunluğudur. Denklem, kosinüs teoreminden yararlanılarak elde edilmiştir.

$$l_1(\theta_1) = a_1 \sin\left(a_1 \cos\left(\frac{(a_1^2 + c_1(\theta_1)^2 - b_1^2)}{2a_1 c_1(\theta_1)}\right)\right) \quad (4.4)$$

$l_1(\theta_1)$  üst uzvun dönme merkezinin, üst silindir bağlantı noktasına olan dik uzaklığıdır.

$$a_2 = \sqrt{d_{21}^2 + d_{22}^2} \quad (4.5)$$

Burada  $a_2$  uzunluğu, alt silindirin üst uzvun bağlantı noktası ile alt uzvun bağlantı noktası arasındaki uzaklıktır. Dik üçgenlerde Pisagor bağıntısından yararlanılarak çıkarılmıştır.

$$c_2(\theta_2) = \sqrt{a_2^2 + b_2^2 - 2a_2 b_2 \cos(\pi - \theta_2 - e_2 - e_3)} \quad (4.6)$$

$c_2(\theta_2)$  terimi, üst silindir uzunluğudur. Denklem, kosinüs teoreminden yararlanılarak elde edilmiştir.

$$l_2(\theta_2) = a_1 \sin\left(\frac{a_2 \cos(c_2(\theta_2)^2 - b_2^2)}{2a_2 c_2(\theta_2)}\right) \quad (4.7)$$

$l_2(\theta_2)$  alt uzvun dönme merkezinin, alt silindir bağlantı noktasına olan dik uzaklığıdır.

Çizelge 4.1 'de bacağın parametre/değişken değerleri verilmiştir.

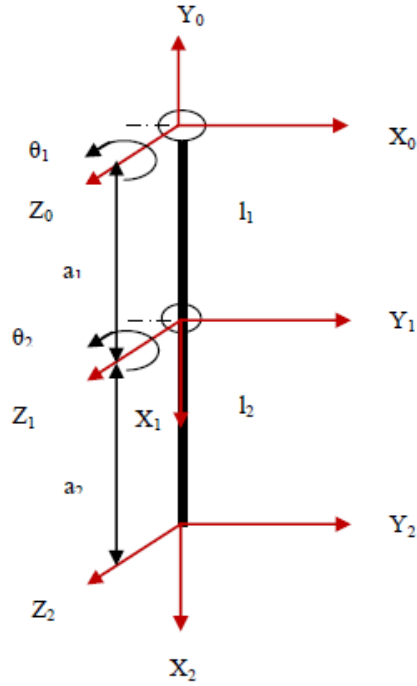
**Çizelge 4.1.** Tasarım parametreleri

Konum	Parametre/Değişken	Değerler
Bacak/gövde	$d_{11}$	0,32 m
	$d_{12}$	0,45 m
	$d_{13}$	0,08 m
Kalça eklem	$d_{21}$	0,32 m
	$d_{22}$	0,045 m
	$\theta_1$	$-70^\circ \dots +50^\circ$
	$a_1$	0,32 m
	$b_1$	0,45 m
	$e_1$	$6,25^\circ$
	$c_1(\theta_1)$	(4.3)
	$l_1(\theta_1)$	(4.4)
Diz eklem	$\theta_2$	$+20^\circ \dots +140^\circ$
	$a_2$	0,32 m
	$b_2$	0,045
	$e_2$	$8,0^\circ$
	$e_3$	$6,0^\circ$
	$c_2(\theta_2)$	(4.6)
	$l_2(\theta_2)$	(4.7)
Toplam ağırlık		7,540 kg



## 4.2. İleri ve Ters Kinematik Analiz

Bu bölümde iki serbestlik dereceli mekanizmanın ileri ve ters kinematik hesaplamaları yapıp açısal denklemler elde edilmiştir. İlk olarak iki serbestlik dereceli bacak tasarımı üzerinde serbest uzayda eksen takımları yerleştirilmiştir (Şekil 4.2). Daha sonra D-H tablosu oluşturulmuş olup, dönüşüm matrisleri elde edilmiştir. Elde edilen matrisler sonucunda ileri ve ters kinematik analizi yapılmıştır.



Şekil. 4.2. Bacak modeli eksen takım yerleşimi

Sistemin D-H parametreleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. D-H parametreleri

Eklemler	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$	$\theta_i$
0-1	0	$l_1$	0	$\theta_1$
1-2	0	$l_2$	0	$\theta_2$

Elde edilen D-H parametrelerine göre, (4.8-4.15) transformasyon matris denklemleri çıkarılarak ileri kinematik analizi yapılmıştır.

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & l_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & l_1 \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & l_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & l_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$${}^0_2T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & l_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & l_1 \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & l_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & l_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$A = \begin{bmatrix} C(\theta_1)C(\theta_2) - S(\theta_1)S(\theta_2) \\ C(\theta_1)S(\theta_2) + C(\theta_2)S(\theta_1) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$B = \begin{bmatrix} -C(\theta_1)S(\theta_2) - C(\theta_2)S(\theta_1) \\ C(\theta_1)C(\theta_2) - S(\theta_1)S(\theta_2) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$D = \begin{bmatrix} l_1C(\theta_1) + l_2C(\theta_1)C(\theta_2) - l_2S(\theta_1)S(\theta_2) \\ l_1S(\theta_1) + l_2C(\theta_1)S(\theta_2) + l_2C(\theta_2)S(\theta_1) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$${}^0_2T = [A \ B \ C \ D] \quad (4.15)$$

Ters kinematik analiz için (4.16-4.19) homojen dönüşüm matrisleri çıkarılır,

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & l_1 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$${}^0_3T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \quad (4.19)$$

İleri yön kinematiğine ait dönüşüm matrisinin her iki tarafı  ${}^0_1T^{-1}$  ile çarpılır.

$${}^0_1T^{-1} \cdot {}^0_3T = {}^0_1T^{-1} \cdot {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \quad (4.20)$$

Bilindiği gibi  ${}^0_1T^{-1} \cdot {}^0_1T = I$  olduğundan denklem aşağıdaki gibi olur.

$${}^0_1T^{-1} \cdot {}^0_3T = {}^1_2T \cdot {}^2_3T \quad (4.21)$$

$$(4.22)$$

$${}^0_1R = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

$${}^0_1R^T = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

${}^0_1T$  dönüşüm matrisinin konum vektörü sıfır olduğundan;

$$-{}^0_1R^T \cdot {}^0P_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$${}^0_1T^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

elde edilir. Bu matrisi  ${}^0_3T$  ileri kinematiği temsil eden matrisle çarpılır.

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

$${}^0_1T^{-1} {}^0_3T = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

${}^0_1T^{-1} \cdot {}^0_3T$  çarpımı bulundu.  ${}^1_2T \cdot {}^2_3T$  matrisler çarpılarak iki sonuç birbirine eşitlenir.

$${}^1_2T \cdot {}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & l_1 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & l_2\cos\theta_2 + l_1 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & l_2\cos\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

$$\cos\theta_1 r_{11} + \sin\theta_1 r_{21} = \cos\theta_2 \quad (4.30)$$

$$-\sin\theta_1 r_{11} + \cos\theta_1 r_{21} = \sin\theta_2 \quad (4.31)$$

$$r_{31} = 0 \quad (4.32)$$

$$\cos\theta_1 r_{12} + \sin\theta_1 r_{22} = -\sin\theta_2 \quad (4.34)$$

$$-\sin\theta_1 r_{12} + \cos\theta_1 r_{22} = \cos\theta_2 \quad (4.35)$$

$$r_{32} = 0 \quad (4.36)$$

$$\cos\theta_1 r_{13} + \sin\theta_1 r_{23} = 0 \quad (4.37)$$

$$-\sin\theta_1 r_{13} + \cos\theta_1 r_{23} = 0 \quad (4.38)$$

$$r_{33} = 0 \quad (4.39)$$

$$\cos\theta_1 p_x + \sin\theta_1 p_y = l_2 \cos\theta_2 + l_1 \quad (4.40)$$

$$-\sin\theta_1 p_x + \cos\theta_1 p_y = l_2 \sin\theta_2 + l_1 \quad (4.41)$$

$$p_z = 0 \quad (4.42)$$

(4.29-4.42) eşitlikleri elde edilir. Ters kinematik çözümün tamamı mümkünse kol uzunlukları cinsinden elde edilmelidir. Bu nedenle (4.40). ve (4.41) denklemlerin her iki tarafının karesi alınıp alt alta toplanır. Daha sonra eşitliğin sol tarafı  $p_x^2$  ve  $p_y^2$ , sağ tarafı da  $l_2^2$  parantezine alınır.

$$p_x^2 + p_y^2 = l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos\theta_2 + l_1^2 \quad (4.43)$$

$$\cos\theta_2 = \left( \frac{p_x^2 + p_y^2 - l_2^2 + l_1^2}{2l_1 l_2} \right) \quad (4.44)$$

$\cos\theta = a$  ise  $\theta = \arctan 2(\pm \sqrt{1 - a^2}, a)$  denkleminde uyarlanır.

$$\theta_2 = \arctan 2 \sqrt{\pm \left( 1 - \frac{p_x^2 + p_y^2 - l_2^2 + l_1^2}{2l_1 l_2}, \frac{p_x^2 + p_y^2 - l_2^2 + l_1^2}{2l_1 l_2} \right)} \quad (4.45)$$

$$\cos\theta_1 p_x + \sin\theta_1 p_y = l_2 \cos\theta_2 + l_1 \quad (4.46)$$

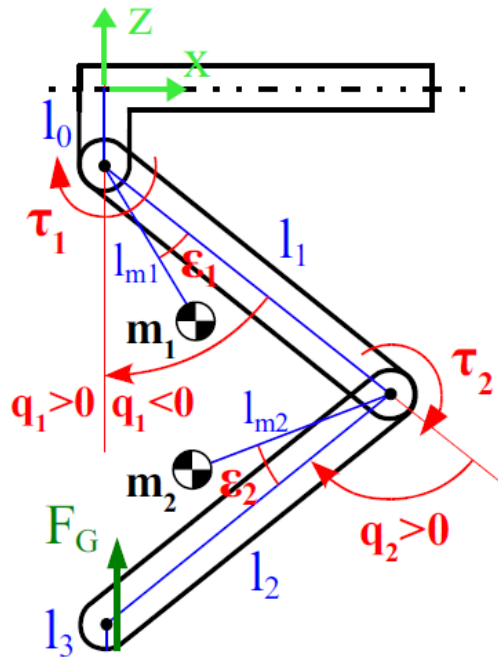
Bu ifadeyi de  $a \sin\theta + b \cos\theta = c$  uyarlar.

$$\theta = \arctan 2(a, b) \pm \theta = \arctan 2(\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}, c) \theta_1 = \arctan 2(p_y, p_x) \pm \theta \quad (4.47)$$

$$\theta_1 = \arctan 2\left(\sqrt{p_y^2 + p_x^2 - (l_2 \cos\theta_2 + l_1)}, (l_2 \cos\theta_2 + l_1)\right) \quad (4.48)$$

### 4.3 Dinamik Analiz

Bu bölümde iki serbestlik dereceli bacağın Lagrange dinamik modeli çıkarılacaktır. Denklemleri basitleştirmek için kalça (üst uzuv) bölümünün silindiri ihmal edilmiştir. Çünkü burada silindir kalça grubuna sabitlenmiştir. Diz silindirinin kütlesi üst bacak bölümüne eklenmiştir. Silindirlerin kütle ve atalet değerleri CAD yazılımıyla hesaplanmıştır. Burada  $m_1$  ve  $m_2$ , uzuvların ağırlık merkezlerini temsil etmektedir.



Şekil. 4.3. Kinematik model değişkenleri

İlk olarak  $m_1$  ve  $m_2$  ağırlık merkezlerinin x-z koordinat sisteminde konumları hesaplandı.

$$r_{m1} = \begin{bmatrix} x_{m1} \\ z_{m1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_{m1} \sin(q_1 + \varepsilon_1) \\ -l_0 - l_{m1} \cos(q_1 + \varepsilon_1) \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

$$r_{m2} = \begin{bmatrix} x_{m2} \\ z_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 \sin q_1 - l_{m2} \sin k \\ -l_0 - l_1 \cos q_1 - l_{m2} \cos k \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

$$k = q_1 + q_2 + \varepsilon_2 \quad (4.51)$$

$m_1$  ve  $m_2$  nin x-z koordinat sisteminde hızları:

$$\dot{r}_{m1} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{m1} \\ \dot{z}_{m1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_{m1} \cos(q_1 + \varepsilon_1) & 0 \\ l_{m1} \sin(q_1 + \varepsilon_1) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

$$\dot{r}_{m2} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{m2} \\ \dot{z}_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 \cos q_1 - l_{m2} \cos k & -l_{m2} \cos k \\ l_1 \sin q_1 + l_{m2} \sin k & l_{m2} \sin k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

$$v_{m1}^2 = \dot{x}_{m1}^2 + \dot{z}_{m1}^2 = \dot{q}_1^2 l_{m1}^2 \sin^2(q_1 + \varepsilon_1) + \dot{q}_1^2 l_{m1}^2 \cos^2(q_1 + \varepsilon_1) = \dot{q}_1^2 l_{m1}^2 \quad (4.54)$$

$$v_{m2}^2 = \dot{x}_{m2}^2 + \dot{z}_{m2}^2 \quad (4.55)$$

$$v_{m2}^2 = \dot{q}_1^2 l_1^2 + (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 l_{m2}^2 + 2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 l_1 l_{m2} \cos(q_2 + \varepsilon_2) \quad (4.56)$$

Potansiyel enerjisi U;

$$U_1 = -gm_1 l_{m1} \cos(q_1 + \varepsilon_1) \quad (4.57)$$

$$U_2 = -gm_2 (l_1 \cos q_1 + l_{m2} \cos k) \quad (4.58)$$

$$U = U_1 + U_2 \quad (4.59)$$

Kinetik Enerjisi T;

$$T_1 = \frac{1}{2} m_2 (\dot{q}_1 l_1^2 + (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 l_{m2}^2 + 2 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) l_1 l_{m2} \cos(q_2 + \varepsilon_2)) + \frac{1}{2} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 I_{2zz} \quad (4.60)$$

$$T = T_1 + T_2 \quad (4.61)$$

$$T = \frac{1}{2} \dot{q}_1^2 (m_1 l_{m1}^2 + m_2 l_1^2 + I_{1zz}) + \frac{1}{2} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 (m_2 l_{m2}^2 + I_{2zz}) + \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) m_2 l_1 l_{m2} \cos(q_2 + \varepsilon_2) \quad (4.62)$$

$$L = T - U \quad (4.63)$$

$$L = \frac{1}{2} \dot{q}_1^2 (m_1 l_{m1}^2 + m_2 l_1^2 + I_{1zz}) + \frac{1}{2} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 (m_2 l_{m2}^2 + I_{2zz}) + (\dot{q}_1 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) m_2 l_1 l_{m2} \cos(q_2 + \varepsilon_2) + gm_1 l_{m1} \cos(q_1 + \varepsilon_1) + gm_2 l_1 \cos q_1 + gm_2 l_{m2} \cos k \quad (4.64)$$

Lagrange denklemi:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad i = 1, 2 \quad (4.65)$$

Birinci adım  $\frac{\partial L}{\partial q_i}$ :

$$\frac{\partial L}{\partial q_1} = \dot{q}_1 (m_1 l_{m1}^2 + m_2 l_1^2 + I_{1zz}) + (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) (m_2 l_{m2}^2 + I_{2zz}) + (2\dot{q}_1 + \dot{q}_2) m_2 l_1 l_{m2} \cos(q_2 + \varepsilon_2) \quad (4.66)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_2} = (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) (m_2 l_{m2}^2 + I_{2zz}) + \dot{q}_1 m_2 l_1 l_{m2} \cos(q_2 + \varepsilon_2) \quad (4.67)$$

İkinci adım:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} = (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) (m_2 l_{m2}^2 + I_{2zz}) + \dot{q}_1 (m_2 l_1 l_{m2} \cos(q_2 + \varepsilon_2)) - \dot{q}_1 m_2 l_1 l_{m2} \sin(q_2 + \varepsilon_2) \dot{q}_2 \quad (4.68)$$

Üçüncü adım:

$$\frac{\partial L}{\partial q_1} = -gm_1 l_{m1} \sin(q_1 + \varepsilon_1) - gm_2 l_1 \sin q_1 - gm_2 l_{m2} \sin k \quad (4.69)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_2} = -(\dot{q}_1 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) m_2 l_1 l_{m2} \sin(q_2 + \varepsilon_2) - gm_2 l_{m2} \sin k \quad (4.70)$$

Lagrange denklemi  $\tau_1$  ve  $\tau_2$  için uygulanırsa;

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad i = 1, 2 \quad (4.71)$$

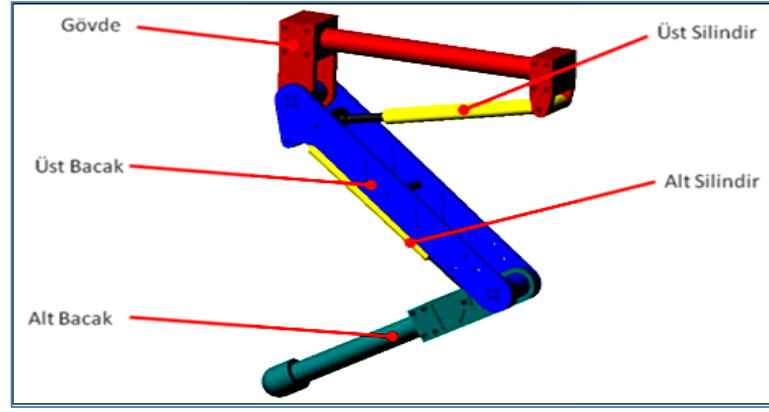
$$\begin{aligned} \tau_1 = & q_1 (m_1 l_{m1}^2 + m_2 l_1^2 + m_2 l_{m2}^2 + 2m_2 l_1 l_{m2} \cos(q_2 + \varepsilon_2) + I_{1ZZ} + I_{2ZZ}) \\ & + q_2 (m_2 l_{m2}^2 + m_2 l_1 l_{m2} \cos(q_2 + \varepsilon_2) + I_{1ZZ}) - 2q_1 q_2 m_2 l_1 l_{m2} \sin(q_2 + \varepsilon_2) \\ & - q_2^2 m_2 l_1 l_{m2} \sin(q_2 + \varepsilon_2) + gm_1 l_{m1} \sin(q_2 + \varepsilon_2) + gm_2 l_1 \sin q_1 + gm_2 l_{m2} \sin k \end{aligned} \quad (4.72)$$

$$\begin{aligned} \tau_2 = & q_1 (m_2 l_{m2}^2 + m_2 l_1 l_{m2} \cos(q_2 + \varepsilon_2) + I_{2ZZ}) + q_2 (m_2 l_{m2}^2 + I_{2ZZ}) \\ & + q_1^2 m_2 l_1 l_{m2} \sin(q_2 + \varepsilon_2) + gm_2 l_{m2} \sin k \end{aligned} \quad (4.73)$$

#### 4.4. MATLAB/Simmechanics Modeli

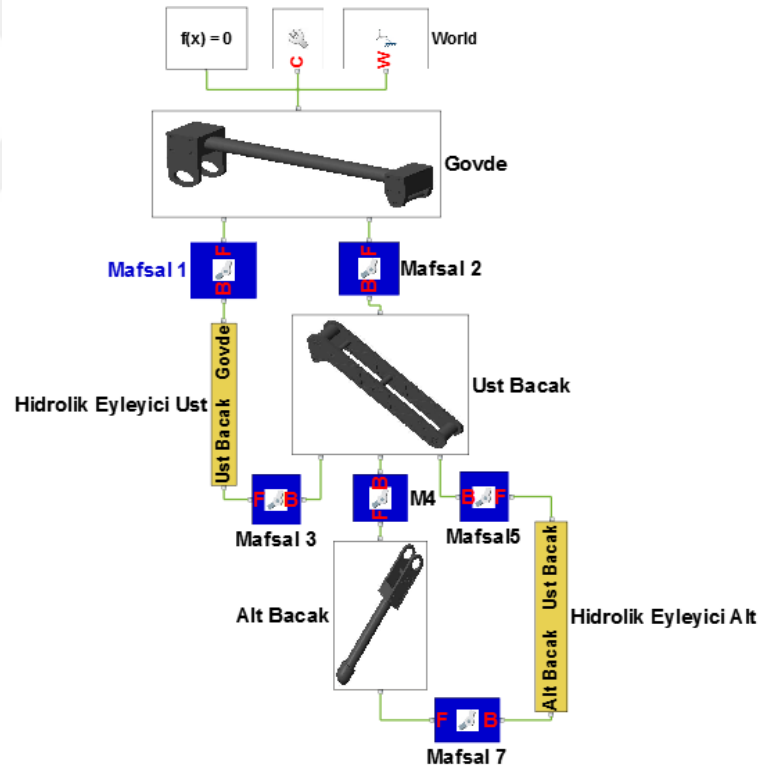
Üzerinde çalıştığımız model 12 serbestlik dereceli dört ayaklı robot için bir bacağına tasarımı üzerine çalışılmıştır. Bacağın mekanik tasarımı anatomik yapısı incelenen yük taşıyabilen katır anatomisinden yararlanılarak ayağının katı modeli oluşturulmuştur. Katı model oluşturulmasında CAD yazılımından faydalanılmıştır. Bu model dört bacaklı bir robotta kullanılacak olmasından dolayı hareket kabiliyeti ve ağırlığı göz önüne alınarak tasarlanmıştır. İki serbestlik dereceli ayak modeli, sabit gövde, iki hareketli parça (üst bacak, alt bacak) ve 2 adet hidrolik silindirlere oluşmaktadır. Modele ait ekran çıktısı Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Fiziksel modelin oluşturulmasında, MATLAB yazılımına ait, bütün gerekli parametreleri CAD yazılımı ile oluşturulan katı modelden alabilen Simulink/Simscape eklentisinden yararlanılmıştır. Şekil 4.5’de bacağına MATLAB/Simmechanics modeli gösterilmiştir. Solidworks ile oluşturulan katı modeli Simulink ortamına aktardığımızda uzuvlar için kısıtlar, uzuv boyutları, ağırlık merkezi, kütle ve atalet gibi fiziksel özellikler ilgili bloklarla tanımlanmıştır. Bu yöntemle benzetim için gerekli matematiksel modele ihtiyaç olmadan hesaplamaların Simulink tarafından yapılması sağlanmıştır. Dört ayaklı robot için tasarlanan bacak, gövde, üst silindir, bel bölgesi uzvu olarak üst bacak, alt silindir ve diz bölümü, alt baktan oluşmaktadır.





Şekil 4.4. CAD modeli

Şekil 4.5’de verilen MATLAB/Simmechanics modelinde gerekli parametreler doğrultusunda tasarlanan uzuvlar, mafsallarla bağlanarak sistem modellenmesi yapılmıştır.



Şekil 4.5. Bacığın MATLAB/Simmechanics modeli

## 5. KONTROLCÜ TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

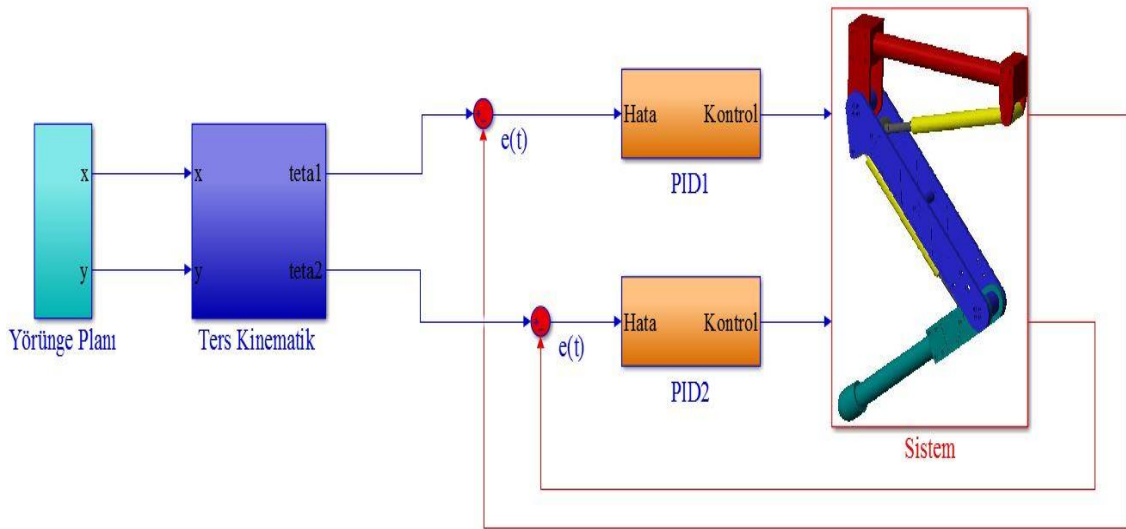
Bu Bölümde, robot bacağının kontrolcü tasarımı ve optimizasyon çalışmaları üç alt başlıkta verilmiştir. Öncelikli olarak, Empedans kontrolcü ve optimizasyon çalışmalarına temel teşkil etmesi amacıyla kontrolcü tasarlanmıştır. Eklemlerin referans açısal konum değerlerini sağlayarak, sistemin ayakucu yörünge kontrolünü gerçekleştirmeye yönelik, PID kontrolcü tasarımı yapılmış, kontrolcü kazançları deneme yanılma yöntemiyle belirlenmiştir.

Daha sonra, tezin ana konusunu oluşturan, sistem ayakucu temas kuvvetinin önem arz ettiği kırılğan, kaygan veya tehlikeli (mayınlı arazi vb.) alanlarda, ayakucunun yüzey ile noktasal temasını düzenleyen PID tabanlı hibrit kuvvet/ konum kontrolü için empedans kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. PID-Empedans kontrolcünün, ayakucunun istenilen yörüngeyi referans değere göre gerçekleştirirken, aynı zamanda yüzey ile temas kuvvetinin ve düşeyde konum kontrolünü başarılı bir şekilde sağlayabilmesi amaçlanmıştır.

Ön tasarımı yapılan PID tabanlı hibrit kuvvet/konum empedans kontrolcü cevabını iyileştirmek için; P,I,D kazançları ve Empedans M,B,K, Katsayıları Arı algoritması ile optimize edilmiştir. Optimizasyon sonrası yeni parametreler ile kontrolcü performansı artırılması hedeflenmiştir.

### 5.1 PID Kontrolcü ile Ayakucu Yörünge Kontrolü

Köpek anatomisinden yararlanılarak tasarlanan bacak modeli üzerinden, sistemin adım hareketinin kontrolü için PID kontrolcü tasarımı bu başlık altında detaylı incelenmiştir. Uygun bir adım yörüngesi (profili) belirlenmesi, bu profili sağlayacak eklemlerin açısal konumları, ters kinematik yöntemleri uygulanarak hesaplanması ve PID kontrolcü tasarımı detaylı olarak izah edilmiştir. Şekil 5.1’de sistemin MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan genel kontrolcü şeması verilmiştir.



Şekil 5.1. PID kontrolcüye ait genel kontrol şeması

Hayvan anatomilerinin adım hareketi göz önüne alarak dairesel bir adım yörüngesi belirlenmiştir. Belirlenen adım profilinin, mafsalsal değişkenlerinin elde edilmesi için mekanizmanın ters kinematik analizi yapılarak MATLAB/Simulink modeline bu değişkenlere ait denklemler eklenmiştir. Daha sonra sistemin ayakucunun istenen yörüngeyi takip edebilmesi için üst ve alt eklemler için iki ayrı PID kontrolcü tasarlanmıştır. PID kazançları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. PID kontrolcü katsayıları

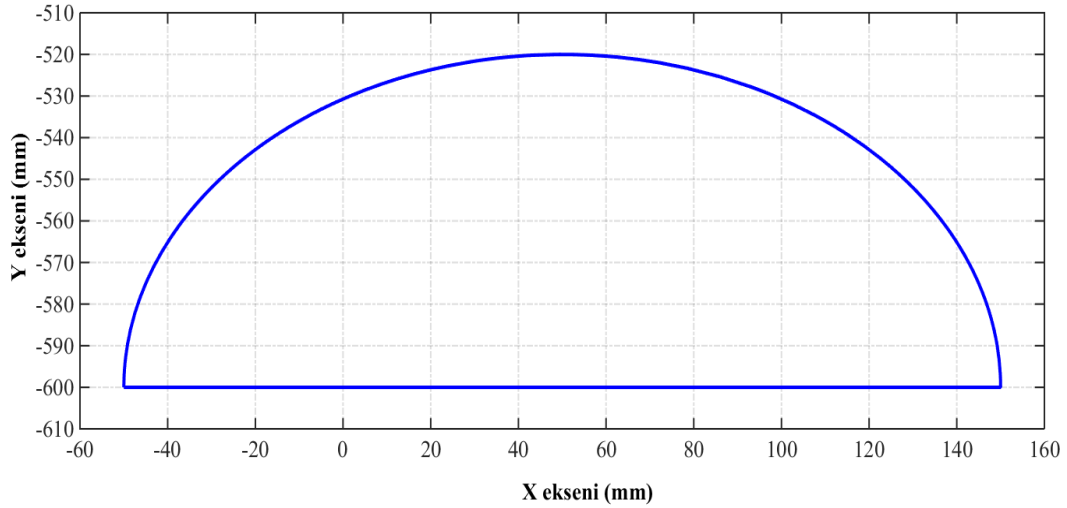
Parametre	$K_p$	$K_i$	$K_d$	N
$q_1$ (Üst uzuv açısı)	3.24	2.15	4.13	1000
$q_2$ (Alt uzuv açısı)	4.12	3.11	3.41	1000

Sistemin yörüngeye karşılık cevapları elde edilmiş ve sonuçlar grafiksel olarak 6. bölümde verilecektir. Aynı zamanda yörünge kontrolünün performansı tartışılıp, 6.2 ve 6.3. bölümlerde iyileştirme çalışmaları verilmiştir. Tasarlanan yörünge planlamasında bacağın ayakucunun ( $P_x$ ,  $P_y$ ) koordinatlarında izlemesini istediğimiz yörünge planı olarak x eksenini doğrultusunda 200 mm, y eksenini doğrultusunda 80mm hareket etmesi istenmiştir. Aşağıda Şekil 5.2’de ayakucunun izlemesi istenilen yörünge

verilmiştir. Ayrıca denklem (5.1)'de ayakucunun yörüngesine ait matematiksel ifadesi (frekans denklemi) verilmiştir. Burada; A genliği, w; frekans değerlerini,  $X_0$  ve  $Y_0$  ise ayakucunun başlangıç konumlarını ifade etmektedir.

$$X_d = A \cdot \cos(\omega \cdot t) + x_0 \quad (5.1)$$

$$Y_d = A \cdot \sin(\omega \cdot t) + y_0 \quad (5.2)$$

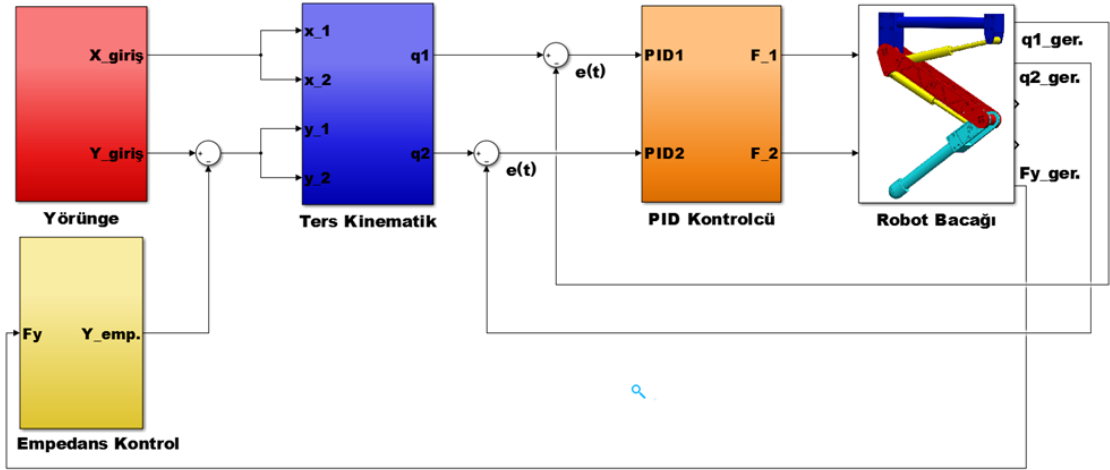


Şekil 5.2. Sistemin ayakucunun izlemesi için istenilen yörünge

Burada x-y düzleminde izlenilmesi gereken değerlerin seçimi bacağın boyutları, açılarının çalışma aralığı, hayvan bacağı incelenerek normal yürüyüş, tırıs yürüyüş için gerekli değerler dikkate alınmıştır.

## 5.2. PID Tabanlı Hibrit Kuvvet/Yörünge Empedans Kontrolcü Tasarımı

Şekil 5.3'de sistemin genel kontrol blok şeması görülmektedir. Kontrolcü tasarımı ve simülasyon çalışmaları MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Sistemin kontrolü için ilk olarak PID kontrolcü tasarımı ile dairesel bir referans yörünge kontrolü sağlanmış, sonrasında belirlenen sabit bir kuvvete karşı empedans kontrolcü ile hibrit kuvvet/konum kontrolü birlikte gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.3. PID tabanlı hibrit kuvvet/yörünge empedans kontrolcü ait genel kontrol blok şeması

Referans yörüngeyi sağlayacak eklemlere ait açısal konum değerleri aşağıda belirtilen ters kinematik bağıntılar kullanılarak elde edilmiştir.

$$E = \frac{p_x^2 + p_y^2 - l_2^2 + l_1^2}{2l_1l_2} \quad (5.3)$$

$$F = p_y^2 + p_x^2 - (l_2 \cos(q_2) + l_1) \quad (5.4)$$

$$G = l_2 \cos(q_2) + l_1 \quad (5.5)$$

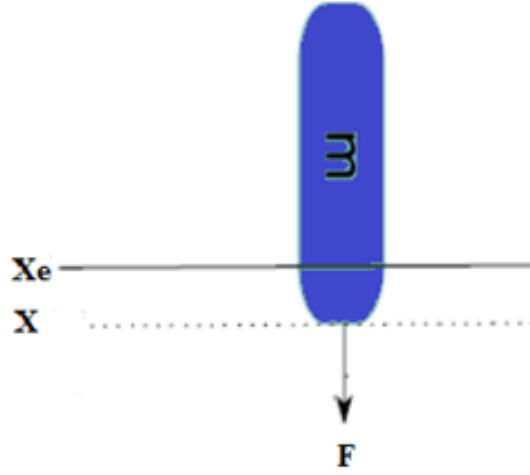
$$q_2 = \arctan2(\pm\sqrt{1-E}, E) \quad (5.6)$$

$$q_1 = \arctan2(p_y, p_x) \pm \arctan2(\sqrt{F}, G) \quad (5.7)$$

Burada,  $q_1$  ve  $q_2$  mafsıl değişkenleridir.  $p_x$ ,  $p_y$ , x-y kartezyen koordinatlarda belirlenen konumlarıdır.  $l_1$ ; üst bacak uzunluğu,  $l_2$ ; alt bacak uzunluğudur. Ayrıca yörünge takibi sırasında, ayakucunun yüzey ile temas anında kuvvet ve konum kontrolü için empedans kontrolcü tasarlanmıştır. Ayağın yüzey ile etkileşimi boyunca; bir zemin modeli üzerinden Y eksenini doğrultusundaki ayakucu temas kuvveti ve konum değerleri geri beslenerek, belirlenen maksimum temas kuvvetini aşmayacak şekilde yüzeyle kesintisiz bir hareket kontrolünün gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Aynı zamanda yörüngeyi takip edebilmesi için PID ile yörünge kontrolü gerçekleştirilmiştir. Böylece, ayakucunun temas kuvvetini ve konumunu beraber düzenleyen bir hibrit kontrol sistemi tasarlanmıştır.

Zemin etkileşim modeli, Newton'un 2. kanuna göre zemin ile ayakucu arasındaki temas kuvvetleri basit bir doğrusal yay ve damper modeli ile elde edilmiştir.

Etki kuvveti aşağıdaki denklem (5.8)'den elde edilmiştir. Yüzey ile ayakucu arasındaki etkileşim modeli Şekil 5.5'de verilmiştir.



Şekil 5.5. Yüzey etkileşim modeli

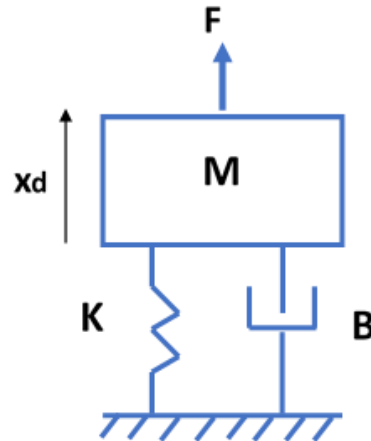
$$f = K_e(x - x_e) + B_e(\dot{x} - \dot{x}_e) \quad (5.8)$$

Burada;  $f$ , temas kuvveti,  $K_e$  yüzeyin sertlik katsayısı,  $B_e$  sönüm katsayısı  $x$ , temas noktasındaki ayakucunun son konumu ve  $x_e$  ise bir önceki konumudur.  $K_e$  ve  $B_e$  değerleri Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Yay ve damper yüzey etkileşim katsayıları

$K_e$ (Yay sabiti)	$B_e$ (Damper sabiti)
5000 N/m	1000 Ns/m

Empedans kontrolcü tasarımı, kuvvet-hareket ilişkisine bağlı ikinci dereceden bir dinamik model olarak tanımlanır. Şekil 5.6'da ikinci dereceden kütle-yay-damper sistemiyle ifade edilen mekanik empedans kontrolün şematik gösterimi verilmiştir.

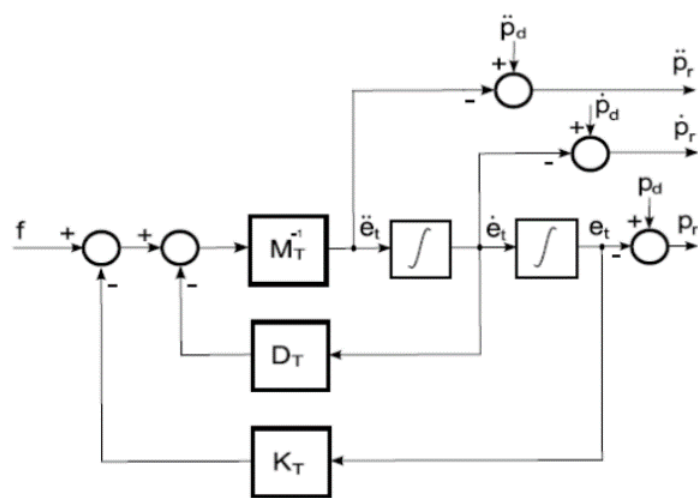


Şekil 5.6. Empedans kontrol basitleştirilmiş fiziksel modeli

M, B ve K matrisleri sırasıyla atalet, sönüm ve sertlik değerleridir. Literatürde aşağıda verilen denklemlerle empedans tasarımı tanımlanır

$$F = M_d(\ddot{x} - \ddot{x}_d) + B_d(\dot{x} - \dot{x}_d) + K_d(x - x_d) \quad (5.9)$$

Burada,  $M_d$  kütle,  $B_d$  sönüm katsayısı,  $K_d$  yay sabiti,  $F$  tepki kuvveti,  $x$  robotun gerçek konumunu ve  $x_d$  ise robotun referans konumunu ifade etmektedir. Empedans kontrolcü, robot ayakucunun istenilen yörüngeyi takip ederken yüzeye temas kurduğu noktada kuvvet-konum etkileşimini düzenler. Ayakucu yüzey ile temas halinde iken empedans kontrolcü referans yörüngeyi düzenleyerek, ayakucunun referans konum ve kuvvet değerinde kontrolünü sağlar. Empedans kontrolcüyeye ait genel blok şeması Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7. Empedans kontrol şematik gösterimi

Burada  $M_T$ ,  $D_T$  ve  $K_T$  sırasıyla atalet, sönüm ve sertlik kazanç katsayıları ve  $e_t$  yörünge hatasıdır. Empedans denetleyici parametreleri, deneme-yanılma yöntemleri kullanılarak; Çizelge 5.3'deki değerler seçilmiştir.

**Çizelge 5.3.** Empedans katsayıları

$M_T$	$B_T$	$K_T$	f (ayakucu yüzey temas kuvveti)
4 (kg)	20 (Ns/m)	20 (N/m)	30 (N)

### 5.3. Hibrit Kuvvet/Konum Kontrolcüye ait PID Kazançlarının ve Empedans Katsayılarının Arı Algoritması ile Optimizasyonu

Bu başlıkta, yukarıda detaylı olarak incelenen hibrit kontrolcünün performansını artırmaya yönelik arı algoritması optimizasyonundan faydalanılarak empedans katsayılarının ve PID kazançlarının ayarlanması anlatılmaktadır.

Arı algoritması, D.T. Pham ve arkadaşları tarafından (Pham ve ark 2006) geliştirilmiş ve günümüze kadar birçok optimizasyon çalışmasında arama algoritması olarak kullanılmıştır (Pham ve Koç 2010, Pham ve Castellani 2015, Castellani ve ark 2019). Kontrolcü parametrelerinin ayarlanması için ilk olarak 2008 yılın M. Kalyoncu tarafından önerilmiştir (Pham ve Kalyoncu 2009).

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında; arı algoritması parametreleri (kâşif arı sayısı, elit bölge vb.), amaç fonksiyonu ve parametrelere ait arama aralıkları M. Kalyoncu, M.A. Şen ve V. Bakırcıoğlu'na ait PID (Şen ve Kalyoncu 2015, Bakırcıoğlu ve ark 2016, Şen ve Kalyoncu 2016) (Şen ve Kalyoncu, 2015a; Bakırcıoğlu ve ark, 2016; Şen ve ark., 2016a; Şen ve ark., 2018), LQR (Şen 2014, Bilgic ve ark 2016) ve Bulanık Mantık Kontrolcülerinin (Pham ve Kalyoncu 2009, Şen 2014, Şen ve Kalyoncu 2015, Şen ve ark 2018) parametrelerinin arı algoritması optimizasyonu ile ilgili çalışmaları referans alınmıştır.

Optimizasyonda öncelikli olarak, ayakucunun belirlenen yörüngede hareket edebilmesinin yanında, istenilen temas kuvveti altında çevriminin tamamlanması amaçlanmıştır. Bölüm 5.1 ve 5.2'de kontrolcü cevaplarında iyileştirme çalışmaları hedeflenmiştir. Sistemin istenen açısal konumlara ve istenilen temas kuvvetinde yörüngeyi takip edebilmesi için, PID tabanlı empedans kontrolcü tasarımı yapılmıştır.



Optimize edilmek istenen her bir ekleme ait PID kontrolcü kazançları ve empedans kontrolcü katsayıları M,B,K, değerleri olmak üzere toplam 9 adet parametre vardır.

Optimum parametreler ayarlanarak deneme yanılma yöntemiyle belirlenen parametrelere kıyasla daha az hata ile, ayakucunun istenen referans yörüngeyi izlemesinin yansıra, belirli bir etki kuvvetine göre yüzeyle kesintisiz bir etkileşim hareketi gerçekleştirilmiştir.

Algoritma için kullanılan amaç fonksiyonu aşağıdaki denklem (5.10)'da verilmiştir.

$$J = 10^4 \sqrt{(|X_{ref} - X_{ger}|)^2 + (|Y_{ref} - Y_{ger}|)^2} + 0.65 [F_{ref} - F_{ger}] + 0.03 \max[F_{ref} - F_{ger}] \quad (5.10)$$

Arı Algoritması ile, robot bacağına ait eklemlerin istenilen değer olarak verilen açısal konumlara en az hata değeri ve maksimum aşma için gerekli kontrolcü kazançları aranmıştır. Arı algoritması, akış şemasına uygun olarak MATLAB ortamında programlanmış ve uygulanmıştır. Optimizasyon parametrelerine ait arama aralıkları Çizelge 5.4'de verilmiştir.

**Çizelge 5.4.** Optimizasyon için seçilen arama aralıkları

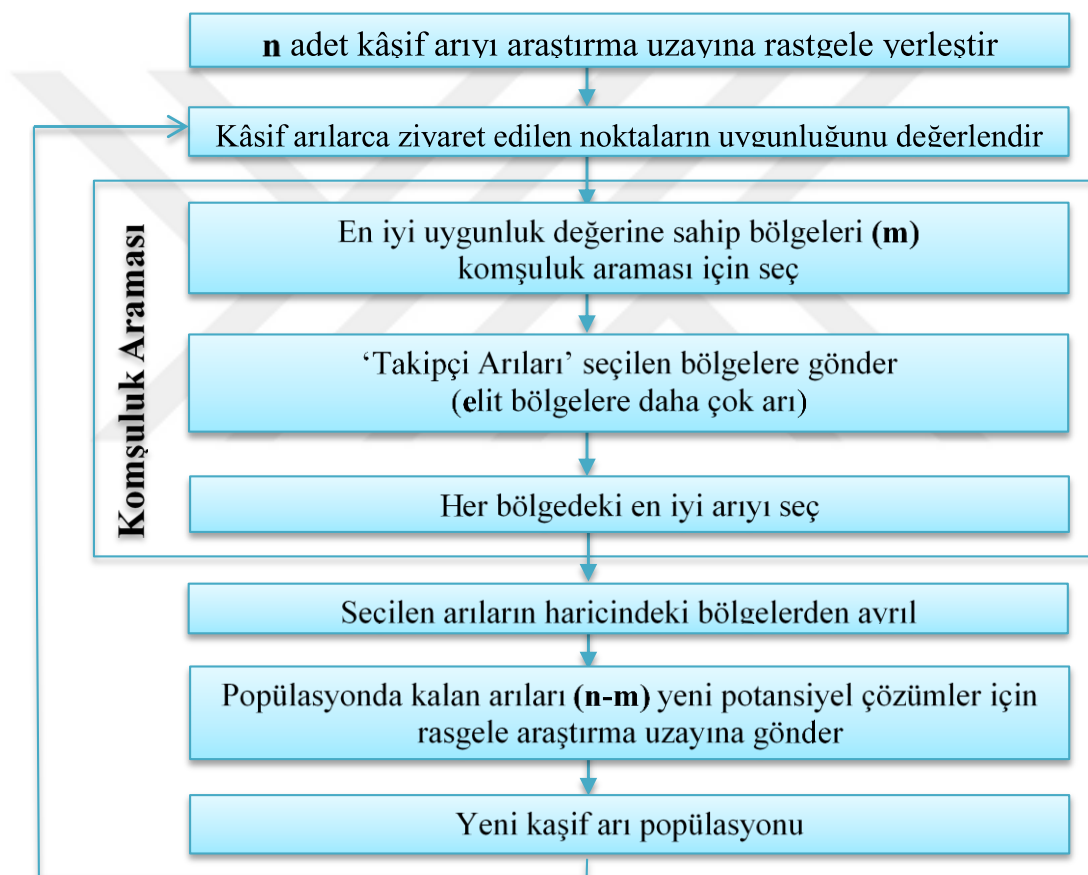
	K <sub>p1</sub>	K <sub>p2</sub>	K <sub>i1</sub>	K <sub>i2</sub>	K <sub>d1</sub>	K <sub>d2</sub>	M	B	K
Alt Sınır	150	750	15	75	1	2	2	15	15
Üst Sınır	250	1250	25	125	3	8	8	25	25

Burada; K<sub>p1</sub>, K<sub>p2</sub>, K<sub>i1</sub>, K<sub>i2</sub>, K<sub>d1</sub>, K<sub>d2</sub>, PID kazançlarını, M, B ve K ise empedans kontrolcü katsayılarını ifade etmektedir.

Arı algoritması rastgele değerler üreterek baslar, belirlenen arama aralıkları dahilinde amaç fonksiyonunun minimize edecek optimum parametreler araştırılır. Program ilk olarak verilen aralıkta kazanç katsayılarını rastgele belirler, daha sonra Simulink benzetim modelini çalıştırarak bu kazançlara göre amaç fonksiyonunu hesaplayıp seçilen kazanç değerlerinin uygunluğunu denetler ve bölgeleri belirler. Girilen iterasyon sayısına göre program, verilen aralıkta en iyi kazanç değerlerini bulmaya çalışır. Çizelge 5.5'de arı algoritması parametreleri, Şekil 5.8'de ise akış şeması verilmiştir.

Çizelge 5.5. Arı algoritması parametreleri ve değerleri

Parametre	Değeri	Açıklama
n	20	Kâşif Arı Sayısı
m	6	Ziyaret Edilen n Nokta İçinden Seçilen En Uygun Bölge Sayısı
e	3	Seçilen m Bölge İçindeki En İyi Bölge Sayısı
nep	10	En İyi e Bölgeye Gönderilen Arı Sayısı
nsp	5	Kalan (m-e) Bölgeye Gönderilen Arı Sayısı
ng	0.01	Bölge Boyutu
itr	150	Durdurma Kriteri / İterasyon



Şekil 5.8. Arı algoritması akış şeması (Şen 2014)

Algoritma, amaç fonksiyonunu her bir adımda kazanç değerlerini bölge boyutuna göre değiştirerek minimuma yaklaştırmaya çalışır. Birbirlerine göre ağırlıklandırılmış, ayakucu temas kuvvetine ve yörüngede ait hata değerlerinden oluşan amaç fonksiyonunu en aza indirmiştir.

Çizelge 5.6. Optimizasyon sonrası kazanç değerleri

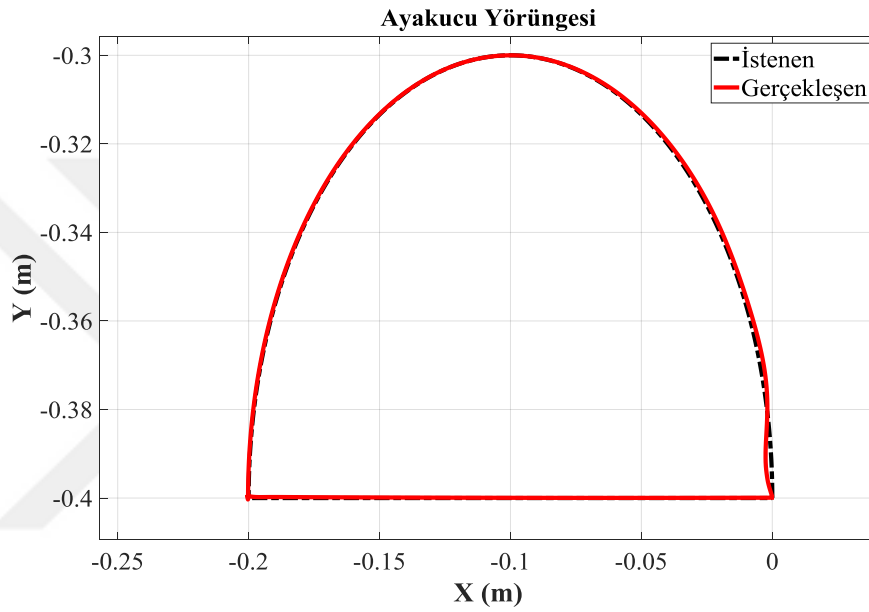
$K_{p_1}$	$K_{p_2}$	$K_{i_1}$	$K_{i_2}$	$K_{d_1}$	$K_{d_2}$	M	B	K
240	1241	16	111	2.5	5.5	7.63	16.4	17.2

Çizelge 5.6 da optimizasyon sonrası PID kazanç değerleriyle M, B ve K katsayıları verilmiştir.

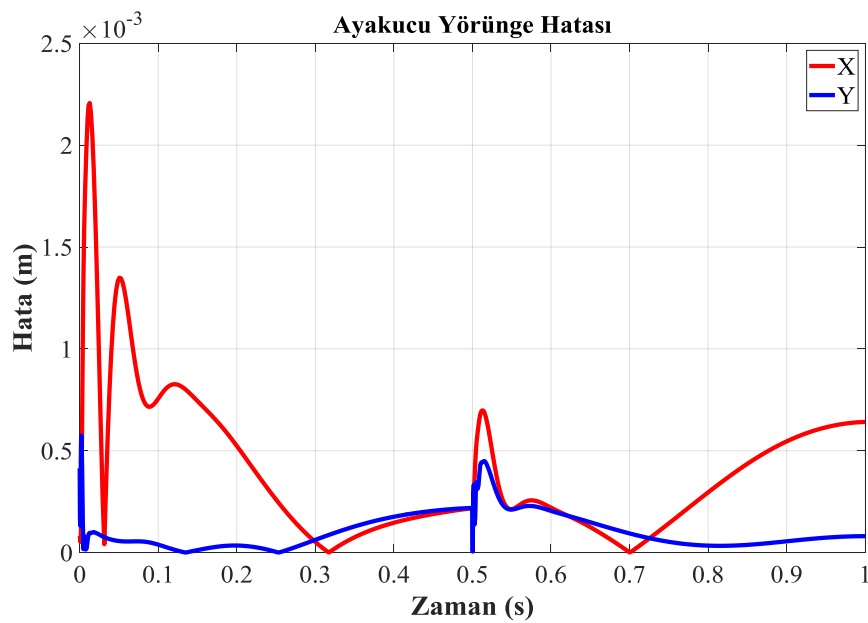
Bu bölüm kapsamında tasarlanan PID yörünge kontrolcü tasarımı, PID tabanlı hibrit kuvvet/konum empedans kontrolcü tasarımı ve optimizasyonuna ait benzetim çalışmaları bir sonraki bölümde detaylı olarak verilmiş ve sonuç kısmında değerlendirilmiştir. Arı algoritması ile gerçekleştirilen empedans katsayısı ve PID kontrolcü kazançlarının ayarlanmasına yönelik optimizasyon süresince, 120. iterasyona kadar amaç fonksiyonu değerinin düzgün ve sürekli bir azalış eğiliminde olduğu görülmektedir. Daha sonrasında 20.744 değerine indirildiğinde sabit kalarak 150. iterasyonda optimizasyon sonlanmaktadır.

## 6. SAYISAL UYGULAMALAR

Şekil 6.1'de görüldüğü üzere, kontrolcü cevabına ait yörünge, referans yörüngeyi başlangıçta küçük hata değerleri hariç, büyük oranda takip ettiği görülmektedir. Hata değerleri daha anlaşılır olması için, Şekil 6.2'de gerçekleşen yörünge cevabının referans değere göre X ve Y doğrultularındaki hata değerleri detaylı görülmektedir.

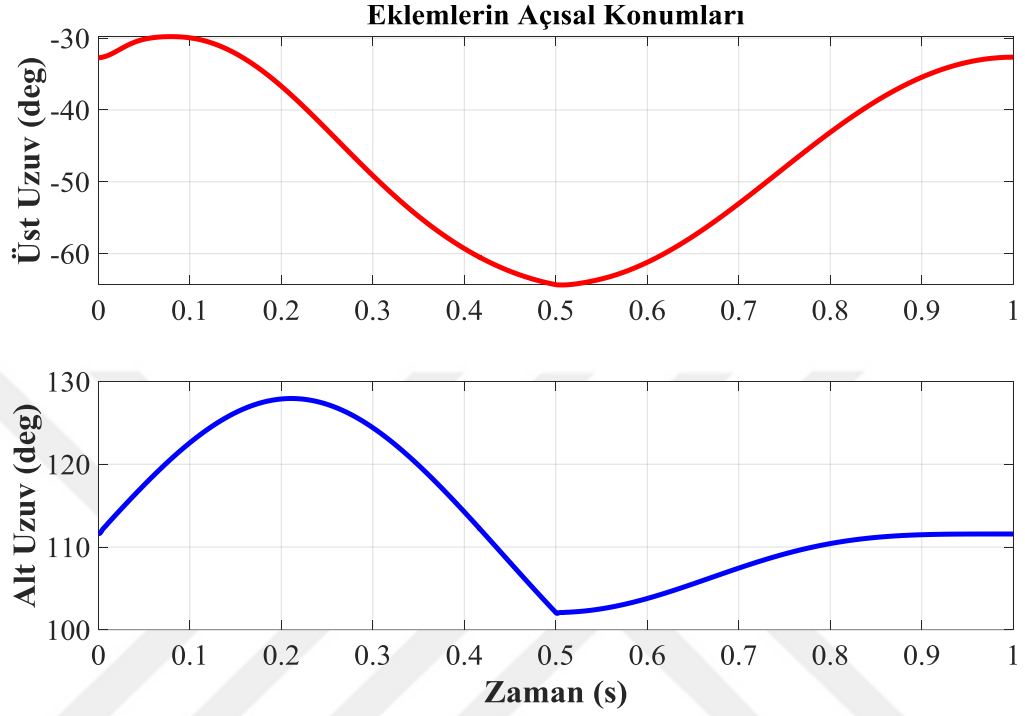


Şekil 6.1. PID Kontrolcü ile gerçekleştirilen ayakucuna ait istenen ve gerçekleşen yörünge grafiği

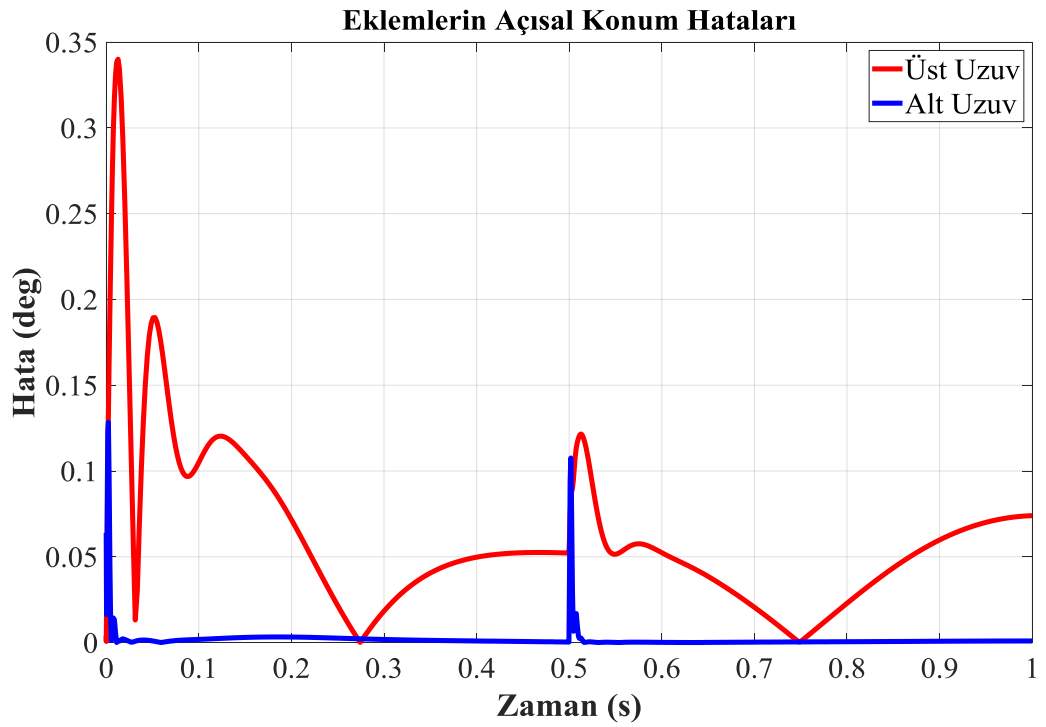


Şekil 6.2. PID kontrolcü ile gerçekleştirilen ayakucuna ait yörünge hatası

Şekil 6.3'de yörünge takibi esnasında alt ve üst uzuvların zamana bağlı derece cinsinden açısal konum değişim grafiği görülmektedir. Şekil 6.4'de hata değişimini görmek için detay görünümü verilmiştir.

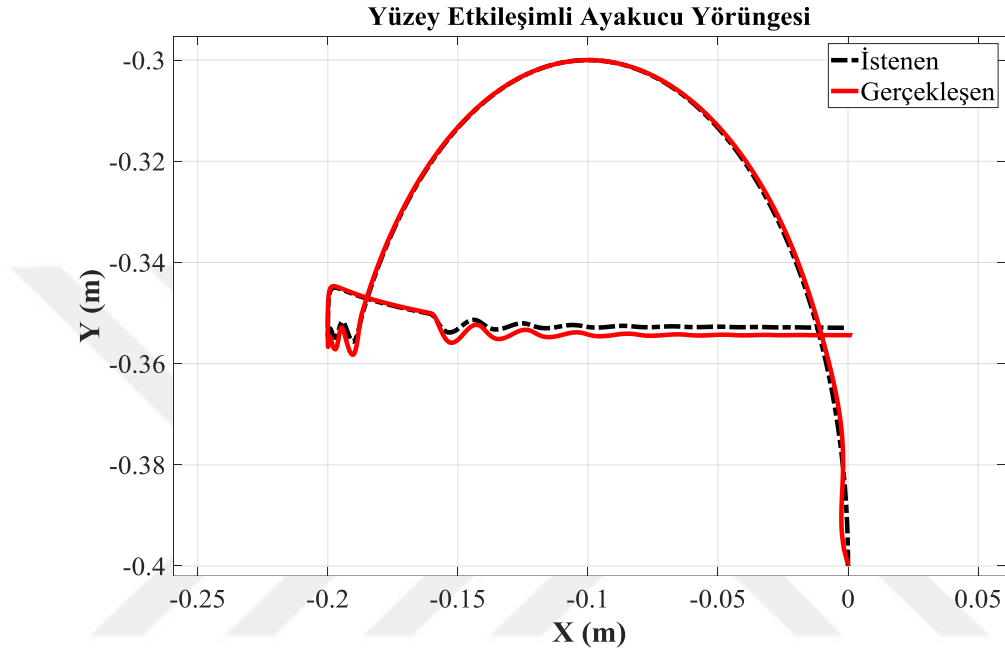


Şekil 6.3. Alt ve üst uzvun açısal konumları

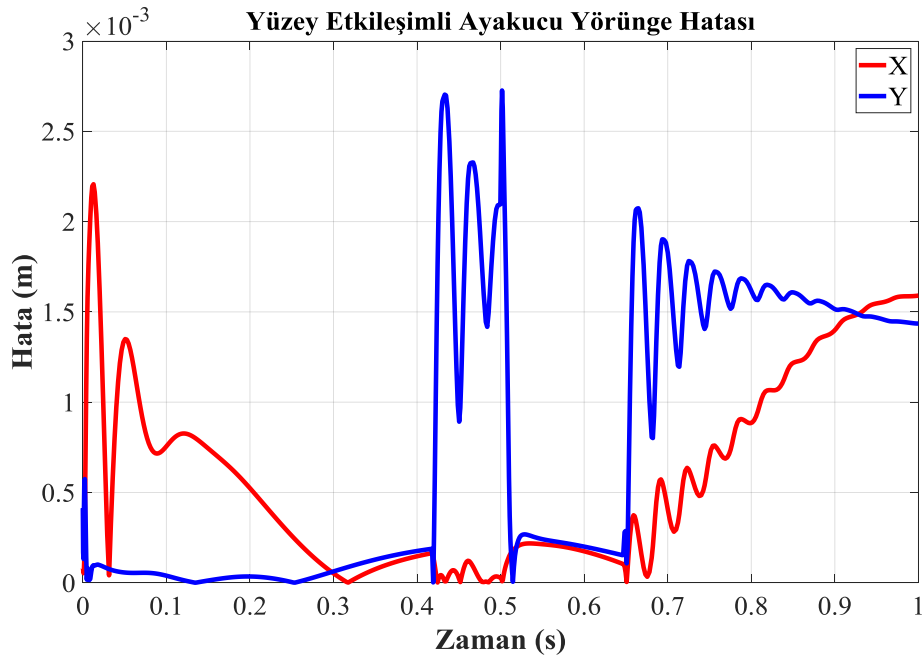


Şekil 6.4. Alt ve üst uzvun açısal konum hataları

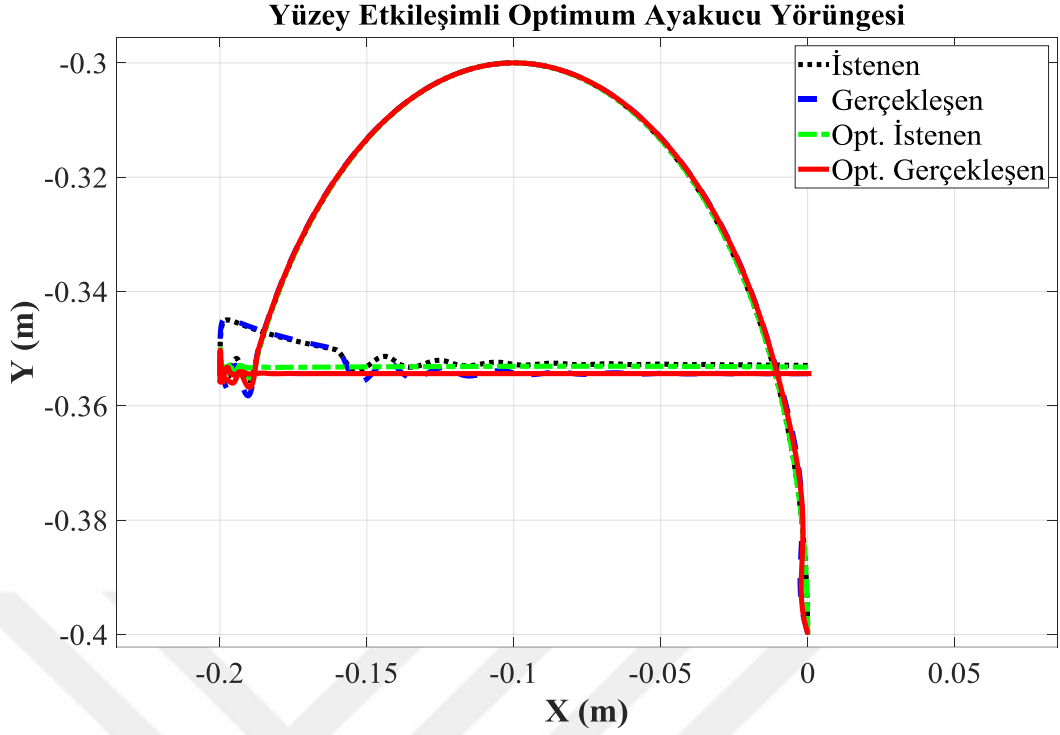
Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da PID tabanlı hibrit empedans kontrolcüye ait yörünge ve hata grafikleri, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8 ise PID kazançları ve empedans kontrolcü katsayılarının optimizasyon sonrası yörünge ve hata grafikleridir. Sistem cevaplarından da görüldüğü gibi optimizasyon sonrası yörünge takibi ve hata grafiğinde %30 civarında iyileştirme gösterdiği,



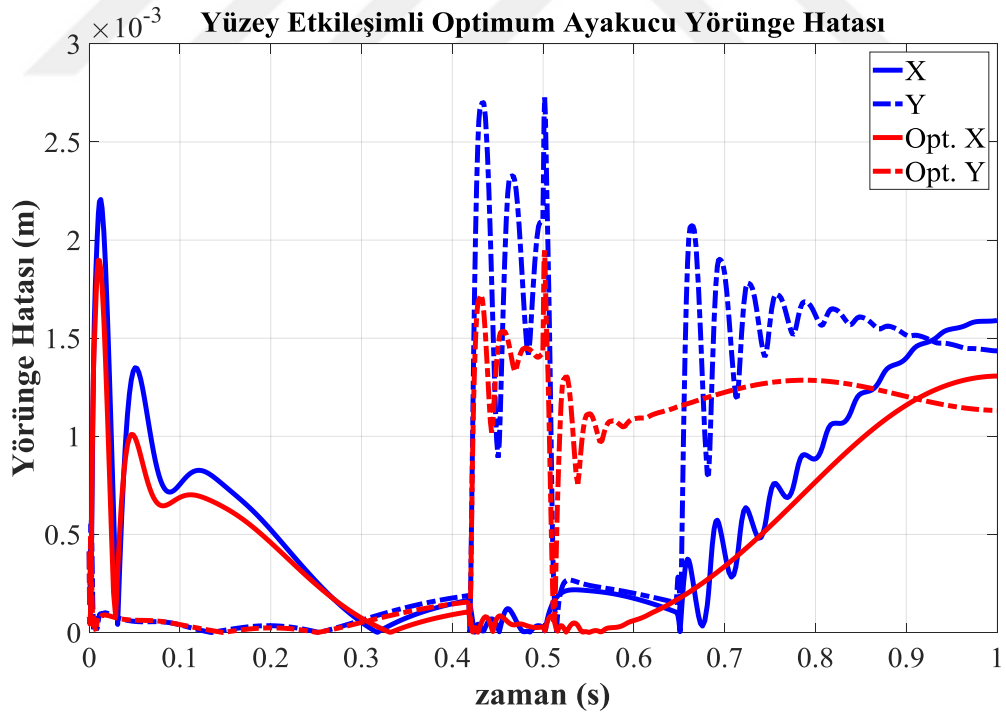
Şekil 6.5. PID tabanlı hibrit kuvvet/yörünge empedans kontrolcüye ait ayakucu yörünge grafiği



Şekil 6.6. PID tabanlı hibrit kuvvet/yörünge empedans kontrolcüye ait x ve y doğrultusunda, ayakucunun yörünge hata grafiği

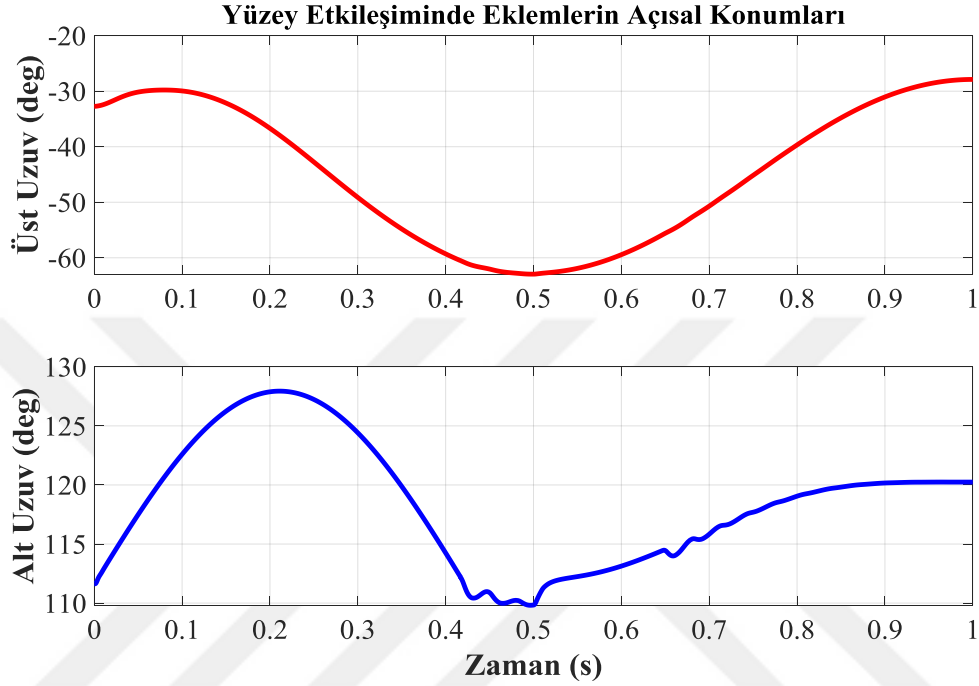


Şekil 6.7. PID tabanlı hibrit kuvvet/yörünge empedans kontrolcüye ait arı algoritması ile optimize edilmiş, ayakucu yörünge grafiği

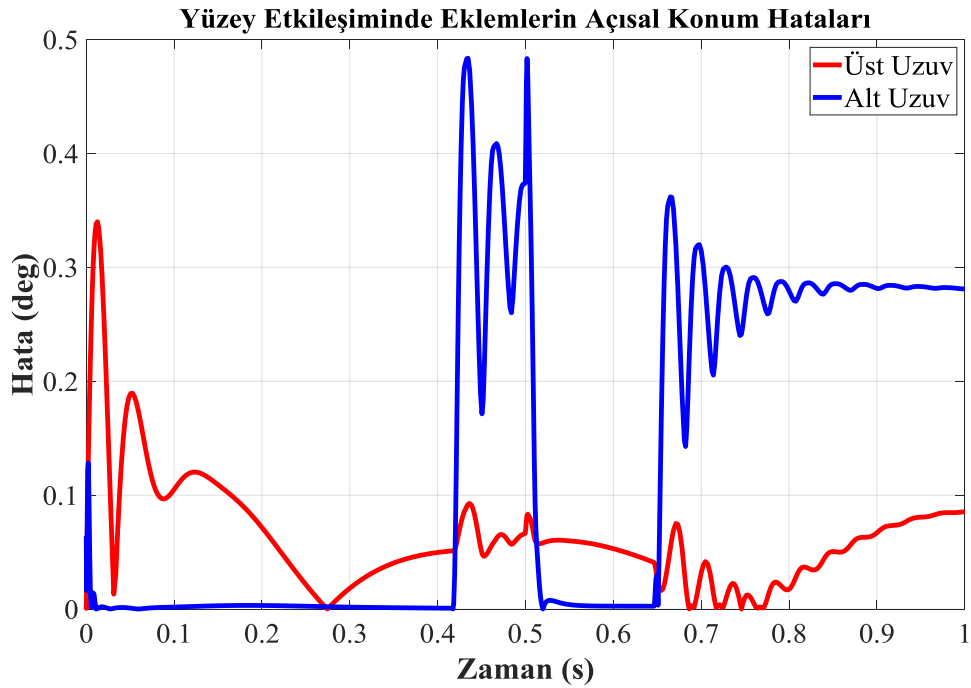


Şekil 6.8. PID tabanlı hibrit kuvvet/yörünge empedans kontrolcüye ait arı algoritması ile optimize edilmiş, ayakucu yörünge hata grafiği

Şekil 6.9, Şekil 6.10, optimizasyon öncesi alt ve üst uzvun açılal konum ve hata grafiğini, Şekil 6.11, Şekil 6.12, optimizasyon sonrası alt ve üst uzvun açılal konum ve hata grafiklerini içermektedir. Açılal konum grafiklerden de görüldüğü üzere maksimum hata grafiğinde azalma ile yörüngeyi takip etmiştir.

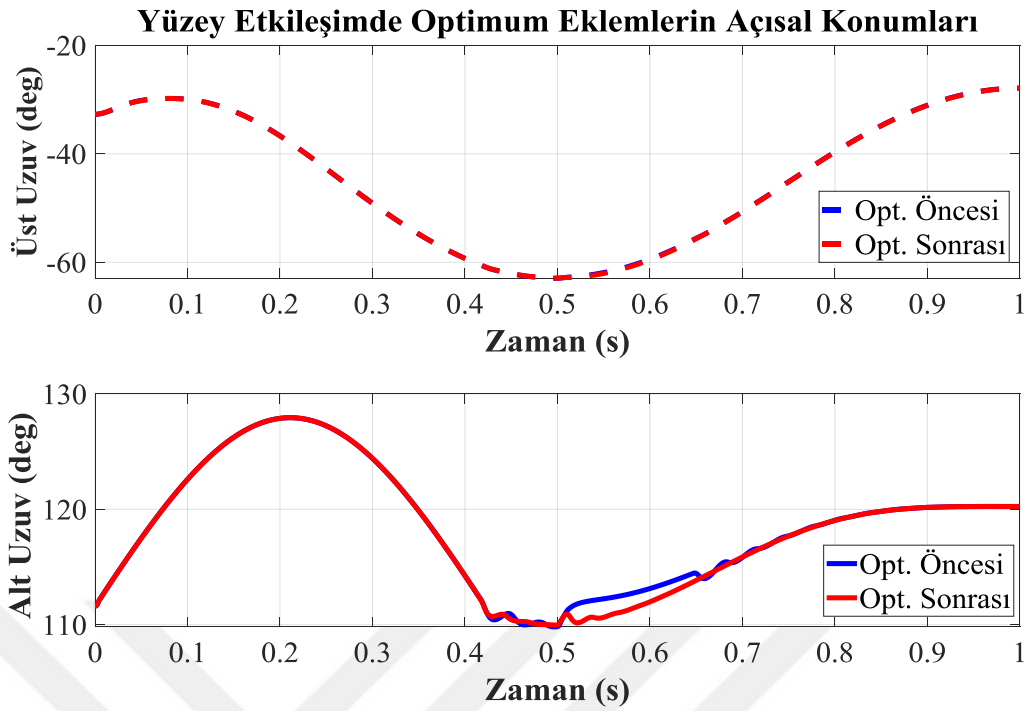


Şekil 6.9. Yüzey etkileşimli alt ve üst uzvun açılal konumları

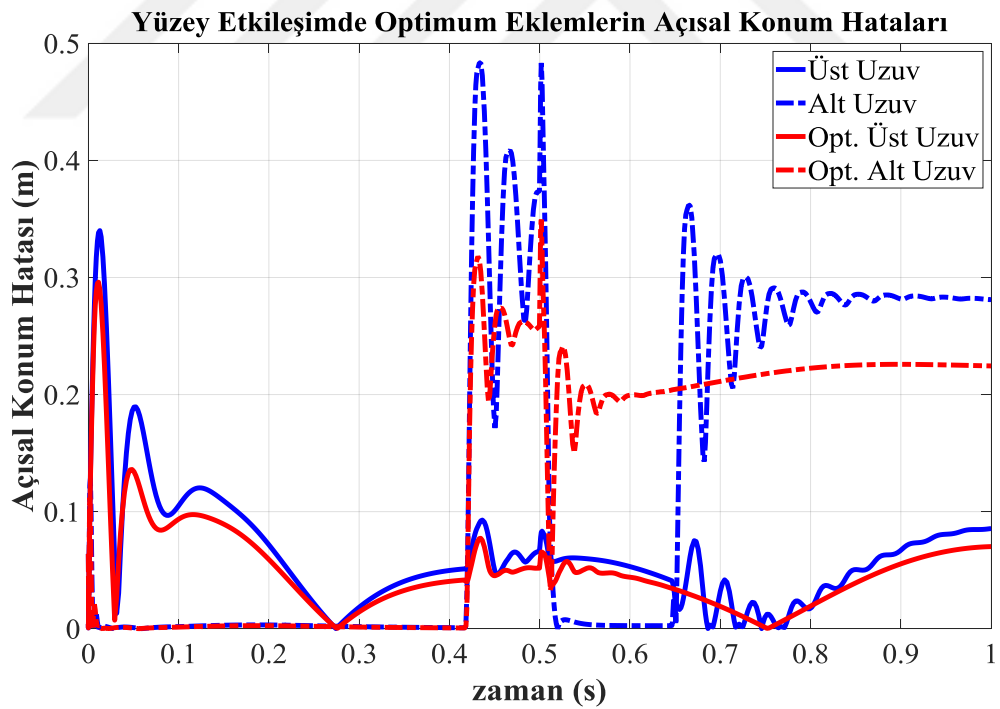


Şekil 6.10. Yüzey etkileşimli alt ve üst uzvun açılal konum hataları



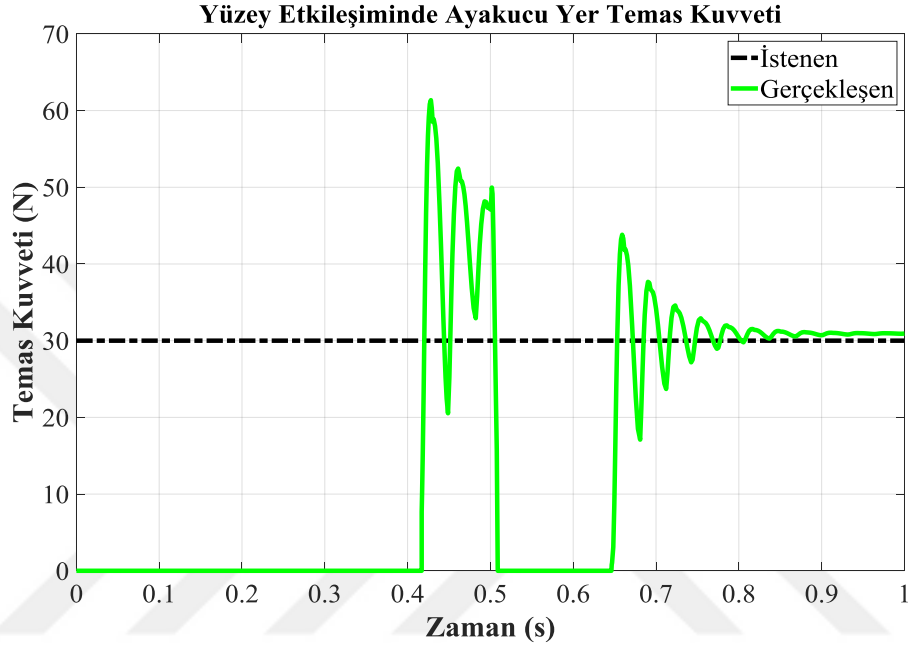


Şekil 6.11.yüzey etkileşiminde optimize edilmiş alt ve üst uzvun açısal konumları

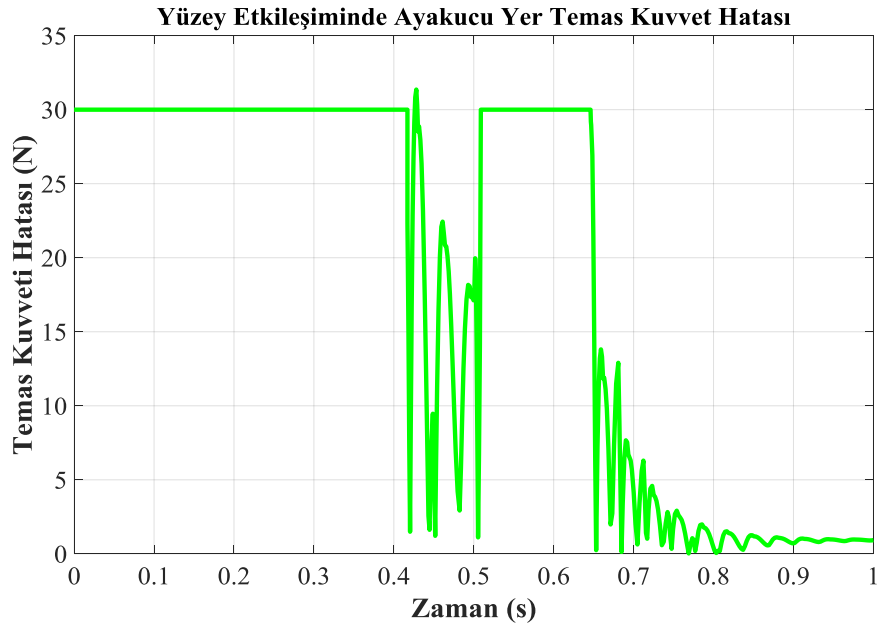


Şekil 6.12.Yüzey etkileşiminde optimize edilmiş alt ve üst uzvun açısal konum hataları

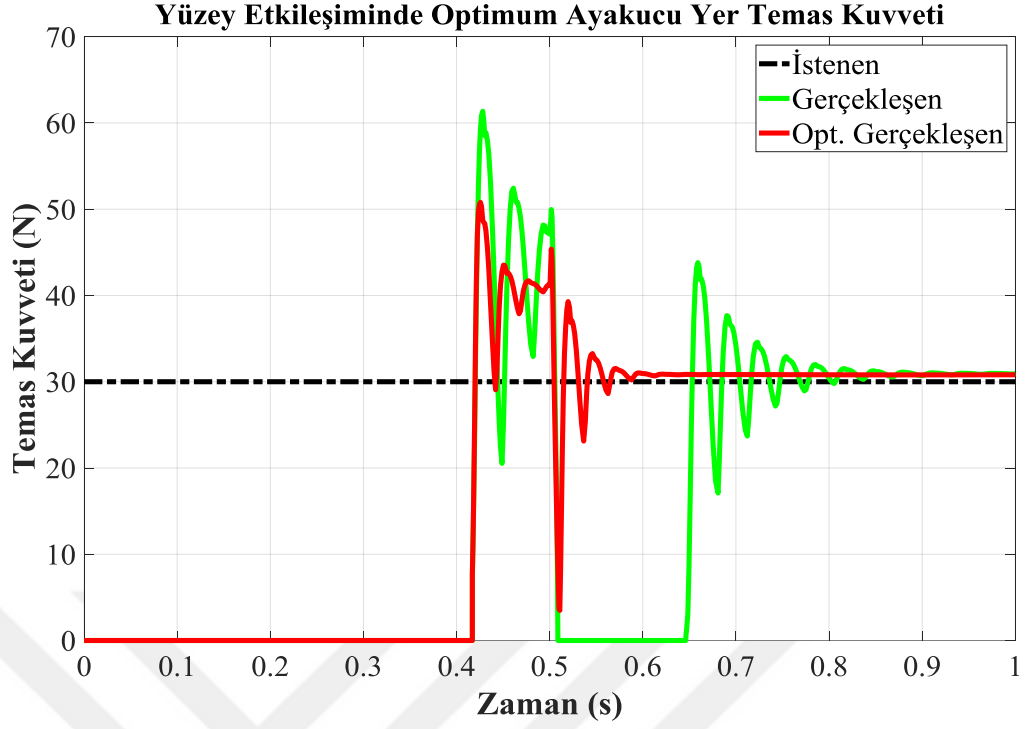
Şekil 6.13, Şekil 6.14’de, optimizasyon öncesi yüzey etkileşimli temas kuvvet ve hata grafiği, Şekil 6.15. Şekil 6.16’da optimizasyon sonrası yüzey etkileşimli temas kuvvet ve hata grafikleri verilmiştir. Optimizasyon sonrası grafiklere bakıldığında maksimum aşmanın daha az olduğu görülmektedir. Ayrıca sayısal değerlendirmeler, ayrıntılı olarak sonuç bölümünde ifade edilecektir.



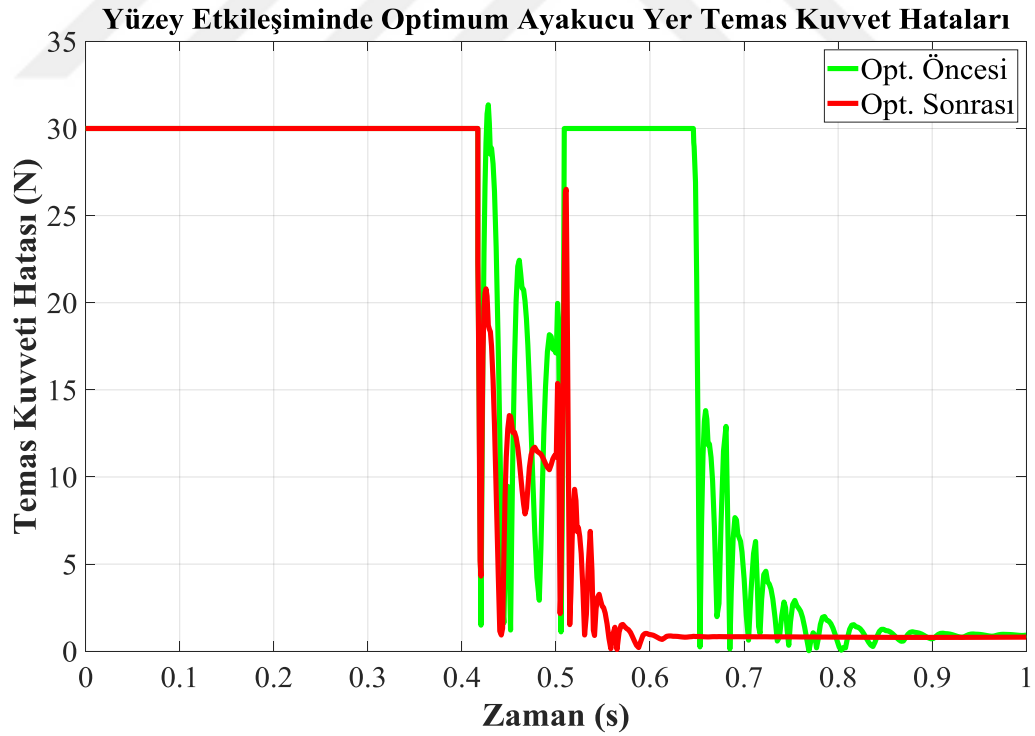
Şekil 6.13. PID tabanlı hibrit kuvvet/yörünge empedans kontrolcüye ait, ayakucunun, yüzey etkileşiminde yer temas kuvveti



Şekil 6.14. PID tabanlı hibrit kuvvet/yörünge empedans kontrolcüye ait, ayakucunun yüzey etkileşiminde yer temas kuvveti



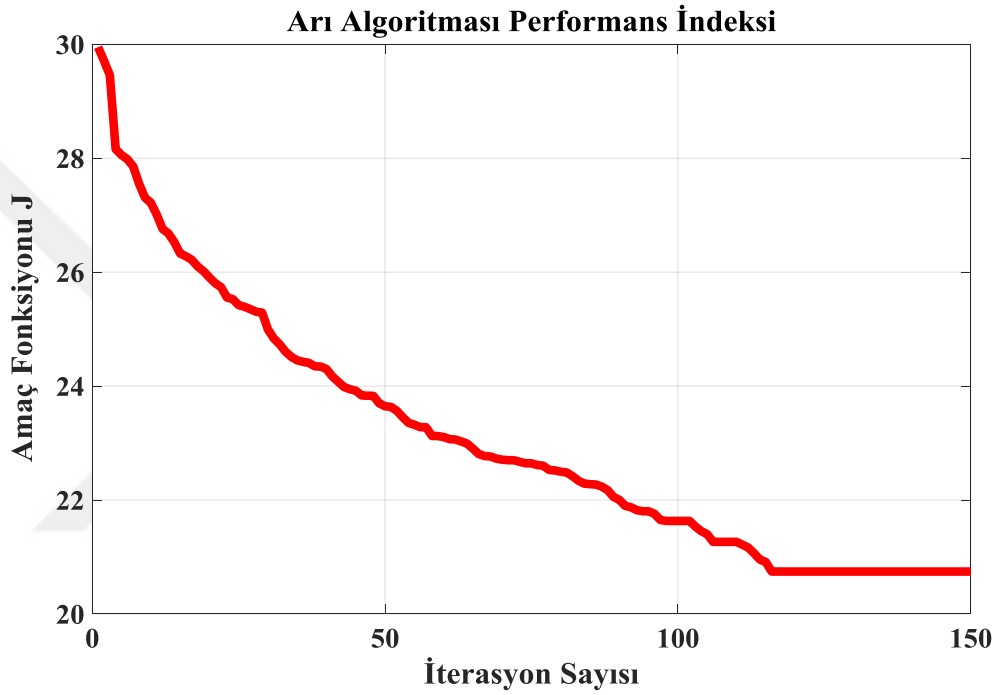
Şekil 6.15. PID tabanlı hibrit kuvvet/yörünge empedans kontrolcüye ait arı algoritması ile optimize edilmiş, ayakucu yer temas kuvveti



Şekil 6.16. PID tabanlı hibrit kuvvet/yörünge empedans kontrolcüye ait arı algoritması ile optimize edilmiş, ayakucu yer temas kuvvet hatası

Şekil 6.17'de Arı algoritması performans indeksi olarak verilen grafikte, empedans katsayısı ve PID kontrolcü kazançlarının ayarlanmasına yönelik optimizasyon süresince amaç fonksiyonu değerinin belirli iterasyon sayısında grafiksel eğilimi görülmektedir.

Simülasyon sonuçlarına bakıldığında PID tabanlı empedans kontrolcünün, kuvvet/yörünge kontrolünde, benzer eğilimde sonuçlar verdiği, arı algoritması ile optimizasyon sonuçlarında yaklaşık yüzde 30 iyileştirme kazanıldığı görülmektedir.



Şekil 6.17. Arı algoritması performans indeksi

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma ile 12 serbestlik dereceli dört bacaklı mobil robotun temelini oluşturacak iki serbestlik dereceli bir bacak mekanizma tasarımı yapılmıştır. Denge kontrolü, yürüme, yük taşıma vb. özellikleri sağlayacak şekilde eyleyici seçimi ve mekanizma parametreleri belirlenmiştir.

Tasarıma ait üç boyutlu model CAD yazılımları yardımıyla elde edilmiştir. Model içerisinde her bir uzva ait malzeme bilgisi ve mafsal serbestlik dereceleri belirlenerek simülasyon için gerekli ön hazırlık yapılmıştır. Mekanizmanın dinamik analizinde oluşturulan bu üç boyutlu modelden faydalanılmıştır. Bu model sayesinde karmaşık yapıdaki uzuvlara ait dinamik parametreler ve malzeme bilgisi MATLAB/Simulink ortamına aktarılarak sisteme ait gerçekçi bir simülasyon ortamı oluşturulmuştur.

Yapılan çalışma ile elde edilen kinematik ve dinamik modeli kullanılarak uygun yürüyüş eğrilerinin belirlenmesi üzerine çalışılmıştır. Belirlenen yürüyüş eğrilerinden mafsal değişkenlerin elde edilmesi için mekanizmanın ters kinematik analizi yapılmış ve MATLAB/Simulink modeline bu değişkenlere ait denklemler eklenmiştir. Sistemin ayakucunun istenen yörüngeyi takip edebilmesi için bir PID kontrolcü tasarlanmıştır. Bacak tasarımının dinamiklerinin bulunması MATLAB/SimMechanics ortamında gerçekleştirilmiş, model tabanlı kontrol algoritmalarını doğrulama imkânı sağlanmıştır.

Daha sonra dört ayaklı bir robotun bir bacağının PID tabanlı hibrit kuvvet/yörünge empedans kontrolcü tasarımı geliştirilmiştir. Daha sonra hibrit kuvvet/yörünge empedans kontrolcünün, PID kazançları ve empedans katsayıları arı algoritması ile optimize edilmiştir.

Çalışma kapsamında, dört ayaklı robotun bir bacağının kontrolü için gerçekleştirilen PID ile yörünge kontrolü, yüzey etkileşimli hibrit kuvvet/yörünge empedans kontrolü ve bu kontrolcüye ait kazanç ve katsayılarının optimizasyon çalışmaları sonucu elde edilen sisteme ait kontrolcü cevapları değerlendirildiğinde;

- Empedans kontrolcü tasarımına temel teşkil eden, yüzey etkileşimsiz PID yörünge kontrolcünün; yörüngede x doğrultusunda 2.2 mm, y doğrultusunda 0.6 mm, üst ve alt uzuv açılarda sırasıyla 0.34 ve 0.13° maksimum hata değerleri ile yörünge takibini başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği,
- Yüzey etkileşimli ayakucu hareketinin kontrolü için tasarlanan, PID tabanlı hibrit kuvvet/yörünge kontrolcünün, empedans kontrolcü tarafından tekrar

düzenlenen yörüngede maksimum 2.1 mm (x doğrultusunda), 2.7 mm (y doğrultusunda), üst ve alt uzuv açısall konumlarında sırasıyla maksimum. 0.33 ve 0.49° hata ile yörünge takibini başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği, ayakucu kuvvet kontrolünde referans kuvvet değerinden aşmalar ve salınımlar göstererek 0.9 saniyede oturduğu ancak 0.5 ile 0.65 saniye aralığında ayağın yer ile temasının kesildiği (temas kuvvetinin sıfır olduğu),

- Empedans ve PID kontrolcü parametrelerinin optimizasyonu sonrası, optimal parametreler güncellenen hibrit kontrolcünün, yörüngede x doğrultusunda 1.9 mm (%13 azalma), y doğrultusunda 1.8 mm (%33 azalma), üst ve alt uzuv açısall konumlarında sırasıyla 0.29 (%12 azalma) ve 0.33 (%32 azalma maksimum hata değerleri ile yörünge takibini başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği, ayakucu kuvvet kontrolünde referans kuvvet değerinden daha az aşmalar ve salınımlar göstererek 0.6 saniyede (%34 azalma) oturduğu ve hareket boyunca ayağın yer ile temasının kesilmediği, böylelikle Arı algoritması ile optimizasyonun kontrolcü performansını artırdığı,
- Arı Algoritmasının özellikle empedans katsayılarını başarılı bir şekilde ayarlayabildiği, optimizasyon parametrelerinin ve amaç fonksiyonunun değiştirilmesi ve/veya farklı arama teknikleri kullanılarak bu çalışmadan önerilen PID tabanlı hibrit kuvvet/yörünge empedans kontrolcü performansını iyileştirilebileceği sonuçlarına varılmıştır.

## KAYNAKLAR

- Anybots, 2010. Erişim tarihi 02.05.2017. Erişim adresi, <http://www.anybots.com>.
- Bakırcıoğlu V, Şen MA, Kalyoncu M, (2016). Optimization of PID controller based on The Bees Algorithm for one leg of a quadruped robot. Mechatronics and Automation (ICCMA 2015). **42**: 1-4.
- Bilgic HH, Sen MA, Kalyoncu M, 2016. Tuning of LQR controller for an experimental inverted pendulum system based on The Bees Algorithm. *Journal of Vibroengineering*, 18, 6, 3684-94.
- Bigdog overview, 2008. Erişim tarihi 07.05.2016. Erişim adresi, <http://www.bostondynamics.com/img/BigDogOverview.pdf>.
- LS3 Legged squad support systems, 2013. Erişim tarihi 7 Haziran 2013. Erişim adresi, <https://www.bostondynamics.com/ls3>.
- Castellani M, Otri S, Pham DT, 2019. Printed circuit board assembly time minimisation using a novel Bees Algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 133, 186-94.
- Marines use experimental technology during RIMPAC 2014, 2014. Erişim tarihi 7 Haziran 2014. Erişim adresi, <https://www.dvidshub.net/image/1443286/marines-use-experimental-technology-during-rimpac-2014>.
- Estremera J, J. Waldron K, 2008. Thrust Control, Stabilization and Energetics of a Quadruped Running Robot. *The International Journal of Robotics Research*, 27, 10, 1135-51.
- Gonzalez-de-Santos P, Garcia E, Estremera J, 2006. Quadrupedal locomotion. An introduction to the control of four-legged robots, Springer, p. 1-250.
- Güney A, 2010. İnsan-makine arayüzü olarak 3x3 stewart platformunun empedans kuvvet kontrolü, MSc, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hirose S, Fukuda Y, Yoneda K, Nagakubo A, Tsukagoshi H, Arikawa K, Endo G, Doi T, Hodoshima R, 2009. Quadruped Walking Robots at Tokyo Institute of Technology Design, Analysis, and Gait Control Methods. 16, 104-14.
- Hogan N, 1985. The mechanics of multi-joint posture and movement control. *Biological cybernetics*, 52, 5, 315-31.
- Hutter M, Gehring C, Jud D, Lauber A, Bellicoso CD, Tsounis V, Hwangbo J, Bodie K, Fankhauser P, Bloesch M. Anymal-a highly mobile and dynamic quadrupedal robot. 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 38-44.

- Hyon SH, Emura T, Mita T, 2003. Dynamics-based control of a one-legged hopping robot. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 217, 2, 83-98.
- Khan H, (2015). Development of a lightweight on-board hydraulic system for a quadruped robot. 4th Scandinavian International Conference on Fluid Power (SICFP). Tampere, Finland.
- Kimura H, Fukuoka Y, Cohen AH, 2007. Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Natural Ground Based on Biological Concepts. *The International Journal of Robotics Research*, 26, 5, 475-90.
- Muybridge E, (1887). *Animals in Motion* [1957 reprint], New York: Dover.
- Niiyama R, Nagakubo A, Kuniyoshi Y. Mowgli: A Bipedal Jumping and Landing Robot with an Artificial Musculoskeletal System. *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2546-51, 10-14 April 2007.
- Owen T, 1989. *Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle* by Shin-Min Song and Kenneth J. Waldron, The MIT Press, Massachusetts 1989, 314 pages incl. index (£35.95). *Robotica*, 7, 4, 368-.
- Pham D, Ghanbarzadeh A, Koç E, Otri S, Rahim S, Zaidi M, (2006). The Bees Algorithm - A Novel Tool for Complex Optimisation Problems. 2nd I\*PROMS Virtual International Conference. Cardiff, UK: 454-9.
- Pham DT, Castellani M, 2015. The Bees Algorithm as a Biologically Inspired Optimisation Method. In: *Encyclopedia of Information Science and Technology*, Third Edition. Eds: Mehdi Khosrow-Pour DBA. Hershey, PA, USA: IGI Global, p. 285-94.
- Pham DT, Kalyoncu M. Optimisation of a fuzzy logic controller for a flexible single-link robot arm using the Bees Algorithm. *2009 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, 475-80, 23-26 June 2009.
- Pham DT, Koç E, 2010. Design of a two-dimensional recursive filter using the bees algorithm. *International Journal of Automation and Computing*, 7, 3, 399-402.
- Poulakakis I, Smith JA, Buehler M, 2005. Modeling and experiments of untethered quadrupedal running with a bounding gait: The Scout II robot. *The International Journal of Robotics Research*, 24, 4, 239-56.
- Raibert M, Blankespoor K, Nelson G, Playter R, 2008. BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot. *IFAC Proceedings Volumes*, 41, 2, 10822-5.
- Raibert M, Chepponis M, Brown H, 1986. Running on four legs as though they were one. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 2, 2, 70-82.
- Semini C, 2010. HyQ - Design and Development of a Hydraulically Actuated Quadruped Robot, PhD, Italian Institute of Technology.



- Semini C, Barasuol V, Boaventura T, Frigerio M, Focchi M, Caldwell DG, Buchli J, 2015. Towards versatile legged robots through active impedance control. The International Journal of Robotics Research, 34, 7, 1003-20.
- Şen MA, 2014. İki tekerlekli robot için bulanık mantık tabanlı kontrolcü tasarımı ve arı algoritması kullanarak optimizasyonu, MSc, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Şen MA, Kalyoncu M, (2015). İki Tekerlekli Kendi Kendini Dengeleyen Robotun Yörünge Takibi için Arı Algoritması kullanarak LQR Kontrolcü Tasarımı. Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu. İzmir: 666-72.
- Şen MA, Kalyoncu M, 2015. Optimisation of a PID Controller for an Inverted Pendulum Using the Bees Algorithm. Applied Mechanics and Materials, 789-790, 1039-44.
- Şen MA, Kalyoncu M, 2016. Optimal Tuning of a LQR Controller for an Inverted Pendulum Using The Bees Algorithm. Journal of Automation and Control Engineering, 4, 5, 384-7.
- Şen MA, Tinkir M, Kalyoncu M, 2018. Optimisation of a PID controller for a two-floor structure under earthquake excitation based on the bees algorithm. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 37, 1, 107-27.
- Tanaka T, Hirose S. Development of leg-wheel hybrid quadruped "AirHopper" design of powerful light-weight leg with wheel. 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 3890-5, 22-26 Sept. 2008.
- Ur Rehman B, Caldwell DG, Semini C, 2017. Centaur robots - a survey. Human-Centric Robotics, 247-58.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Abdullah YÖNGÜL  
**Uyruğu** : T.C  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : KONYA / 07.06.1987  
**Telefon** : 0.5385475285  
**Faks** :  
**E-Posta** : ayongul@ktun.edu.tr

### EĞİTİM

Derece	Adı	İlçe	İl	Bitirme Yılı
Lise	: Karatay Anadolu Lisesi		KONYA	2005
Üniversite	: Erciyes Üniversitesi		KAYSERİ	2011
Yüksek Lisans	: KTUN Lisansüstü Eğitim Enstitüsü		KONYA	Devam
Doktora	:			

### İŞ DENEYİMLERİ

2011-2012	Isıl İşlem A.Ş	Kontrol Mühendisi
2012- Halen	KTUN – Makina Müh.Böl.	Araştırma Görevlisi

Yıl	Kurum	Görevi
2012- Halen	Konya Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

### UZMANLIK ALANI

### YABANCI DİLLER

KPDS 88

### BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

### YAYINLAR

Yöngül, A., Kalyoncu, M., “Dört Ayaklı Robotun Yürüyüşünde Bir Bacağın Yörünge Kontrolü”, Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu – (UMTS 2015), Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 657-660, İYTE, İzmir, 14-17 Haziran 2015.