



**İKİ AYAKLI YÜRÜME HAREKETİNİN  
MODELLENMESİ VE AKILLI KONTROLÜ  
Gökçe YILDIRIM**

**Yüksek Lisans Tezi  
Elektronik Sistemler Anabilim Dalı  
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Cafer BAL  
AĞUSTOS-2017**

**T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İKİ AYAKLI YÜRÜME HAREKETİNİN MODELLENMESİ VE AKILLI  
KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Gökçe YILDIRIM**

**141134103**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 07/08/2017**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 24/08/2017**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Cafer BAL (F.Ü)**

**Diğer Jüri Üyeleri: Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÜSTÜNDAĞ (B.Ü)**

**Yrd. Doç. Dr. Mustafa AY (F.Ü)**

**AĞUSTOS-2017**

## ÖNSÖZ

Yapılan bu tez çalışmasında bilgi birikimi ve tecrübeleriyle daima bana yol gösteren ve desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam, Sayın Yrd. Doç. Dr. Cafer Bal'a teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca sürekli benim yanımda olan ve hayatımın her aşamasında arkamda varlığını hissettiğim canım annem Sema SARAÇOĞLU'na teşekkür ederim.

Çalışmalarımnda bilgi ve tecrübeleri ile destek olan Arş. Gör. Dr. Deniz Korkmaz'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımnda gerek bilgi birikiminden yararlandığım gerekse manevi olarak her zaman yanımda hissettiğim arkadaşlarım Öğr. Gör. Zeynep İLKILIÇ ve Arş. Gör. Büşra AKARSU'ya ve beni her zaman sabırla destekleyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

**Gökçe YILDIRIM**

**ELAZIĞ- 2017**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                   | <u>Sayfa No</u> |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| ÖNSÖZ .....                                                                       | II              |
| İÇİNDEKİLER.....                                                                  | III             |
| ÖZET .....                                                                        | IV              |
| SUMMARY .....                                                                     | V               |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                                            | VI              |
| TABLolar LİSTESİ .....                                                            | VIII            |
| SEMBOLLER LİSTESİ .....                                                           | IX              |
| KISALTMALAR LİSTESİ .....                                                         | XI              |
| 1. GİRİŞ.....                                                                     | 1               |
| 2. İKİ AYAKLI YÜRÜYEN ROBOTUN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE KİNEMATİK ANALİZİ..... | 8               |
| 2.1. Matematiksel modellenmesi .....                                              | 8               |
| 2.2. Kinematik Analiz.....                                                        | 9               |
| 3. İKİ AYAKLI YÜRÜYEN ROBOTUN TASARIM ÖZELLİKLERİ VE ROBOT SÜRÜCÜ SİSTEMLERİ..... | 19              |
| 3.1 İki Ayaklı Yürüyen Robotun Tasarım Özellikleri .....                          | 19              |
| 3.2. Robot Sürücü Sistemleri .....                                                | 21              |
| 3.2.1. Doğru Akım Motorların Yapısı .....                                         | 22              |
| 3.2.2. Doğru Akım Motorun Matematiksel Modellenmesi .....                         | 22              |
| 4. YÜRÜME VE YÜRÜME EĞRİSİ TASARIMI .....                                         | 25              |
| 4.1. Yürüme .....                                                                 | 25              |
| 4.2. Yürüme Eğrisinin Tasarımı .....                                              | 26              |
| 4.2.1. Eklem Uzayında Yürüme Eğrisi Tasarımı.....                                 | 26              |
| 4.2.2. Merkezi Örüntü Üretici İle Yürüme Eğrisi Tasarımı .....                    | 28              |
| 4.2.2.1 Hopf Osilatör .....                                                       | 29              |
| 5. İKİ AYAKLI YÜRÜYEN ROBOTUN KATI MODEL TASARIMI VE KONTROLÜ .....               | 39              |
| 5.1. İki Ayaklı Yürüyen Robotun Katı Model Tasarımı.....                          | 39              |
| 5.2.İki Ayaklı Yürüyen Robotun Kontrolü.....                                      | 42              |
| 6. SONUÇLAR.....                                                                  | 49              |
| KAYNAKLAR.....                                                                    | 50              |

## ÖZET

### İKİ AYAKLI YÜRÜME HAREKETİNİN MODELLENMESİ VE AKILLI KONTROLÜ

Bu tez çalışmasında iki ayaklı insansı yürüme hareketini modellemek ve akıllı kontrol sistemleri kullanılarak adım yolu takibi gerçekleştirilmiştir. Bu gerçeklemede iki ayaklı yürüme hareketine en yakın modelin oluşturulması için ortalama boydaki bir insanın boyutları kullanılarak SolidWORKS paket programı ile sistemin katı modeli oluşturulmuştur. Daha sonra sistemin kontrolünü gerçekleştirebilmek amacıyla model Matlab/Simulink ortamına aktarılmıştır. Yürüme eğrisinin alt yapısını oluşturmak adına sistemin düz ve ters kinematik hesaplamaları yapılmış ve eklem açıları belirlenmiştir. Belirlenen eklem açıları ile yürüme eğrisinin planlamasında iki farklı yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemler 6. dereceden polinomlar ve merkezi örüntü üreticidir. İki ayaklı yürüyen robotun yürüme eğrisi tasarımı yapıldıktan sonra kontrol işlemlerini gerçekleştirmek için PID kontrolör uygulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** İki ayaklı yürüme, Düz kinematik, Ters kinematik, Yörünge planlama, CPG, PID

## SUMMARY

### MODELLING OF BIPED LOCOMOTION AND INTELLIGENT CONTROL

In this thesis, biped human walking motion modelling and intelligent control systems have been used to follow foot orbital. In order to construct the model which is the closest to the bipedal walking motion in this realization, a solid model of the system have been created with the SolidWORKS package program using the dimensions of an average person. Then the model have been transfered to MATLAB / Simulink environment in order to control the system. In order to construct the substructure of the walking curve, forward and inverse kinematics calculations of the system have been made and the angles of the joints have been determined. Two different methods were used in the planning of the walking curve with the determined joint lines. These methods are polynomials at the 6th level and central pattern generator. After the walking curve design of the biped walking robot, the PID controller have been applied to perform the control operations.

**Keywords:** Biped walking, Forward kinematics, Inverse kinematics, Orbital planning, CPG, PID

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                                | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Şekil 2.1. Eklemlerin pozitif dönme yönleri .....                                                              | 9                      |
| Şekil 2.2. Uzuvarların eksen takımları .....                                                                   | 10                     |
| Şekil 2.3. İleri ve ters yön kinematik analiz arasındaki ilişki.....                                           | 12                     |
| Şekil 3.1. Gövde uzvu .....                                                                                    | 19                     |
| Şekil 3.2. Ayak uzvu .....                                                                                     | 20                     |
| Şekil 3.3. Üst bacak ve alt bacak uzuvları.....                                                                | 20                     |
| Şekil 3.4. Serbestlik derecelerinin sayısı ve konumları.....                                                   | 21                     |
| Şekil 3.5. Doğru akım motoru .....                                                                             | 22                     |
| Şekil 3.6. Doğru akım motorun MATLAB/Simulink ortamında modellenmesi.....                                      | 23                     |
| Şekil 4.1. Yürüme siklusu .....                                                                                | 25                     |
| Şekil 4.2. $\theta_3$ açısı için belirlenen yörünge ve yörünge polinomundan elde edilen grafik .               | 27                     |
| Şekil 4.3. $\theta_4$ açısı için belirlenen yörünge ve yörünge polinomundan elde edilen grafik ..              | 27                     |
| Şekil 4.4. Omurgalılarda hareketin kontrolü .....                                                              | 29                     |
| Şekil 4.5. Örnek sinyal için $P_{\text{eğitim}}$ sinyali.....                                                  | 30                     |
| Şekil 4.6. Örnek sinyal için çıkış $Q_{\text{öğrenme}}$ sinyali .....                                          | 31                     |
| Şekil 4.7. Örnek sinyal için eğitim sinyali ile çıkış sinyali arasındaki hata .....                            | 31                     |
| Şekil 4.8. Hopf CPG osilatörün örnek sinyal frekanslarını öğrenme performansı.....                             | 32                     |
| Şekil 4.9. Hopf CPG osilatörün örnek sinyal genliklerini öğrenme performansı.....                              | 32                     |
| Şekil 4.10. Hopf CPG osilatörün örnek sinyal faz farklarını öğrenme performansı .....                          | 33                     |
| Şekil 4.11(a). Kalça eklemi için $P_{\text{eğitim}}$ ve $Q_{\text{öğrenme}}$ sinyallerinin ilk değerleri ..... | 34                     |
| Şekil 4.11(b). Kalça eklemi için $P_{\text{eğitim}}$ ve $Q_{\text{öğrenme}}$ sinyallerinin son değerleri ..... | 34                     |
| Şekil 4.12. Kalça eklemi için $P_{\text{eğitim}}$ ve $Q_{\text{öğrenme}}$ sinyalleri arasındaki hata.....      | 34                     |
| Şekil 4.13. Hopf CPG osilatörün kalça eklemi sinyalleri için genliklerini öğrenme performansı .....            | 35                     |
| Şekil 4.14. Hopf CPG osilatörün kalça eklemi sinyalleri için frekanslarını öğrenme performansı .....           | 35                     |

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.15. Hopf CPG osilatörün kalça eklemi sinyalleri için faz farklarını öğrenme performansı .....        | 35 |
| Şekil 4.16(a). Diz eklemi için $P_{\text{egitim}}$ ve $Q_{\text{öğrenme}}$ sinyallerinin ilk değerleri ..... | 36 |
| Şekil 4.16(b). Diz eklemi için $P_{\text{egitim}}$ ve $Q_{\text{öğrenme}}$ sinyallerinin son değerleri ..... | 36 |
| Şekil 4.17. Diz eklemi için $P_{\text{egitim}}$ ve $Q_{\text{öğrenme}}$ sinyalleri arasındaki hata .....     | 37 |
| Şekil 4.18. İki ayaklı yürüyen robotun kalça eklemi referans ve robot kalça eklem açıları                    | 37 |
| Şekil 4.19. İki ayaklı yürüyen robotun diz eklemi referans ve robot diz eklem açıları .....                  | 38 |
| Şekil 5.1. İki ayaklı yürüyen robotun katı modeli .....                                                      | 39 |
| Şekil 5.2. Sistemin MATLAB/Simulink modeli .....                                                             | 40 |
| Şekil 5.3. Gövde uzvunun MATLAB/Simulink Modeli .....                                                        | 40 |
| Şekil 5.4. Kalça eklemlerinin MATLAB/Simulink modeli .....                                                   | 41 |
| Şekil 5.5. Bacak üst eklem uzvu MATLAB/Simulink modeli .....                                                 | 41 |
| Şekil 5.6. Diz eklemleri için MATLAB/Simulink Modeli .....                                                   | 41 |
| Şekil 5.7. Bacak alt eklem uzvunun MATLAB/Simulink modeli .....                                              | 42 |
| Şekil 5.8. Ayak uzvunun MATLAB/Simulink modeli .....                                                         | 42 |
| Şekil 5.9. PID denetleyici .....                                                                             | 43 |
| Şekil 5.10. Sistemin PID ile oluşturulmuş MATLAB/Simulink modeli .....                                       | 45 |
| Şekil 5.11. Kalça ekleminin PID kontrolör ile kontrolü .....                                                 | 46 |
| Şekil 5.12. Diz ekleminin PID kontrolör ile kontrolü .....                                                   | 46 |
| Şekil 5.13. Kalça ekleminin servo motor bağlantılı PID kontrolör ile kontrolü .....                          | 47 |
| Şekil 5.14. Diz ekleminin servo motor bağlantılı PID kontrolör ile kontrolü .....                            | 47 |
| Şekil 5.15. Kalça ekleminin CPG ile yörünge üretimi ve PID kontrolör ile kontrolü .....                      | 48 |
| Şekil 5.16. Diz ekleminin CPG ile yörünge üretimi ve PID kontrolör ile kontrolü .....                        | 48 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                         | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Tablo 2.1. Eklem açılarının başlangıç değerleri ve değişim açıları..... | 11                     |
| Tablo 2.2. D-H Parametre Tablosu.....                                   | 13                     |
| Tablo 2.3. Sağ bacak uzuvları için D-H parametre tablosu.....           | 13                     |
| Tablo 2.4. Sol bacak uzuvları için D-H parametre tablosu .....          | 14                     |
| Tablo 3.1. Doğru akım motorun parametreleri.....                        | 24                     |
| Tablo 5.1. PID parametrelerinin değerleri.....                          | 44                     |



## SEMBOLLER LİSTESİ

|                  |                                                                  |
|------------------|------------------------------------------------------------------|
| $L$              | : Lagrange İfadesi                                               |
| $P$              | : Sistemin Toplam Potansiyel Enerjisi                            |
| $K$              | : Sistemin Toplam Kinetik Enerjisi                               |
| $m$              | : Çubuk Kütleleri                                                |
| $V$              | : Kütle Merkezinin Hızı                                          |
| $I$              | : Kütle Atalet Momenti                                           |
| $\omega$         | : Açısal Hız                                                     |
| $\tau$           | : Tork                                                           |
| $g$              | : Yer Çekimi İvmesi                                              |
| $\theta_n^{(b)}$ | : b. Ayağın n. Eklem Açısı                                       |
| $d_i$            | : Kesişen eklemler arasındaki eklem kayması                      |
| $a_i$            | : Ardışık iki eksen takımı arasındaki mesafe                     |
| $\alpha_i$       | : Ardışık iki eksen takımı arasındaki eksen açısı                |
| $A_i^{i-1}$      | : i. Eklem ile (i-1). eklem arasındaki homojen dönüşüm matrisi   |
| $O_n$            | : n. Eksen takımı                                                |
| $x_k^{(b)}$      | : Yer ile kalça eklemi arasındaki vektör                         |
| $x_b^{(b)}$      | : Yer ile ayak bileği arasındaki vektör                          |
| $x_b^{k(b)}$     | : Kalça ile ayak bileği arasındaki vektör                        |
| $uvw^{(b)}$      | : Kalçanın konumunun $O_6$ eksen takımına göre ifade eden vektör |
| $i$              | : Armatür akımı                                                  |
| $R_a$            | : Elektriksel direnç                                             |
| $L_a$            | : Elektriksel indüktans                                          |
| $K_m$            | : Motor moment sabiti                                            |
| $J$              | : Rotorun atalet momenti                                         |

|       |                                            |
|-------|--------------------------------------------|
| $B$   | : Motor viskoz sürtünme sabiti             |
| $K_b$ | : Elektromotor kuvveti sabiti              |
| $K_p$ | : Oransal katsayı                          |
| $K_i$ | : İntegral katsayısı                       |
| $K_d$ | : Türev katsayısı                          |
| $u$   | :PID kontrolör ile kontrol edilen değişken |
| $e$   | : Sistemin etkin hatası                    |



## KISALTMALAR LİSTESİ

|            |                            |
|------------|----------------------------|
| <b>ZPM</b> | : Sıfır Moment Noktası     |
| <b>DOF</b> | : Serbestlik Derecesi      |
| <b>SMC</b> | : Kayma Kipli Kontrolör    |
| <b>CPG</b> | : Merkezi Örüntü Üretici   |
| <b>COG</b> | : Ağırlık Merkezi          |
| <b>ÇDF</b> | : Çift Destek Fazı         |
| <b>TDF</b> | : Tek Destek Fazı          |
| <b>D-H</b> | : Denavit-Hartenberg       |
| <b>DC</b>  | : Doğru Akım               |
| <b>AC</b>  | : Alternatif Akım          |
| <b>PID</b> | : Oransal, İntegral, Türev |
| <b>PI</b>  | : Oransal, İntegral        |
| <b>PD</b>  | : Oransal, Türev           |

## 1. GİRİŞ

Teknoloji kavramının temelinde insanların yaşam kalitesi nasıl yükseltilebilir ve insan iş yükü ne kadar düşürülebilir gibi konulara alternatif çözüm yolları aranmaktadır. İnsansı robot çalışmalarındaki başlıca amaç, özellikle endüstri alanında insanlar ile uyumlu bir şekilde çalışabilecek, üretimdeki rutin işleri gerçekleştirebilecek, insan gücünün yetmediği kısımlarda devreye girebilecek robotlar icat etmektir. Günümüz teknolojinin geldiği noktaya bakıldığında geçmiş yıllara oranla gerek günlük yaşamı kolaylaştırmada gerekse zorlu çalışma alanlarında kullanılmak üzere birçok robot üretilmiştir. Ancak bu robotların çoğunda istenilen görevi yerine getirse de yine de bir insan kadar hareket yeteneğine ve karar verme mekanizmasına sahip olamadıkları için uygulamada bazı sorunlar ile karşılaşmaktadır. Bu sorunlardan biri de robotun çalışma uzayına taşınması ve oradaki hareket sınırlarıdır. Paletli robotlar belli bir noktaya kadar hareket imkanı sağlamasına rağmen yine de yeterli olmadığı durumlar endüstride mevcuttur. Bu durum bilim insanlarını iki ayaklı insansı yürümenin robotlara uygulanabilirliği konusunda çalışmalar yapmaya yöneltmiştir. Bu sebeple insansı robotlar ve iki ayaklı yürüme konusunda özellikle son yıllarda gerek teorik gerekse uygulamalı olarak pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir. İnsanın işlerini gerçekleştirebilecek bir robotun insan hareketlerini iyi taklit edebilmesi gerekir. Günümüzde çalışmalar birebir insan yapısına benzer bir robotu henüz bunu mümkün kılmasa da teknolojideki gelişmeyi de göz önünde bulundurarak gelecekte bu teorinin gerçekleşebileceği düşünülmektedir [1].

İnsansı robotlar pek çok farklı çalışma alanını için ortak bir çalışma konusudur. Robotlarda yürüme, robot görmesi, karar verme mekanizması bunlardan bazılarıdır. İnsansı robot çalışmalarının en önemli problemlerinden birisi iki ayaklı yürümedir. Özellikle endüstri şartları göz önünde bulundurulduğunda robotların hareket ettirilebilmesi ve iş yapılacak kısma taşınması iş yükünü önemli ölçüde hafifletecektir. Hareketli robotlar arasından insansı iki ayaklı robotların tercih edilmesinin temel sebebi hareket kabiliyeti açısından daha fazla esneklik sunmasıdır. Robotun kendi hareketini sağlayabilmesi verilen konuma devrilmeden en hızlı şekilde ulaşabilmesi günümüzde çözülmeye çalışılan sorunlardan biridir [2].

İnsansı robotlar ve iki ayaklı yürüme hakkında uzun yıllar çalışmalar yapılmıştır ve günümüzde yeni sistemler geliştirmek veya var olan sistemleri iyileştirmek amacıyla

alışmalar devam etmektedir. Bu kısımda iki ayaklı yürüme hareketinin modellenmesi ve akıllı kontrol gerçeklemesi ile ilgili yapılan bazı çalışmalardan bahsedilmektedir.

Naeem vd. yürüme esnasında maksimum istikrar sağlayan bir 4-DOF (Serbestlik Derecesi) iki ayaklı robot için Oransal İntegral Türev kontrolünün tasarımı üzerinde çalışmışlardır. Sistem, sistemin transfer fonksiyonuna PI, PD ve PID kontrolleri eklenerek analiz edilmiştir. Tasarımın doğruluğu bilgisayar ortamındaki simülasyonları ile doğrulanmıştır [3].

Burada robotun kuvvet analizi ve matematiksel modellemesi yapılmıştır. Daha sonra, PI, PD ve PID kontrolörleri transfer fonksiyonuna ayrı ayrı eklenmiştir. Sistem, MATLAB/SIMULINK ortamında gerçekleştirilen bir dizi simülasyon ile analiz edilmiştir. PID kontrolörlerini kullanmak, iki ayaklı robotun kontrolünü büyük ölçüde basitleştirmiştir. Kullanılan değerlerin bazılarının en uygun değerlere yakın olduğu varsayılmıştır, ancak daha kesin değerler kullanılarak sonuçlar daha da geliştirilebilir.

Raiberd vd. 5-serbestlik dereceli iki ayaklı bir robot modeline simülasyon yardımıyla, PD kontrolörünü ve kayma kipli kontrol (SMC) yöntemini uygulanmış ve iki kontrol yönteminin sonuçlarını kıyaslayan bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada parametrelerde ki belirsizliklerin saptanmasında SMC'nin diğer kontrol yöntemine kıyasla daha üstün olduğu kanıtlanmıştır. Bu stnlğn, iki boyutlu modelin belirsizlik seviyesi arttıkça güçlendiği gerçeği de ortaya çıkmaktadır. Uygun referans sinyallerinin seçilmesi sayesinde, hem yatay bir düzlem üzerinde hem de bir merdiven üzerinde istikrarlı bir yürüme sağlanabildiği görülmüştür. Belirsizlik seviyesi çok yüksek (normalde %80'den fazla) olduğunda normal PID kontrolü ile dengeli bir yürüyüş gerçekleştirmek mümkün olmayabilir. Hem tork hesaplaması hem de SMC hesaplama karmaşıklığı standart mikroişlemci donanımı ve yazılımı ile gerçekleştirilmektedir. Özellikle, algoritmalar montajda programlanırsa, hesaplama süresi 3-4 ms'dir. Ayrıca, uygun hızlı ters dinamik algoritmalarını kullanarak veya hesaplamalar paralel hale getirilerek, bu rakam 1-2 ms altına inebilmiştir. Tüm trigonometrik fonksiyonlar önceden hafızaya alındığında ve bir ROM bellekten çağırıldığında başka bir gelişme elde edilebilir. Bu nedenle, en az 60 Hz'lik ( $T_s < 16$  ms) bir örnekleme frekansı çok iyi bir yörünge izleme performansına yol açtığı için SMC'nin deneysel ve gerçekte iki ayaklı robotik sistemlerde kullanım için uygun olduğu ileri sürülebilir [4].

Sugihara T. vd. sıfır moment noktasının (ZMP) dolaylı manipülasyonu ile ağırlık merkezini (COG) kontrol eden gerçek zamanlı bir hareket metodu geliştirmişlerdir [5].

Yöntemin gerçek zamanlı tepkisi, yüksek mobiliteye sahip olan insansı robotlara olanak tanımıştır. Yapılan bu çalışma ZMP planlaması, ZMP manipülasyonu, eklem açılarında COG hız dekompozisyonu ve eklem açılarının konum kontrolü olmak üzere dört bölümden oluşur. Önerilen yöntemin etkinliği bilgisayar simülasyonları ile doğrulanmıştır.

Bu çalışmanın amacı, robot dinamiklerinden olumlu bir şekilde yararlanarak gerçek zamanlı bir hareket oluşturma yöntemi geliştirilerek insansı robotların yüksek hareket kabiliyetine sahip olmasını sağlamaktır. ZMP [6] ve ağırlık merkezi (COG) arasındaki dinamik ilişkiyi kullanılarak oluşturulmuştur. Yürüme sistemi ters sarkaç ile benzer bir dinamiğe sahiptir ve destekleme noktası eşdeğer ZMP'de bulunur. ZMP manipülasyonu ile insan vücut sisteminin COG'sini gerçek zamanlı olarak kontrol eden yöntem önerilmiştir.

Park vd. bulanık mantığı kullanarak ZMP yörüngesini tasarlamak için çevrim dışı bir yöntem önermişlerdir [7]. Sorao vd. aksi gibi belirli bir kinematikle sınırlandırılmış ZMP manipülasyonunu önermişlerdir.

Bu çalışmada önerilen yöntem, geçmişteki çalışmalara göre keyfi serbestlik derecesi ve kinematik ile uyumlu olduğu ve gerçek zamanlı hesaplamayı mümkün kılmak için vücut dinamiklerinin düşük boyutlu bir parçasını göz önünde bulundurduğundan daha avantajlı olduğu söylenmiştir. Tam manada hareket üretme ve insansı robot kontrolü, büyük bir hesaplama ve atılım gerektirmektedir, çünkü doğası gereği hiperaktiviteden ötürü nonholonomic kısıtlamalar vardır. Bu çalışmada önerilen ZMP'yi manipüle etme yöntemi, sorunun karmaşıklığını önemli ölçüde azaltır ve böylece gerçek zamanlı uygulanmayı sağlar.

Geliştirilen gerçek zamanlı hareket metodu insansı robotların yüksek mobiliteli, yüksek adaptif ve çevik olmasını sağlamış ve gerçek dünyada insanlara yardımcı olmuştur. Kullanılan bu metod robotların dinamiği ile ters sarkaç arasındaki benzerliğe dayanmaktadır ve gerçek zamanlı uygulama için ikisinin bileşimleri yeniden düzenlenmiştir.

Carbone vd. WABIAN-RIV (Waseda bipedal humanoid rafine IV) adlı bir insansı robotu, sağlamlık özellikleri açısından analiz etmiştir. WABIAN mimarisinin en önemli sağlamlık parametrelerinin bir fonksiyonu olarak sağlamlık matrisini çıkarmak için basit modeller ve bir formülasyon önerilmişlerdir [8]. Önerilen formülasyon sağlamlık performanslarının sayısal tahmini için faydalı olmuştur.

Birçok araştırma grubu insansı robotların geliştirilmesi üzerinde çalışmaktadırlar [9,10] ve bir insansı robot, birçok bilim ve mühendislik dalında gelişme gerektiren karmaşık bir

mekatronik sistem olması açısından sağlamlık performansı üzerinde durulması gereken önemli bir konudur [11,12]. Gerçekte, bir robot da, bağlantıların ve bağlantıların sertliği yetersiz ise, dış kuvvetler ve momentler bağlantılarda büyük sapmalara neden olabilir; bu da hem doğruluk hem de yük taşıma performansı açısından istenmemektedir. Bu nedenle, sağlamlık performanslarını değerlendirmek için farklı robot tipleri üzerinde bir sağlamlık analizi yapılmaktadır [13,14]. Dahası, uygun bir sertlik modeli ve formölasyonu tanımlandıktan sonra, ağırlıkların bağlantı ağırlıkları ile sağlamlık performansları arasında optimum bir uzlaşıyı bulmak amacıyla tasarım amaçları için de kullanılabilir [15,16].

Bu bahsedilen hususlar, insansı robotların üzerinde de sağlamlık analizi yapmasını kuvvetle önermektedir. Bu çalışma, katılık matrisini çıkarmak için uygun kinematik, sertlik ve statik modelleri tanımlayarak, insansı robot WABIAN-RIV'in sertlik analizini açıklamaktadır. Önerilen formölasyon, sağlamlık performanslarının bir kestirimini elde etmek için sayısal olarak uygulanabilir.

Bu çalışmada, bacaklar, bel, gövde, omuzlar, boyun ve kolların uygun kinematik, sertlik ve statik modellerine dayanılarak WABIAN-RIV (Waseda Bipedal humanoid Refine IV) sertlik analizi yapılmıştır. Bu modelleri kullanarak sağlamlık matrisini ve uyumluluk yer değiştirmelerini hesaplamak için bir formölasyon çıkarılmıştır. Bu formölasyon, yürüme aşamaları esnasında ZMP'de sağlamlık matrisinin hesaplanması için bile uygundur. Önerilen formölasyon, WABIAN-RIV'in sağlamlık performanslarını tahmin etmek için sayısal algoritmalarda uygulanabilir. Benzer modeller ve formölasyon, tasarımı ve kontrolünü iyileştirmek için genel bir yaklaşım veren diğer insansı robotları için uygulanabilir.

Chestnutt vd. engelli ortamlarda özerk olarak gezinme olanağı sunan bir Honda ASIMO insansı robotu üzerine çalışmışlardır [17]. Bilinen, sabit engel konfigürasyonları ile yolunu bulmanın yanı sıra, planlama sistemi, zorlu ortamlarda engel konumunun gelecekteki halini dikkate alabilmektedir. Bu çalışmada, ASIMO'nun dinamik bir ortamda otonom bir şekilde güvenli gezinmesine olanak tanıyan, sahnedeki nesnelerin hızlarını tahmin etmek için bir görme sistemi kullanılmıştır. Deneme başlangıcında engel konumları ve hızları bilinmemektedir, ancak robot yürürken çevrimiçi olarak tahmin edebilmektedir. Planlayıcı, ASIMO'nun konumunun ve engel yörüngelerinin en son tahminleriyle ayak izi yolunu sürekli olarak ayarlar ve robotun hareketli engelleri başarıyla dolaşmasını sağlamıştır.

Gelecek incelemeler için birkaç uzantı ve iyileştirme yapılmıştır. Birincisi, algılama sistemi şu anda robotun kendi kameralarından ziyade kafa üstü bir kamera kullanılmıştır. Bu, robotun içinde manevra yapabileceği alanı sınırlar ve bazı oklüzyon konularını sunar. İkincisi, tahmin modelleri sabit hız varsayımı kullanır. Bu, örnek ortamlar için uygun olsa da daha ifade ve engel odaklı hareket modelleri, insanlar gibi çevre üzerindeki diğer nesnelerin gelecekteki hareketlerini daha iyi tahmin edilmesini sağlayabilir. Son olarak, izleme ve planlama, düzlemsel ortamlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmayı, biped yeteneklerinden daha fazla kullanan daha zorlayıcı 3D ortamlara genişletmeyi planlanmaktadır.

Erbatur vd. Sabancı Üniversitesi'nde tasarlanan, yürüyen insan robot olan SURALP platformu üzerinde çalışmışlardır [18]. Tamamlandığında, robotun kinematik düzenlemesi, bacaklar, kollar, bel ve boyun dahil olmak üzere, bağımsız olarak hareket eden 30 eksenenden oluşmaktadır. Şimdiye kadar, platformun 12 serbestlik derecesi (DOF) bacak modülü, SURALP-L yapılmıştır. Bu çalışmasında bu bacak modülünün tasarımının en önemli özelliklerini sunmaktadır. Mekanik tasarım, tahrik mekanizmaları, sensörler, kontrol donanımı ve algoritmaları tanıtılmıştır. Cihazın tahriği doğru akım motorlara, kayış ve kasnak sistemlerine ve Harmonik Sürüş redüksiyon dişlilerine dayalıdır. Duyusal ekipman, ortak kodlayıcılar, kuvvet / tork sensörleri ve atalet ölçüm sistemlerinden oluşur. Kontrol donanımı bir dSpace dijital sinyal işlemcisi etrafında ortalanmıştır. Yumuşak bir yürüyüş yörüngesi oluşturulmuştur. Zemin etki kompensatörü, erken iniş yörüngesi modifikasyonu sistemi, ayak ve gövde yönlendirmesi için kontrolörler ve bağımsız eklem konum denetleyicileri uygulanmaktadır. Bacak modülü ile yapılan deneysel yürüyüş sonuçları da elde edilmiştir.

Bu çalışmada, tam gövde insansı robotun 12 serbestlik dereceli bacak modülü tanıtılmıştır. Mekanik tasarım talimatları ve bileşenleri anlatılmıştır. Sensör sistemi ve geribesleme kontrolörlerinde kullanımı ve duyusal geribildirim kullanılarak sorunsuz üretilen referans yörüngesini izlemek için denetleyici donanım ve kontrol algoritmaları sunulmuştur. Deneysel yürüme sonuçları, bu kontrol cihazlarının istikrarlı bir yürüyüş elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, mekanik sistem, kontrol donanımı ve kullanılan sensörlerin yürüme uygulamaları için uygun olduğu doğrulanmıştır. SURALP platformunun geri kalan serbestlik derecelerinin inşası devam etmektedir.

Toygar vd. bu çalışmada, alt ekstremité bozukluğu olan insanlar için dış iskelet sistemi tasarımı yapmışlar ve yapılan tasarımın kontrolünde yapay sinir ağlarını kullanmayı

hedeflemişlerdir [19]. Dış iskeletin 3 boyutlu katı modelinin kullanılmasında SolidWorks yazılımı kullanılmıştır. İnsan yürüme verileri alınıp aynı zamanda da ayak tabanına etki eden kuvvetlerin hesaplanabilmesi için ayak tabanı dört parçaya bölünmüştür. Elde edilen verilerden faydalanılarak yürüme hareketi modellenip dış iskelet sistemi üzerinde oluşan gerilme ve şekil değiştirme dağılımı hesaplanmıştır. Bu analizler sonucunda yürüme için gereken veriler elde edilmiştir.

Ayak tabanında oluşan tepki kuvvetleri baskı plakaları kullanılarak ölçülmüştür. Elde edilen bu kuvvetler sonlu elemanlar analizinde bozucu giriş olarak uygulanmış ve yürümenin farklı fazları için destek sistemi üzerindeki gerilme dağılımı elde edilmiştir. Yapılan çalışmaların sonucunda en yüksek Von Mises gerilme değerinin tasarım için güvenli olduğu belirlenmiştir. SolidWorks Motion yazılımı kullanılarak eklem motorlarının moment gereksinimleri hesaplanmıştır. Eklem hareketinin sağlanabilmesi için ise dişli kayış sistemi kullanılarak motor momentleri artırılmıştır. İki bacağın uyumlu hareketinin sağlanabilmesi için sistem yapay sinir ağları ile eklem açısal uyartım bilgileri elde edilmiştir. Sonuç olarak kullanılan yöntemin uygunluğu gözlemlenmiştir.

Gerçek, yaptığı tez çalışmasında toplam on iki serbestlik derecesine sahip iki ayaklı yürüyen robotun prototip imalatını amaçlamıştır [20]. Tasarlanan iki ayaklı robot gövde, kalça eklem grubu, diz eklemi ve bilek eklem grubu olmak üzere dört ana montaj grubundan oluşmaktadır. Montaj gruplarına ait tasarım kriterlerini belirleyebilmek için, bilgisayar ortamındaki benzetimi yapılan bir çubuk modelden yararlanılmıştır. Çubuk modelin fiziksel parametreleri için literatürdeki mevcut değerler kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda iki ayaklı yürüyen robota ait eklem açısal yer değişimleri, tork ve açısal hız değerleri elde edilmiştir. Bu veriler ışığında tezin amacına da uygun olacak şekilde tasarım kriterleri oluşturulmuştur. Tasarım sırasında, riskli görünen parçaların analizi yapılarak gerekli olan düzenlemeler yapılmıştır. Mekanik kısımdan sonra elektronik ve kontrol mekanizmaları üzerinde çalışılmıştır. Daha önceden yapılmış olan çubuk model için, tasarlanan model uygulanarak yer değişimi, tork ve hız değerleri elde edilmiştir. Bu gödeğerler ile hem tasarımın hem de kullanılan elemanların güvenilirliği doğrulanmıştır. Tasarımı biten parçaların, imalat ve montaj resimlerinin oluşturulmuş, uygun imalat yöntemleri belirlenmiştir. İmalat için gerekli tüm bilgileri içeren bir imalat klasörü hazırlanmıştır ve robota son hali verilmiştir.

Bu tez çalışmasında SolidWORKS paket programıyla tasarlanan ve benzetimi yapılan iki ayaklı yürüyen robotun merkezi örüntü üretici ile kontrolü sağlanmış ve yürüme eğrisi takip performansı incelenmiştir.

Gerçekleştirilen bu tez çalışması 6 bölümden oluşmaktadır. Bölüm içerikleri aşağıda belirtildiği gibidir;

**Bölüm 1’de**, bugüne kadar iki ayaklı yürüme hareketi üzerinde yapılan çalışmalar üzerinde durulmuştur. Aynı zamanda bu tez çalışması kapsamında yer alan bölümler ile ilgili bilgiler verilmiştir.

**Bölüm 2’de**, iki ayaklı yürüyen robotun matematiksel olarak ifadesinin nasıl elde edildiği anlatılmıştır. İleri ve ters kinematik analizler ile iki ayaklı yürüyen robotun eklem açıları hesaplanmıştır.

**Bölüm 3’de**, iki ayaklı yürüyen robotun tasarımı için gerekli olan kriterler belirlenmektedir. Aynı zamanda robot eklemlerinin istenilen hareketi gerçekleştirebilmesi için her bir ekleme uygulanacak olan robot sürücü sistemlerinden bahsedilmektedir.

**Bölüm 4’de**, yürüme hareketi ile ilgili temel kavramlardan bahsedilmektedir. Yürüme hareketinin nasıl gerçekleştiği anlatılmıştır ve robot eklemlerinin takip etmesi istenilen yürüme yörüngelerin planlaması yapılmıştır

**Bölüm 5’de**, iki ayaklı robotun katı model tasarımından bahsedilmiştir ve yürüme yörüngeleri belirlenen eklemlerin PID ile kontrolü gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar verilmiştir.

**Bölüm 6’da**, elde edilen simülasyon sonuçlarının, gerçekleştirilen tasarıma uygunluğu tartışılmıştır.

## 2. İKİ AYAKLI YÜRÜYEN ROBOTUN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE KİNEMATİK ANALİZİ

### 2.1. Matematiksel modellenmesi

Robot uzuvlarının harekete başlamasını sağlamak, görevini yerine getirmesi için gereken ivmeye ulaşmak ve görevi bittikten sonra durmasını sağlamak için eklemlere bir tork uygulanmalıdır. Bu tork değerini hesaplamak için dinamik denklemlerden faydalanılır. Dinamik analiz sistem hareketlerinin matematiksel ifadesidir. Sistemin dinamik denklemleri sistem davranışlarını en iyi şekilde açıklayan matematiksel ifadelerdir. Dinamik analizin yapılması sistemin herhangi bir bozucu etki karşısındaki davranışının gözlemlenmesinde, uygun kontrol yöntemlerinin belirlenmesinde, kinematik denklemlerin çıkarılması açısından önemlidir. Dinamik denklemlerin çıkarılması için literatürde yaygın olarak Newton-Euler formülasyonu ve Lagrange-Euler formülasyonu kullanılmıştır. Newton-Euler yöntemini uygulamak nispeten daha basittir fakat öte yandan bu yöntem Lagrange'ın ortak reaksiyon kuvvetlerinin çarpanlarının dizisinden oluşan ek cebirsel denklemleri içerdiğinden çözülmesi gereken problemlerin sayısını artırır [21]. Bu çalışmada sistemin tork değerlerinin elde edilmesinde Lagrange – Euler yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem diğer birçok yöntemlere göre uygulanması oldukça basit ve sistemattir. Lagrange – Euler yönteminde sistemin enerji denklemlerinden ve atalet ifadelerinden yararlanılır. Sistem tasarımında kullanılan uzuvların homojen olduğu kabul edilmiş ve her bir uzvun ağırlık merkezi orta noktasındadır. Lagrange – Euler ifadesi [22];

$$L = K - P \quad (2.1)$$

K= Sistemin toplam kinetik enerjisi,

P= Sistemin toplam potansiyel enerjisi,

L= Lagrange ifadesidir.

$$K = \frac{1}{2} * m * (V_x^2 + V_y^2 + V_z^2) + \frac{1}{2} * I * \omega^2 \quad (2.2)$$

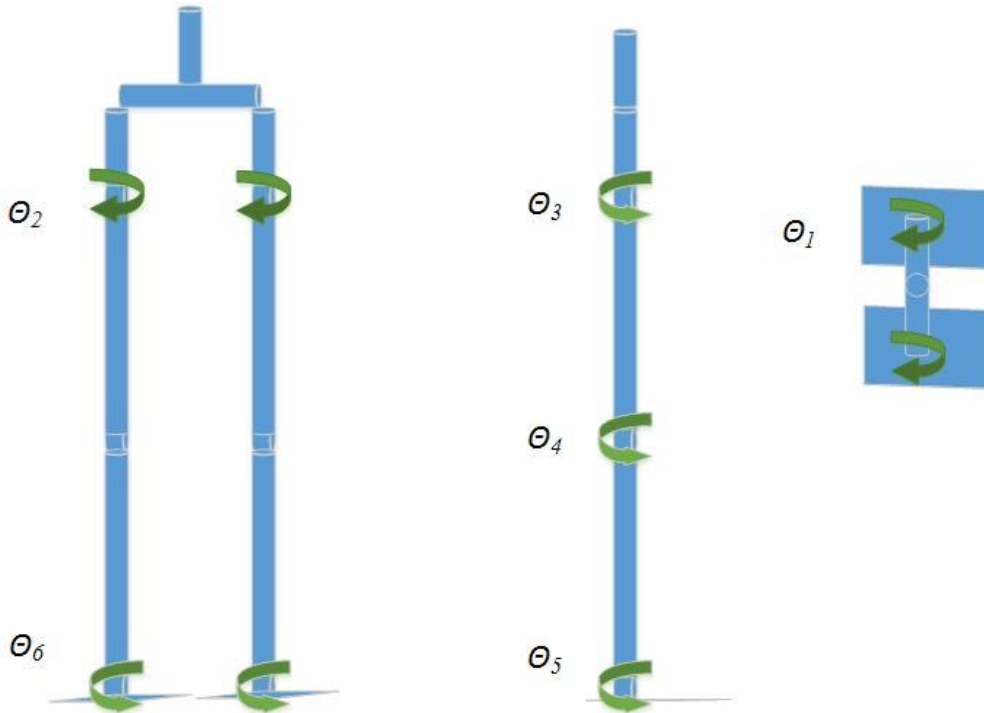
$$P = m * g * h \quad (2.3)$$

Lagrange ifadesi elde edildikten sonra eklemlere uygulanacak tork değerlerinin elde edilmesi için denklem (2.4) formülasyonu kullanılmıştır.

$$\tau = \frac{d}{dt} \left( \frac{\delta L}{\delta \dot{q}} \right) - \left( \frac{\delta L}{\delta q} \right) \quad (2.4)$$

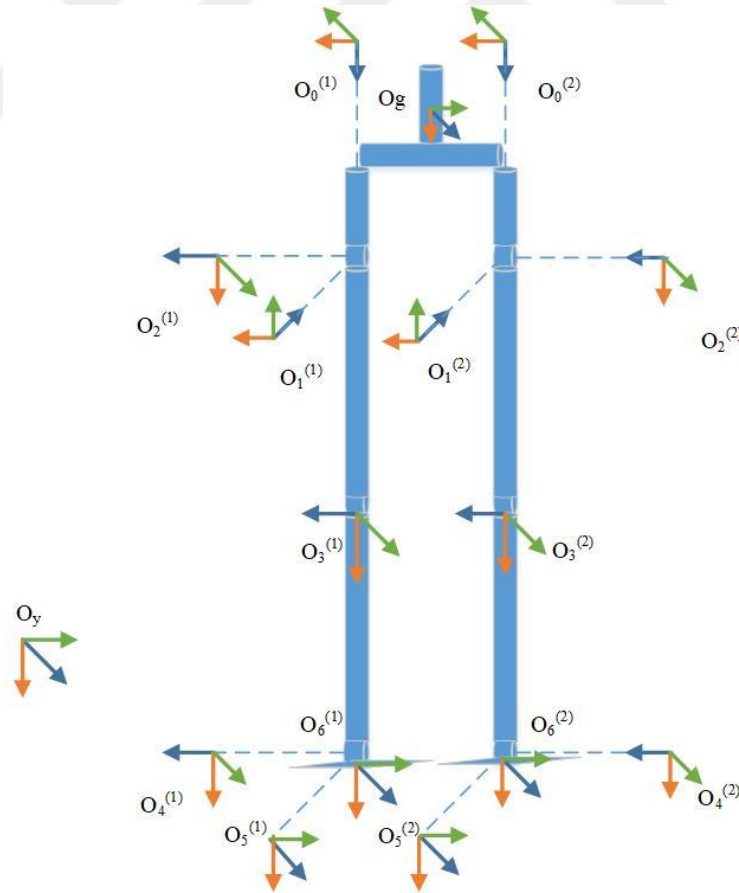
## 2.2. Kinematik Analiz

Robot kinematiği robotun uç işleyicisi ile robot eklemleri arasındaki bağlantıyı tanımlamaktadır [23]. Bir eklemin konum ve yönelimi bir önceki ve bir sonraki eklemin konum ve yönelimi ile ifade edilebilir. Bu konum ve yönelim bilgileri için 4x4 lük homojen matrisler kullanılmaktadır. Bir robotun her serbestlik derecesi için bir dönüşüm matrisi mevcuttur. İki ayaklı robotun her bir bacağı için altı serbestlik derecesi kullanılarak endüstriyel manipülatörler için kullanılan analiz ve tasarım yöntemleri bu sistem için de kullanılmaktadır. Daha sonra robottaki eklem açıları için bir pozitif yön belirlenmiştir. Bu pozitif yönler eklemlerdeki serbestlik derecelerinin hareket yönlerini ifade etmektedir. Eklem momentleri için de bu yöntemler kullanılmıştır. Şekil 2.1’de eklemlerin pozitif yönleri görülmektedir [24].



Şekil 2.1. Eklemlerin pozitif dönme yönleri

Her bir uzuv için hareket doğrultuları referans alınarak bir eksen takımı yerleştirilmiştir ve homojen dönüşüm matrisleri oluşturulmuştur. Bu matrisler eksen takımlarının birbirlerine göre dönüşümünü ifade etmektedir. Robottaki uzuvlar için sabit bir referans kullanılmamıştır. Her bir bacak bir manipülatörmüş gibi düşünülüp her bir bacak için gövdeye 0. eksen takımı yerleştirilmek üzere ayaklara kadar 6 eksen takımı ayrı ayrı yerleştirilmiştir. Bu çalışmada kalça eklemlerindeki ve ayak bileği eklemlerine yerleştirilen eksen takımları çakışık olarak kabul edilmektedir. Çakışık olması ters kinematik hesaplamalarda işlem kolaylığı sağlamaktadır. Diz ekleminde tek yönlü bir hareket bulunduğundan bir tane eksen takımı yerleştirilmiştir. Eksen takımları ve konumları Şekil 2.2’de verilmiştir [24]. Çakışık olan eksen takımları yönleri ve konumları daha belirgin olması açısından kesikli çizgiler ile belirtilmektedir. Şekil 2.2 de ki eksen takımlarında kırmızı oklar x-ekseni, yeşil oklar y-ekseni ve mavi oklar ise z-eksenini ifade etmektedir. Eksen takımları D-H formülasyonuna uygun şekilde yerleştirilmiştir. Eksen takımları yerleştirilirken z-eksenleri eklemlerin hareket doğrultusunda yerleştirilmiştir.



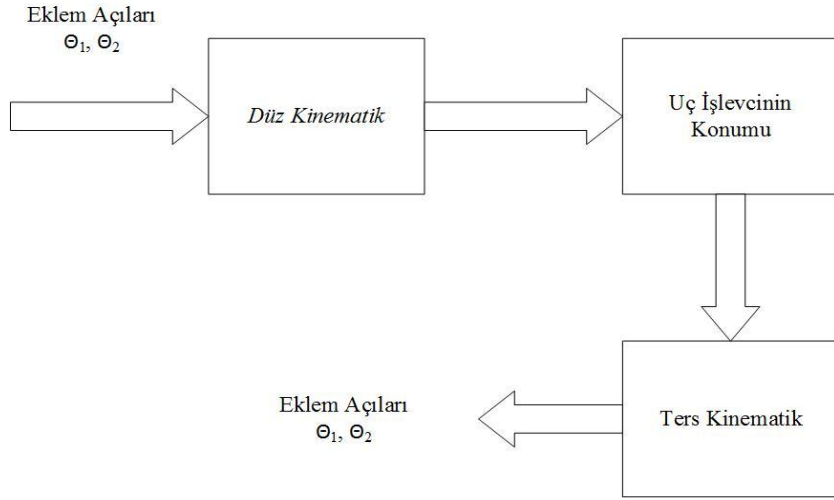
Şekil 2.2. Uzuvların eksen takımları

İki bacaklı robotun sahip olduğu her eklem için hareket ettiği bir konum aralığı vardır. Yürüme hareketinin gerçeğe en yakın şekilde taklit edilebilmesi için bu aralıklar oldukça önemlidir. Aşağıdaki tablo 2.1 ‘de eklem açılarının başlangıç değerleri ve her bir serbestlik derecesi için açısal konumun değişim aralıkları verilmiştir [24].

Tablo 2.1. Eklem açılarının başlangıç değerleri ve değişim açıları

| $AÇI$            | $Açısal\ Konumun\ Başlangıç\ Değeri\ (rd)$ | $Açısal\ Konumun\ Değişim\ Aralığı(rd)$ |
|------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|
| $\theta_1^{(1)}$ | 0                                          | $-n/2, +n/2$                            |
| $\theta_2^{(1)}$ | $-n/2$                                     | $-n, 0$                                 |
| $\theta_3^{(1)}$ | 0                                          | $-n/2, +n/2$                            |
| $\theta_4^{(1)}$ | 0                                          | $-n, 0$                                 |
| $\theta_5^{(1)}$ | 0                                          | $-n/2, +n/2$                            |
| $\theta_6^{(1)}$ | 0                                          | $-n/2, +n/2$                            |
| $\theta_1^{(2)}$ | 0                                          | $-n/2, +n/2$                            |
| $\theta_2^{(2)}$ | $-n/2$                                     | $-n, 0$                                 |
| $\theta_3^{(2)}$ | 0                                          | $0, +n/2$                               |
| $\theta_4^{(2)}$ | 0                                          | $-n, 0$                                 |
| $\theta_5^{(2)}$ | 0                                          | $-n/2, +n/2$                            |
| $\theta_6^{(2)}$ | 0                                          | $-n/2, +n/2$                            |

Ters kinematik ile düz kinematik arasında çift yönlü bir ilişki vardır. İleri kinematik analiz eklem açıları verilen robotun son uzvunun konumunun belirlenmesine, ters kinematik analiz ise son uzvunun konumu bilinen bir robotun eklem açılarının belirlenmesini ifade etmektedir. Ters kinematik işlemlerde serbestlik derecesinin artması işlem zorluğunu arttırmaktadır. Şekil 2.3’de düz kinematik ile ters kinematik arasındaki ilişki görülmektedir [22].



Şekil 2.3. İleri ve ters yön kinematik analiz arasındaki ilişki

### 2.2.1. İleri Yön Kinematiği

Kinematik analiz için her ekleme ait homojen dönüşüm matrisleri elde edilir. Daha sonra bu matrisler sırasıyla çarpılarak robotun baş işlevcisi ile uç işlevcisi arasındaki konum ve oryantasyon tespit edilir [23]. Bu şekilde eklem açıları önceden belirlenmiş bir robotun uç noktasının konum ve oryantasyonunu bulma işlemine ileri yön kinematik analiz denir.

En sık kullanılan yöntem Denavit – Hartenberg(D-H) yöntemidir. Yöntemde öncelikle her eklem üzerine bir eksen takımı yerleştirilir. Burada çakışık olan eksen takımlarında hesaplamalarda kolaylık sağlaması açısından kütlesi ve ataleti olmayan sözde uzuvlar yerleştirilmiştir. Eksen takımları yerleştirilirken her uzuv için hareket doğrultusuna z-ekseni gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu eksen takımlarını yerleştirirken dikkat edilmesi gereken kurallar vardır. Öncelikle z-ekseni söz konusu eklemin hareket doğrultusuna yerleştirilir. Ve bu işlem robotun bütün eklemlerine uygulanır. Daha sonra ardışık iki eklem arasındaki uzuv ile aynı doğrultuda x-ekseni yerleştirilir. Son olarak da y-ekseni sağ el kuralı uygulanarak eksen takımlarına yerleştirilir.

Eksen takımlarının yerleştirilmesinden sonra ardışık iki eksen takımı arasında hareket doğrultusunun değişimine göre kinematik hesaplar yapılmıştır. Bu doğrultuda  ${}^{i-1}_iA$  homojen dönüşüm matrisleri hesaplanır. Bu yöntemde ileri kinematik hesaplamaları yapmak için 4 değişken kullanılır [25]. Tablo 2.2’de Denavit-Hartenberg parametre tablosu görülmektedir.

$d_i$ : Kesişen eklemler arasındaki eklem kaymasıdır.

$\theta_i$ : Ardışık iki eksen takımı arasındaki eklem açısıdır.

$a_i$ : Ardışık iki eksen takımı arasındaki mesafedir.

$\alpha_i$ : Ardışık iki eksen takımı arasındaki eksen açısıdır.

Tablo 2.2. D-H Parametre Tablosu

| Uzuv<br>Numarası(i) | $\alpha_i$ (radyan) | $A_i$ (m) | $d_i$ (m) | $\Theta_i$ (radyan) |
|---------------------|---------------------|-----------|-----------|---------------------|
| 1                   | $\alpha_1$          | $a_1$     | $d_1$     | $\theta_1^{(1)}$    |
| 2                   | $\alpha_2$          | $a_2$     | $d_2$     | $\theta_2^{(1)}$    |
| 3                   | $\alpha_3$          | $a_3$     | $d_3$     | $\theta_3^{(1)}$    |
| 4                   | $\alpha_4$          | $a_4$     | $d_4$     | $\theta_4^{(1)}$    |
| 5                   | $\alpha_5$          | $a_5$     | $d_5$     | $\theta_5^{(1)}$    |
| 6                   | $\alpha_6$          | $a_6$     | $d_6$     | $\theta_6^{(1)}$    |

Aşağıda verilen tablo 2.3 ve tablo 2.4’de sağ ve sol bacak için D-H notasyonu değişkenlerinin değerleri tablolar halinde verilmiştir [24]. Tablolar da verilen değerler homojen dönüşüm matrislerinde yerine yerleştirilip ileri kinematik analiz için kullanılmaktadır.

Tablo 2.3. Sağ bacak uzuvları için D-H parametre tablosu

| Uzuv<br>Numarası(i) | $\alpha_i$ (radyan) | $a_i$ (m) | $d_i$ (m) | $\Theta_i$ (radyan) |
|---------------------|---------------------|-----------|-----------|---------------------|
| 1                   | $-\pi/2$            | 0         | 0         | $\theta_1^{(1)}$    |
| 2                   | $-\pi/2$            | 0         | 0         | $\theta_2^{(1)}$    |
| 3                   | 0                   | 0.4       | 0         | $\theta_3^{(1)}$    |
| 4                   | 0                   | 0.4       | 0         | $\theta_4^{(1)}$    |
| 5                   | $-\pi/2$            | 0         | 0         | $\theta_5^{(1)}$    |
| 6                   | 0                   | 0.09      | 0         | $\theta_6^{(1)}$    |

Tablo 2.4. Sol bacak uzuvları için D-H parametre tablosu

| Uzuv<br>Numarası(i) | $\alpha_i$ (radyan) | $a_i$ (m) | $d_i$ (m) | $\Theta_i$ (radyan) |
|---------------------|---------------------|-----------|-----------|---------------------|
| 7                   | $-\pi/2$            | 0         | 0         | $\theta_1^{(2)}$    |
| 8                   | $-\pi/2$            | 0         | 0         | $\theta_2^{(2)}$    |
| 9                   | 0                   | 0.4       | 0         | $\theta_3^{(2)}$    |
| 10                  | 0                   | 0.4       | 0         | $\theta_4^{(2)}$    |
| 11                  | $-\pi/2$            | 0         | 0         | $\theta_5^{(2)}$    |
| 12                  | 0                   | 0.09      | 0         | $\theta_6^{(2)}$    |

Parametreler belirlendikten sonra homojen dönüşüm matrisi denklem (2.5) deki matris formuyla belirlenmektedir [24]. Bu matris sisteminde ilk üç satır ve sütun eklemin oryantasyonunu son satır ve sütun ise eklemin konum bilgisini vermektedir.

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Bu denklemden yararlanılarak 0. Eksen takımı ile 6. Eksen takımına kadar tüm serbestlik dereceleri için homojen dönüşüm matrisleri denklem (2.6) – (2.11) de verildiği gibi oluşturulmuştur [24].

$$A_1^{0(b)} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1^{(b)} & 0 & -\sin\theta_1^{(b)} & 0 \\ \sin\theta_1^{(b)} & 0 & \cos\theta_1^{(b)} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$A_2^{1(b)} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2^{(b)} & 0 & -\sin\theta_2^{(b)} & 0 \\ \sin\theta_2^{(b)} & 0 & \cos\theta_2^{(b)} & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$A_3^{2(b)} = \begin{bmatrix} \cos\theta_3^{(b)} & -\sin\theta_3^{(b)} & 0 & 0.4\cos\theta_3^{(b)} \\ \sin\theta_3^{(b)} & \cos\theta_3^{(b)} & 0 & 0.4\sin\theta_3^{(b)} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$A_4^{3(b)} = \begin{bmatrix} \cos\theta_4^{(b)} & -\sin\theta_4^{(b)} & 0 & 0.4\cos\theta_4^{(b)} \\ \sin\theta_4^{(b)} & \cos\theta_4^{(b)} & 0 & 0.4\sin\theta_4^{(b)} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$A_5^{4(b)} = \begin{bmatrix} \cos\theta_5^{(b)} & 0 & -\sin\theta_5^{(b)} & 0 \\ \sin\theta_5^{(b)} & 0 & \cos\theta_5^{(b)} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$A_6^{5(b)} = \begin{bmatrix} \cos\theta_6^{(b)} & -\sin\theta_6^{(b)} & 0 & 0.09\cos\theta_6^{(b)} \\ \sin\theta_6^{(b)} & \cos\theta_6^{(b)} & 0 & 0.09\sin\theta_6^{(b)} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Yukarıda hesaplanan homojen dönüşüm matrisleri kullanılarak bacak üzerindeki her eklemin gövde üzerindeki 0. Eksen takımına göre konum ve oryantasyonu denklem (2.12) – (2.16) kullanılarak hesaplanır.

$$A_2^{0(b)} = A_1^{0(b)} A_2^{1(b)} \quad (2.12)$$

$$A_3^{0(b)} = A_1^{0(b)} A_2^{1(b)} A_3^{2(b)} \quad (2.13)$$

$$A_4^{0(b)} = A_1^{0(b)} A_2^{1(b)} A_3^{2(b)} A_4^{3(b)} \quad (2.14)$$

$$A_5^{0(b)} = A_1^{0(b)} A_2^{1(b)} A_3^{2(b)} A_4^{3(b)} A_5^{4(b)} \quad (2.15)$$

$$A_6^{0(b)} = A_1^{0(b)} A_2^{1(b)} A_3^{2(b)} A_4^{3(b)} A_5^{4(b)} A_6^{5(b)} \quad (2.16)$$

Bu çalışmada tasarlanan robot üzerinde  $O_g$  ve  $O_0$  eksen takımları gövde uzvunun üzerindedir ve bu nedenle birbirine göre hareketsizdir. Bu şekilde oluşturulan iki eksen takımı arasındaki dönüşüm matrisi (2.17) ve (2.18) de verilmiştir.

$$A_0^{g(1)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.3 \\ -1 & 0 & 0 & -0.1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$A_0^{g(2)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.3 \\ -1 & 0 & 0 & 0.1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

### 2.2.2. Ters Yön Kinematığı

Kartezyen koordinatlarda verilen bir robotun uç işleyicisinin konumuna göre robottaki eklemlerin açılarının hesaplamasına ters yön kinematığı denir [23]. Ters yön kinematığı doğrusal olmayan karmaşık denklemler içerdiğinden hesaplanması oldukça güçtür. Sistemlerin eklem türleri de kinematik analizin zorluk derecesini etkilemektedir. Bir sistemdeki döner eklem sayısının çok olması o sistemin çözümünü zorlaştırmaktadır. Çünkü döner eklem sahip olan robotların uç işleyicisinin belirlenen noktaya gitmesi için birden fazla yol vardır.

İki ayaklı robot modelinin ters kinematik probleminin çözümünde geometrik yöntemin kullanılması uygun görülmüştür. Öncelikle kapalı formda eklem açılarının ayak ve gövde yörüngelerine olan bağlantısı elde edilmiştir [24]. Kapalı formda çözüm yapıldığından dolayı gerçek zamanda çok hızlı bir şekilde çözüme ulaşmak mümkündür.

Yapılan tasarımda kinematik analizin kolay olması açısından kalça üzerindeki ilk üç eklem ile ayak bileğindeki iki eklem çakışık şekilde tasarlanmıştır.

Geometrik yaklaşım kullanılırken vektörlerin çıkarılması işleminden yararlanılmıştır. Bunun için 3 farklı vektör tanımlanmaktadır. Birinci vektör yer ile kalça eklemi arasında  $\mathbf{x}_k^{(b)}$ , ikinci vektör yer ile ayak bileği arasına yerleştirilmiş  $\mathbf{x}_b^{(b)}$  dir. Bu vektörleri birbirinden çıkararak kalça ile ayak bileği arasındaki  $\mathbf{x}_b^{k(b)}$  vektörü elde edilmiştir.

Denklem (2.19)'da kalçada bulunan 0. Eksen takımı ile yerde ki eksen takımı arasındaki dönüşüm matrisi verilmiştir [24].

$$A_0^{y(b)} = A_g^y A_0^{g(b)} \quad (2.19)$$

Burada  $A_0^{y(b)}$  4. satır ve sütunundaki değerler ayak bileği ile kalça arasındaki vektörü ifade etmektedir.

$$x_k^{(b)} = A_0^{y(b)}(1:4,4) \quad (2.20)$$

Ayak bileğinin uç nokta eksen takımına göre konumu  $[-0.09 \ 0 \ 0 \ 1]^T$  vektörü ile ifade edilebilir.

$$x_b^{(b)} = A_6^{y(b)} \begin{bmatrix} -0.09 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Denklem (2.22)'de  $x_b^{k(b)}$  ifadesi verilmiştir.

$$x_b^{k(b)} = x_k^{(b)} - x_b^{(b)} \quad (2.22)$$

Yukarıda elde edilen iki vektörden yararlanılarak yapılan çıkarma işlemi sonucunda kalça ile ayak bileği eklemi arasındaki vektör elde edilmiştir.

Kalçanın konumunu, robotun uç noktasındaki 6. Eksen takımına göre, ifade eden vektör  $uvw^{(b)}$  denklem (2.23) ile ifade edilmiştir.

$$uvw^{(b)} = (R_6^{y(b)})^{-1} x_b^{k(b)} \quad (2.23)$$

Yukarıda elde edilen ifadelerden yararlanılarak her bir eklem açısı (2.24) – (2.35) denklemleri ile elde edilmiştir.

$$\theta_6^{(b)} = \arctan(-uvw^{(b)}(2)/uvw^{(b)}(1)) \quad (2.24)$$

$$b^{(b)} = (uvw^{(b)}(1)^2 + uvw^{(b)}(2)^2 + uvw^{(b)}(3)^2 - 0.4^2 - 0.4^2)/(2 * 0.4 * 0.4) \quad (2.25)$$

$$\theta_4^{(b)} = \arctan2(-\sqrt{1 - b^{(b)^2}}, b^{(b)}) \quad (2.26)$$

$$a^{(b)} = (-0.4 \sin \theta_4^{(b)}) / \sqrt{uvw^{(b)}(1)^2 + uvw^{(b)}(2)^2 + uvw^{(b)}(3)^2} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned}\theta_5^{(b)} = \pi - [arctan2(a^{(b)}, -\sqrt{1 - a^{(b)2}}) \\ - arctan2(uvw^{(b)}(3), \sqrt{uvw^{(b)}(1)^2 + uvw^{(b)}(2)^2})]\end{aligned}\quad (2.28)$$

$$R_6^{3(b)} = R_4^{3(b)} R_5^{4(b)} R_6^{5(b)} \quad (2.29)$$

$$r^{(b)} = R_6^{3(b)} (R_6^{y(b)})^{-1} R_g^y R_0^{g(b)} \quad (2.30)$$

$$\theta_2^{(b)} = arctan2(\sqrt{1 - r^{(b)}(3,3)^2}, r^{(b)}(3,3)) - \pi \quad (2.31)$$

$$c^{(b)} = r^{(b)}(2,3)/\sin\theta_2^{(b)} \quad (2.32)$$

$$\theta_3^{(b)} = arctan2(c^{(b)}, \sqrt{1 - c^{(b)2}}) \quad (2.33)$$

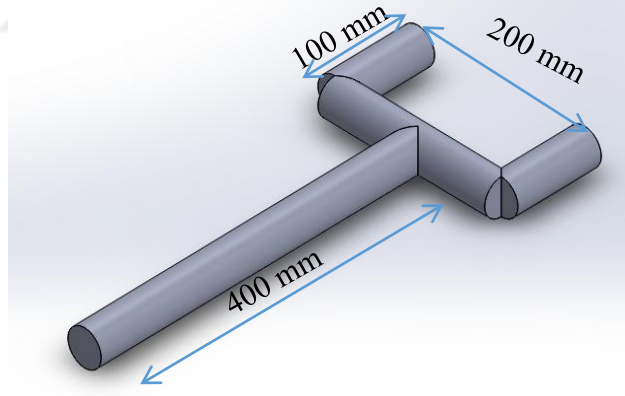
$$d^{(b)} = -r(3,2)/\sin\theta_1^{(b)} \quad (2.34)$$

$$\theta_1^{(b)} = arctan2(d^{(b)}, \sqrt{1 - d^{(b)2}}) \quad (2.35)$$

### 3. İKİ AYAKLI YÜRÜYEN ROBOTUN TASARIM ÖZELLİKLERİ VE ROBOT SÜRÜCÜ SİSTEMLERİ

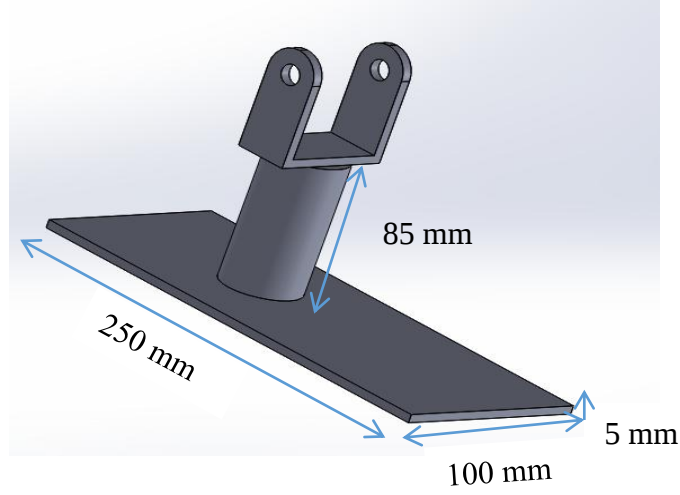
#### 3.1 İki Ayaklı Yürüyen Robotun Tasarım Özellikleri

İnsansı robot çalışmalarında serbestlik dereceleri, uzuv boyları gibi tasarım kriterleri oldukça önemlidir. Bu kriterler robotun çalışma uzayına ve gerçekleştirmesi istenilen göreve göre belirlenmelidir. Bu nedenle insanlar ile aynı çalışma uzayında çalışacak ve aynı görevleri üstlenecek robotların insan fiziksel yapısına ve hareket kabiliyetine yakın bir yapıda olması beklenir. Bu çalışmada ortalama boyutlardaki bir insanın vücut ölçüleri kabul edilmiştir. Bu tez çalışmasındaki tasarımı yapılan iki ayaklı yürüyen robotun tasarımı bir gövde ve her bacak için üst bacak, alt bacak ve ayaktan oluşmaktadır. Yani bu sistem için gövde tek parça olarak düşünülüp toplam 7 tane uzuv vardır. Bu uzuvlar ve uzunlukları bölüm içerisindeki şekiller üzerinde de verilmiştir. Şekil 3.1’de görülen gövde uzvunun omuz genişliği 200 mm olarak alınmıştır.



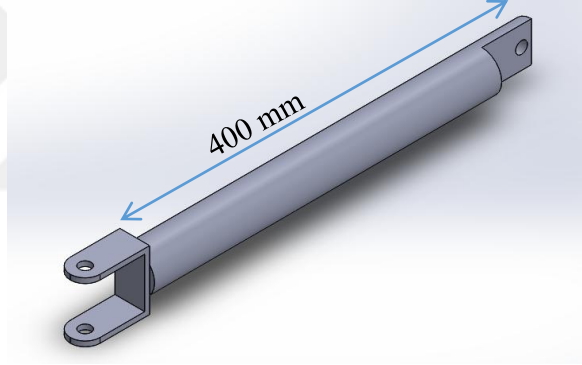
Şekil 3.1. Gövde uzvu

Şekil 3.2’de verilen, iki ayaklı yürüyen robotun ayağının yüksekliği 5 mm, ayağın uzunluğu 250 mm ve genişliği 100 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.2. Ayak uzvu

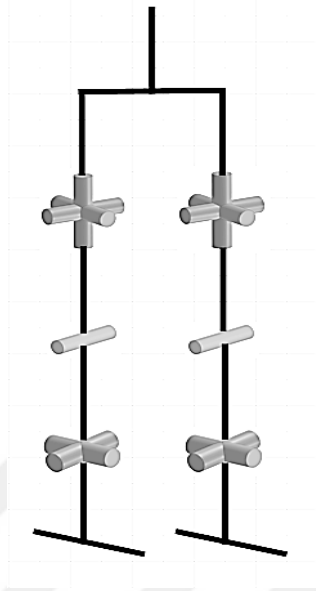
Şekil 3.3’de görüldüğü gibi tasarımda kullanılan üst bacak ve alt bacak uzunlukları 400 mm olarak alınmıştır.



Şekil 3.3. Üst bacak ve alt bacak uzuvları

İnsan iskelet sistemi çok fazla serbestlik derecesine sahiptir. Robotlardaki serbestlik derecelerinin sayısı arttıkça işlem yükü de aynı oranda artmaktadır. Bu da uygulamada pek çok sorun yaratmaktadır. Günümüz teknolojisi ile insan yapısını birebir taklit etmek mümkün değildir. Bu nedenle bugüne kadar yapılan çalışmalarda da daha az serbestlik derecesi ile insan hareketleri nasıl daha iyi taklit edilebileceği konusunda çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında, temel dengeli yürüme hareketlerini sağlamak amacıyla, iki ayaklı yürüyen robotun her bir bacağına altı tane olmak üzere toplam 12 serbestlik derecesine sahip olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Serbestlik dereceleri insan bacağına temel hareketleri yapmayı sağlayan bölgelere yerleştirilmiştir. Bu serbestlik derecelerinin üç tanesi kalça ekleminde, bir tanesi diz ekleminde ve iki tanesi bilek

eklemindedir. Kinematik hesaplamalarda kolaylık sağlaması açısından kalça ve diz eklemlerinde bulunan serbestlik dereceleri çakışmıştır. Şekil 3.4’de serbestlik derecelerinin yönleri ve konumları görülmektedir [26].



Şekil 3.4. Serbestlik derecelerinin sayısı ve konumları

İki ayaklı robotun eklemlerindeki serbestlik derecelerinin her biri bir yönde hareketi sağlamak için yerleştirilmiştir. Eklemlerdeki hareketi başlatmak ve istenilen yörüngede hareketi gerçekleştirebilmek için her bir ekleme tahrik elemanları yerleştirilmiştir.

### 3.2. Robot Sürücü Sistemleri

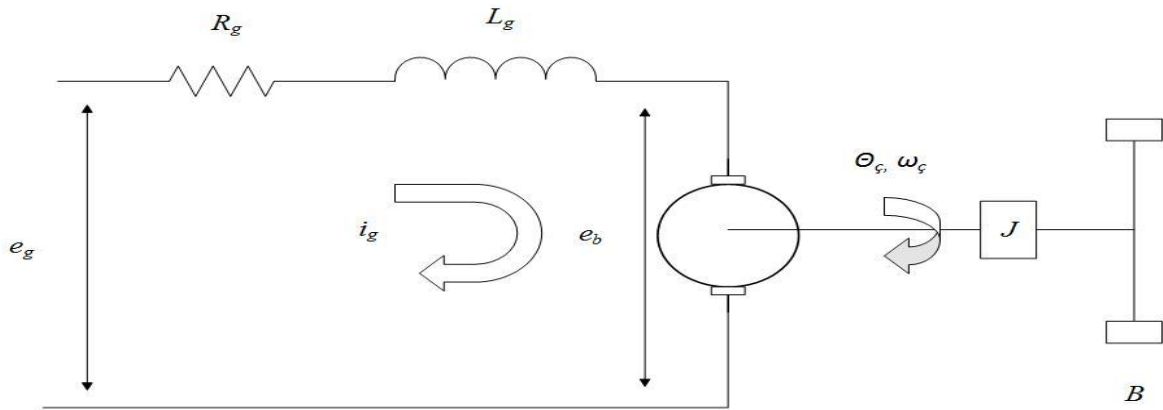
Robot sürücü sistemleri olarak yaygın şekilde elektrik motorları kullanılmaktadır. Elektrik motorları elektrik enerjisini kullanarak mekanik enerji üreten makinalardır. İki tip elektrik motoru vardır. Bunlar alternatif akım ve doğru akım motorlardır. Her iki motor türünün de avantajları ve dezavantajları vardır. Alternatif akım motorlarda yük miktarındaki değişim motorun devir sayısında büyük oranda bir değişime sebep olmamaktadır ve daha az bakıma ihtiyat duymaktadır [27]. Doğru akım motorları hassas konum denetimi gerektiren uygulamalarda daha çok tercih edilmektedir. Aynı zamanda yüksek kalkış torkuna ve hız regülasyonuna sahiptirler [28]. Armatüre uygulanan gerilim veya uyarma akımı değiştirilerek kolaylıkla hız ayarı yapılabilir. Bu tez

çalışmasında etkili ve hassas konum kontrolü ve yüksek kalkış torku özelliğinin robot kontrolüne uygunluğu dolayısı ile doğru akım motoru kullanılması uygun görülmüştür.

### 3.2.1. Doğru Akım Motorların Yapısı

Doğru akım motorların yapısı rotor, stator, kollektör, fırça, yataklar ve kapaklardan oluşmaktadır [29]. Dönen bölüm rotor, sabit olan bölüm ise stator olarak adlandırılmaktadır. Kollektörün ise sistemdeki görevi rotora gerilim sağlamaktır.

Doğru akım motorların çalışma prensibi elektromanyetik yasalara dayanmaktadır. İletken bir tele akım uygulandığında tel üzerinde bir manyetik alan meydana gelmektedir. Bu tel başka bir manyetik alana girdiğinde zıt kutupların birbirini çekmesi ve aynı kutupların birbirini itmesi ile kutuplar arasında oluşan manyetik kuvvet manyetik akı olarak adlandırılmaktadır. Doğru akım motorlarında stator ve rotor arasında meydana gelen manyetik akı ile rotorun dönmesi sağlanmaktadır. Şekil 3.5’de bir doğru akım motor modeli verilmiştir [22].



Şekil 3.5. Doğru akım motoru

### 3.2.2. Doğru Akım Motorun Matematiksel Modellenmesi

Bir sistemin matematiksel ifadeler kullanılarak tanımlanmasına matematiksel modelleme denmektedir. Matematiksel modelleme sistem dinamiklerinin belirlenmesinde, dış etkiler karşısında sistem davranışlarının neler olacağının tahmin edilmesinde oldukça faydalıdır. Bu çalışmada kullanılacak doğru akım motorunun matematiksel modellenmesi sonraki kısımda verilmiştir [30].

Doğru akım motorunun çıkışından elde edilecek olan tork değeri armatür akımı ile manyetik alanın değişimi ile ilişkilidir. Doğru akım motorlar sabit bir manyetik alana sahip olduklarından çıkıştaki tork değeri armatür akımı ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Doğru akım motorunun dinamik modeli (3.1) – (3.4) denklemleri ile ifade edilir [31].

$$T = K_m i \quad (3.1)$$

Zıt emk değeri sistemin açısal hızıyla orantılıdır.

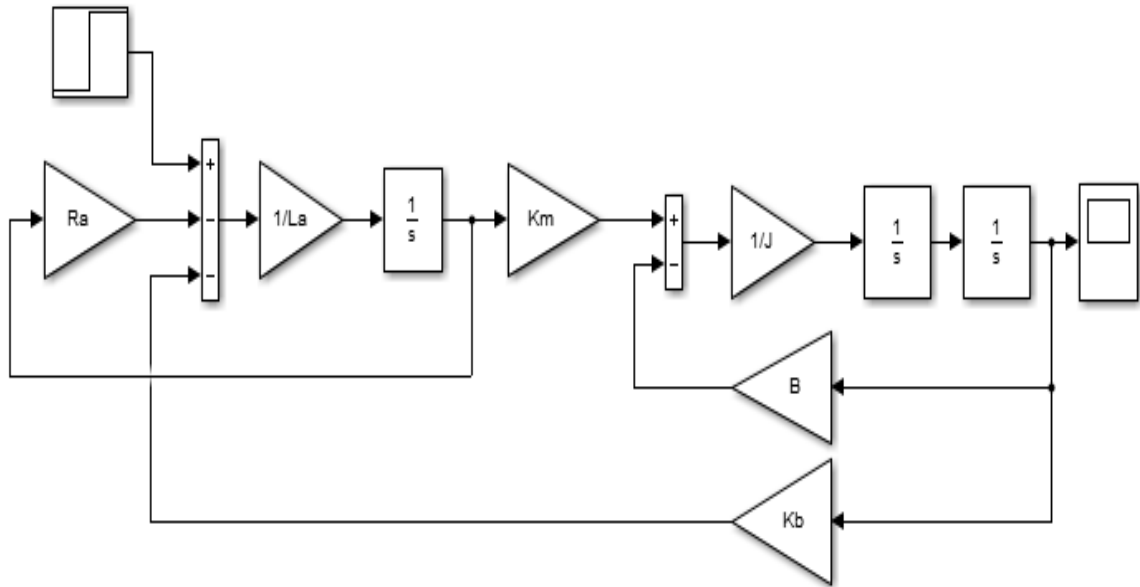
$$e = K_b \dot{\theta} \quad (3.2)$$

Dönen milin mekanik denklemi ve Kirchhoff 'un gerilim kanunundan yararlanılarak;

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = K_m i \quad (3.3)$$

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V - K_b \dot{\theta} \quad (3.4)$$

elde edilir. Bir robotik sistemin bilgisayar ortamında simülasyonunu gerçekleştirebilmek için sistemin matematiksel modeline ihtiyaç vardır. Yukarıda verilen matematiksel ifadelerden yararlanılarak MATLAB/Simulink programında doğru akım motorunun blok şeması şekil 3.6'de görüldüğü gibi oluşturulmuştur.



Şekil 3.6. Doğru akım motorun MATLAB/Simulink ortamında modellenmesi

Bu tez çalışmasında, iki kalça eklemi ve iki diz eklemi için, kullanılan servo doğru akım motorunun parametreleri ortak olarak belirlenmiş ve bu değerler aşağıdaki tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Doğru akım motorun parametreleri

| Parametreler                         | Değerler          |
|--------------------------------------|-------------------|
| Elektriksel direnç( $R_a$ )          | $1(ohm)$          |
| Elektriksel indüktans( $L_a$ )       | $0.5(H)$          |
| Motor moment sabiti( $K_m$ )         | $0.01(Nm/Amp)$    |
| Rotorun atalet momenti( $J$ )        | $0.01(kg.m^2)$    |
| Elektromotor kuvveti sabiti( $K_b$ ) | $0.01(V/rad/sec)$ |
| Motor viskoz sürtünme sabiti( $B$ )  | $0.1(N.m.s)$      |

Matematiksel modele dayanarak tasarlanan doğru akım motor modeli iki ayaklı yürüyen robot sisteminde tahrik elemanı olarak kullanılmıştır.

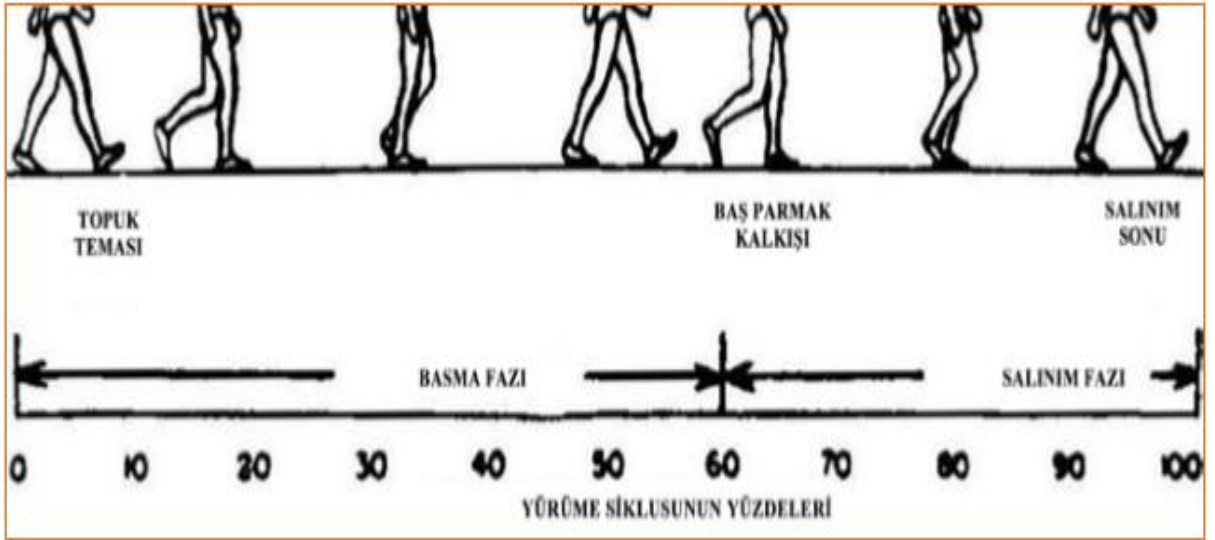
Doğru akım motorları arasında, yüksek hızlarda bile kararlı çalışabilen ve hassas hız ve konum kontrolüne olanak sağlayan servo motorlar, endüstriyel alanda basit sistemlerden birkaç motorun birlikte çalışması gerektiği karmaşık sistemlere kadar pek çok alanda tercih edilmektedirler. Servo motorlar bir sürücü sistemi ile birlikte kullanılmaktadırlar. Servo motorlar bağlı olduğu sistemin performansını etkileyebilecek hataları geri bildirim sinyalleri yardımı ile belirleyip sistem çıkışını kısa sürede düzenlemektedirler. Sürekli bir hareketten ziyade belirli açı aralıklarında çalışması istenilen açısal hareketli sistemlerde tercih edilmektedirler.

Bu tez çalışmasında eklemlerde hareketi sağlamak için her bir ekleme bir tane olmak üzere toplam 4 tane servo motor kullanılmıştır.

## 4. YÜRÜME VE YÜRÜME EĞRİSİ TASARIMI

### 4.1. Yürüme

İki ayaklı yürüyen robotun tasarımını ve kontrolünü yapabilmek için öncelikle insanın yürüme hareketini nasıl gerçekleştirdiğinin iyi bilinmesi gerekmektedir. İnsanda dengeli yürümenin gerçekleşmesi için eklemler, kaslar ve bağlar birbirleri ile uyumlu bir şekilde çalışırlar. Yürümenin en temel ifadesi vücudun ağırlık merkezini bir konumdan başka bir konuma taşımak için yapılan hareketlerin toplamıdır [32]. Bu hareketler belirli bir periyotta tekrarlanan hareketlerdir. Adım, basan ayağın yerle temasını kesip salınan ayağın yerle temasa geçtiği andır [33]. Bir yürüme periyodunun gerçekleşmesi için ise basan ayağın yerle temasını kesip yeniden yere basması gerekir. Yani bir yürüme periyodu iki adımdan oluşmaktadır. Şekil 4.1 de insan yürüme siklusu görülmektedir [34]. Şekilde de görüldüğü gibi bir adım periyodunun % 60'ını basma fazı, % 40'ını salınım fazı oluşturmaktadır. Basma fazı topuğun yerle teması ile başlayıp ayak başparmağının yerle teması kestiği ana kadar devam etmektedir. Salınım fazı ise ayak başparmağının yerle teması kesip topuğun yerle temas ettiği ana kadar geçen süreyi ifade etmektedir.



Şekil 4.1. Yürüme siklusu

Yürüme esnasındaki ayakların konumuna göre yürüme iki fazda gerçekleşir. Her iki ayakta zemin üzerinde ise çift destek fazı (ÇDF), ayaklardan biri zemin üzerindeyken diğeri salınıyor ise tek destek fazı (TDF) dır [34].

İnsanda temel yürüme hareketini taklit edebilmek ve çalışma uzayında insan hareketlerine en yakın hareketi her bir bacak için 6 serbestlik derecesi ile verebiliriz. Bu nedenle bu tasarımda da her bir bacak için altı olmak üzere toplam 12 serbestlik derecesi kullanılmıştır.

## **4.2. Yürüme Eğrisinin Tasarımı**

Yürüme eğrisi tasarımı birçok araştırmacının üzerinde çalıştığı araştırma konulardan biri olmuştur [35-37]. Bir robot manipülatöründen yapması beklenen, çalışma uzayı içerisinde uç işlevcinin gitmesi gereken noktaya en hızlı şekilde engellere çarpmadan ve mümkün olan en az titreşim ile varmasıdır. Uç işlevcinin istenilen konuma gitmesi için birden fazla seçenek vardır. Bu seçeneklerden en yakın ve en az engel olanını seçip bunu uygun yöntemler ile robota komut olarak verilmesine yürüme eğrisi planlama denir [23]. Belirlenen en iyi yörünge üzerine çok sayıda nokta yerleştirilerek robotun bu noktalardan geçip yörüngeyi takip etmesi istenir.

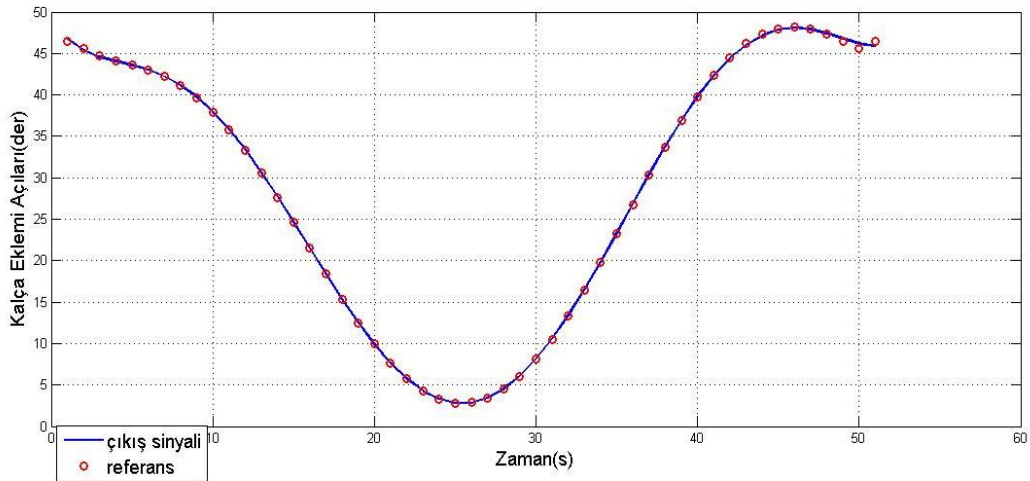
Belirlenen yürüme eğrisini takip etmesinde robotun sahip olduğu serbestlik derecesi oldukça önemlidir. Serbestlik derecesi ne kadar fazla ise çözüm için gereken işlemlerde o kadar fazla olacaktır.

### **4.2.1. Eklem Uzayında Yürüme Eğrisi Tasarımı**

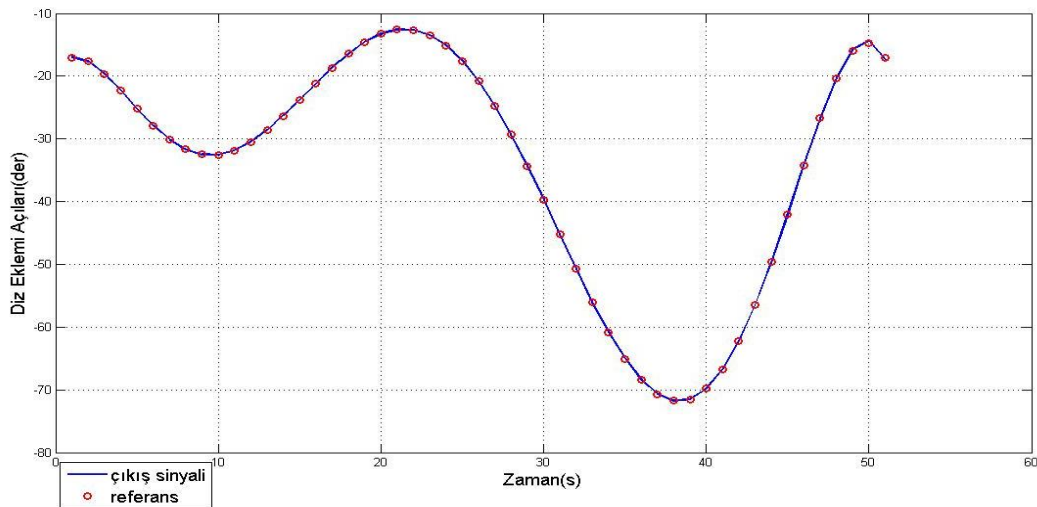
Yürüme eğrisi tasarımı robotik alanında yapılan tüm çalışmalar için oldukça önemlidir. İki çeşit yürüme eğrisi tasarımı yöntemi vardır. Bunlardan biri eklem uzayında yürüme eğrisi tasarımı ve kartezyen uzayında yürüme eğrisi tasarımıdır. Eklem uzayında yürüme eğrisi tasarımı yapılırken en az üçüncü dereceden polinomlar kullanılır. Uç işlevcinin istenilen süre içerisinde belirlenen iki nokta arasında hareket etmesi için ters kinematik analiz ile elde edilen verilerden yararlanılır. Bu veriler yardımı ile sistemin serbestlik derecesine göre polinomlar elde edilerek robotun izlemesi istenilen yörüngeleri elde edilir [38]. Bir başka yöntem ise kartezyen uzayında yürüme eğrisi tasarımıdır. Bu yöntemde robotun sahip olduğu tüm eklemler doğrusal bir yörüngede hareket etse bile manipülatörün

uç noktası parabolik bir yörünge izleyecektir. Bu nedenle hareketin başlangıç ve bitişinde sürekli olmayan hız problemleri meydana gelir. Bunu engellemek için doğrusal yörünge tam orta noktasından simetrik olacak şekilde yörünge başına ve sonuna eşit zamanda gerçekleşen parabolik kısımlar eklenerek konum ve hızın sürekliliği sağlanır [23].

Bu tez çalışmasında tek bir bacak için kalçada bulunan  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_5$  ve  $\theta_6$  açıları sabit olarak kabul edilmiştir. İki ayaklı yürüyen robotun tek bacağının,  $\theta_3$  ve  $\theta_4$  eklem açıları için ters kinematik analizden elde edilen veriler doğrultusunda, şekil 4.2 ve şekil 4.3'deki düz çizgi ile görülen yürüme eğrisini takip etmesi beklenmektedir. Bu eğri ters kinematik analizden alınan 51 adet yürüme eğrisi açısı değerleri kullanılarak 6. dereceden polinom polinom-eğri uydurma yöntemi ile elde edilmiştir.



Şekil 4.2.  $\theta_3$  açısı için belirlenen yörünge ve yörünge polinomundan elde edilen grafik



Şekil 4.3.  $\theta_4$  açısı için belirlenen yörünge ve yörünge polinomundan elde edilen grafik

Şekil 4.2 ve şekil 4.3 deki noktalar eklemelere uygulanması planlanan açıları, eğri ise bu açı değerleri kullanılarak en küçük kareler eğri uydurma yöntemi ile elde edilen 6. Derece polinomdan elde edilen eğriyi ifade etmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi uydurulan eğri denkleminde elde edilecek açı değerlerinin eklemler için kullanılmasının uygun olacağı söylenebilir.

$\theta_3$  açısı için uydurulan polinom denklemi;

$$(1.0e + 04) * (0.5631t^6 - 1.6991t^5 + 1.8022t^4 - 0.7681t^3 + 0.1107t^2 - 0.0088t + 0.0047) \quad (4.1)$$

$\theta_4$  açısı için uydurulan polinom denklemi;

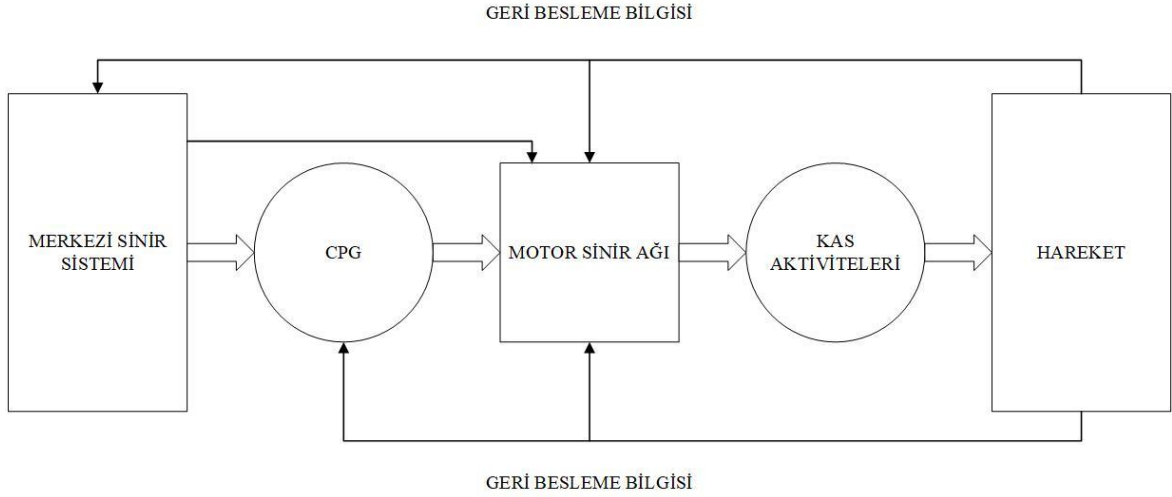
$$(1.0e + 04) * (-1.7034t^6 + 4.7140t^5 - 4.6113t^4 + 1.8668t^3 - 0.2674t^2 + 0.0013 - 0.0017) \quad (4.2)$$

olarak elde edilmiştir.

#### 4.2.2. Merkezi Örüntü Üretici İle Yürüme Eğrisi Tasarımı

İki ayaklı yürüyen robotta da olduğu gibi günümüze kadar yapılan robotik çalışmaların çoğunda, doğada var olan canlıların gerek fizyolojik olarak gerekse kontrol mekanizmalarından esinlenildiği görülmektedir. İnsan ve hayvanların yürüme hareketleri oldukça düzgün ve uygulanabilir. İnsanlar ve memeli hayvanların yapısı incelendiğinde canlının gerçekleştirdiği temel hareketlerin, omurilikten gelen sinirsel sinyallerin sonucunda üretildiği görülmektedir. Örneğin insanlar yürürken adım yüksekliğinin ne olması gerektiğini ya da adımını ne kadar ileri atması gerektiğini düşünmesine gerek yoktur. Omurilikte bu sinyalleri üreten yapıya merkezi örüntü üretici (CPG) denilmektedir. CPG'ler canlıların nefes alıp vermek gibi istemsiz hareketlerini gerçekleştirebilmek için geri besleme sinyaline ihtiyaç duymadan sinirsel sinyal üreten yapılardır [39].

Canlılarda hareketin oluşması, merkezi sinir sistemi ve iskelet kas sisteminin birlikte çalışmasının bir sonucudur. Beyin hareketi başlatmak için emir gönderir ve daha sonra döngü başlamaktadır. CPG ritmik sinyaller üretmektedir ve bu sinyaller nöronlar tarafından iskelet kas sistemine iletilmektedir. Aşağıda omurgalı hareketinin basit bir kontrol sistemi görülmektedir [40].



Şekil 4.4. Omurgalılarda hareketin kontrolü

Temel bir CPG yapısı en az iki sinir hücresinden oluşmaktadır. Bu sinir hücreleri birbirlerine sineps adı verilen bağlantılar ile bağlıdırlar. Bu bağlantılar yardımıyla sinir hücreleri birbirini engelleyici sinyaller göndererek sıralı sinyaller üretirler. İki sinir hücresinden oluşan bu yapı yarım merkezli osilatör olarak adlandırılmaktadır. Literatürde çalışmaların, sinirsel osilatörler ve doğrusal olmayan osilatörler olarak gruplandığı iki tür yapı, yürüme eğrisi tasarımında kullanılabilmektedir. Sinirsel osilatörler gerçek sinir hücrelerinin modellenmesi ile oluşturulmuştur. Doğrusal olmayan osilatörler ise sinirsel osilatörleri en iyi taklit edebilen osilatörlerdir [40]. Bu tez çalışmasında yürüme eğrisini planlamak Hopf osilatör kullanılmıştır.

#### 4.2.2.1 Hopf Osilatör

Hopf osilatörler doğrusal olmayan osilatörlerdir. Bu osilatörler, harici bir işleme gerek duymadan periyodik girdi sinyalinin frekansını öğrenebilecek özelliklere sahiptirler. Bir Hopf osilatörün dinamik denklemleri, denklem (4.3) – (4.10) da verilmiştir [41].

$$\dot{x} = \gamma(\mu - r_i^2)x_i - w_i y_i + \epsilon F(t) + \tau \sin(\theta_i - \phi_i) \quad (4.3)$$

$$\dot{y} = \gamma(\mu - r_i^2)y_i - w_i x_i \quad (4.4)$$

$$\dot{w}_i = -\epsilon F(t) \frac{y_i}{r_i} \quad (4.5)$$

$$\dot{\alpha}_i = \eta x_i F(t) \quad (4.6)$$

$$\dot{\phi}_i = \sin\left(\frac{w_i}{w_0}\theta_0 - \theta_i - \phi_i\right) \quad (4.7)$$

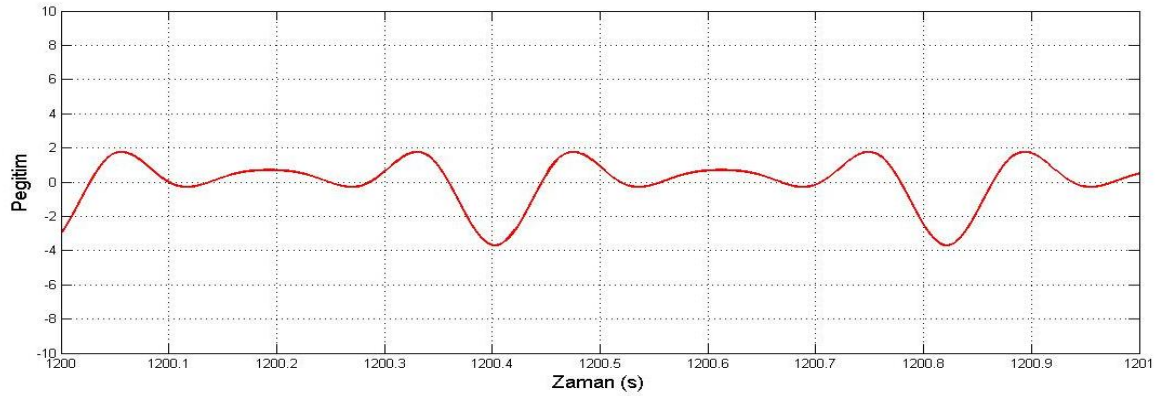
$$\theta_i = \text{sgn}(x_i)\cos^{-1}\left(-\frac{y_i}{r_i}\right) \quad (4.8)$$

$$F(t) = P_{egitim}(t) - Q_{ogrenme}(t) \quad (4.9)$$

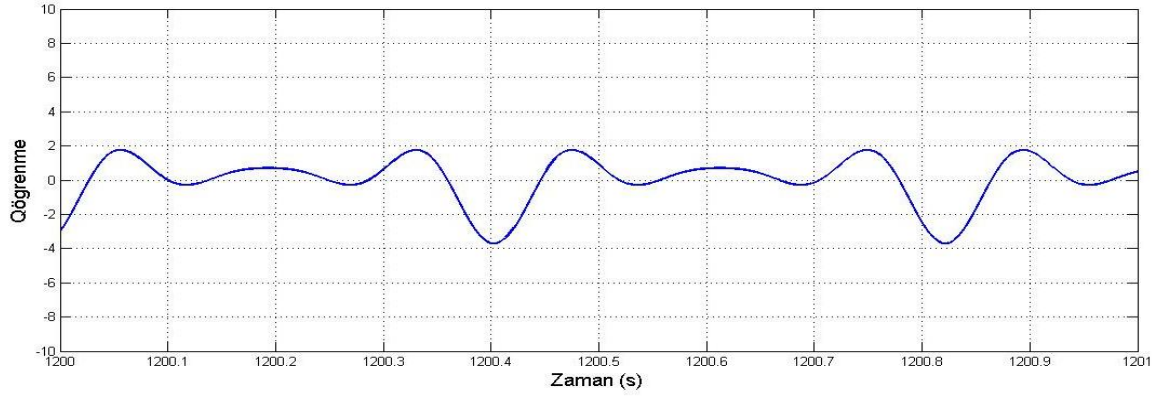
$$Q_{ogrenme}(t) = \sum_{i=0}^N \alpha_i x_i \quad (4.10)$$

Bu denklemlerde  $\tau$  ve  $\epsilon$  bağlantı sabitleri ve  $\mu$  öğrenme sabitidir.  $Q_{ogrenme}$  CPG çıkışı olup her bir osilatör çıkışının ağırlıklı toplamıdır.  $F(t)$ , osilatörün öğrendiği eğitim sinyali  $P_{egitim}$  ile osilatör çıkışı arasındaki fark olarak, negatif geri beslemeyi ifade etmektedir. Denklemlerdeki  $a_i$  sinyalin genliğini,  $w_i$  ise frekansını ifade etmektedir.  $\phi_i$  i. osilatörün ilk osilatörlerle arasındaki faz farkı görülmektedir.

Hopf CPG osilatörü, (4.3) – (4.10) denklemleri kullanılarak verilen  $P_{egitim}$  eğitim sinyalinin genlik, faz ve frekansını öğrenmesini gerçekleştirebilmektedir. Örneğin  $P_{egitim} = 0.8\sin(15t) + \cos(30t) - 1.4\sin(45t) - 0.5\cos(60t)$  sinyali Hopf CPG osilatörü için bir eğitim sinyali olarak uygulandığında, elde edilen  $Q_{ogrenme}$  sinyali, hata değerleri, eğitim sinyalinin açısal hızları, genlikleri ve faz farkları aşağıdaki şekillerde görülmektedir [41].

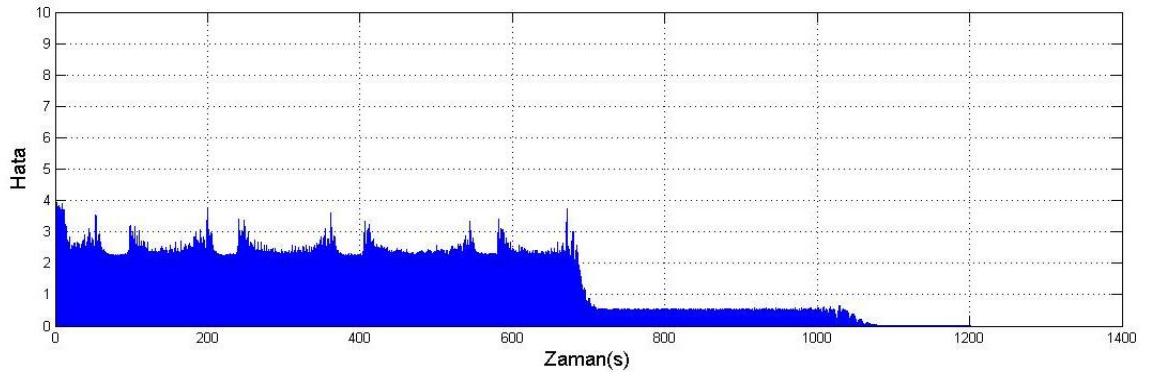


Şekil 4.5. Örnek sinyal için  $P_{egitim}$  sinyali



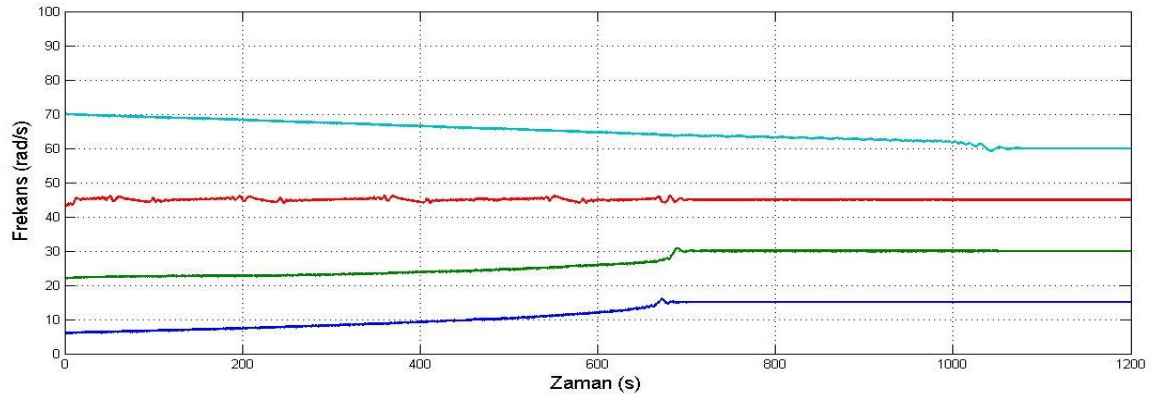
Şekil 4.6. Örnek sinyal için çıkış  $Q_{\text{öğrenme}}$  sinyali

Şekil 4.5 ve 4.6 da görüldüğü gibi,  $P_{\text{eğitim}}$  eğitim sinyali için Hopf CPG osilatörü öğrenme performansı oldukça iyi bir düzeyde gerçekleşmiştir. Yapılan 1200s eğitim süreci sonunda çıkış sinyalinin referans sinyali düzgün şekilde takip ettiği görülmektedir.



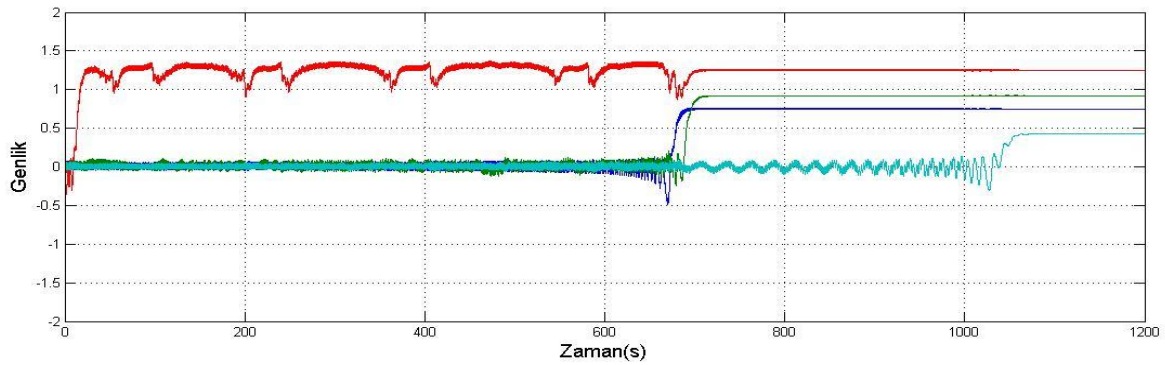
Şekil 4.7. Örnek sinyal için eğitim sinyali ile çıkış sinyali arasındaki hata

Şekil 4.7 de eğitim sinyali ile çıkış sinyali arasındaki hatanın zamana göre değişimi görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi hata sinyali 1200s sonunda  $10^{-2}$  nin altındaki değerlere ulaşmıştır.



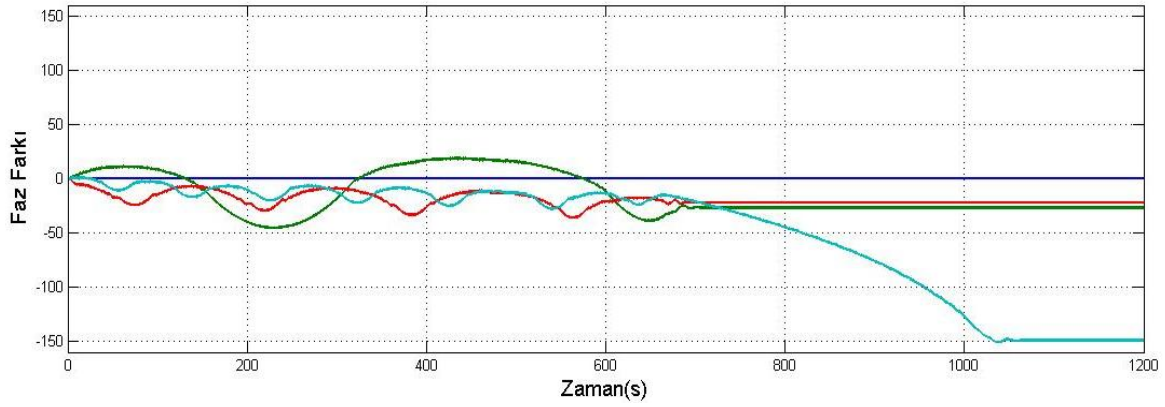
Şekil 4.8. Hopf CPG osilatörün örnek sinyal frekanslarını öğrenme performansı

Şekil 4.8 de örnek eğitim sinyali Hopf CPG osilatörünün frekans öğrenme performansı verilmiştir. Şekil 4.8 incelendiğinde, eğitim sinyalinde bulunan 15, 30, 45 ve 60 frekans bileşenleri değerlerine 1200s eğitim süresi sonucunda kararlı bir şekilde ve oldukça iyi yakınsadığı görülmektedir.



Şekil 4.9. Hopf CPG osilatörün örnek sinyal genliklerini öğrenme performansı

Şekil 4.9 da örnek eğitim sinyali için Hopf CPG osilatörü kullanılarak elde edilen genlik öğrenme performansının grafiği verilmiştir. Şekil 4.9 da görüldüğü gibi, eğitim sinyalinde bulunan 0.8, 1, 1.4 ve 0.5 genlik bileşenleri değerlerine eğitim süresi sonucunda yaklaşık olarak 1050s den sonra tüm bileşenler kararlılığa yakınsamaktadır. Bu sinyal için elde edilen sonuçların kabul edilebilir olduğu görülmektedir.

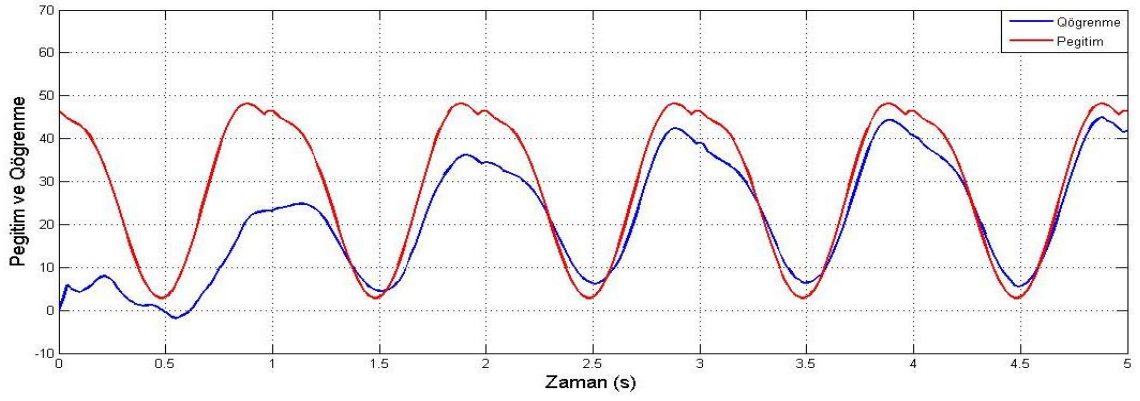


Şekil 4.10. Hopf CPG osilatörün örnek sinyal faz farklarını öğrenme performansı

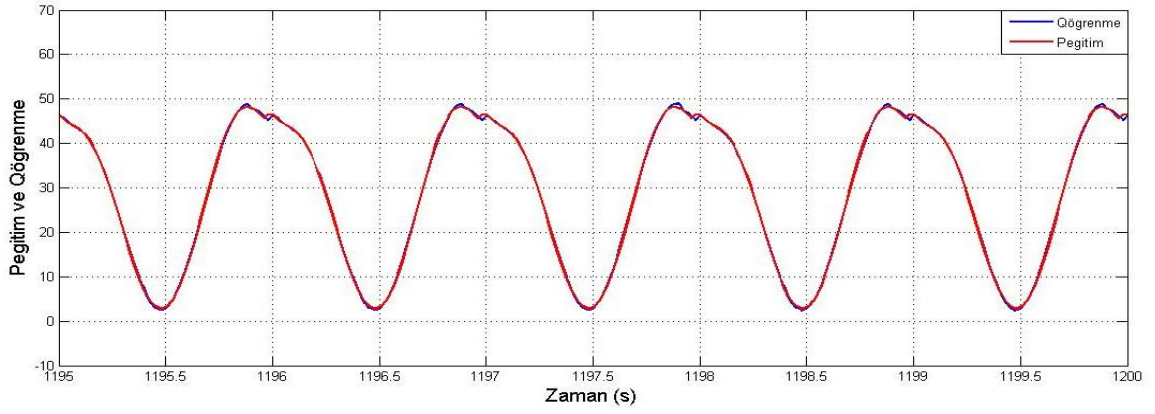
Şekil 4.10 da ise örnek eğitim sinyali bileşenleri için elde edilen faz farkları görülmektedir. Faz farklarının toplam eğitim süreci sonunda sabit değerlere ulaştığı ve kararlılığın sağlandığı gözlemlenmiştir. Örnek  $P_{\text{eğitim}}$  sinyali ile öğrenmenin gerçekleşebilmesi için Hopf CPG osilatör denklemlerindeki parametre değerleri;  $a_i(0)=0$ ,  $\phi_i(0)=0$ ,  $x_i(0)=1$ ,  $y_i(0)=0$ ,  $\mu=1$ ,  $\gamma=8$ ,  $\epsilon=0.9$ ,  $\eta=0.5$  ve  $\tau=2$  olarak kullanılmıştır [41].

İki ayaklı yürüyen robot için gerekli olan eğitim sinyalleri başlık 3.2.1 altında ters kinematik analiz sonucunda eklem uzayında oluşturulan 6. dereceden polinomlardan elde edilmiştir. Hopf CPG osilatörün denklemleri ve eğitim sinyali kullanılarak yürüme yörüngesi tasarımı yapılmıştır. Eğitim sinyali elde edildikten sonra Hopf CPG osilatörün denklemleri ile iki ayaklı yürüyen robotun robot öğrenmesi gerçekleştirilmiştir.

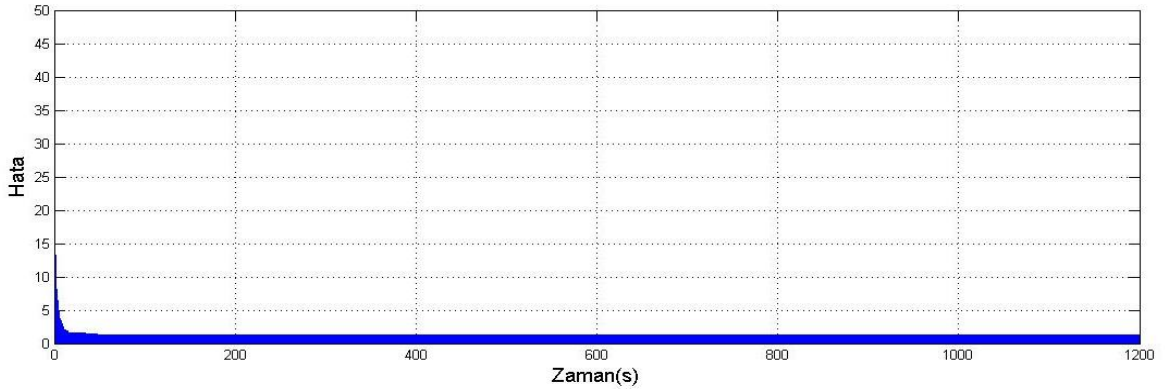
Şekil 4.11(a) ve 4.11(b) de kalça eklemine eğitim işlemi uygulandıktan sonra robottaki öğrenmenin zamana göre değişimi görülmektedir. Şekil 4.11(a) da eğitim sürecinin ilk 5 saniyesi verilmiştir. Bu süreç içerisinde öğrenme sinyalinin eğitim sinyalden uzak olduğu ve eğitimin başlangıçta düzgün olmadığı görülmektedir. Şekil 4.11(b) de ise 1200s eğitim yapıldıktan sonra eğitimin son 5 saniyesi verilmiştir. Şekilden anlaşıldığı üzere eğitim sinyali ile öğrenme sinyali birbirine yakınsamaktadır ve böylelikle iki ayaklı yürüyen robotun kalça eklemi için gerekli olan yürüme eğrisi elde edilmiştir.



Şekil 4.11(a). Kalça eklemi için  $P_{\text{egitim}}$  ve  $Q_{\text{öğrenme}}$  sinyallerinin ilk değerleri

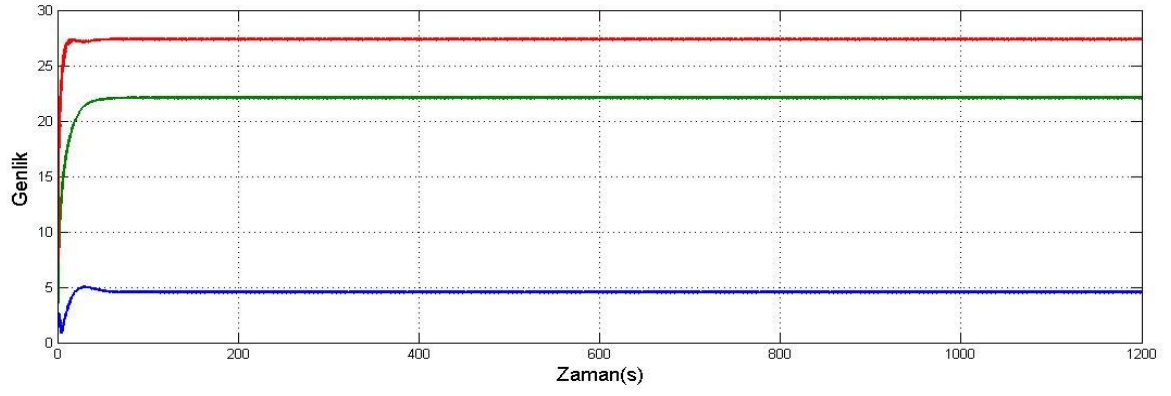


Şekil 4.11(b). Kalça eklemi için  $P_{\text{egitim}}$  ve  $Q_{\text{öğrenme}}$  sinyallerinin son değerleri

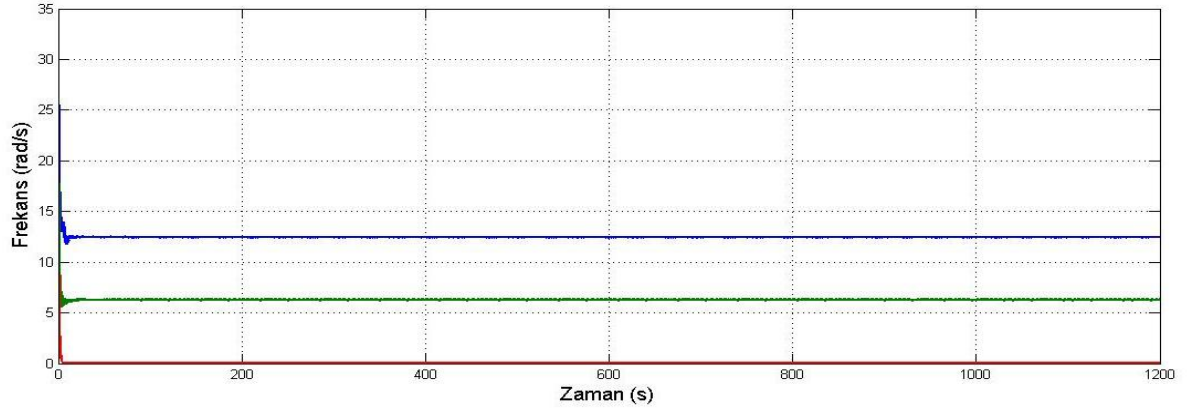


Şekil 4.12. Kalça eklemi için  $P_{\text{egitim}}$  ve  $Q_{\text{öğrenme}}$  sinyalleri arasındaki hata

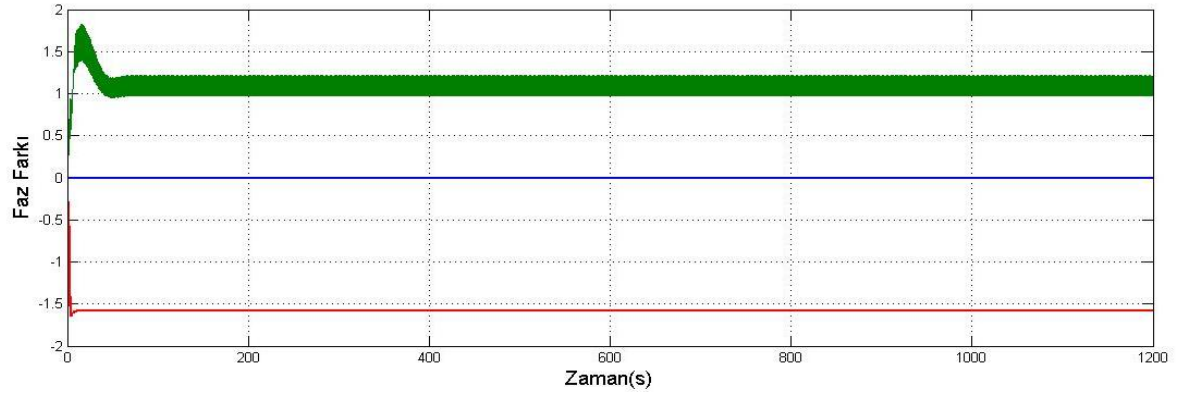
Şekil 4.12 de eğitim sonucunda eğitim sinyali ile öğrenme sinyali arasındaki hata görülmektedir. Hata oranı eğitim başladıktan kısa bir süre sonra sabit kalmaktadır. Bu oranının iki ayaklı yürüme hareketinin gerçekleştirilmesi için uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 4.13. Hopf CPG osilatörün kalça eklemi sinyalleri için genliklerini öğrenme performansı



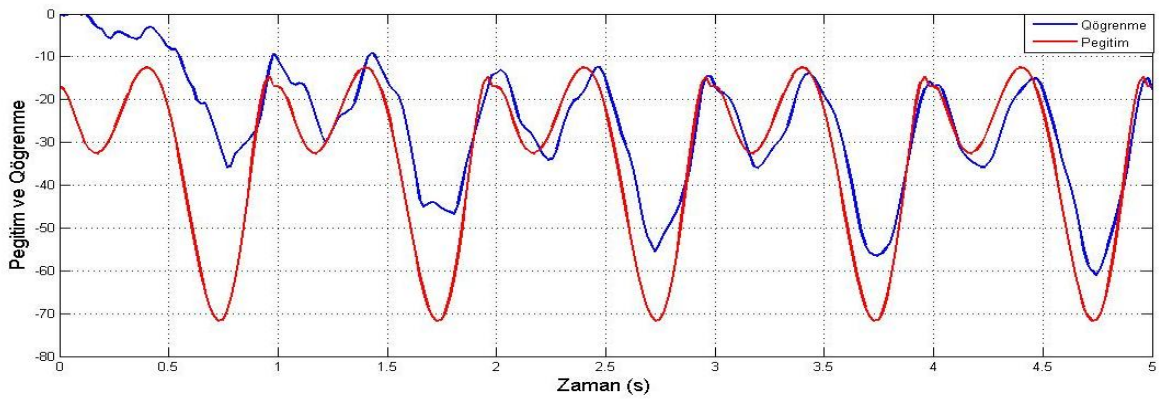
Şekil 4.14. Hopf CPG osilatörün kalça eklemi sinyalleri için frekanslarını öğrenme performansı



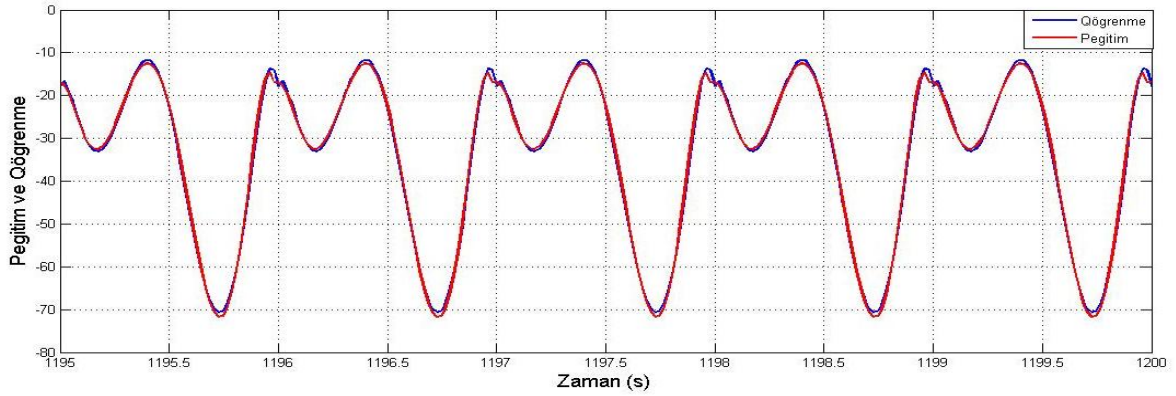
Şekil 4.15. Hopf CPG osilatörün kalça eklemi sinyalleri için faz farklarını öğrenme performansı

Şekil 4.13, 4.14 ve 4.15 kalça eklemi eğitim sinyali için sırasıyla genlikler, frekanslar ve faz farkları görülmektedir. Eğitim sinyali bileşenleri eğitim başladıktan kısa bir süre sonra kararlılığa ulaşmaktadır ve böylelikle kalça eklemi için yürüme eğrisi eğitimi gerçekleştirilmiştir.

Kalça eklemi için yapılan eğitim diz eklemi için de uygulanmıştır ve diz eklemi için yürüme eğrisi eğitimi yapılmıştır. Yapılan eğitim sonucunda elde edilen sonuçlar şekil 4.16(a) ve 4.16(b) de görülmektedir.



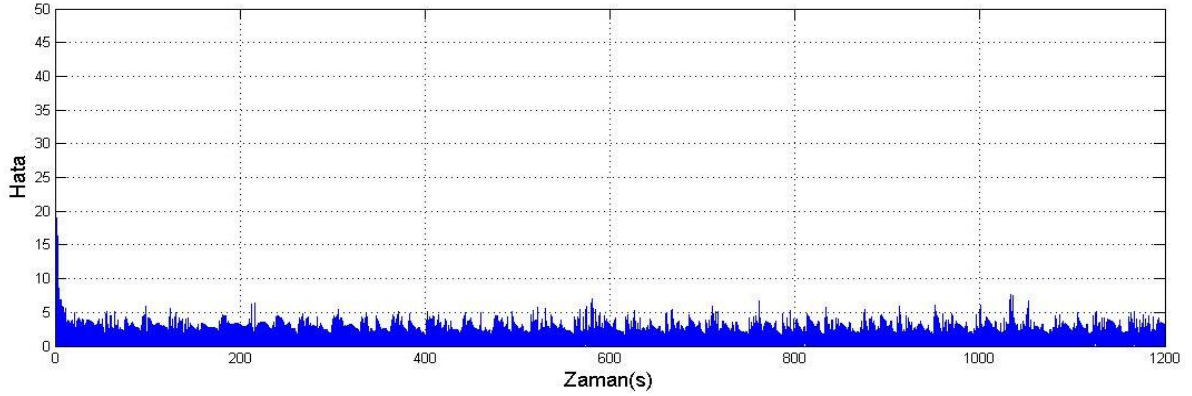
Şekil 4.16(a). Diz eklemi için  $P_{\text{egitim}}$  ve  $Q_{\text{öğrenme}}$  sinyallerinin ilk değerleri



Şekil 4.16(b). Diz eklemi için  $P_{\text{egitim}}$  ve  $Q_{\text{öğrenme}}$  sinyallerinin son değerleri

Şekil 4.16(a) da 1200 saniyelik eğitim sinyalinin başlangıcı verilmiştir. Şekilde, eğitimin başında öğrenme sinyalinin eğitim sinyalinden oldukça farklı olduğu görülmektedir. Şekil 4.16(b) de ise eğitimin son 5 saniyesi verilmiştir. Diz eklemi için öğrenilen çıkış sinyalinin, üretilmesi istenilen eğitim sinyalini düzgün şekilde takip ettiği

görülmektedir. Sonuç olarak başlangıçta büyük bir hataya sahip olan sinyalin eğitim sonunda istenilen çıkışı verdiği görülmektedir.

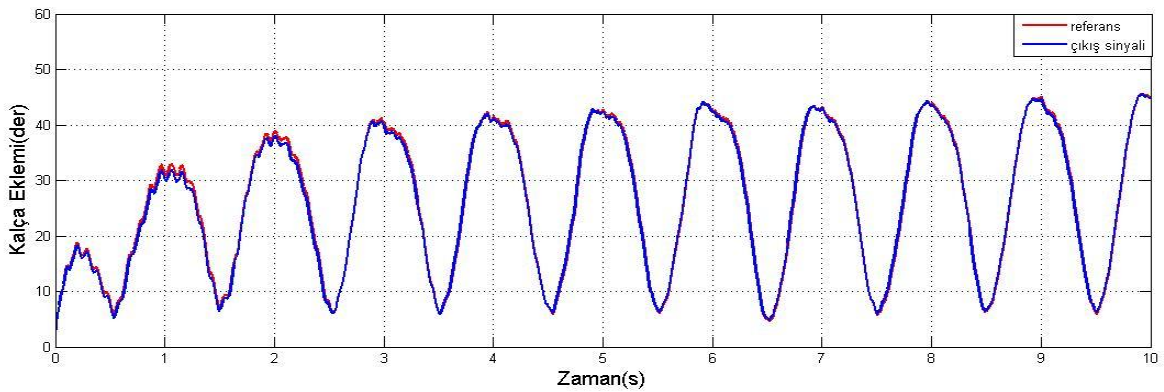


Şekil 4.17. Diz eklemi için  $P_{\text{egitim}}$  ve  $Q_{\text{öğrenme}}$  sinyalleri arasındaki hata

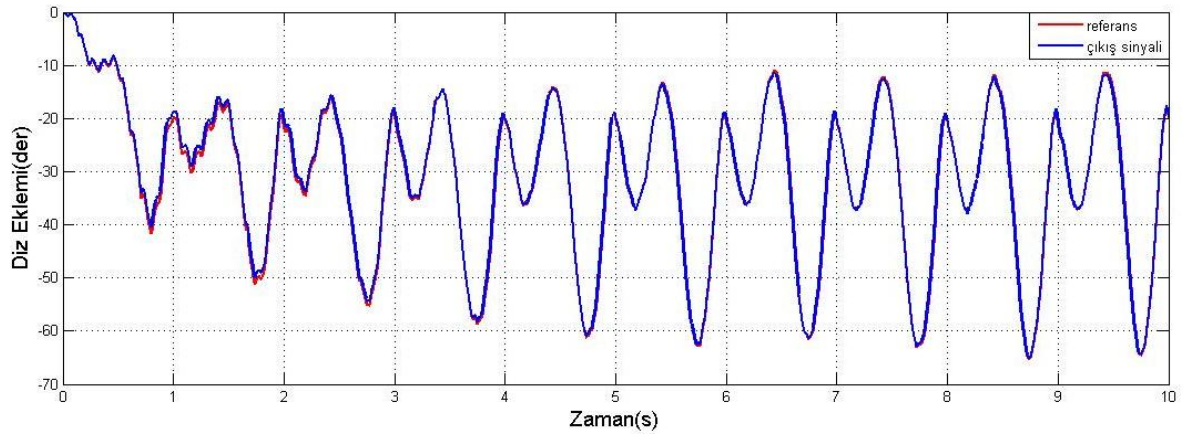
Şekil 4.17 da ise eğitim sinyali ile öğrenme sinyali arasındaki hatanın zamana göre değişimi görülmektedir. Gerçekleştirilen eğitimin sonunda hatanın belirli bir bant aralığında salındığı görülmektedir. Ancak yapılan bu çalışma için kabul edilebilir düzeyde olduğu söylenebilir.

Bu tez çalışması için CPG ile yürüme eğrisi oluşturulmuş iki ayaklı yürüyen robotun eklemlerine uygulanmıştır. Tasarlanan yürüme eğrileri ile yürüme işlemi simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması için kullanılan eğitim yöntemi ve parametreleri daha sonraki çalışmalarda geliştirilerek daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

CPG eğitimi sonucunda elde edilen yürüme eğrisi, iki ayaklı yürüyen robotun eklemlerine uygulanmış ve diz ve kalça eklemi için yörünge izleme performansı şekil 4.18 ve 4.19'dak görüldüğü gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.18. İki ayaklı yürüyen robotun kalça eklemi referans ve robot kalça eklem açıları



Şekil 4.19. İki ayaklı yürüyen robotun diz eklemi referans ve robot diz eklem açıları

Şekil 4.18 ve 4.19 da görüldüğü üzere kalça ve diz eklemi için belirlenen Hopf CPG osilatör ile yürüme eğrisi, simülasyon ortamında robot eklemlerine uygulandığında, başlangıçta yürümenin başarısız olduğu ancak eğitimin sonlarına doğru iki ayaklı yürüme hareketinin düzgün şekilde gerçekleştirildiği görülmektedir.

## 5. İKİ AYAKLI YÜRÜYEN ROBOTUN KATI MODEL TASARIMI VE KONTROLÜ

### 5.1. İki Ayaklı Yürüyen Robotun Katı Model Tasarımı

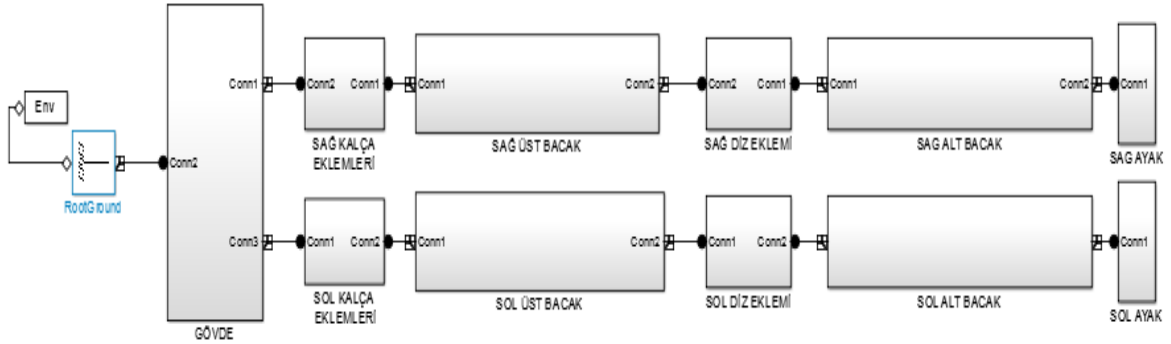
İki ayaklı insansı yürüyen robottan beklenen çalışma uzayında insan hareket yeteneğine yakın bir hareket olanağı sağlayabilmesidir. Bu amaç doğrultusunda iki ayaklı yürüyen robotun tasarımı için ortalama bir insanın bacak boyutları kullanılmıştır.

Bu boyutlar dikkate alınarak iki ayaklı yürüyen robotun tasarımı SolidWorks tasarım programı ile gerçekleştirilmiştir. Belirlenen parametreler doğrultusunda robotun katı model tasarımı gerçekleştirildikten sonra sistem kontrolünün yapılabilmesi ve simülasyonun sağlanabilmesi için SolidWorks içerisindeki SimMechanics bağlantısı ile MATLAB ortamına aktarımı gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1’de robotun SolidWorks katı modeli görülmektedir.



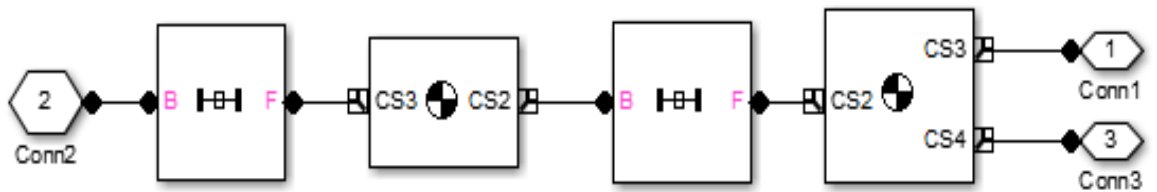
Şekil 5.1. İki ayaklı yürüyen robotun katı modeli

Bu tez çalışmasındaki iki ayaklı yürüyen robotun bilgisayar ortamında tasarımı MATLAB programlama dili ile gerçekleştirilmiştir. Robotun üç boyutlu simülasyonunun yapılmasında MATLAB/Simulink blokları kullanılmıştır. Aşağıdaki şekil 5.2’de sistemin MATLAB/Simulink blok şeması verilmiştir.



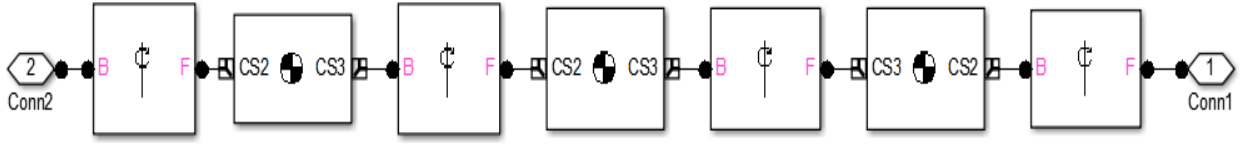
Şekil 5.2. Sistemin MATLAB/Simulink modeli

Bu tez çalışması için gövde tek parçadan oluşturulmuştur. Şekil 5.3’de gövde uzvu için oluşturulmuş Simulink subsysteminin iç yapısı görülmektedir. Model tasarımı için kullanılan bloklar MATLAB/Simulink kütüphanesindeki Simscape/SimMechanics başlığı altında bulunmaktadır.



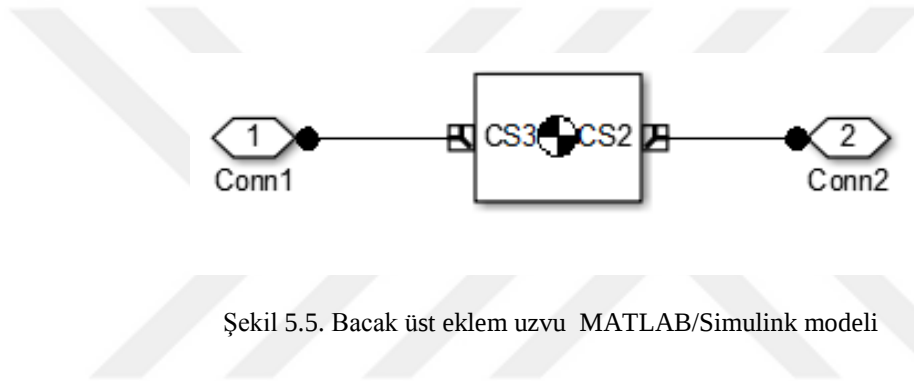
Şekil 5.3. Gövde uzvunun MATLAB/Simulink Modeli

Şekil 5.4’de her bir bacak için kalçaya yerleştirilen eklemlerin blok şeması görülmektedir. Kalçada üç boyutlu hareket mevcuttur. Her bir hareketi tanımlamak için bir döner eklem kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında iki bacak için de aynı eklem yapısı kullanılmaktadır.



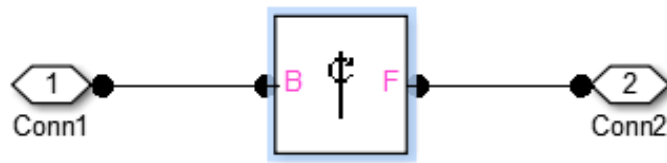
Şekil 5.4. Kalça eklemlerinin MATLAB/Simulink modeli

Şekil 5.5’de üst bacak uzvunun MATLAB/Simulink blok şeması görülmektedir. Her iki bacak için aynı tasarım ve ölçüler kullanılmıştır.



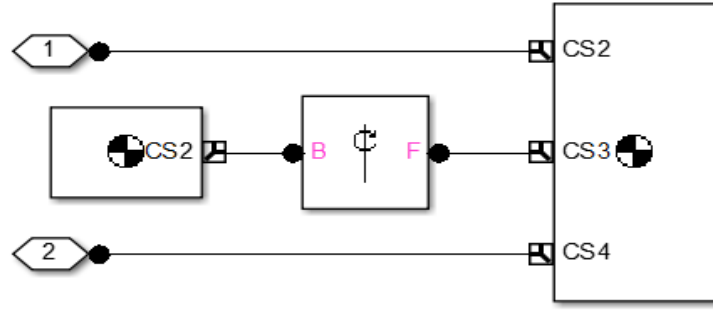
Şekil 5.5. Bacak üst eklem uzvu MATLAB/Simulink modeli

Şekil 5.6 da diz eklemine yapısı görülmektedir. Tasarım özellikleri belirlenirken diz eklemi için tek yönde hareket tanımlandığı için bir tane döner eklem kullanılmıştır.



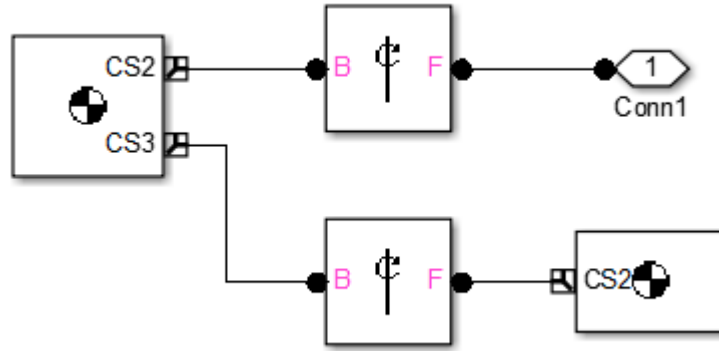
Şekil 5.6. Diz eklemleri için MATLAB/Simulink Modeli

Şekil 5.7 de alt bacak uzuvları için oluşturulmuş subsystem yapısının içeriği görülmektedir. Alt bacak uzvu bir eklem ile üst bacağa ve iki eklem ile alt bacağa bağlantısı bulunmaktadır.



Şekil 5.7. Bacak alt eklem uzvunun MATLAB/Simulink modeli

Bu tez çalışmasında her bir ayak uzvunda iki yönlü hareketi gerçekleştirmek üzere iki serbestlik derecesi kullanılmıştır. Şekil 5.8 de Ayak uzuvları için oluşturulmuş Simulink subsysteminin iç yapısı görülmektedir.

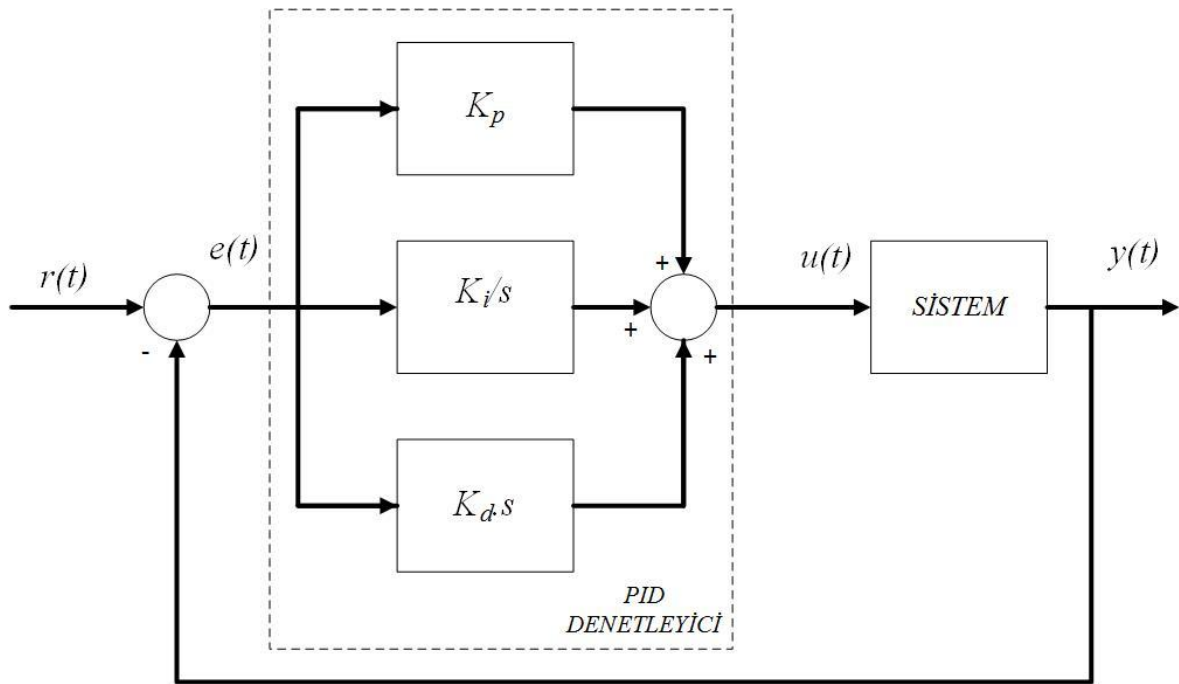


Şekil 5.8. Ayak uzvunun MATLAB/Simulink modeli

## 5.2.İki Ayaklı Yürüyen Robotun Kontrolü

Robotik sistemlerde denetim mekanizması oldukça önemli bir yere sahiptir. Kontrol sistemleri temel prensibi referans giriş ile sistem çıkışından elde edilen geri-besleme değeri arasındaki hatayı minimize etmek amacı ile seçilen kontrol yönteminden elde edilen uygun bir denetim sinyalinin üretilerek, sistem davranışının referansı takip etmesinin sağlanması için, sisteme giriş olarak uygulanmasına dayanmaktadır. Birçok denetim sistemi türü mevcuttur. Bu tez çalışmasında PID denetleyici ve Yapay Sinir Ağı (YSA) tabanlı Hopf CPG osilatör denetimi kullanılmıştır.

PID kontrolörler hem yapısının basit olması hem de ayarlanması gereken parametre sayısının az olması sebebiyle oldukça tercih edilen bir kontrolör türüdür. PID kontrolörler için kesin bir tanımlama yapılmamıştır. Temel olarak geri besleme yoluyla aldıkları sinyali değerlendirerek çıkışı düzenleyici sinyal üreten yapılardır. Sisteme uygulanan giriş ile geri besleme yoluyla çıkıştan alınan bilgiyi karşılaştırarak bir hata sinyali oluşturulmaktadır. Bu hata sinyali PID kontrolör ile düzeltilerek yeniden sisteme uygulanmakta ve sistem çıkışının istenilen şekilde olması için bu işlem sürekli olarak tekrarlanmaktadır. PID kontrolörler P (oransal), I (integral), D (türev) olmak üzere ayarlanması gereken üç çeşit parametre vardır. Şekil 5.9’de PID kontrolörün genel yapısı görülmektedir [42].



Şekil 5.9. PID denetleyici

PID kontrolörlerin temel denklemi (5.1) deki gibidir.

$$u(t) = K[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (5.1)$$

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (5.2)$$

$u$  : Kontrol edilen değişkeni

$e$  : sistemin etkin hatasını tanımlamaktadır.

Denklemden de anlaşılacağı üzere kontrol değişkeni hata, hatanın integrali, hatanın türevi ile orantılı olan ifadelerin toplamından oluşmaktadır.

$$u(t)=P(t)+I(t)+D(t) \quad (5.3)$$

Bu parametrelerden oransal değer yükselme zamanını azaltmaktadır, integral değeri kararlı hal hatasının çıkarılmasında kullanılmaktadır ve türev değeri aşmayı azaltır ve geçici tepkiyi düzeltmektedir.

PID parametrelerinin hesaplanabilmesi için iki yöntem vardır bunlar elle ayarlama ve parametrelerin hesaplanması yöntemidir. Parametrelerin hesaplanması yöntemi Ziegler-Nichols Metodu olarak ifade edilmektedir.

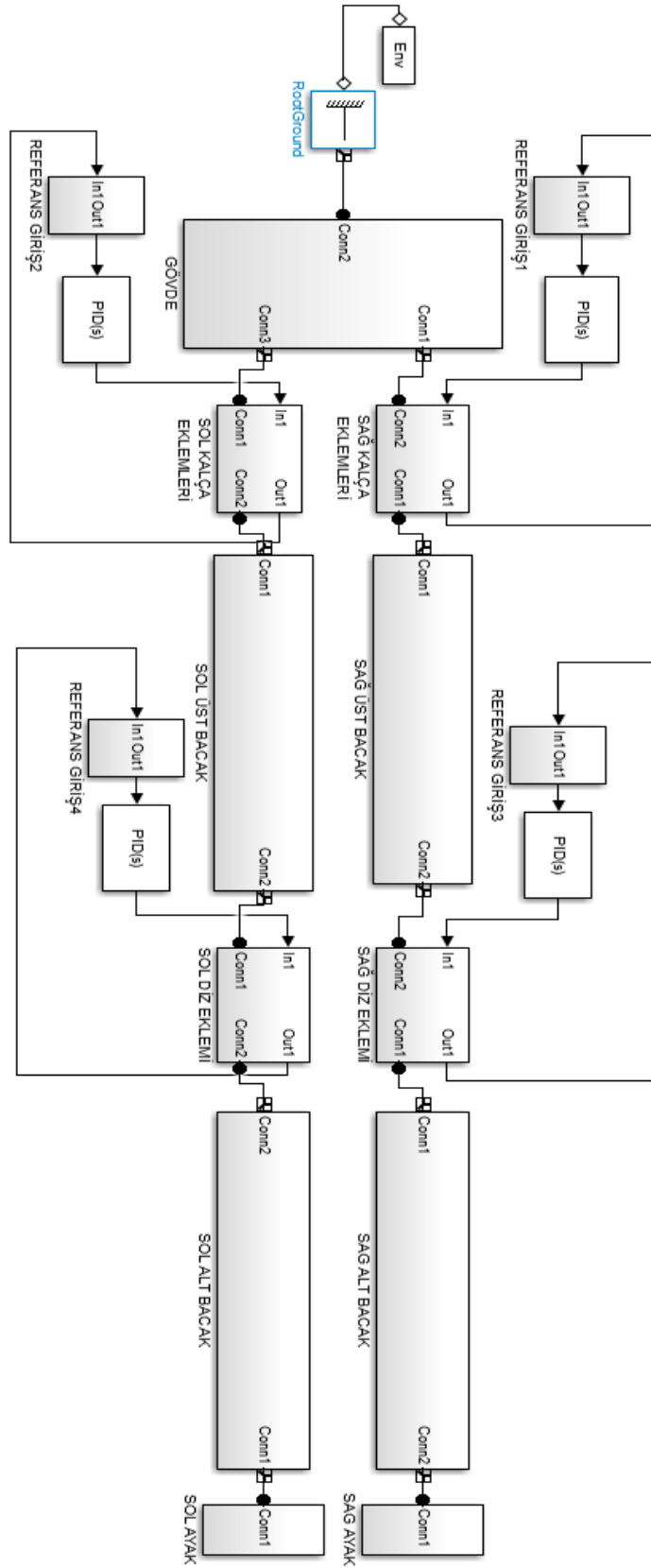
Ziegler-Nichols Metodunda parametrelerin belirlenebilmesi için iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan birisi basamak girişin cevabında elde edilen değerler ile pıd parametrelerinin hesaplanmasıdır ikincisi ise frekans yanıtı yöntemi ile elde edilmesidir. Basamak yanıtına göre parametre hesaplama yönteminde sisteme açık çevrim olarak uygulanırken frekans yanıtı yönteminde ise sisteme sadece oransal kontrolörün etkisi varken test edilmektedir.

Bu çalışmada Matlab/Simulink programında var olan hazır PID bloğu kullanılmıştır. Her iki eklem için de aynı kontrol parametreleri kullanılmıştır. Bu sistem için optimum PID parametreleri tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. PID parametrelerinin değerleri

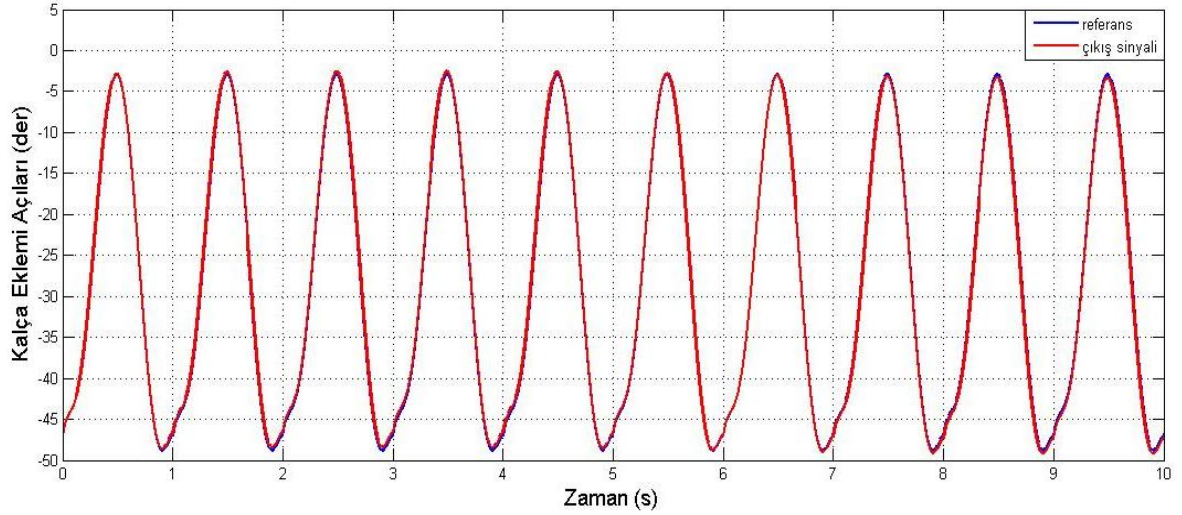
| Parametreler                | Değerler |
|-----------------------------|----------|
| Oransal Katsayı( $K_p$ )    | 0.5      |
| Türev Katsayısı( $K_i$ )    | 35       |
| İntegral Katsayısı( $K_d$ ) | 135      |

Şekil 5.10 da eklemlerin takip etmesi gereken yürüme eğrisini veren polinomlar Simulink modeline uygulanmış ve PID kontrolörlerin sisteme bağlantısı yapılmıştır. Bu tasarımda sağ ve sol bacak yörünge planlamaları için aynı polinomlar kullanılmıştır. İki bacak arasındaki gecikme miktarı MATLAB/Simulink/Library deki delay bloğu ile sağlanmıştır.

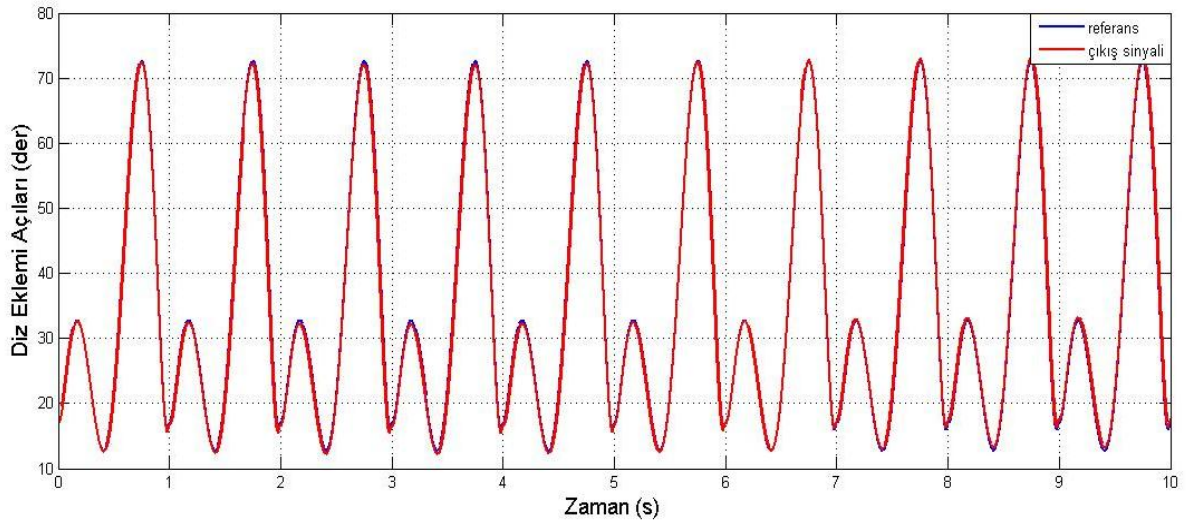


Şekil 5.10. Sistemin PID ile oluşturulmuş MATLAB/Simulink modeli

Şekil 5.11 ve 5.12’de diz ve kalça eklemlerine PID kontrolör uygulandıktan sonra referans giriş sinyali ile çıkış sinyalini veren grafik görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü üzere çıkış sinyalinin referans sinyali uygun şekilde takip ettiği görülmektedir.

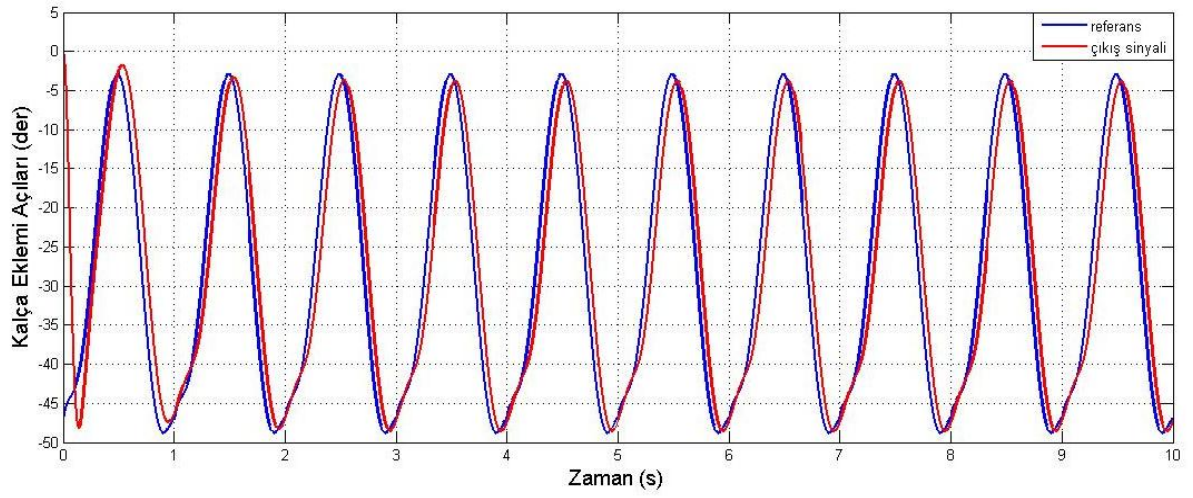


Şekil 5.11. Kalça ekleminin PID kontrolör ile kontrolü

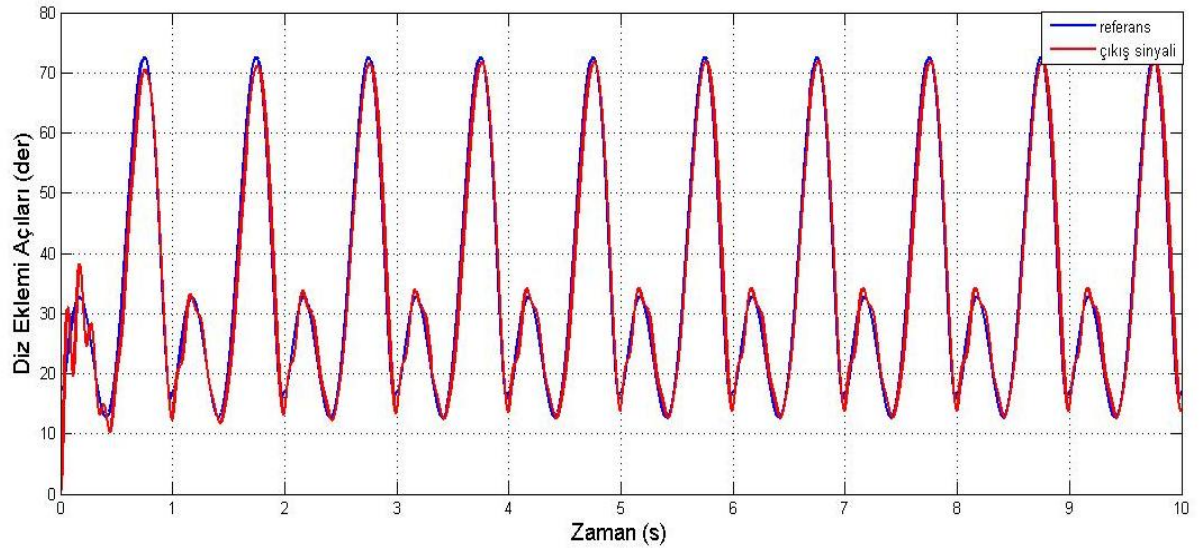


Şekil 5.12. Diz ekleminin PID kontrolör ile kontrolü

İki ayaklı yürüyen robotun diz ve kalça eklemlerine servo motorlar bağlandıktan sonra PID kontrolör ile kontrolü sağlanmış ve simülasyonun çıkış sinyalleri şekil 5.13 ve 5.14 de görülmektedir. Başlangıçta 0 olan kalça ve diz eklemleri çıkış sinyallerinin kısa bir süre sonra referans sinyale yakınsadığı görülmektedir.

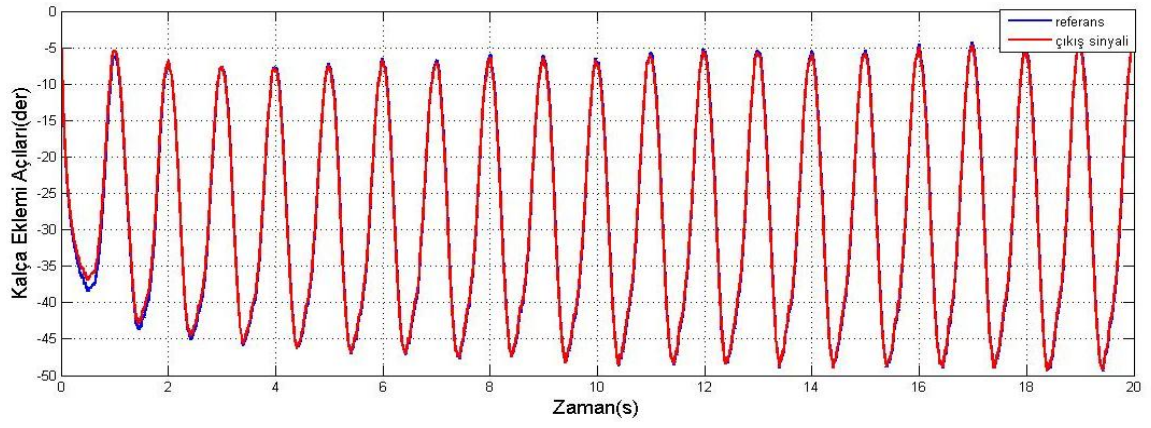


Şekil 5.13. Kalça ekleminin servo motor bağlantılı PID kontrolör ile kontrolü

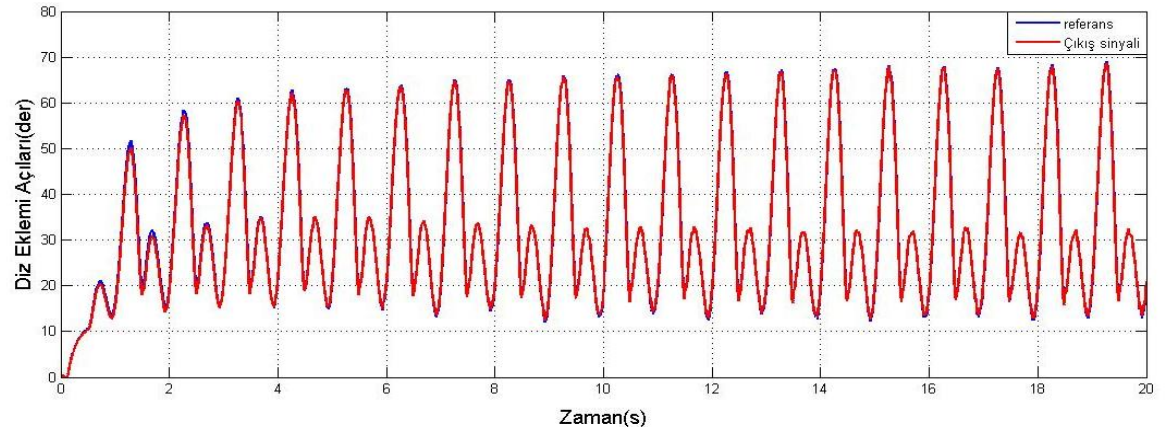


Şekil 5.14. Diz ekleminin servo motor bağlantılı PID kontrolör ile kontrolü

Hopf CPG osilatör ile elde edilen yürüme eğrisi PID kontrolör kullanılarak kontrol edilmiş ve sonuçlar şekil 5.15 ve 5.16 da verilmiştir. Hopf CPG osilatör kullanılarak robot eğitimi ile eklem açıları belirlenmiş ve simülasyon ortamına eklenmiştir. Simülasyon ortamında PID kontrolör ile kontrol işlemi gerçekleştirilmiş ve belirli bir eğitim sürecinden sonra robotun eklem açıları belirlenen yürüme eğrisindeki açı değerlerine yakınsamıştır ve istenilen iki ayaklı yürüme hareketi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.15. Kalça ekleminin CPG ile yörünge üretimi ve PID kontrolör ile kontrolü



Şekil 5.16. Diz ekleminin CPG ile yörünge üretimi ve PID kontrolör ile kontrolü

## 6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında iki ayaklı yürüyen robotun modellenmesi ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda öncelikle iki ayaklı robotun matematiksel modelinin nasıl oluşturulacağından bahsedilmiş ve Denavit-Hartenberg yöntemi ile kinematik analizleri yapılmıştır. Yapılan ters kinematik işlemler ile robotun eklem açılarının neler olması gerektiği belirlenmiştir.

Bu çalışma için robotun kalça ve dizde bulunan iki eklemi üzerinde çalışılmıştır. Diğer eklemlerin sabit olduğu kabul edilmiştir. İki ayaklı yürüyen robotun yörünge planlaması için iki farklı yöntem uygulanmıştır. Bunlardan ilki eklem uzayında 6. Dereceden polinomlar kullanılarak robot ekleminin 1 saniye boyunca takip etmesi gereken yürüme eğrisi tasarlanmıştır. İkinci yöntem olarak CPG robot öğrenmesi yaptırılarak yürüme eğrisi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması için CPG mimarisinde doğrusal olmayan Hopf osilatör kullanılmıştır. Kalça ve diz eklemleri için eğitim sinyali oluşturularak osilatörün dinamik denklemlerine uygulanmış ve yürüme eğrisi tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Robot tasarım kriterleri belirlenirken ortalama boyutlarda bir insanın bacak boyutları dikkate alınarak yapılmıştır. İnsan yürüme hareketinde görev alan tüm kas ve eklemleri taklit etmek zor olacağından yürüme hareketini iyi şekilde taklit edebilmesi açısından toplam 6 serbestlik derecesi kullanılması uygun görülmüştür. Bunlardan 3 tanesi kalça eklemi, bir tanesi diz eklemi ve iki tanesi ise ayak bileği eklemidir. Böylelikle insan yürüme hareketine yakın bir tasarım elde edilmiştir. Eklem hareketlerini gerçekleştirmek için robot sürücü sistemlerinden doğru akım servo motorlar tercih edilmiştir. Servo motorların matematiksel modelinden faydalanılarak MATLAB/Simulink’de blok diyagramları oluşturulmuş ve iki ayaklı yürüyen robotun eklemlerine yerleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında iki ayaklı yürüyen robotun katı model tasarımı SolidWorks programı ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra robotun kontrolünü gerçekleştirmek için oluşturulan katı model SimMechanics aracılığıyla MATLAB/Simulink ortamına aktarılmıştır. Oluşturulan modelin eklemlerine PID kontrolör uygulanarak daha önceden oluşturulmuş olan yürüme eğrisini takip etmesi sağlanmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] **Tan, N. M., 2012.** İki ayaklı yürüyen robot için kontrol sistemi geliştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **Yapıcı, K. O., 2008.** 14 serbestlik dereceli iki ayaklı bir robotun dinamik yürüme hareketinin kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Khan L.A., Naeem J.,Khan U.,Hussain S.Z., 2008.** PID Control of a Biped Robot, *8th WSEAS Int. Conf. on ROBOTICS, CONTROL and MANUFACTURING TECHNOLOGY (ROCOM '08), Hangzhou, China, April 6-8*, s.156-160.
- [4] **Raibert M., Tzafestas C., Tzafestas S., 1993.** Comparative Simulation Study of Three Control Techniques Applied to a Biped Robot, *AI Lab., MIT, 545 Tech.Square Cambrige, Mass 02139, USA, IRCU, National Tech. Univ. of Athens Zografou, 15773 Athens, GREECE, July 14*, s.494-502.
- [5] **Sugihara T., Nakamura Y.,Inoue H., 2002.** Realtime Humanoid Motion Generation through ZMP Manipulation based on Inverted Pendulum Control, *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation Washington, DC, May*, s.1404-1409.
- [6] **Miomir Vukobratovid, B.Borovac, D.Simla and D.Stokic. 1990.** Biped Locomotion: Dynamics, Stability, Control and Application, *volume 7 of Scientific Fundamentals of Robotics. Springer-Verlag.*
- [7] **Jong H. Park and Yong K.Rhee. 1998.** ZMP Trajectory Generation for Reduced Trunk Motions of Biped Robots. In *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, s. 90-95.
- [8] **Carbone G.,Lim H., Takanishi A., Ceccarelli M., 2003.** Stiffness Analysis of the Humanoid Robot WABIAN-RIV: Modelling, *Proceedings of the 2003*

*IEEE International Conference on Robotics & Automation Taipei\* Taiwan\**  
September, s.14-19.

- [9] <http://www.unibw-muenchen.de/hermes/>, Bundeswehr University of Munich homepage. 14.06.2017.
- [10] <http://www.humanoid.waseda.ac.jp>, Waseda University homepage. 14.06.2017.
- [11] **Fukuda T., Michelini R., Potkonjak V., Tzafestas S., Valavanis K., Vukobratovic M., 2001.** How far Away is Artificial Man?, *IEEE Robotics Automation Magazine*, Vol.7, n.1, s.66-73.
- [12] **Rosheim M.E., 1994.** *Robot Evolution. The Development of Anthrobotics*, John Wiley & Sons, New York.
- [13] **Duffy J., 1996.** *Statics and Kinematics with Applications to Robotics*, Cambridge University Press, Cambridge, s.153-169.
- [14] **Ceccarelli M., Carbone G., 2002.** A Stiffness Analysis for CaPaMan (Cassino Parallel Manipulator), *Mechanism and Machine Theory*, vol.37, n.5, s.427-439.
- [15] **Chakarov D. 1998.** Optimization Synthesis of Parallel Manipulators with Desired Stiffness, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.28, n.4.
- [16] **Liu X.-L., Jin Z.-L., Gao F., 2000.** Optimum Design of 3- Dof Spherical Parallel Manipulators with Respect to the Conditioning and Stiffness Indices, *Mechanism and Machine Theory*, Vol.35, n.9, s.1257-1267.
- [17] **Chestnutt J., Michel P., Kuffner J., Kanade T., 2007.** Locomotion Among Dynamic Obstacles for the Honda ASIMO, Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems San Diego, CA, USA, Oct 29 - Nov 2, s.2572-2573.

- [18] **Erbatur K., Seven U., Taşkıran E., Koca Ö., Kızıldaş G., Unel M., Sabanovic A., Onat A., 2008.** SURALP-L - The Leg Module of a New Humanoid Robot Platform, *8<sup>th</sup> IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots December 1~3, 2008 / Daejeon, Korea*, s.168-173.
- [19] **Toygar E. M., Özkurt A., Kırıl Z., Çakmakçı M., Kırıl B. G., Şenol Y., Akkan T., Arman Y., Olcay T., Dağhan N. M., Karagöz M., 2012.** İnsan Bacak Hareketleri İçin Prototip Dış İskelet Robotik Sisteminin Mekanik Tasarımı Ve Hareket Verilerinin Yapay Sinir Ağları İle Elde Edilmesi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 16.3*, s.234-248.
- [20] **Gerçek A., 2012.** İki Ayaklı Yürüyen Robot Tasarımı Ve Prototip İmalatı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [21] **Yüksel, B., 2008.** Towards the enhancement of biped locomotion and control techniques, *Doktora Tezi*, O.D.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [22] **Aykaç, B., 2011.** Dc motorla tahrik edilen iki uzuvlu manipülatörün adım atma hareketinin kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [23] **Bingül, Z. ve Küçük, S., 2009.** Robot Kinematiği, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- [24] **Acar, M., 2007.** İki ayaklı yürüme hareketinin modellenmesi ve kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [25] [http://hilmi.trakya.edu.tr/ders\\_notlari/robotik/Temel%20Robotik2.pdf](http://hilmi.trakya.edu.tr/ders_notlari/robotik/Temel%20Robotik2.pdf), Temel Robotik2. 19.03.2017.
- [26] **Yılmaz, S., 2013.** İnsansı Robotlarda Yürüme, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [27]<http://www.elektrikrehberiniz.com/elektrik-motorlari/ac-motor-nedir-445/>, AC Motor nedir?. 05.04.2017.
- [28]<https://www.elektrikce.com/dc-motorlari-ozellikleri/>, DC Motorların özellikleri. 05.04.2017.
- [29]<http://www.elektronik.gen.tr/dc-motor-nedir/>, DC Motor nedir?. 06.04.2017.
- [30]<http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=MotorPosition&section=SystemModeling>, DC motor position: system modeling. 16.04.2017.
- [31]<http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=MotorPosition&section=SystemModeling>
- [32] **Altınorak S., 2006.** İki ayak robot modellemesi denetleyici tasarımı ve dinamik benzetimi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [33] **Kanath, U. ve Yetkin, H., Songür M., Öztürk A., Bölükbaşı S., 2006.** Yürüme analizinin ortopedik uygulamaları, *TOTBİD Dergisi*, 5, s. 53-59.
- [34] **Şeker A., Talmaç M.A., Sarıkaya İ., 2014,** TOTBİD Dergisi 2014; doi: 10.14292/totbid.dergisi.2014.35, s. 314–324.
- [35] **Kızılhan, A., Toz, M., Aliustaoğlu, C. ve Bingül, Z., 2007.** Gezgin robot tasarımı ve hareket planlaması, *TOK'07 Bildiriler Kitabı*, İstanbul, s. 371-376.
- [36] **Ewald, A., Buschmann, T., 2013.** Online Trajectory Replanning for Biped Robots Based on Foot Step Position Modification, *The 2013 World Congress on Advances in Nano, Biomechanics, Robotics, and Energy Research*, Korea, s.155-163.

- [37] **Azimi, E., Ghobadi, M., Esfahani, E., Keshmiri, M., ve Tehrani, A., 2005.** Three Dimensional Smooth Trajectory Planing Using Realistic Simulation, *Robot Soccer World Cup*. Springer Berlin Heidelberg, s. 381-393.
- [38] **Uzuner, S., Akkuş, N. ve Toz, M., 2017.** 5 Eksenli Manipülatörün Eklem Uzayında Yörünge Planlaması, *Politeknik Dergisi*, 20(1), s. 151-157.
- [39] **Günay, E., Kılıç, R., Dahasert, N., Öztürk, İ., 2012.** Merkezi Desen Üreteçleri için Donanımsal Çözümler, *ELECO '2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 29 Kasım - 01 Aralık 2012, Bursa*, s.332-335.
- [40] **Adak, Ö.K., 2013.** Quadruped Locomotion Reference Synthesis With Central Pattern Generators Tuned by Evolutionary Algorithms, *Yüksek Lisans Tezi*, Sabancı Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [41] **Righetti, L., Ijspeert, A. J., 2006,** Programmable central pattern generators: an application to biped locomotion control, In *Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on* , s.1585-1590.
- [42]<http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/pid-denetleyiciler/11787#ad-image-0>, PID Denetleyiciler. 04.05.2017.