T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DÖRT AYAKLI BİR ROBOTUN ENGEBELİ YÜZEYLERDE YÜRÜME ANALİZİ VE KONTROLÜ

Muhammed Arif ŞEN

DOKTORA TEZİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2020
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammed Arif ŞEN tarafından hazırlanan "Dört Ayaklı Bir Robotun Engebeli Yüzeylerde Yürüme Analizi ve Kontrolü" adlı tez çalışması 10/06/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Başkan Prof. Dr. Fatih M. BOTSALI	……..
Danışman Prof. Dr. Mete KALYONCU	……..
Üye Dr. Öğr. Üyesi Ümit ÖNEN	……..
Üye Dr. Öğr. Üyesi Koray KAVLAK	……..
Üye Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TINKIR	……..

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Muhammed Arif ŞEN

10/06/2020

ÖZET

DOKTORA TEZİ

DÖRT AYAKLI BİR ROBOTUN ENGEBELİ YÜZEYLERDE YÜRÜME ANALİZİ VE KONTROLÜ

Muhammed Arif ŞEN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mete KALYONCU

2020, 233 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Fatih M. BOTSALI
Prof. Dr. Mete KALYONCU
Dr. Öğr. Üyesi Ümit ÖNEN
Dr. Öğr. Üyesi Koray KAVLAK
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TINKIR

Bu tez kapsamında, dört ayaklı bir robotun (4AR) adım yörünge denetimini geliştirmek amacıyla farklı optimal kontrolcü tasarımları ve düz/engebeli yüzeylerde yürüyüşüne yönelik özgün bir kontrol mimarisi tasarlanarak modelleme, simülasyon ve analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar dikkate alınarak 4AR'ın tasarım kriterleri ve fiziksel parametreleri belirlenmiş, ileri/ters kinematik analizi ve sayısal hesaplamaları gerçekleştirilmiş, Newton-Euler metodu tabanlı kapalı form matematiksel dinamiğine ait çözümlemeler sunulmuştur. Yürüyüş çalışmalarına temel teşkil etmesi amacıyla, tek bacak modeli üzerinden, adım hareketinin yörünge kontrolüne yönelik daha önce önerilmeyen sezgisel algoritmalar kullanılarak, özgün yaklaşımlarla optimal PID, Hibrit LQR-PID, Bulanık Mantık Kontrolcü (BMK) tasarımları gerçekleştirilmiş ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayak ucu ile yüzey arasındaki etkileşimi denetleyen PID tabanlı bir Empedans Kontrolcü tasarlanmıştır. Ayrıca, dört ayaklı bir robota (HyQ2max) ait fiziksel ve dinamik parametrelere sahip, üç serbestlik dereceli bir bacak yapısı modellenmiş ve çeşitliliği artırmak amacıyla PIλDμ kontrolcü tasarlanmış, performansı klasik PID kontrolcü ile kıyaslamalı olarak değerlendirilmiştir. Adım hareketi üzerine yapılan çalışmalar ile sistemin ayakucu yörünge denetimi iyileştirilmiştir. Sistemin katı modeli CAD programında tasarlanmış ve ADAMS ortamına aktarılarak 4AR'ın dinamik modeli elde edilmiştir. Yürüyüş boyunca adım evrelerine göre kazançlarını uyarlayan PD tabanlı bir tork kontrolcü geliştirilmiştir. ADAMS ve MATLAB/Simulink programlarının eş zamanlı koşturulması ile, 4AR'ın düz bir zeminde statik yürüyüşün yanı sıra tırıs, rahvan ve eşkin dinamik yürüyüşleri olmak üzere toplamda dört farklı çeşitte düzlemsel yürüyüş simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu tezde, 4AR'ın düzensiz yüzeylerde yürüyüş kontrolüne yönelik, gövdenin ve adım hareketinin birlikte denetlenebildiği ve bunların kontrolcü çıkışı üzerindeki etkilerinin ayarlanabildiği, ayak ucu ve engebeli yüzey arasındaki etkileşimi düzenleyen empedans konum-kuvvet denetimini de içeren, özgün bir kontrol mimarisi önerilmiştir. Dört farklı çeşit standart engebelerden oluşan bir parkur tasarlanmış, 4AR'ın engebeli yürüyüş kontrolü ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Önerilen kontrol mimarisinin, 4AR'ın denge ve kararlılığını koruyarak, engebeli parkurda referans yürüyüş planını başarılıyla denetleyebildiği gösterilmiştir. Sistemin tüm durum değişkenine ve hata değerlerine ait kapsamlı sayısal sonuçlar sunulmuş, literatürdeki benzer sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Arı Algoritması (AA), Bozkurt Algoritması (BA), Bulanık Mantık Kontrolcü, PID, LQR, Dört Ayaklı Robot, Empedans, Eş-Simülasyon, Engebeli Parkur, Kontrolcü Tasarımı, Optimizasyon, Tork Kontrolü, Yürüyüş Analizi.

ABSTRACT

PhD THESIS

GAIT ANALYSIS AND CONTROL OF A QUADRUPED ROBOT ON RUGGED SURFACES

Muhammed Arif ŞEN

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering

Advisor: Prof. Dr. Mete KALYONCU

Year, 233 Pages

Jury
Prof. Dr. Fatih M. BOTSALI
Prof. Dr. Mete KALYONCU
Asst. Prof. Dr. Ümit ÖNEN
Asst. Prof. Dr. Koray KAVLAK
Asst. Prof. Dr. Mustafa TINKIR

In this thesis, in order to improve step trajectory control of a quadruped robot (4AR) diversity the optimal controller designs and by designing the unique control structure to walking on uneven/rugged surfaces the modeling, simulation, and analysis studies were carried out. By considering the experimental studies, the design criteria and physical parameters of the 4AR have been determined. The forward/inverse kinematic analysis and the numerical calculations have been performed, and the solutions of closed-form mathematical dynamics based on the Newton-Euler method had been presented. To provide a basis for gait studies, the optimal PID, Hybrid LQR-PID, Fuzzy Logic Controller (FLC) designs have been realized using heuristic algorithms which not proposed before and unique approaches and evaluated comparatively for trajectory control of the step motion. A PID based Impedance Controller is designed to control the interaction between the end-point of the leg and the surface. In addition, the three degrees of freedom leg structure with physical and dynamic parameters belonging to a quadruped robot (HyQ2max) was modeled, and to increase diversity the PIλDμ controller was designed, its performance was compared to the classical PID controller. The foot trajectory control of the system had been improved by the studies on the step motion. the solid model of the system was designed in a CAD program and the dynamic model of 4AR was obtained by it is transferred to the ADAMS environment. A PD based torque controller is developed which could adapt its own gains according to the step phases along the walk. With the simultaneous running of ADAMS and MATLAB/Simulink programs, the planar walking simulations on the uneven ground were carried out at a total of four different types; the trot, pace, and canter dynamic gaits as well as the static gait. In this thesis, a unique control approach in which the body and step motion could be controlled together and their effects on the controller output could be adjusted, and also that included the impedance position-force control that regulates the interaction between the end-point and the ground was proposed for gait control on rugged surfaces. The parkour consisting of four different types of standard roughness was designed, the rugged gait control and simulation of 4AR were carried out. It has been shown that the proposed control structure could successfully control the reference gait planning on the rugged parkour while keeping the balance and stability of 4AR. Detailed numerical results of all the system variable and error values of the system were presented and evaluated comparatively with similar results in the literature.

Keywords: The Bee Algorithm, Grey Wolf Optimization Algorithm, Fuzzy Logic Controller, PID, LQR, Quadruped Robot, Impedance, Co-Simulation, Rugged Parkour, Controller Design, Optimization, Torque Control, Gait Analysis.

ÖNSÖZ

İnsanoğlu varoluşundan itibaren doğadaki canlıları incelemeye, onların etkileyici yeteneklerinden ve sezgisel davranışlarından ilham alarak, yaşadığı çağın yenilikçi fikirlerini üretmeye ve hayatını kolaylaştıracak yeni teknolojiler geliştirmeye gayret etmiştir. Bu çabanın son yıllardaki en belirgin örneklerinden birisi; üstün kabiliyetleri sayesinde mükemmel yürüyüşler sergileyen, dinamik hareketleri ustalıkla gerçekleştiren, hayvanlardan esinlenerek geliştirilen dört ayaklı robotlardır.

Dört ayaklı robotların, geleneksel tekerlekli/paletli araçların sağlayamayacağı avantajlara sahip olması, robotik alanındaki araştırmacıların temel motivasyon kaynağıdır. Hareketli bir gövdeye bağlı eklemli bacaklardan oluşan karmaşık yapısı ve kontrolündeki zorluklar nedeniyle dört ayaklı robotlar, günümüz robotiğinin önemli bir çalışma konusunu teşkil etmektedir. Ülkemizde yürütülen çalışmalar henüz yeterli seviyede olmasa da, bu alandaki araştırmacıların ve desteklerin artmasıyla, sivil amaçlara ve stratejik önem arz eden savunma uygulamalarına yönelik, yerli dört ayaklı robotların geliştirilmesi ve yaygınlaşması kaçınılmaz olacaktır.

Bu motivasyon ile başlayıp, uzun uğraşlar ve araştırmalar neticesinde hazırladığım doktora tezimde, dört ayaklı robotların düz ve engebeli yüzeylerde yürüyüşü üzerine; literatür derlemesi, tasarım, modelleme, kontrol, optimizasyon gibi birçok konuda kapsamlı çalışmalar, sonuçlar ve değerlendirmeler sunulmuştur.

Tez çalışmamda, yenilikçi ve güncel bir konuda çalışmam için beni yönlendiren, tez ve yayın çalışmalarımı yöneten, yetkinliğimi geliştirebilmem adına bilgi ve tecrübesiyle beni hep destekleyen, zorlandığım süreçlerde cesaretlendiren danışmanım Prof. Dr. Mete KALYONCU 'ya sonsuz teşekkürlerimi sunar, akademik deneyimleriyle bizlerin yolunu aydınlatmaya devam etmesini temenni ederim.

Tez izleme süreçlerimde, görüş ve önerileriyle çalışmalarımın ilerlemesine önemli katkılar sunan, Prof. Dr. Fatih M. BOTSALI 'ya ve Dr. Öğr. Üyesi Ümit ÖNEN 'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda, ilgisini esirgemeden birçok konuda yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TINKIR 'a ve Dr. Öğr. Üyesi Yusuf ŞAHİN 'e teşekkür ederim. Yen fikirlerin şekillenmesinde yardımcı olan ve birlikte yaptığımız çalışmalar için Öğr. Gör. Dr. Veli BAKIRCIOĞLU 'na, farklı konularda fikir alışverişimde bulunarak yürüttüğümüz çalışmalar için Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin BİLGİÇ 'e ve desteklerini hiç esirgemeyen tüm mesai arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

En önemlisi; iyi bir eğitim alabilmem adına hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan, maddi ve manevi hep desteklerini hissettiğim değerli babama ve rahmetli anneme, bu zorlu süreçte sabırla hep yanımda olan kıymetli eşime, sevgili oğluma ve kardeşlerime en kalbi duygularımla teşekkür ederim.

Muhammed Arif ŞEN
KONYA-2020

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **ix**

ÇİZELGELER LİSTESİ ..... **xv**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **xvi**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Motivasyon 4
1.2. Literatüre Yapılan Katkılar 7
2.1. Güncel Dört Ayaklı Robotlara Genel Bakış 15
2.2. Modelleme, Kontrol ve Eyleyiciler ile İlgili Literatür Çalışmaları 28
2.3. Engebeli Yüzeylerde Yürüyüş ile İlgili Literatür Çalışmaları 36
2.4. Yürüyüş Simülasyonu ile İlgili Literatür Çalışmaları 40

3. DÖRT AYAKLI BİR ROBOTUN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ **45**

3.1. Genel Formülasyon Teorik Esaslar 45
3.2. Tasarım Kriterleri ve Fiziksel Modeli 49
3.3. Kinematik Analiz 53
3.3.1. İleri kinematik analiz 53
3.3.2. Ters kinematik analiz 54
3.3.3. Sayısal kinematik hesaplama sonuçları 55
3.4. Dinamik Analiz 58
3.4.1. Zemin ile ayak ucunun etkileşim modeli 63

4. ADIM HAREKETİNİN OPTİMAL KONTROLÜ **65**

4.1. Kontrolcü Tasarımda Kullanılan Optimizasyon Algoritmaları 65
4.1.1. Genetik algoritma (GA) 65
4.1.2. Parçacık sürü algoritması (PSO) 66
4.1.3. Arı algoritması (AA) 67
4.1.4. Bozkurt algoritması (BA) 68
4.2. Bacak Yapısının Modellenmesi 72
4.2.1. Katı model üzerinden dinamik modelin elde edilmesi 72
4.2.2. Durum-uzay modelinin elde edilmesi 73
4.2.3. Referans adım yörüngesinin tasarımı 75
4.3. PID Kontrolcü Tasarımı ve Optimizasyonu 77
4.4. Hibrit LQR-PID Kontrolcü Tasarımı ve Optimizasyonu 81
4.5. Bulanık Mantık Kontrolcü Tasarımı ve Optimizasyonu 87
4.6. Engelli Yörüngede PID Tabanlı Empedans Kontrolcü Tasarımı 97

4.7. Üç Uzuvlu Gerçekçi Bacak Modellenmesi ve Kesir Dereceli PID (PIλDμ) Kontrolcü Tasarımı 101

5. DÖRT AYAKLI ROBOTLARIN YÜRÜYÜŞÜ 109

5.1. Yürüyüşe Genel Bakış ve Temel Teorik Esaslar 110
5.2. Dört Ayaklı Yürüyüş Çeşitleri 116
5.3. Yürüyüş Planlaması ve Kontrolü 127

6. DÖRT AYAKLI ROBOTUN DİNAMİK MODELLENMESİ VE YÜRÜYÜŞ SİMÜLASYONLARI 135

6.1. Çok Kütleli Dinamik Modelin Oluşturulması ve Eş Simülasyon 137
6.2. Adaptif PD Tork Kontrolcü Tasarımı 142
6.3. Düz Zeminde Yürüyüş Simülasyonu 147
6.3.1. Statik yürüyüşün sayısal çözümleri 149
6.3.2. Tırıs yürüyüşün sayısal çözümleri 158
6.3.3. Rahvan yürüyüşün sayısal çözümleri 165
6.3.4. Eşkin yürüyüşün sayısal çözümleri 173
6.4. Engebeli Parkurda Yürüyüş Simülasyonu 181
6.4.1. Ayak ucunun empedans tabanlı konum-kuvvet denetimi ve gövdenin denge kontrolü 184
6.4.2. Engebeli yürüyüş parkurunun tasarımı 187
6.4.3. Engebeli zeminlerde yürüyüşün sayısal çözümleri 188

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 202

KAYNAKLAR 210

ÖZGEÇMİŞ 229

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. a) İlk otonom yürüyen robot '*Phony Pony'*, **b)** Dört ayaklı robot *'BigDog'* ... 1
Şekil 1.2. a) Tek (one leg), **b)** İki (biped), **c)** Altı (six legs) ve **d)** Dört (quadruped) ayaklı robotlar ... 6
Şekil 2.1. Düzensiz arazide bacaklı sistemlerin performansı (Remy, 2011) ... 14
Şekil 2.2. Dört ayaklı otonom makine *Walking Truck* ... 15
Şekil 2.3. Raibert tarafından geliştirilen **a)** tek, **b)** iki ve **c)** dört ayaklı robotlar ... 16
Şekil 2.4. Elektrik tahrikli dört ayaklı robotlar, **a)** *Scout I* ve **b)** *Scout II* ... 17
Şekil 2.5. Hidrolik tahrikli dört ayaklı robotlar, **a)** *KenKen I* ve **b)** *KenKen II* ... 17
Şekil 2.6. Küçük ve büyük boyutlu dört ayaklı robotlar, **a)** *Tekken II* ve **b)** *KOLT* ... 18
Şekil 2.7. Boston Dynamics firmasının ilk robotu, **a)** BigDog-2005, **b)** BigDog-2006 ve **c)** BigDog-2008 ... 19
Şekil 2.8. Yay eklenmiş ters sarkaç modeli (SLIP) ... 28
Şekil 2.9. a) Sanal model kontrollü yürüyüş mekanizması **b)** Kayan nokta tabanlı robot modeli ... 30
Şekil 2.10. ETH Zürih Enstitüsünde geliştirilen **a)** *StarlETH* ve **b)** *ANYmal* robotlarına ait eyleyiciler ... 32
Şekil 2.11. ETH Zürih Enstitüsünde geliştirilen **a)** *StarlETH* ve **b)** *ANYmal* robotlarının bacak yapıları ... 32
Şekil 2.12. İtalyan IIT Enstitüsünde geliştirilen **a)** *HyQ* ve **b)** *HyQ-REAL* robotlarına ait eyleyiciler ... 34
Şekil 2.13. İtalyan IIT Enstitüsünde geliştirilen **a)** *HyQ* ve **b)** *HyQ-REAL* robotlarının bacak yapıları ... 34
Şekil 2.14. a) Aktif/pasif eklem yapısına sahip model **b)** Pnömatik tahrikli biyonik ... 35
Şekil 2.15. *LittleDog* robotunun engebeli zeminde yürüyüşü ... 36
Şekil 2.16. *HyQ* robotunun ayak ucu reaktif yöntem ile **a)** basamak aşması ve **b)** eğimli zeminde hareketi ... 37
Şekil 2.17. *StarlETH* robotunun temas kuvvetlerine dayalı **a)** engebeli ve **b)** eğimli zeminlerde hareketi ... 37
Şekil 2.18. *HyQ* robotunun **a)** tepki kuvvetleri ve **b)** adım yörüngesinin güncellenmesi temelli hareketi ... 38
Şekil 2.19. a) *HyQ* ve **b)** *ANYmal* robotlarının engebeli zeminlerde gerçek zamanlı (online) haritalama temelli hareketi ... 39

Şekil 2.20. *HyQ* robotunun engebeli parkurda (rampa, basamak ve boşluk) yürüyüşü . 40
Şekil 2.21. Düz zeminde yürüyüş ile ilgili simülasyon çalışmalarına ait görseller..... 42
Şekil 2.22. Engebeli parkurda yürüyüş ile ilgili simülasyon çalışmalarına ait görseller 44
Şekil 3.1. ZYX Euler Açıları yöntemine ait temel rotasyon matrisleri 46
Şekil 3.2. a) Katı cismin kinematiği ve **b)** Katı cismin dinamiği..... 47
Şekil 3.3. a) Genişleyen Tip (*HyQ2max*) ve **b)** Sıralı Tip (*StarlETH*) eklem dizilimi .. 50
Şekil 3.4. a) M tipi, **b)** X Tipi ve **c)** O Tipi bacak konfigürasyonları 51
Şekil 3.5. Dört ayaklı robotun (4AR) fiziksel ve kinematik yapısı 52
Şekil 3.6. Yay-damper tabanlı Yumuşak Kontak ayak ucu etkileşim modeli..... 64
Şekil 4.1. Arı Algoritmasının **a)** parametreleri, **b)** akış şeması ve **c)** salınım dansı..... 67
Şekil 4.2. Bozkurt Algoritmasının **a)** hiyerarşisi, **b)** akış kodu ve **c)** avlanma 69
Şekil 4.3. Bozkurt Algoritmasının **a)** 2D, **b)** 3D pozisyon vektörleri ve **c)** konum güncellemesi 70
Şekil 4.4. 2-DoF bacağa ait **a)** fiziksel model ve **b)** parametreleri..... 72
Şekil 4.5. a) Simscape'de oluşturulan **a)** dinamik model ve **b)** modelleme aşamaları .. 73
Şekil 4.6. a) Adım yörüngesi, **b)** parametreleri ve **c)** adım hareketine ait görseller 75
Şekil 4.7. Ayak ucu yörüngesinin PID kontrolü ve optimizasyon şeması 78
Şekil 4.8. Optimal PID kontrolde **a)** ayak ucu yörüngesi, **b)** üst ve **c)** alt eklemlerin açısal konum grafikleri 80
Şekil 4.9. Optimal PID kontrolde **a)** üst ve **b)** alt eklemlerin tork-açısal hız grafikleri . 80
Şekil 4.10. Optimal PID kontrolde **a)** yörünge takip hatları ve **b)** yakınsamalar..... 81
Şekil 4.11. Ayak ucu yörüngesinin Hibrit LQR-PID kontrolü ve optimizasyon şeması 82
Şekil 4.12. Optimal LQR-PID kontrolde **a)** ayak ucu yörünge, **b)** üst ve **c)** alt eklem açısal konum grafikleri 85
Şekil 4.13. Optimal LQR-PID kontrolde **a)** üst ve **b)** alt eklemlere ait tork-açısal hız grafikleri..... 86
Şekil 4.14. Optimal LQR-PID kontrolde **a)** yörünge takip hatları ve **b)** yakınsamalar . 86
Şekil 4.15. Ayak ucu yörüngesinin BMK yapısı ve optimizasyon şeması..... 88
Şekil 4.16. BMK ön tasarıma ait **a)** üyelik fonksiyonları, **b)** kontrol yüzey grafiği ve **c)** kural tabanı..... 89
Şekil 4.17. BMK **a)** üçgen üyelik fonksiyonları ve **b)** kural tabanının ayarlanması..... 91
Şekil 4.18. Optimal BMK1 üyelik fonksiyonları ve yüzey grafikleri, **a)** AA ve **b)** GA 92
Şekil 4.19. Optimal BMK2 üyelik fonksiyonları ve yüzey grafikleri, **a)** AA ve **b)** GA 93
Şekil 4.20. BMK **a)** ayak ucu yörünge, **b)** üst ve **c)** alt eklem açısal konum grafikleri . 95

Şekil 4.21. BMK **a)** üst ekleme ve **b)** alt ekleme ait tork-açısal hız grafikleri 95
Şekil 4.22. BMK optimizasyonunda **a)** yörünge takip hatları ve **b)** yakınsamalar 96
Şekil 4.23. Optimal BMK, LQR-PID ve PID kontrolcülerin adım yörünge takip performansları 96
Şekil 4.24. a) PID-Emp kontrolcü ait genel şema ve **b)** engelli adım hareketine ait görseller..... 98
Şekil 4.25. Kontak kuvvetlerini de kapsayan bacağın Simscape modeli 99
Şekil 4.26. Empedans kontrolcünün **a)** şematik görseli ve b**)** Simulink blok şemaları.. 99
Şekil 4.27. PID-Emp kontrolcü **a)** ayak ucu yörüngesi, **b)** üst ve **c)** alt eklem açısal konum grafikleri..... 100
Şekil 4.28. PID-Emp Kontrolcü **a)** üst ve **b)** alt ekleme ait tork değişim grafikleri..... 101
Şekil 4.29. 3-DoF bacağın **a)** fiziksel modeli **b)** Simscape blok şeması ve **c)** modellenmesi ve kontrolü..... 103
Şekil 4.30. PID, PIλDμ kontrolcülere ait **a)** matematiksel ifadeler ve **b)** blok şemalar105
Şekil 4.31. 3-DoF bacak modellerin kontrolsüz cevapları 105
Şekil 4.32. 3-DoF bacak için tasarlanan PID ve PIλDμ kontrolcü genel blok şeması . 106
Şekil 4.33. PID ve PIλDμ kontrolü ile eklemlerin açısal konum cevapları..... 107
Şekil 4.34. PID ve PIλDμ kontrolcülerin ürettiği tork girişlerine ait değişimler 108
Şekil 5.1. Bir atın **a)** tırıs yürüyüş ve **b)** dörtnala koşma hareketin sıralı fotoğrafları . 109
Şekil 5.2. Chebyshev'in geliştirdiği **a)** yürüme mekanizması ve **b)** yürüyen makine.. 110
Şekil 5.3. Chebyshev'in geliştirdiği **a)** yürüme mekanizması ve **b)** yürüyen makina.. 111
Şekil 5.4. Dört ayaklı yürüyüş çeşitlerine göre destek poligonu 115
Şekil 5.5. Dört ayaklı yürüyüşte **a)** Destek poligonu ve **b)** Kararlılık marjı 115
Şekil 5.6. Karakteristiklerine göre temel yürüyüş sınıflandırması 118
Şekil 5.7. Dört ayaklı statik yürüyüşe ait bacakların hareket dizilimi..... 118
Şekil 5.8. Statik yürüyüşe ait faz farkları, yürüyüş diyagramı ve ayak dizilimleri 120
Şekil 5.9. Tırıs yürüyüşe ait faz farkları, yürüyüş diyagramı ve ayak dizilimleri 121
Şekil 5.10. Rahvan yürüyüşe ait faz farkları, yürüyüş diyagramı ve ayak dizilimi..... 122
Şekil 5.11. Eşkin yürüyüşe ait faz farkları, yürüyüş diyagramı ve ayak dizilimi..... 123
Şekil 5.12. Dörtnala koşmaya ait faz farkları, yürüyüş diyagramı ve ayak dizilimi 124
Şekil 5.13. Sıçrama ait faz farkları, yürüyüş diyagramı ve sıralaması 125
Şekil 5.14. Temel dört ayaklı yürüyüşlere ait **a)** görseller ve **b)** faz farkları 126
Şekil 5.15. MÖÜ mimarisini şematik gösterimi ve tırıs yürüyüşe ait bağlantı matrisi 129
Şekil 5.16. Bacaklı robotların yürüyüş kontrolünün genel blok diyagramı..... 131

Şekil 5.17. a) Modern ZMP uygulaması ve **b)** Çok ayaklı robotun destek üçgeni 132
Şekil 6.1. 4AR dinamik modelin oluşturulma aşamalarına ait görseller 140
Şekil 6.2. Simulink ortamına aktarılan dinamik modele ait ekran görüntüsü 141
Şekil 6.3. 4AR'ın düz zeminde yürüyüş simülasyonuna ait genel kontrol şeması..... 144
Şekil 6.4. Adaptif PD tabanlı tork kontrolcü **a)** Simulink modeli ve **b)** alt bloğu 147
Şekil 6.5. Yürüyüş simülasyon süreçlerinin akış şeması..... 148
Şekil 6.6. Statik yürüyüş eş simülasyonuna ait anlık ekran görüntüleri..... 150
Şekil 6.7. Statik yürüyüş – Gövde durum değişkenlerine ait sonuçlar..... 151
Şekil 6.8. Statik yürüyüş – Gövde durum değişkenlerine ait hatalar 151
Şekil 6.9. Statik yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait açısal konumlar 152
Şekil 6.10. Statik yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait açısal konum hataları..... 152
Şekil 6.11. Statik yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait tork girişleri 152
Şekil 6.12. Statik yürüyüş – Baldır eklemlerine ait açısal konumlar 153
Şekil 6.13. Statik yürüyüş – Baldır eklemlerine ait açısal konum hataları..... 153
Şekil 6.14. Statik yürüyüş – Baldır eklemlerine ait tork girişleri 153
Şekil 6.15. Statik yürüyüş – Ayakuçlarına etki eden zemin tepki kuvvetleri..... 154
Şekil 6.16. Statik yürüyüş – Ayakuçlarına ait adım yörüngeleri..... 154
Şekil 6.17. Statik yürüyüş – Ayakuçlarına ait adım yörünge hataları 155
Şekil 6.18. Statik yürüyüş – LF ve RF ayakuçlarının x-z konumları ve hataları 155
Şekil 6.19. Statik yürüyüş – LH ve RH ayakuçlarının x-z konumları ve hataları 155
Şekil 6.20. Adaptif ve sabit kazançlı PD tork kontrolcünün karşılaştırılması..... 157
Şekil 6.21. Tırıs yürüyüş eş simülasyonuna ait anlık ekran görüntüleri..... 159
Şekil 6.22. Tırıs yürüyüş – Gövde durum değişkenlerine ait sonuçlar..... 159
Şekil 6.23. Tırıs yürüyüş – Gövde durum değişkenlerine ait hatalar 160
Şekil 6.24. Tırıs yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait açısal konumlar 160
Şekil 6.25. Tırıs yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait açısal konum hataları 161
Şekil 6.26. Tırıs yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait tork girişleri..... 161
Şekil 6.27. Tırıs yürüyüş – Baldır eklemlerine ait açısal konumlar 161
Şekil 6.28. Tırıs yürüyüş – Baldır eklemlerine ait açısal konum hataları 162
Şekil 6.29. Tırıs yürüyüş – Baldır eklemlerine ait tork girişleri..... 162
Şekil 6.30. Tırıs yürüyüş – Ayakuçlarına etki eden zemin tepki kuvvetleri 163
Şekil 6.31. Tırıs yürüyüş – Ayakuçlarına ait adım yörüngeleri..... 163
Şekil 6.32. Tırıs yürüyüş – Ayakuçlarına ait adım yörünge hataları..... 163
Şekil 6.33. Tırıs yürüyüş – LF ve RF ayakuçlarının x-z konumları ve hataları 164

Şekil 6.34. Tırıs yürüyüş – LH ve RH ayakuçlarının x-z konumları ve hataları 164
Şekil 6.35. Rahvan yürüyüş eş simülasyonuna ait anlık ekran görüntüleri 166
Şekil 6.36. Rahvan yürüyüş – Gövde durum değişkenlerine ait sonuçlar 167
Şekil 6.37. Rahvan yürüyüş – Gövde durum değişkenlerine ait hatalar 167
Şekil 6.38. Rahvan yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait açısal konumlar 168
Şekil 6.39. Rahvan yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait açısal konum hataları 168
Şekil 6.40. Rahvan yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait tork girişleri 168
Şekil 6.41. Rahvan yürüyüş – Baldır eklemlerine ait açısal konumlar 169
Şekil 6.42. Rahvan yürüyüş – Baldır eklemlerine ait açısal konum hataları 169
Şekil 6.43. Rahvan yürüyüş – Baldır eklemlerine ait tork girişleri 169
Şekil 6.44. Rahvan yürüyüş – Ayakuçlarına etki eden zemin tepki kuvvetleri 170
Şekil 6.45. Rahvan yürüyüş – Ayakuçlarına ait adım yörüngeleri 170
Şekil 6.46. Rahvan yürüyüş – Ayakuçlarına ait adım yörünge hataları 171
Şekil 6.47. Rahvan yürüyüş – LF ve RF ayakuçlarının x-z konumları ve hataları 171
Şekil 6.48. Rahvan yürüyüş – LH ve RH ayakuçlarının x-z konumları ve hataları 171
Şekil 6.49. Eşkin yürüyüş eş simülasyonuna ait anlık ekran görüntüleri 174
Şekil 6.50. Eşkin yürüyüş – Gövde durum değişkenlerine ait sonuçlar 174
Şekil 6.51. Eşkin yürüyüş – Gövde durum değişkenlerine ait hatalar 175
Şekil 6.52. Eşkin yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait açısal konumlar 175
Şekil 6.53. Eşkin yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait açısal konum hataları 176
Şekil 6.54. Eşkin yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait tork girişleri 176
Şekil 6.55. Eşkin yürüyüş – Baldır eklemlerine ait açısal konumlar 176
Şekil 6.56. Eşkin yürüyüş – Baldır eklemlerine ait açısal konum hataları 177
Şekil 6.57. Eşkin yürüyüş – Baldır eklemlerine ait tork girişleri 177
Şekil 6.58. Eşkin yürüyüş – Ayakuçlarına etki eden zemin tepki kuvvetleri 178
Şekil 6.59. Eşkin yürüyüş – Ayakuçlarına ait adım yörüngeleri 178
Şekil 6.60. Eşkin yürüyüş – Ayakuçlarına ait adım yörünge hataları 178
Şekil 6.61. Eşkin yürüyüş – LF ve RF ayakuçlarının x-z konumları ve hataları 179
Şekil 6.62. Eşkin yürüyüş – LH ve RH ayakuçlarının x-z konumları ve hataları 179
Şekil 6.63. 4AR'ın engebeli yürüyüş simülasyonuna ait genel kontrol blok şeması ... 183
Şekil 6.64. Engebeli yüzeyler için tasarlanan empedans kontrolcü blok şeması 185
Şekil 6.65. **a)** Yükselti, **b)** boşluk ve **c)** rampa için ZMP tabanlı gövde yönelimleri ... 186
Şekil 6.66. Engebeli yürüyüş parkuru, düzensizlikler ve boyutları 187
Şekil 6.67. Engebeli parkruda yürüyüşe ait anlık ekran görüntüleri 191

Şekil 6.68. Engebeli yürüyüş – Gövde durum değişkenlerine ait sonuçlar 191
Şekil 6.69. Engebeli yürüyüş – Gövde durum değişkenlerine ait hatalar..... 192
Şekil 6.70. Engebeli yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait açısal konumlar..... 192
Şekil 6.71. Engebeli yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait açısal konum hataları..... 193
Şekil 6. 72. Engebeli yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait tork girişleri 193
Şekil 6.73. Engebeli yürüyüş – Baldır eklemlerine ait açısal konumlar..... 193
Şekil 6.74. Engebeli yürüyüş – Baldır eklemlerine ait açısal konum hataları..... 194
Şekil 6.75. Engebeli yürüyüş – Baldır eklemlerine ait tork girişleri 194
Şekil 6.76. Engebeli yürüyüş – Ayakuçlarına etki eden zemin tepki kuvvetleri..... 195
Şekil 6.77. Engebeli yürüyüş – Ayakuçlarına ait adım yörüngeleri 195
Şekil 6.78. Engebeli yürüyüş – Ayakuçlarına ait adım yörünge hataları 195
Şekil 6.79. Engebeli yürüyüş – LF, RF ayak ucu konumları ve hatalar (Yükselti)..... 196
Şekil 6.80. Engebeli yürüyüş – LH,RH ayak ucu konumları ve hatalar (Yükselti) 196
Şekil 6.81. Engebeli yürüyüş – LF, RF ayak ucu konumları ve hatalar (Eğim)..... 197
Şekil 6.82. Engebeli yürüyüş – LH, RH ayak ucu konumları ve hatalar (Eğim) 197
Şekil 6.83. Engebeli yürüyüş – LF, RF ayak ucu konumları ve hatalar (Boşluk)..... 197
Şekil 6.84. Engebeli yürüyüş – LH, RH ayak ucu konumları ve hatalar (Boşluk)..... 198
Şekil 6.85. Engebeli yürüyüş – LF, RF ayak ucu konumları ve hatalar (Kanal)..... 198
Şekil 6.86. Engebeli yürüyüş – LH, RH ayak ucu konumları ve hatalar (Kanal) 198
Şekil 6.87. Engebeli yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait tork-açısal hız eğrileri..... 201
Şekil 6.88. Engebeli yürüyüş – Baldır eklemlerine ait tork-açısal hız eğrileri..... 201
Şekil 7.1. İtalyan Teknoloji Enstitüsü (ITT) − HyQ robotu 209

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1.1. Literatüre yapılan katkıların konu başlıklarına göre özeti 11
Çizelge 2.1. Bacaklı sistemlerin tekerlekli sistemlere göre avantajları 13
Çizelge 3.1. Temel semboller ve açıklamaları 45
Çizelge 3.2. Dört ayaklı robotun (4AR) fiziksel parametreleri 52
Çizelge 3.3. Ters kinematik programdan elde edilen örnek hesaplamalar ve grafikler . 56
Çizelge 4.1. PID kontrolcü optimizasyonda kullanılan algoritmalara ait parametreler . 78
Çizelge 4.2. PID kontrolcülere ait optimal kazançlar ve sonuçlar 79
Çizelge 4.3. Hibrit LQR-PID kontrolcü optimizasyonda kullanılan algoritmalara ait parametreler 83
Çizelge 4.4. Hibrit LQR-PID kontrolcüye ait kazançlar ve optimizasyon sonuçları 85
Çizelge 4.5. BMK optimizasyonu için kullanılan algoritmalara ait parametreler 91
Çizelge 4.6. BMK1 ve BMK2 ön tasarım ve optimal ölçeklendirme kazançları 93
Çizelge 4.7. Optimal BMK1 ve BMK2 kural tabanları 94
Çizelge 4.8. PID-Em kontrolcüye ait kazançlar ve katsayılar 99
Çizelge 4.9. 3-DoF bacağa ait parametreler ve değerleri 104
Çizelge 4.10. PID ve PIλDμ kontrolcü parametreleri ve cevap özellikleri 107
Çizelge 5.1. Yürüyen mekanizmalar ve yürüyüş ile ilgili temel tarihsel gelişmeler 111
Çizelge 6.1. Statik yürüyüş boyunca bacaklara ait faz farkları 149
Çizelge 6.2. Statik yürüyüş – Sistem değişkenlere ait maks. ve ort. hata değerleri 156
Çizelge 6.3. Tırıs yürüyüş boyunca bacaklara ait faz farkları 158
Çizelge 6.4. Tırıs yürüyüş – Sistem değişkenlere ait maks. ve ort. hata değerleri 165
Çizelge 6.5. Rahvan yürüyüş boyunca bacaklara ait faz farkları 166
Çizelge 6.6. Rahvan yürüyüş – Sistem değişkenlere ait maks. ve ort. hata değerleri .. 172
Çizelge 6.7. Eşkin yürüyüş boyunca bacaklara ait faz farkları 173
Çizelge 6.8. Eşkin yürüyüş – Sistem değişkenlere ait maks.ve ort. hata değerleri 180
Çizelge 6.9. Engebeli yürüyüş – Sistem değişkenlere ait maks. ve ort. hata değerleri 200

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler*

θ_{LFU}	:	Sol ön bacak uyluk ekleminin açısal konumu
θ_G	:	Gövdenin yunuslama açısı
x_G	:	Gövdenin x doğrultusundaki konumu
z_G	:	Gövdenin z doğrultusundaki konumu (yerden yüksekliği)
$\dot{x}_G$	:	Gövdenin (robotun) x doğrultusundaki hızı
$F_{c_{LF}}$	:	Sol ön bacak ayak ucunun yüzey ile kontak kuvveti
τ_{LFU}	:	Sol ön bacak uyluk ekleminin tork girişi
K	:	LQR kontrolcüye ait kazanç matrisi
$x_{E_{LF}}$	:	Ayak ucunun x doğrultunuzdaki konumu
$z_{E_{LF}}$	:	Ayak ucunun z doğrultunuzdaki konumu
$e\theta_{LFU}$	:	Sol ön bacak uyluk ekleminin açısal konum hatası
$e\theta_G$	:	Gövde yunuslama açısına ait hata
β_{LF}	:	Sol ön bacağın faz farkı
T	:	Adım süresi (periyodu)
t_{st}	:	Adımın destek evresine ait süre
t_{sw}	:	Adımın uçuş evresine ait süre
J	:	Optimizasyonun amaç fonksiyonu
α_{statik}	:	Statik yürüyüşe ait görev faktörü
$V_{G_{statik}}$	:	Statik yürüyüşe ait ortalama gövde hızlı
${}^{O}_{G}T$	:	Gövdenin global koordinat sistemine göre dönüşüm matrisi
L	:	Adım yörüngesinin uzunluğu
H	:	Adım yörüngesinin genişliği
k_p, k_i, k_d	:	PID kontrolcünün oransal, türevsel, integral kazançları
Q,R	:	LQR kontrolcünün ağırlık matrisleri
t	:	Zaman
$u(t)$	:	Kontrolcü girişi
M_e, B_e, K_e	:	Empedans kontrolcünün kütle, sönüm ve sertlik kazanç katsayıları
q	:	Genelleştirilmiş koordinatlar

* Tezde sıklıkla kullanılan simgelere yer verilmiştir. Her simgenin açıklaması, ilgili metinde yapılmıştır.

Kısaltmalar[*]

4AR	:	Tez Kapsamında Geliştirilen Dört Ayaklı Robot
AA	:	Arı Algoritması
BA	:	Bozkurt Algoritması
BD	:	Boston Dynamics Kurumu
BMK	:	Bulanık Mantık Kontrolcü
CAD	:	Bilgisayar Destekli Tasarım
COM	:	Gövde Ağırlık Merkezi
CPG (MÖÜ)	:	Merkezi Örüntü Üretimi
CPU	:	Merkezî İşlem Birimi
DARPA	:	Amerikan Ordusu İleri Savunma Araştırma Projeleri Ajansı
D-H	:	Denavit-Hartenberg Yöntemi
DoF	:	Serbestlik Derecesi
ETH Zürih	:	Zürih Federal Teknoloji Enstitüsü
GA	:	Genetik Algoritma
IIT	:	İtalyan Teknoloji Enstitüsü
LQR	:	Doğrusal Karesel Regülatör Kontrolcü
MATLAB	:	Sayısal Hesaplama ve Dördüncü Nesil Programlama Yazılımı
MIMO	:	Çok Girişli-Çok Çıkışlı Sistem
MSC ADAMS	:	Mekanik Sistemlerin İleri Dinamik Analiz Programı
PD	:	Oransal-Türevsel Kontrolcü
PID	:	Oransal-İntegral-Türevsel Kontrolcü
PID-Emp	:	PID Tabanlı Empedans Kontrolcü
PIλD (FOPID)	:	Kesir Dereceli PID Kontrolcü
PSO	:	Parçacık Sürü Algoritması
SEA	:	Seri Elastik Eyleyici
SIMO	:	Tek Girişli-Çok Çıkışlı Sistem
SLIP	:	Yay Eklenmiş Ters Sarkaç Modeli
ZMP	:	Sıfır Moment Noktası
Z-N	:	Ziegler-Nichols Yöntemi

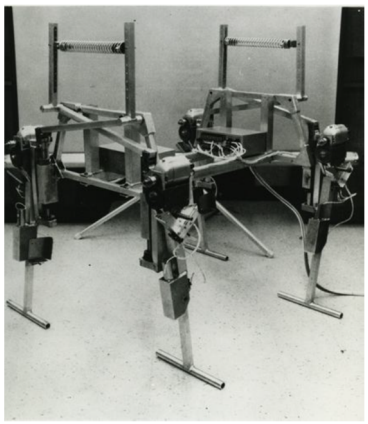
[*] Tezde sıklıkla kullanılan kısaltmalara yer verilmiştir. Her kısaltmanın açıklaması, ilgili metinde yapılmıştır.

1. GİRİŞ

Robot kelimesi ilk olarak, *Karel Capel* isimli oyun yazarının 1920'de yazdığı "*Rossum's Üniversal Robots*" isimli oyunda geçmektedir. Atılım Üniversitesi Robot Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi (RoTAM) ise robotları, '*Canlıların işlev ve yaşam biçimlerini taklit eden; programlanabilir yetenek ve zekâya sahip, gelişmiş ve çok disiplinli ögeler içeren makineler*' olarak tanımlamıştır.

Mobil robotlar, literatürde yeni olmamasına rağmen, gelişen teknoloji ile çeşitlenmekte ve halen araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Dış çevreye ve yol şartlarına bağlı olmadan neredeyse her yerde hareket edebilen ayaklı yürüyen sistemler kurma fikri, araştırmacıları etkilemiştir. Bacaklı yürüyüşün (legged locomotion) sahip olduğu yüksek hareket kabiliyeti; engebeli arazi şartlarında arama-kurtarma, yük ve canlı taşıma vb. gibi önemli görevlerde, geleneksel yöntemlere kıyasla büyük avantaj sağlamakta ve bu alandaki çalışmaları motive etmektedir. Yaklaşık 50 yıl önce geliştirilen ilk otonom yürüyen robottan (McGhee, 1967; Frank, 1968) (Şekil 1.1.a) sonra, gündelik sosyal hayattaki ve endüstriyel alanlardaki sorunların çözümleri için yürüyen sistemlere olan talep artmaya başlamıştır. Özellikle doğal afetlerde sağlayabileceği faydalar dikkate alınarak, bu konuyla ilgili farklı ve büyük ölçekli projeler başlatılmıştır. ABD ordusu destekli DARPA tarafından geliştirilen ve bu alandaki çalışmalara temel teşkil eden *'BigDog'* (Raibert ve ark., 2008) (Şekil 1.1.b) isimli robot, doğadaki canlılardan esinlenerek geliştirilen dört ayaklı (Quadruped) robot çalışmalarına farklı bir boyut kazandırmış ve bu alandaki çalışmaları hızlandırmıştır. Bacaklı robotik çalışmaları; çok yönlülük, hız, verimlilik, sağlamlık, boyut ve çevreyle etkileşim gibi kriterler doğrultusunda, ileri teknolojinin sağladığı imkânlar ölçüsünde sürdürülmektedir.

a)



b)

Şekil 1.1. a) İlk otonom yürüyen robot '*Phony Pony'*, **b)** Dört ayaklı robot *'BigDog'*

Dört ayaklı robotlar; çok serbestlik dereceli dinamik yapısı sayesinde, gelişmiş ve esnek hareket kabiliyetine sahip, engebeli ve insanın ulaşamayacağı alanlarda emniyet ve avantaj sağlayan, kompleks ve kararsız yapısı nedeniyle kontrol alanında öğretici yönü yüksek, çevik ve güçlü, oldukça güncel ve popülerliğini giderek artıran, yürüyebilen mobil sistemlerdir. Tekerlekli ve paletli sistemlere kıyasla karmaşık kinematik/dinamik yapısı nedeniyle bu robotların; tasarımı, modellenmesi, kontrol teorisi, yörünge ve yürüyüş planlaması, çevreyle etkileşimi vb. gibi birçok konu geliştirilmeye açıktır.

Bu tez çalışması kapsamında geniş kaynak araştırması sunulmuş, dört ayaklı bir robotun; detaylı kinematik/dinamik analizi, tasarımı ve deneysel uygulaması yapılmış robotlara ait veriler kullanılarak dinamik modellenmesi, adım hareketinin özgün yaklaşımlar ile optimal kontrolü, dinamik modelin ve kontrol sisteminin farklı yazılımlar üzerinden eş zamanlı yürütülmesi ile robotun düz ve engebeli parkurda, farklı çeşitlerde yürüyüşlerine ait benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışması genel olarak, alt başlıklar içeren yedi bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde; tezin genel hatları açıklandıktan sonra, motivasyonu ve literatüre yapılan katkılardan bahsedilmiştir. Bölüm 2'de literatürde öne çıkan, güncel dört ayaklı robotların tarihsel gelişimi ve teknik bilgileri verilmiş, sistemin modellenmesi, kontrolü ve yürüyüşü gibi tez kapsamında incelenen konulara ait teorik ve uygulamalı çalışmaları özetleyen geniş bir literatür taraması sunulmuştur.

Bölüm 3'te matematiksel modelleme için temel formülasyonlar açıklanmış, literatürdeki mevcut uygulamalı çalışmalar dikkate alınarak sistemin tasarım kriterleri ve parametreleri belirlenmiş, 4AR'ın fiziksel modeli tasarlanmıştır. 4AR'a ait tüm kinematik bağıntılar elde edilmiş ve MATLAB ortamına aktarılarak sistemin kinematik analizine yönelik bir program geliştirilmiştir. Bu programdan elde edilen çözümlemeler ve görseller sunularak kapsamlı bir ileri/ters kinematik analiz gerçekleştirilmiştir. 4AR'ın standart, kapalı form robot denklemi ve tüm bileşenlerine ait çözümlemeler klasik Newton-Euler metodu tabanlı elde edilmiş, sistemin matematiksel dinamiği detaylı olarak incelenmiştir. Ayaklı robotların yürüyüşünde en önemli hususlardan biri olan, ayak ucu ile zemin arasındaki etkileşimin tanımlanması ve modellenmesi ayrı bir başlıkta sunulmuştur.

Bölüm 4'te, yürüyüş çalışmalarına katkı sağlaması amacıyla, adım hareketinin yörünge denetimine yönelik optimal kontrolcü tasarımı ile ilgili kapsamlı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İki uzuvlu bir bacak yapısının dinamik modeli MATLAB/Simscape ortamında oluşturulmuş, bu model üzerinden Durum-Uzay formunda doğrusal

matematiksel modeli elde edilmiştir. Robotun dengesini koruyarak ve yürüyüş planına göre yürüyebilmesi, bacağın istenen yörüngede adım hareketini en az hata ile gerçekleştirebilmesine bağlıdır. Bu sebeple, adım hareketinde yörüngenin optimal kontrolüne yönelik, özgün bir yaklaşımlarla; PID kontrolcü, Hibrit LQR-PID kontrolcü, BMK (Bulanık Mantık Kontrolcü) tasarımları ve optimizasyonları önerilmiştir. Bacağın, adım hareketini minimum yörünge hatası ile gerçekleştirebilmesi amacıyla, önerilen kontrolcü kazançlarının/parametrelerinin sezgisel arama algoritmaları olan Arı ve Bozkurt Algoritmaları kullanılarak ayarlanmasına ve performanslarının Genetik ve Parçacık Sürü Algoritmaları ile kıyaslanmasına yönelik optimizasyon çalışmaları sunulmuştur. Önerilen kontrolcü ve optimizasyon algoritmalarının, birbirlerine ve literatüre göre, yörünge hatasını minimize etmedeki performansları değerlendirilmiştir. Engebeli yüzeylerde 4AR'ın yürüyüşüne yönelik ön çalışma olması amacıyla, engel tanımlanmış bir yörüngede adım hareketinin konum-kuvvet denetimi için PID tabanlı empedans kontrolcü geliştirilmiş, engel ve ayak ucu arasındaki dinamik etkileşim incelenmiştir. Ayrıca, literatürde öne çıkan deneysel uygulamalar dikkate alınarak belirlenen fiziksel boyutlara ve dinamik özelliklere sahip, üç uzuvlu bir bacağın dinamik modelli ve doğrusal durum-uzay modeli sunulmuştur. Bacağın doğrusal modeli üzerinden, kontrolcü çeşitliliğini artırmak amacıyla, daha önce önerilmeyen Kesir Dereceli PID (PIλDμ) tasarımı gerçekleştirilmiş, performansı klasik PID kontrolcü ile kıyaslanmıştır. Bu gerçeğe daha yakın bacak model üzerinde yapılan çalışmalar, 4AR'ın yürüyüş planlamasında ve PD tork kontrolcü kazançlarının belirlenmesinde hızlı ve etkili öngörüler elde etme imkânı sağlamıştır.

Bölüm 5'de yürüyüş ile temel bilgiler ve teorik esasalar verildikten sonra, dört ayaklı yürüyüş çeşitleri, planları ve kontrolü detaylı olarak açıklanmış, ilgili literatür çalışmaları üzerinde durulmuştur.

Bölüm 6'da, fiziksel ve geometrik parametreleri belirlenen sistemin CAD (bilgisayar destekli tasarım) ortamında tasarlanan katı modeli üzerinden, 4AR'ın dinamik modeli MSC ADAMS (çok kütleli dinamik sistemler modelleme ve analiz) programında elde edilmiştir. 4AR'ın ters kinematik çözümlemelerini, referans adım konumlarını, yürüyüş planlamasını ve PD tabanlı tork kontrolcü tasarımını kapsayan genel kontrol mimarisi MATLAB/Simulink ortamında geliştirilmiştir. 4AR'ın düz bir yüzeyde ve farklı engebeler içeren bir parkurda farklı çeşitlerde yürüyüşü, MSC ADAMS ve MATLAB/Simulink yazılımları eş zamanlı koşturulmasıyla (co-simulation) gerçekleştirilen benzetim çalışmaları ile detaylı analiz edilmiştir.

İlk olarak, bacakların ayrı ayrı ve sıralı bir şekilde adım attığı statik yürüyüş, çapraz veya yan bacakların eş zamanlı ve simetrik hareket ettiği sırasıyla tırıs ve rahvan yürüyüşler ve her bacağın birbirinden bağımsız ve asimetrik hareket gerçekleştirdiği eşkin yürüyüş olmak üzere dört farklı yürüyüş tipinde 4AR'ın engebesiz, düz bir yüzeyde yürüyüş analizi gerçekleştirilmiştir. Engebeli yüzeylerde yürüyüş simülasyon çalışmalarında ise; literatürdeki benzer çalışmalarda kullanılan dört farklı engebeden oluşan bir parkur tasarlanmış, adım yörüngesinin ve gövdenin konum/denge kontrolünün birlikte sağlandığı özgün bir yürüyüş kontrol algoritması önerilmiştir. Özelikle dengenin bozulduğu kararsız durumlarda, ayak ucu ile yüzey arasındaki konum-kuvvet kontrolü sağlamak için empedans kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Her bir yürüyüş simülasyonunu için; gövdeye ait oryantasyon ve konumlar, uzuvlara ait açısal konumlar, tork girişleri, her bir bacağa ait ayak ucu konumları gibi tüm durum değişkenlerine ait sayısal sonuçlar grafiksel olarak sunulmuş, çizelgeler ile geniş kapsamlı incelenmiştir.

Bölüm 7'de, tez kapsamında sunulan; 4AR'ın tasarımı, matematiksel ve dinamik modellenmesi, adım hareketinin optimal yörünge kontrolü ve optimizasyon teknikleri, yürüyüşün planlanması ve kontrol mimarisi ile iliği çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve tezin katkıları belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlar benzer çalışmalar ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu alanda, daha sonra ele alınması düşünülen çalışma konuları, önerilen yöntemlerin ve/veya sonuçların iyileştirilmeye, geliştirmeye açık yönleri gibi hususlar tartışılmıştır.

1.1. Motivasyon

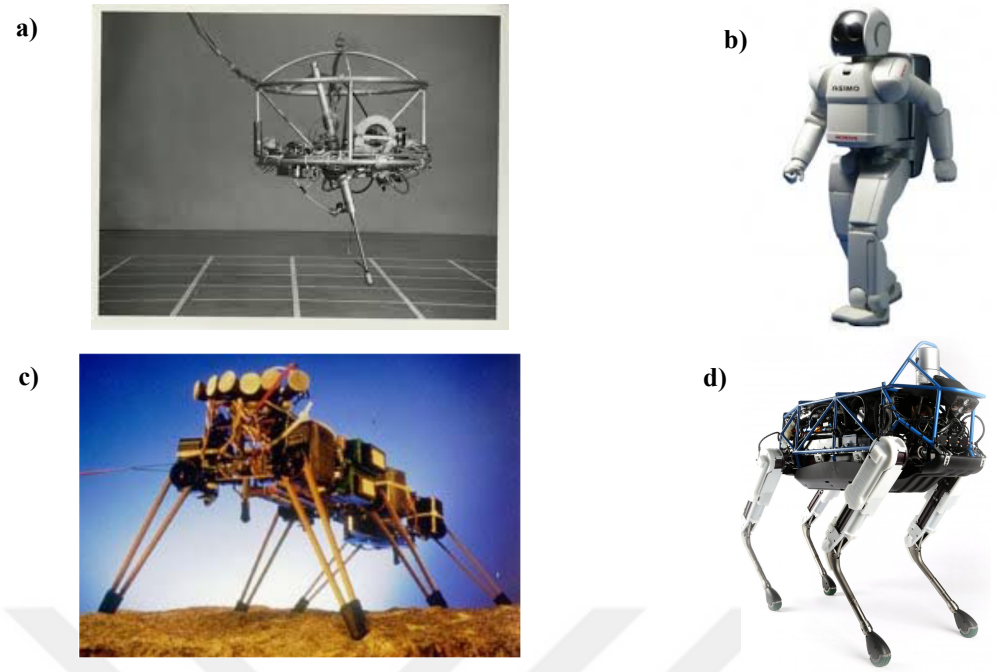
Geleneksel tekerlekli/paletli mobil robotlara kıyasla, belirli bir yol veya ray üzerinde ilerlemek zorunda olmadan, zorlu arazi şartlarında dahi yüksek hareket kabiliyeti sayesinde önemli görevleri yerine getiren bacaklı robotlar; biyolojik canlılara benzerliği sebebiyle insanların dikkatini çekmekte, geliştirilmeye müsait yönlerinin çeşitliliği sayesinde robotik alanındaki yerini giderek artırmaktadır.

Tekerlekli bir sistemin hareketi kötü koşullar ile sınırlı kalmak zorunda iken, tasarlanabilir bir bacak yapısı ve kontrol edilebilir bir yürüyüş ile bulunduğu zeminle etkileşimli ancak engeller ile kısıtlı olmadan hareket eden bacaklı robotlar, araştırmacıları heyecanlandırmakta ve motive etmektedir. Ancak, insanlara ve kendilerine zarar vermeyen, güvenli bir bacaklı robot geliştirmek teknolojik açıdan önemli ve uzun bir çaba gerektiren karmaşık bir görevdir.

Bacaklı bir robotun en az sayıda bacağa sahip olması, toplam gövde kütlesinin azalması ve bacaklar arası koordinasyonun kolaylaşması açısından avantajlıdır. Ayrıca, bacak sayısı azaldıkça zemin ile temas da azalacağı için robotun zorlu arazilerde hareketi daha uygun hale gelir. Ancak, bacaklı robotların en temel problemi olan denge problemi bacak sayısının azalmasıyla dramatik bir şekilde artmaktadır. Robotun dinamik olarak kararlı olabilmesi için ağırlık merkezinin yerini değiştirebilecek veya düzenleyici kuvvetler uygulayarak kendisi aktif dengeleyebilecek minimum bacak sayısına sahip olması gerekir. Bu sebeple bacaklı bir robotun inşa sürecinde tanımlanacak ilk özellik bacak sayısıdır. Bu sayı, stabilite ve güvenilirlik gibi robotun sahip olması gerekli temel özellikler ile hız, en az ağırlık ve maliyet gibi özel uygulama gereksinimleri arasındaki bir dengenin kurulması sonucu belirlenir.

Tek ayaklı robotlar (Şekil 1.2a), zemine tek bir noktadan temas halinde ve zıplayarak hareket ederler. Hareketiz halde dahi dengelenmeye muhtaç oldukça kararsız bir yapıdır. *Asimo* gibi iki ayaklı insansı robotlar (Şekil 1.2b), zemine ayak tabanları ile yüzey temas ettikleri için statik halde dengededir. Ancak yürüyüş sırasında bir ayak adım atarken diğer bacağın, tüm gövde ağırlığını destekleyecek ve dengeleyecek yapıda sahip olması gerekir. Altı ayaklı robotlar (Şekil 1.2c) (*Genghis-MIT*) ise, stabil bir yürüyüş ve kontrol edilebilirlik açısından en avantajlı robotlar olsa da bacak sayısının artması farklı problemleri beraberinde getirmektedir. Gövde dengesini garanti eden sayıdan fazla bacak kullanmak toplam kütlenin artmasına, bacaklar arası koordinasyonun karmaşıklaşmasına ve maliyetin yükselmesine sebep olmaktadır. Bacaklı bir robotun sahip olması gereken ideal bacak sayısı; kararlılık, karmaşıklık, toplam kütle ve maliyet açısından değerlendirildiğinde dört ayaklı robotların (Şekil 1.2d) (*Spot*) daha optimum çözümler sunabileceği görülmektedir. Serbest hareketli bir kütleyi dengede tutmak için en az üç noktadan kuvvet uygulamak gerekir. Benzer şekilde, statik kararlı bir yürüyüş için de en az üç noktadan zemine ile temas gerektirir. Dört ayaklı robotlarda bir bacak adım atarken diğer üç bacak zeminle temas halinde gövdeyi taşır ve hareket ettirir. Böylece, zemindeki ayaklar gövde dengesini garanti eden bir destek üçgeni oturarak robotun kararlı bir şekilde yürümesini sağlarlar.

Genel olarak dört ayaklı robotlar, tek ve iki ayaklı robotlara kıyasla daha kararlı ve güvenilir, altı ve daha fazla ayaklı robotlara kıyasla daha az karmaşık, hafif ve ucuz olabilmektedir. Diğer bir ifadeyle dört ayaklı robotların, güvenli ve kararlı bir yürüyüş ile kolay kontrol edilebilirlik ve toplam kütle arasında bir dengenin kurulabilmesi için gerekli en ideal bacak sayısına sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 1.2. a) Tek (one leg), **b)** İki (biped), **c)** Altı (six legs) ve **d)** Dört (quadruped) ayaklı robotlar

Dört ayaklı robotların, tekerlekli sistemlere kıyasla en belirgin avantajı ve zorlu görevler için tercih edilmesini sağlayan özelliği, düzensiz arazide hareket edebilme kabiliyetidir. Düzensiz arazilerde hareketin ve denge kontrolünün karmaşık olması nedeniyle, çalışmalar çoğunlukla robotun düz yüzeylerde ki hareketliliğine odaklanmamıştır. Ancak, düz ve engebesiz bir yüzeyde, robottan istenen hareketi elde edebilmek için bacak koordinasyonları ve adımlar daha esnek seçilebilir iken, engebeli bir arazide yürüyüş planlamasının ve kararlı bir gövde hareketinin sağlanabilmesi önem arz etmektedir. Yani engebeli arazideki yürüyüşte robotun hareketliliğini belirleyen ve sınırlayan zemindeki düzensizliklerdir.

Dört ayaklı robotlar ile ilgili yapılan çalışmaların sayısı giderek artış gösterse bile, karmaşık dinamik yapısı nedeniyle ileri düzey teorik hesaplamalar gerektirmesi ve araştırma maliyetinin yüksek olması nedeniyle, dünya genelinde birkaç kurum hariç kayda değer deneysel çalışmalar yapılamamakta ve bacaklı robot teknolojisinin laboratuvar ortamından çıkıp ticarileşmesi uzun sürmektedir.

Dört ayaklı sistemlerin geliştirilmesi ve yaygınlaşması bu konuda yapılacak başarılı bilimsel çalışmaların sayısına ve niteliğine bağlı ilerleyecektir. Özellikle engebeli alanlardaki yürüyüş performansının iyileştirilebilmesi, görüntü işleme ile arazi tanıma ve/veya ayak ucu ile zemin etkileşimine dayalı zemin tanımlama tekniklerinin çeşitlendirilmesi ve geliştirilmesi ile sağlanabilecektir.

Geliştirilen yazılım/donanım teknolojileri doğrultusunda ilerleyen bu çalışmalar sonucunda; dört ayaklı robotların endüstri, tarım, madencilik gibi alanlarda, uzay çalışmalarında, doğal afet durumunda arama-kurtarma faaliyetlerinde ve askeri operasyonlarda kullanımının sıradanlaşması fikri hayal değildir.

Dört ayaklı robotların, mobil sistemlere ve diğer bacaklı robotlara kıyasla avantajlarının olması, oldukça güncel ve geliştirilmeye açık bir konu olması, özellikle düzensiz yüzeylerde yürüyüş ile ilgili çalışmaların az ve ilgi çekici olması nedeniyle, bu tez kapsamında dört ayaklı bir robotun engebeli yüzeylerde yürüyüş kontrolü analizi üzerine adım hareketinin kontrolünü de içeren geniş kapsamlı bir çalışma amaçlanmıştır.

Ayrıca, bu alanda yapılmış Türkçe tez çalışmalarının, yayınların ve literatür derlemelerinin az olması, bu tez kapsamında sunulan kaynak araştırması, modelleme, kontrol, optimizasyon tekniklerinin ve kapsamlı yürüyüş analizi çalışmalarının ileride yapılacak teorik ve deneysel çalışmalar için fayda sağlayabilecek olması, tezin ana motivasyonunu oluşturmaktadır.

1.2. Literatüre Yapılan Katkılar

Bu tez kapsamında ele alınan konuları genel olarak özetlemek gerekirse; Dört ayaklı robotlar ve engebeli yüzeylerde yürüyüşü ile ilgili çalışmaların derlendiği kaynak araştırması, sistem tasarımının, kinematik ve dinamik analizlerinin sunulduğu matematiksel modelleme, adım yörüngesinin kontrolü için birden fazla optimal kontrolcü yaklaşımının ve optimizasyon algoritmasının önerildiği tek bacak hareketi üzerine gerçekleştirilen çalışmalar ve nihai olarak, robotun düz yüzeyde ve farklı engebeler içeren bir parkurda yürüyüş analizine yönelik empedans kontrol ve ZMP tekniği tabanlı özgün bir tork kontrol mimarisinin önerildiği ve modelleme ile kontrol yazılımlarının birlikte koşturulduğu eş-simülasyon çalışmalarıdır.

Tez çalışmasının özgün yönleri ve literatüre sağladığı katkılar konu başlıklarına göre aşağıda sırasıyla belirtilmiştir.

- Dört ayaklı robotlar ile ilgili, sistemin belirli bir kısmına odaklanan sınırlı derlemelerden farklı olarak; Türkçe literatürün gelişmesine katkı sağlayacak, kavram ve tanımlardaki eksiklikleri giderecek, sistemin geneli, modellenmesi, kontrolü ve özellikle engebeli yüzeylerde yürüyüşü ile ilgili kapsamlı ve güncel bir kaynak araştırması sistematik bir şekilde derlenmiş ve sunulmuştur.

- Karmaşık yapısı nedeniyle, dört ayaklı robotların matematiksel modellemesi ile ilgili literatürde genellikle, sabit bir koordinat sistemi tabanlı, bacakların 2-DoF olarak tasarlandığı, tek bacak kinematiği ile sınırlı çalışmalar mevcuttur. Tez çalışmasında ise, kayan nokta tabanlı haraketli koordinat sistemine göre tanımlanan ve tüm gövde kinematiğini ele alan, 3-DoF bacak yapısına sahip 4AR tasarımı ve detaylı kinematik analizi sunulmuştur. Literatürde öne çıkan deneysel uygulamalara ait tasarım kriterleri ve parametreleri kullanılarak özgün bir fiziksel model tasarlanmıştır. Bacaklı robot dinamiğinde önem arz eden ayak ucunun zemin ile etkileşimi, zeminin modellenmesindeki zorluklar nedeniyle, literatürdeki benzer çalışmalarda genellikle ihmal edilmektedir. Tez kapsamında ise, sistemin kapalı form hareket denklemleri ve bileşenleri tanımlanarak, ayağın zemin ile etkileşimini de içeren bir dinamik analiz sunulmuştur. Ayrıca, robotun tüm gövdesinin kinematik analizine yönelik, global koordinat sistemine göre girilen referans gövde oryantasyonları ve ayak ucu koordinatlarına karşılık bacak eklemlerine ait açısal konumları veren bir ters kinematik programı geliştirilmiştir. (Sen ve ark., 2017a).

- Bacaklı robotik çalışmaları genellikle, tek bacak tasarımı ve adım hareketinin kontrolü üzerine başlamakta ve sürdürülmektedir. Çünkü dengeli ve kararlı bir yürüyüşün sağlanmasında, ayak ucunun referans adım yörüngesini en az hata ile takip etmesine yönelik bacağın adım hareket kontrolü doğrudan etki etmektedir. Literatüre bakıldığında, adım yörüngesinin denetime yönelik genellikle PID tabanlı oransal kontrolcülerin önerildiği ve optimizasyon çalışmalarınınım yetersiz olduğu görülmektedir. Bu sebeple tez kapsamında, farklı kontrol yaklaşımları ile çeşitliliği artırmaya ve kontrolcü performansını iyileştirmek için daha önce önerilmeyen farklı optimizasyon algoritmaları ile farklı optimal kontrolcüler önerilmiştir. Bu kapsamda, klasik PID kontrolcü (Sen ve Kalyoncu, 2018), hibrit bir yaklaşım olan LQR-PID kontrolcü (Sen ve Kalyoncu, 2019) ve Bulanık Mantık Kontrolcü (BMK) tasarımları gerçekleştirilmiştir.

    - BMK tasarımında literatürden farklı olarak, üyelik fonksiyonlarının yanı sıra kural tabanı da dahil tüm kontrolcü tasarım parametreleri birlikte optimize eden kullanıcı tanımlamasını en aza indirgeyen yöntem önerilmiştir Optimizasyon çalışmalarında, Bozkurt ve Arı Algoritmaları gibi

daha önce uygulanmayan farklı, güncel arama algoritmaları kullanılmıştır ve performansları yaygın kullanılan Genetik ve Parçacık Sürü Algoritmaları ile kıyaslamalı olarak değerlendirilmiştir.

- Ayrıca, bacağın adım hareketi sırasında, referans adım yörüngesine tanımlanmış bir engel ile ayak ucu etkileşimin kontrolü için PID tabanlı bir Empedans kontrolcü önerilmiştir. (Sen ve ark., 2017b).

- Bu bölümde son olarak, bacaklı robot çalışmalarına da katkı sunabilecek, gerçekçi fiziksel ve dinamik parametrelere sahip, üç uzuvlu bir bacak yapısının dinamik modeli, doğrusal durum-uzay modeli ve sistemin kontrolü için daha önce önerilmeyen bir kontrol tekniği olan PIλDμ kontrolcü uygulaması sunulmuştur (Sen ve ark., 2019).

- 4AR'ın yürüyüşü üzerine, kapsamlı simülasyon çalışmaları ve analizler sunulmuştur. Öncelikle, gerçekçi fiziksel parametrelere, kütle ve atalet özelliklerine sahip 4AR'ın dinamik modeli elde edilmiştir.

  - Kararlı ve dengeli bir yürüyüş sunabilmesi sebebiyle literatürde sıklıkla incelenen ancak yavaş bir yürüyüş olan statik yürüyüşe ilave olarak; daha hızlı ve daha yüksek kontrol performansı gerektiren farklı dinamik yürüyüşler (tırıs yürüyüş, literatürde nadir yer alan rahvan ve eşkin yürüyüş) dahil toplamda dört farklı çeşitte düz yüzeyde yürüyüş simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

  - Tork kontrolcü tasarımındaki zorluklar nedeninle benzer çalışmalarda genellikle, sabit kazançlı açılsal konum kontrolcüleri önerilmiştir. Ancak bu durum önerilen yöntemlerin deneysel uygulanabilirliğini azaltmaktadır. Daha gerçeğe yakın olması amacıyla tez kapsamında, kontrolcü kazançlarının adaptif bir yaklaşımla, adım hareketinin duruş/destek ve uçuş/salınım evreleri için farklı belirlendiği, daha ideal tork değerleri üreten, deneysel uygulanması halinde üretilebilecek maksimum tork değerleri ile sınırlandırılmış ve gerçek zamanlı uygulamalarda da kullanabilecek özgün bir PD tork kontrol mimarisi geliştirilmiştir.

- 4AR'ın düzensiz yüzeylerde yürüyüşüne yönelik, sadece belirli tekil bir engebenin ele alındığı literatürdeki yaygın çalışmalardan farklı olarak, literatürdeki standartlara göre tasarlanmış birçok farklı engebeyi içeren özgün ve süreklilik arz eden bir parkur tasarlanmıştır.

- Dengeli bir gövde hareketini ve en az yörünge hatası ile adım hareketini birlikte sağlayabilen ve kontrolcü çıkışı üzerindeki etkilerinin ayarlanabildiği özgün bir kontrol mimarisi yaklaşımı önerilmiştir. Ayak ucu ve engebeli yüzey arasındaki etkileşimi düzenleyen, ayak ucunun referans konumunu ve zeminden gelen tepki kuvvetlerini denetleyen bir empedans kontrolcü önerilmiştir.

- Benzer çalışmalarda, genellikle bacak eklemlerine ait sonuçlara ve değerlendirmelere yer verilmiştir. Tez kapsamında ise, her bir bacağa ve gövdeye ait tüm durum değişkenlerine ve referans değerlerine göre hataların zamana bağlı değişimine, ayak ucunun konumuna ve zeminle olan etkileşimine ait detaylı sayısal sonuçlar sunulmuştur ve incelenmiştir.

- Özellikle, ayakucunun adım yörünge takip performansı planlanan yürüyüşün dengeli ve referans değerlere uygun şekilde gerçekleşmesinde önem arz etmesine rağmen literatürde yeterince incelenemediği görülmektedir. Bu sebeple tez kapsamında, düz yüzeyde ve engebeli parkurda yürüyüş için ayak uçlarının adım yörüngelerine ait sonuçlar detaylı olarak ele alınmış, yüzdesel hata değerleri belirtilmiş ve benzer çalışmalar ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

- Tez kapsamında önerilen yöntemlerin ve simülasyon çalışmalarının deneysel uygulanabilirliği bakımından kontrolcü çıkışlarının yani tork değerlerinin üretilebilir olması önemlidir. Bu sebeple tüm yürüyüş simülasyonlarında eklemlere ait tork değerlerinin değişimleri ve tork-açısal hız eğrileri sunulmuştur.

Çizelge 1.1'de, literatürdeki yaklaşımlar ve bu tez kapsamında yapılan katkılar, konu başlıklarına göre özetlenmiştir.

Çizelge 1.1. Literatüre yapılan katkıların konu başlıklarına göre özeti

Konu Başlığı	**Literatürdeki Mevcut Çalışmalar, Yaklaşımlar**	**Gerçekleştirilen Çalışmalar, Önerilen Yaklaşımlar**
Kaynak Araştırması	Çok yönlü bir konu olması nedeniyle, literatürde genellikle sistemle ilgili belli konular ele alınmış ve sınırlı derlemelere yer verilmiştir.	Dört ayaklı robotların modellemesi, kontrolü, düz/engebeli yürüyüşü vb. gibi birçok konu birlikte ele alınmış ve Türkçe literatüre katkı yapacak geniş literatür derlemeleri sunulmuştur.
Tasarım ve Modelleme	Literatürde yaygın olarak, bacağın 2-DoF olarak tasarlandığı basit ve sadeleştirilmiş bacak modelleri üzerinden sınırlı kinematiği ve dinamiği analizler mevcuttur.	Bacak yapısını 3-DoF olarak tasarlandığı tüm gövde modeli üzerinden kapsamlı kinematik ve analizi analizler yapılmıştır. Deneysel olarak uygulaması yapılmış bir robotun verileri ile, dinamik modelleme yazılımı kullanılarak kütle, atalet, sertlik, sönüm vb. gibi tüm dinamik özelliklere sahip, gerçeğe daha yakın model bir elde edilmiştir.
Adım Yörünge Kontrolü ve Optimizasyon	Genellikle PID tabanlı oransal kontrolcü ile açısal konum kontrolü tercih edilmiştir. Kontrolcü parametreleri yaygın olarak, geleneksel deneme-yanılma yöntemlerine veya yaygın arama algoritma kullanılarak ayarlanmıştır.	Daha gerçeğe yakın olması amacıyla, eklemlerin tork kontörlüne yönelik; PID kontrolcünün yansıra, LQR-PID ve BMK olmak üzere, farklı algoritmalar (BA, AA, PSO, GA) ile optimize edilmiş, adım yörünge hatasını en aza indirgemeye yönelik, üç farklı optimal kontrolcü önerilmiş ve performansları karıştırılarak değerlendirilmiştir. Engel ile ayak ucu etkileşimini denetleyen için PID tabanlı bir Empedans kontrolcü önerilmiştir. Ayrıca, gerçek bir robota ait parametrelere göre tasarlanan, 3-DoF bir bacak yapısının doğrusal durum-uzay modelinin elde edilmesi ve literatürde daha önce önerilmeyen bir kontrol tekniği olan PIλDμ kontrolcü ile denetimi önerilmiştir.
Düz Yüzeyde Yürüyüş	Kontrolünün kolay olması sebebiyle statik yürüyüş yaygın incelenmiştir. Simülasyon çalışmalarında genellikle basit, sadeleştirilmiş matematiksel modeller tercih edilmiştir. Önerilen model ve kontrolcülerin deneysel uygulanabilirliği genellikle göz ardı edilmiştir. Tork denetiminin zor olması nedeniyle genellikle, sabit kazançlı açılsal konum kontrolcüleri önerilmiştir.	Statik yürüyüşün yanı sıra; tırıs, rahvan ve eşkin dinamik yürüyüşleri dahil, dört farklı çeşitte yürüyüş simülasyonları gerçekleştirilmiştir. MSC-ADAMS ve MATLAB/Simulink programlarının eş zamanlı koşturularak 4AR'ın dinamik modeli ve kontrolü birlikte ele alınmıştır. Tork değerleri ile deneysel olarak üretilebilecek değerler ile sınırlandırılmıştır. Destek ve uçuş evreleri için farklı kazançların belirlendiği, deneysel uygulanması halinde üretebilecek tork değerleri sınırlandırılmış özgün bir PD tork kontrol mimarisi geliştirilmiştir.
Engebeli Parkurda Yürüyüş	Yaygın olarak, sadece belirli tekil bir engebenin aşılmasına yönelik çalışmalar mevcuttur. Genellikle, gövdenin dengelenmesi ve kararlılığına yönelik kontrolcüler önerilmiştir. Ancak, referans yürüyüş planlamasına göre robotun konum ve hız kontrolünün sağlanmasına yönelik çalışmalar yetersizdir. Engebeli yüzeylerde yürüyüş konusu literatürde oldukça güncel ve geliştirmeye açık bir alandır.	Literatürdeki standartlara göre tasarlanmış, birçok farklı engebeyi içeren, özgün ve süreklilik arz eden bir parkurda yürüyüş gerçekleştirilmiştir. Engebeli parkurda yürüyüş için; gövde dengesinin ve adım hareketlerinin birlikte denetlenebildiği ve bunların kontrolcü çıkışı üzerindeki etkilerinin ayarlanabildiği, ayak ucu ve engebeli yüzey arasındaki etkileşimi düzenleyen empedans konum-kuvvet denetimini de içeren, özgün bir kontrol mimarisi önerilmiştir. Planlanan yürüyüşün, dengeli ve referans değerlere uygun şekilde gerçekleşmesinde önem arz eden adım yörüngesine ait hatalar, benzer çalışmalar ile kıyaslamalı bir şekilde değerlendirilmiştir.
Sonuç ve Analiz	Genellikle, robotun belirli değişkenleri dikkate alınarak analizler yapılmakta ve sınırlı sonuçlar yer almaktadır.	Sistemin tüm durum değişkenlerine (gövde ve bacaklara) ve hata değerlerinin değişimine, ayak ucunun konumuna ve zeminle olan etkileşimine ait detaylı sayısal sonuçlar sunulmuştur ve incelenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

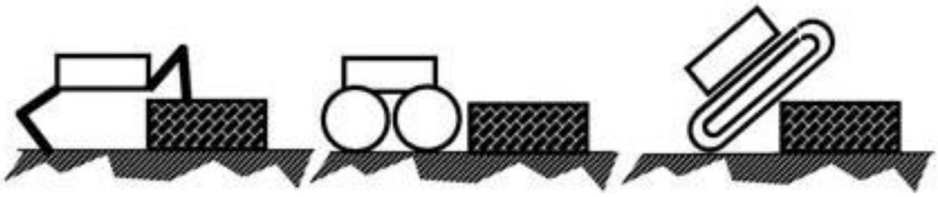
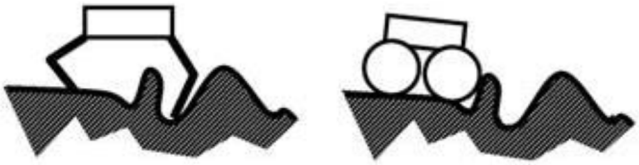
İnsanoğlunun hareket eden makinalar geliştirme serüveni, kısıtlı kabiliyetlere sahip tekerlekli/paletli sistemler ile belli bir düzeye ulaşmış, sonrasında ise biyolojik canlılardan esinlenerek geliştirilen yürüyen bacaklı robotlar ile devam etmiştir. Canlıların hareket mekanizmalarının binlerce yıldır gözlenmekte olmasına rağmen, teknolojik gelişimlerin yetersizliği nedeniyle, onlardan ilham alan ilk çalışmalar bile çok eski tarihlere dayanmamaktadır. Bu sebeple bacaklı robotik sistemler; stratejik önem arz eden, dikkat çekici ve güncel bir konu olarak gelişmeye devam etmektedir.

Mobil robotik sistemler, belirli bir konuma bağlı olmaksızın otomatik hareket etme kabiliyetine sahip (Chen ve ark., 2009), yürüme, koşma, sürünme, kayma ve yuvarlanma gibi birçok farklı dinamik hareketi gerçekleştirebilen ve çoğunlukla doğadaki canlılardan ilham alınarak tasarlanan (Siciliano ve Khatib, 2016) makinalar olarak tanımlanmaktadır. Tekerlekli mobil sistemler, yüzey ile belli bir profilde kesintisiz hareket ederek yer değiştirirler. Bacaklı mobil sistemler ise, doğadaki canlılarda olduğu gibi yürüme mekanizmalarını kullanarak hareket ederler. Yürüyüş, robot ayağı ile yer arasında kesintili, noktasal temasların sıralı takibi şeklinde gerçekleşir (Siegwart ve ark., 2011). Bu süreksiz temas sayesinde, düzensiz arazilerde hareket edebilirler (Ritzmann ve ark., 2004). Ancak, kolay kontrol edilebilirliği ve hızlı çözümler sunabilmesi, tekerlekli sistemlerin kullanımını yaygınlaştırmıştır (Machado ve Silva, 2006).

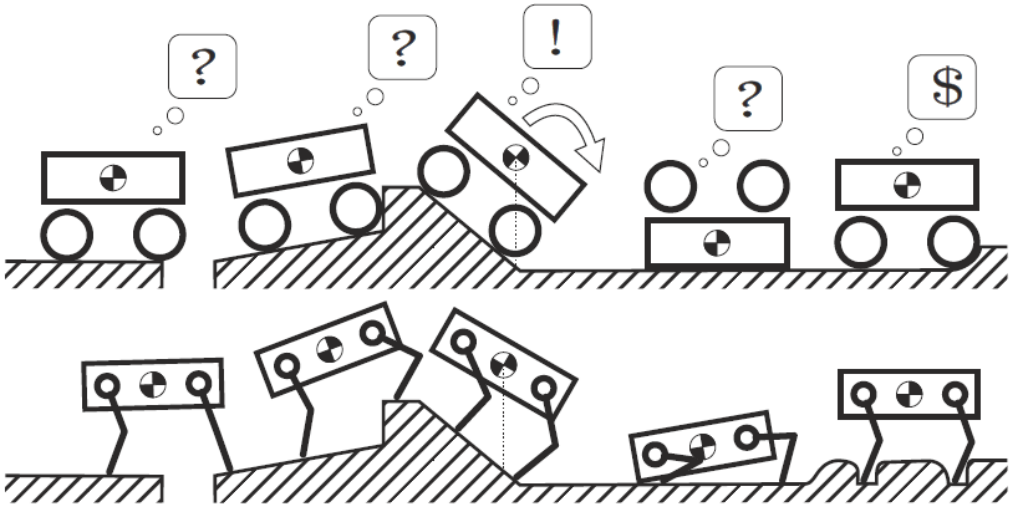
Tekerlekli hareketin en olumsuz yönü, mecburi olarak düz veya düze yakın bir zemine ihtiyaç duymasıdır (Anon, 1967). Bacaklı sistemler ise, yapısından kaynaklı avantajları sayesinde, tekerlekli sistemlerin çaresiz kaldığı durumlarda esnek çözümler sunabilmektedir. Bir engel ile karşılaştıklarında, tekerlekli bir yapı geniş manevra alanına ihtiyaç duyarken, bacaklı robotlar manevra yapmadan kolayca engeli aşabilirler. Zemindeki çukur, tümsek gibi düzensizliklerden bağımsız olarak, bacaklı robotlar hareket sırasında gövdesini dengeleyebilir ve konumlandırabilir. Bu özelliği sayesinde, tekerlekli robotların sahip olduğu sabit süspansiyon sistemine kıyasla gövde hareketini ve kontrolünü daha esnek sağlayabilmektedirler. Engebeli arazide tekerlekli sistemler büyük engelleri aşamazken, bacaklı robotlar atlayarak veya tırmanarak takılmadan ilerleyebilir. Bu sebeple engebeli arazide ortalama hızları, tekerlekli sistemlere göre daha fazladır. Zeminle temasları kesikli ve noktasal olduğu için bacaklı yapılar sıkışma durumunda, tekerlekli bir yapıya göre daha kolay kurtulur. Ayrıca, zeminle sürekli bir teması olmaması nedeniyle çevreye daha az zarar verirler.

Bacaklı sistemlerin, tekerlekli sistemlere kıyasla sağlamış oldukları üstünlükleri açıklayan görseller, Çizelge 2.1'de özet halde sunulmuştur.

Çizelge 2.1. Bacaklı sistemlerin tekerlekli sistemlere göre avantajları

Engel Aşma Kabiliyeti	
Aktif Süspansiyon Sağlama	
Engebeli/ Düzensiz Araziye Uyum	
Sıkışma ve Kayma	
Yüksek Ortalama Hız	
Çevreye En Az Zarar	

Bacaklı sistemlerin, düzensiz arazilerdeki yüksek hareket performanslarına ait örnek durumlar Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, çok serbestlik dereceli, kompleks yapıdaki bacaklı sistemler; basamak, boşluk, yumuşak zemin veya diğer engebelere/engellere maruz kaldığı durumlarda tekerlekli bir sistemin garanti edemeyeceği kadar yüksek performans sergileyebileceği açıktır.



Şekil 2.1. Düzensiz arazide bacaklı sistemlerin performansı (Remy, 2011)

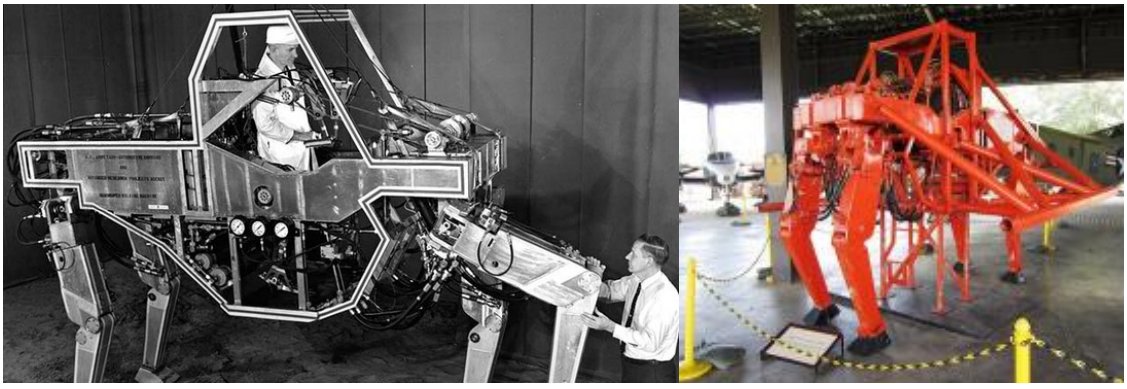
Bacaklı robotların, tekerlekli araçlara göre üstün özelliklere sahip olması ve özellikle engebeli arazilerde hareket edebilmesi nedeniyle, bacaklı robotlar üzerine yapılan araştırmalar gün geçtikçe artmaktadır. Hayvanlar ve insanlar dünya üzerindeki kara parçalarında kolaylıkla hareket edebilirken, tekerlekli/paletli araçlar bu alanların yaklaşık yarısına erişememektedir (Song ve Chen, 1991). Tekerlekler, düz ve normal yüzeylerde daha iyi performans gösterebilirken, çok zorlu arazilerde yetersiz hareket kabiliyetleri ile sınırlı kalırlar. Bacaklı robotlar ise, yüksek hareket kabiliyetine ve yeteneklerini artırabilme potansiyeline sahiptirler. Bacaklı robotların karmaşık yapısal ve kontrol problemleri sebebiyle, göreceli olarak daha basit yapıdaki tekerlekli sistemler yaygınlaşmıştır. Hesaplama gücü yüksek, hızlı ve bir robotun bünyesine dahil edilebilecek kadar hafif ve kompakt bilgisayarların gelişmesiyle birlikte, ayaklı robotların geliştirilme süreci hızlanmıştır.

21. Yüzyılda, laboratuvar ortamından çıkarak gerçek dünya ile uyumlu hareket edebilen otonom sistemlerin geliştirilmesi, robotik alanının önemli bir başarı göstergesidir. EuRobotics kurumu tarafından 2014 yılında yayınlanan *'Avrupa Robotik İçin Stratejik Araştırma Gündemi'* isimli raporda; tarım, taşımacılık, sağlık, güvenlik ve kamu hizmetleri gibi birçok imalat sektörü dışındaki alanlarda kullanılan robotların ve bu konudaki çalışmaların artacağı belirtilmiştir. İmalat dışı sektörlerde, endüstriyel robotların aksine, çevreleriyle güvenli bir şekilde etkileşime girebilen mobil robotlar talep edilmektedir. Gelişmiş tekerlekli ve paletli araçlar bu talebi kısmen karşılayabilse de, zorlu arazi şartlarında hareket kabiliyetleri sınırlı kalmaktadır. Ancak, yürüyen bacaklı sistemler, bu konuda üstün hareket becerilerine sahiptirler.

2.1. Güncel Dört Ayaklı Robotlara Genel Bakış

Son on yıldaki bacaklı robotlar üzerine yapılan araştırmalar ve eyleyici, sensör, yazılım, donanım vb. gibi alanlardaki teknolojik gelişmeler; biyolojik canlılara benzer, çok yönlü ve çevik hareket etme potansiyeline sahip bacaklı yürüyebilen mobil robotların geliştirmesinin önünü açmıştır. Özellikle, dinamik hareketler için yeterli beceriye sahip dört ayaklı robotlar geliştirilmeye başlanmıştır. Tekerlekli sistemlere göre üstün olmalarına rağmen, bacaklı robotların performansı, esinlenerek geliştirildikleri canlılara kıyasla halen yetersiz kalmaktadır. Çünkü, dinamiklerini ve çevreleriyle etkileşimlerini kontrol etmek için yeni yöntemler, algoritmalar tasarlamak veya mevcut olanları geliştirebilmek halen büyük bir zorluk teşkil etmektedir. Bacaklı yürüyüş kontrolü için, farklı yöntemlere ve arazinin türüne bağlı olarak değişkenlik (adaptasyon) göstermesi gereken yeni yaklaşımlara gereksinim duyulabilmektedir. Bu nedenle, özellikle yüksek hız ve ivmelerde, robot dinamiklerinin ve gövde dengesinin kontrolüne yönelik çalışmalar önem arz etmektedir (Michele, 2013).

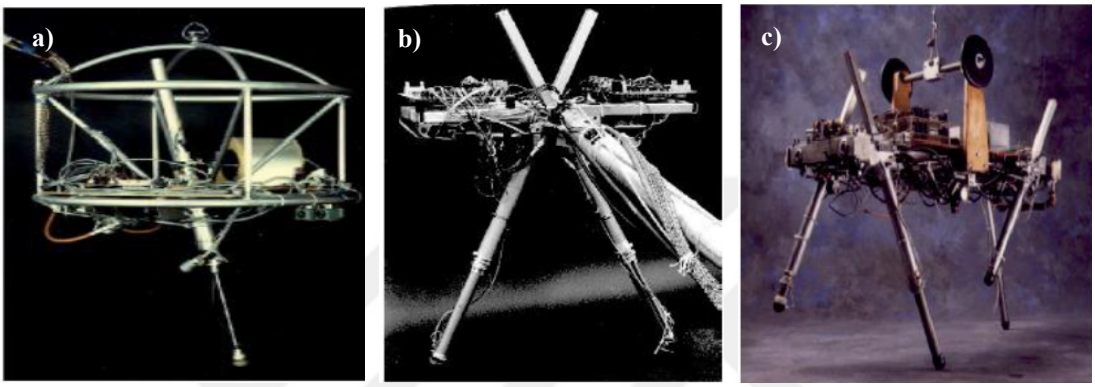
Geçmişteki otonom yürüyüş makinelerinin ilk başarılı örneklerinden birisi, Liston ve Mosher (1968) tarafından, *General Electric* firması adına geliştirilen hidrolik tahrikli *'Walking Truck'* isimli dört ayaklı makinedir. Şekil 2.2'den anlaşılacağı üzere, bu makine 1400 kg ağırlığında oldukça büyük boyutlarda (3530 x 1066 x 4572 mm) olmasına rağmen bacakların hareketi için yüksek kazançlı pozisyon kontrolü kullanılmasından dolayı, 8 km/s yürüyüş hızına kadar çıkabilmekteydi.



Şekil 2.2. Dört ayaklı otonom makine *Walking Truck*

Marc Raibert, Carnegie Mellon Ünv. ve sonrasında Massachusetts Teknoloji Enstitüsünde yaptığı çalışmalar sonrasında *Boston Dynamics* firmasının (Boston Dynamics, 2020) kurucusu ve yöneticisi olarak bu alanda önemli bir otorite olmuştur.

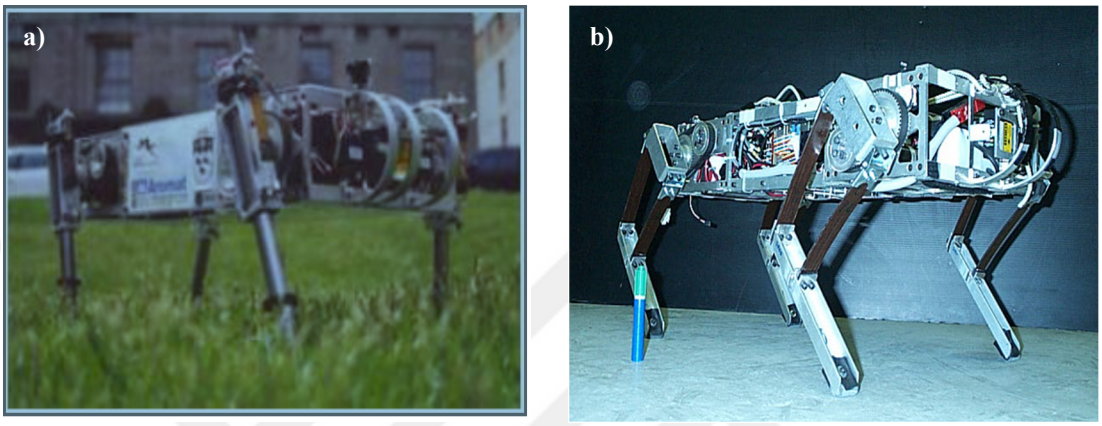
İlk çalışmalarına, 1979 yılında tek bacaklı zıplayan robotlar ile başlayan Raibert, bacaklı robotlar alanında yaptığı önemli ve yol gösterici çalışmalar ile araştırmacılara ilham kaynağı olmuştur. Raibert'ın, tek (monoped), iki (biped) ve dört ayalı (Quadruped) robotları Şekil 2.3'te gösterilmiştir (Raibert, 1986). Tek bacaklı zıplama hareketinde; zıplama yüksekliğini, gövde duruşunu ve ilerleme hızını birbirinden bağımsız olarak kontrol etmiştir (Silva ve Tenreiro Machado, 2007). Daha sonra önerdiği bu kontrol algoritmasını iki ve dört ayaklı sistemler için de uygulamıştır.



Şekil 2.3. Raibert tarafından geliştirilen **a)** tek, **b)** iki ve **c)** dört ayaklı robotlar

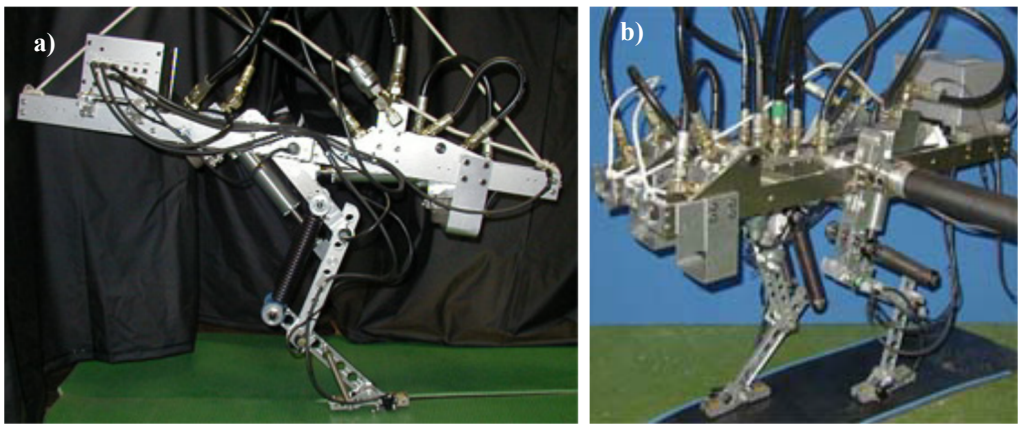
Bacaklı robotlar pnömatik, hidrolik ve elektrikli eyleyiciler ile tahrik edilmektedir. Elektrikli eyleyiciler kolay kontrol edilebilirliği, boyut ve maliyet avantajları nedeniyle, öncelikli olarak tercih edilmektedir. Ancak, güç yoğunluklarının yetersiz olması nedeniyle yüksek dinamik hareketler için mekanik enerji depolayan yayların kullanılmasını gerektirmektedir. Yaylar, robotun doğal dinamiklerini kullanabilme kapasitesini artırmakla birlikte, iş yükünü azaltarak enerji tasarrufu sağlamakta ve pasif dinamik yürüyüş konusunda geniş bir araştırma alanı oluşturmaktadır (McGeer, 1990). Bu sebeple, çıkışlarında elastik bileşenlerin bulunduğu, yüksek çevrim oranına sahip Seri Elastik Eyleyiciler yaygın olarak kullanılmaktadır (Pratt, 2002). 1990'lı yıllarda geliştirilmeye başlanan *Scout I* isimli robot, elektrikli eyleyici kullanılarak geliştirilen ilk robotlardandır (Yamazaki, 1999). Raibert'ın robotlarından sonra, Sang-Ho Hyon ve ark. tarafından 1998 yılında geliştirilmeye başlanan *KenKen I* isimli robot, hidrolik tahrikli robotların belirgin bir örneğidir (Hyon ve ark., 2003b). Krupp ve Pratt tarafından geliştirilen tek bacaklı bir robotta, ilk defa hidro-elastik eyleyiciler kullanılmıştır. (Krupp ve Pratt, 2006). 2008 yılında geliştirilen *Airhopper* isimli robotta ise pnömatik eyleyiciler kullanılmıştır. Semini (2010), bacaklı robotların eyleyicileri üzerine kapsamlı bir çalışma sunmuştur.

Poulakakis ve ark. (2005), Mcgill Üniversitesi'nde 1990 yılında geliştirmeye başladıkları prizmatik bacak yapısına sahip *Scout I* isimli robotun (Şekil 2.4a) devamı olarak, 1999 yılında dörtnala koşabilen *Scout II* isimli robotu (Şekil 2.4b) geliştirmişlerdir. Robotun iki uzuvlu bacak yapısı, sadece düzlemsel dairesel hareketli tek bir eyleyici ile gövdeye bağlıdır. Basit bir mekanizmaya sahip olmasına rağmen dinamik olarak kararlı bir şekilde koşabilme kabiliyetine sahiptir.



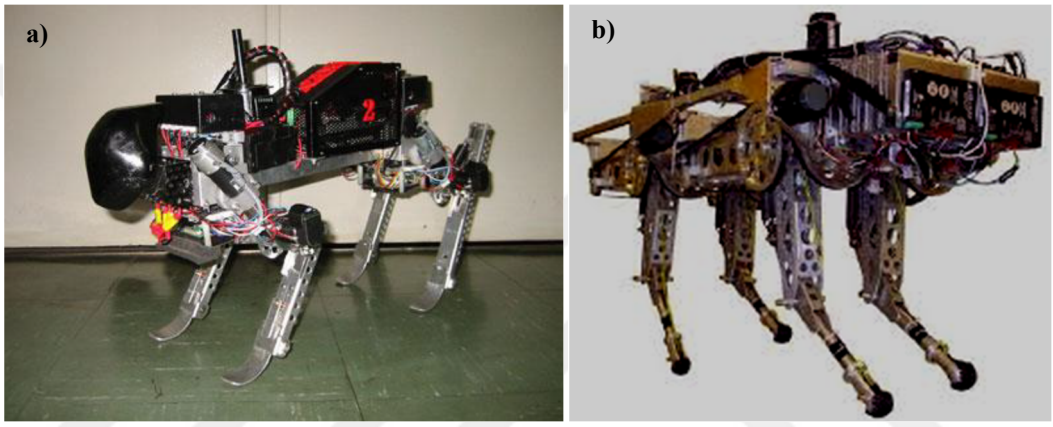
Şekil 2.4. Elektrik tahrikli dört ayaklı robotlar, **a)** *Scout I* ve **b)** *Scout II*

Hyon ve ark. (2003a), geliştirdikleri tek bacaklı *KenKen I* isimli robotun (Şekil 2.5a) ardından, iki bacaklı *KenKen II* isimli robotu (Şekil 2.5b) geliştirmişlerdir. Dört bacaklı versiyonunu ise hayata geçirememişler, ancak bu konuda önemli sonuçlar sunmuşlardır. Bacak yapısı, kalça (hip) ve baldır (knee) hidrolik tahrikli eklemlerin yanı sıra yay ile pasif hareketli ve zemin ile temas sensörü içeren bir ayak bileğiden (ankle) oluşur. Güç ünitesi hariç, valfler ve kontrol bileşenleri robotun bünyesindedir. *KenKen* bacak yapısı, sonrasında geliştirilen hidrolik bacaklı robotlara ilham kaynağı olmuştur.



Şekil 2.5. Hidrolik tahrikli dört ayaklı robotlar, **a)** *KenKen I* ve **b)** *KenKen II*

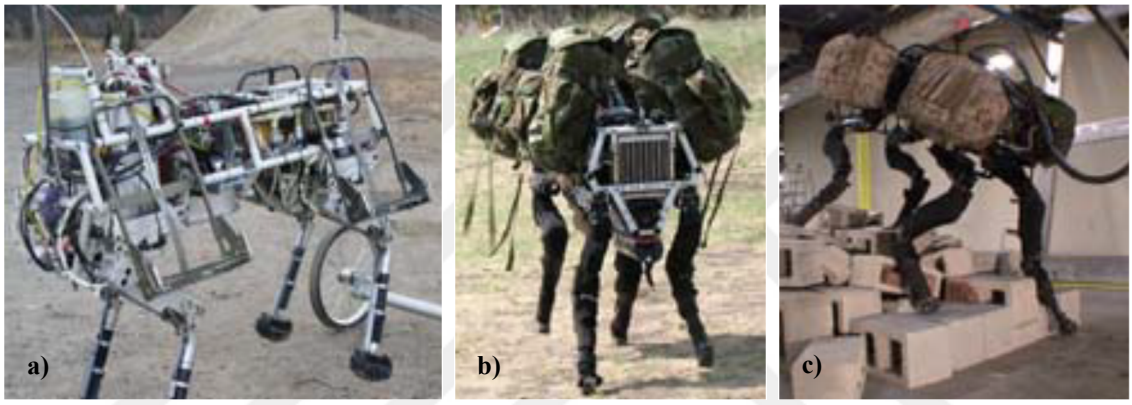
Dört ayaklı robotlar çalışma konularına, kullanım amaçlarına ve esinlenildiği biyolojik canlıların fiziksel özelliklerine göre farklı boyutlarda tasarlanmıştır. Hiroshi Kimura tarafından geliştirilen, elektrik tahrikli *Tekken II* isimli robot (Şekil 2.6a), ağırlığı 4.3 kg ve uzunluğu 0.3 m olan küçük boyutlu bir robottur. Ayrıca Kimura, mekanik sistemin doğal dinamiklerini kullanarak, dört ayaklı sıçrama (bounding) hareketi üzerine çalışmalar yapmıştır (Kimura ve ark., 1999; Zhang ve ark., 2006). Stanford Üniversitesinde Kenneth Waldron tarafından elektrik tahrikli olarak geliştirilen, 80 kg ağırlığında ve 1.75 m x 0.6 m x 0.8 m boyutlarında *KOLT* isimli robot (Şekil 2.6b), büyük boyutlu dört ayaklı robotların belirgin bir örneğidir (Estremera ve Waldron, 2008).



Şekil 2.6. Küçük ve büyük boyutlu dört ayaklı robotlar, **a)** *Tekken II* ve **b)** *KOLT*

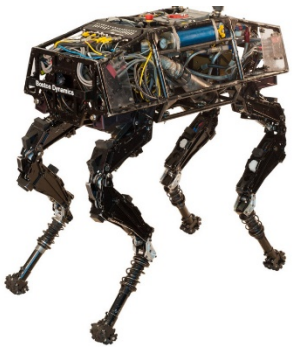
Marc Raibert ve arkadaşları, 1922 yılında kurdukları Boston Dynamics firmasında; otonom 50 kg yük taşıma kapasitesi olan, engebeli alanlarda ve yüksek hızlarda dinamik yürüyebilen dört bacaklı robotlar geliştirmek üzerine çalışmalara başlamışlardır. 2005 yılında, Amerikan ordusunun Savunma Gelişmiş Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA) tarafından finanse edilen, *BigDog* isimli dört ayaklı robotun ilk versiyonunu sunmuşlardır (Şekil 2.7a). Her bir bacağı dört uzuvlu olan hidrolik tahrikli *BigDog-2005* versiyonu, 1 m x 0.3 m x 1 m boyutlarında ve 90 kg ağırlığındadır (Buehler ve ark., 2005). 2006 yılında yayınlanan çalışmalar (Buehler ve ark., 2006; Playter ve ark., 2006) ve çarpıcı bir video ile Boston Dynamics, eğimli yüzeylerde yürüyebilen, çapraz (X şeklinde) bacak düzenine sahip yeni *BigDog-2006* versiyonunu sunmuştur (Şekil 2.7b). Ancak, bacak yapısının neden değiştirildiği hakkında bilgi sunulmamıştır. 2008 yılında, karlı ve ormanlık bir arazide yürüyebildiği görülen, dış bozucu girişlere karşın dengesini koruyabilen, daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip yeni *BigDog-2008* versiyonu yayınlanmıştır (Şekil 2.7c).

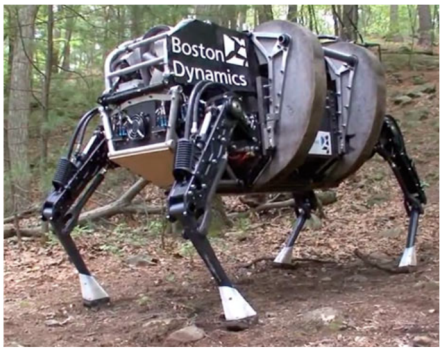
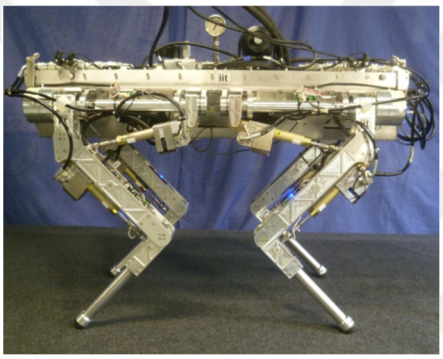
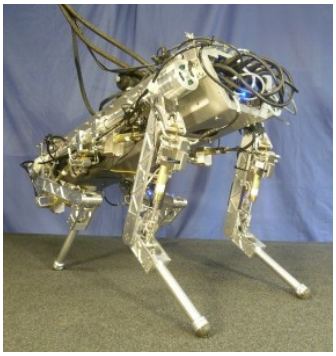
Raibert ve ark. (2008), *BigDog-2008* versiyonunun tasarımını kısa bir bildiri ve video kaydı ile tanıtmışlar, diğer versiyonlara göre en belirgin farkının ek bir aktif dönme eklemi içeren yeni kinematik yapısı olduğunu belirtmişlerdir. Bu alanda en popüler yayınlardan biri olan bu bildiride, ne yazık ki çok az ayrıntı yer almaktadır ve ilave dönme ekleminin nedenlerinden söz edilmemektedir. Sonraki yıllarda, Boston Dynamics firması *BigDog*'un gelişimini ve hareket kabiliyetini sergileyen birkaç video daha yayınlanmıştır. Ancak, Amerikan ordusu destekli geliştirilmesi ve gizlilik gibi nedenlerden dolayı, bacaklı robotik alanda büyük ilham kaynağı olan *BigDog* robotunun tasarımı, kontrolü, bileşenleri ve teknik özellikleri hakkında çok az bilgi ve bilimsel yayın mevcuttur.

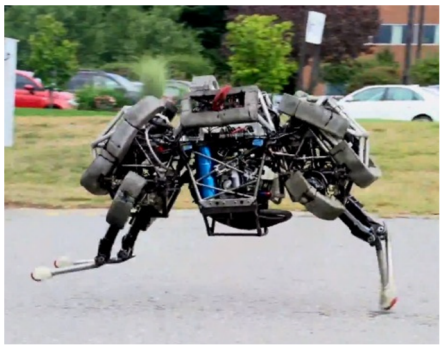
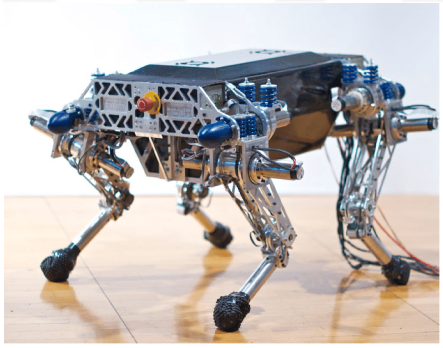


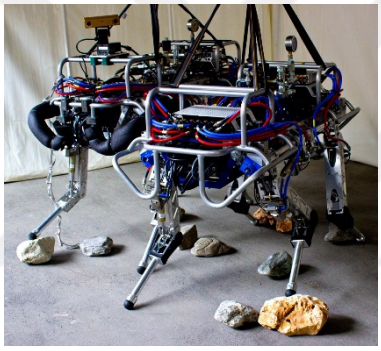
Şekil 2.7. Boston Dynamics firmasının ilk robotu, **a)** BigDog-2005, **b)** BigDog-2006 ve **c)** BigDog-2008

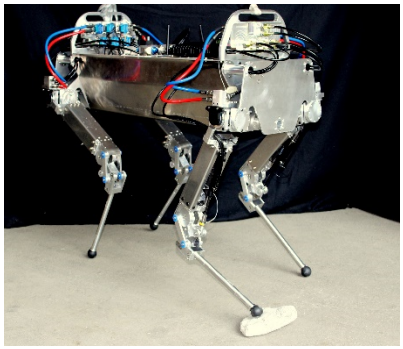
Son yılarda geliştirilen dört ayaklı robotların genel tanıtımları, görselleri, fiziksel özellikleri ve maksimum yürüyüş kapasiteleri gibi teknik detaylar tarihsel sıraya göre aşağıda sunulmuştur. Bakırcıoğlu ve Kalyoncu (2020) tarafından bacaklı robotların geneli hakkında bir literatür çalışması sunulmuştur.

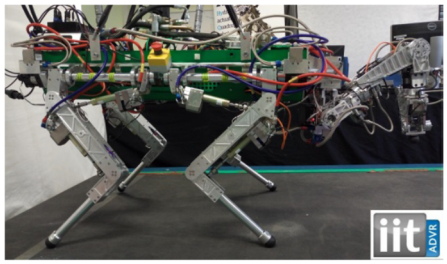
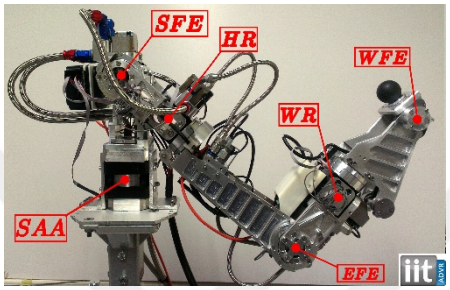
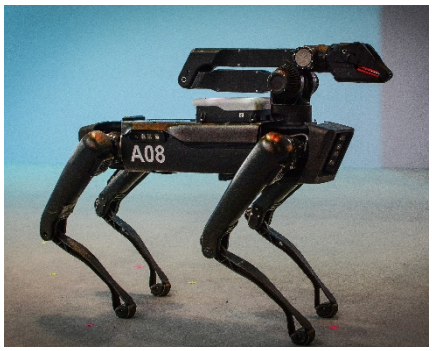
Yıl	Robot	Açıklama
2005 2006 2008	**BigDog** 	Boston Dynamics firması tarafından 2005 yılında geliştirilmeye başlanmış, büyük boyutlu ve hidrolik tahrikli en popüler robotlardandır. Farklı kinematik yapılarda ve yük taşıma kapasitelerinde 3 farklı versiyonu sunulmuştur. Engebeli alanlarda engel aşma, tırmanma gibi yüksek dinamik hareket kapasitesine sahiptir (Raibert ve ark., 2008). Ağırlık: 90 kg, Yük taşıma kapasitesi: 50 kg, Yürüyüş hızı: 1.6 m/s, Boyutları: 1 m x 0.3 m x 1 m

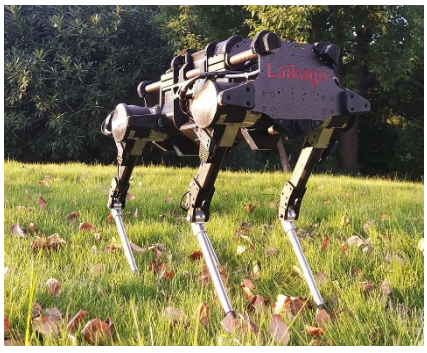
2008	***AlphaDog*** 	2008 yılında Boston Dynamics firması tarafından, Bigdog robotu temel alınarak, önemli askeri görevler için DARPA destekli geliştirilmiştir. *Legged Squad Support System (LS3)* ismiyle de bilinmektedir. İçten yanmalı motor ile tahrik edilmektedir. 24 saat hareket edebilme süresi ve 20 mil yol alabilme kapasitesine sahiptir. Askeri uygulamalardaki başarı potansiyeli dikkat çekicidir. Ağırlık: 450 kg Yük taşıma kapasitesi: 181 kg Yürüyüş hızı: 1.1 m/s Boyutları: 2 m x 1.9 m x 0.9 m.
2010	**HyQ**  	Semini ve arkdaşları tarafından, İtalyan Teknoloji Enstitüsü (IIT) bünyesinde geliştirilmiştir. Labrador Retriever köpeğinin biyolojik yapısınıdan ilham alınarak tasarlanmıştır. İkisi hidrolik, biri elektrik tahrikli 3 eklemli bacak yapısna sahiptir. Toplamda 12 serbestlik derecesine sahip robotun avantajları; göreceli olarak hafif ve ucuz olması, zorlu arazilerde ilerleyebilmesi, yük taşıyabilmesi ve yüksek hareket kabiliyetine sahip olmasıdır. Semini (2010) tez çalışmasında, *HyQ* robotunun bacak yapısının ve tüm gövde prototipinin mekanik tasarımları ve sistemin hidrolik özellikleri hakkında kapsamlı bilgiler verilmiştir. *HyQ* robotu ve geliştiricileri bu alandaki çalışmalara önemli katkılar sağlamıştır. (Semini ve ark., 2011). Ağırlık: 80 kg, 98 kg (hidrolik ünite dahil) Yük taşıma kapasitesi: 154 kg Yürüyüş hızı: 0.2 ~ 2 m/s Yürüyüş süresi- mesafesi: 2.5 saat – 10 km Boyutları: 1 m x 0.5 m x 0.98 m
2011	**ALoF** 	İsviçre/Zürih Federal Teknoloji Enstitüsü (ETH Zürich) bünyesindeki otonom robotik sistem laboratuvarının ilk çalışması olan *ALoF* isimli robot, CD Remy tarafından 2011 yılında geliştirilmiştir. Emekleme (crawling) yürüyüşü ile elverişsiz alanlarda geniş hareket becerisine sahip, küçük boyutlu bir robottur (Remy ve ark., 2011). Ağırlık: 15 kg, Boyutları: 0.55 m x 0.38 m x 0.4 m

2012	**Cheetah** 	*Cheetah* robotu, DARPA'nın maksimum mobilite ve manevra kabiliyeti elde etmek amaçlı yürüttüğü proje kapsamında, *WildCat* robotunun devamı olarak geliştirilmiştir. Yüksek hızlarda hareket kapasitesi sahiptir. Bu alandaki hız rekorunu aşarak, en hızlı bacaklı robot olmuştur. Bir önceki rekor 13.1 mph (21.1 km/h; 5.9 m/s) ile MIT'de 1989 yılında kaydedilmiştir (Seok ve ark., 2013). Koşma hızı: 28 mph (45 km/h, 12.5 m/s)
2012	**Scalf-1** 	*Scalf-1* robotu, Shandong Üniversitesi tarafından Çinde geliştirilmiştir. Her bir bacağı 3 serbestlik derecesine sahiptir ve hidrolik silindir ile tahrik edilmektedir. Yük dahil maksimum 120 kg ağırlığındadır. Boyutuna göre hızlı ve hareket kabiliyeti yüksektir (Rong ve ark., 2012a). Ağırlık: 65 kg (güç ünitesi hariç) Yürüyüş hızı: 1.8 m/s Yük taşıma kapasitesi: 80 kg Boyutları: 1 m × 0.4 m × 0.68 m
2012	**StarlETH** 	*StarlETH* robotu, ETH Zürich'de M. Hutter ve ekibi tarafından, elektrikli tahrikli olarak geliştirilmiştir. Model tabanlı teorik ve deneysel çalışmaları ile literatürde önemli bir yer tutar. Elastik eyleyiciler sayesinde, tork ve konum kontrolü başarılı bir şekilde sağlanmıştır. Enerji verimliliği de dikkate alınarak, yüksek dinamik hareketleri yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Simetrik bacak yapısında, orta ölçekli bir robottur. (Hutter ve ark., 2012a; Hutter, 2013). Ağırlık: 23 kg, Yük taşıma kapasitesi: 25 kg Boyutları: 0.71 m × 0.64 m × 0.58 m
2013	**Jinpoong** 	*Jinpoong* robotu, Endüstriyel Teknoloji Enst. tarafından Güney Kore'de geliştirilmiştir. Engebeli arazilerde ağır yükleri taşıyabilmesi amaçlanmıştır. Daha geniş bir hareket kabiliyeti elde etmek amacıyla, her bir bacağı 4-DoF olmak üzere, toplamda 16 serbestlik dereceli yapıda tasarlanmıştır. *BigDog*'a göre daha büyük ve ağırdır (Kim ve ark., 2013). Ağırlık: 120 kg Boyutları: 1.2 m x 0.4 m x 1.1 m

2013	**Spot** 	Boston Dynamics firmasının, Google tarafından satın alındıktan sonra geliştirdiği, *Spot* serisinin ilk robotudur. Kapalı mekanlarda insanlarla etkileşimli hareket edebilecek ve engebeli arazilerde arama amaçlı kullanılabilecek şekilde tasarlanmıştır. *BigDog* serisinin dördüncü versiyonudur. *BigDog'*a göre hafif ve boyutları daha küçüktür. Hızlı ve çevik hareket yetenekleri ile dikkat çekmiştir (Boston Dynamics, 2020). Ağırlık: 75 kg Yük taşıma kapasitesi: 14 kg Yürüyüş süresi: 1.5 saat Yürüyüş hızı: 1.6 m/s
2013	**HyQ Blue** 	*HyQ Blue, HyQ* robotunun yeni bir versiyonu olarak, IIT enstitüsü tarafından 2013 yılında geliştirilmiştir. Trento Üniversitesi ile işbirligi kapsamında, üç yıl süreyle Trento'ya gönderimiştir. Robotunun arama ve kurtarma, orman ve inşaat teknolojileri gibi yüksek potansiyelli görevlerde kullanılması amaçlanmıştır. Kalça uzvu eklenmiş bu versiyon birçok hidrolik ve elektronik sensör ile donatılmıştır. Kablosuz, uzaktan yönlendirilebilmekte ve gerçek zamanlı çevre haritalaması yapabilecek kameralar içermektedir. Ağırlık: 90 kg
2014	**Baby Elephant** 	*Baby Elephant,* yüksek yük taşıma amacıyla, fil görünümlü olarak geliştirilmiştir. Seri-paralel hibrit mekanizma şeklinde tasarlanan bacak yapısı, 3 serbestlik dereceli ve hidrolik silindirler ile tahrik edilmektedir. Zemin tepkisini azaltmak için ayak ucuna yay eklenmiştir. Diğer seri mekanizmalı robotlara kıyasla, elektronik aksamın korunması amacıyla ayak ucunda sensor ve eyleyici bulunmamaktadır. Araştırmacılar bu robotta kullanmak üzere, *"Hy-Mo"* isimli bir mikro-motor kontrolcü, filtre, soğutucu, akümülatör ve tank gerektirmeyen yeni bir hidrolik eyleyici geliştirmişlerdir (Gao ve ark., 2014). Ağırlık: 130 kg Yürüyüş hızı: 0.5 m/s Boyutları: 1.2 m x 0.6 m x 1m

2015	**MiniHyQ**  	*HyQ* ekibi tarafından tasarlanmış ve şimdiye kadar inşa edilmiş en hafif ve en küçük hidrolik dört ayaklı robot ünvanına sahiptir. *MiniHyQ* tamamen tork kontrollü olup geniş hareket kabiliyetine sahiptir ve güç ünitesi üzerindedir. *HyQ* ile yaklaşık aynı boyutlara sahip olmasına ragmen 3 kat daha hafif, % 30 daha fazla tork gücüne sahip ve eklem hareket aralığı % 40 daha fazladır. Bacağın dönme eksenini değiştirebilmek için alt ve üst eklemlerin boyları ayarlanabilmektedir. Robot bacaklarına ait uzuvlar tam kapalı olduğunda %15 kısalabilmektedir. Ağırlığı hidrolik güç ünitesi hariç sadece 24 kg'dir. Bir kişi tarafından kolayca taşınabilir. Robotu hafifletmek için minyatür hidrolik eyleyiciler kullanılmıştır. Ayrıca, diz eklemlerinde Isogram mekanizması kullanılmış, mekanizma ile uyumlu bir tork sensörünün tasarımı önerilmiştir. (Khan, 2015; Khan ve ark., 2015) Ağırlık: 35 kg Boyutları: 0.85 m x 0.35 m x 0.77 m Yürüyüş hızı: 2.5 m/s
2015	**HyQ2Max** 	*HyQ2Max, HyQ*'nun gelişmiş bir versiyonudur. Gücü, sağlamlığı ve çok yönlülüğü maksimize etmek amacıyla geliştirilmiştir. Önceki versiyonlara göre, daha büyük eklem açısal konum aralıkları ve daha yüksek tork değerleri tercih edilmiştir. Ortalama maliyeti aynı kalacak şeklide belli iyileştirmeler yapılmıştır. Robot donanımının kararlılığı ve güvenilirliği artırılmış, daha yüksek tork üretebilen eyleyiciler kullanılmıştır. Ayaklı robotlar için dış darbelere ve kire karşı dayanıklılık önemli bir gereksinimdir. *HyQ2Max* çevresel etkilere karşı dayanıklı olacak şekilde tasarlanmıştır. Sensörler, vanalar, aktüatörler ve elektronik aksam gibi tüm hassas parçalar robot gövdesi içinde korumaya alınmıştır. Bacaklar ve gövde alüminyum alaşımdan (7000 serisi) imal edilmiştir (Semini ve ark., 2015b; Semini ve ark., 2015c). Ağırlık: 80 kg, Yük taşıma kapasitesi: 40 kg Boyutları: 1.3 m x 0.54 m x 0.91 m Yürüyüş hızı: 1.5 m/s

2015	**HyQ-Centaur**  **Hyarm** 	*HyQ-Centaur*'un *HyQ* ekibi tarafından, tehlikeli ve kirli ortamlarda kullanılmak amacıyla, *HyQ* robotuna iki adet kol eklenerek geliştirilmesi planlanmıştır. Geleneksel dört ayaklı robotların kabiliyeti yük taşıma ve gözlem sınırlıdır. Bu sınırlamayı aşabilmek amacıyla, robota tutucu işlevi kazandıran ve hareketi sırasında gövde dengesini koruma yardımcı olabilecek bir robot kol ilave edilmiştir. Tekerlekli araçların ulaşamayacağı arazilerde, nükleer santral gibi tehlikeli alanlarda arama kurtarma faaliyetlerine yönelik planlanmıştır. Eklenen bu kol sistemi sayesinde robot; nesneleri tutma, dengede kalma, dış etkilere tepki verebilme gibi yeni özelliklere sahip olabilecektir. Bu sayede *HyQ*'dan farklı olarak birçok yeni görevi yapabilceği belirtilmiştir (Semini ve ark., 2015c; Ur Rehman ve ark., 2016). Robot kol ağırlığı: 12.5 kg Robot kol yük taşıma kapasitesi: 10 kg Robot kol uzanma mesafesi: 0.74 m
2016 2018	**SpotMini** 	Laboratuvar ortamından çıkarak ticarileşen ilk robotlardan olan *SpotMini*, Boston Dynamic firmasınına ait Massachusetts ticari şirketi tarafından, ev ve ofis ortamlarına yönelik tasarlanmış ve ticari pazara sunulmuştur. Stereo kamera ve navigasyon gibi birçok gelişmiş teknolojiye sahip, yeni nesil, elektrik tahrikli, küçük, çevik ve kompakt bir robottur. Engel aşma, tırmanma çevresini algılayabilme ve haritalayabilme gibi çok yönlü kabiliyetleri vardır. Biyolojik canlılardan ilham alınarak geliştirilmiştir. Dinamik denge ve konum kontrol sistemlerine sahiptir. Uzaktan kumanda ile yönetilebilmesinin yanı sıra, bazı zorlu görevleri otonom gerçekleştire-bilmektedir. Gelişmiş batarayaları sayesinde 1.5 saat çalışabilmektedir. 2018 yılında ise, robot kol eklenmiş versiyonu sunulmuştur. Güncel robotlardan olması nedeniyle hakkında az bilgi paylaşılmıştır (Niquille, 2019; Boston Dynamics, 2020). Ağırlık: 25 kg, Yük taşıma kapasitesi: 14 kg Robot kol ağırlığı: 5 kg Uzunluğu: 0.84 m Yürüyüş hızı: 1.6 m/s

2016	**ANYmal** 	*ANYmal,* ETH Zurich Enstitüsü ve ANYbotics firması tarafından, zorlu ortamlarda otonom operasyonlar için tasarlanmış yeni nesil, elektrik tahrikli bir robottur. Özel uyumlu ve hassas bir şekilde tork kontrollü eyleyiciler tarafından tahrik edilen robot, yüksek dinamik güce ve hareketliliğe sahiptir. Bünyesindeki lazer sensörleri, kameralar ve navigasyon sistemleri sayesinde; çevresini algılayabilir, kendini doğru bir şekilde konumlandırabilir, yörüngesini otonom bir şekilde planlayabilir ve yürürken adım hareketini ayarlayabilir. *ANYmal* gelişmiş bataryaları sayesinde 2 saatten fazla otonom hareket edebilir ve 5-10 kg yük taşıyabilir. Bir kişi tarafından kolayca taşınabilen, görece düşük ağırlıkta ve orta ölçekli bir robottur. Zorlu ortamlarda kullanım için tasarlanmıştır. Su ve toz geçirmez, darbelere karşı dayanıklıdır. 70 Hz tork kontrol hızına sahip ve en fazla 280 W'lık bir güç gereksinimi vardır. Teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda geliştirilmiş ve nihai hedef olarak ticarileştirilmiştir. *ANYmal* robotu litratüre önemli katkılar sunmuştur. (Hutter ve ark., 2016). Ağırlık: 30 kg Yük taşıma kapasitesi: 10 kg Boyutları: 0.8 m x 0.4 m x 0.7 m Yürüyüş hızı: 1.6 m/s
2017	**Laikago** 	*Laikago,* Unitree Robotics şirketi tarafından hem akademik araştırma hem de ticari amaclı olarak Çin'de geliştirilmiştir. Elektrik tahrikli, engel aşma kabiliyetleri olan, küçük boyutlu bir dört ayaklı robottur. İleri, geri ve yana doğru hareket edebilme gibi çok yönlü hareket kabiliyeti vardır. Kablosuz bağlantı (Wi-Fi) ile uzaktan kontrol edilebilir. Stereo kameralar ve Lidar sensörler içermedigi için henüz otonom hareket edemeyen *Laikago (XDog)* robotu, günlük hayatta basit ve kolay işlerde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Mekanik yapısı ve kontrol sisteminin özgün ve sade olması nedeniyle maliyeti düşüktür (Pan ve ark., 2020). Ağırlık: 27 kg Boyutları: 0.6 m x 0.37 m x 0.57 m Yürüyüş hızı: 0.8 m/s

2019	**ANYmal C** 	*ANYmal C,* endüstriyel uygulamalara yönelik geliştirilen ve *ANYbotics* firması bünyesinde ticarileşen, *ANYmal* robotunun güncel bir versiyonudur. Endüstriyel alanlarda karmaşık görevleri güvenli ve otonom bir şekilde gerçekleştirebilmesi için görsel ve termal kameralar, mikrofon, gaz detektörü gibi birçok donanıma sahiptir. 2 saatten fazla pil gücüyle çalışabilir ve kendi kendini şarj edebilir. 360 derece etrafını algılayarak gerçek zamanlı ortam haritalaması yapabilen, engelli ve eğimli zeminlerde otonom ve uzaktan kumanda ile hareket edebilen, merdiven çıkabilen, gelişmiş kontrolcülere sahip *ANYmal C*, birçok sektörde izleme, denetleme ve veri toplama gibi görevleri yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Henüz test aşamasında olmasına rağmen, gelecekte denetim operatörlük stratejisini temelden değiştirecek ve tamamen optimize edilmiş denetim sistemlerine imkân sağlayacaktır. Ağırlık: 50 kg, Yük taşıma kapasitesi: 10 kg Boyutları: 1.05 m x 0.5 m x 0.83 m Yürüyüş hızı: 1 m/s
2019	**HyQReal** 	*HyQReal, HyQ* ekibinin yüksek güç ve dayanıklılık temelinde tasarladığı, acil durum senaryolarında insanları desteklemek için geliştirdiği ve ticarileştirdiği, hidrolik tahrikli, büyük boyutlu, güncel bir robottur. Tümleşik hidrolik sistemlere ve bataryalara sahip, kablosuz iletişim ile tamamen otonom hareket edebilen *HyQReal,* yüksek sağlamlık, güvenilirlik ve enerji verimliliği sunabilmektedir. Tasarımı ve mekanik donanımı IIT enstitüsü, yazılımı ve kontrolcüsü ise, kontrol sistemleri tasarımcısı ve üreticisi olan Moog firması tarafından geliştirilmiştir. *HyQReal*'in 3300 kg ağırlığındaki yolcu uçağını 10 m çekebilmesi, rakiplerine göre çok güçlü olduğunu göstermiştir. Enerji verimliliği ve yüksek performansı ile pazarda avantajlıdır (Semini ve ark., 2019; Villarreal ve ark., 2020). Ağırlık: 130 kg, Boyutları: 1.33 m x 0.67 m x 0.9 m Yürüyüş hızı: 0.5 m/s

Yukarıda belirtilen güncel dört ayaklı robotlara bakıldığında; Boston Dynamics firması, İtalyan Teknoloji ve ETH Zurich Enstitüleri olmak üzere, dünya çapında üç temel kurumun ön plana çıktığı görülmektedir. Robotların yapılarını, kullanım amaçlarını ve tarihsel sıralamalarını genel olarak incelediğimizde;

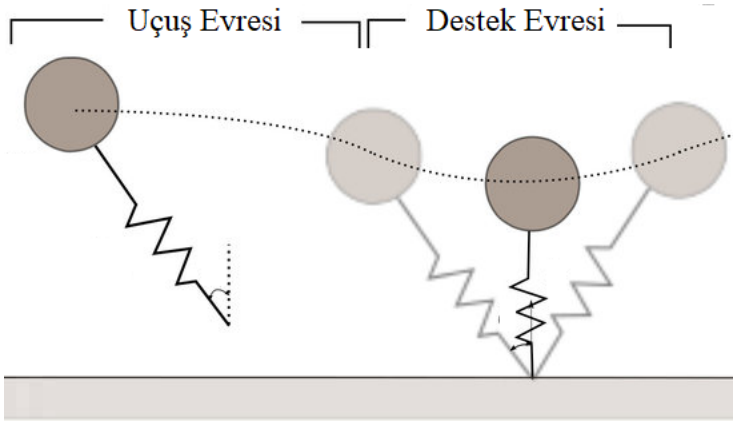
- Bacaklı robotik alanda öncü ve yönlendirici konumda olan ancak gizlilik nedeniyle çok az bilgi paylaşan, Amerikan ordusu destekli, M. Raibert liderliğindeki Boston Dynamics firması; yüksek yük taşıma ve dayanıklılık temelli, hidrolik tahrikli ve büyük boyutlu *BigDog* isimli robot ile başlattığı serüvenini; ev ve ofis ortamında basit görevleri insan ile etkileşimli olarak yapabilecek, elektrik tahrikli ve küçük boyutlu *SpotMini* isimli robot ile sürdürmektedir (Boston Dynamics, 2020).
- Akademik boyutta başlattıkları çalışmalar ile literatüre önemli kazanımlar sağlamanın yanı sıra, yakın zamanda ticarileşme yoluna giden C Semini liderliğindeki İtalyan Teknoloji (IIT) Enstitüsü; yüksek güç ve sağlamlık gerektiren zorlu işler için hidrolik tahrikli, büyük boyutlu robotlar geliştirmektedir. H*yQ, HyQ2Max* isimli robotların daha güçlü versiyonu olan, birçok sektörde ve alanda kullanılabilecek otonom *HyQReal* isimli robot ile yüksek güç ve enerji verimliliği sunmaktadır (Semini, 2010; Boaventura, 2013; Focchi, 2013; Khan, 2015; Mastalli, 2017; Orsolino, 2019).
- Benzer şeklide, M. Hutter liderliğindeki ETH Zurich Enstitüsü; fazla zorlu olmayan ancak karmaşık hareketleri gerçekleştirebilen, seri elastik elektrikli eyleyiciler ile tahrikli, küçük boyutlu, hızlı çevik *StarlETH* isimli robot ile literatürde önemli bir yere sahiptir. İlk robotları küçük boyutlarda olmasına rağmen, sonrasında güçlü ve dayanıklı *ANYmal* robot serisini geliştirmişler ve *ANYbotics* firmasını kurmuşlardır. Endüstriyel alanlarda denetim ve veri toplama gibi görevlere yönelik tasarladıkları, yüksek algılama ve çevresini haritalandırabilme kabiliyetlerine sahip otonom *ANYmal C* versiyonu geliştirmektedirler (Hutter, 2013; Bloesch, 2017; Gehring, 2017).

Günümüzde dört ayaklı robotlar ile ilgili çalışmalar; robotun tasarımı ve modellenmesinin yanı sıra, eklemlerin tork/kuvvet kontrolü ve gövdenin denge kontrolü, yürüyüş planlaması, ortam haritalaması ve engebeli yüzeylerde yürüyüş gibi ana başlıklar altında, teorik ve deneysel olarak sürdürülmektedir.

2.2. Modelleme, Kontrol ve Eyleyiciler ile İlgili Literatür Çalışmaları

İnsanların ve hayvanların yürüme, koşma gibi hareketleri, basit dinamik modeller üzerinden açıklanabilmektedir. Bunların en önemlilerinden biri olan doğrusal ters sarkaç modeli üzerinden, yürüyüş sırasında gövdenin hareketi ve dengelenmesi tam olarak ifade edilebilir (Winter, 1995). 1980 yıllarında M. Raibert tarafında geliştirilen Yay Eklenmiş Ters Sarkaç modeli (Spring-Loaded Inverted Pendulum, SLIP), rijit bir sarkaç modeline kıyasla koşma hareketini çok daha iyi temsil edebilmektedir (Alexander, 1990). SLIP yöntemi çok karmaşık sistemlere dahi uygulanabilmekte, basit modeller ve kontrol kuralları ile etkili çözümler sunabilmektedir.

Park ve ark. (2014) ise, dört ayaklı zıplamayı kontrol etmek için açısal momentumu da hesaba katan farklı bir model kullanmışlardır. SLIP modeli, robot bacağını noktasal bir kütle varsayarak, yay eklenmiş bir ters sarkaç sistemi olarak modeller. Yay, kütlenin ağırlık merkezini dengeleyerek hareket evreleri (uçuş ve destek evresi) arasındaki geçişte momentumu koruma işlevi görür. Uçuş evresinden destek evresine iniş açısı gövdenin nasıl ivmeleneceğini belirler ve ters sarkaç dinamiklerinin kontrol edilmesiyle stabil bir hareket sağlanır. Bu yaklaşım her biri SLIP model formunda tasarlanmış birden çok bacağa sahip bir robot için de uygulanabilir. SLIP gibi mekanik modeller, karmaşık denklemlerin sayısal olarak çözülmesini gerektiren kompleks modellere kıyasla, daha basit çözümler sunabilir ve eğrisel formlarda tasarlanan temel ayak ucu yörüngeleri ile hızlı sonuçlar verebilirler. Bu tür mekanik modeller, kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi ve denge probleminin çözümü için bacaklı robotik alanındaki araştırmacılara ilham vermiştirler (Ubellacker, 2016). Şekil 2.8'de SLIP modelinin hareketi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Yay eklenmiş ters sarkaç modeli (SLIP)

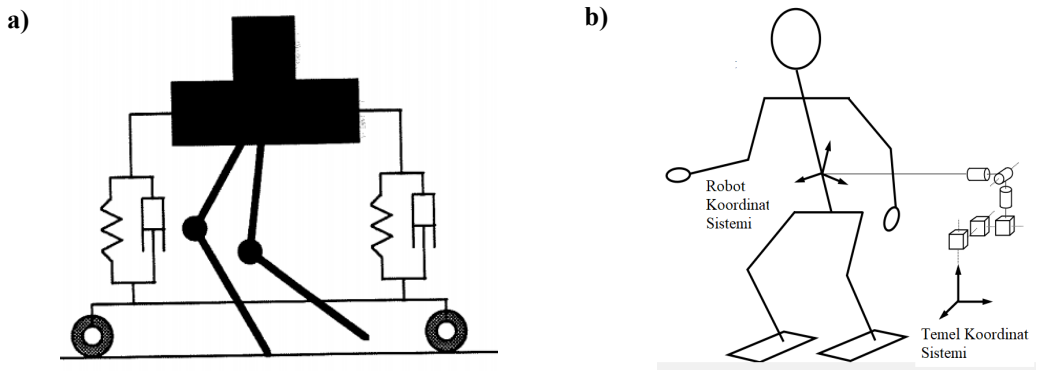
Robotlar, uzuvları genellikle rijit cisimler olarak modellenen, girişleri eyleyici torkları, çıkışları ise eklemlere ait açısal konumlar olan sistemlerdir. Endüstriyel robotların tork/kuvvet kontrolü üzerine araştırmalar 1950'li yıllara dayanır. Mafsallı robotların geliştirilmesiyle, tork kontrolü temel ilgi odağı olmuştur (Whitney, 1985). Bacaklı robotik alanında ise, Raibert (1986)'ın düzlemsel zıplayan bacağın kontrolüne yönelik çalışmaları bir dönüm noktasıdır. Önerilen kontrol yönteminin iki temel bileşeni; kalça eklemi üzerinden gövde kontrolü ve ayak ucu pozisyon kontrolü ile dengenin sağlanmasıdır. Bu temel ve basit metot, iki ve dört ayaklı sistemler için de başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Sonrasında, bacaklı sistemler için tork/kuvvet kontrol yöntemlerinin gelişimi devam etmiş ve son yıllarda yoğun çalışılan bir konu olmuştur.

Tork tabanlı kontrol, çeşitli empedans kontrol formlarında temas (kontak) kuvvetlerinin kontrolüne, rijit cisim dinamiği modeline dayalı kontrole ve diğer birçok model tabanlı kontrol uygulamalarına imkân verir. Yaygın olarak kullanılan empedans ve model tabanlı tork/kuvvet kontrol teknikleri mevcuttur.

N. Hogan tarafından sunulan çalışmaların, eklemli manipülatörlerin empedans kontrolü için temel olduğu düşünülmektedir (Hogan, 1985b; Hogan, 1985a). Hogan, dinamik etkileşim halindeki iki fiziksel sistemin, birbirini fiziksel olarak tamamlaması gerektiğini vurgulamıştır. Robotun çevre ile fiziksel uyumunu sağlamak için genellikle, çevrenin giriş (admittance) kabul edildiği ve uç işlevcinin ise empedans davranışı gösterdiği yaklaşımlar kullanılmıştır. Genel olarak empedans kontrol, kartezyen koordinat sisteminde çevre tarafından uygulanan bir harekete cevap olarak üretilen kuvveti denetler ve istenilen dinamik kapasitif-sönüm-endüktif etkiye göre eklemlere uygulanacak torkları üretir. Kazerooni ve ark. (1986), sınırlı model belirsizlikleri için çok değişkenli Nyquist kriterlerini kullandıkları, çevre ile uyumu denetleme yönelik farklı bir yöntem sunmuşlardır. Albu-Schaffer ve Hirzinger (2002), eklem sertliklerinin kontrolünü dikkate alarak, gelişmiş bir empedans denetleyici yapısı önermişlerdir. Bu yapı, Hogan'ın önerdiği klasik yönteme göre daha iyi bir empedans kontrol performansı sağlayabilmesine karşın daha düşük geometrik doğruluk göstermiştir.

O. Khatib, hareket ve kuvvet kontrolünü birlikte ele alarak, Operasyonel Alan Kontrolü (Operational Space Control-OSC) kavramı ve formülasyonları ile farklı bir yaklaşım sunmuştur. Eklemlerin kontrolünden daha çok robota verilen göreve, yani uç işlevcinin performansına odaklanan bir yaklaşım önermiştir (Khatib, 1987). Bu yaklaşımda, uç işlevcinin hem konumunun hem de temas kuvvetlerinin kontrolü, eklem torklarının denetimine dayanır.

Bacaklı hareket kontrolü için Pratt ve ark. (2001) sezgisel tabanlı Sanal Model Kontrolü (Virtual Model Control) tekniğini sunmuşlardır. Bu sanal modelleme tekniğinde; yay, damper gibi mekanik parçalar ile fiziksel olarak eşdeğer sanal bileşenler, robotun içine veya robot ile çevre arasındaki uygun konumlara tanımlanır. Daha sonra, bu sanal bileşenler ile robotun etkileşimi, eyleyicilerden istenen torkları ve kuvvetleri üreten Jacobian matrisi ile ifade edilir. Şekil 2.9a'da, sanal model kontrolü yöntemiyle geliştirilmiş yürüyüş mekanizması verilmiştir. Diğer model tabanlı yaklaşımlarda ise, genellikle rijit cisim dinamiği tabanlı matematiksel modeller kullanmıştır. Buchli ve ark. (2009), bacaklı hareket kontrolünün gürbüzlüğünü (robust) artırmaya yönelik, rijit cisimler için model tabanlı ve ters dinamik kontrole dayalı bir çözüm sunmuşlardır. Bu yöntem, yörünge takibinde önemli bir kayba sebep olmadan pozisyon geri besleme kazancının azaltılmasına imkân verir. Bu düşük geri besleme kazançları sayesinde, robot bilinmeyen muhtemel engebeli arazide daha gürbüz ve kararlı hareket edebilir. Mistry ve ark. (2010), kayan nokta (floating base) tabanlı koordinat sistemine sahip robotların, noktasal temasların dinamik olarak sürekli değişmesinden kaynaklı sorunların üstesinden gelmek için, rijit cismin ters dinamiğini hesaplayan bir ortogonal ayrışma yöntemi önermişlerdir. Kayan nokta tabanlı bir sistemde, robot gövdesine ait (body frame) koordinat sistemi ve temel (inertial frame) koordinat sistemi Şekil 2.9b'de görülmektedir.



Şekil 2.9. a) Sanal model kontrollü yürüyüş mekanizması **b)** Kayan nokta tabanlı robot modeli

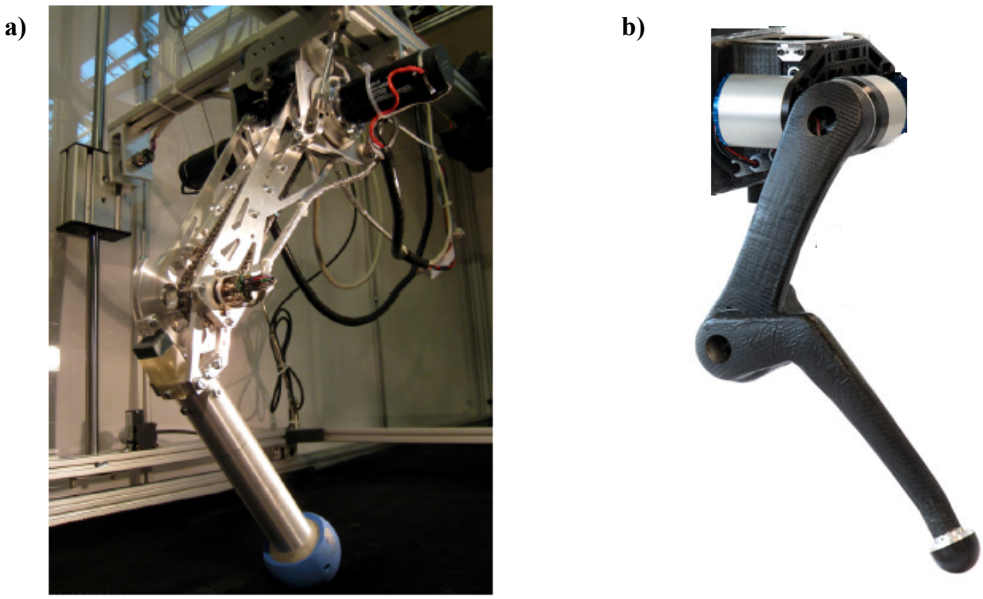
Kuvvet kontrolü gerektiren sistemlerde eyleyicilerin güç aktarımdaki sertlik, denge ve kararlılık problemlerinin ana nedenidir. Ayrıca, eyleyicilerin çalışma frekanslarının sınırlı olması ve yetersiz sayısal hesaplama hızı nedeniyle oluşan gecikmeler, kapalı çevrim kontrol sistemlerinin kararlılığını olumsuz etkilemektedir (Whitney, 1985). Bu tür sorunların üstesinden gelmek için, eyleyicilere esnek yaylar eklenerek aktarım sertliğinin azaltılması sağlanmıştır (Pratt ve Williamson, 1995).

Seri Elastik Eyleyicilerin (Series Elastic Actuators-SEA), aktarım sertliğini azaltmanın yanı sıra, darbe kuvvetlerinden kaynaklanan hasarları önlemek, enerji depolamak, daha güvenli bir insan/çevre ve robot etkileşimi sağlamak gibi özellikleri vardır. SEA'ların tasarımı, sağlamlık ve performans arasında bir denge kurulmasını gerektirir. Robotun çok yönlü hareket kabiliyeti açısından uygun yay sertliğini seçmek önemlidir. Yüksek eklem sertliği istenmediği gibi, düşük eklem sertliği ise robotun kontrol edilebilirliğini ve ayak ucu yörünge izleme yeteneğini düşürmektedir. Bu sebeple, Grebenstein ve ark. (2011) ve Tsagarakis ve ark. (2011), ayarlanabilir değişken sertlik değerlerine sahip farklı SEA tasarımları ve çalışma prensipleri önermişlerdir. Değişken sertliğe sahip eyleyiciler önemli çözümler sunabilmelerine karşın ağırlık, hacim, mekanik karmaşıklık, sağlamlık ve hız gibi özellikleri nedeniyle yüksek dinamik hareketli robotlar için yetersiz kalmaktadır. Kuvvet, eyleyiciden yüke sonlu sertliğe (rijit olmayan) sahip hidrolik akışkan veya yay ile aktarıldığından dolayı yükün hızı geri beslenir. Gelişmiş model tabanlı kontrol teknikleri, bu geri beslemeyi telafi etmek üzerine tasarlanmaktadır (Boaventura ve ark., 2012a).

M. Hutter ve ekibi, geliştirdikleri *StarlETH* (Hutter, 2013) ve *ANYma*l (Hutter ve ark., 2016) isimli elektrik tahrikli robotların; tasarımlarını, eyleyici dinamiğinin ayrıntılı modelini, mekanik analizlerini ve düşük seviye kontrol tekniğini (low-level controller) detaylı olarak sunmuşlardır. Yüksek verimli ve zıplama/koşma gibi çok yönlü hareketlere uyumlu, insan/hayvan bacak yapılarından ilham alınarak tasarlanan, iki uzuvlu *StarlETH* robotuna ait bacak yapısını ve aktif sönümleme içeren entegre bir eklemlerin tork, pozisyon kontrolüne yönelik bir yaklaşım tanıtmışlar, detaylı analizler sunmuşlardır (Hutter ve ark., 2012b; Hutter ve ark., 2013). Güçlü bir öğrenme metodu kullanarak (reinforcement learning), *StarlETH* robotunun optimal tek-bacak zıplama hareketinin kontrolünü gerçekleştirmişlerdir (Fankhauser ve ark., 2013). Önerilen tek-bacak zıplama kontrol tekniğinin, yüksek hızlardaki sürtünme etkisinde yetersiz kaldığını ve büyük güç gereksinimlerini karşılamadığını belirtmişlerdir (Heijnen, 2014). Eklem kinematiği ile ters dinamik operasyonel alan kontrolünün birleşiminden oluşan hibrit bir operasyonel alan kontrolcü geliştirmişler ve *StarlETH* robotuna başarıyla uygulamışlardır (Hutter ve ark., 2014). Büyük adımlar ile robotun çevresini görmeden/haritalandırmadan kör yürüyüşüne yönelik (blind walking) hiyerarşik bir optimizasyon formüle etmişlerdir (Bellicoso ve ark., 2016). Robotun daha hızlı ve düşük enerji tüketimine yönelik modelleme, yürüyüş planlaması ve gürbüz bir model tabanlı kontrolcü çalışma sunmuşlardır (Gehring, 2017). Fankhauser ve Hutter (2018), yüksek hareketliliğe ve çok

yönlülüğe sahip dört ayaklı robotlar için, klasik mekanik dişli sistemine sahip eyleyicilerin kullanılamayacağını, klasik eyleyicilerin sadece yavaş ve statik hareketler üretebileceğini belirtmişlerdir. Eklem torkunu, pozisyonunu ve empedansını herhangi bir ek bileşene gerek kalmadan doğrudan düzenleyebilen, kompakt ve küçük boyutlu, ANYdrive isimli bir yeni nesil SEA sunmuşlar ve geliştirdikleri *ANYmal* isimli robotta kullanmışlardır. Grandia ve ark. (2019) bacaklı robotlar için daha gürbüz kontrol çözümleri geliştirmek amacıyla, eyleyicilerin performans sınırları ile yürüyüş planlarını uyumlu hale getiren, frekans tabanlı, ayarlanabilir bir model öngörücü (model predictive) kontrol önermişler ve uygulamışlardır. Deneysel sonuçların *ANYmal* robotunun hareket ve tork performansını iyileştirdiğini ve önceden tanımlanmamış zeminlerde daha kararlı yürüyüş sağlayabildiğini bildirmişlerdir. Şekil 2.10'da, *StarlETH* ve *ANYmal* robotları için geliştirilen elektrikli eyleyicilere ait görseller verilmiştir. Bu iki robotun bacak yapıları ise Şekil 2.11'de görülmektedir.

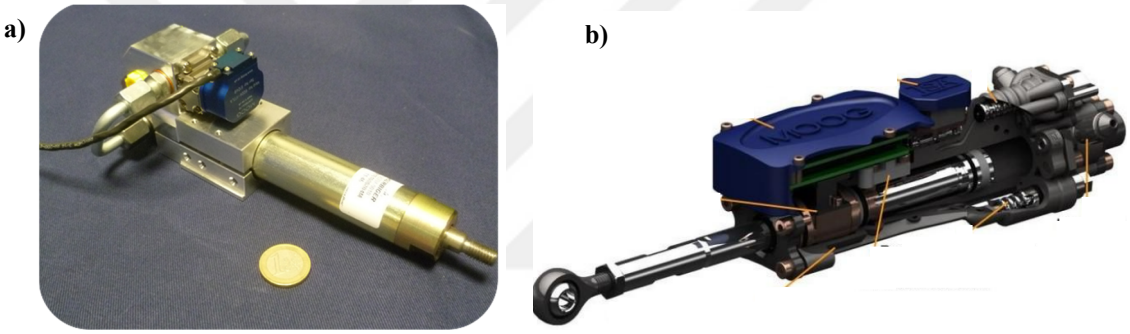
Şekil 2.10. ETH Zürih Enstitüsünde geliştirilen **a)** *StarlETH* ve **b)** *ANYmal* robotlarına ait eyleyiciler



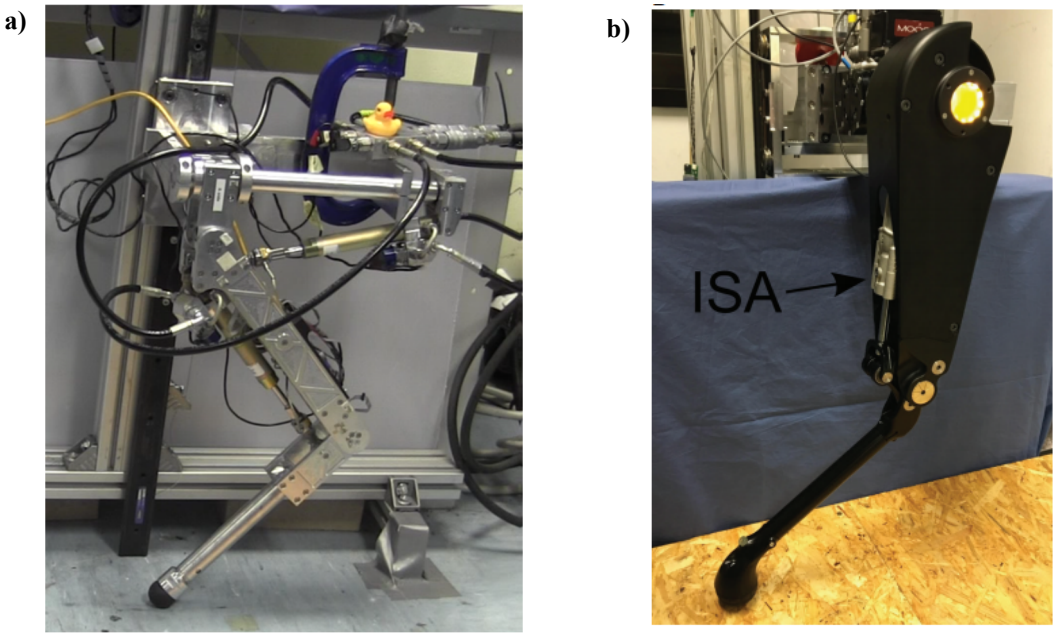
Şekil 2.11. ETH Zürih Enstitüsünde geliştirilen **a)** *StarlETH* ve **b)** *ANYmal* robotlarının bacak yapıları

C. Semini ve ekibi, geliştirdikleri *HyQ* (Semini, 2010), *HyQ2Max* (Semini ve ark., 2015c) ve *HyQ-Real* (Semini ve ark., 2019) isimli hidrolik tahrikli robotların; tasarımlarını, hidrolik eyleyicilerinin analizlerini ve geliştirilen kontrolcüleri kapsamlı olarak sunmuşlardır. Çalışmalarına, düşey bir kızak üzerine doğrusal hareketli olarak sabitlenmiş, iki uzuvlu, *Hy* isimli bir hidrolik robot bacağın geliştirilmesi ve kontrolü ile başlamışlardır. Başlangıçta, sistemin denge problemi olmadığı için öncelikle eklemlerin kuvvet ve pozisyon kontrolü üzerinde durmuşlardır. Eklemlerin açısal konumlarının ölçümünde enkoder kullanmışlar ve bu sayede bacağın pozisyonunu tayine etmişlerdir. İlk olarak, benzetim ve uygulama çalışmaları için gerçek zamanlı bir kontrol yazılımı (Schaal, 2009) kullanmışlardır. Koşma ve zıplama gibi oldukça dinamik hareketlere uyumlu bu bacak yapısı birçok kontrol tekniklerinin test edilmesine ve analizine imkân sağlamıştır. Semini ve ark. (2008), bacak yapısının fiziksel parametrelerini ve test sisteminin kurulumunu açıklamış, bacağın zıplama hareketine ait deneysel sonuçları, analizleri rapor etmişlerdir. Yüksek güç ve hızlı bir dinamik tepki sunabilmesi nedeniyle hidrolik eyleyiciler tercih edilmiş, performans ve fiziksel boyutlar açısından elektrikli eyleyiciler ile karşılaştırılması yapılmıştır. Cunha ve ark. (2009) bacağın ilk kontrol yaklaşımı olarak, kazançlarının yürüyüş döngüsüne eklem konumuna göre ayarlanabildiği PID kontrol algoritması uygulamışlardır. Semini ve ark. (2011), *HyQ* robotunun tasarım yapısı, hidrolik eyleyici ve kontrolcü bileşenleri hakkında detaylı bilgiler vermişlerdir. *HyQ* robotu, aktif uyumlu kontrol sağlayan, tam tork kontrolcüye sahiptir (Boaventura ve ark., 2012b; Boaventura ve ark., 2013). Ugurlu ve ark. (2013) hidrolik tahrikli robotlarda dinamik ve uygulanabilir yürüyüş hareketi üretmek için birleştirilmiş bir yörünge sentezleyici ve aktif kontrol şeması önermişler, HyQ robotunda uygulamışlardır. Semini ve ark. (2015a), yay gibi pasif elemanların aksine gerçek zamanlı eklem sertliği ve sönümleme ayarı sağlayan, tork kontrol tabanlı aktif bir empedans kontrolcü önerilmişler ve HyQ robotun yürüyüşündeki etkisini değerlendirmişlerdir. Focchi ve ark. (2016) empedans sertlik ve sönüm parametrelerinin etkisi üzerine deneysel ve benzetim çalışmaları ile kapsamlı bir analiz çalışması sunmuşlardır. Koivumäki ve ark. (2017) hidrolik bacak kontrolü için sanal ayrışma kontrol (Virtual Decomposition Control -VDC) yaklaşımı ile doğrusal olmayan model tabanlı bir kontrol tekniği sunmuşlardır. Semini ve ark. (2017) çalışmalarıyla, *HyQ* robotuna göre daha sağlam ve güçlü olması amaçlanan, mevcut hareket kabiliyetini genişletmek amacıyla farklı kinematik yapıda tasarlanan bacak yapısına ve optimize edilmiş hidrolik mekanizmalara sahip *HyQ2Max* isimli versiyonu geliştirmişlerdir. Önerilen yeni tasarımın ve tork kontrolcünün, robotun

önceki versiyonlarına kıyasla farklı yüksek dinamikteki hareketleri gerçekleştirmedeki performansını araştırmak için deneysel ve simülasyon çalışmaları yapmışlar, detaylı analizler sunmuşlardır. Barasuol ve ark. (2018), *HyQ-REAL* robot bacağında kullanılmak üzere; yüksek güç, sağlamlık ve geniş çalışma frekansı sunan, hidrolik silindir, servo valf ve elektronik bileşenlerden oluşan, basınç/konum/sıcaklık algılayıcıları sayesinde aktif empedans ve kuvvet kontrolüne uygun, hidrolik bir Entegre Akıllı Eyleyici (Integrated Smart Actuator-ISA) geliştirmişlerdir. Önerilen akıllı eyleyicinin dinamik modelini ve tasarladıkları kontrol mimarisini tanıtmışlar, tek bacak yapısı üzerinde deneysel olarak doğrulama çalışmaları ve değerlendirmeler sunmuşlardır. Bu eyleyicinin, robot ile yüksek oranda entegre edilmiş, bu alanda geliştirilen ilk hidrolik akıllı eyleyici olduğunu bildirmişlerdir. Şekil 2.12'de, *HyQ* ve *HyQ-REAL* robotları için geliştirilen hidrolik eyleyicilere, Şekil 2.13'de ise bu robotların bacak yapıları ait görseller sunulmuştur.



Şekil 2.12. İtalyan IIT Enstitüsünde geliştirilen **a)** *HyQ* ve **b)** *HyQ-REAL* robotlarına ait eyleyiciler

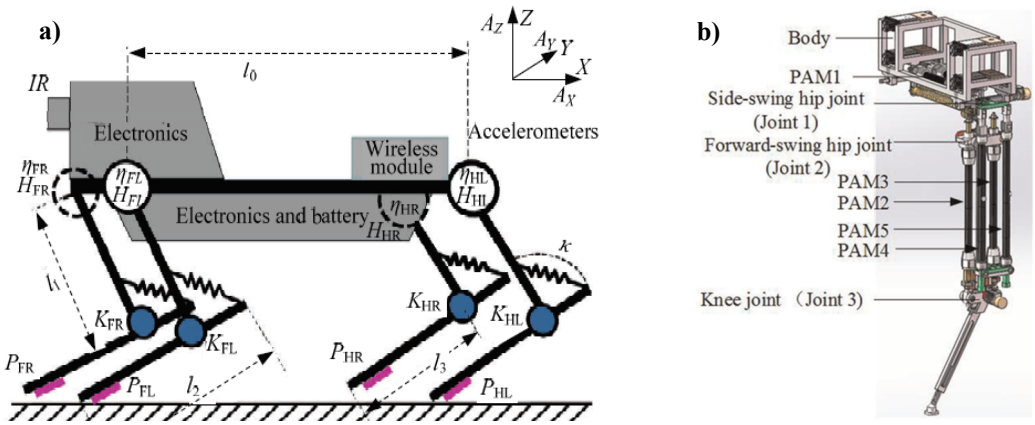


Şekil 2.13. İtalyan IIT Enstitüsünde geliştirilen **a)** *HyQ* ve **b)** *HyQ-REAL* robotlarının bacak yapıları

Hoffmann ve Simanek (2017), geliştirdikleri dört ayaklı bir robotun diz eklemlerine yay ekleyerek aktif/pasif eklem (Active/Passive Compliant Joint) oluşturup, deneysel ve benzetim çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Yay eklenerek oluşturulan eklem yapısının; yürüyüş algoritmasının öğretilmesi, enerji verimliliği ve ölçüm alma üzerine etkileri, avantajları incelenmiştir. Pasif eklem yapısının, düz zeminlerde aktif eklem yapısına kıyasla, robotun %30~50 oranında daha stabil ve verimli bir yürüyüş gerçekleştirebildiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca pasif eklemin işlevsel ve ucuz olmasının yanı sıra, arazi şartlarına daha iyi uyum sağlayabildiği belirtilmiştir. Önerilen eklem yapısının, hassas kontrol gerektirmeyen uygulamalarda, karmaşık yapının, maliyetin ve toplam ağırlığın azaltılması; enerji verimliliğinin, sağlamlığın ve güvenilirliğin artırılması açısındañ avantajları olduğu ifade edilmiştir (Şekil 2.14a).

Lei ve ark. (2017), çitanın biyolojik anatomisinden ve kas yapısından esinlenerek, pnömatik yapay kaslarla çalışan, hafif ve esnek bir biyonik bacak geliştirmişlerdir. Sistemin jakobiyen matrisi ve kinematik çözümlemeleri yapılmıştır. Bacağın yüksek hızda hareketi ve yumuşak teması için, ayak temas kuvvetlerine göre ayak esnekliğine bağlı potansiyel enerjisi analiz edilmiş ve ayağın katılığını veren bir model sunulmuştur. Önerilen bacak modeli deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır (Şekil 2.14b).

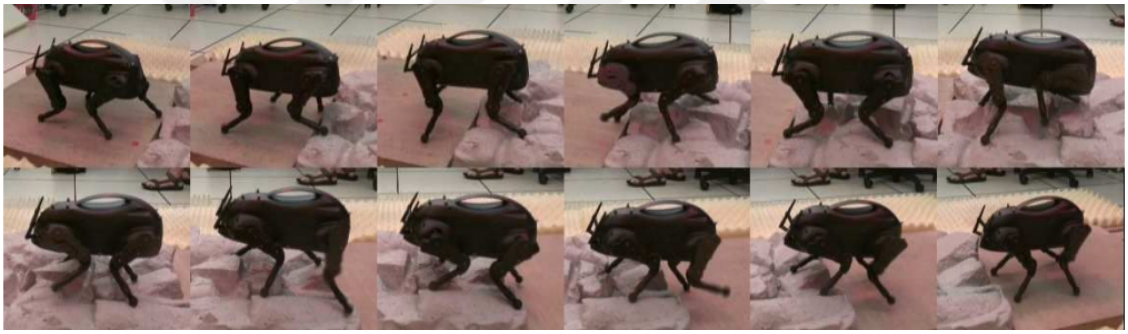
Kitano ve ark. (2016), yüksek hızlı ve enerji tüketimi açısından verimli bir yürüme yeteneğine ve genişleyen tipte (sprawling-type) bacak yapısına sahip *TITAN-XIII* isimli bir dört ayaklı robot geliştirmişlerdir. Bu robot, geniş bir ayak destek poligonu ve hafif gövde ağırlığı sayesinde yüksek kararlılığa sahiptir. Yürüme hızını ve enerji verimliliğini artırmak için hafif ve kompakt bir bacak yapısı tasarlamışlar ve yürüme hızını 1.38 m/s hıza kadar artırmışlardır. Böylece, örümcek tipte geliştirilen bu robotun memeli tipte bir robot ile aynı hız ve enerji verimliliğine sahip olabileceğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.14. a) Aktif/pasif eklem yapısına sahip model **b)** Pnömatik tahrikli biyonik

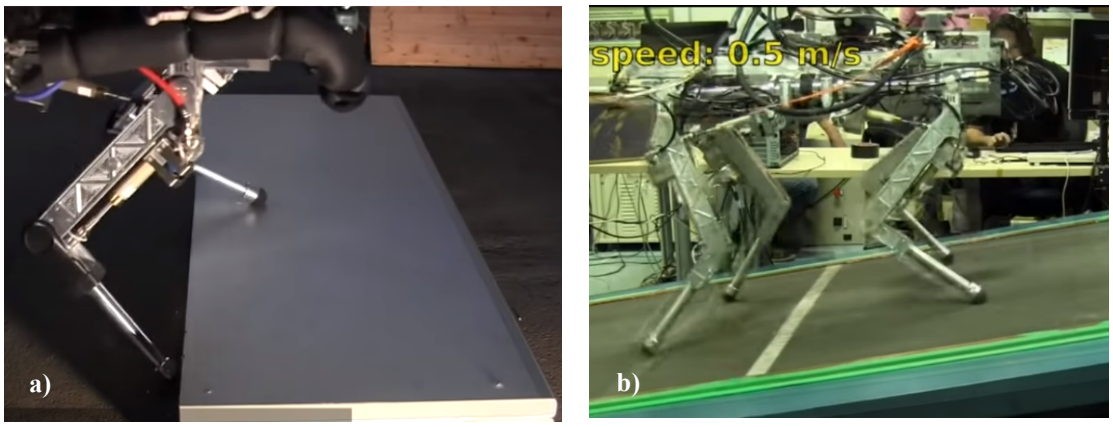
2.3. Engebeli Yüzeylerde Yürüyüş ile İlgili Literatür Çalışmaları

Bacaklı robotik sistemlerin en önemli avantajları, zorlu arazi şartlarındaki yüksek hareketlilik potansiyelleridir. Ancak engebeli arazi koşullara yönelik tüm gövde hareket planlanmasının ve kontrolünün karmaşıklığı, dört bacaklı robotların hareketliliğini düz araziler ile sınırlamaktadır. DARPA'nın yürüyüş öğrenme programı kapsamında gerçekleştirilen, *LittleDog* isimli küçük boyutlu robotun engebeli, düzensiz bir zemindeki yürüyüş çalışması, bu alandaki diğer araştırmalara yön vermiştir. Bu çalışmada Rebula ve ark. (2007), robotun engebeli arazide statik yürüyüşü için kaymayı, çarpmayı ihmal eden reaktif bir kontrolcü geliştirmişlerdir. Önceden tasarlanmış küçük boyutlardaki engebeleri aşmak için geliştirilen bu kontrolcü, birden fazla yürüyüş modeline ve bunlar arasında geçişe uygundur. Şekil 2.15'de görülebileceği üzere, robot 7.5 cm (bacak uzunluğunun % 40'ı) engebelerden başarıyla geçebilmektedir.



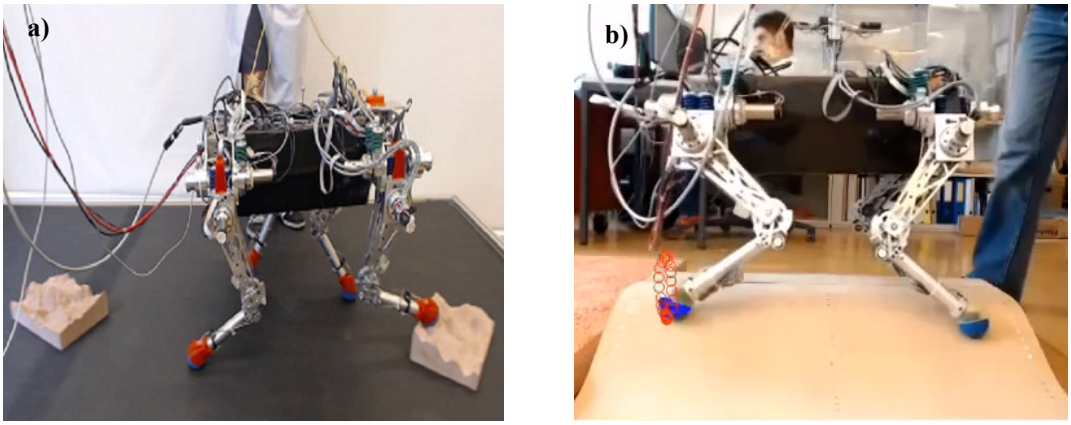
Şekil 2.15. *LittleDog* robotunun engebeli zeminde yürüyüşü

Literatürde, engebeli arazide hızlı ve sağlam bir yürüyüş için önerilen farklı hareket planlama ve kontrol yöntemleri mevcuttur. Kalakrishnan ve ark. (2011), üç ana alt sistemden oluşan, temel bir hiyerarşik yaklaşım önermişlerdir. Bu yaklaşım; gövde duruş planlayıcısı, adım hareket planlayıcısı ve kayan nokta tabanlı ters dinamik kontrolcüden oluşmaktadır. Bu hiyerarşik ayrışmanın en önemli avantajı, hesaplama süresini azaltmasıdır. Focchi ve ark. (2013), robotun yüzeydeki düzensizlikleri bilmediği ve görsel bir geri bildirim alamadığı durumlarda, ayak ucu reaksiyonu tepki hızının çok önemli olduğunu bildirmişler ve *HyQ* robotunun reaktif olarak yüksek engelleri (Şekil 2.16a) aşabilmesi için yerel bir refleks yöntemi önermişlerdir. Benzer şekilde, Barasuol ve ark. (2013), eğimli ve düzensiz zeminlerde gürbüz bir yürüyüş sağlamak amacıyla, gövdenin duruşunu da dikkate alarak, eliptik ayak ucu yörüngeleri üreten Merkezi Örüntü Üretimi (CPG) tabanlı bir reaktif kontrol algoritması önermişleridir (Şekil 2.16b).



Şekil 2.16. *HyQ* robotunun ayak ucu reaktif yöntem ile **a)** basamak aşması ve **b)** eğimli zeminde hareketi

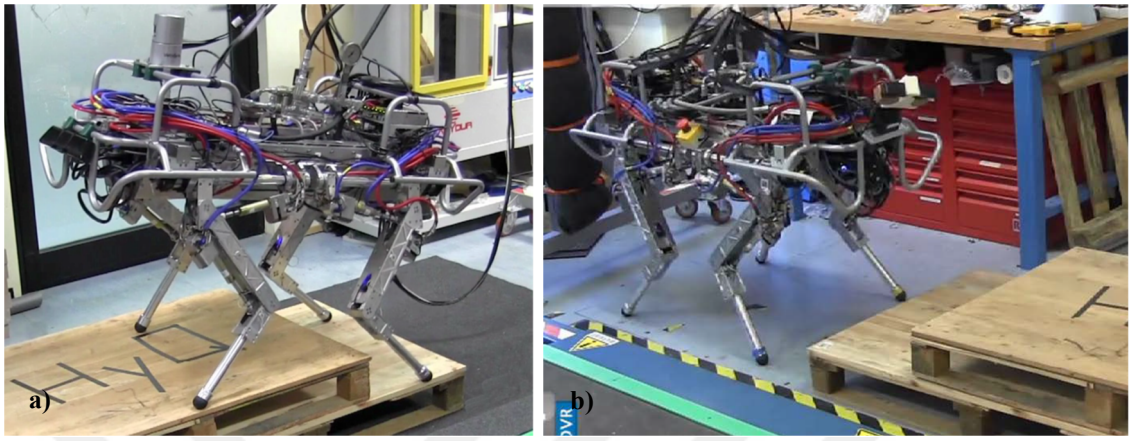
Gehring ve ark. (2013), *StarlETH* isimli robotun farklı yürüyüş çeşitleri ve farklı hızlarda yürüyüşü için esnek bir kontrol algoritmasını geliştirmişler ve deneysel olarak doğrulamışlardır. Önerilen algoritmanın, yürüyüş çeşitleri arasında geçişlere izin verebildiğini ve beklenmedik arazi şartlarına göre parametrelerinin ayarlanabilir olduğunu bildirmişleridir. Robotun yürüyüş sırasında 5 cm yüksekliğindeki üç boyutlu engebeleri aşabildiğini belirtmişlerdir (Şekil 2.17a). Wagner ve ark. (2017), zeminin teğetsel tepki kuvvetlerini en aza indirerek kayma riskini azaltmak amacıyla, ayak ucuna yerleştirilen bir kuvvet sensörü ile temas kuvvetlerini tahmin etmeye dayalı bir yöntem önermişler ve doğrulamışlarıdır. Optik kuvvet sensörünü modellemişler ve Kalman filtresi kullanılarak elde edilen eklem tork ölçümleri ile entegre edilmiştir. (Şekil 2.17b).



Şekil 2.17. *StarlETH* robotunun temas kuvvetlerine dayalı **a)** engebeli ve **b)** eğimli zeminlerde hareketi

Winkler ve ark. (2014) zorlu arazi şartları için, ayak ucu tepki kuvvetlerine göre kendini güncelleyebilen, sanal model tabanlı tork bir kontrolcü kullanan, gürbüz ve esnek bir ayak ucu yörünge planlayıcısı önermişlerdir (Şekil 2.18a). Daha sonra, Winkler ve

ark. (2015) tepki kuvvetleri yerine, online ortam modellemesi üzerinden yörünge güncellemesi yapabilen, sanal modelini ve sistem dinamiklerini birlikte dikkate alan, ZMP denge kriterine dayalı, daha hızlı bir yöntem önermişlerdir. (Şekil 2.18b).

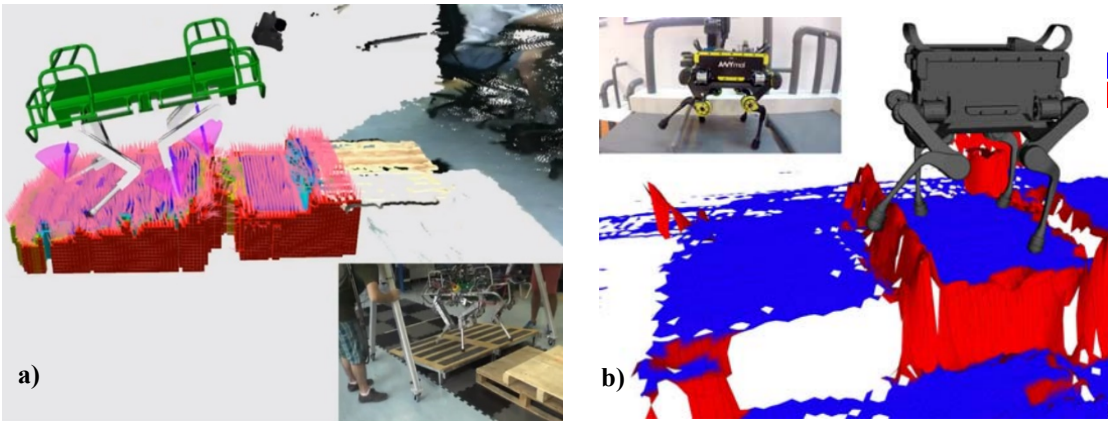


Şekil 2.18. *HyQ* robotunun **a)** tepki kuvvetleri ve **b)** adım yörüngesinin güncellenmesi temelli hareketi

Focchi ve ark. (2017), *HyQ* robotun 'V' şeklinde 50 derece eğimli bir kanalın ortasında yarı-statik yürüyüş planlaması ve kontrolü üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Robotun ağırlık merkezinin denge kontrolü; ayağa etki eden kuvvetlere göre, gövde ağırlığının o anda zemin ile temas halindeki ayaklara dağıtılmasıyla sağlanmıştır. Bunun için, eklem torklarını ayakların kaymasını önleyecek şekilde hesaplayan, Kuadratik Programlama tabanlı bir metot kullanmışlar ve önerdikleri yöntemi deneysel olarak doğrulamışlardır.

Mastalli (2017) ve Mastalli ve ark. (2020), robot dinamiklerini ve arazi modellemeyi uygun bir formülasyonda birleştirerek, ayak ucu yörünge ve gövde hareket planlaması (coupled planner) için yeni bir optimizasyon metodu önermişlerdir. Önerilen yöntemde, yürüyüş sırasında eş zamanlı arazi haritalaması ile elde edilen arazi topolojisi dikkate alınarak; gövdenin hareketi, ayağın temas noktaları ve adım süresi birlikte optimize edilmiştir. Adım evrelerinin sürelerini ve gövdenin duruşunu ayarlayarak, robot yürüyüşünün araziye uyumunu artırmışlardır. Online arazi verisi kullanan gerçek zamanlı tüm gövde kontrolcüsü ve parametrik olarak ifade edilmiş dinamik model sayesinde, robotun farklı arazi koşularına kolayca uyum sağlayabileceğini belirtmişlerdir. Önerilen yöntem, *HyQ* robotunun artan zorluk seviyelerindeki karmaşık zeminlerde yürüyüşü için gerçekleştirilen deneysel ve gerçekçi simülasyon çalışmaları ile doğrulanmıştır. Engebeli araziler için yürüyüş zamanlamasını otomatik ayarlayan ilk yaklaşım olduğu belirtilmiştir. (Şekil 2.19a).

Fankhauser ve ark. (2018), dört ayaklı robotların engebeli arazilerde hareketliliği için gürbüz bir hareket planlayıcısı sunmuşlardır. Online arazi haritalaması kullanılarak, ayak havada (uçuş evresinde) iken ayak ucunun herhangi bir yere çarpmadan güvenli bir basma noktası bulması ve robotun engelleri aşmasını sağlayacak yeni bir gövde duruş optimizasyonu amaçlamışlardır. Önerilen yöntemin doğruluğu, *ANYmal* robotu üzerinde test edilmiş ve robot eğim, basamak ve merdiven gibi engelleri otonom şekilde geçmeyi başarmıştır. Değişen arazi şartları ve bozucu giriş durumunda hareket planlayıcısı, hareketi her adımda tekrar planlamaktadır. Robotun ortam hakkında önceden bir bilgisi yoktur ve ortam haritalamasını, gövde duruş kontrolünü, yürüyüş planlamasını gerçek zamanlı gerçekleştirmektedir. Birbiriyle bağlantılı birkaç modülden oluşan yöntem, belirli bir duruş pozisyonu veya hız girişi ile başlar, mesafe sensörleri ve stereo kameralar ile sürekli ölçümler yaparak elde ettiği yükselti bilgileri ve arazi haritası sayesinde pozisyon tahmini yaparak bir sonraki duruş pozisyonu hesaplayabilmektedir. Gerçek zamanlı haritalama verileri ile, her ayağın adım atacağı yerin güvenilirliğini yansıtan bir uygunluk değeri hesaplanır. Hareket planlayıcının nihai çıkışı, ayak ucunun basacağı güvenli bir nokta ve bir sonraki adım hareketidir. Bu şekilde gövdenin mevcut pozisyonu ve hedef pozisyonu dikkate alınarak düzlemsel ayak temas noktaları üretilir. Bu ayak temas noktalarını gerçekleştirebilecek, kinematik ve denge kısıtlarına uygun, kararlı bir robot konfigürasyonunun bulunup bulunmadığını kontrol etmek için bir pozisyon denetleyicisi kullanılır. Önerilen hareket planlayıcısı, her bir bacak için her bir adımda tekrar hesaplatılır. Robotun genel hareket kontrolü, tüm gövde kontrolcüsü ile gerçekleştirilir (Şekil 2.19b).



Şekil 2.19. a) *HyQ* ve **b)** *ANYmal* robotlarının engebeli zeminlerde gerçek zamanlı (online) haritalama temelli hareketi

Aceituno-Cabezas ve ark. (2018), *HyQ* robotunun yürüyüş hareketini ve ayak ucu kontak konumlarını eş zamanlı ve verimli bir şekilde hesaplamak amacıyla '*mixed-integer convex*' isimli bir formülasyon sunmuşlardır. Düz bir zeminde belirli yürüyüş çeşitleri ile sınırlı kalmamışlar, konik yüzeyler için sürtünmeyi, yaklaşık eyleyici tork limitlerini ve yürüyüş planlamasını birlikte ele almışlardır. Yaklaşımlarını, konveks ve düz arazi varsayımlarına yol açabilecek düzeyde optimal olmayan, kararsız, farklı zorlu arazi şartlılarında deneysel olarak doğrulamışlarıdır. Önerilen yöntemin, hesaplama süresinde bir artışa sebep olmadan yürüyüş kararlılığını artırdığı, en karmaşık senaryolarda bile bir saniyenin altında yürüyüş planı hesaplayabildiğini ve bu sürenin benzer uygulamalara göre yaklaşık iki kat daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 2.20'de deneysel çalışmalarını gerçekleştirdikleri, zorlu arazi koşularını temsil eden, farklı yükseltilerdeki rampa, basamak ve boşluklardan oluşan parkur görülmektedir.

Şekil 2.20. *HyQ* robotunun engebeli parkurda (rampa, basamak ve boşluk) yürüyüşü

2.4. Yürüyüş Simülasyonu ile İlgili Literatür Çalışmaları

Dört ayaklı robotların düz ve engebeli yüzeylerde yürüyüş simülasyonu ile ilgili çalışmalarda; üç boyutlu katı model tasarımı, yürüyüş planlaması, kontrolcü geliştirilmesi ve gerçeğe yakın dinamik çözümlemeler için çeşitli programlar kullanılmıştır.

Adak (2013) dört ayaklı yürüyüş için, Merkezi Örüntü Üreteci tabanlı referans sentezi ve evrimsel algoritmalar ile ayarlanmasına yönelik bir çalışma sunmuştur. Çok serbestlik dereceli robot modelini Solidworks programında tasarlamış ve 3D animasyon yazılımları ile dinamik benzetimler gerçekleştirmiştir. Çalışmada, robotun dengesi ve enerji verimliliği incelenmiştir. Önerilen referans üretme yönteminin ve parametrelerinin ayarlanması için kullanılan algoritmaların yararlı olduğu bildirilmiştir (Şekil 2.21a).

Dat ve Phuc (2014), küçük boyutlu bir dört ayaklı robotun modellenmesi ve MSC ADAMS ortamında, düz bir zeminde yürüyüş simülasyonuna yönelik temel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bacak eklemlerinin açısal hareketlerine ve gövde ağırlık merkezinin yörüngesine ait sonuçlar sunmuşlardır. Ayak ucu ile yüzey etkileşiminden kaynaklı dinamiklerinin ihmal edilmesi sebebiyle, çalışmanın sınırlı kaldığını ancak gelecekte yapılabilecek kontrolcü tasarımı, farklı yüzeylerde hareket, enerji tasarrufu ile ilgili çalışmalar için teorik bir temel teşkil edeceğini bildirmişlerdir (Şekil 2.21b).

Xu ve ark. (2016), küçük boyutlardaki dört ayaklı bir robotun katı modellemesini ve MSC ADAMS ortamında tırıs yürüyüş simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Basit modellerin aksine, gerçek canlılara daha yakın bir fiziksel model tasarlamışlardır. Bacaklarının adım hareket planlamasında trigonometrik fonksiyonlar kullanmışlar, çalışmanın geliştirilmeye açık olduğunu bildirmişlerdir (Şekil 2.21c).

Hui-shu ve Jian-Jun (2018), yüksek tork üreten elektrik motor tahrikli, biyonik bir dört ayaklı robotun tasarımını ve yörünge kontrolünü sunmuşlardır. Koordinat dönüşümü yöntemi ile sistemin kinematik modelini oluşturmuşlardır. Adım hareketinin uçuş ve destek evreleri arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Tırıs yürüyüş için, düşük kuvvet gerektiren ve enerji tüketimi açısından tasarruflu bir ayak yörünge planlaması geliştirmişlerdir. Sistemin sanal modeli MATLAB ortamına aktarılarak kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiş, robotun tırıs yürüyüşü simüle edilmiş ve enerji tüketimi incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, önerilen yörünge planlamasının sürekli ve dengeli bir yürüyüş sağlayabildiğini belirtmişlerdir (Şekil 2.21d).

Zhang ve ark. (2019b), iki ayaklı insansı bir robotun dinamiklerinin incelenmesi, dengeli yürüyüşü ve yapısal tasarımı üzerine bir çalışma sunmuşlardır. Sistemin Lagrange dinamikleri de belirtilerek, CATIA yazılımında tasarlanan katı modeli üzerinden MSC ADAMS'da dinamik yürüyüş simülasyonu gerçekleştirilmiştir. (Şekil 2.21e).

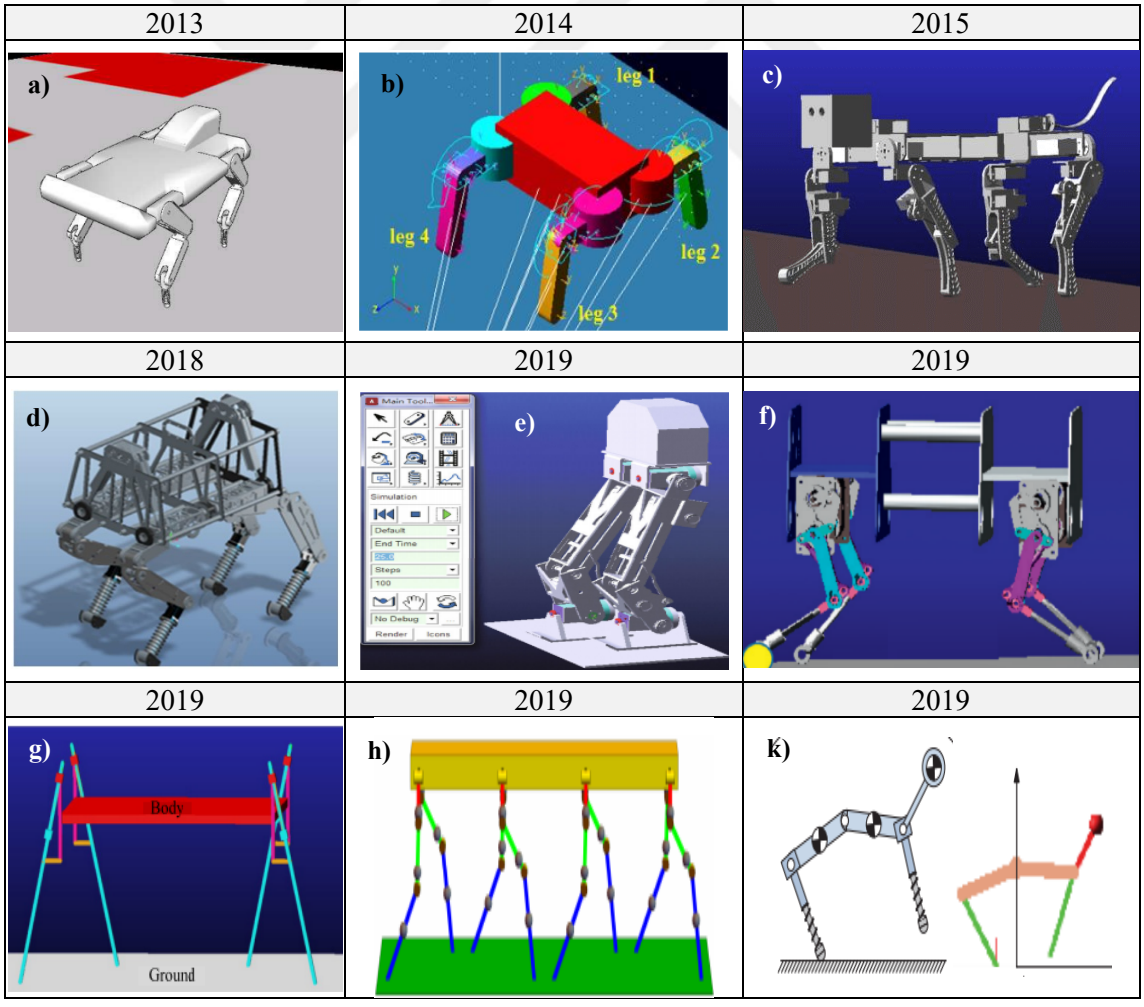
Chen ve ark. (2019b), dayanımı artırmaya yönelik antiparallelogram bir bacak yapısı geliştirmişler, CPG tabanlı yürüyüş planlaması ile robotun statik yürüyüşten tırıs yürüyüşe geçişi için bir algoritma önermişlerdir. Simulink&ADAMS yazılımlarının eş zamanlı koşturulmasıyla yürüyüş simülasyonları gerçekleştirmişler ve deneysel olarak doğrulamışlardır. Önerilen bacak yapısının robotun yük taşıma kapasitesini artırdığını, yürüyüş çeşitleri arasında yumuşak geçişler yapabildiğini ve eş zamanlı simülasyon yönteminin başarılı sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir (Şekil 2.21f).

Wang ve ark. (2019), dört ayaklı robotlar için bacak boyunun uzayabildiği yeni bir bacak mekanizması (crank-rocker) önermişler ve ADAMS'da oluşturdukları sanal

model üzerinden emekleme yürüyüşüne ait simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Robot gövdesine ve ayak ucu yörüngesine ait analiz sonuçlarını sunarak, önerilen bacak mekanizmasının sorunsuz çalıştığını belirtmişlerdir (Şekil 2.21g).

Grzelczyk ve Awrejcewicz (2019), sekiz bacaklı bir robotun kinematik/dinamik analizlerini ve Mathematica programında sade bir sanal model tasarlayarak yürüyüş simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Yürüyüşü adım genişliğinin ve yüksekliğinin değişken olduğu, basit sinüs fonksiyonları ile planlamışlardır. (Şekil 2.21h).

Chen ve ark. (2019a), dört ayaklı robot yapısına biyolojik canlılara benzer şekilde bir kafa uzvu eklemiş, kafa hareketinin etkisi üzerine deneysel ve Simulink&ADAMS ile eş zamanlı simülasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Kafa uzvunun ve hareketinin, gövde pozisyonunun aktif kontrolünde ve eğim açısının düzenlenmesinde etkili olduğunu, robotun daha kararlı ve dengeli hareketi için önem arz ettiğini analiz sonuçları ile birlikte belirtmişlerdir (Şekil 2.21f).



Şekil 2.21. Düz zeminde yürüyüş ile ilgili simülasyon çalışmalarına ait görseller

Park ve Park (2012), engebeli arazilerde harekete yönelik değişken bir empedans algoritması önermişler, dört ayaklı bir robot modelinin tırıs yürüyüşüne yönelik Simulink ortamında kontrolcü tasarımı ve dinamik bir simülatör programında simülasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Empedans parametrelerini ikinci derecenden sistem modeli tabanlı sezgisel yöntemler ile elde etmişlerdir (Şekil 2.22a).

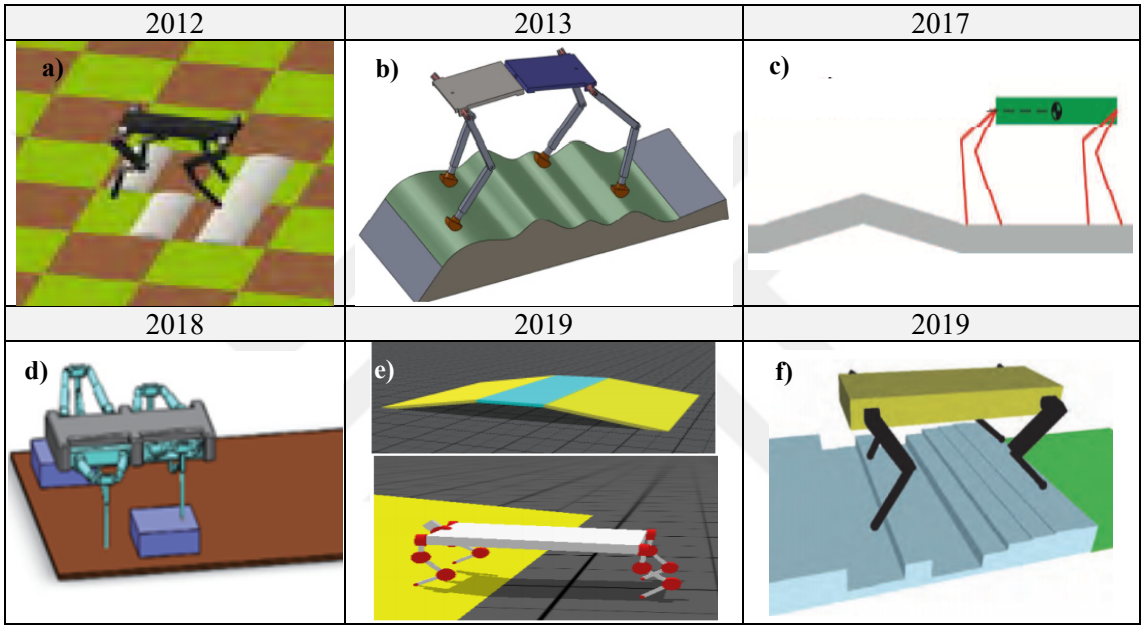
Krishna ve ark. (2013), esnek (flexible) uzuvlara sahip dört bacaklı bir robot modeli tasarlayarak, engebeli zeminlerde yürüyüş üzerine benzetim çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Robotun simülasyonu için MSC ADAMS ve MATLAB/Simulink programlarını eş zamanlı koşturmuşlardır. Rijit uzuvlu modellere kıyasla esnek uzuvlu yapının, enerji tasarrufu yönünden daha verimli ve engebeli arazilerde yürüyüş için daha uyumlu olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 2.22b).

Wang ve ark. (2017), düzensiz zeminlerde yürüyüş için ZMP tekniği ve doğrusal ters sarkaç modeli tabanlı, gövde yörüngesinin sezgisel optimizasyonu da içeren bir yürüyüş planlaması önermişler ve Webot yazılımda oluşturulan sanal bir model üzerinden simüle etmişler, başarılı sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir (Şekil 2.22c).

Han ve ark. (2018), suyun altındaki karmaşık çalışma ortamlarında kullanılmaya yönelik geliştirdikleri, dört ayaklı bir amfibi (yüzer-gezer) robotun yürüyüş planlaması ve simülasyonuna ait bir çalışma sunmuşlardır. Çalışmada, robotun ayakları paralel bir mekanizma olarak tasarlanmış ve sistemin ters kinematik çözümleri çıkartılmıştır. Yürüyüş boyunca robot ağırlık merkezinin, ayak destek noktalarının oluşturduğu poligon içinde kalmasına dayalı bir denge ve kararlılık kriteri belirlemişlerdir. Robotun sanal modeli bir CAD programında tasarlanmış, dinamik analizi ve yürüyüş benzetimi ADAMS programında gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları ile önerilen yürüyüş planının kararlı bir şekilde gerçekleştiğini göstermişlerdir (Şekil 2.22d).

Yu ve ark. (2018), eğimli zeminlerde yürüyüşte gövdenin pozisyon denetimine yönelik adaptif bir kontrolcü tasarımı ve uygulaması gerçekleştirmişlerdir. IMU sensöründen geri bildirim alan kontrolcü, gövdenin dengesini sürekli sağlamak amacıyla ayak ucu yörünge planlayıcısı ile etkileşimli olarak çalışmaktadır. Önerilen kontrolcü, Webots yazılımı ile tasarlanan dinamik model ve küçük boyutlu bir dört ayaklı robot prototipi üzerinden hem simülasyon hem de deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Sadece ayak ucu yörünge planlamasına dayalı denge kontrolcülere kıyasla, geliştirilen kontrolcünün eğimli yüzeylerde (en fazla 10 derece) gövdenin pozisyonunu ve dengesini ayarlayarak, daha yüksek hareket kabiliyetinde, daha istikrarlı ve stabil bir yürüyüş sunabildiğini belirtmişlerdir (Şekil 2.22e).

Li ve ark. (2019), robotun engebeli arazide hareketi boyunca ağırlık merkezinin yörünge kontrolü için hiyerarşik yapıda bir kontrol algoritması ve yürüyüş planlama tekniği önermişlerdir. Engebeler içeren bir yüzey modellemişler ve sezgisel A∗ algoritması kullanılarak ağırlık merkezine ait optimal bir yörünge tasarlamışlardır. Bu yörüngeyi gerçekleştirilmesi için gerekli durum değişkenleri yürüyüş boyunca hesaplatılmaktadır. Dinamik robot modeli ve engebeli yüzey OpenRAVE simülasyon programında tasarlanmış, önerilen kontrol algoritmasının performansı robotun düzlemsel statik yürüyüşü için benzetim çalışmaları ile incelenmiştir (Şekil 2.22f).



Şekil 2.22. Engebeli parkurda yürüyüş ile ilgili simülasyon çalışmalarına ait görseller

Genel olarak engebeli arazilerde yürüyüş çalışmalarında; ayak tepki kuvvetlerine göre reaktif davranışlar üretmeye dayalı, küçük boyutlu arazi düzensizlikleri ile sınırlı ve yavaş çözümler geliştirilmiştir. Güncel yaklaşımlarda ise; yürüyüş planlamasının, ayak ucu yörünge ve gövde denge kontrolünün birlikte ele alındığı, tüm gövdenin hareketlerini sentezlemeye odaklanılmaktadır. Bazı gelişmiş tüm gövde hareket sentezleme çalışmalarında, robot dinamiği ile arazinin özellikleri ve modellenmesi birlikte çok boyutlu bir problem olarak ele alınmıştır. Bu yaklaşımda, önceden tanımlanmış, öngörülebilir bir arazi modeli tasarlanmakta (planning) ya da robot bünyesindeki kameralar ile çevre modeli yürüyüş boyunca gerçek zamanlı haritalandırılmaktadır (mapping). Ancak deneysel uygulama maliyetleri, gelişmiş teknoloji gereksinimi nedeniyle halen oldukça yüksektir. Bu sebeple, genellikle gerçeğe yakın sanal dinamik robot modelleri üzerinden simülasyon çalışmaları yürütülmektedir.

3. DÖRT AYAKLI BİR ROBOTUN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Robotik alandaki araştırmalarda, sistemin matematiksel olarak ifade edilmesi ve analizi önemli bir konudur. Dört ayaklı robotlar; ileri düzey hareket kabiliyetlerine sahip, yüksek serbestlik dereceli ve dinamik yapıları oldukça karmaşık olan sistemlerdir. Bu sebeple, sistemin kontrolü ve benzetimi için matematiksel model elde etmek oldukça zordur, hatta öngörülmeyen durumlar için ise mümkün değildir. Ancak, yürüyüşün planlanması ve denetiminde sistemin dinamik davranışının anlaşılması oldukça faydalı olacaktır. Bu başlık altında, dört ayaklı bir robot (4AR) modeline ait boyutlar, ağırlıklar, koordinat sistemleri, eklem tipleri, bacakların serbestlik dereceleri ve konfigürasyonları gibi fiziksel parametreler ve tasarım kriterleri belirlenerek, sistemin yapısal tasarımı, kapsamlı kinematik ve dinamik analizleri sunulmuştur.

3.1. Genel Formülasyon Teorik Esaslar

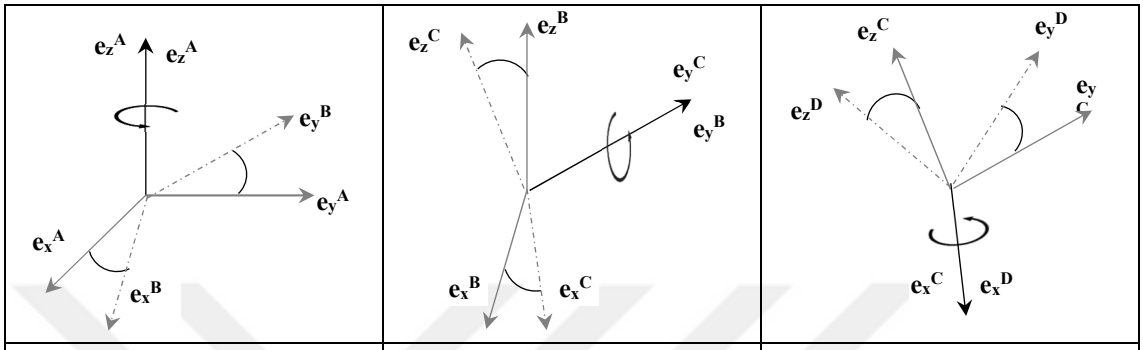
Bu bölümde, matematiksel çözümlemeler için gerekli temel formülasyonlar hakkında bilgiler verilmiştir. Çizelge 3.1'de temel semboller ve açıklamalar belirtilmiştir.

Çizelge 3.1. Temel semboller ve açıklamaları

Sembol	Açıklama
A	A koordinat sistemi
$\mathbf{e_x^A}$, $\mathbf{e_y^A}$, $\mathbf{e_z^A}$	A koordinat sisteminin eksen takımı
$\boldsymbol{r_{AP}}$	A koordinat sisteminin merkezinde tanımlı P noktasının pozisyon vektörü
$\boldsymbol{v_A}, \boldsymbol{a_A}$	A noktasının mutlak hızı ve ivmesi
$\boldsymbol{\omega_{AB}}$	A koordinat sistemine göre B koordinat sisteminin açısal hızı
$\boldsymbol{R_{AB}}$	A koordinat sistemine göre B koordinat sisteminin rotasyon matrisi
$\boldsymbol{T_{AB}}$	A koordinat sistemi ile B koordinat sistemi arasındaki homojen dönüşüm matrisi
$\boldsymbol{\Omega}$, $\boldsymbol{\Psi}$	Cismin mutlak açısal hızı ve ivmesi
$[\bullet]_\times$	• vektörünün çarpık-simetrik (skew-symmetric) formda ifadesi
$\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}$	$[a]_\times b$

Kinematik; noktaların, cisimlerin veya sistemlerin herhangi bir andaki hareketlerini, kütleleri ve kuvvetleri ihmal ederek, konum, hız ve ivmeye bağlı olarak tarif eder. Hareketin *'neden'* gerçekleştiğini değil sadece *'nasıl'* gerçekleştiğini açıklar. Hareketli bir noktanın kinematiği pozisyon vektörleri (*r*) ve türevleri kullanılarak tanımlanır. Hareketli bir katı cismin kinematiğini tanımlayabilmek için ise, ek olarak 3x3 boyutlu orthogonal rotasyon matrisleri (*R*) kullanılır.

Uzayda rotasyonları minimal düzeyde temsil edebilmek için genellikle üç bağımsız parametreye sahip Euler Açıları yöntemi kullanılır. Tait-Bryan açıları olarak da bilinen ZYX Euler Açıları (*yaw (ψ) – pitch (θ) – roll (ϕ)),* genellikle kayan nokta tabanlı sistemler için kullanılır. Şekil 3.1'de bu açılara ait koordinat sistemleri ve temel rotasyon matrisleri sunulmuştur.



$$R_z = \begin{bmatrix} cos\,\psi & -sin\,\psi & 0 \\ sin\,\psi & cos\,\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R_y = \begin{bmatrix} cos\,\theta & 0 & sin\,\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -sin\,\theta & 0 & cos\,\theta \end{bmatrix} \quad R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cos\,\phi & -sin\,\phi \\ 0 & sin\,\phi & cos\,\phi \end{bmatrix}$$

Şekil 3.1. ZYX Euler Açıları yöntemine ait temel rotasyon matrisleri

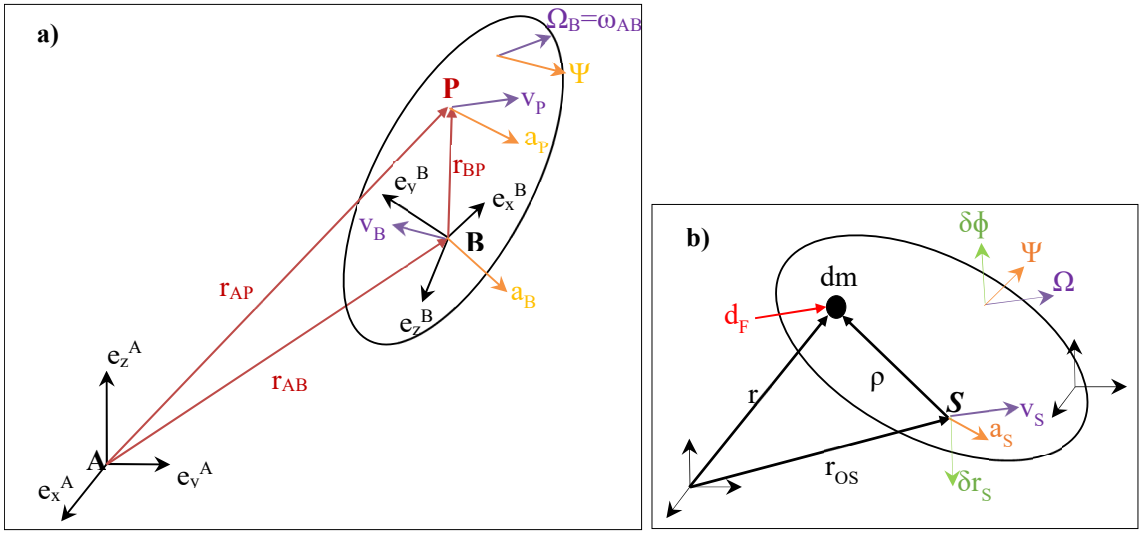
A ile D koordinat sistemleri arasındaki rotasyon matrisi, üç rotasyon matrisinin birleşimi (R_{AD}) şeklinde, aşağıdaki gibi elde edilir;

$$R_{AD} = R_z\, R_y\, R_x = \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & c_\psi s_\phi s_\theta - c_\phi s_\psi & s_\phi s_\psi + c_\phi c_\psi s_\theta \\ c_\theta s_\psi & c_\phi c_\psi + s_\phi s_\theta s_\psi & c_\phi s_\theta s_\psi - c_\psi s_\phi \\ -s_\theta & c_\theta s_\phi & c_\phi c_\theta \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

Hareketli B koordinat sisteminin, sabit A koordinat sistemine göre açısal hızı (ω_{AB}) aşağıdaki gibi elde edilir.

$$[\omega_{AB}]_\times = \dot{R}_{AB}\, R_{AB}^T = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & -\omega_y \\ \omega_z & 1 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}, \omega_{AB} = \begin{bmatrix} \omega_x & \omega_y & \omega_z \end{bmatrix}^T \tag{3.2}$$

Şekil 3.2a'da görüldüğü üzere, iki farklı koordinat sistemi arasında genellikle hem ötelenme hem de rotasyon mevcuttur. Katı cismin üzerimdeki bir nokta *(P),* bir koordinat siteminden diğer bir koordinat sistemine hem ötelenme hem de rotasyon dönüşümünü içeren 4x4 homojen dönüşüm matrisi *(T)* kullanılarak dönüştürülebilir.



Şekil 3.2. a) Katı cismin kinematiği ve **b)** Katı cismin dinamiği

Sabit bir A koordinat sistemi ile B koordinat sistemi arasındaki bağıl dönüşüm matrisi ve tersi $(T_{AB}, {T_{AB}}^{-1})$ aşağıdaki gibi ifade edilir. Birbirini izleyen dönüşüm matrisleri tek bir dönüşüm matrisi formunda Denklem (3.8)'de belirtildiği gibi elde edilir.

$$r_{AP} = r_{AB} + r_{BP} \tag{3.3}$$

$$\dot{r}_{AP} = \dot{r}_{AB} + R_{AB}\,\dot{r}_{BP} + \dot{R}_{AB}\,r_{BP} \tag{3.4}$$

$$\begin{pmatrix} r_{AP} \\ 1 \end{pmatrix} = T_{AB} \begin{pmatrix} r_{BP} \\ 1 \end{pmatrix} \tag{3.5}$$

$$T_{AB} = \begin{bmatrix} R_{AB} & r_{AB} \\ 0_{1x3} & 1 \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

$${T_{AB}}^{-1} = \begin{bmatrix} {R_{AB}}^{T} & -{R_{AB}}^{T} r_{AB} \\ 0_{1x3} & 1 \end{bmatrix}, \quad \left(-{R_{AB}}^{T} r_{AB} = r_{BA}\right) \tag{3.7}$$

$$T_{AC} = T_{AB}\,T_{BC} \tag{3.8}$$

Katı cismin üzerindeki bir noktanın hızını (v_P) ve ivmesini (a_P) tanımlamak için kullanılan genel formülasyon aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$v_P = v_B + \Omega_B \times r_{BP} \tag{3.9}$$

$$a_P = a_B + \Psi_B \times r_{BP} + \Omega_B \times (\Omega_B \times r_{BP}) \tag{3.10}$$

Birden fazla uzuvdan oluşan robotik sistemlerde, uzuvlar arasındaki hız ilişkileri için doğrusal ve dönel hızları içeren jakobiyen matris *(J=[J_P J_R]^T)* kullanılır. Seri şekilde bağlanmış *k* adet dönel eklemden oluşan robotik bir sistemde, sabit bir *A(0)* koordinat sistemi ile uç-işlevciye ait *E(k+1)* koordinat sistemi arasındaki jakobiyen matris aşağıdaki gibi elde edilir. Burada, n_k, *k* ekleminin dönme ekseni temsil eden 3x1 matristir.

$$J_{AE} = \begin{bmatrix} J_{P_{AE}} \\ J_{R_{AE}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_1 \times r_{1(k+1)} & n_2 \times r_{2(k+1)} & \cdots & n_k \times r_{k(k+1)} \\ n_1 & n_2 & \cdots & n_k \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

Dinamik; uygulanan kuvvetlerin etkisi altındaki sistemin '*neden hareket ettiğini'* açıklar. Ayrıca, bir robotun dinamiklerinin matematiksel olarak ifade edilmesi ile elde edilen matematiksel model, sistemin benzetim ve kontrol çalışmaları için önem arz eder. Şekil 3.2b'de gösterildiği gibi, üç boyutlu kartezyen uzayında kütleye sahip bir cisim, sonsuz sayıda küçük noktasal kütlelerden oluşur. Cismin üzerindeki noktasal bir kütlenin (dm) hareketi, cisim üzerindeki başka bir nokta *(S)* ile aşağıdaki gibi tanımlanır. Burada; ρ, δm ile *S* arasındaki pozisyon vektörüdür.

$$r = r_{OS} + \rho \tag{3.12}$$

$$\dot{r} = v_s + \Omega \times \rho = [\mathbb{I}_{3\times3} \; -[\rho]_\times] \begin{pmatrix} v_s \\ \Omega \end{pmatrix} \tag{3.13}$$

$$\ddot{r} = a_s + \Psi \times \rho + \Omega \times (\Omega \times \rho) = [\mathbb{I}_{3\times3} \; -[\rho]_\times] \begin{pmatrix} a_s \\ \Psi \end{pmatrix} + [\Omega]_\times [\Omega]_\times \rho \tag{3.14}$$

Noktasal kütlenin sanal yer değişimi *(δ_r)* (virtual displacement) aşağıdaki gibi ifade edilir. Burada; $\delta\phi$, cisme ait koordinat sisteminin sonsuz küçük rotasyon değişimidir.

$$\delta_r = \delta_{rS} + \delta\phi \times \rho = [\mathbb{I}_{3\times3} \; -[\rho]_\times] \begin{pmatrix} \delta_{rS} \\ \delta\phi \end{pmatrix} \tag{3.15}$$

D'Alambert prensibi dikkate alınarak, cismin tamamına ait sanal iş (virtual work) formülasyonu aşağıdaki gibi ifade edilir. Burada; dF_{ext}, noktasal kütleye etki eden dış kuvvetlerdir.

$$\delta_W = \int \delta_r{}^T \; (dF - dF_{ext}) = 0, \qquad dF = \ddot{r} dm \tag{3.16}$$

Newton-Euler metoduna göre cismin ağırlık merkezi etrafındaki *(S=com)* atalet matrisi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\Theta_S = \int [\rho]_\times \, [\rho]_\times \, dm \tag{3.17}$$

3.2. Tasarım Kriterleri ve Fiziksel Modeli

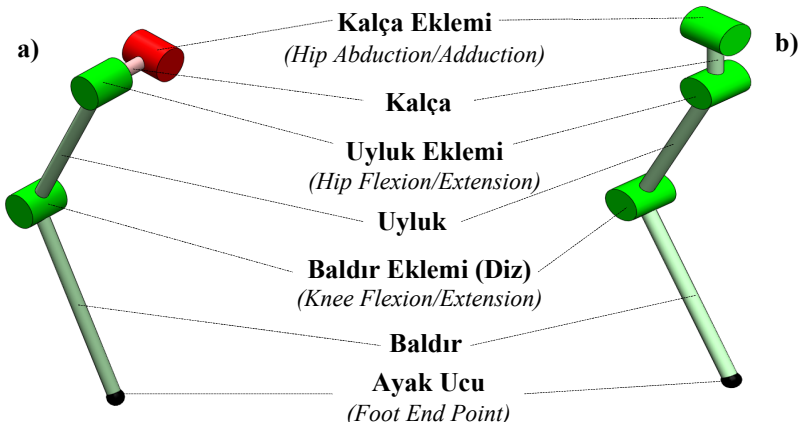
Bacaklı robotların, çevre ile güvenli bir etkileşim sağlayabilmesi için biyolojik canlılar ile uyumlu bir fiziksel tasarıma ve kontrol edilebilir tam hareketli bir kinematik yapıya sahip olmalıdırlar. Bu sebeple, boyutların yanı sıra, bacak ve eklem konfigürasyonları da mümkün olduğunca robotun farklı arazi koşularında uygun, farklı yürüyüş çeşitlerini gerçekleştirebilecek şekilde belirlenmelidir (Hutter, 2013).

Robotun biyolojik canlılara uyum sağlaması için, fiziksel yapının ve boyutların belirlenmesinde birçok hayvanın fizyolojik yapısı ve yetenekleri dikkate alınmaktadır. Bunlardan bazıları; çok ağır yükleri taşıyabilen *'at'* (Makita ve ark., 1999), en hızlı kara hayvanı olan *'çita'* (Park ve Kim, 2014), çok çevik yapısı ile *'kedi'* (Kimura ve ark., 2007)'dir. En çok yaygın tercih edilen hayvan ise 'köpek' (Raibert ve ark., 2008)'dir. Köpek; güç, çeviklik ve dayanaklılık bakımından uyumlu bir dengeye sahip olması ve gövde ile bacak uzunlukları arasında kare şeklinde bir yapı olması gibi kinematik açıdan avantajlı özellikleri nedeniyle, son yıllarda geliştirilen birçok dört ayaklı robotun esin kaynağı olmuştur. Hatta robotun kullanım amacına ve yerine göre, farklı tür köpekler göz önüne alınarak, *"büyük boyutlu"* (*BigDog* (Raibert ve ark., 2008), *HyQ* (Semini, 2010), *HyQ2max* (Semini ve ark., 2017)), *"orta boyutlu"* (*StarlETH* (Hutter, 2013), *ANYmal* (Hutter ve ark., 2016), *SpotMini* (2017) (Boston Dynamics, 2020)) ve *"küçük boyutlu"* (*LittleDog* (Murphy ve ark., 2011)) robotlar geliştirilmiştir.

Robotun farklı arazi şartlarında ve farklı türdeki yürüyüşler yapabilmesini sağlayan en kritik unsur, uzuvların eklem hareketliliğidir. Bu nedenle, dinamik yürüyüşler için prizmatik bir tasarım yerine eklemli uzuvlara sahip bacaklı sistemler tercih edilir. (Raibert, 1986; Poulakakis ve ark., 2005). Yürüyüş sırasında genellikle; ön ayaklar gövdeyi dengelemek için düşey kuvvetleri, arka ayaklar ise gövdenin ileri gitmesi için gerekli itme kuvvetini uygularlar. Bu kuvvetlerin yönleri farklı ancak büyüklükleri birbirine yakındır. Bu sebeple Witte ve ark. (2001), ön ve arka bacakların farklı yapıda olması için bir neden olmadığını ve aynı yapıya sahip olabileceğini belirtmişlerdir.

Genellikle dört ayaklı robotlar; hareketli bir gövdeye bağlanmış, her biri üç eklemli uzva sahip, aynı yapıda dört bacaktan oluşan, toplamda 12 serbestlik dereceli sistemler olarak tasarlanmaktadır. Ancak, bacak eklem dizilimlerine ve bacakların birbirlerine göre konfigürasyonlarına göre kinematik açıdan farklı tasarımlar mevcuttur.

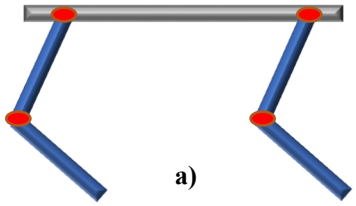
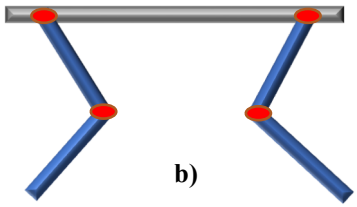
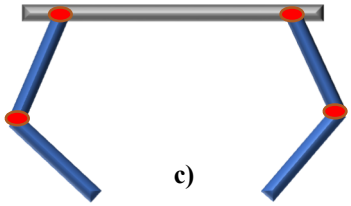
Bacaklı robotlar için yaygın olarak tercih edilen iki farklı eklem dizilimi aşağıda verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, *"Sıralı Tip"* diziliminde (Şekil 3.3b), tüm uzuvlar memeli canlılarınkine benzer şekilde, düşey eksen doğrultusunda dizilmiştir. *"Genişleyen Tip"* diziliminde ise (Şekil 3.3a), kalça uzvu sürünen canlılara benzer şekilde yatay eksen doğrultusunda, diğer uzuvlar ise düşey eksen doğrultusunda dizilmiştir. Sıralı tip her bacağının aynı kinematik yapıda olmasına imkan verdiği için, robot kinematiği ve farklı bacak konfigürasyonları arası geçiş bakımından avantajlıdır (Hutter, 2013). Ancak, robotun kendi kendini tam oturur durumdan doğrulmuş konuma getirebilmesi sırasında yüksek uyluk eklem torku gerektirir (Semini ve ark., 2017). Sağ ve sol bacak için simetrik yapıda olan genişleyen tip ise, özellikle engebeli yüzeylerde robot dengesinin kontrol edilebilirliği noktasında avantajlıdır (Siegwart ve ark., 2011). Ayrıca Hutter ve ark. (2017) *ANYmal* robotu için genişleyen tipe benzer şekilde, fakat kalça uzvunun dönme ekseni doğrultusunda olduğu bir bacak tasarımı da kullanmışlardır.



Şekil 3.3. a) Genişleyen Tip (*HyQ2max*) ve **b)** Sıralı Tip (*StarlETH*) eklem dizilimi

Dört bacaklı robotların tasarımındaki bir diğer kriter ise, bacakların gövde ile bağlantı şekline göre durumunu gösteren konfigürasyon tipidir. Şekilde 3.4'de, *M tipi* (Şekilde 3.4a), *X tipi* (Şekilde 3.4b) ve *O tipi* (Şekilde 3.2c) olmak üzere üç farklı bacak konfigürasyon tipi gösterilmiştir. Yaygın olarak M ve X tipi tercih edilmektedir. Kinematik yapısı daha karmaşık olsa bile X tipinin en uygun olduğunu ileri süren farklı teorik ve simülasyon çalışmalar (Semini, 2010) olmasına rağmen, bu konuda robotun

performansına dayalı kesin bir kanıt yoktur (Hutter, 2013). Boston Dynamics firmasının son yılarda geliştirdiği *BigDog*'a göre daha küçük boyutlu, çevik robotlarda ve IIT Enstitüsünün güncel *HyQReal* isimli robotunda M tipi tercih edilmiştir. Bacak konfigürasyonuna yönelik çalışmalar devam etmektedir.

 a)	 b)	 c)
TekkenII (Kimura ve ark., 2007) *KOLT* (Estremera ve Waldron, 2008) *Spot* (2015) ve *SpotMini* (2017) (Boston Dynamics, 2020) *HyQReal* (Semini ve ark., 2019) *Laikago* (Pan ve ark., 2020)	*BigDog* (Raibert ve ark., 2008) *HyQ* (Semini, 2010) *StarlETH* (Hutter, 2013) *LittleDog* (Murphy ve ark., 2011) *HyQ2Max* (Semini ve ark., 2015c) *ANYmal* (Hutter ve ark., 2016)	*LS3* (DARPA,2009) (Boston Dynamics, 2020)

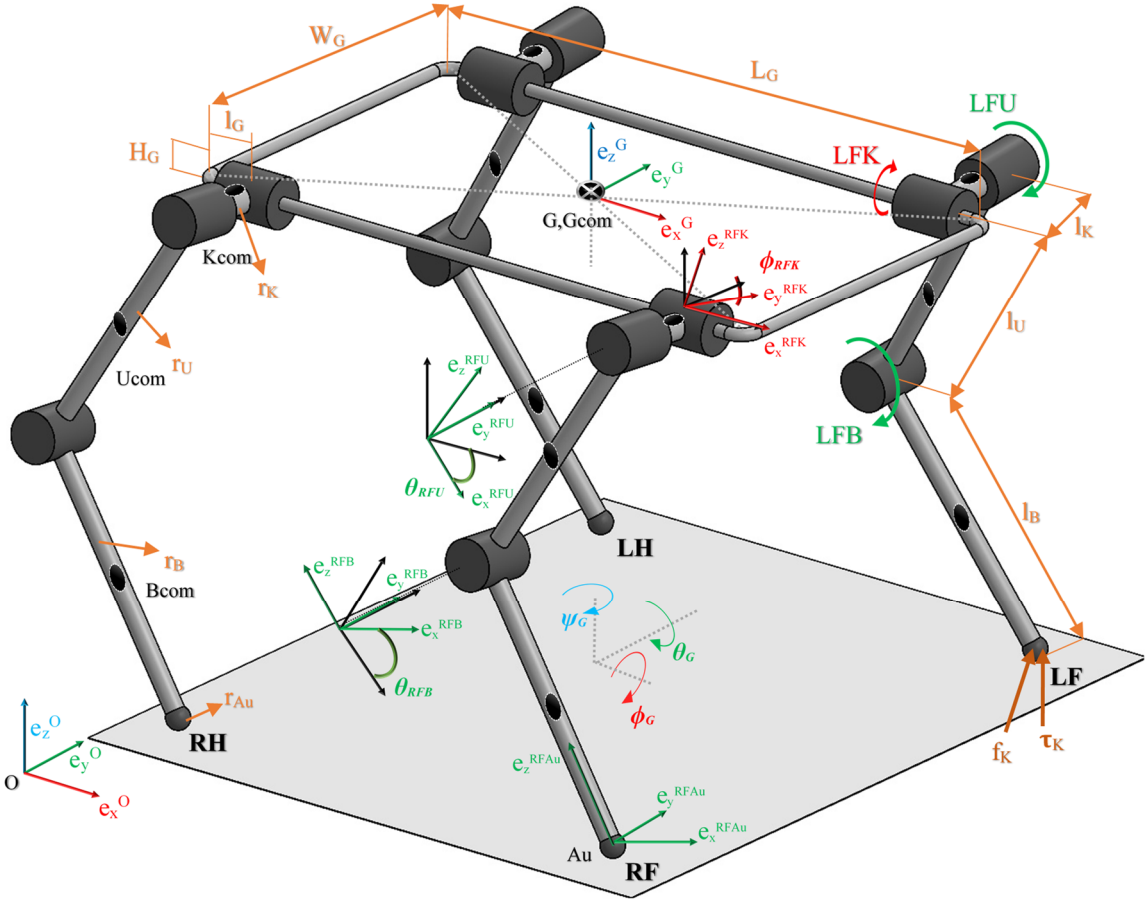
Şekil 3.4. a) M tipi, **b)** X Tipi ve **c)** O Tipi bacak konfigürasyonları

Güncel tasarımlarındaki eğilimler ve *HyQ, HyQ2max* robotları dikkate alınarak, bu tez kapsamında incelenecek 4AR modelinin tasarımında;

- Zorlu arazi şartlarında ve farklı görevlerde kullanılabilesi için büyük boyutlardaki bir köpeğin fiziksel boyutlarına benzer,
- Engebeli yüzeylerde dengeli ve çevik bir yürüyüş için Genişleyen Tip eklem dizilimi,
- Sade bir kinematik yapı ile kontrol edilebilirliği artırmak için M tipi bacak konfigürasyonuna sahip bir yapı,

tasarım kriterleri olarak belirlenmiştir.

4AR'ın fiziksel ve kinematik yapısı Şekil 3.5'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere robot; zeminle etkileşimli, her biri üç serbestlik dereceli (3-DoF) dönel eklemlere sahip dört bacak ve bu bacaklar sayesinde ötelenme ve dönme hareketleri yapabilen serbest haraketli bir gövdeden oluşan, gövde koordinat sistemine göre on iki serbestlik dereceli bir sistemdir. Çizelge 3.2'de sistemin fiziksel parametreleri ve değerleri belirtilmiştir. Robotun bacaklarını, uzuvlarını ve eklemlerini tanımlamak için numaralandırma yerine, daha açıklayıcı olması sebebiyle, yapısal konumunu temsil eden kısaltmalar kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Dört ayaklı robotun (4AR) fiziksel ve kinematik yapısı

Çizelge 3.2. Dört ayaklı robotun (4AR) fiziksel parametreleri

Sembol	Açıklama	Değer	Birim
m_{4AR}	Toplam Robotun Kütlesi (Yüksüz)	80	kg
m_G	Gövdenin Kütlesi	40	kg
m_K	Kalça Uzvunun Kütlesi	3.5	kg
m_U	Uyluk Uzvunun Kütlesi	5	kg
m_B	Baldır Uzvunun Kütlesi	1.5	kg
m_{Au}	Ayak ucunun Kütlesi	0	kg
L_G	Gövde Uzunluğu	1	m
W_G	Gövde Genişliği	0.5	m
H_G	Gövde Yüksekliği	0.05	m
l_G	Gövde ile Bacak Arası mesafe	0.015	m
l_K	Kalça Uzvunun Uzunluğu	0.04	m
l_U	Uyluk Uzvunun Uzunluğu	0.4	m
l_B	Baldır Uzvunun Uzunluğu	0.41	m
r_K	Kalça Uzvunun Çapı	0.02	m
r_U	Uyluk Uzvunun Çapı	0.02	m
r_{Au}	Ayak Ucunun Çapı	0.02	m
r_B	Ayak Ucunun Çapı	0.02	m
g	Yer Çekimi İvmesi	9.81	m/s^2

L	F	K	
L: Sol	**F:** Ön	**K:** Kalça (Hip Abduction/Adduction)	**B:** Baldır (Knee Flexion/Extension)
R: Sağ	**H:** Arka	**U:** Uyluk (Hip Flexion/Extension)	**Au:** Ayak Ucu (Foot Endpoint)

3.3. Kinematik Analiz

Bir robotun, dinamik ve kontrol problemlerinin çözümünde ilk gereksinim duyulan konulardan birisi kinematik analizdir. Robotların kinematik modelini çıkarmak amacıyla birçok yöntem geliştirilmiştir. Keller (1960), nokta vektörlerin Kartezyen uzayındaki dönüşümlerini kullanarak, 4x4 homojen dönüşüm matrisini tanımlamıştır. Denavit ve Hartenberg, bu homojen dönüşüm matrisini kullanarak bir koordinat sisteminin oryantasyonunu ve konumunu başka bir koordinat sistemine göre tanımlamıştır (Denavit, 1955). Dört bacaklı robotların kinematik analiz ile ilgili detaylı çalışmalar (Potts ve Da Cruz, 2010; Zhang ve ark., 2014; Chen ve ark., 2015; Mikić ve ark., 2017) literatürde mevcuttur.

3.3.1. İleri kinematik analiz

Sabit koordinat sistemi ile bacakların ayak ucu koordinat sistemi arasındaki ileri kinematik bağıntılar dönüşüm matrisleri kullanılarak incelenmiştir. İlk olarak, sabit ile gövde koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm matrisi aşağıda verilmiştir.

$$ {}^{O}_{G}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_G \\ 0 & 1 & 0 & y_G \\ 0 & 0 & 1 & z_G \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{O}_{G}R & 0_{3x1} \\ 0_{1x3} & 1 \end{bmatrix} \tag{3.18} $$

$$ {}^{O}_{G}R = \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & c_\psi s_\phi s_\theta - c_\phi s_\psi & s_\phi s_\psi + c_\phi c_\psi s_\theta \\ c_\theta s_\psi & c_\phi c_\psi + s_\phi s_\theta s_\psi & c_\phi s_\theta s_\psi - c_\psi s_\phi \\ -s_\theta & c_\theta s_\phi & c_\phi c_\theta \end{bmatrix} \tag{3.19} $$

Gövde ile her bir bacağa ait koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm matrisleri;

$$ {}^{G}_{LFK}T = \begin{bmatrix} & & \frac{L_G}{2} - l_G \\ I_{3x3} & & \frac{W_G}{2} \\ & & 0 \\ 0_{1x3} & & 1 \end{bmatrix}, {}^{G}_{RFK}T = \begin{bmatrix} & & \frac{L_G}{2} - l_G \\ I_{3x3} & & \frac{-W_G}{2} \\ & & 0 \\ 0_{1x3} & & 1 \end{bmatrix}, $$

$$ {}^{G}_{LHK}T = \begin{bmatrix} & & -\frac{L_G}{2} + l_G \\ I_{3x3} & & \frac{W_G}{2} \\ & & 0 \\ 0_{1x3} & & 1 \end{bmatrix}, {}^{G}_{RHK}T = \begin{bmatrix} & & -\frac{L_G}{2} + l_G \\ I_{3x3} & & -\frac{W_G}{2} \\ & & 0 \\ 0_{1x3} & & 1 \end{bmatrix} \tag{3.20} $$

şeklinde ifade edilir. Bacakların kinematik yapılarının benzer olması sebebiyle, bir bacak için elde edilen dönüşüm matrisleri diğerleri içinde benzer olacaktır. Sol ön (LF) bacağın eklemlerine ait koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm matrisleri,

$$ {}^{LFK}_{LFU}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi_{LFK}) & -\sin(\phi_{LFK}) & \pm l_K \cos(\phi_{LFK}) \\ 0 & \sin(\phi_{LFK}) & \cos(\phi_{LFK}) & \pm l_K \cos(\phi_{LFK}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.21} $$

$$ {}^{LFU}_{LFB}T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{LFU}) & 0 & \sin(\theta_{LFU}) & -l_U \sin(\theta_{LFU}) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_{LFU}) & 0 & \cos(\theta_{LFU}) & -l_U \cos(\theta_{LFU}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.22} $$

$$ {}^{LFB}_{LFAu}T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{LFB}) & 0 & \sin(\theta_{LFB}) & -l_B \sin(\theta_{LFB}) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_{LFB}) & 0 & \cos(\theta_{LFB}) & -l_B \cos(\theta_{LFB}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.23} $$

$$ {}^{LFK}_{LFAu}T = {}^{LFK}_{LFU}T \; {}^{LFU}_{LFB}T \; {}^{LFB}_{LFAu}T \tag{3.24} $$

şeklinde ifade edilir. Burada, l_K sol bacaklar için pozitif, sağ bacaklar için negatiftir. Sabit koordinat sistemi ile sol ön ayak ayak ucu koordinat sistemi arasındaki ileri kinematik ifade eden dönüşüm matrisi ve ayak ucu konumları aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$ {}_{LFAu}^{O}T = {}_{G}^{O}T \; {}_{LFK}^{G}T \; {}_{LFAu}^{LFK}T \tag{3.25} $$

$$ x_{LFAu} = {}_{LFAu}^{O}T\,(1,4), \qquad y_{LFAu} = {}_{LFAu}^{O}T\,(2,4), \qquad z_{LFAu} = {}_{LFAu}^{O}T\,(3,4) \tag{3.26} $$

3.3.2. Ters kinematik analiz

4AR'ın ayak ucu ile sabit koordinat sistemi arasında doğrudan bir ters kinematik bağıntı elde etmek zor ve karmaşıktır. Sabit koordinat sistemine göre verilen bir ayak ucu konumunu *(x′ y′z′),* bacağa (kalça eklemine) ait koordinat sistemine göre konumu (x y z), Denklem (3.25) ve (3.26)'da tanımlanmıştır. Bacak koordinat sisteminde tanımlı ayak ucu konumlarını veren homojen dönüşüm matrisi ($_{LFK}^{Au}T$); sabit koordinat sistemine göre tanımlanan 4x4 konum matrisinin, sabit koordinat sistemi ile bacak koordinat sistemi arasındaki homojen dönüşüm matrisinin ($_{LFK}^{O}T = \left[{}_{G}^{O}T \; {}_{LFK}^{G}T\right]$) tersi ile çarpılmasıyla elde edilmiştir. Bu homojen dönüşüm matrisi kullanılarak, sabit koordinat sistemine göre tanımlanan ayak ucu konumlarına karşılık gelen tek bacak eklemlerin açısal konumlarını veren ters kinematik bağıntılar sunulmuştur.

$$ {}^{Au}_{LFK}T = \left[{}^{O}_{G}T\ {}^{G}_{LFK}T\right]^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x'_{Au} \\ 0 & 1 & 0 & y'_{Au} \\ 0 & 0 & 1 & z'_{Au} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.27} $$

$$ \mathrm{x}_{Au} = {}^{Au}_{LFK}T(1,4), \qquad \mathrm{y}_{Au} = {}^{Au}_{LFK}T\,(2,4), \qquad \mathrm{z}_{Au} = {}^{Au}_{LFK}T(3,4) $$

Tek bir bacağa ait eklemlerinin açısal değerlerini veren, ayak ucu ile bacağa ait koordinat sistemi arasındaki ters kinematik bağıntılar, geometrik yöntemlerle Denklem (3.28-3.31)'daki gibi elde edilmiştir. Burada, kalça ekleminin açısal konumunun hesabında, l_K değeri sol bacaklar için negatif, sağ bacaklar için pozitif değerdedir. Bunun haricinde, 4AR'ın tüm bacakların ters/ileri kinematik yapıları ve çözümlemeleri aynıdır.

$$ \phi_K = \mathrm{atan2}\,(\mathrm{z}_{Au}, \mathrm{y}_{Au}) + \mathrm{atan2}\left(\left(\sqrt{{\mathrm{y}_{Au}}^2 + {\mathrm{z}_{Au}}^2 - {l_H}^2}\right), \pm l_K\right) \tag{3.28} $$

$$ D = \frac{\left({\mathrm{x}_{Au}}^2 + {\mathrm{y}_{Au}}^2 + {\mathrm{z}_{Au}}^2 - {l_K}^2 - {l_U}^2 - {l_B}^2\right)}{2\, l_U\, l_B} \tag{3.29} $$

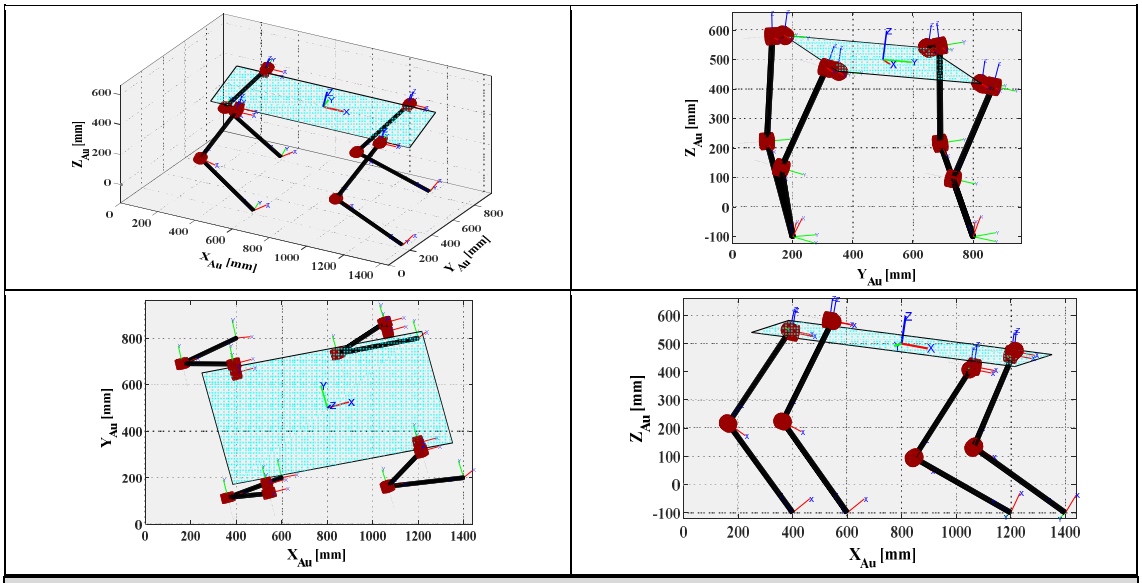
$$ \theta_B = \mathrm{atan2}\left(-\sqrt{1 - D^2}, D\right) \tag{3.30} $$

$$ \theta_U = \mathrm{atan2}\left(-\mathrm{x}_{Au}, \sqrt{{\mathrm{y}_{Au}}^2 + {\mathrm{z}_{Au}}^2 - {l_K}^2}\right) - \mathrm{atan2}\left(l_B \sin(\theta_{LFB}),\ l_U + l_B \cos(\theta_{LFB})\right) \tag{3.31} $$

3.3.3. Sayısal kinematik hesaplama sonuçları

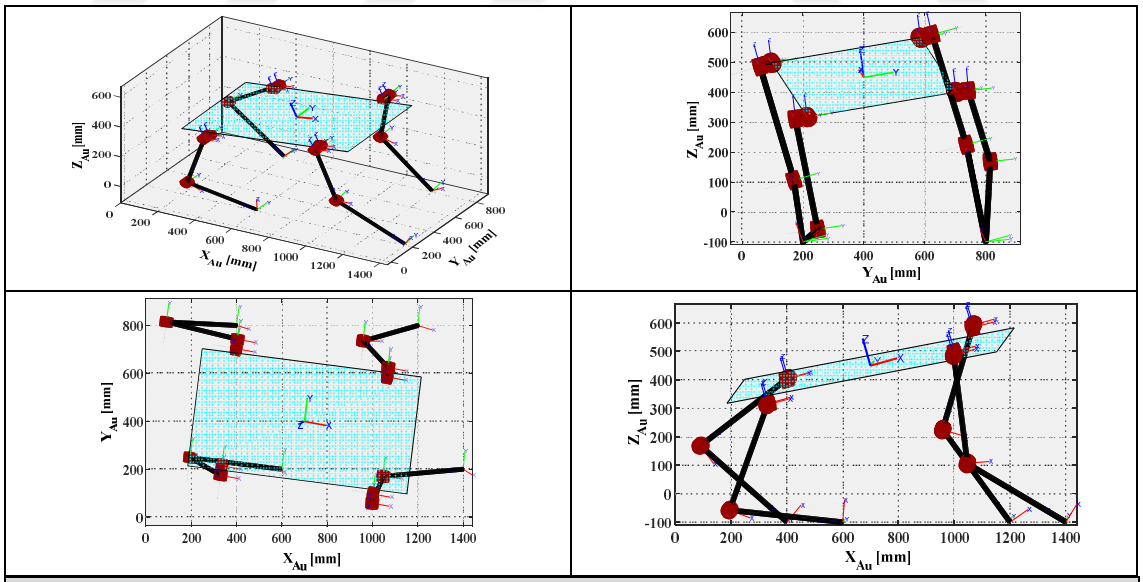
Ters kinematik analizlerden elde edilen denklemeler MATLAB ortamına aktarılarak, kullanıcı tarafından girilen farklı gövde konum, oryantasyon değerlerine ve ayak ucu konumlarına karşılık, bacak eklemlerinin açısal konum değerlerini hesaplamaya yönelik bir ters kinematik çözümleme programı geliştirilmiştir (Sen ve ark., 2017a). Geliştirilen program, sabit koordinat sisteminde tanımlı gelişigüzel girilen, gövdenin referans konum, oryantasyon değerlerine ve ayak uçlarının konumlarına göre eklemlerin açısal konumlarını hesaplamaktadır. Çizelge 3.3'te bu programdan elde edilen örnek ters kinematik hesaplamalar ve elde edilen sonuçlara karşın robot duruşunu gösteren üç boyutlu grafikler sunulmuştur. İlk örnekten sonra sırasıyla; gövdeye, ayak ucu konumlarına ve son olarak tüm konumlara ait değerler değiştirilerek toplamda dört farklı hesaplama sonucu ve görseller tablo şeklinde sunulmuştur.

Çizelge 3.3. Ters kinematik programdan elde edilen örnek hesaplamalar ve grafikler



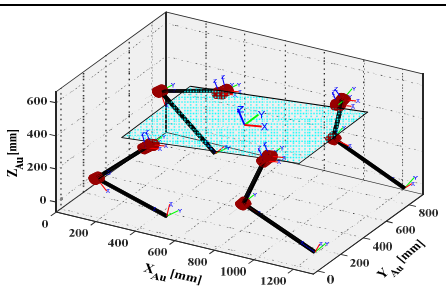
Referans Gövde Konumu [mm] ve Oryantasyonu [derece]					
x_G	y_G	z_G	ψ_G	θ_G	ϕ_G
800	500	500	15	10	-5

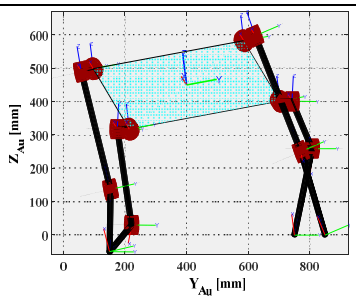
	Referans Ayak Ucu Konumları [mm]			Hesaplanan Eklem Açısal Konumları [derece]		
	x_{Au}	y_{Au}	z_{Au}	ϕ_K	θ_B	θ_U
LF	1200	800	-100	-6.9	26.2	-94.4
RF	1400	200	-100	-11.4	17.6	-81.8
LH	400	800	-100	14.5	23.2	-71.9
RH	600	200	-100	9.5	16.8	-64.5

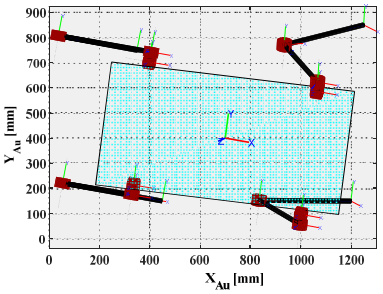


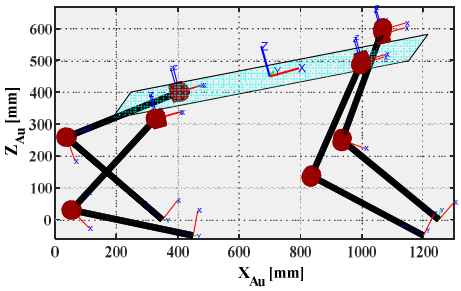
Referans Gövde Konumu [mm] ve Oryantasyonu [derece]					
x_G	y_G	z_G	ψ_G	θ_G	ϕ_G
700	400	450	-10	-15	10

	Referans Ayak Ucu Konumları [mm]			Hesaplanan Eklem Açısal Konumları [derece]		
	x_{Au}	y_{Au}	z_{Au}	ϕ_K	θ_B	θ_U
LF	1200	800	-100	5.7	33.1	-52.3
RF	1400	200	-100	7.5	10.1	-52.8
LH	400	800	-100	-3.4	68.4	-102.2
RH	600	200	-100	-1.2	36.2	-105.1



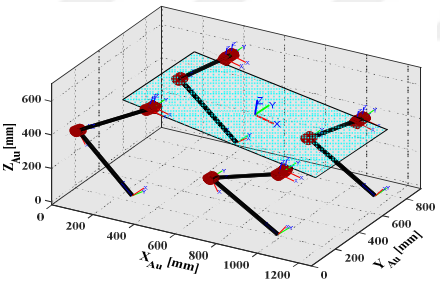


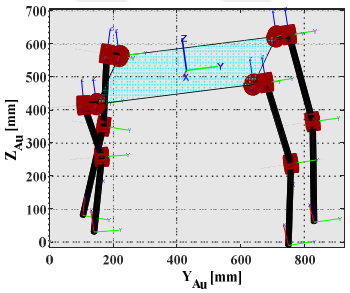


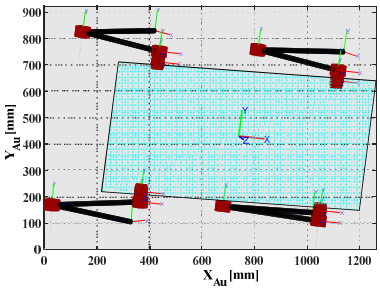


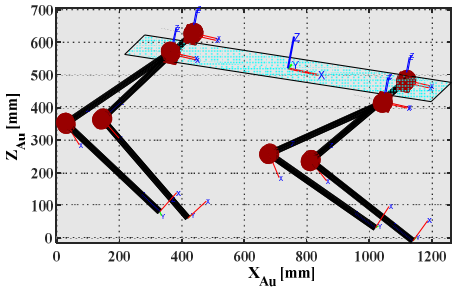
Referans Gövde Konumu [mm] ve Oryantasyonu [derece]					
x_G	y_G	z_G	ψ_G	θ_G	ϕ_G
700	400	450	-10	-15	10

	Referans Ayak Ucu Konumları [mm]			Hesaplanan Eklem Açısal Konumları [derece]		
	x_{Au}	y_{Au}	z_{Au}	ϕ_K	θ_B	θ_U
LF	1250	850	0	12.6	36.9	-69.7
RF	1200	150	-50	2.5	40.7	-87.6
LH	350	750	0	-10.3	84.2	-120.0
RH	450	150	-50	-10.6	59.0	-122.8









Referans Gövde Konumu [mm] ve Oryantasyonu [derece]					
x_G	y_G	z_G	ψ_G	θ_G	ϕ_G
740	430	450	-6	12	7

	Referans Ayak Ucu Konumları [mm]			Hesaplanan Eklem Açısal Konumları [derece]		
	x_{Au}	y_{Au}	z_{Au}	ϕ_K	θ_B	θ_U
LF	1140	750	-10	1.6	39.4	-104.1
RF	1020	140	30	-2.7	54.8	-123.0
LH	420	830	60	0.8	36.2	-89.8
RH	330	105	80	-16.2	44.3	-104.5

3.4. Dinamik Analiz

Dört ayaklı robotlar, etkileşim halindeki çevreye katı bağlı hiçbir uzvunun bulunmaması sebebiyle serbest veya kayan nokta tabanlı (floating base) sistemler olarak nitelendirilirler. Ayakucu kontak noktaları sayesinde sabit zemin ile değişken ancak sürekli bir etkileşimi sürdürerek, dengesini koruyabilir ve hareket edebilirler.

Bennani ve Giri (1996), açık/kapalı kinematik zincir mekanizmalarını göz önünde bulundurarak, Newton-Euler yaklaşımına ve kapalı döngü mekanizması için kinematik holonomik kısıtlama formülasyonuna dayanan dört bacaklı bir dinamik model yaklaşımı sunmuşlardır. Krishnan ve ark. (2010), grafik yöntem (bond graph) kullanarak sagital (gövdeyi sağ ve sol olarak ikiye ayıran) düzlemde bir model elde etmişler ve deney olarak test etmişlerdir. Shah ve ark. (2012), dört bacaklı bir robotun dinamik modellenmesi için, her bir modülün seri olarak bağlandığı kinematik bir modüller yaklaşım sunmuşlardır. Kumar ve Pathak (2013), gövde ve bacağın kinetik ve potansiyel enerji denklemlerini formüle ederek, düzlemsel bir dinamik model geliştirmişlerdir. Hutter (2013), *StarlETH* robotunun hareket denklemlerini Newton-Euler yöntemi ile analitik olarak elde etmiş, kayan nokta tabanlı dinamik bir model sunmuştur.

Robotun zemin ile temas eden ayaklarını sabit kabul edip, klasik yöntemlerle sürekli bir dinamik model elde edilemez. Çünkü her adım değişiminde dinamik modelin de değişmesi gerekecektir. Bu sebeple, süreklilik sağlayan ve dört bacaklı robotların hareketlerini daha doğal ifade edebilen kayan nokta tabanlı dinamik model (Righetti ve ark., 2011) kullanılır. Dört bacaklı robotlar için yaygın olarak kullanılan, kapalı formdaki genel dinamik denklem aşağıda verilmiştir;

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{b}(\mathbf{q},\mathbf{u}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}_k^T \boldsymbol{F}_k \tag{3.32}$$

Burada; $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ atalet matrisini, $\mathbf{q}$ genelleştirilmiş koordinatları, $\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}$ genelleştirilmiş hızları ve ivmeleri, $\mathbf{b}$ coriolis ve merkez çekim kuvvetini, $\mathbf{g}$ yerçekimi kuvvetini, $\boldsymbol{\tau}$ genelleştirilmiş tork girişlerini, $\boldsymbol{F_k}$ ayakuçlarına etki eden kontak kuvvetlerini ve $\mathbf{J_k}$ bu kuvvetlerin uygulandığı ayak ucu noktalarına ait geometrik jakobiyen matrisini ifade eder. Genelleştirilmiş koordinatlar ve hızlar aşağıdaki gibi tanımlanmıştır;

$$\begin{aligned} q &= [x_G\ y_G\ z_G\ \ \phi_G\ \theta_G\ \psi_G\ \ \phi_{LFK}\ \theta_{LFU}\ \theta_{LFB}\ \ \phi_{RFK}\ \theta_{RFU}\ \theta_{RFB}\ \ \phi_{LHK}\ \theta_{LHU}\ \theta_{LHB}\ \ \phi_{RHK}\ \theta_{LHU}\ \theta_{LHB}]^T \\ u &= [\dot{x}_G\ \dot{y}_G\ \dot{z}_G\ \ \dot{\phi}_G^G\ \dot{\theta}_G^G\ \dot{\psi}_G^G\ \ \dot{\phi}_{LFK}\ \dot{\theta}_{LFU}\ \dot{\theta}_{LFB}\ \ \dot{\phi}_{RFK}\ \dot{\theta}_{RFU}\ \dot{\theta}_{RFB}\ \ \dot{\phi}_{LHK}\ \dot{\theta}_{LHU}\ \dot{\theta}_{LHB}\ \ \dot{\phi}_{RHK}\ \dot{\theta}_{LHU}\ \dot{\theta}_{LHB}]^T \end{aligned} \tag{3.33}$$

Dört bacaklı robotun kayan nokta tabanlı dinamik modelinde, sabit tabanlı sistemlere göre dikkate alınması gereken önemli bir nokta ise; gövdenin açısal hızının sabit koordinat sistemine göre değil, gövdenin üzerindeki hareketli koordinat sistemine göre ifade edilmesi gerekliliğidir. Denklem (3.33)'de görüldüğü üzere $u \neq \dot{q}$'dir ve gövdenin açısal hızı kendi koordinat sistemine göre aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_G^G & \dot{\theta}_G^G & \dot{\psi}_G^G \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0 & -\sin(\psi_G) & \cos(\theta_G)\cos(\psi_G) \\ 0 & \cos(\psi_G) & \cos(\theta_G)\sin(\psi_G) \\ 1 & 0 & -\sin(\theta_G) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_G & \dot{\theta}_G & \dot{\psi}_G \end{bmatrix}^T \tag{3.34}$$

Gövde, kalça, uyluk, baldır ve ayak ucu uzuvlarının ağırlık merkezlerine (COM) göre kütle atalet momentleri aşağıda verilmiştir;

$$\Theta_{G_c} = \begin{bmatrix} m_G\left({H_G}^2 + {W_G}^2\right)/12 & 0 & 0 \\ 0 & m_G\left({H_G}^2 + {L_G}^2\right)/12 & 0 \\ 0 & 0 & m_G\left({L_G}^2 + {W_G}^2\right)/12 \end{bmatrix} \tag{3.35}$$

$$\Theta_{K_c} = \begin{bmatrix} m_K\left({L_K}^2 + 3\,{r_K}^2\right)/12 & 0 & 0 \\ 0 & m_K\left({L_K}^2 + 3\,{r_K}^2\right)/12 & 0 \\ 0 & 0 & m_K {r_K}^2/2 \end{bmatrix} \tag{3.36}$$

$$\Theta_{U_c} = \begin{bmatrix} m_U\left({L_U}^2 + 3\,{r_U}^2\right)/12 & 0 & 0 \\ 0 & m_U\left({L_U}^2 + 3\,{r_U}^2\right)/12 & 0 \\ 0 & 0 & m_U {r_U}^2/2 \end{bmatrix} \tag{3.37}$$

$$\Theta_{B_c} = \begin{bmatrix} m_B\left({L_B}^2 + 3\,{r_B}^2\right)/12 & 0 & 0 \\ 0 & m_B\left({L_B}^2 + 3\,{r_B}^2\right)/12 & 0 \\ 0 & 0 & m_B {r_B}^2/2 \end{bmatrix} \tag{3.38}$$

$$\Theta_{Au_c} = \begin{bmatrix} 2\,m_{Au}\,(r_{Au}/2)^2/5 & 0 & 0 \\ 0 & 2\,m_{Au}\,(r_{Au}/2)^2/5 & 0 \\ 0 & 0 & 2\,m_{Au}\,(r_{Au}/2)^2/5 \end{bmatrix} \tag{3.39}$$

Gövde koordinat sistemi gövde ağırlık merkezinde olduğu için, gövdenin gövde koordinat sisteminde tanımlı atalet momenti ($\Theta_{(G,G_c)}$) ile koordinat sistemine (Θ_G) ve ağırlık merkezine göre (Θ_{G_c}) tanımlı atalet momentleri eşittir. Ancak uzuvların ağırlık merkezinin, ilgili uzva ait koordinat sisteminde tanımlı atalet momentleri aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\Theta_{(G,G_c)} = \Theta_G = \Theta_{G_c} \tag{3.40}$$

$$\Theta_K = \Theta_{K_c} - m_K\left[r_{(K_c,K)}\right]_\times^2,\ \Theta_{(K,K_c)} = \Theta_K + m_K\left[r_{(K,K_c)}\right]_\times^2 \tag{3.41}$$

$$\Theta_U = \Theta_{U_c} - m_U\left[r_{(U_c,U)}\right]_\times^2,\ \Theta_{(U,U_c)} = \Theta_U + m_U\left[r_{(U,U_c)}\right]_\times^2 \tag{3.42}$$

$$\Theta_B = \Theta_{B_c} - m_B\left[r_{(B_c,B)}\right]_\times^2,\ \Theta_{(B,B_c)} = \Theta_B + m_B\left[r_{(B,B_c)}\right]_\times^2 \tag{3.43}$$

$$\Theta_{Au} = \Theta_{Au_c} - m_{Au}\left[r_{(Au_c,Au)}\right]_\times^2,\ \Theta_{(Au,Au_c)} = \Theta_{Au} + m_{Au}\left[r_{(Au,Au_c)}\right]_\times^2 \tag{3.44}$$

Kayan nokta tabanlı sistemlerin dinamik modellerinin, çok serbestlik dereceli ve karmaşık yapıları nedeniyle analitik olarak elde edilmesi çok zordur. Kapalı form dinamik denkleme ait elemanlar, Newton-Euler yöntemleri kullanılarak, sistematik bir şekilde elde edilebilir (Greenwood, 2006). Kapalı form dinamik denkleme (Denklem (3.32)) ait elemanların çözümlenmesi aşağıda izah edilmiştir.

Atalet matrisi;

Gövdeye ait atalet matrisi (M_G),

$$\begin{aligned}
&\mathrm{M}_G = \mathrm{J}_{P_{G_c}}^T m_G\, \mathrm{J}_{P_{G_c}} + \mathrm{J}_{R_{(G,G_c)}}^T \Theta_{(G,G_c)}\, \mathrm{J}_{R_{(G,G_c)}} \\
&\mathrm{J}_G = \mathrm{J}_{G_c} = \begin{bmatrix} \mathrm{J}_{P_{G_c}} \\ \mathrm{J}_{R_{G_c}} \end{bmatrix},\ \mathrm{J}_{R_{(G,G_c)}} = {}_G^O R^T\, \mathrm{J}_{R_{G_c}}
\end{aligned} \tag{3.45}$$

şeklinde ifade edilir. Burada; J_G ve J_{G_c} gövdenin kendi koordinat sistemine ve ağırlık merkezine ait, doğrusal *(J_P)* ve dönel *(J_R)* hareketleri içeren, sabit koordinat sisteminde tanımlı, analitik jakobiyen matrislerini ifade eder. $J_{R_{(G,G_c)}}$ ise gövdenin ağırlık merkezine ait gövde koordinat sisteminde tanımlı, dönel analitik jakobiyen matrisidir. Benzer şekilde, sol ön bacak uzuvlarına ait atalet matrisleri aşağıdaki gibi elde edilir. Sol ön bacak kalça uzvuna ait atalet matrisi *(M_{LFK}),*

$$\begin{aligned}
&\mathrm{M}_{LFK} = \mathrm{J}_{P_{LFK_c}}^T m_K\, \mathrm{J}_{P_{LFK_c}} + \mathrm{J}_{R_{(LFK,LFK_c)}}^T \Theta_{(K,K_c)}\, \mathrm{J}_{R_{(LFK,LFK_c)}} \\
&\mathrm{J}_{LFK} = \begin{bmatrix} \mathrm{J}_{P_{LFK}} \\ \mathrm{J}_{R_{LFK}} \end{bmatrix} = \mathrm{J}_G + \mathrm{J}_{(G,LFK)}\ ,\ \mathrm{J}_{LFK_c} = \begin{bmatrix} \mathrm{J}_{P_{LFK_c}} \\ \mathrm{J}_{R_{LFK_c}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{J}_{P_{LFK}} - \left[r_{(LFK,LFK_c)}\right]_\times \mathrm{J}_{R_{LFK}} \\ \mathrm{J}_{R_{LFK}} \end{bmatrix} \\
&\mathrm{J}_{R_{(LFK,LFK_c)}} = {}_{LFK}^O R^T\, \mathrm{J}_{R_{LFK_c}} \qquad , \qquad r_{(LFK,LFK_c)} = {}_{LFK}^O R\, r_{LFK}
\end{aligned} \tag{3.46}$$

şeklinde ifade edilir. Burada, $r_{(LFK,LFK_c)}$ sol ön bacak kalça uzvu koordinat sistemi ile uzvun ağırlık merkezi arasındaki pozisyon vektörünü ifade eder. Sol ön bacağın diğer uzuvlarına ait atalet matrisleri de benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\mathrm{M}_{LFU} = \mathrm{J}_{P_{LFU_c}}^{T} m_U \, \mathrm{J}_{P_{LFU_c}} + \mathrm{J}_{R_{(LFU,LFU_c)}}^{T} \Theta_{(U,U_c)} \, \mathrm{J}_{R_{(LFU,LFU_c)}} \tag{3.47}$$

$$\mathrm{M}_{LFB} = \mathrm{J}_{P_{LFB_c}}^{T} m_B \, \mathrm{J}_{P_{LFB_c}} + \mathrm{J}_{R_{(LFB,LFB_{com})}}^{T} \Theta_{(B,B_c)} \, \mathrm{J}_{R_{(LFB,LFB_c)}} \tag{3.48}$$

$$\mathrm{M}_{LFAu} = \mathrm{J}_{P_{LFAu_c}}^{T} m_{Au} \, \mathrm{J}_{P_{LFAu_c}} + \mathrm{J}_{R_{(LFAu,LFAu_c)}}^{T} \Theta_{(Au,Au_c)} \, \mathrm{J}_{R_{(LFAu,LFAu_c)}} \tag{3.49}$$

Diğer bacaklara ait uzuvların atalet matrisleri de benzer şekilde elde edilir. Toplam atalet matrisi (M) Denklem (3.50)'de belirtildiği gibi elde edilir;

$$M = M_G + M_{LFK} + M_{LFU} + M_{LFB} + M_{LFAu} + \cdots + M_{RHK} + M_{RHU} + M_{RHB} + M_{RHAu} \tag{3.50}$$

Coriolis ve merkez çekim kuvvet matrisi;

Gövdeye ait coriolis ve merkez çekim kuvvet matrisi *(b_G),*

$$\begin{aligned} \mathrm{b}_G &= \mathrm{J}_{P_{G_c}}^{T} m_G \, \dot{\mathrm{J}}_{P_{G_c}} \dot{q} + \mathrm{J}_{R_{(G,G_c)}}^{T} \left(\Theta_{(G,G_c)} \, \dot{\mathrm{J}}_{R_{(G,G_c)}} \dot{q} + \Omega_{(G,G_c)} \times \Theta_{(G,G_c)} \Omega_{(G,G_c)} \right) \\ \dot{\mathrm{J}}_{R_{(G,G_{com})}} &= {}_{G}^{O}R^{T} \, \dot{\mathrm{J}}_{R_{G_{com}}} \quad , \quad \Omega_{(G,G_{com})} = {}_{G}^{O}R^{T} \Omega_{G_{com}} \quad , \quad \Omega_{G_{com}} = \mathrm{J}_{R_{G_{com}}} u \end{aligned} \tag{3.51}$$

şeklinde ifade edilir. Burada, $\dot{\mathrm{J}}_{\mathrm{G_c}}$ gövdenin ağırlık merkezine ait sabit koordinat sisteminde tanımlı, analitik Jakobiyen matrisinin türevini ifade eder. $\Omega_{G_{com}}$ gövdenin ağırlık merkezinin sabit koordinat sisteminde tanımlı genelleştirilmiş açısal hızını, $\Omega_{(G,G_{com})}$ ise gövde koordinat sisteminde tanımlı genelleştirilmiş açısal hızını ifade eder. Benzer şekilde sol ön bacak uzuvlarına ait coriolis ve merkez çekim kuvvet matrisleri aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\begin{aligned} \mathrm{b}_{LFK} = {} & \mathrm{J}_{P_{LFK_c}}^{T} m_{LFK} \, \dot{\mathrm{J}}_{P_{LFK_c}} \dot{q} \\ & + \mathrm{J}_{R_{(LFK,LFK_c)}}^{T} \left(\Theta_{(LFK,LFK_c)} \, \dot{\mathrm{J}}_{R_{(LFK,LFK_c)}} \dot{q} \right. \\ & \left. + \Omega_{(LFK,LFK_c)} \times \Theta_{(LFK,LFK_c)} \Omega_{(LFK,LFK_c)} \right) \end{aligned} \tag{3.52}$$

$$\begin{aligned} \mathrm{b}_{LFK} = {} & \mathrm{J}_{P_{LFK_c}}^{T} m_{LFK} \, \dot{\mathrm{J}}_{P_{LFK_c}} \dot{q} \\ & + \mathrm{J}_{R_{(LFK,LFK_c)}}^{T} \left(\Theta_{(LFK,LFK_c)} \, \dot{\mathrm{J}}_{R_{(LFK,LFK_c)}} \dot{q} \right. \\ & \left. + \Omega_{(LFK,LFK_c)} \times \Theta_{(LFK,LFK_c)} \Omega_{(LFK,LFK_c)} \right) \end{aligned} \tag{3.53}$$

$$\mathrm{b}_{LFB} = \mathrm{J}_{P_{LFB_c}}^{T} m_{LFB}\, \dot{\mathrm{J}}_{P_{LFB_c}} \dot{q} + \mathrm{J}_{R_{(LFB,LFB_c)}}^{T} \left(\Theta_{(LFB,LFB_c)}\, \dot{\mathrm{J}}_{R_{(LFB,LFB_c)}} \dot{q} + \Omega_{(LFB,LFB_c)} \times \Theta_{(LFB,LFB_c)} \Omega_{(LFB,LFB_c)} \right) \quad (3.54)$$

$$\mathrm{b}_{LFAu} = \mathrm{J}_{P_{LFAu_c}}^{T} m_{LFAu}\, \dot{\mathrm{J}}_{P_{LAu_c}} \dot{q} + \mathrm{J}_{R_{(LFAu,LFAu_c)}}^{T} \left(\Theta_{(LFAu,LFAu_c)}\, \dot{\mathrm{J}}_{R_{(LFAu,LFAu_c)}} \dot{q} + \Omega_{(LFAu,LFAu_c)} \times \Theta_{(LFAu,LFAu_c)} \Omega_{(LFAu,LFAu_c)} \right) \quad (3.55)$$

Diğer bacaklara ait uzuvların coriolis ve merkez çekim kuvvet matrisleri de benzer şekilde elde edilir. Toplam atalet matrisi *(b)* Denklem (3.56)'daki gibi elde edilir;

$$b = b_G + b_{LFK} + b_{LFU} + b_{LFB} + b_{LFAu} + \cdots + b_{RHK} + b_{RHU} + b_{RHB} + b_{RHAu} \quad (3.56)$$

Yer çekim matrisi;

Gövdeye ve sol ön bacak uzuvlarına ait yer çekim matrisleri,

$$g_G = \mathrm{J}_{P_{G_c}}^{T} m_G\, I_g \quad (3.57)$$

$$\mathrm{g}_{LFK} = \mathrm{J}_{P_{LFK_c}}^{T} m_{LFK}\, I_g \quad (3.58)$$

$$\mathrm{g}_{LFU} = \mathrm{J}_{P_{LFU_c}}^{T} m_{LFU}\, I_g \quad (3.59)$$

$$\mathrm{g}_{LFB} = \mathrm{J}_{P_{LFB_c}}^{T} m_{LFB}\, I_g \quad (3.60)$$

$$\mathrm{g}_{LFB} = \mathrm{J}_{P_{LFB_c}}^{T} m_{LFB}\, I_g \quad (3.61)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, $I_g = [0 \quad 0 \quad -9.81]^T$ yer çekimi vektörüdür. Diğer bacaklara ait uzuvların yer çekim matrisi de benzer şekilde elde edilir. Toplam yer çekim matrisi (g) Denklem (3.62)'de belirtildiği gibi elde edilir;

$$g = g_G + g_{LFK} + g_{LFU} + g_{LFB} + g_{LFAu} + \cdots + g_{RHK} + g_{RHU} + g_{RHB} + g_{RHAu} \quad (3.62)$$

Dört bacaklı robotun gövde hareketi, bacaklara ait eklemlerin tahrik edilmesi ile gerçekleşir. Dolayısıyla gövdenin kontrolü, eklemlerin tork girişlerinin kontrolüne bağlıdır. Denklem (3.63)'de sistemin girişleri yani eklemlere ait genelleştirilmiş torkları içeren matris (τ) verilmiştir;

$$\tau = [\ 0_{1\times 6}\ \tau_{LFK}\ \tau_{LFU}\ \tau_{LFB}\ \ \tau_{RFK}\ \tau_{RFU}\ \tau_{RFB}\ \ \tau_{LHK}\ \tau_{LHU}\ \tau_{LHB}\ \ \tau_{RHK}\ \tau_{LHU}\ \tau_{LHB}]^T \quad (3.63)$$

Zemin ile temas halinde olan ayak uç noktalarının geometrik Jakobiyen matrisi (J_k) aşağıdaki gibi hesaplanır. Sol ön ayak ucu noktasının, sabit koordinat sistemine göre doğrusal ve dönel geometrik Jakobiyen matrisi Denklem (3.64)'de ifade edilmiştir;

$$\mathrm{J}_{LFAu} = \begin{bmatrix} \mathrm{J}_{P_{LFAu}} \\ \mathrm{J}_{R_{LFAu}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbb{I}_{3x3} & -{}^{O}_{G}R\left[r_{(G,LFAu}\right]_{\times} & {}^{O}_{G}R\ \mathrm{J}_{P_{G,LFAu}} \\ 0_{3x3} & {}^{O}_{G}R & \mathrm{J}_{R_{G,LFAu}} \end{bmatrix} \tag{3.64}$$

Burada, $\mathrm{J}_{G,LFAu}$ sol ön ayak ucunun, gövde koordinat sisteminde tanımlı geometrik Jakobiyen matrisini ifade eder. Denklem (3.11)'de belirtildiği şekliyle, Denklem (3.65)'deki gibi hesaplanır;

$$\begin{aligned} \mathrm{J}_{G,LFAu} &= \begin{bmatrix} \mathrm{J}_{P_{G,LFAu}} \\ \mathrm{J}_{R_{G,LFAu}} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} n_{LFK} \times r_{(LFK,LFAu)} & n_{LFU} \times r_{(LFU,LFAu)} & n_{LFB} \times r_{(LFB,LFAu)} & n_{LFAu} \times r_{(LFAu,LFAu)} \\ n_{LFK} & n_{LFU} & n_{LFB} & n_{LFAu} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{3.65}$$

Ayrıca, sol ön ayak ucu noktasının sabit koordinat sistemine göre açısal hızı $\left(\omega_{(O,LFAu)} = \mathrm{J}_{R_{LFAu}}\, u\right)$ şeklinde hesaplanır. Diğer ayak uç noktalarının sabit koordinat sistemine göre geometrik Jakobiyen matrisleri de benzer şekilde hesaplanır. Genel Jakobiyen matris Denklem (3.66)'da belirtildiği gibi elde edilir;

$$\mathrm{J}_k = (\ \mathrm{J}_{LFAu}\ \ \mathrm{J}_{RFAu}\ \ \mathrm{J}_{LHAu}\ \ \mathrm{J}_{RHAu})^T \tag{3.66}$$

Ayakuçlarına etki eden, üç boyutlu dış kuvvetleri ve torkları içeren, toplam kuvvet matrisi (F_k), Denklem (3.67)'deki gibi ifade edilir;

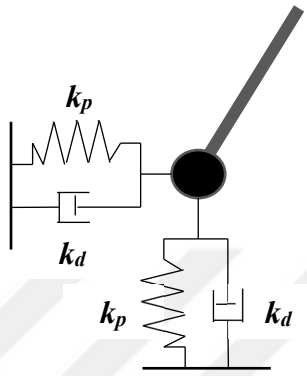
$$\begin{aligned} &F_k[f_k\ \ \tau_k] \\ &= [f_{x_{LFAu}}\ f_{y_{LFAu}}\ f_{z_{LFAu}}\ \tau_{x_{LFAu}}\ \tau_{y_{LFAu}}\ \tau_{z_{LFAu}}\ \cdots\ f_{x_{RHAu}}\ f_{y_{RHAu}}\ f_{z_{RHAu}}\ \tau_{x_{RHAu}}\ \tau_{y_{RHAu}}\ \tau_{z_{RH}} \end{aligned} \tag{3.67}$$

3.4.1. Zemin ile ayak ucunun etkileşim modeli

Zemin ile ayak ucu arasındaki dinamik etkileşimi modellemek ve temas (kontak) kuvvetlerini elde etmek için temelde iki farklı yöntem vardır. Gilardi ve Sharf (2002), kontak dinamiğinin modellenmesi hakkında detaylı bir çalışma sunmuşlardır.

Etkileşimin yay-damper elemanları ile modellendiği *Yumuşak Kontak (Soft Contac)* (Bibalan ve Featherstone, 2009) yönteminde temas kuvvetleri, etkileşim halindeki noktanın sadece konum ve hızına ait bir fonksiyon olarak elde edilmektedir.

Diğer bir metot olan *Sert Kontak (Hard Contac)* (Glocker, 2013) yönteminde ise, etkileşim bir kinematik kısıt olarak ele alınır. Bu metotta da, zemin ile ayağın uç noktası arasındaki etkileşime ait dinamik model, basit bir yay-damper modeli kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 3.6'da, tez kapsamında kullanılan yumuşak kontak yöntemine ait model, Denklem (3.68-3.70)'de ise ayak ucunun x, y ve z eksenleri doğrultusundaki kontak kuvvetlerine ait denklemler verilmiştir.



Şekil 3.6. Yay-damper tabanlı Yumuşak Kontak ayak ucu etkileşim modeli

$$f_x = k(\Delta x_k) + b\dot{x}_k \tag{3.68}$$

$$f_y = k(\Delta y_k) + b\dot{y}_k \tag{3.69}$$

$$f_z = k(\Delta z_k) + b\dot{z}_k \tag{3.70}$$

Burada k_p , k_d sırasıyla, yay ve sönüm (damper) elemanlarına ait sabit değerleri ifade eder. Simülasyon çalışmalarında, fiziksel olarak gerçekçi yay ve sönümleme parametrelerinin belirlenmesi oldukça zordur. Bu sebeple, kontak modeline ait sertlik ve sönüm parametreleri, deneme-yanılma yöntemleri ile belirlenebilir.

Bu bölümde sunulan kinematik analiz ve dinamik çözümlemeler, 4AR'ın yürüyüş hareketinin tanımlanması, anlaşılması ve kontrolcü tasarımı için belirli öngörüler sağlaması açısından önemlidir. Ancak; uzuv ağırlıklarının kütle merkezinde kabul edilmiş üniform çubuklar olarak düşünülmesi, yapılan genel kabuller, basitleştirmeler vb. gibi birçok nedenlerden dolayı, elde edilen matematiksel model gerçek sistemden oldukça farklı olmaktadır. Bu sebeple, gerçeğe daha yakın bir model elde etmek amacıyla, tüm geometrik boyutları ve kütle değerlerini içeren bir katı model tasarlanarak, MSC ADAMS ortamında 4AR'ın dinamik modeli elde edilmiştir. 4AR'ın yürüyüş benzetimleri ve kontrolcü tasarımları, MSC ADAMS ile MATLAB/Simulink programlarının birlikte eş zamanlı koşturulması ile gerçekleştirilmiştir.

4. ADIM HAREKETİNİN OPTİMAL KONTROLÜ

Bacaklı robotik alanında yapılan çalışmalara, özellikle *HyQ* ve *StarlETH* isimli robotlarının gelişim süreçlerine bakıldığında, dört ayaklı bir robotun inşa sürecinin, tek bacak yapısının tasarımı ve kontrolü üzerine teorik analizler, benzetim ve uygulama çalışmaları ile başladığı görülmektedir. Bacak sisteminin uygun kriterler belirlenerek fiziksel tasarımı ve modellenmesi, kinematik ve dinamik yapısının anlaşılması, adım yörüngesi için kontrolcü tasarımı; tüm robot gövdesinin inşasına ve yürüyüş çalışmalarına öncülük etmektedir (Semini ve ark., 2008; Hutter ve ark., 2013).

Bu bölümde, yürüyüş çalışmalarına katkı sağlayabilecek öngörüler elde etmek amacıyla, bacak yapısı üzerine tasarım, dinamik modelleme, doğrusal matematiksel modelleme ve adım hareketinin yörünge kontrolüne yönelik sezgisel algoritmalar ile optimal kontrolcü tasarımlarına ait çalışmalar detaylı olarak sunulmuştur.

4.1. Kontrolcü Tasarımda Kullanılan Optimizasyon Algoritmaları

Kontrolcü parametrelerinin optimizasyonda, adım hareketinin denetimine yönelik daha önce uygulanmayan, güncel Arı Algoritması (AA) ve Bozkurt Algoritması (BA) önerilmiştir. Önerilen algoritmaların performanslarını değerlendirebilmek için klasik Genetik Algoritma (GA) ve Parçacık Sürü Algoritması (PSO) kullanılmıştır. Her bir sezgisel arama algoritmasının yapısı aşağıda kısaca izah edilmiştir.

4.1.1. Genetik algoritma (GA)

Genetik Algoritma (GA) (Genetic Algorithm) Whitley (1994) tarafından geliştirilen, doğal seleksiyon temelli ve genetiği taklit eden, yaygın bir optimizasyon tekniğidir. GA, arama uzayında olası çözüm noktalarının popülasyonunu tek tek defalarca üretir. Her kuşak, nüfusu daha iyi çözümlere doğru evrimleştirir. Değişkenler ikili dizeler halinde ve doğal genetik ile uyumlu olarak tanımlanır (Rao, 2009).

GA'nın yedi ana adımı vardır. Bunlar sırasıyla şöyledir. İlk olarak, arama uzayındaki olası tüm çözümler (popülasyonlar) dizi şeklinde kodlanır. Başlangıç popülasyonu olarak rastsal (random) bir çözüm kümesi seçilir. En iyi çözümleri bulmaya yönelik belirlenen bir amaç fonksiyonuna (Fitness Function) göre, her dizinin çözüm kalitesini gösteren bir uygunluk (Fitness) değeri hesaplanır. Belli bir olasılık değerine

göre bir dizi grubu rastsal olarak seçilir (Selection) ve çoğalma gerçekleştirilir. Yeni bireylerin uygunluk değerleri hesaplanır, Çaprazlama (Crossover) ve Mutasyon (Mutation) işlemleri gerçekleştirilir. Yukardaki işlemler, belirlenen kuşak sayısı boyunca, tekrar eden bir döngü şeklinde devam ettirilir. Her kuşakta en iyi bireyler, en uygun çözümü bulmak için uygunluk değerine göre seçilir. Son olarak iterasyon sayısı kuşak sayısına ulaşınca arama sonlandırılır ve amaç fonksiyonuna en uygun dizi elde edilir.

GA ile kontrolcü tasarımında, optimizasyon problemlerini çözümünde güçlü bir araç olan MATLAB Global Optimizasyon ara yüzü kullanılmıştır.

4.1.2. Parçacık sürü algoritması (PSO)

Kennedy ve Eberhart (1995) tarafından, kuş ve balık sürülerinin sosyal davranışlarından esinlenerek geliştirilen Parçacık Sürü Algoritması (PSO) (Partcle Swarm Optimization) oldukça popüler bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu yaklaşımda, matematiksel bir optimizasyon problemine en uygun çözümler; kuşların birbirleriyle etkileşimleri, gıda arayışları, tehlikelerden kaçma davranışları taklit edilerek aranır. PSO algoritması, klasik programlama problemlerinden, bilimsel optimizasyon problemlerine kadar çok çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır (Panda ve Padhy, 2008).

Geleneksel PSO algoritması, aday çözümlerin (parçacıkların) başlangıç popülasyonu (swarm) ile başlar. Parçacıklar, tanımlanan formülasyonları arama alanı boyunca araştırırlar. Arayışın ardından, parçacıklar arama alanındaki ve sürü içindeki bilinen en iyi konumlara doğru hareket ederler. Parçacıklar en iyi pozisyonu bulduktan sonra diğer parçacıkların hareketlerini yönlendirirler. Arama alanı içinde tatmin edici çözüm bulunana kadar veya itrerasyon değerine ulaşılana kadar, arama bir döngü şeklinde tekrarlanır. Her iterasyonda, parçacıların pozisyon ve hızları Denklem (4.1) ve Denklem (4.2)'de belirtildiği şekilde yenilenir;

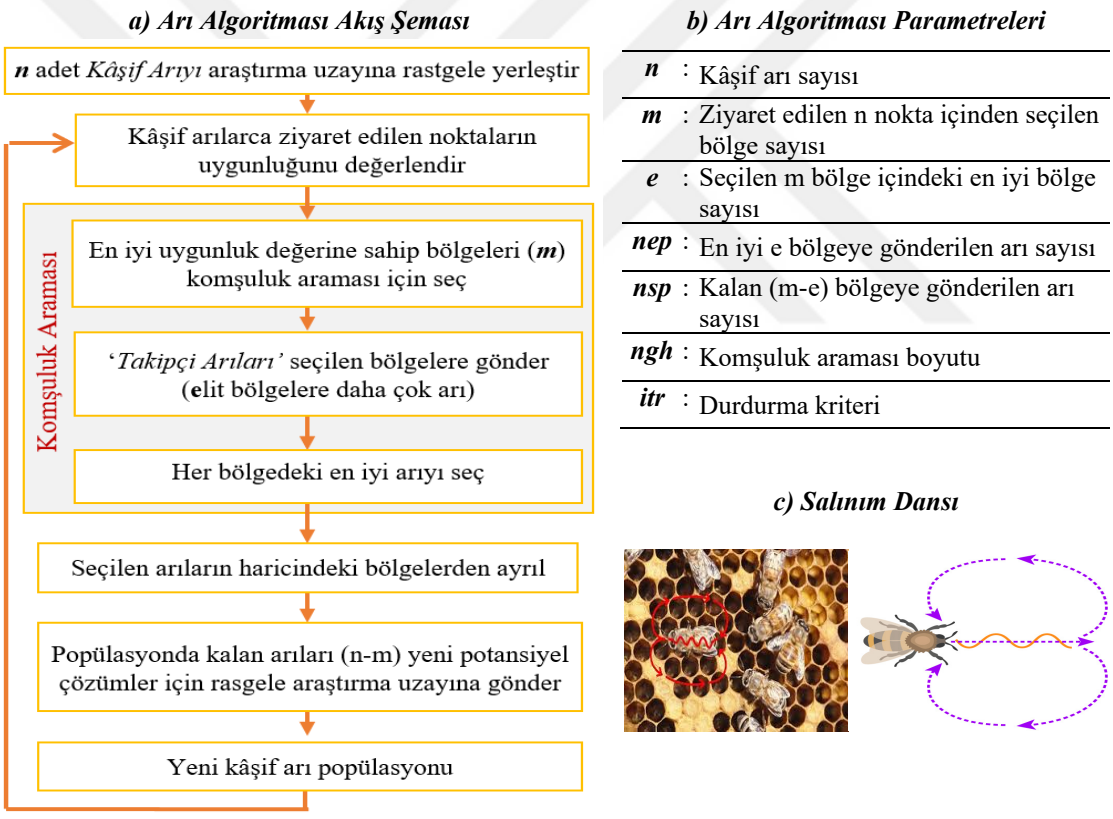
$$v_i^{t+1} = \mathrm{w}\, v_i^t + c_1 r_1 (p_i^t - x_i^t) + c_2 r_2 (g_i^t - x_i^t) \tag{4.1}$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad i=1,2,\ldots,n \tag{4.2}$$

Burada, v_i^{t+1} hız ve x_i^{t+1} pozisyon değerlerini ifade eder, *t* iterasyon sayısı, *n* parçacık sayısı, C_1 ve C_2 pozitif ölçeklendirme sabitleri, *w* ağırlık atalet değeri, p_i parçacığın en iyi konumu, g_i grup üyeleri arasındaki en iyi parça, r_1 ve r_2 ise [0,1] aralığında dağıtılan iki rastgele sayıdır.

4.1.3. Arı algoritması (AA)

Arı Algoritması (AA) (The Bees Algorithm), Pham ve ark. (2006) tarafından önerilmiş, bal arılarının kaynak (su, nektar vb.) arama davranışını ve birbirleri arasındaki bilgi (kaynağın yönü, uzaklığı ve miktarı vb.) paylaşımını taklit eden, popülasyon tabanlı, sezgisel bir arama algoritmasıdır. Algoritmada popülasyon, farklı görevleri yerine getiren üç sınıf arıdan oluşur. Bunlar; yeni kaynakları herhangi bir bilgi kullanmadan, bağımsız arayan *Kâşif Arılar*, kaynağa ulaştıktan sonra kaynak hakkındaki bilgileri *'salınım dansı'* adı verilen hareket ile kovandaki diğer arılara aktaran *Takipçi Arılar* ve son olarak bu bilgilere göre kaynak arayışını devam ettiren *İzci Arılar*'dır. Şekil 4.1'de salınım dansı görseli, AA parametreleri ve akış şeması verilmiştir.



Şekil 4.1. Arı Algoritmasının **a)** parametreleri, **b)** akış şeması ve **c)** salınım dansı

Pham ve Kalyoncu (2009), AA optimizasyonu yöntemiyle kontrolcü tasarımının ilk uygulamasını önermişlerdir. Sonrasında, birçok sistem üzerinde farklı kontrolcülere ait parametrelerin AA optimizasyonu ile ayarlanmasına yönelik çalışmalar sunulmuştur (Sen ve Kalyoncu, 2015; Bakırcıoğlu ve ark., 2016b; Bilgic ve ark., 2016; Sen ve ark., 2016; Sen ve Kalyoncu, 2016; Sen ve ark., 2018).

4.1.4. Bozkurt algoritması (BA)

Bozkurt Algoritması (BA) (Grey Wolf Optimizer), Mirjalili ve ark. (2014) tarafında geliştirilmiş, vahşi doğadaki bozkurtların liderlik hiyerarşisini ve avlanma stratejilerini taklit eden, sezgisel bir optimizasyon algoritmasıdır.

Liderlik hiyerarşisinde bozkurtlar; *Alfa (α), Beta (β), Delta (δ) ve Omega (ω)* olmak üzere dört farklı grupta tanımlanmıştır. Sürünün avlanma kararının verilmesi, uyku yerinin ve kalkma vaktinin belirlenmesi gibi konularda yetki ve sorumluluğu olan *Alfa (α)* kurt, hiyerarşisinde lider konumdadır. *Beta (β)* kurt hiyerarşide ikinci sırada bulunur ve karar vermede *Alfa (α)* kurdun yardımcısıdır, onun emirlerini diğer kurtlara iletir, geri dönüş sağlar ve sürü disiplininin uygulamasında rol oynar. *Alfa (α)* kurt yaşlandığı ya da uzaklaştığı zaman onun yerine *Beta (β)* kurt geçer. *Delta (δ)* kurt hiyerarşide üçüncü sırada bulunur, *Alfa (α)* ve *Beta (β)* kurtlar tarafından seçilir ve *Omega (ω)* kurda kıyasla daha baskındır. Hiyerarşide bir kurt *Alfa (α), Beta (β)* veya *Omega (ω) değilse Delta (δ)* kurt olarak belirlenir. Hiyerarşide en düşük seviyede olan *Omega (ω)* kurt yemek için diğer kurtların doymasını, ona sıra gelmesini bekler. *Omega (ω)* kurt önemsiz bir birey gibi görünse de, kaybolması durumunda sürüde problemler çıkar.

BA hiyerarşisi ve akış kodu, avlanmaya ait görsel Şekil 4.2'de sunulmuştur. Bozkurt hiyerarşide avlanma üç adımda gerçekleşir. Şekilde görüldüğü üzere, bozkurtlar öncelikle avlanma eğilime girerler (A), ardından izleme, takip ve ava yaklaşma (B-C-D) gerçekleşir, son olarak avı çevreleyerek durana kadar rahatsız ederler ve saldırırlar (E).

Bozkurtların *sosyal hiyerarşisinin* matematiksel olarak modellenmesinde, en uygun çözümün *Alfa (α)* olduğu kabul edilir. İkinci ve üçüncü en iyi çözümler ise sırasıyla *Beta (β)* ve *Delta (δ)* olarak adlandırılır. Geri kalan olası çözümlerin *Omega (ω)* olduğu varsayılır. BA algoritmasında arama (avlanma) *α, β,* ve *δ* tarafından yönlendirilir, *ω* kurtlar diğer kurtları takip eder. Bozkurttun avın çevresindeki konumu, aşağıdaki *çevreleme* davranışının matematiksel modeli ile rastgele güncellenir;

$$\vec{D} = \left|\vec{C}\overrightarrow{X_P}(t) - \vec{X}(t)\right| \tag{4.3}$$

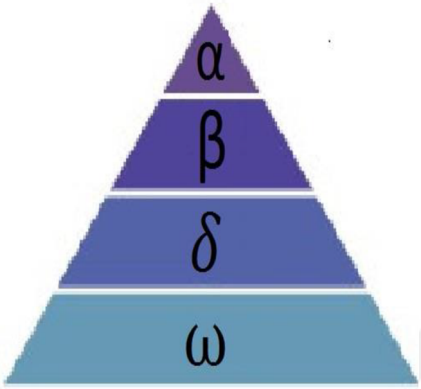
$$\vec{X}(t+1) = \overrightarrow{X_P}(t) - \vec{A}\vec{D} \tag{4.4}$$

$$\vec{A} = 2\vec{a}\vec{r}_1 - \vec{a} \tag{4.5}$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \tag{4.6}$$

Burada; *t* geçerli yinelemeyi, *A* ve *C* katsayısı vektörlerini, *Xp* avın konum vektörünü, *X* bir bozkurdun pozisyon vektörünü ifade eder. $\vec{a}$ bileşeni, 2'den 0'a yineleme boyunca doğrusal azalır. r_1 ve r_2 ise, [0,1] arasında rastsal bir vektördür.

a) Bozkurt Hiyerarşisi

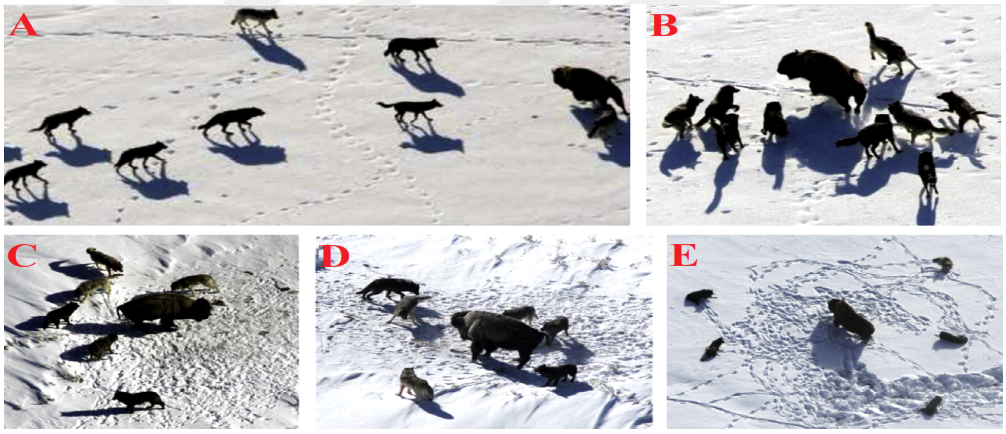


b) Bozkurt Algoritmasının Akış Kodu

- Bozkurt Popülasyonunu başlat (Xi)
- Başlangıç değerlerini ata (a, A, C)
- Her bir temsilci için uygunluk fonksiyon metodu hesapla
- $X\alpha$ en iyi arama temsilcisini ata
- $X\beta$ en iyi 2. arama temsilcisini ata
- $X\delta$ en iyi 3. arama temsilcisini ata
- **while** (t < Maks. iterasyon sayısından küçük olduğu sürece)
  - **for** Her Bir Temsilci İçin Tekrarla
    - Temsilcinin konumunu güncelle (Denklem 4.9)

    end
  - Başlangıç değerlerini güncelle
  - Her bir temsilci için uygunluk fonksiyonu metodu hesapla
  - $X\alpha$, $X\beta$, $X\delta$ değerlerini güncelle
  - t=t+1
- **end while**
- **return** $X\alpha$

c) Bozkurt Avlanması



Şekil 4.2. Bozkurt Algoritmasının **a)** hiyerarşisi, **b)** akış kodu ve **c)** avlanma

Bozkurtların, 2D ve 3D uzayındaki pozisyon vektörleri ve sonraki güncelleştirmedeki olası konumları ve kurtların konum güncellenmesine ait görseller Şekil 4.3'de sunulmuştur. Şekilde 4.3a'da görüldüğü gibi, (X, Y) konumundaki bozkurt avın pozisyonuna göre konumunu günceller (X*, Y*). A ve C vektörlerinin değerini ayarlayarak mevcut konuma göre en iyi temsilcinin (ajan) etrafındaki farklı yerlere ulaşılabilir. Örneğin A=(1,0) ve C=(1,1) değerlene karşın (X*-X, Y*) değerine ulaşılabilir. 3D uzayda bozkurdun olası güncelleştirilmiş pozisyonu Şekil. 4.3b'de verilmiştir. Bozkurt, avın çevresindeki rastgele bir yerde konumunu güncelleyebilir. Aynı kavram n boyutlara sahip bir arama alanında genişletilebilir ve bozkurtlar elde edilen en iyi çözüm etrafında hiper küp (ya da hiper-küre) şeklinde hareket eder.

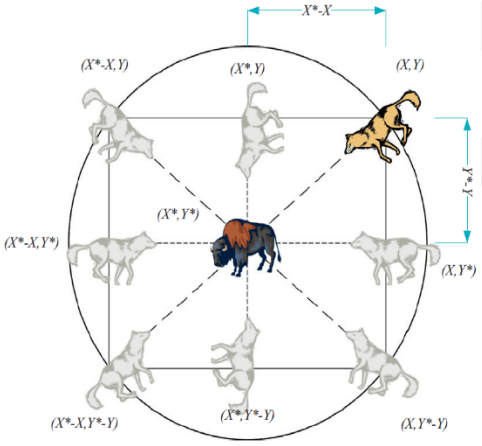
Avlanma, genellikle α tarafından yönlendirilir, β ve δ da avcılık yapabilir. Bozkurtların avlanma davranışının matematiksel olarak modellenmesinde, α (en iyi aday çözüm), β ve δ'nın avın potansiyel yeri hakkında daha iyi bilgiye sahip olduğu kabul edilir. Bu sebeple, o zamana kadar elde edilen ilk en iyi üç çözüm kaydedilir ve en iyi arama temsilcilerinin konumlarına göre diğer arama temsilcilerinin (ω'lar dâhil) konumu güncellenir. Bu güncellemeye ait denklemler aşağıda verilmiştir;

$$\vec{D}_\alpha = \left|\vec{C}_1\overrightarrow{X_\alpha} - \vec{X}\right|,\ \vec{D}_\beta = \left|\vec{C}_2\overrightarrow{X_\beta} - \vec{X}\right|,\ \vec{D}_\delta = \left|\vec{C}_3\overrightarrow{X_\delta} - \vec{X}\right| \tag{4.7}$$

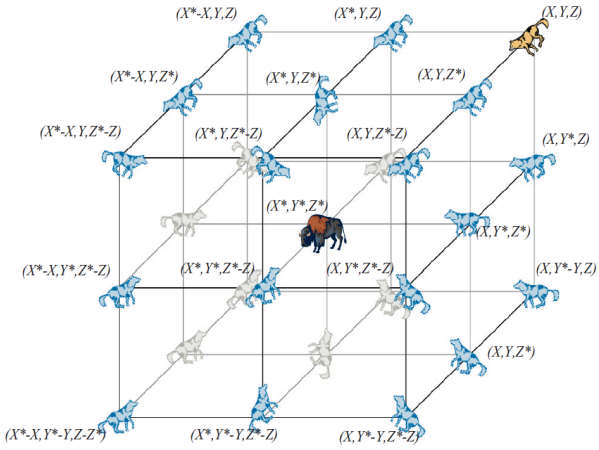
$$\vec{X}_1 = \overrightarrow{X_\alpha} - \vec{A}_1(\vec{D}_\alpha), \qquad \vec{X}_2 = \overrightarrow{X_\beta} - \vec{A}_2(\vec{D}_\beta), \qquad \vec{X}_3 = \overrightarrow{X_\delta} - \vec{A}_3(\vec{D}_\delta) \tag{4.8}$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \tag{4.9}$$

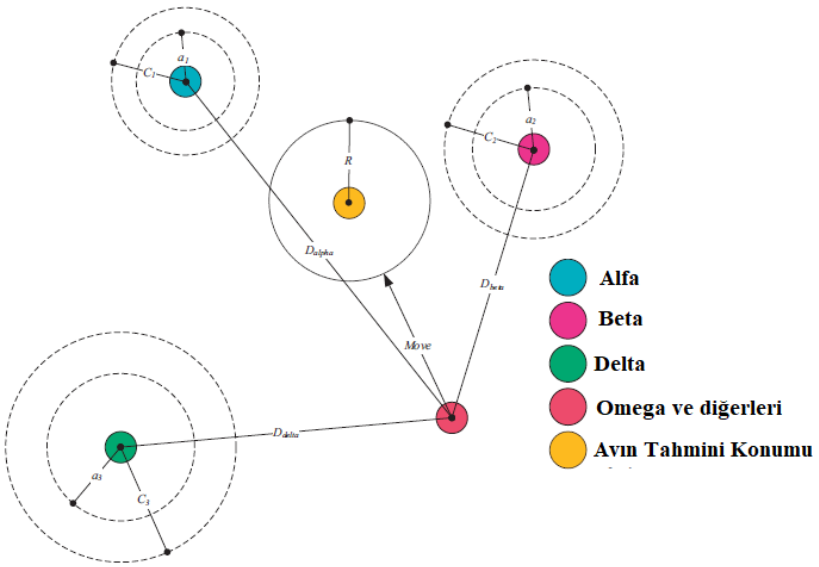
a) 2D uzayında pozisyon vektörü



b) 3D uzayında pozisyon vektörü



c) Kurt konumlarının güncellenmesi



Şekil 4.3. Bozkurt Algoritmasının **a)** 2D, **b)** 3D pozisyon vektörleri ve **c)** konum güncellemesi

Arama temsilcileri α, β ve δ'nın 2D arama uzayında konumlarını nasıl güncelledikleri Şekil 4.3c'de şematik gösterilmiştir. Temsilciler konumlarına göre tanımlanan bir daire içinde rastgele bir yerde olabileceği görülmektedir. Diğer bir ifadeyle α, β ve δ avın konumunu tahmin eder ve buna göre diğer kurtlar av etrafındaki konumlarını günceller.

Nihai olarak, bozkurtlar av durduğunda ava saldırırlar. Ava yaklaşmanın matematiksel olarak modelinde kullanılan $\vec{a}$ değeri, yineleme boyunca 2'den 0'a doğrusal olarak düşürülür. Böylelikle $\vec{a}$ vektörüne bağlı A vektörü de azalır. Başka bir deyişle, A vektörü $[-2a, 2a]$ değerleri arasında rastgele bir değer alır. A vektörü [-1, 1] içinde rastgele bir değer olduğunda; arama temsilcisi bir sonraki konumu, mevcut konumu ile avın pozisyonu arasında herhangi bir komun olabilir. |A|<1 olduğunda ise bozkurt ava doğru saldırır.

Bozkurtların av arayışında, avın durumuna (uzak olması, yırtıcı olması vb. gibi zorluklara) göre avdan sapabilirler. Sapmayı matematiksel olarak modellemek için, 1'den büyük veya -1'den küçük rastgele değerlere sahip A değerleri kullanılır. Bu durum BA'nın global arama yapabilmesine imkân sağlar. A vektörünün aksine, [0, 2] arasında rastgele değerleri içeren C vektörü ise doğrusal olarak azalmamaktadır. Diğer bir ifadeyle C vektörü, avlanma durumunda bozkurdun hızlı ve rahat bir şekilde ava yaklaşmasını engelleyen, öngörülmeyen zorlukların modeli olarak tanımlanabilir. Bu sebeple, BA'nın yerel araması sırasında, muhtemel çözümlerin durgunluğa gitme eğilimini önlemeyebilmesi için C vektörü önem arz eder.

Özetlemek gerekirse, Bozkurt Algoritmasında arama işlemi;

- Rastgele bir bozkurt topluluğu (aday çözümleri) oluşturarak başlar,
- Yinelemeler boyunca, alfa, beta ve delta kurtları avın muhtemel konumunu tahmin eder,
- Her aday çözüm, avından uzaklığını günceller. En iyi çözümü araştırmak için a parametresi 2'den 0'a indirilir,
- Aday çözümler, $\vec{A} > 1$ olduğunda avdan ayrılma eğilimi gösterir ve $\vec{A} < 1$ olduğunda ava saldırır,
- Son olarak, maksimum iterasyon sayısına ulaşılmasıyla veya tanımlanan bir durdurma kriterine ulaşılması ile arama sonlandırılır.

4.2. Bacak Yapısının Modellenmesi

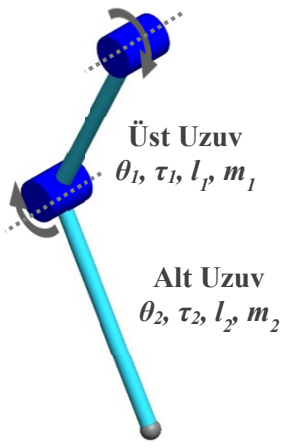
Dört ayaklı robotlar, yer ile temas halindeki ayak sayısının birden fazla olabilmesi ve böylece daha dengeli ve farklı çeşitlerde yürüyüş gerçekleştirebilmeleri nedeniyle iki ayaklı robotlardan daha avantajlı bir yapıya sahiptirler. Bacak sayısının artması ile toplam ağırlığın ve kinematik karmaşıklığın artığı altı bacaklı robotlardan ise daha hafif ve sade bir yapıdadırlar. Dört ayaklı robotların bacak yapıları, farklı performans kriterleri doğrultusunda, farklı serbestlik dereceli olarak tasarlanabilmektedir. Örneğin, tasarımları ve kullanım amaçları farklı olan; *Scout II* robotu 2-DoF, *HyQ2Max* ve *ANYmal* robotları 3-DoF ve *BigDog-2008* robotu 4-DoF bacak yapısına sahiptir.

Dört ayaklı bir robotun adım atma hareketinin incelenmesi, adım yörüngesinin kontrolü ve iyileştirilmesine yönelik optimal kontrolcü tasarımı için; bacaklı robotlarda yaygın olarak kullanılan, sade ancak etkinliği birçok çalışmayla kanıtlanmış, gövde ile birleştirildiği noktada bir serbestlik derecesi daha oluşan, 2-DoF bir bacak yapısı tasarlanmıştır. Bacağın 3D katı modeli üzerinden MATLAB/Simscape ortamında dinamik modelinin ve doğrusallaştırma yöntemleri ile Durum-Uzay modelinin elde edilmesi ve ayak ucu referans adım yörüngesinin tasarımı alt başlıklarda anlatılmıştır.

4.2.1. Katı model üzerinden dinamik modelin elde edilmesi

Alt ve üst uzuv olmak üzere iki uzuv ve bu uzuvlara ait dairesel hareketli iki eklemden oluşan, üniform yapıdaki, 2-DoF bacağa ait fiziksel model ve parametreleri Şekil 4.4'de sunulmuştur.

a) Fiziksel Model



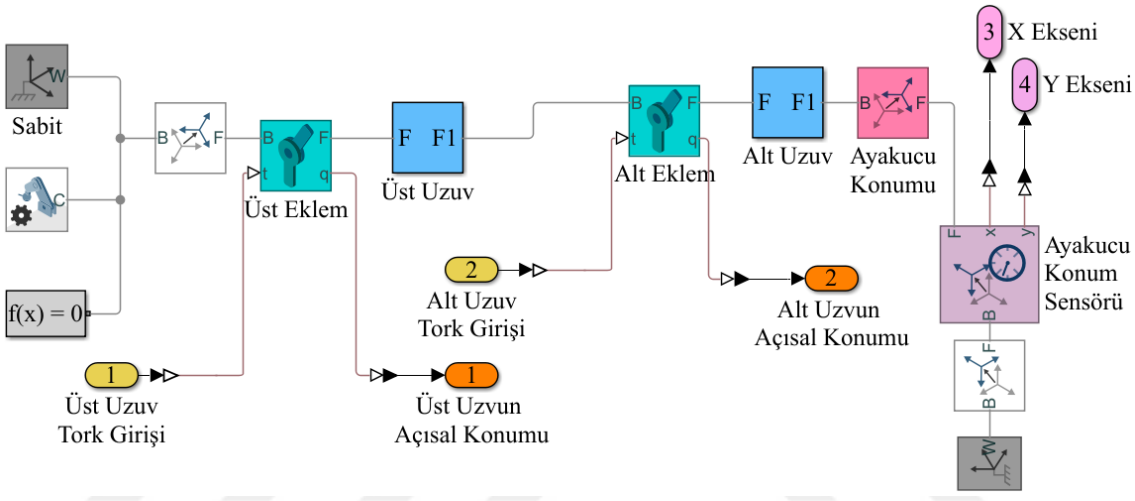
b) Fiziksel Parametreler

Parametre	Açıklama	Değer
θ_1	Üst Uzuv Konum Aralığı	0~90
τ_1	Üst Uzuv Torku	±100 Nm
l_1	Üst Uzvun Uzunluğu	0.4 m
m_1	Üst Uzvun Kütlesi	5 kg
θ_2	Alt Uzuv Konum Aralığı	0~120
τ_2	Alt Uzuv Torku	±100 Nm
l_2	Alt Uzvun Uzunluğu	0.41 m
m_2	Alt Uzvun Kütlesi	1.5 kg

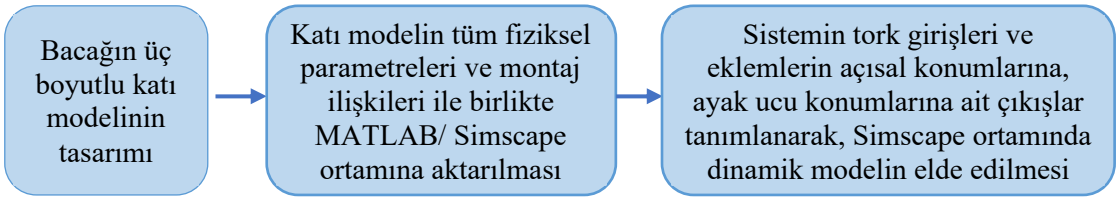
Şekil 4.4. 2-DoF bacağa ait **a)** fiziksel model ve **b)** parametreleri

Bacak yapısının şekil, boyut, kütle vb. gibi fiziksel parametrelerini ve montaj ilişiklerini içeren üç boyutlu katı modeli SolidWork[1] programında tasarlanmış, MATLAB/Simscape/MultiBody[2] (önceki versiyon ismi SimMechanics) ortamına aktarılarak, dinamik model elde edilmiştir. Simscape, standart Newtonian kuvvet ve tork dinamiklerini kullanarak mekanik sistemleri modellemek ve simüle etmek için kullanılan blok şema tabanlı bir modelleme ortamıdır. Şekil 4.5'te Simscape yazılımında oluşturulan bacağın dinamik modeli ve modelleme yönteminin aşamaları görülmektedir.

a) Simscape yazılımında oluşturulan dinamik model



b) Modelleme aşamaları



Şekil 4.5. a) Simscape'de oluşturulan **a)** dinamik model ve **b)** modelleme aşamaları

4.2.2. Durum-uzay modelinin elde edilmesi

Kontrol ve benzetim çalışmalarında doğrusal matematiksel modellerin kullanılması, işlem yükü ve süresi açısından çok kütleli dinamik modellere kıyasla daha avantajlıdır. Özellikle optimizasyon çalışmalarında, kontrol sisteminin arama algoritması içinde en hızlı şekilde defalarca koşturulması gerektiği düşünüldüğünde, toplam işlem süresinin ve yükünün mümkün olduğunca azaltılması gerekebilir.

[1] SOLIDWORKS® Introducıng Solidworks, 2019
[2] Simscape™ Getting Started Guide, The MathWorks, Inc 2019.

Ancak karmaşık dinamik yapıya sahip, çok serbestlik dereceli sistemlerin doğrusal modelinin analitik yöntemlerle elde edilmesi oldukça zor olabilmektedir. Bu sebeple, Tek Giriş-Tek Çıkış (SISO) sistemlerin Transfer Fonksiyonu ve Çoklu Giriş-Çoklu Çıkış (MIMO) sistemlerin ise durum-uzay modeli (state-space model), Simscape ortamında oluşturulmuş dinamik modeller üzerinden, doğrusallaştırma araçları kullanılarak elde edilebilmektedir.

Bacağın yörünge kontrolü için PID ve LQR tabanlı kontrolcü optimizasyonu çalışmalarında, optimal kontrolcü kazançlarının bacağın doğrusal modeli üzerinden aranması, işlem yükünü azaltarak, daha hızlı ve etkili sonuçlar sağlayacaktır. Ayrıca, LQR kontrolcüye ait parametrelerinin (Q ve R ağırlık matrislerinin) tayin edilebilmesi için sistemin durum-uzay modeli gereklidir. Bu nedenle, MATLAB[1]'nın lineer analiz araç kutusu ve doğrusallaştırma komutları kullanılarak, bacağın çok kütleli dinamik modeli üzerinden, girişler tork−çıkışlar açısal konum olacak şekilde, birim basamak tork girişine karşın alınan sistem cevaplarına göre, bacağa ait doğrusal durum-uzay modeli elde edilmiştir. Denklem (4.10)'da sistemin durum-uzay formunda ifadesi ve devamında bileşenlerinin detayları sunulmuştur;

$$\dot{x} = Ax + Bu\ , y = Cx + Du \tag{4.10}$$

$$x^T = \left[\theta_1\ \dot{\theta}_1\ \theta_2\ \dot{\theta}_2\right]\quad y^T = [\theta_1\ \theta_2]\quad u^T = [\tau_1\ \tau_2] \tag{4.11}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -25.5 & 0 & 9.9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 6.3 & 0 & 25.6 & 0 \end{bmatrix}\quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 2.4 & 2.9 \\ 0 & 0 \\ 2.9 & 22.7 \end{bmatrix} \tag{4.12}$$

$$C = \begin{bmatrix} 57.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 57.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 57.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 57.3 \end{bmatrix}\quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.13}$$

Burada; $x, \dot{x}$, durum değişkenleri vektörünü ve zamana bağlı türevini, y, çıkış değişkenlerini içeren vektörü, u, sistemin giriş (kontrolcünün çıkış) vektörünü ifade eder. A, sistem matrisi, B, C, giriş ve çıkış matrisleri, D ise, ileri besleme matrisidir

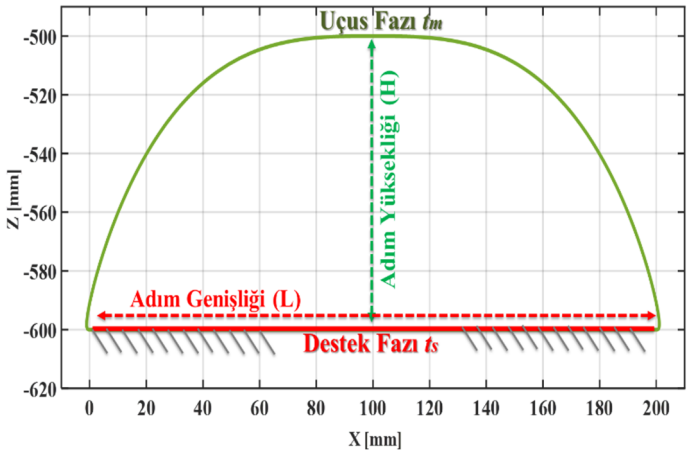
Bölüm 4.6'da, üç uzuvlu bir bacak tasarımının ve kontrolünün gerçekleştirildiği kısımda, dinamik model üzerinden doğrusal durum-uzay modeli elde etme yöntemi detaylandırılmış, daha kapsamlı açıklamalara yer verilmiştir.

[1] MATLAB&Simulink® User's Guide, The MathWorks, Inc 2019.

4.2.3. Referans adım yörüngesinin tasarımı

Tekerlekli/paletli sistemlerin aksine bacaklı robotlar, eklemli bacak yapıları sayesinde, adım atarak hareket ederler. Robotun adım hareketi, ayak ucunun yüzey ile sürekli temas hâllide olmayan bir adım yörüngesini takip etmesiyle gerçekleşir. Dört ayaklı robotlar için yaygın kullanılan sinüsoidal adım yörüngesi (Sakakibara ve ark., 1990), destek/duruş evresi (stance phase) ve uçuş/salınım evresi (swing phase) olmak üzere iki evreli, yarım daireye benzer parabolik eğriler olarak tasarlanmaktadır (Yang ve ark., 2009). Uçuş evresi; ayak ucunun yerden ayrılıp, x ve z eksenleri doğrultusunda, adım yüksekliği ve uzunluğu boyunca hareket ettiği evre olarak tanımlanabilir. Destek evresi ise; uçuş evresinden sonunda, ayak ucunun yer ile tekrar etkileşime girmesiyle başlayan ve z ekseninde sabit, x ekseni doğrultusunda, adım uzunluğu kadar hareket ettiği evre olarak tanımlanabilir. Zeng ve ark. (2018), uçuş evresinden ve destek evresine geçişte, yer ile daha yumuşak etkileşim sağlamak amacıyla, biyolojik tabanlı bir adım yörünge tasarımı ve kontrolü önermişlerdir. Şekil 4.6'da adım yörüngesi ve parametreleri sunulmuş, bacağın adım hareketine ait görseller verilmiştir.

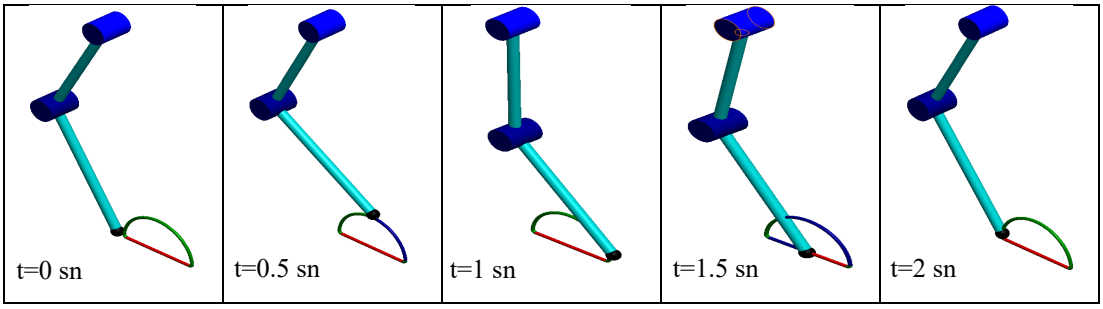
a) Adım Yörünge Profili



b) Adım Yörüngesinin Parametreleri

Param.	Açıklama
L	Adım Uzunluğu
H	Adım Yüksekliği
t_m	Uçuş Süresi
t_s	Destek Süresi
T	Toplam adım üresi (t_m+t_s)

c) Adım hareketine ait görseller



Şekil 4.6. a) Adım yörüngesi, **b)** parametreleri ve **c)** adım hareketine ait görseller

Şekil 4.6a'da görüldüğü üzere, adım yörüngesi, temel olarak adıma ait yükseklik ve uzunluk parametreleri ile tanımlanabilen, yarım daireye benzer sinüsoidal bir eğri profili şeklinde tasarlanır. Bacak yapısına mekanik zarar verebilecek ölçekte yüksek ivme ve kuvvetlerin oluşabildiği duruş evresinde, ayakuçları zeminle etkileşim halinde gövdeyi taşır ve iterek hareketlendirir. Bu sebeple, bacak yapısının dayanımının hesaplanmasında ve adım yörünge kontrolünde ayak ucuna gelen tepki kuvvetleri dikkate alınmalıdır. Bacağın zeminde ayrıldığı ve sadece kendi kütlesi kadar gerilmelere maruz kaldığı uçuş evresinde ise, yörünge tasarımdaki temel kriter, en az enerji tüketimi ile ayak ucunun engel/engebeleri aşması için yeterli yörünge alanının oluşmasıdır (Zeng ve ark., 2019).

Evreler arası hassas bir geçiş için, bir sonraki evrenin başlangıç konumu ve hızı, bir önceki evrenin nihai konumuna ve hızına uygun olması gerekir (Orsolino, 2019). Ayak ucunun zeminle etkileşimli hareketinde, yani duruş evresinde, ayak ucu ile zemin arasındaki bağıl hızın sıfır olması, ani tepki kuvvetlerinin ve bu kuvvetlerin olumuz etkilerinin azaltılmasına yardımcı olur (Gehring, 2017). Evreler arası ani geçişlerde, daha yumuşak bir ayakucu-zemin etkileşimi sağlayabilmek amacıyla, B-spline parametrik eğrisi ve kontrol poligonu kullanılarak farklı yörüngeler tasarlanabilir. Buradaki temel amaç, bacağa etki eden olası yüksek kuvvetlerin oluşturduğu maksimum ivmeleri en aza indirmek ve ayak ucunun pozisyon, hız ve ivmesinin sürekliliğini sağlamaktır. Ancak ayak ucunun izlemesi gereken adım yörüngesi karmaşıklaştıkça kontrolü zorlaşabilir ve yörünge izleme hatası artabilir. Aşağıdaki Denklem (4.14) ve Denklem (4.15)'de referans adım yörüngesinin, x ve z eksenlerine ait zamana bağlı matematiksel ifadesi verilmiştir;

$$x(t) = \frac{L}{2} - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) * \frac{L}{2} \tag{4.14}$$

$$z(t) = \min\{h, \max\{0, \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) * H\} \tag{4.15}$$

Burada; L ve H, adım uzunluğu ve yüksekliğini, T toplam adım süresini (periyodu), h ise bacak koordinat sisteminin başlangıçtaki zeminden yüksekliğini ifade etmektedir.

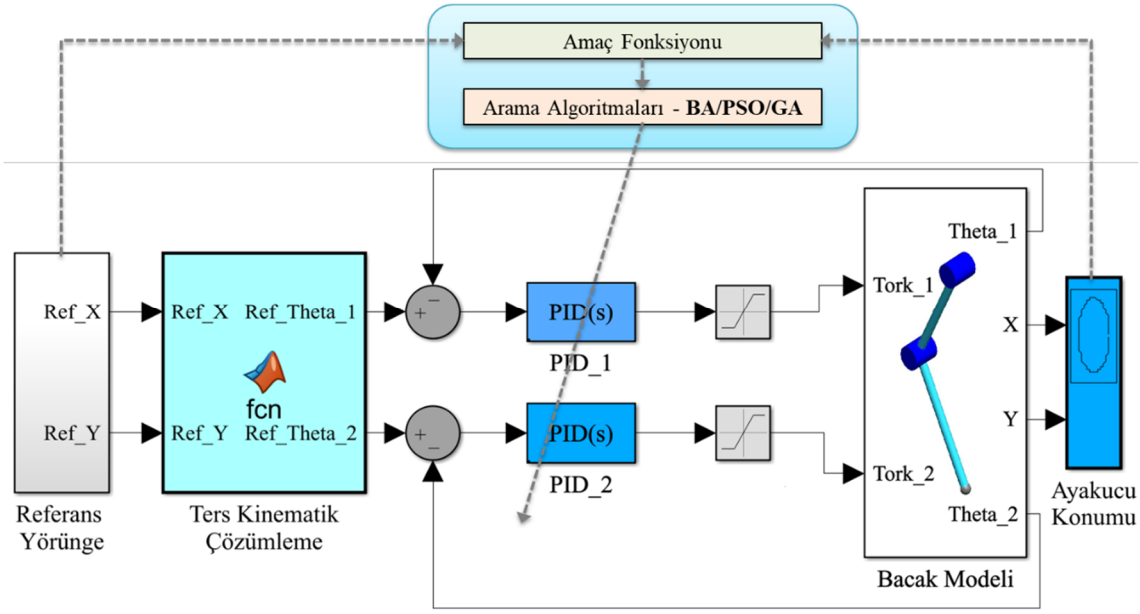
Adım yörüngesi; gövde ve uzuv boyutlarının ve eklemlerin açısal konum aralıklarının müsaade ettiği çalışma uzayı ile sınırlı kalacak şekilde, yürüyüş planlamasına, istenilen gövde ilerleme hızı, denge vb. gibi kriterlere ve zemindeki düzensizliklere göre farklı formlarda tasarlanabilmektedir. Bu konu ile ilgili detaylı bilgilere yürüyüş çalışmalarında değinilmiştir.

4.3. PID Kontrolcü Tasarımı ve Optimizasyonu

Bacaklı robotların kontrolü üzerine çalışmalar son yıllarda istikrarlı bir şekilde gelişmektedir. Dört ayaklı robotların tekerlekli araçların erişemediği alanlardaki yüksek hareketlilik avantajları beraberinde, karmaşık yapılarından kaynaklı zorlu kontrol problemlerinin çözülmesini ve uygun denetleyicilerin tasarlanmasını gerektirmektedir. PID denetleyici, kontrol alanında birçok araştırmacı tarafından tercih edilen, yaygın bir kontrol tekniğidir. Bir arama algoritması kullanılarak PID kazançlarının ayarlanması, Ziegler-Nichols yöntemine (Ziegler ve Nichols, 1942) ve deneme-yanılma yöntemlerine kıyasla daha hızlı ve etkin sonuçlar verebilmektedir. PID kontrolcü optimizasyonuna yönelik detaylı çalışmalar literatürde mevcuttur. Ayala ve dos Santos Coelho (2012), bir robot manipülatörüne uygulanan PID denetleyici parametrelerinin optimizasyonu için çok amaçlı ve sıralamalı bir GA geliştirmişlerdir. Kanojiya ve Meshram (2012), PSO algoritmasını ve Modified Ziegler-Nichols (MZN) ayarlama yöntemini kullanarak, doğru akım motorlu bir tahrik sisteminde optimal PI kontrolcü parametrelerinin ayarlanmasını önermişlerdir. Das ve ark. (2015), ikinci dereceden bir DC motor sistemi için, BA tabanlı evrimsel bir algoritma kullanılarak, PID kontrolcü tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Verma ve ark. (2017), Kesir Dereceli PID (PIλDμ) kontrolcü parametrelerinin tasarımı için BA ile optimizasyon tekniği sunmuşlardır. Lal ve ark. (2016), hidro-termik güç sisteminin otomatik kontrolcü için optimal bulanık mantık tabanlı PID kontrolcü kazançları meta-sezgisel bir teknik olan BA ile ayarlamışlardır.

Bu bölümde, meta-sezgisel bir yöntem olan Bozkurt Algoritması (BA) kullanılarak, bacağın referans bir adım yörüngesinde hareketinin kontrolü için klasik PID kontrolcü tasarımı ve optimizasyonu sunulmuştur. Ayak ucunun referans adım yörüngesini en az hata ile takip edebilmesine yönelik, eklem torklarını denetleyen PID kontrolcüye ait k_p, k_i ve k_d kazançları BA ile ayarlanmıştır. Ayrıca, önerilen algoritmaların etkinliklerini araştırmak için BA'nın performansı, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) algoritması ve Genetik Algoritma (GA) ile karşılaştırılmıştır.

Adım hareketinin yörünge kontrolüne yönelik, MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan genel PID kontrolcü yapısı ve optimizasyon şeması Şekil 4.7'de sunulmuştur. Şekilden de görülebileceği üzere, referans adım yörüngesini sağlayacak değerlerdeki eklemlere ait referans açısal konumlar ters kinematik çözümlemeler ile elde edilmekte ve her iki eklemin geri beslemeli tork denetimi, bacağın Simspace modeli üzerinden, iki adet PID kontrolcü ile gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4.7. Ayak ucu yörüngesinin PID kontrolü ve optimizasyon şeması

Ayak ucunun adım yörüngesini izleme hatasını en aza indirebilmek için, parametrik olarak ön tasarımı yapılmış PID kontrolcülere ait toplam 6 adet kazancın optimal değerleri, önerilen arama algoritmaları (BA, PSO, GA) ile ayrı ayrı ayarlanmıştır. PID kontrolcü optimizasyonu için kullanılan algoritmaların parametreleri Çizelge 4.1'de belirtilmiştir. Denklem (4.16)'de, Simulink'e ait PID kontrolcü bloğunun matematiksel ifadesi verilmiştir. Denklemde filtre katsayısı N=100 olarak belirlenmiştir. Ani aşmaları önlemek ve uygulanabilir torklar üretebilmek amacıyla kontrolcü çıkışları sınırlandırılmıştır. Yörünge takip hatalarının normunu içeren ve Denklem (4.17)'de belirtilen amaç fonksiyonunu minimize edecek kontrolcü kazançları aranmıştır.

Çizelge 4.1. PID kontrolcü optimizasyonda kullanılan algoritmalara ait parametreler

BA	Arama temsilcisi sayısı		30
	Maksimum yineleme		100
PSO	Parçacık sayısı (NoP)		30
	Maksimum yineleme		100
	Hız Ayırma Parametresi ($V_{maks.}$)		6
	Atalet ağırlık değeri	$w_{başlangıç}$	0.2
		w_{final}	0.9
	Kişisel En İyi Değerin Önemi (c_1)		2
	Komşuluğun En Önemli Değeri (c_2)		2
GA	Popülasyon Büyüklüğü		30
	Kuşak Sayısı		100
	Elit Sayısı		5
	Çaprazlama Oranı		0.8

$$k_p + k_i \frac{1}{s} + k_d \frac{N}{1 + N\frac{1}{s}} \tag{4.16}$$

$$\mathrm{J} = \left\| \sqrt{|Xref - X|^2 + |Yref - Y|^2} \right\| \tag{4.17}$$

Burada; X_{ref} *ve* Y_{ref}, referans adım yörüngesinin koordinatları, X ve Y ise gerçekleşen yörünge koordinatlarıdır. Amaç fonksiyonu (J), adım hareketi süresince referans ve gerçekleşen yörünge arasındaki mutlak hataların matrissel normunu ifade etmektedir.

Optimizasyon işlemlerinde; BA ve PSO algoritmaları MATLAB ortamında programlanarak uygulanmış, GA optimizasyonu için ise MATLAB Global Optimizasyon araç kutusu kullanılmıştır. Önerilen algoritmalar, 16.0 GB bellek, Intel® Core ™ i7-4700HQ CPU 2.40 GHz özeliklerine sahip bilgisayarda, sistemin genel Simulink kontrol modeli üzerinde, 100 iterasyon boyunca çalıştırılmıştır.

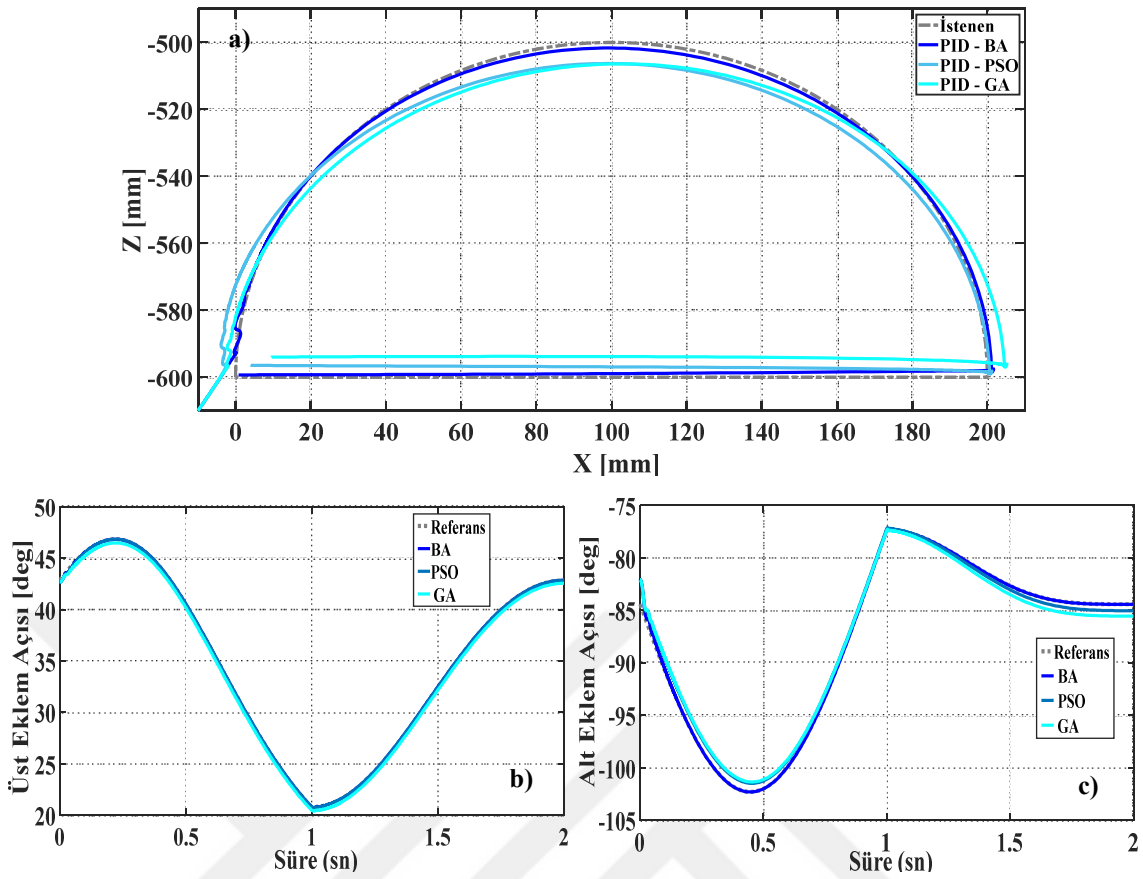
Optimizasyon sonucu, BA, PSO ve GA tarafından indirgenen amaç fonksiyonuna ait minimum değerler, bu değerlere karşılık gelen optimal PID kontrolcü kazançları ve toplam optimizasyon süreleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. PID kontrolcülere ait optimal kazançlar ve sonuçlar

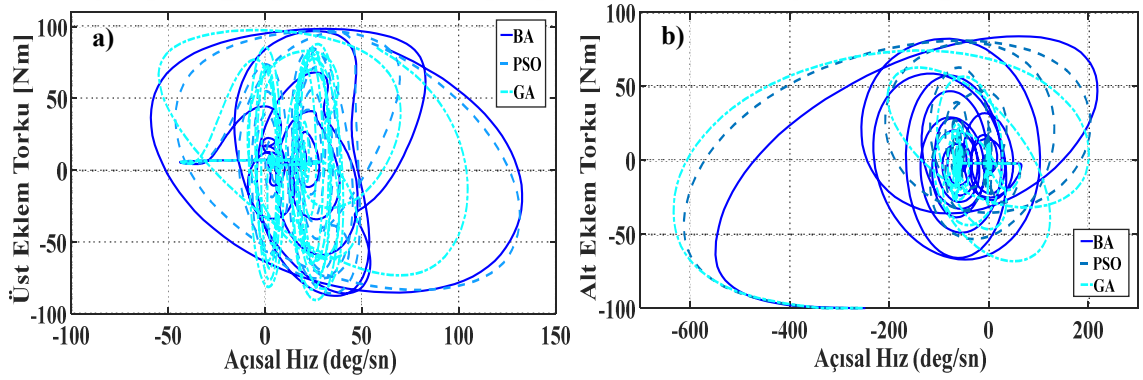
	PID 1			**PID 2**			*Arama Aralığı (Min-Maks)*	*En iyi Sonuç* (J_{min})	*Optimizasyon Süresi* (sn)
	$\mathbf{k_{p1}}$	$\mathbf{k_{i1}}$	$\mathbf{k_{d1}}$	$\mathbf{k_{p2}}$	$\mathbf{k_{i2}}$	$\mathbf{k_{d2}}$			
BA	493.3	0.055	8.050	93.73	21.92	3.910	0−1000	63.94	1854,59
PSO	932.5	615.0	34.85	117.4	271.3	173.9	0−1000	67.93	2025.94
GA	81.65	2.540	465.3	47.78	595.4	247.9	0−1000	74.14	2342.48

Optimizasyon sonrası elde edilen, farklı kazançlara sahip üç optimal PID kontrolcü ile bacağın adım hareketinin kontrolü, ayrı ayrı Simulink ortamında simüle edilmiştir. Adım hareketinin simülasyon süresi, uçuş ve destek evreleri 1'er saniye olmak üzere, toplamda 2 saniye olarak belirlenmiştir.

Önerilen arama algoritmalarının (BA, PSO, GA) sağladığı optimal PID kontrolcülerin yörünge izleme performansları analiz edilmiştir. Simulasyon sonrası gerçekleşen, ayak ucunun adım yörüngesinin takibine ait sonuçlar Şekil 4.8a'da, üst ve alt eklemlerin açısal konumlarına ait sonuçlar Şekil 4.8b ve Şekil 4.8c'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



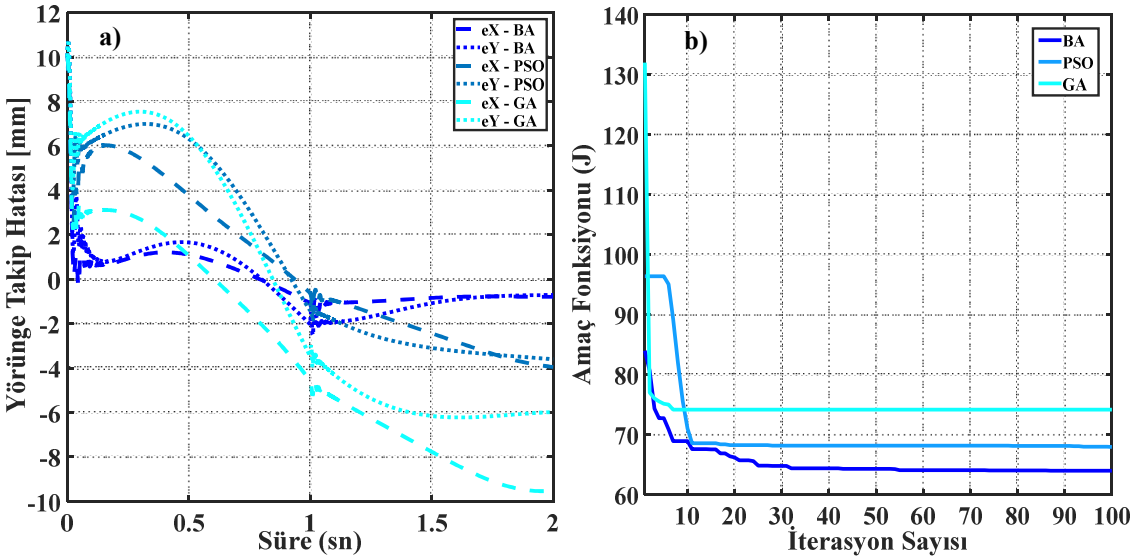
Şekil 4.8. Optimal PID kontrolde **a)** ayak ucu yörüngesi, **b)** üst ve **c)** alt eklemlerin açısal konum grafikleri



Şekil 4.9. Optimal PID kontrolde **a)** üst ve **b)** alt eklemlerin tork-açısal hız grafikleri

Alt ve üst eklemlere ati tork- açısal hız eğri grafikleri, önerilen algoritmalar için karşılaştırmalı olarak Şekil 4.9'da sunulmuştur. Deneysel uygulamalar için, optimal PID kontrolcülerden elde edilen üst ve alt eklemler için tork-açısal hız eğrisinin limitleri içinde kalacak şekilde motor seçimi yapılabilecektir.

Optimal PID kontrolcülerin x ve z eksenlerindeki yörünge takip hataları Şekil 4.10a'da ve önerilen algoritmaların amaç fonksiyonunu indirgeme (yakınsama) performansları ise Şekil 4.10b'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.10. Optimal PID kontrolde **a)** yörünge takip hatları ve **b)** yakınsamalar

Benzetim sonuçlarına göre; adım yörünge kontrolü için optimal PID kontrolcü kazançlarının ayarlanmasında BA'nın; daha az hata ile PSO algoritması ve GA'ya göre daha hızlı çözümler sunabildiği, daha etkin yerel ve global arama yapabildiği, amaç fonksiyonunun indirgenmesine yönelik daha tatmin edici bir performans gösterebildiği sonuçlarına varılmıştır.

4.4. Hibrit LQR-PID Kontrolcü Tasarımı ve Optimizasyonu

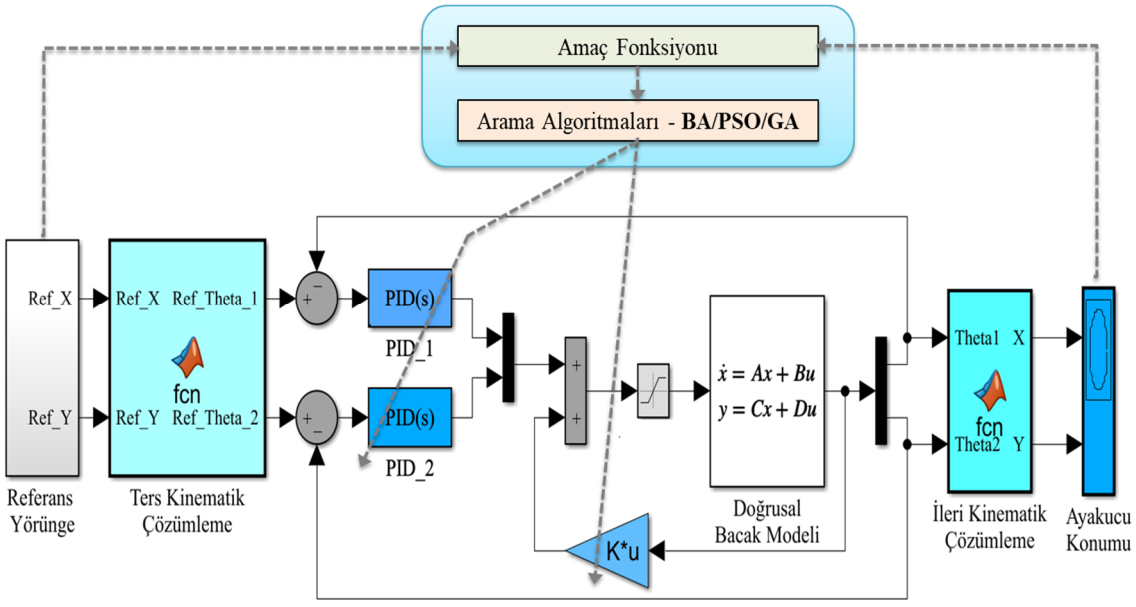
Bacak yapısının adım hareketinin kontrolüne yönelik, Doğrusal Kuadratik Regülatör (LQR) ve PID kontrolcülerin birleşiminden oluşan, farklı ve özgün bir yaklaşım ile Hibrit LQR-PID kontrolcü tasarımı ve optimizasyonu sunulmuştur. PID kontrolcü tasarımına benzer şekilde, LQR kontrolcü parametreleri de yaygın olarak, tecrübeye dayalı deneme-yanılma yöntemleri ile belirlenmektedir. Bu sebeple, geliştirilen kontrolcünün tüm parametreleri (LQR'ye ait Q ve R ağırlık matrisleri ve PID'ye ait k_p, k_i, k_d kazançları) önerilen arama algoritmaları kullanılarak ayarlanmıştır.

PID kontrolcünün yanı sıra LQR kontrolcü de özellikle Çok Girişli−Çok Çıkışlı (MIMO) sistemlerin kontrol problemlerinin çözümünde oldukça popüler ve pratik bir kontrol algoritmasıdır. LQR kontrolcü tasarımında, Durum (Q) ve Kontrol (R) ağırlıklandırma matrisleri tasarımcı tarafından deneme-yanılma yöntemleri kullanılarak belirlenmektedir. Ancak, bu ağırlıklandırma matrislerinin tanımlanması kontrolcü performansı açısından çok önemlidir. Bu sebeple, bir arama algoritması ile ayarlanması daha etkili sonuçlar verebilmektedir.

Birçok sistemin kontrolüne yönelik, sezgisel optimizasyon tekniklerine dayalı LQR kontrolcü optimizasyonu çalışmaları literatürde mevcuttur. Örnek olarak, LQR kontrolcü tasarımında; BA'ın (Razmjooy ve ark., 2016), PSO'nun (Al-Mahturi ve Wahid, 2017) ve GA'nın (Nath ve Dewan, 2017) kullanıldığı çalışmalar verilebilir.

Dört ayaklı robotların kontrolü içinde LQR kontrolcünün kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Focchi ve ark. (2010) *HyQ* robotunun bacak yapısının denetimi için, ayrı ayrı PID ve LQR kontrolcü tasarımları gerçekleştirmişlerdir. Sabit bir çalışma noktası etrafında çalışmak üzere tasarlandığından dolayı, LQR kontrolcünün yüksek frekanslarda performansının azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca, Hubacher (2014) düşük seviye denetleyicilerin sebep olduğu problemleri bertaraf eden LQR tabanlı, uyarlamalı (adaptif) bir kontrolcü sunmuştur. Meng ve ark. (2015), dört ayaklı bir robotun denge problemi için LQR kontrolcü ile bir dengeleme yöntemi önermişlerdir.

Bu bölümde, Bölüm 4.3'teki PID kontrolcü optimizasyonuna benzer şekilde, bacağın referans bir yörüngede adım hareketinin kontrolü için Bozkurt Algoritması (BA) ile Hibrit LQR-PID kontrolcü tasarımı ve optimizasyonu ele alınmıştır. Ayak ucunun adım yörüngesinin takibindeki hatayı en az indirmeye yönelik, Hibrit LQR-PID kontrolcüye ait tüm tasarım parametreleri BA ile ayarlanmıştır. Ayrıca, önerilen algoritmaların etkinliklerini araştırmak için; BA'nın performansı, PSO'nun ve GA'nın performansları ile karşılaştırılmıştır. MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan Hibrit LQR-PID kontrolcünün genel yapısı ve optimizasyon şeması Şekil 4.11'de sunulmuştur.



Şekil 4.11. Ayak ucu yörüngesinin Hibrit LQR-PID kontrolü ve optimizasyon şeması

Ayak ucunun adım yörüngesini en az hata ile takip edebilmesi amacıyla, parametrik olarak ön tasarımı yapılmış Hibrit LQR-PID kontrolcüye ait toplam 12 adet kazancın optimal değerleri, önerilen arama algoritmaları (BA, PSO, GA) ile ayrı ayrı ayarlanmıştır. Önerilen algoritmaların parametreleri Çizelge 4.3'teki gibi belirlenmiştir. LQR kontrol tekniğinde, durum-uzay formunda tanımlanmış bir sistem modelinin durum geri beslemeli denetimi için, kontrol performans indeksini (*Je*) minimize edecek giriş (*u=Kx* yani kazanç matrisi *K*) belirlenir (Zhou ve ark., 1996). Denklem (4.18-4.20)'de LQR kontrol tekniğinin matematiksel ifadesi sunulmuş ve izah edilmiştir.

Çizelge 4.3. Hibrit LQR-PID kontrolcü optimizasyonda kullanılan algoritmalara ait parametreler

BA	Arama temsilcisi sayısı		20
	Maksimum yineleme		50
PSO	Parçacık sayısı (NoP)		20
	Maksimum yineleme		50
	Hız Ayırma Parametresi (V_{maks})		6
	Atalet ağırlık değeri	$w_{başlangıç}$	0.2
		w_{final}	0.9
	Kişisel En İyi Değerin Önemi (c_1)		2
	Komşuluğun En Önemli Değeri (c_2)		2
GA	Popülasyon Büyüklüğü		20
	Kuşak Sayısı		10
	Elit Sayısı		50
	Çaprazlama Oranı		0.8

$$J_e = \int_0^\infty \left[x^T{}_{(t)}\, Q x_{(t)} + u^T{}_{(t)}\, R u x_{(t)}\right] dt \tag{4.18}$$

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & . & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & . & 0 & 0 \\ 0 & 0 & . & 0 & 0 \\ 0 & 0 & . & q_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & . & 0 & q_n \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & . & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & . & 0 & 0 \\ 0 & 0 & . & 0 & 0 \\ 0 & 0 & . & r_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & . & 0 & r_n \end{bmatrix} \tag{4.19}$$

$$PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P \tag{4.20}$$

Burada; J_e, kontrol performans indeksini, $x_{(t)}$, sistemin durum değişkenlerine ait matrisi $u_{(t)}$, sistem girdisini, Q, simetrik ve yarı kesin pozitif matrisi, R ise, simetrik ve kesin pozitif matrisi ifade eder. Sistemin kontrol edilebilir ve gözlemlenebilir olması şartıyla, *Je'*yi minimize ederek *u(t)'*nin bulunması amaçlanır. Bu sebeple, Q ve R matrislerinin belli bir denge içerisinde, en uygun şekilde tanımlanması gerekir.

R matrisinin, *Q* matrisinden büyük tanımlanması; sistemin, daha az güç gereksinimini azaltır ancak cevap süresinin uzanmasına neden olur. Tam tesri durumda ise, sistem daha hızlı cevap için daha yüksek güç gereksinimi duyar. Kullanıcı tanımlı q_i ve r_i katsayılarına bağlı olarak, J_e'yi minimize edecek $u(t) = Kx(t)$ bulunur. Burada, $K=R^{-1}B^TP$ olup, *P* ise Ricatti Eşitliğinin (Denklem (4.20)) çözümünden bulunan simetrik matristir. Sistemin *A, B* durum matrislerinin bilindiği ve *Q, R* ağırlık matrislerinin tanımlandığı takdirde, MATLAB programının '*lqr*' komutu ile *K* geri besleme kontrol kazanç matrisi hesaplatılabilir. LQR kontrolcü, cevabının arzu edilen değerlere ulaşınca kadar, *Q* ve *R* matrislerinin ayarlanmasına bağlı olarak performans indeksinin değiştirilmesine dayanan bir optimal kontrol tekniğidir. Dolasıyla, *Q* ve *R* matrislerinin deneme-yanılma yerine bir algoritma ile aranması daha hızlı ve etkili sonuçlar sunabilir.

Adım yörüngesine ait hata değerlerinin ortalamasını ifade eden, Denklem 4.21'deki amaç fonksiyonunu minimize edecek, Hibrit LQR-PID kontrolcü tasarımında, önerilen algoritmalar kullanılarak PID kontrolcü kazançları ve *Q, R* matrislerine ait elemanlar aranmıştır.

$$J = \overline{\left(\sqrt{|Xref - X|^2 + |Yref - Y|^2}\right)} \tag{4.21}$$

Burada; X_{ref} *ve* Y_{ref}, referans adım yörüngesinin koordinatlarıdır, *X* ve *Y* ise gerçekleşen yörüngeye ait koordinatlardır. Amaç fonksiyonu (*J*), adım hareketi boyunca yörünge izleme hatalarının ortalama değerini ifade etmektedir.

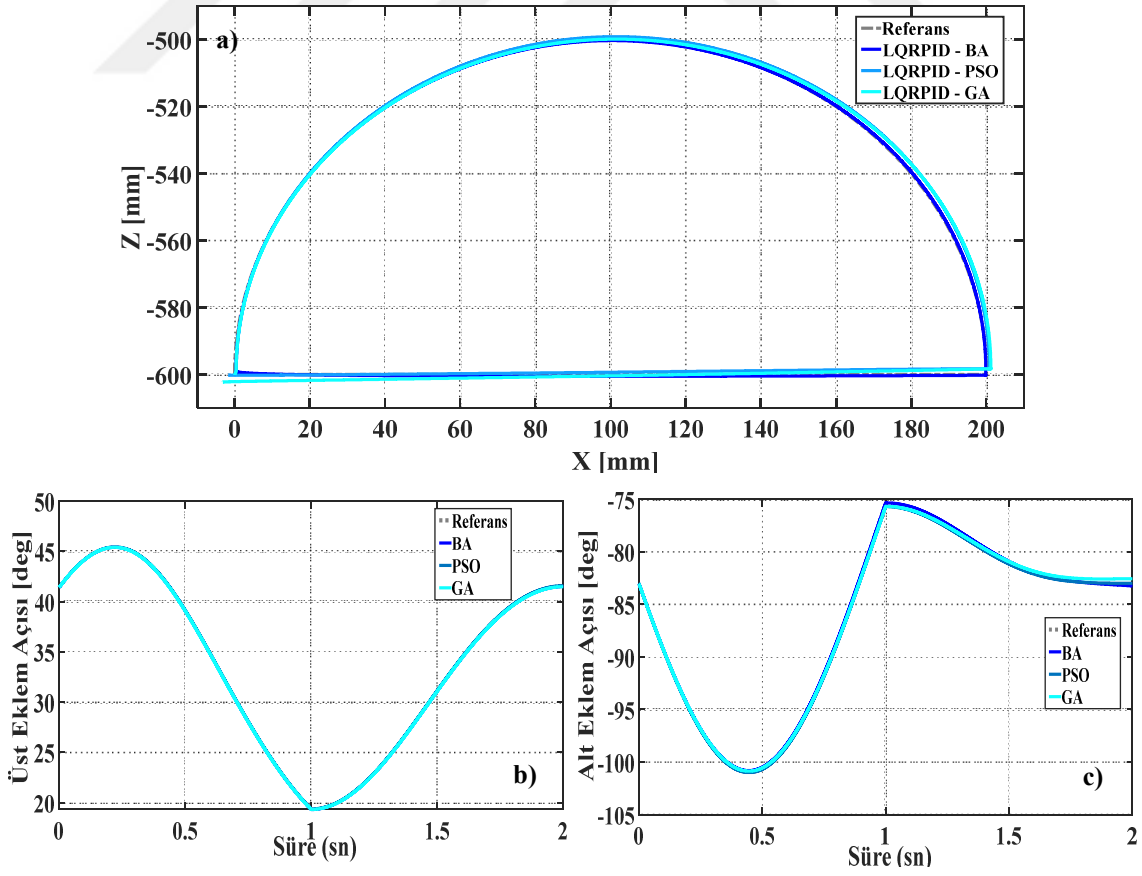
Bölüm 4.3'deki PID kontrolcü optimizasyonuna benzer şekilde optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Önerilen algoritmalar aynı özeliklere sahip bilgisayarda, sistemin Simulink kontrol modeli 50 iterasyon boyunca çalıştırılmıştır. Optimizasyon sonucu, BA, PSO ve GA tarafından sağlanan minimum amaç fonksiyon değerleri, bu değerlere karşılık gelen Hibrit LQR-PID kontrolcüye ait optimal kazanç değerleri ve toplam optimizasyon süreleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Elde edilen üç farklı Hibrit LQR-PID ile adım hareketi, ayrı ayrı simüle edilmiştir. Adım hareketinin toplam simülasyon süresi 2 saniye (uçuş ve destek evreleri 1'er saniye) olarak belirlenmiştir.

Optimal Hibrit LQR-PID kontrolcülerin, önerilen algoritmalara (BA, PSO, GA) göre yörünge izleme performansları analiz edilmiştir. Ayak ucunun yörünge takibine ait simülasyon sonuçları Şekil 4.12a'da, üst ve alt eklemlerin açısal konumlarına ait sonuçlar Şekil 4.12b ve Şekil 4.12c'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.4. Hibrit LQR-PID kontrolcüye ait kazançlar ve optimizasyon sonuçları

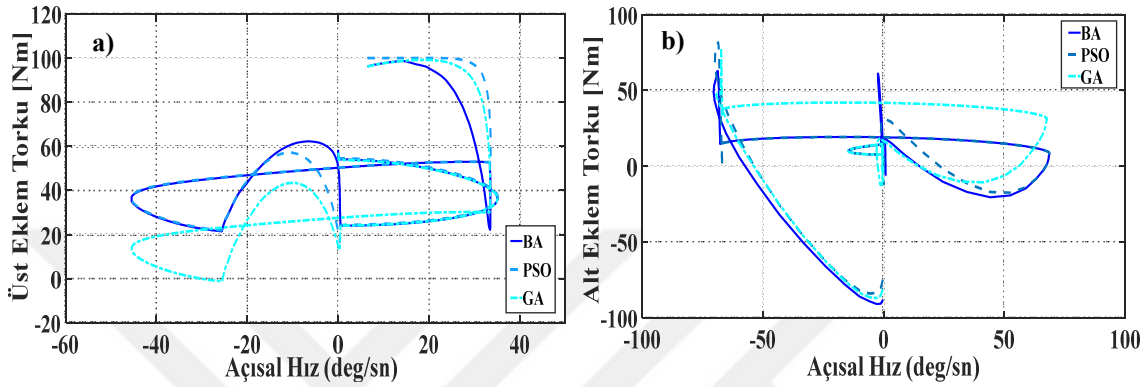
		BA	PSO	GA
LQR	**Q_1**	12.22	47.06	13.21
	Q_2	0.99	11.27	2.89
	Q_3	0.78	0.0006	0.17
	Q_4	45.74	22.83	4.63
	R_1	6.88	7.56	6.65
	R_2	14.56	23.05	6.85
	K	[1.30 0.67 0.06 0.50; -0.18 -0.10 0.22 1.73]	[2.47 1.43 0.001 0.22; -0.18 -0.12 0.005 0.98]	[1.40 0.87 -0.001 -0.01; 0.009 -0.02 0.15 0.82]
PID1	**k_p**	-1.51	5.15	1.48
	k_i	5.24	-15.72	3.99
	k_d	680.11	566.44	733.03
PID2	**k_p**	-66.90	-2.35	-12.53
	k_i	72.75	9.28	-10.13
	k_d	110.28	67.80	144.07
En iyi Sonuç (J_{min})		0.4624	1.2100	1.4563
Optimizasyon Süresi (sn)		1965.4	1314.5	1897.2

Arama Aralığı	**LQR**						**PID 1**			**PID 2**		
	Q_1	**Q_2**	**Q_3**	**Q_4**	**R_1**	**R_2**	**k_p**	**k_i**	**k_d**	**k_p**	**k_i**	**k_d**
Min.	0	0	0	0	0.001	0.001	-2	-35	-850	-75	-100	-150
Maks.	70	5	1	100	10	15	2	35	850	75	100	150

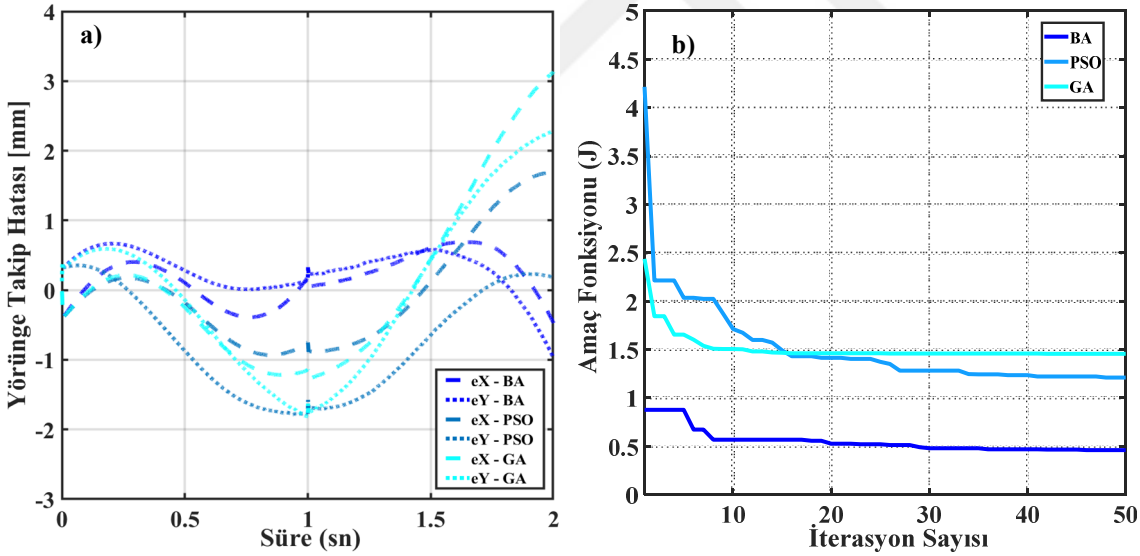


Şekil 4.12. Optimal LQR-PID kontrolde **a)** ayak ucu yörünge, **b)** üst ve **c)** alt eklem açısal konum grafikleri

Önerilen algoritmalara göre, alt ve üst eklemlere ait tork- açısal hız eğri grafikleri Şekil 4.13'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Sistemin doğrusal durum-uzay modeli kullanıldığı için dinamik modeli üzerinden yapılan benzetimlere göre daha sade tork-açısal hız eğrileri gerçekleşmiştir. Hibrit LQR-PID kontrolcülerin x ve z eksenlerindeki yörünge takip hataları Şekil 4.14a'da ve önerilen algoritmaların amaç fonksiyonunu indirgeme performansları Şekil 4.14b'de sunulmuştur.



Şekil 4.13. Optimal LQR-PID kontrolde **a)** üst ve **b)** alt eklemlere ait tork-açısal hız grafikleri



Şekil 4.14. Optimal LQR-PID kontrolde **a)** yörünge takip hatları ve **b)** yakınsamalar

Benzetim sonuçlarına göre; BA'nın, iterasyonun başında ve sonunda daha az hata ile Hibrit LQR-PID kontrolcü parametrelerinin ayarlanmasında, PSO algoritmasına ve GA'ya göre daha etkili ve hızlı sonuç verebildiği, daha etkin bir arama yapabildiği, amaç fonksiyonunun indirgenmesinde daha tatmin edici bir performans gösterebildiği sonuçlarına varılmıştır.

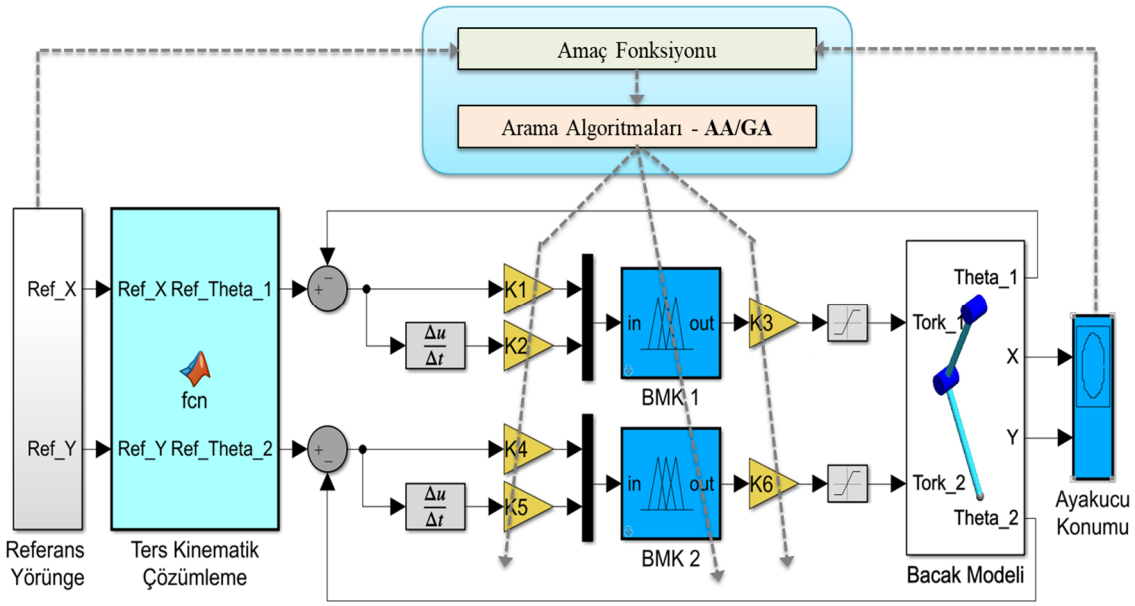
4.5. Bulanık Mantık Kontrolcü Tasarımı ve Optimizasyonu

Dört ayaklı robot bacağının adım hareketinin farklı bir yöntem ile kontrolüne yönelik, Bulanık Mantık Tabanlı Kontrolcü (BMK) tasarımı ve optimizasyonu sunulmuştur. Doğrusal olmayan, karmaşık yapısı ve çok sayıda parametreye sahip olması sebebiyle, tecrübeye dayalı deneme-yanılma yöntemleri ile optimal bir BMK tasarımı, PID ve LQR kontrolcü tasarımına kıyasla oldukça zorlu bir süreçtir. Bu sebeple, BMK kontrolcüye ait, üyelik fonksiyonları, ölçeklendirme kazançları ve kural tabanı dahil tüm parametrelerinin tamamını birlikte, sezgisel bir optimizasyon algoritması ile ayarlamak ve deneyime ihtiyaç duymadan optimal bir BMK tasarlanabilmesi amaçlanmıştır.

İnsanların, niteliksel düşünme yeteneklerini kontrolcü tasarımına yansıtabilmesine imkân verebilen BMK, özellikle doğrusal olmayan sistemlerin denetleyici tasarımları için önemli bir yaklaşım haline gelmiştir. Bulanık tabanlı kontrolde, kural tabanı ve üyelik fonksiyonları, kontrolcü performansını etkileyen en önemli tasarım unsurlarıdır. Başarılı bir BMK tasarlamak için, kural tabanı ve üyelik fonksiyonlarının iyi ayarlanması gerekir. Üyelik fonksiyonlarını ve bulanık çıkarım kurallarını belirlemede yaygın kullanılan geleneksel yöntemlerin performansı, tasarımcı deneyimi ile sınırlıdır. BMK'nın tasarlanması genelde zor ve zaman alıcı olabilir. Bazı sistemlerde ise, BMK tasarımı için gerekli uzmanlık elde edilemeyebilir. Bu durumda, kontrol performansı kaçınılmaz olarak düşük olmaktadır. Bu sebeple, tasarım süresini azaltmak ve kontrol performansını arttırmak için, tasarımcı deneyiminden bağımsız bir optimizasyon yöntemi kullanılarak BMK tasarlanması daha etkili sonuçlar sunabilir.

Bu amaçla araştırmacılar, yapay zekâ yöntemlerine ve optimizasyon algoritmalarına dayalı birçok teknik geliştirmişlerdir. Shimojima ve ark. (1995), Genetik Algoritma (GA) ile BMK üyelik fonksiyonlarının şekil ve sayılarını otomatik ayarlayan, minimum sayıda üyelik fonksiyonu ve kural gereksinimi amaçlayan bir yöntem önermişlerdir. Liu ve Yang (2000), Tavlama (Annealing) Algoritması tabanlı bulanık üyelik fonksiyonları için bir öğrenme ve ayarlama yöntemi sunmuşlardır. El-Zonkoly ve ark. (2009), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile bir güç sistemi stabilizatörünün bulanık mantık tabanlı denetiminin optimal ayarlanmasını araştırmışlardır. Juang ve ark. (2014), bulanık sistemlerin tasarımı için kural tabanlı bir Kolektif Sürekli Karınca Kolonisi Optimizasyon Algoritması (CCACO) sunmuşlardır. Önerilen algoritma, bulanık sistemin tüm parametrelerini optimize etmek için kullanılmış ve diğer popülasyon tabanlı optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Bacaklı ve mobil robotların kontrolüne yönelik bulanık mantık tabanlı denetleyici yaklaşımları mevcuttur (Chen ve ark., 2002; Bakırcıoğlu ve ark., 2016a). Bu alt başlıkta, adım hareketinin yörünge kontrolüne yönelik üst ve alt eklemlerin denetimi için, ön tasarımı yapılmış iki BMK'nın tüm parametreleri, Arı Algoritması (AA) ve Genetik Algoritma (GA) ile optimize edilmiştir. Sistemin optimal kontrolcü tasarımına alternatif bir yaklaşım sunmak amacıyla tercih edilen ve sürü zekâsı metodolojisine dayalı AA'nın, adım yörünge takip hatasını indirgemedeki performansı, klasik GA'nın performansı ile karşılaştırılarak incelenmiştir. BMK sisteminin MATLAB/Simulink ortamındaki genel yapısı ve optimizasyon şeması Şekil 4.15'te verilmiştir.

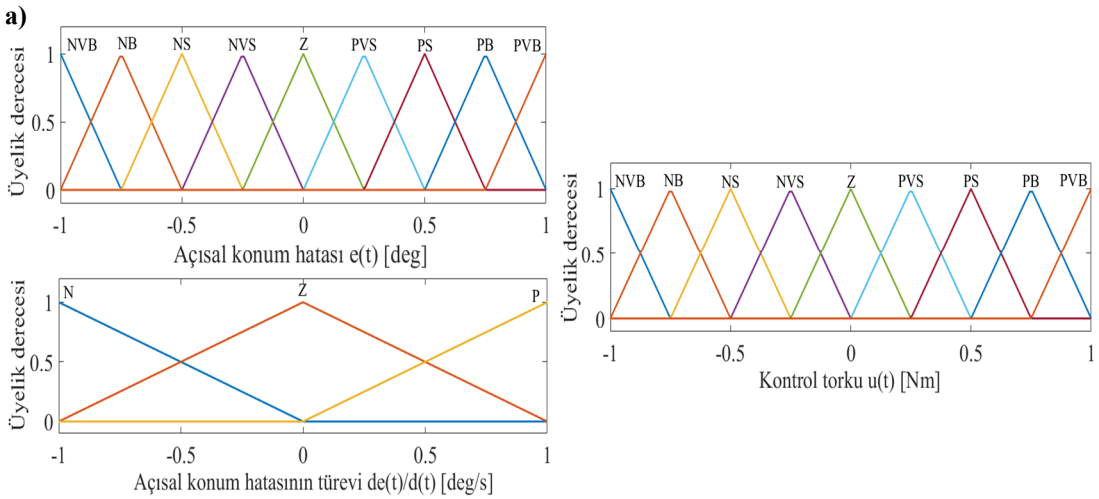


Şekil 4.15. Ayak ucu yörüngesinin BMK yapısı ve optimizasyon şeması

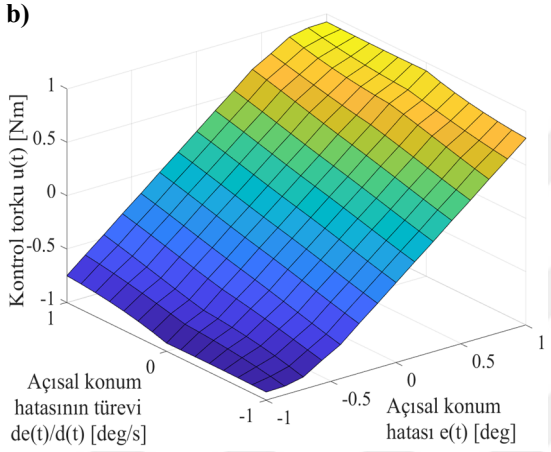
Ayak ucunun bulanık mantık tabanlı yörünge kontrolünde, uyluk ve baldır eklemleri için sırasıyla BMK1 ve BMK2'nin ön tasarımı yapılmıştır. Kontrolcüler, iki giriş ve bir çıkış değişkeni şeklinde tasarlanmıştır. Girişler, konum hatası (*e(t)*) ve türevi (*de(t)/d(t)*), çıkış ise kontrol torku (*u(t)*)'dur. Optimizasyon öncesi, BMK ön tasarıma ait üyelik fonksiyonları Şekil 4.16a'da, kontrol yüzey grafiği Şekil 4.16b'de ve kural tabanı Şekil 4.16c'de sunuluştur.

Her bir giriş/çıkış için minimum üyelik fonksiyonu sayısı üç olmalıdır. Bu nedenle, pozisyon hatasının türevleri (*de(t)/d(t)*) için üç üçgen üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır. Ancak, çözünürlüğü arttırmak amacıyla, konum hatası (*e(t)*) için ise dokuz üçgen üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır.

a)



b)



c) BMK1 ve BMK2 Ön Tasarım Kural Tabanı

	Açısal konum hatasının türevi, de(t)/d(t)		
Açısal konum hatası, e(t)	*N*	*Z*	*P*
NVB	NVB	NVB	NB
NB	NVB	NB	NS
NS	NB	NS	NVS
NVS	NS	NVS	Z
Z	NVS	Z	PVS
PVS	Z	PVS	PS
PS	PVS	PS	PB
PB	PS	PB	PVB
PVB	PB	PVB	PVB

Şekil 4.16. BMK ön tasarıma ait **a)** üyelik fonksiyonları, **b)** kontrol yüzey grafiği ve **c)** kural tabanı

Üyelik fonksiyonları, Şekil 4.16a'da görüldüğü üzere [-1,1] aralığında tanımlanmıştır. Ayrıca, BMK'ların kontrol karakteristiklerini, kontrol edilen sistemin dinamik özelliklerine daha uyumlu hale getirebilmek için, girişlerden önce ve çıkışlardan sonra ölçekleme kazançları (*K1 … K6*) kullanılmıştır. *K1, K4 ve K2, K5* pozisyon hatasını ve pozisyon hata değerlerinin türevini normalleştirir. *K3 ve K6* ise kontrol çıkış sinyalini ölçeklendirir. *e(t)* konum hatası, kontrolcüye doğrudan bir giriştir. Hatanın değişim hızını kontrol edebilmek için, *de(t)/d(t)* konum hatalarının türevleri doğrudan giriş olarak kullanılır. Kontrolcünün *u(t)* çıkışı, *u(t) = f(e(t), de(t)/d (t))* olarak tanımlanır. Çıkarım birimi, pozisyon hatası ve pozisyon hatasının türevine bağlı bir dizi kuraldan oluşur. Önerilen BMK'ların tasarımında Mamdani yöntemi kullanılmıştır. Kural tabanı Şekil 4.16c'deki tabloda verilen 27 adet *(IF… THEN)* bulanık kuraldan oluşur. Aşağıda iki adet örnek kural verilmiştir:

IF e(t)=NVB and de(t)/d(t)=N THEN u(t)=NVB
IF e(t)= NVB and de(t)/d(t)=Z THEN u(t)= NVB
…

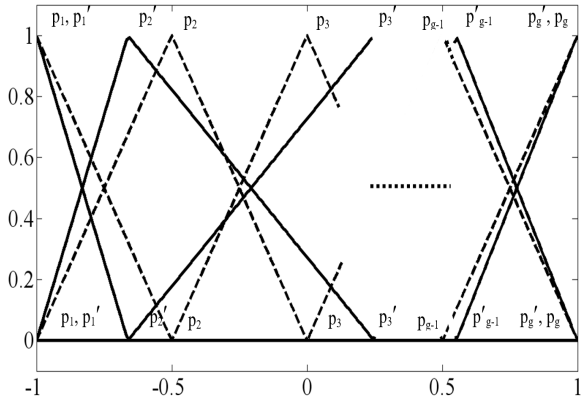
Kural tabanındaki; NB, PS, PVB vb. gibi terimler, girdi ve çıktı değişkenlerinin dilsel değerleridir. Pozisyon hatasının türevinde *e(t)/d(t)* üç dilsel terim vardır: *negatif−N, sıfır−Z, pozitif−P. e(t)* konum hatasında ve *u(t)* çıkışta dokuz dilsel değer vardır: *negatif çok büyük−NVB, negatif büyük−NB, negatif küçük−NS, negatif çok küçük−NVS, sıfır−ZO, pozitif çok küçük−PVS, pozitif küçük−PS, pozitif büyük−PB, pozitif çok büyük−PVB.* Kural tabanının ön tasarımı, sistemin davranışının sezgisel bilgisi kullanılarak inşa edilmiştir. Şekil 4.16b'deki BMK'ların ön tasarımına ait yüzey grafiği, ölçeklenmiş konum hatasına ve konum hatasının türevine göre değişen kontrol sinyalini (çıkışını) belirtir.

Her üyelik fonksiyonu belli sayıda değişkenle parametrik olarak ifade edilebilir ve böylece üyelik fonksiyonunun optimizasyonu, bir parametre optimizasyonu problemine dönüştürülebilir. Önerilen BMK optimizasyonu yönteminde, üçgen üyelik fonksiyonlarının ve kural tabanının ayarlanmasına ait görseller Şekil 4.17'de sunulmuştur. Şekil 4.17a, kontrol kurallarının bulanık değişkenlerini tanımlayan üyelik fonksiyonları ile ilgili parametreleri $(p_1, p_2, ..., p_{g-1}, p_g)$ göstermektedir. BMK'nın birinci girişi ve çıkışı için, $g=9$'a eşittir. p_1 *ve* p_9 noktalarına ait değerler sabit tanımlanmıştır. Optimizasyonda, bir önceki parametreler $p_2,...,p_8$, sırasıyla yeni parametreler $p_2',...,p_8'$ ile değiştirilir. BMK'nın ikinci girişleri için, $g=3$'e eşittir. p_1 *ve* p_3 noktalarına ait değerler sabit tanımlanmıştır. Optimizasyonda, bir önceki parametre p_2, yeni parametre p_2' ile değiştirilir. Şekil 4.17a'da, kesikli çizgiler optimizasyondan önceki üyelik fonksiyonlarını ve sabit çizgiler ise optimal üyelik fonksiyonlarını temsil eder.

Şekil 4.17b'deki tablodaki *Rij* ifadeleri, sırasıyla dokuz dilsel değeri *NVB, NB, NS, NVS, Z, PVS, PS, PB ve PVB*'yi temsil eden 1 ile 9 arasındaki herhangi bir doğal sayıdır. Örneğin; optimizasyon sırasında, açısal konum hatasına ait bir dilsel ifade için elde edilen değer 5.5 ile 6.5 arasında bir sayı ise, değer 6'ya dönüşür ve bu *PVS* dilsel değerini temsil eder. Açısal konum hatasının türevine ait bir dilsel ifade için elde edilen değer 1.5 ile 2.5 arasında bir sayı ise, değer 2'ye dönüşür ve bu *Z* dilsel değerini temsil eder. Benzer şekilde, kontrolcü çıkışına ait bir dilsel ifade için elde edilen değer 6.5 ile 7.5 arasında ise 7'ye dönüşür ve bu *PS* dilsel değerini temsil eder. Böylece, *IF e(t)=PVS and de(t)/d(t)=Z THEN u(t)=PS* şeklinde bir kural tanımlanmış olur.

Her bir BMK için; birinci girişin ve çıkışın üyelik fonksiyonları için 7+7, ikinci girişin üyelik fonksiyonu için 1, ölçeklendirme kazançları için 3 ve kural tabanı için 27 tasarım değeri olmak üzere, toplamda 47 tasarım değeri parametrik olarak ifade edilmiş ve optimizasyon için ön tasarım gerçekleştirilmiştir.

a)



b) BMK Kural Tabanı Parametreleri

	Açısal konum hatasının türevi, de(t)/d(t)		
Açısal konum hatası, e(t)	$N \rightarrow 1$	$Z \rightarrow 2$	$P \rightarrow 3$
$NVB \rightarrow 1$	R_{11}	R_{12}	R_{13}
$NB \rightarrow 2$	R_{21}	R_{22}	R_{23}
$NS \rightarrow 3$	R_{31}	R_{32}	R_{33}
$NVS \rightarrow 4$	R_{41}	R_{42}	R_{43}
$Z \rightarrow 5$	R_{51}	R_{52}	R_{53}
$PVS \rightarrow 6$	R_{61}	R_{62}	R_{63}
$PS \rightarrow 7$	R_{71}	R_{72}	R_{73}
$PB \rightarrow 8$	R_{81}	R_{82}	R_{83}
$PVB \rightarrow 9$	R_{91}	R_{92}	R_{93}

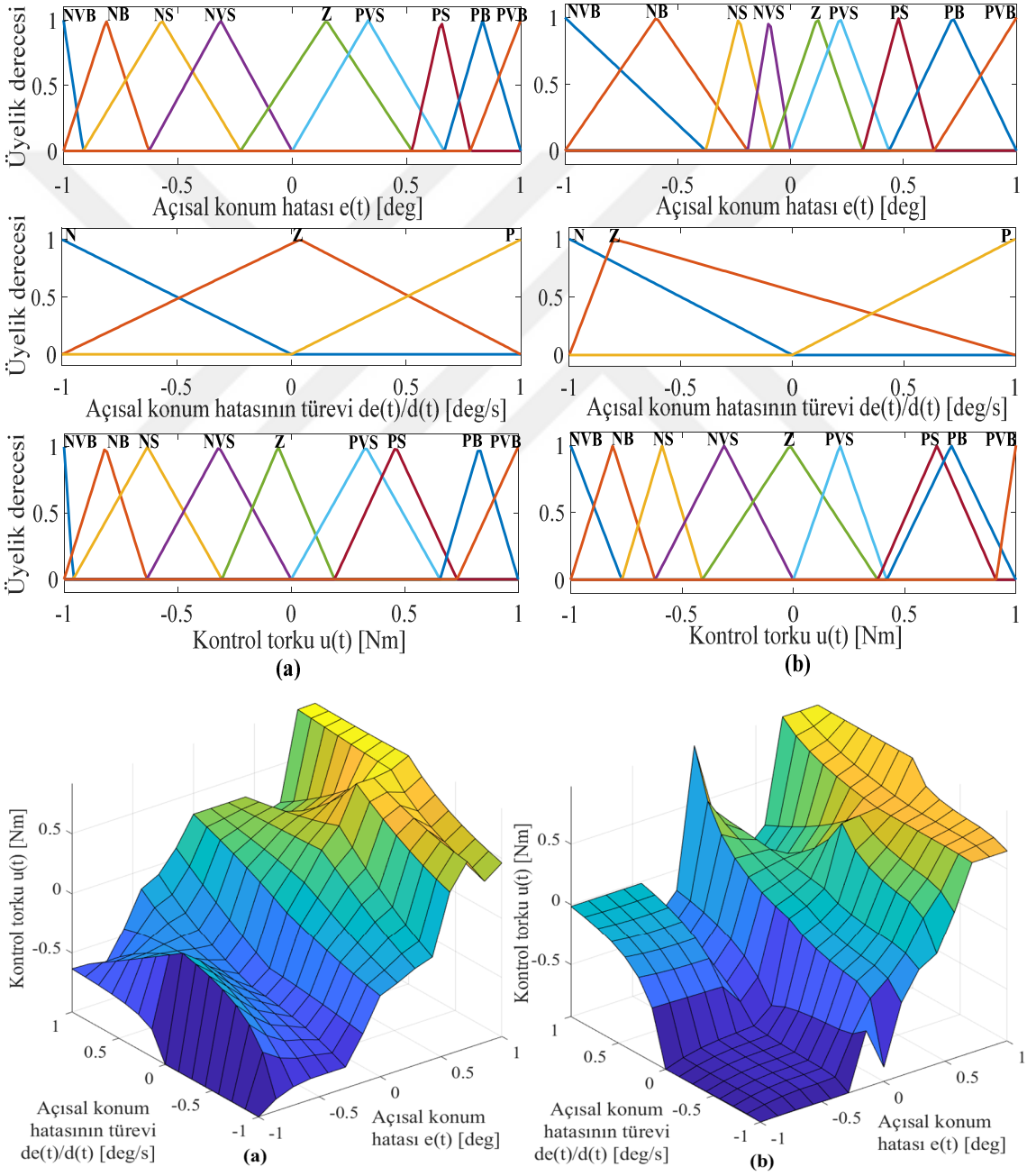
Şekil 4.17. BMK **a)** üçgen üyelik fonksiyonları ve **b)** kural tabanının ayarlanması

BMK optimizasyonu, Bölüm 4.3 ve 4.4'te önerilen kontrolcülerin optimizasyon süreçlerine benzer şekilde gerçekleştirilmiştir. AA algoritması kullanılarak, adım yörünge izleme hata değerlerinin ortalamasını ifade eden bir amaç fonksiyonunu (Denklem (4.21)) en aza indirgemek ve en iyi kontrol performansı elde etmek için, BMK'ya ait ölçeklendirme kazançları, üyelik fonksiyonları ve kural tabanı dahil tüm parametrelerinin optimal değerleri araştırılmıştır. Pham ve Kalyoncu (2009) tarafından sunulan, elastik bir robot kolun kontrolüne yönelik, AA ile BMK optimizasyonu çalışması temel alınmıştır. Ayrıca yaygın kullanılan GA ile de aynı şekilde BMK optimizasyonu gerçekleştirilerek, AA'nın performansı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Uygun bir karşılaştırma olabilmesi için; GA ve AA parametreleri (Çizelge 4.5), birbiri ile aynı veya yakın seçilmiştir. Sistemin Simulink genel kontrol blok şeması üzerinde, önerilen iki sezgisel algoritma ayrı ayrı çalıştırılarak, 40 iterasyon boyunca optimal BMK parametreleri aranmıştır. Adım hareketinin toplam simülasyon süresi 2 saniye olarak belirlenmiştir.

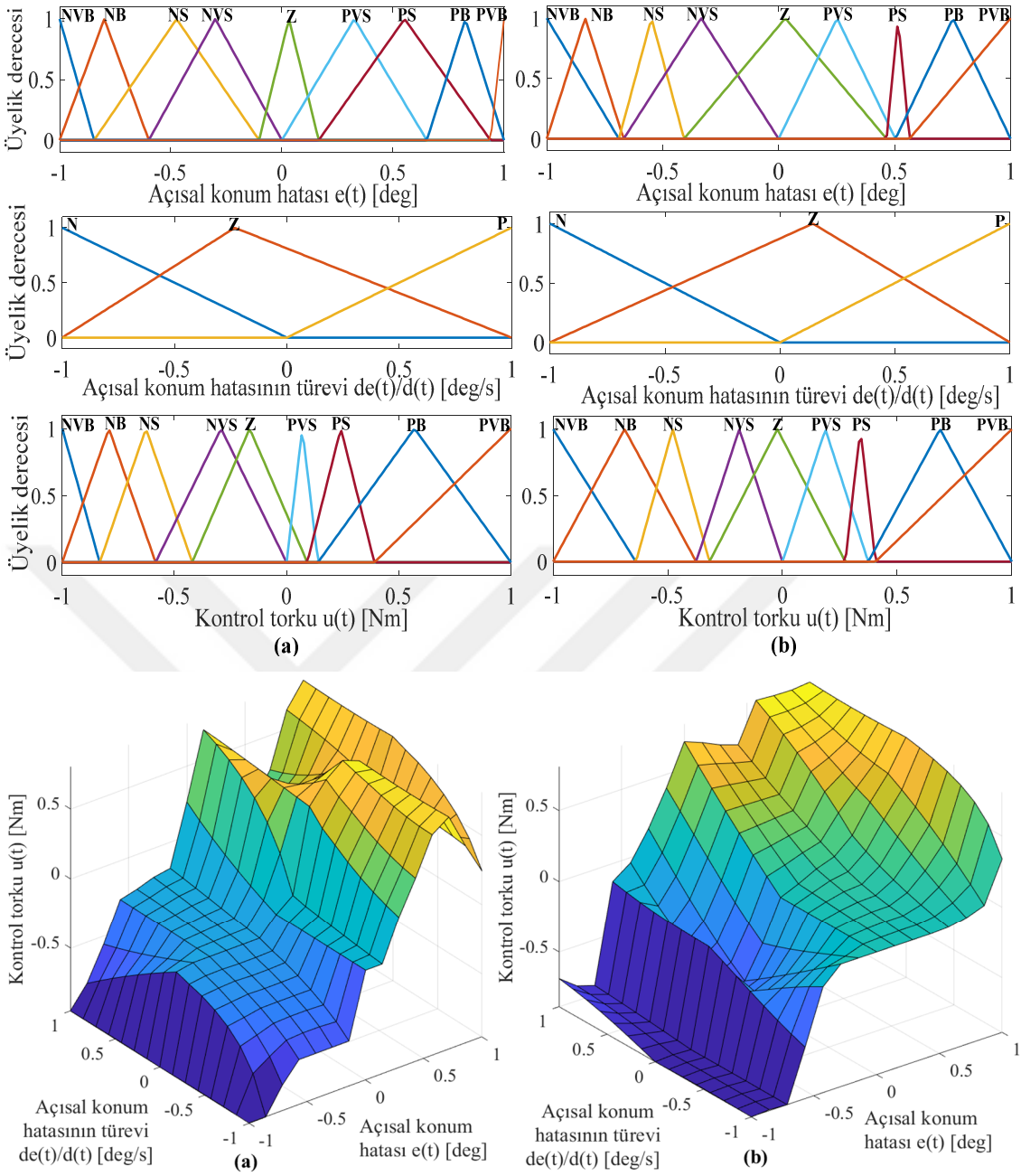
Çizelge 4.5. BMK optimizasyonu için kullanılan algoritmalara ait parametreler

AA	Kâşif arı sayısı (n)	20
	Ziyaret edilen 'n' nokta içinden seçilen bölge sayısı (m)	10
	Seçilen 'm' bölge içindeki en iyi bölge sayısı (elit bölge) (e)	5
	En iyi 'e' bölgeye gönderilen arı sayısı (nep)	8
	Kalan (m-e) bölgeye gönderilen arı sayısı (nsp)	6
	Komşuluk araması boyutu (ngh)	0.001
	Durdurma kriteri (iterasyon sayısı) (itr)	20
GA	Popülasyon Büyüklüğü	20
	Kuşak Sayısı	5
	Elit Sayısı	20
	Çaprazlama Oranı	0.7

AA ve GA optimizasyonu sonrası, amaç fonksiyonunu en aza indirgeyen BMK parametre değerleri elde edilmiştir. Bu değerlere sahip optimal BMK1 ve BMK2'nin üyelik fonksiyonları ve yüzey grafikleri Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de önerilen algoritmalara göre karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Benzer şekilde, optimal bulanık kuralları içeren kural tabanları Çizelge 4.7'de belirtilmiştir. Ayrıca, BMK giriş ve çıkış ölçeklendirme kazançlarının optimizasyon aralıkları, optimal değerleri ve önerilen algoritmaların performans değerleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.18. Optimal BMK1 üyelik fonksiyonları ve yüzey grafikleri, **a)** AA ve **b)** GA



Şekil 4.19. Optimal BMK2 üyelik fonksiyonları ve yüzey grafikleri, **a)** AA ve **b)** GA

Çizelge 4.6. BMK1 ve BMK2 ön tasarım ve optimal ölçeklendirme kazançları

		BMK1			BMK2		
		K1	**K2**	**K3**	**K4**	**K5**	**K6**
Arama Aralığı		0 – 0.1	0 – 0.01	0 – 1000	0 – 0.1	0 – 0.01	0 – 1000
AA	*Ön Tasarım*	0.01	0.001	100	0.01	0.001	100
	Optimal	0.0156	0.0038	176.7	0.1	0.0023	101.9
GA	*Ön Tasarım*	0.01	0.001	100	0.01	0.001	100
	Optimal	0.0137	0.0044	705.6	0.0662	0.0087	767.1

	AA	**GA**
En iyi Sonuç (J_{min})	1.4881	2.3870
Optimizasyon Süresi (sn)	94637	27605

Çizelge 4.7. Optimal BMK1 ve BMK2 kural tabanları

BMK1

AA

Açısal Konum Hatası, e(t)	Açısal Konum Hatasının Türevi, de(t)/d(t)		
	N	Z	P
NVB	NVB	NVB	NS
NB	NVB	Z	NS
NS	NB	NVS	NVB
NVS	NB	NS	Z
Z	NVS	Z	PVS
PVS	Z	PB	PVS
PS	PB	PB	Z
PB	PVS	PB	PVB
PVB	PS	PVB	PVB

GA

Açısal Konum Hatası, e(t)	Açısal Konum Hatasının Türevi, de(t)/d(t)		
	N	Z	P
NVB	NVB	NVB	Z
NB	NVB	NB	Z
NS	NVB	NB	NS
NVS	NVS	NS	Z
Z	NB	Z	PVB
PVS	Z	PVS	PVS
PS	Z	PS	Z
PB	PS	PS	PVB
PVB	PS	PVB	PVB

BMK2

AA

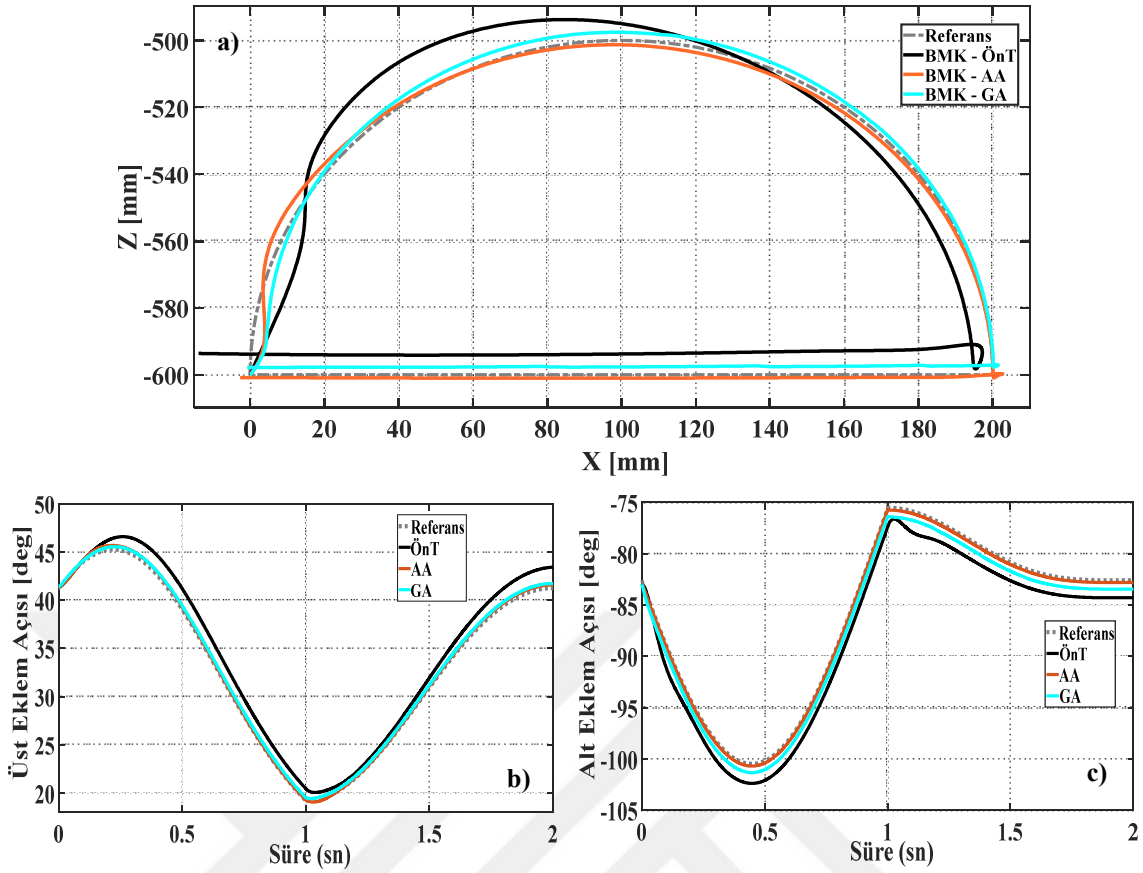
Açısal Konum Hatası, e(t)	Açısal Konum Hatasının Türevi, de(t)/d(t)		
	N	Z	P
NVB	NVB	NVB	NVB
NB	NVB	NVS	NB
NS	NS	NVS	NVS
NVS	NS	NVS	Z
Z	Z	Z	PS
PVS	Z	PVS	PVB
PS	PVB	PVB	Z
PB	PVS	PVS	PVB
PVB	PS	PVB	PVB

GA

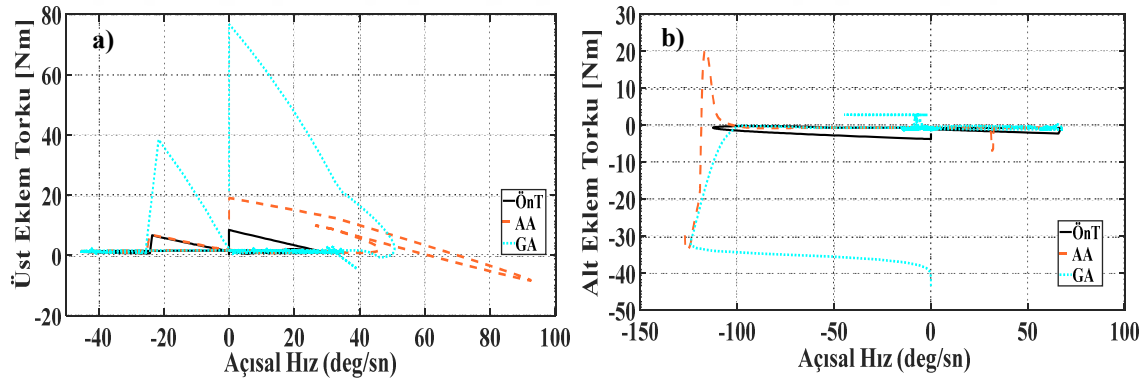
Açısal Konum Hatası, e(t)	Açısal Konum Hatasının Türevi, de(t)/d(t)		
	N	Z	P
NVB	NVB	NVB	NB
NB	NVB	NVB	NVB
NS	NB	Z	NVS
NVS	Z	NB	Z
Z	NVS	Z	PVS
PVS	Z	Z	PB
PS	PS	Z	PVS
PB	Z	PVS	PVB
PVB	PS	PVB	PVB

Önerilen algoritmalar (AA ve GA) ile elde edilen optimal BMK'ların ve optimizasyon öncesindeki Ön Tasarım (ÖnT) kontrolcünün, adım yörüngesi izleme performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Gerçekleşen ayak ucu yörüngelerine ait sonuçlar Şekil 4.20a'da, üst ve alt eklemlerin açısal konumlarına ait sonuçlar Şekil 4.20b ve Şekil 4.20c'de sunulmuştur.

Önerilen algoritmalar için karşılaştırmalı olarak, alt ve üst eklemlere ait tork- açısal hız grafikleri Şekil 4.21'de verilmiştir. Bulanık mantık kontrol tekniğinin doğrusal olmayan sistemler için daha uyumlu olması, esnek ve yumuşak çözümler sunma avantajları sebebiyle daha düşük kazançlar ve tork değerleri ile adım yörünge kontrolü sağlamıştır. Optimal BMK'ların x ve z eksenlerindeki ayak ucu yörünge takip hataları Şekil 4.22a'da ve önerilen algoritmaların amaç fonksiyonunu indirgeme performansları ise Şekil 4.22b'de sunulmuştur.

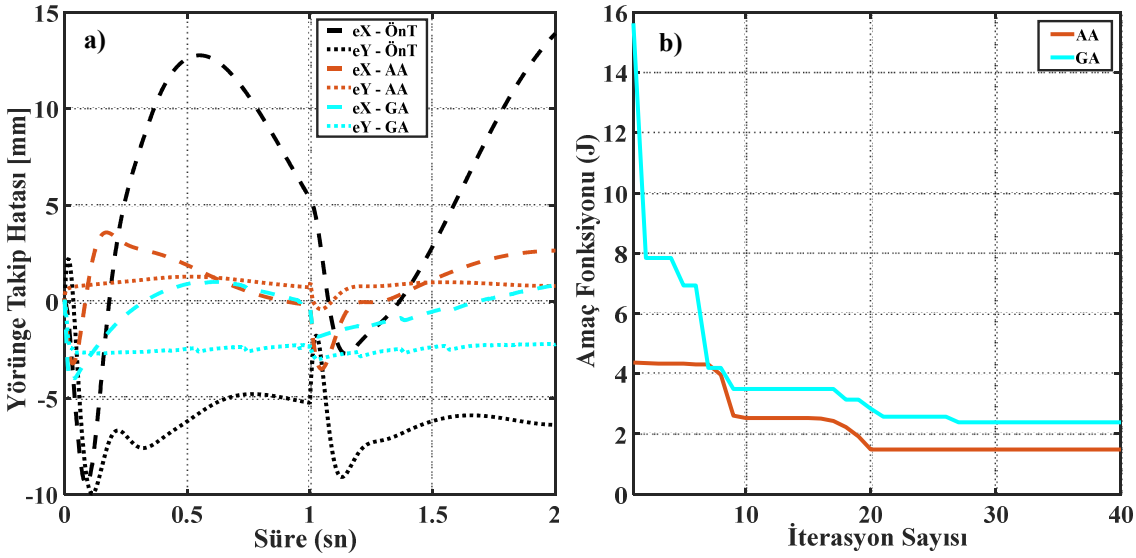


Şekil 4.20. BMK **a)** ayak ucu yörünge, **b)** üst ve **c)** alt eklem açısal konum grafikleri



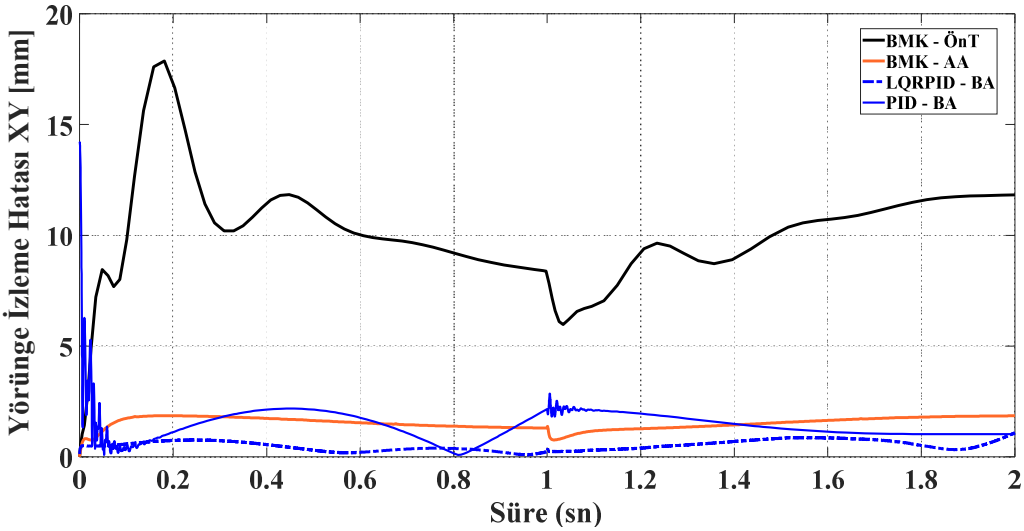
Şekil 4.21. BMK **a)** üst ekleme ve **b)** alt ekleme ait tork-açısal hız grafikleri

Benzetim sonuçlarına göre; AA'nın, GA'ya kıyasla, ilk iterasyonda daha az bir hata değeri sağladığı ve daha hızlı bir şekilde daha düşük değerlere kadar indirgeyebildiği görülmüştür. BMK parametrelerinin ayarlanmasında AA; GA'dan daha etkili arama ile daha hızlı yakınsayan bir sonuç verebildiği, yörünge hatalarının en aza indirgenmesinde daha tatmin edici olduğu sonuçlarına varılmıştır. Ayrıca her iki algoritma ile ayarlanan BMK'ların, optimize edilmemiş ön tasarım BMK'ya kıyasla daha başarılı bir kontrol performansı sağlayabildiği anlaşılmıştır.



Şekil 4.22. BMK optimizasyonunda **a)** yörünge takip hatları ve **b)** yakınsamalar

Bacağın adım yörünge kontrolü için Bölüm 4.3, 4.4. ve 4.5'te tasarlanan ve en yüksek performansı gösteren optimal kontrolcülerin ayak ucunun adım yörünge takibindeki düzlemsel hata değişimleri Şekil 4.23'te birlikte, kıyaslamalı olarak sunulmuştur. Şekilden anlaşılacağı üzere, Bozkurt Algoritması ile optimize edilen PID (PID−BA) ve Hibrit LQR-PID (LQRPID−BA) kontrolcüleri ile Arı Algoritması optimize edilen BMK (BMK−AA)'nın, 5 mm'den daha az hata ile yörünge kontrolünü gerçekleştirebildikleri, ön tasarım BMK'ya (BMK−ÖnT) kıyasla daha başarılı sonuçlar sunabildiği görülmüştür. Tezin sonuç bölümünde optimal adım yörünge kontrolcü çalışmalarına ait değerlendirmelere yer verilmiştir.



Şekil 4.23. Optimal BMK, LQR-PID ve PID kontrolcülerin adım yörünge takip performansları

4.6. Engelli Yörüngede PID Tabanlı Empedans Kontrolcü Tasarımı

4AR'ın engebeli yüzeylerde yürüyüş çalışmalarına temel teşkil etmesi amacıyla; bacağının engel tanımlanmış bir yörüngede adım hareketinin kontrolüne yönelik, PID tabanlı Empedans (PID-Emp) kontrolcü tasarımı ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. MATLAB/Simspace'de oluşturulan dinamik bacak modeli üzerinden, ayak ucuna engelden gelen tepki kuvvetlere göre referans yörüngeyi tekrar düzenleyerek, engelin aşılmasını amaçlayan bir empedans kontrol tekniği tasarlanmıştır. Bölüm 4.3'te detaylı izah edildiği üzere, sistemin eklemlerine ait referans açısal konumları ters kinematik çözümlemeler ile elde edilmiştir ve denetimi PID kontrolcü ile sağlanmıştır. PID-Emp kontrolcü yapısı MATLAB/Simulink programında tasarlanmış, empedans katsayıları ve PID kontrolcü kazançları deneme-yanılma yöntemleri ve otomatik ayarlama seçenekleri kullanılarak ayarlanmıştır.

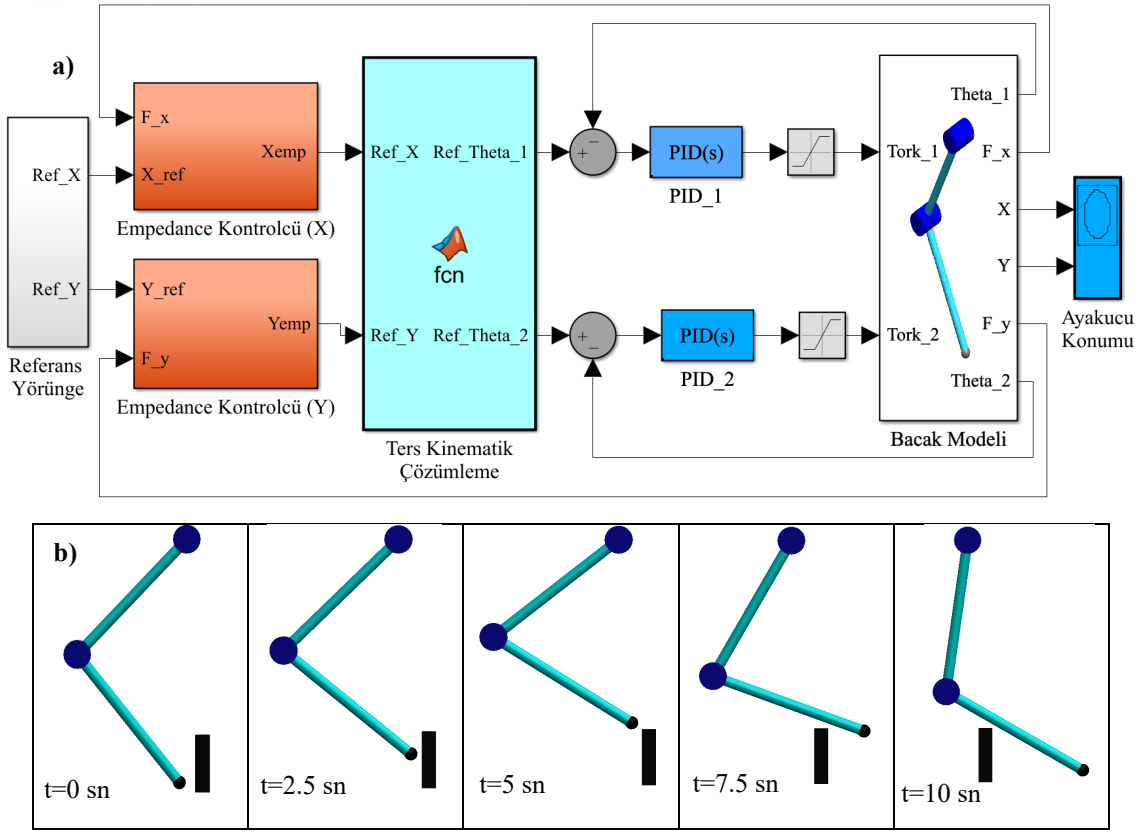
Hogan tarafında geliştirilen empedans kontrol tekniği, genel olarak kuvvet ile konum arasındaki etkileşimi düzenleyen bir kontrol yaklaşımı olarak ifade edilebilir. Empedans kontrol problemi, robot uç işlevcisine etki eden kontak (temas) kuvvetlerinin empedans kuralına göre, uç işlevcinin referans konumuyla gerçek konumu arasındaki bir fark ortaya çıkaracak biçimde bir kontrol tekniği tasarımının gerekliliği olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir ifadeyle empedans kontrol, robotun temasa geçtiği çevrenin uygun şekilde modellenmesini sağlayan ve dış kuvvetlere karşı davranışının denetimini amaçlayan bir kontrol yaklaşımıdır. Doğrudan robotla temas halindeki cisim ile arasında oluşan etki-tepki kuvvetlerini kontrol etmek yerine, empedans kontrolcü konum ile harici kuvvetler arasında bir bağıntı tanımlar ve robotun harici kuvvetlere karşı hareketini düzenler (Hogan, 1985b; Hogan, 1985a). İkinci dereceden bir kütle-yay-damper sistemiyle ifade edilen mekanik empedansın matematiksel modeli, adım yörüngesinin x ve y doğrultuları için Denklem (4.22) ve Denklem (4. 23)'te verilmiştir.

$$F_x = M(\ddot{x} - \ddot{x}_r) + B(\dot{x} - \dot{x}_r) + K(x - x_r) \tag{4.22}$$

$$F_y = M(\ddot{y} - \ddot{y}_r) + B(\dot{y} - \dot{y}_r) + K(y - y_r) \tag{4.23}$$

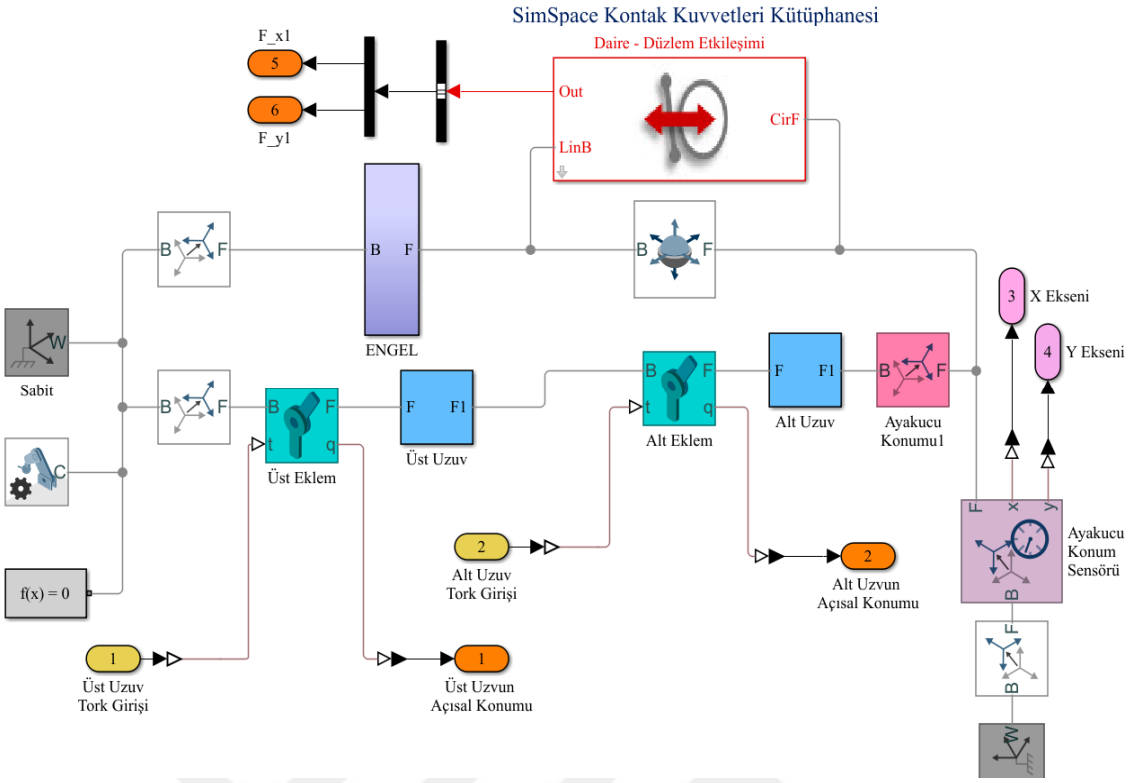
Burada; x_r, y_r referans ve x, y ise gerçekleşen konumlardır. Sabit *M, B, K* kazançları ise sırasıyla; atalet, sönüm ve sertlik değerleridir. Ayak ucu bir engelle etkileşime girdiğinde bu değerlere göre harici kuvvetler oluşmaktadır.

Ayak ucunun engel tanımlanmış bir yörüngede adım hareketinin ve eklemlerin açısal konum kontrolünün birlikte düzenlendği PID-Emp kontrolcüye ait MATLAB/Simulink'de tasarlanan genel kontrol şeması Şekil 4.24a'da tanıtılmıştır. Kontrol sistemine engel ile igli bir ön tanımlama yapılmamıştır. İlk başta bacağın engel olmayan, standat bir adım hareketini için gerekli eklem açısal konumları, kinematik bağıntılar ile hesaplatılıp, referans giriş olarak verilmektedir. Sonrasında bu referans adım yörüngesi, adım hareketi boyunca empedans kontrolcü tarafından ayak ucundan gelen tepki kuvvetine uygun olarak güncellenmekte, referans açısal konumlar tekar hesaplatılmakta ve PID kontrolcü eklemlerin tork girişini denetlemektedir. Şekil 4.24b'de, bacağın engelli yörüngedeki adım hareketine ait görseller verilmiştir.

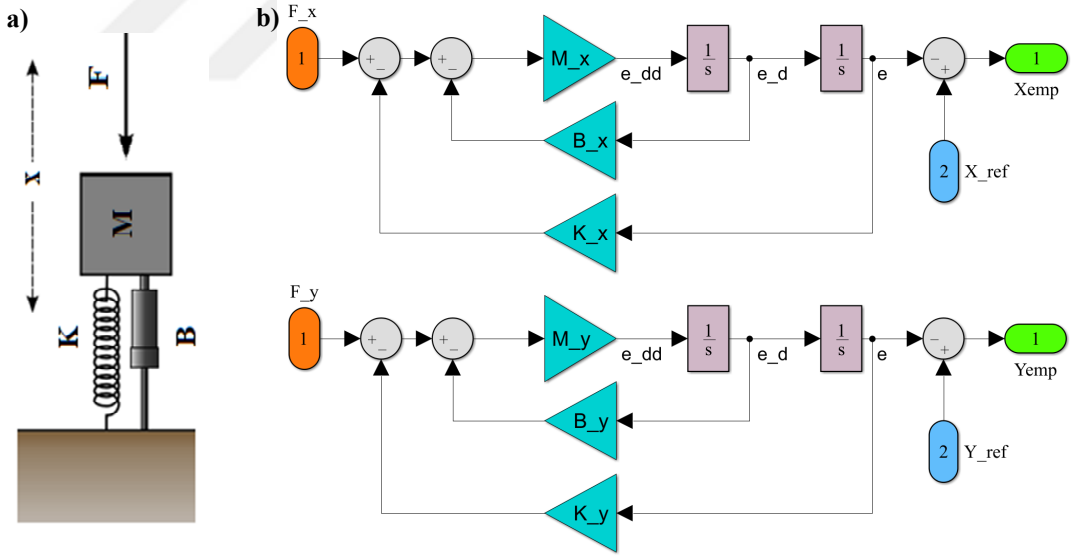


Şekil 4.24. a) PID-Emp kontrolcü ait genel şema ve **b)** engelli adım hareketine ait görseller

Ayak ucunun engel ile etkileşiminde oluşan kontak kuvvetlerini de içeren bacağın SimSpace modeli Şekil 4.25'te verilmiştir. Ayak ucu tepki kuvvetlerini hesaplatmak için kontak kuvvetleri kütüphanesi (*Contact_Forces_Lib*) kullanılmıştır. Engelin yüksekliği 130 mm, genişliği ise 50 mm; ayak ucucun kontak sertlik değeri K_{kontak}=5.10^5 N/m, sönüm değeri B_{kontak}=100 Ns/m olarak belirlenmiştir. Statik ve kinematik sürtünme katsayıları 0.5, sürtünme yöntemi ise tutma-bırakma (stick-slip) olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.25. Kontak kuvvetlerini de kapsayan bacağın Simscape modeli



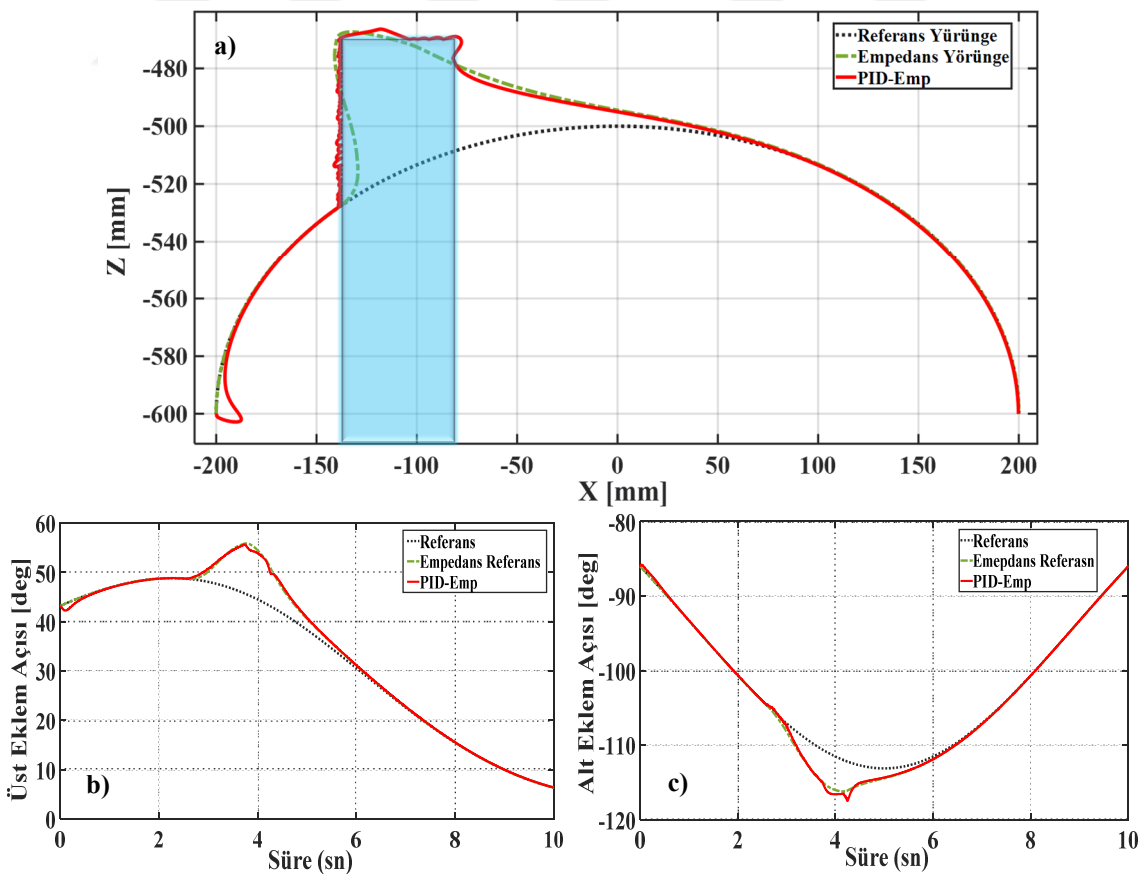
Şekil 4.26. Empedans kontrolcünün **a)** şematik görseli ve b) Simulink blok şemaları

Çizelge 4.8. PID-Em kontrolcüye ait kazançlar ve katsayılar

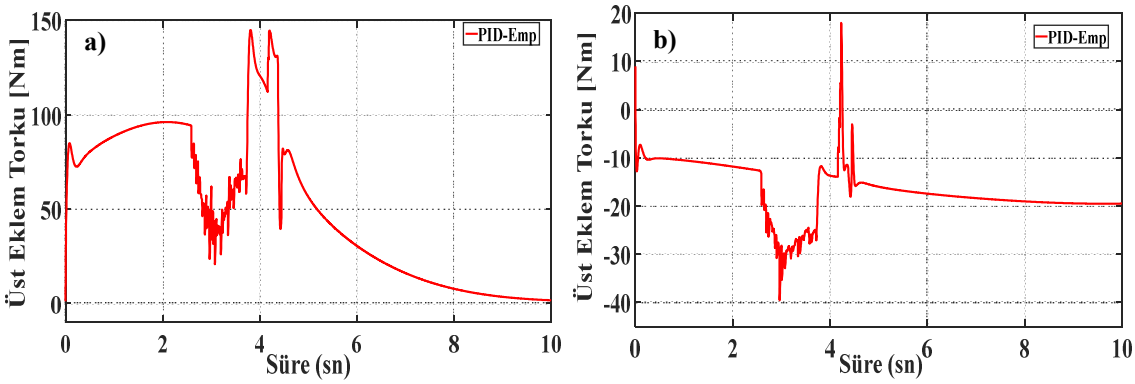
Empedans Katsayıları			**PID 1**				**PID 2**			
M_x, M_y	B_x, B_y	K_x, K_y	k_{p1}	k_{i1}	k_{d1}	N_1	k_{p2}	k_{i2}	k_{d2}	N_2
50	0.1	0.1	148.6	593.4	9.1	464.9	-34.7	-113.3	-2.6	389.4

Eklemlerin açısal kontrolü için PID kontrolcü tasarımında, filtre kazancı da içeren Simulink PID blokları (Denklem 4.16) kullanılmıştır. Empedans katsayıları, yörüngenin x ve y doğrultusu için aynı olacak şekilde, deneme-yanılma yöntemleri ile belirlenmiştir. PID kontrolcü ise, birim basamak cevap özellikleri dikkate alınarak otomatik ayarlama yöntemleri ile ayarlanmıştır. PID-Emp kontrolcüye ait kazançlar ve katsayılar Çizelge 4.8'de sunulmuştur. Adım yörüngesinin uzunluğu L=400 mm, yüksekliği H=100 mm olarak belirlenmiştir. Uygulanabilir torklar üretebilmek ve ani aşmaları önlemek için kontrolcü çıkışları sınırlandırılmıştır. Engelsiz yörüngeye kıyasla, daha yüksek eklem torkları gerekeceği için, kontrolcü çıkışları ± 150 Nm ile sınırlandırılmıştır.

Şekil 4.27a'da ayak ucunun referans yörüngesi, empedans kontrolcünün ayarladığı yörünge ve gerçekleşen yörünge karşılaştırmalı olarak verilmiştir. PID-Emp kontrolcünün, ayak ucunun engel ile etkileşimi sonucu oluşan tepki kuvvetlerine göre referans yörüngeyi güncelleyebildiği ve bacağın şekildeki engeli aşarak başarılı bir adım atabildiği anlaşılmaktadır. Üst ve alt eklemlerin açısal konum değişimleri Şekil 4.27b ve Şekil 4.27c'de görülmektedir. Ayrıca, PID-Emp kontrolcünün ürettiği üst ve alt eklemlere ait tork değişim grafikleri Şekil 4.28a ve Şekil 4.28b'de sunulmuştur.



Şekil 4.27. PID-Emp kontrolcü **a)** ayak ucu yörüngesi, **b)** üst ve **c)** alt eklem açısal konum grafikleri



Şekil 4.28. PID-Emp Kontrolcü **a)** üst ve **b)** alt ekleme ait tork değişim grafikleri

Bu bölümde, 4AR'ın engebeli yüzeylerde yürüyüş çalışmalarına katkı sağlaması amacıyla, bacak yapısının engel tanımlanmış bir yörüngede adım hareket kontrolünün yanı sıra, ayak ucunun çevre ile dinamik etkileşiminin empedans tabanlı tanımlanması ve kontak kuvvetlerinin denetimine yönelik PID-Emp kontrolcü tasarımı ve simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Engel ile etkileşimden doğan tepki kuvvetlerine göre empedans kontrolcünün, referans adım yörüngesini güncellemesi ve böylece ayak ucunun engeli aşarak yörüngeyi tamamlaması sağlanmıştır. Ayak ucu, engel ile temas ettiği andan itibaren, empedans kontrolcünün tekrar düzenlediği yörüngeyi takip ederek, engel yüzeyi ile temas halinde hareket etmiş ve engeli aşarak adım hareketini tamamlamıştır. 4AR'ın engebeli parkurda yürüyüş simülasyonlarının incelendiği bölümde, ayak ucunun düzensiz yüzeylerle etkileşiminin denetimi için empedans tekniği kullanılmıştır.

4.7. Üç Uzuvlu Gerçekçi Bacak Modellenmesi ve Kesir Dereceli PID (PIλDμ) Kontrolcü Tasarımı

Dört ayaklı robotun; yürüyüş planlaması, ayak ucu yörüngesinin tasarımı ve kontrolü, gövde kontrolü gibi konularda hızlı ve etkili benzetimler yaparak, yürüyüş çalışmaları için belli öngörüler elde etmek amacıyla, üç serbestlik dereceli doğrusal bacak modellenmesi ve kontrolü sunulmuştur. Tüm uzuv boyutlarının, kütlelerin ataletlerin ve eklemlere ait sertlik ve sönüm değerlerinin tanımlandığı daha gerçekçi bir dinamik model Matlab/Simspace'de tasarlanmıştır. Matlab/Simulink'de Sistemin kontrol ve benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yürüyüş için tasarlanan, standart bir adım yörüngesi için gerekli eklemlere ait açısal konum aralıkları dikkate alınarak, sistemin girişi tork−çıkışı ise açısal konum olacak şekilde, dinamik model üzerinden doğrusallaştırma araçları kullanılarak bacağın durum-uzay modeli elde edilmiştir.

Durum-uzay modelini doğrulamak amacıyla, sabit tork girişlerine karşın sistemin doğrusal model ile dinamik modelinin birim basamak cevapları karşılaştırılmıştır. Küçük farklar ile modellere ait cevapların birbirine benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Yürüyüş için gerekli eklem hareketliliği (açısal konumların değişim aralıkları) referans giriş olarak tanımlanmış, doğrusal model kullanılarak sistemin PIλDμ kontrolcü ve klasik PID kontrolcü tasarımları gerçekleştirilmiştir ve karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Robotik bir sistemin dinamik modeli genellikle Lagrange enerji modeli aracılığıyla elde edilir. Ancak çok serbestlik dereceli sistemlerde, Lagrange denklemlerinin hesaplaması karmaşık ve çok uzun formülasyonlar gerektirebilir (Wisama ve Etienne, 2002). Bu nedenle, fiziksel bir sistemin; kütle, geometri ve bileşenleri arasındaki kinematik ilişkiler gibi değişkenlerle belirtildiği, zaman ve emek tasarrufu sağlayan Matlab/Simspace yazılımı kullanılarak eşdeğer bir dinamik model tasarlanabilir. Sistemlerin lineer olmayan karakterler içermesi de bir başka dezavantajdır. Doğrusal kontrolcüler ile hızlı ve etkili sistem benzetimi yapabilmek için hareket denklemlerinin sadeleştirilmesi gerekir. Sistem modelinin doğrusallaştırılması, denetleyici tasarımını kolaylaştıran yaygın bir stratejidir.

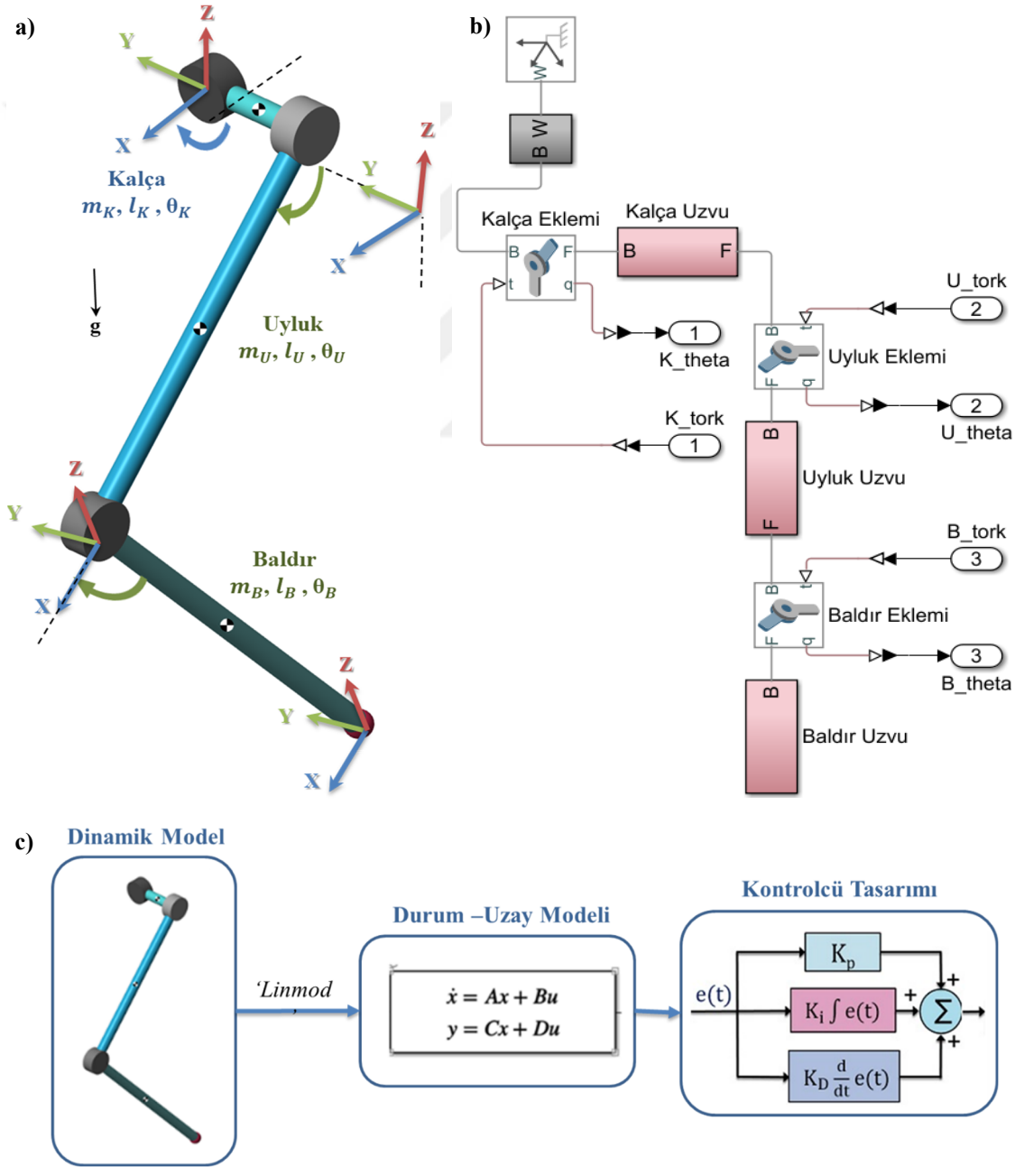
Velásquez-Lobo ve ark. (2013), Simspace yazılımıyla iki ayaklı bir robotun modellenmesi ve doğrusallaştırılması üzerine bir çalışma sunmuşlardır. Doğrusal model üzerinden, sistemin PID kontrolünü Simulink ortamında gerçekleştirmişlerdir. Benzer şekilde Rossell ve ark. (2015), tasarladıkları Stewart platformunun katı modeli üzerinden, Simulink ve Simspace yazılımları ile sistemin doğrusallaştırılmasını, sistemin PID ve LQR tabanlı yörünge kontrolünü karşılaştırmalı olarak gerçekleştirmişlerdir.

Bu çalışmada, 4AR için üç serbestlik dereceli bir bacak yapısı; fiziksel boyut, kütle, atalet, eklem sertliği ve sönümü gibi dinamik parametreleri içeren daha gerçekçi bir katı model tasarlanarak, Simspace ortamında dinamik olarak modellenmiştir. Dinamik model ve dogrusallaştıma yöntemleri kullanılarak, sistemin doğrusal durum-uzay formundaki matematiksel modeli elde edilmiştir, Simulink'de PIλDμ kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Gerçek robotlardaki bacak yapısına daha yakın olması amacıyla, genellikle 2-DoF tasarlanan çalışmalardan farklı olarak, bacak 3-DoF (kalça, uyluk, baldır) olarak tasarlanmıştır. Ayrıca doğrusallaştırma işlemi, standart bir adım hareketi için gerekli olan, eklemlerin açısal konum aralıkları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Koordinat sistemleri, eklemlerin başlangıç şartları ve kinematik kısıtlar tanımlanarak, bacağının daha gerçeğe yakın bir dinamik modeli Simpsace ortamında oluşturtulmuştur. Bacağın tasarımında; uzuv boyutları, kütleler, eklem sönüm ve sertlik

değerleri gibi birçok tasarım parametresi, *HyQ* (Semini, 2010) ve *HyQ2Max* (Semini ve ark., 2017) isimli dört ayaklı robotlara ait fiziksel boyular ve kinematik yapı dikkate belirlenmiştir. Bacak; kalça *(hip),* uyluk *(thigh),* baldır *(shank)* uzuvlarından ve bu uzuvlara ait açısal haraketli eklemlerden *(hip/pitch, hip/roll, knee)* oluşmaktadır.

3-DoF bacağa ait fiziksel model Şekil 4.27a'da, Simscape dinamik modelin blok şeması Şekil 4.27b'de, sistemin modellenmesine ve kontrolüne ait genel akış görseli ise Şekil 4.27c'de sunulmuştur. Çizelge 4.10'da, sistemin fiziksel parametrelerinin yansıra, eklemlerin açısal konum aralıkları ve üretilebilecek en fazla tork değerleri de verilmiştir.



Şekil 4.29. 3-DoF bacağın **a)** fiziksel modeli **b)** Simscape blok şeması ve **c)** modellenmesi ve kontrolü

Çizelge 4.9. 3-DoF bacağa ait parametreler ve değerleri

Parametre	**Kalça**	**Uyluk**	**Baldır**
Uzunluğu	l_K = 0.1 m	l_U =0.35 m	l_B =0.4 m
Ağırlığı	m_K =3.5 kg	m_U =5 kg	m_B =1.5 kg
Açısal Konumu Aralıkları	θ_K = -5°~-25°	θ_U =45° ~ 15°	θ_B =-85°~-110°
Maks. Tork	±120 Nm	±245 Nm	±250 Nm
Uzuv Yarıçapları	$r_K = r_U = r_B$ =0.01 m		
Eklemlerin sertlik değeri	$k_K = k_U = r_B$ =70 Nm/rad		
Eklemlerin sönüm değeri	$b_K = b_U = b_B$ =3 Nm/(rad/s)		
Yer çekimi	g=9,81 m/s^2		

Bacağın dinamik modeli kullanılarak, doğrusal durum-uzay modeli elde edilmiştir. Doğrusallaştırma işlemi; ayak ucunun, yüksekliği 100 mm, boyu 200 mm olan bir adım yörüngesini gerçekleştirebilmesi için gerekli referans eklem açısal konum değerleri (Çizelge 4.10) dikkate alınarak yapılmıştır. Bu açısal konum değerleri, yazarların önceki çalışmalarından (Sen ve ark., 2017a; Sen ve Kalyoncu, 2018) ve *HyQ* robotunun bacak yapısı üzerine yapılan çalışmadan (Focchi ve ark., 2010) elde edilmiştir. Sistemin doğrusal modeli, giriş−çıkışlar belirtilerek, *'linmod'* komutu işletilerek elde edilmiştir. *Linmod;* çok sayıda değişken içeren, matematiksel ifadesi karmaşık, doğrusal olmayan sistemleri doğrusallaştırmak için kullanılan bir Matlab komutudur. Ayrıca, modelin kontrol edilemeyen veya gözlenemeyen durumlarını ihmal ederek, gereksiz durumları asgariye indirmek için *'minreal'* komutu kullanılmıştır. Elde edilen doğrusal durum-uzay modelinin genel matematiksel ifadesi Denklem (4.24)'de, durum matrisleri ve elemanları (A, B, C, D) ise Denklem (4.25)'de, Denklem (4.26)'da açıklanmıştır.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \qquad \begin{aligned} x^T &= [\theta_{Hp}\ \dot{\theta}_{Hp}\ \theta_{Hr}\ \dot{\theta}_{Hr}\ \theta_K\ \dot{\theta}_K] \\ y^T &= [\theta_{Hp}\ \theta_{Hr}\ \theta_K] \\ u^T &= [\tau_{Hp}\ \tau_{Hr}\ \tau_K] \end{aligned} \tag{4.24}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} &A_{21} = -284.3, A_{22} = -11.2, A_{23} = -57.8 \\ &A_{24} = -2.4, A_{25} = 129.2, A_{26} = 5.4 \\ &A_{41} = -63.1, A_{42} = -2.4, A_{43} = -414 \\ &A_{44} = -16.9, A_{45} = 456, A_{46} = 19.4 \\ &A_{61} = 140.8, A_{62} = 5.41, A_{63} = 447.2 \\ &A_{64} = 19.4, A_{65} = -1442, A_{66} = -60.4 \end{aligned} \tag{4.25}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 3.75 & 0.80 & -1.80 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.80 & 5.65 & -6.5 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1.8 & -6.5 & 20.15 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 57.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 57.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 57.3 & 0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.26}$$

Sistemin durum-uzay modeli ile dinamik modelini karşılaştırmak amacıyla; eklemlere sabit birim basamak tork girişi verilerek, sistem 3 saniye simüle edilmiştir. Girilen tork değerleri, adım yörüngesi için gerekli en büyük açısal konum değerleri göz önüne alınarak belirlenmiştir. Şekil 4.30'da PID ve PIλDμ kontrolcünün matematiksel ifadeleri ve blok şemaları verilmiştir. Şekil 4.31'de Simspace ve durum-uzay modellerinden elde edilen, eklemlerin kontrolsüz açısal konum cevapları sunulmuştur.

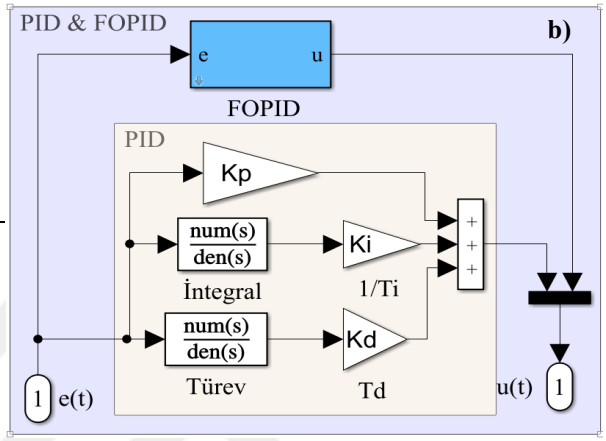
a)

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d\, s$$

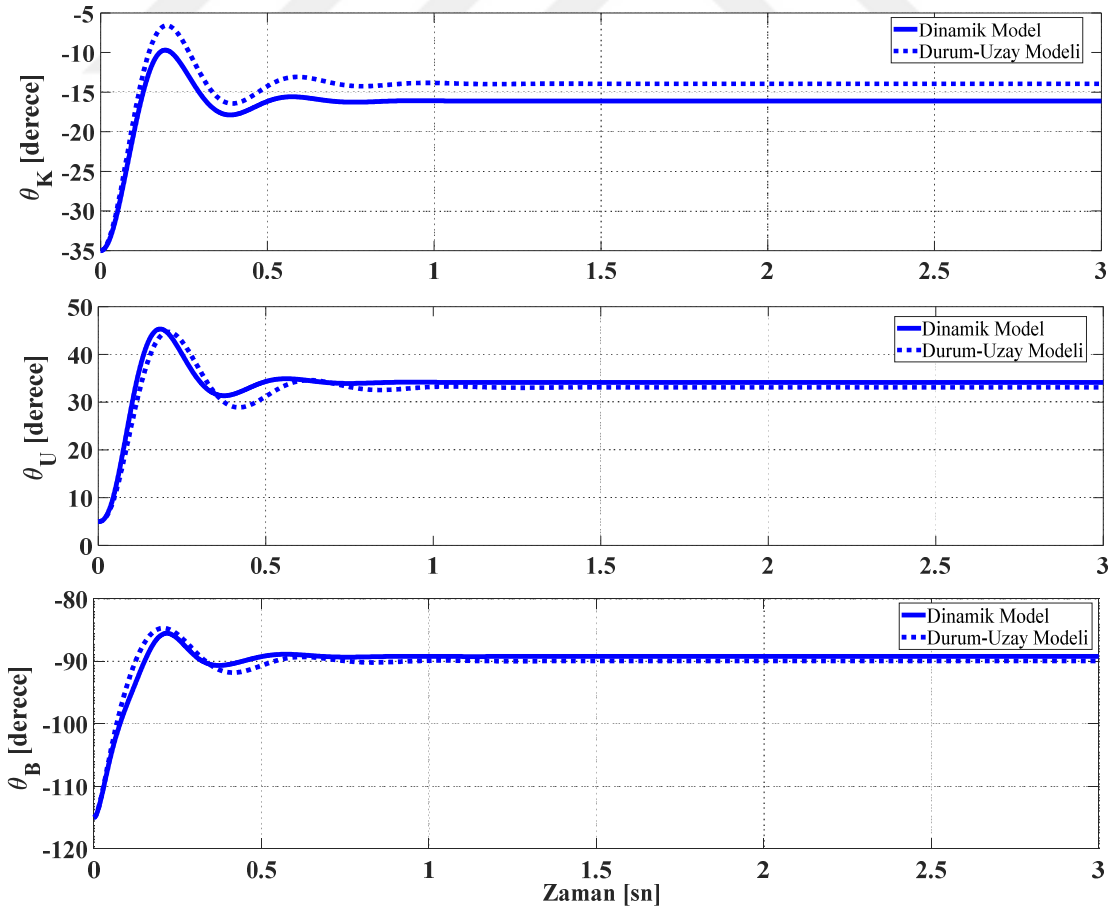
$$u(t) = k_p e(t) + \int_0^t e(t)d(t) + k_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s^{\lambda}} + k_d\, s^{\mu}$$

$$u(t) = k_p e(t) + k_i D^{-\lambda} e(t) + k_d D^{-\mu} e(t)$$



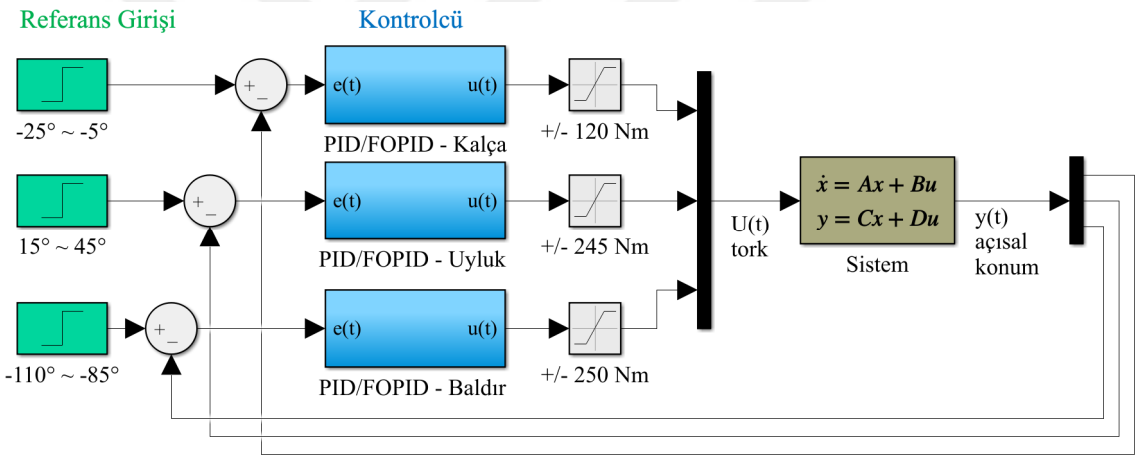
Şekil 4.30. PID, PIλDμ kontrolcülere ait **a)** matematiksel ifadeler ve **b)** blok şemalar



Şekil 4.31. 3-DoF bacak modellerin kontrolsüz cevapları

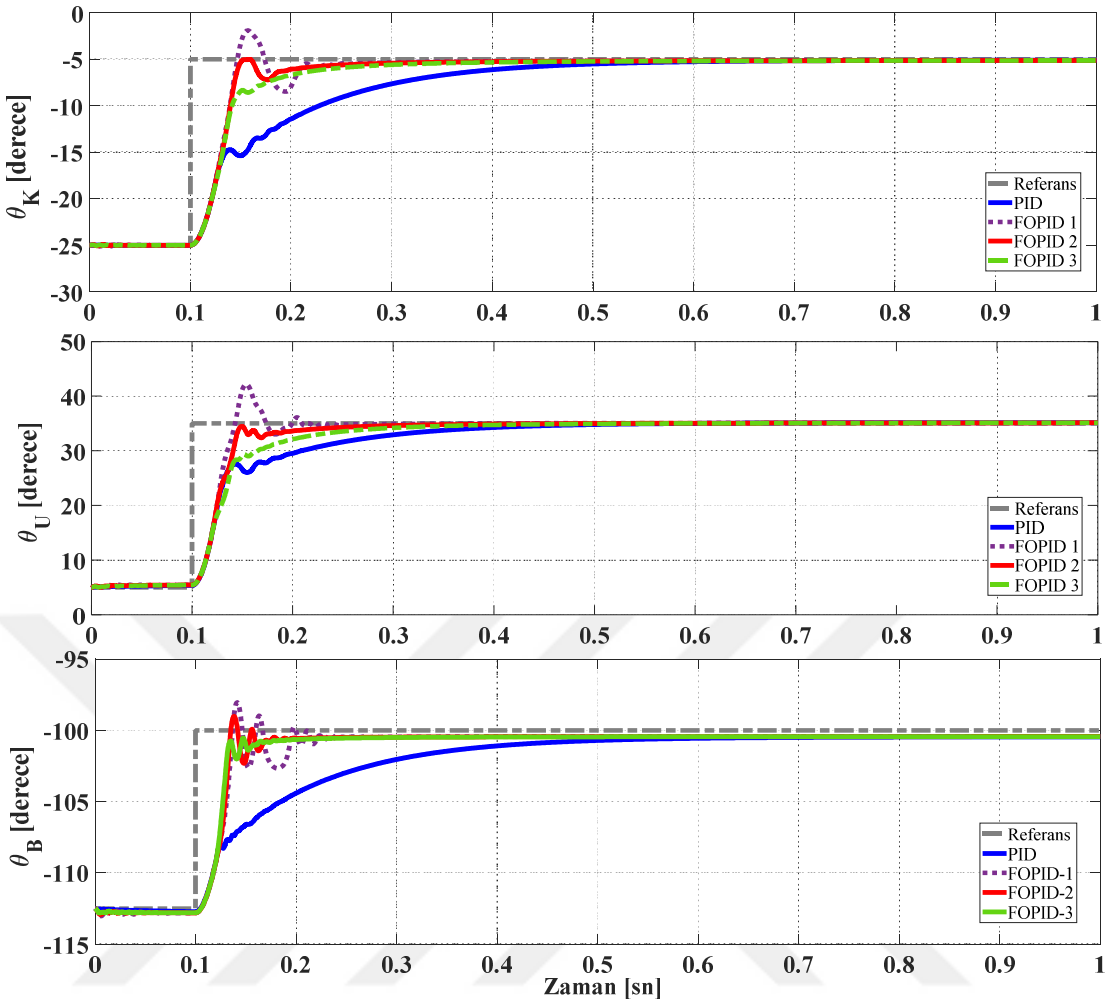
Şekil 4.31'den anlaşılacağı üzere, her iki model benzer eğilimde ve yakın sonuçlar vermiştir. Modellerin açısal konum cevapları arasındaki en büyük ve ortalama fark değerleri sırasıyla; kalça eklemi için 3.2 ve 2.1 derece, uyluk eklemi için 3.4 ve 1.2 derece, baldır eklemi için 3.3 ve 0.8 derece olarak hesaplanmıştır.

Kesir dereceli PIλDμ kontrolcü (*fractional order proportional-integral-derivative, FOPID*); klasik PID kontrolcü parametrelerine ek olarak, kesir türev derecesi (λ) ve kesir integral derecesi (μ) parametrelerini içeren, gelişmiş bir PID denetleyici çeşididir. Daha fazla ayarlanabilir tasarım parametresine sahip olması nedeniyle, daha esnek ve dayanıklı olduğu ve daha yüksek performans ile daha geniş bir kontrolcü cevabı sunabileceği belirtilmiştir (Podlubny ve ark., 1997; Podlubny ve ark., 2002). Üç serbestlik dereceli bacak yapısının kontrolü için tasarlanan genel kontrol sistemine ait blok şema Şekil 4.32'de sunulmuştur.



Şekil 4.32. 3-DoF bacak için tasarlanan PID ve PIλDμ kontrolcü genel blok şeması

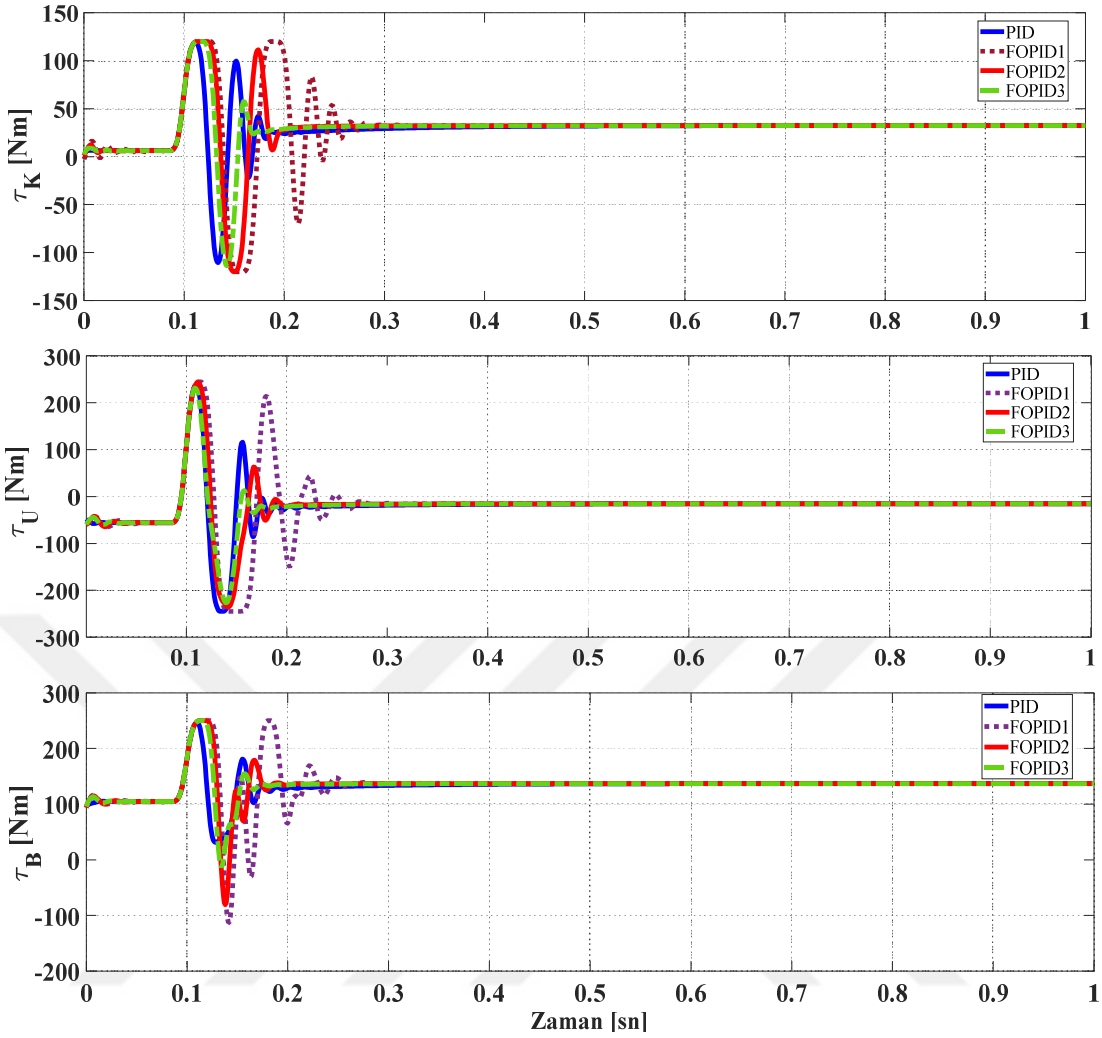
PID ve PIλDμ kontrolcülerin tasarımı Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Kesir derecelerinin (λ, μ) sistem cevabı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla; farklı kesir dereceleri belirlenerek, üç farklı PIλDμ kontrolcü (FOPID 1-2-3) tasarlanmıştır. Durum-uzay modeli üzerinden, her kontrolcü için sistem simüle edilmiştir. PID ve PIλDμ kontrolcülerin, 3-DoF bacağa ait eklemlerin açısal konumlarının denetimindeki performansları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.33'te verilmiştir. Kontrolcü parametreleri ve cevap özellikleri Çizelge 4.10'da sunulmuştur. Kontrolcü parametreleri tecrübeye dayalı olarak deneme-yanılma ile belirlenmiştir. Doğru bir kıyaslama yapabilmek için, PID ve PIλDμ kontrolcülerin oransal-integral-türev kazançları (k_p, k_i, k_d) aynı seçilmiştir. Ayrıca kontrolcülerin ürettiği eklemelere ait tork değişim grafikleri Şekil 4.34'te verilmiştir.



Şekil 4.33. PID ve PIλDμ kontrolü ile eklemlerin açısal konum cevapları

Çizelge 4.10. PID ve PIλDμ kontrolcü parametreleri ve cevap özellikleri

			Kalça	Uyluk	Baldır
PID		Kp, Ki, Kd	300, 0.3, 30	100, 0.1, 10	150, 0.15, 15
		tr [s]	0.39	0.36	0.4
		ts [s]	0.51	0.44	0.53
		MaxOS [deg]	0	0	0
		e(t) [deg]	0.12	0.15	1.02
PIλDμ		Kp, Ki, Kd	300, 0.3, 30	100, 0.1, 10	150, 0.15, 15
	FOPID-1	λ, μ	0.8, 0.5	0.7, 0.6	0.3, .02
		tr [s]	0.18	0.17	0.15
		ts [s]	0.25	0.21	0.22
		MaxOS [deg]	2.9	7.1	3.9
		e(t) [deg]	0.09	0.11	0.93
	FOPID -2	λ, μ	0.9, 0.6	0.8, 0.7	0.4, 0.3
		tr [s]	0.13	0.13	0.12
		ts [s]	0.26	0.28	0.18
		MaxOS [deg]	0	0	2.5
		e(t) [deg]	0.10	0.12	0.86
	FOPID -3	λ, μ	1.0, 0.7	0.9, 0.8	0.5, 0.4
		tr [s]	0.17	0.18	0.11
		ts [s]	0.32	0.34	0.18
		MaxOS [deg]	0	0	0
		e(t) [deg]	0.10	0.10	0.86



Şekil 4.34. PID ve PIλDμ kontrolcülerin ürettiği tork girişlerine ait değişimler

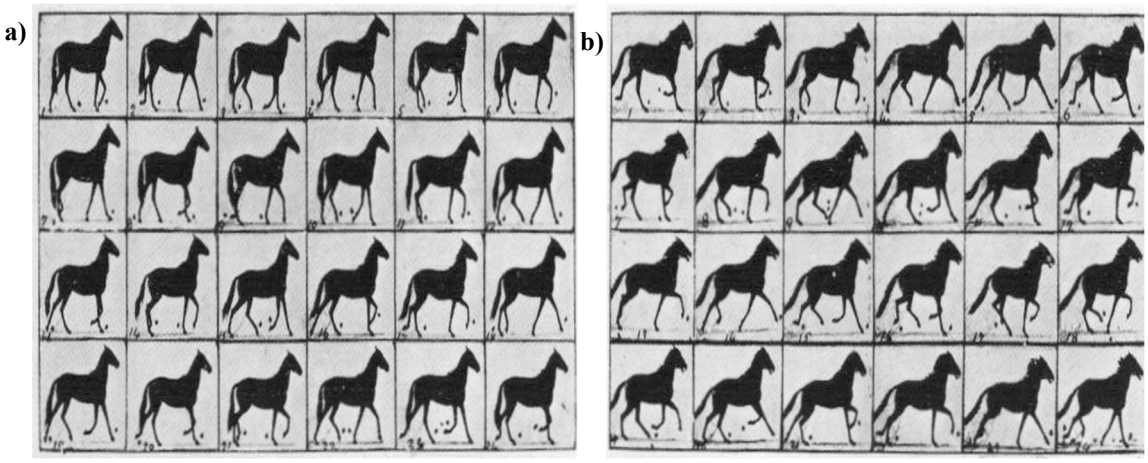
Şekil 4.33 ve Çizelge 4.10'dan anlaşılacağı üzere; PIλDμ kontrolcüye kıyasla, klasik PID kontrolcü tüm cevap spesifikasyonlarında daha yetersiz kalmıştır. FOPID-1 kontrolcü, bir miktar maksimum aşmaya rağmen (maxOS) daha az hata ile daha hızlı bir kontrol performansı sağlamıştır. Kesir derece değerlerinin daha yüksek olduğu FOPID-2 kontrolcü ise, yükselme (*tr*) ve yerleşme zamanının (*ts*) ve kalıcı durum hatasının (*e(t)*) azalmasını sağlamış, baldır ekleminde biraz maksimum aşma ile birlikte genel olarak kontrolcü performansı iyileşmiştir. Son olarak FOPID-3 ise, kabul edilebilir değerlerde kalıcı durum hatalarına karşın maksimum aşma olmadan, PID kontrolcüye kısayla daha hızlı ve daha etkili bir performansı göstermiştir.

Sonuç olarak, kesirli dereceleri sayesinde PIλDμ kontrolcü, aynı kazançlar kullanılmasına rağmen, tüm cevap spesifikasyonları bakımından klasik PID'den daha yüksek performans göstermiştir. Ayrıca, kesir derecelerinin çeşitli optimizasyon teknikleri ile ayarlanmasıyla PIλDμ kontrolcü performansı geliştirilebilir.

5. DÖRT AYAKLI ROBOTLARIN YÜRÜYÜŞÜ

İnsanlar uzun yıllar boyunca, doğada gözlemledikleri ve yaratılışları itibariyle üstün özelliklere sahip canlıları anlamaya ve taklit etmeye çalışmışlardır. Canlıların özelliklerini ve hareketlerini taklit etmek çok ilgi çekici bir fikir olsa bile, onların kolayca sergileyebildiği özelliklere sahip bir makine inşa etmek oldukça zor bir süreçtir.

1870 yılında, matematikçi Chebyshev tarafından gelişilen dört çubuklu mekanizma ile ilgili çalışmalar, doğal yürüyüşün ilk taklit girişimleri olarak bilinmektedir. Eadward Muybridge, 1878 yılında bir yarış atının koşma hareketini sıralı bir şekilde fotoğraflayarak, atın koşma hızlarına göre farklı tipte bacak hareketleri sergilediği ve tüm ayaklarının yerden kesilebildiğini gözlemlemiştir. Çalışmasında gözlemlediği atın tırıs yürüyüş ve dörtnala koşma hareketin sıralı fotoğrafları Şekil 5.1'de verilmiştir. Bu çalışma, bacaklı robotik alanındaki ilk bilimsel çalışma olarak kabul edilmektedir (Muybridge, 1985). Araştırmacılar 1940'larda, askeri uygulamalar başta olmak üzere birçok gerçek uygulamalar için bacaklı robotların kullanılabilirliğinin olası olduğunu düşünmeye başlamışlardır. İngiltere ve ABD orduları, bacaklı robotların askeri amaçlı kullanımını araştırmak amacıyla, halen devam eden önemli projeler başlatmışlardır. Bu projelerin önderliğinde, bacaklı sistemlerin sağladığı avantajların motivasyonu ile birçok teorik ve uygulama çalışması sürdürülmektedir.



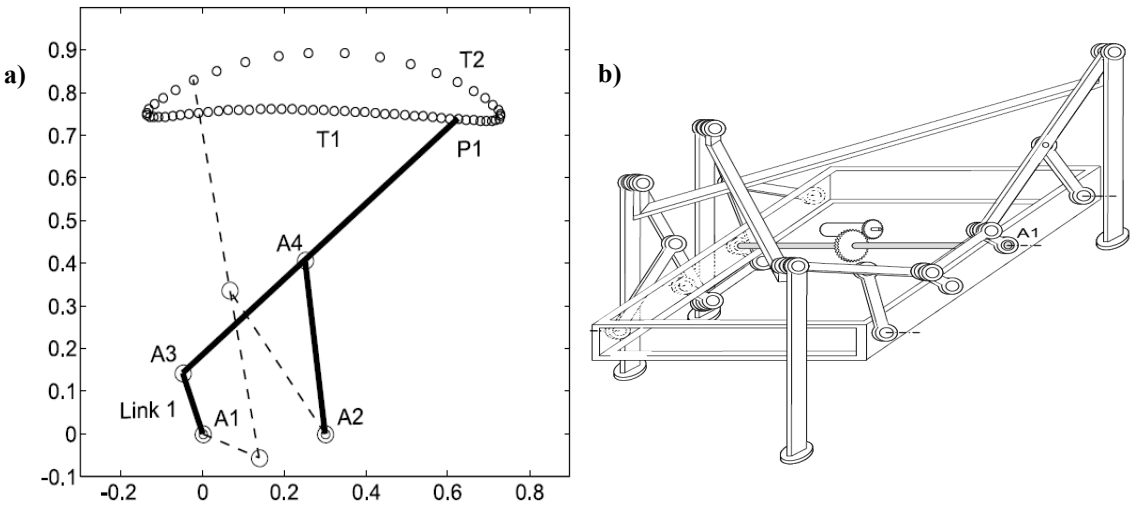
Şekil 5.1. Bir atın **a)** tırıs yürüyüş ve **b)** dörtnala koşma hareketin sıralı fotoğrafları

Bu bölümde, 4AR'ın düz/engebeli yüzeylerde yürüyüşü için kontrolcü tasarımı ve simülasyon çalışmalarına yönelik, dört ayaklı yürüyüş hakkında temel esaslar, yürüyüş çeşitleri ve planlamaları sunulmuştur.

5.1. Yürüyüşe Genel Bakış ve Temel Teorik Esaslar

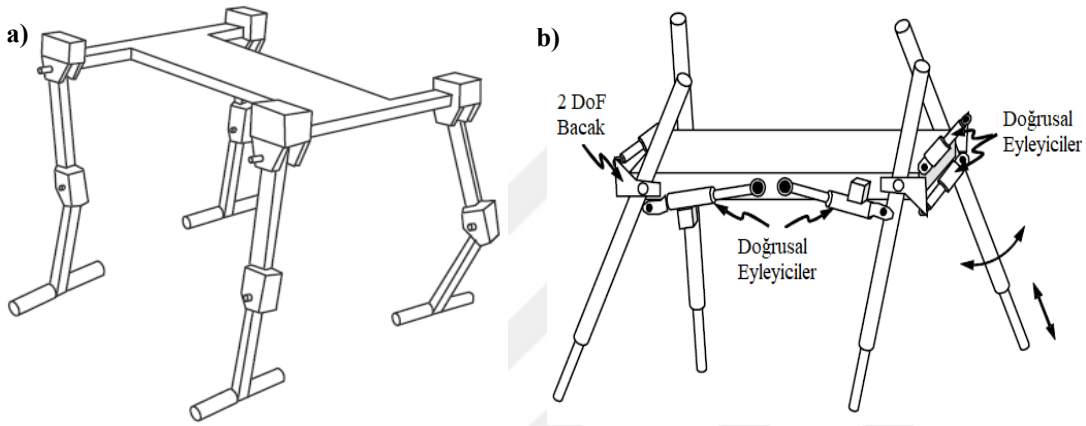
Ayaklı yürüme teknolojisi, hareket edebilmesi birçok koşulun sağlanmasına bağlı olan, oldukça basit yürüyüş mekanizmaları ile başlamıştır. Daha sonra bu mekanizmaların kabiliyetlerini geliştirmek amacıyla, yürüyüş çeşitleri matematiksel formülasyonlar ile modellenmiş, yürüyüş algoritmaları geliştirilmiş ve o anki mevcut teknolojiye bağlı olarak yürüyüş çalışmalarının iyileştirilmesi sürdürülmüştür. Yürüyüş mekanizmalarının gelişimi günümüzde halen devam etmektedir. Yürüyebilen bir robot geliştirmenin, sadece mekanizma tekniği açısından değil; aynı zamanda elektronik sistemler, algılama elemanları, kontrol algoritmaları ve eyleyiciler gibi birçok konu açısından da beklenenden daha karmaşık bir süreç olduğu anlaşılmıştır (De Santos ve ark., 2007).

Chebyshev tarafından inşa edilen ilk yürüyüş mekanizmasının temeli bir dört çubuk mekanizmasına dayanmaktadır. Şekil 5.2a'da görüldüğü üzere, 1 nolu uzuv düzleme dik olarak dairesel tahrik edildiğinde, P_1 noktası düz bir yörünge (T_1) boyunca hareket etmekte ve döngünün geri kalan kısmında zeminden ayrılarak bir eğri (T_2) takip ederek harekete devam etmektedir. T_1'in düzgünlük kalitesi ve T_2'nin şekli uzuv boyutlarına bağlı olarak değişmektedir. Bu mekanizmasının bir uygulaması olan yürüyen makine (Şekil 5.2b), bacakların iki çift halinde tasarlanması ve destek ve uçuş evrelerinin düzenlenebilmesi sayesinde tırıs yürüyüş yapabilmektedir. Ancak, farklı arazi şartlarına adaptasyonu için herhangi bir kontrol sistemine ve bacakların birbirinden bağımsız harekete sahip olmamaları nedeniyle yürüyüş makinasının hareketi düz zeminler ile sınırlıdır (De Santos ve ark., 2007).



Şekil 5.2. Chebyshev'in geliştirdiği **a)** yürüme mekanizması ve **b)** yürüyen makine

McGhee ve Frank, 1966 yılında inşa ettikleri *Phony Pony* (Şekil 5.3a) isimli, ilk orta ölçekteki boyutlarda ve elektrik motoru tahrikli iki serbestlik dereceli dönel uzuvlara sahip robot ile önemli bir gelişme sağlamışlardır. Temelde statik olarak kararlı bir sistem olarak tasarlanan robotların aksine Raibert (1986), tam dinamik kararlı olarak yürüme ve koşma yeteneğine sahip ilk dört ayaklı robotu MIT üniversitesi bünyesinde geliştirmiştir (Şekil 5.3b). Raibert'ın tek bacak hareketi üzerine başlattığı ve sonrasında çok bacaklı sistemler içinde başarıyla uyguladığı çalışmaları, bu alanda önemli bir kilometre taşı olarak kabul edilmektedir (De Santos ve ark., 2007).



Şekil 5.3. Chebyshev'in geliştirdiği **a)** yürüme mekanizması ve **b)** yürüyen makina

Bacaklı robotik alanın temelini oluşturan, önemli kilometre taşları olarak kabul edilen temel gelişmelerin Çizelge 5.1'de tarihsel sıralaması özetlenmiştir. Bu gelişimler temelinde ilerleyen, yakın geçmişimize ait dört ayaklı yürüyüş ile ilgili çalışmaların öne çıkanları tezin kaynak araştırması bölümünde sunulmuştur.

Çizelge 5.1. Yürüyen mekanizmalar ve yürüyüş ile ilgili temel tarihsel gelişmeler

Yıl	Araştırmacı	Yürüyen mekanizmalar ile ilgili temel gelişmeler
1870	Chebyshev	Duruş-uçuş evre değişimi sağlayan dört çubuk mekanizması geliştirildi
1893	Rygg	Mekanik at patenti alındı
1940	Hutchinson	Dört ayaklı bir sistem prototipi yapıldı
1961	Morrison	*Iron Mule* isimli robotun tasarımı ve testleri yapıldı
1968	Frank ve McGhee	*Phony Pony* isimli robotun tasarımı ve testleri yapıldı
1968	Mosher	*General Electric* firması *Walking Truck* isimli robotun testlerini yaptı
1972	Rome Ünivesitesi	Avrupa'daki ilk yürüyen robot geliştirildi
1977	McGhee	OSU isimli ilk bilgisayar kontrollü robotun testleri yapıldı
1980	Hirose ve Umetani	Tokyo teknoloji enstitüsünde PV-II isimli robot geliştirildi
1983	Odetics Şirketi	İlk ticari amaçla ODEX I isimli yürüyebilen robot üretildi
1987	Waldron ve McGhee	ASV isimli altı bacaklı robotun ilk gösterimi yapıldı
1989	Raibert	Dinamik kontrol temelli, yürüme-koşma-zıplama hareketlerini yapabilen ilk dört ayaklı robot geliştirildi

Yıl	Araştırmacı	Yürüyüş çalışmaları ile ilgili temel gelişmeler
1965	Hildebrand	Hayvanların yürüyüşleri sınıflandırıldı
1968	McGhee	Yürüyüşün matematiksel olarak formülasyonu yapıldı
1968	McGhee ve Frank	Dört ayaklı yürüyüş için optimal salınımlar geliştirildi
1973	Bessonov ve Umnov	Altı ayaklı yürüyüş için optimal salınımlar geliştirildi
1975	Kugushev ve Jarosh.	Serbest yürüyüşlerin ilk formülasyonları yapıldı
1979	McGhee ve Iswandhi	Serbest yürüyüşlerin formülasyon çalışmaları tamamlandı
1989	Kumar ve Waldron	Uyarlanabilir (adaptif) yürüyüş çalışmaları yapıldı
1990	Zhang ve Song	Yengeç (crab) yürüyüşün formülasyonu yapıldı

Yürüyüş çeşitlerinin ve planlamasının daha iyi anlaşılması açısından, yürüyüş ile ilgili temel kavramlar ve açıklamaları aşağıda verilmiştir.

Yürüyüş (Gait): Bir yürüme mekanizmasının bir yerden başka bir yere hareketini sağlaması için gerçekleştirdiği bir dizi bacak hareketi *'yürüyüş'* olarak bilinir. Diğer bir ifadeyle yürüyüş, bacaklı hareket sırasında ayakların yerden kesilerek yer değiştirdiği bir dizi tasarlanmış hareketi ifade eder.

Yürüyüş Döngüsü (Gait Cycle): Bacaklı yürüyüş hareketinde, bir ayağın yer ile temasının başladığı andan ve aynı ayağın tekrar zeminle temas ettiği ana kadar süren hareketin yürüyüş boyunca düzenli ve ritmik olarak tekrarlanması, yürüyüş döngüsü olarak tanımlanabilir.

Adım Hareketi (Step Stride): Bir yürüyüş döngüsü içinde, her bir bacağın birbirlerine göre belli faz açıları ile gerçekleştirdikleri hareket, *'adım atma veya adım hareketi'* olarak ifade edilebilir. Temel adım hareketi iki ana aşamadan oluşur. Bunlar; ayağın yer ile temas halinde olduğu destek/duruş evresi (Stance Phase/Support Stage) ve ayağın yer ile temasının kesildiği, havada olduğu uçuş/salınım evresi (Swing Phase/Transfer Stage)'dir. Bir yürüyüş döngüsünde, her bir bacak tam olarak bir tam adım hareketi gerçekleştirir. Destek evresinde bacaklar gövdeyi, mümkün olduğunca zeminle paralel ve zeminden belli bir yükseklikte tutarak, yürüme yönünde iterler. Uçuş evresinde ise bacaklar, havada bir sonraki destek evresi için adım yörüngesini takip ederek, gövdeyle beraber ileri giderler. Uçuş evresinin gövdenin ilerlemesine katkısı yoktur. İki ayaklı yürüyüşte, destek evresi genellikle adım hareketinin yaklaşık % 60'ını, uçuş evresi ise yaklaşık % 40'ını oluştur. Bu oranlar, dört veya daha fazla bacaklı robotlarda yürüyüşün hızına göre değişken tasarlanabilir. Yürüyüş periyodu aynı kalmak şartıyla, destek evresinin oranı azalır ve uçuş evresinin oranı artarsa robotun ilerleme hızı artar.

Yürüyüş Periyodu ve Frekansı (Gait Period and Frequency): Tam bir yürüyüş döngüsünün gerçekleşmesi için geçen süreye yürüyüş periyodu denir. Yürüyüş periyodunun tersi, yürüyüş frekansı olarak tanımlanır. Diğer bir ifadeyle yürüyüş periyodu, destek ve uçuş evreleri için geçen sürelerin toplamıdır. Sabit adım uzunluğu için, yürüyüş periyodu ile robotun ilerleme hızının ters orantı olduğu söylenebilir.

Faz Farkı (Gait Phase, ϕ): Bacaklı yürüyüşte, bacaklar veya belirli bir bacak grubu aynı adım hareketini, birbirlerine göre tanımlanmış bir faz (salınım) farkı ile, düzenli ve sıralı olarak gerçekleştirirler. Bu faz farkını, yürüyüş döngüsü süresince her bir ayak için 0 ile 1 arasında değişen değerler olarak düşünülebilir. Bacakların hareketliği arasındaki farkı, bir diğer ifadeyle bacakların birbirlerine göre bağıl hareketlerini temsil eder. Yürüyüş çeşitleri, bu faz açılarına ve ayakların dağılımlarına göre tanımlanır. Ayrıca, kararlılık açısından önem arz eden, robotun statik veya dinamik yürüyüş karakteristikleri de yürüyüş sırasındaki faz açılarına göre değişkenlik gösterir.

Görev Faktörü (Duty Factor, β): Genel bir ifadeyle, her bir ayağın yerde kaldığı sürenin, bir yürüyüş döngüsü için gerekli toplam süreye oranı olarak bilinir. Yürüyüş sırasında bir ayağın yer ile temas halindeyken geçen sürenin (destek evresi süresinin) tam bir yürüyüş döngüsü için geçen süreye (yürüyüş periyoduna) oranına görev faktörü denir. Görev faktörü hesaplanması Denklem (5.1)'de tanımlanmıştır.

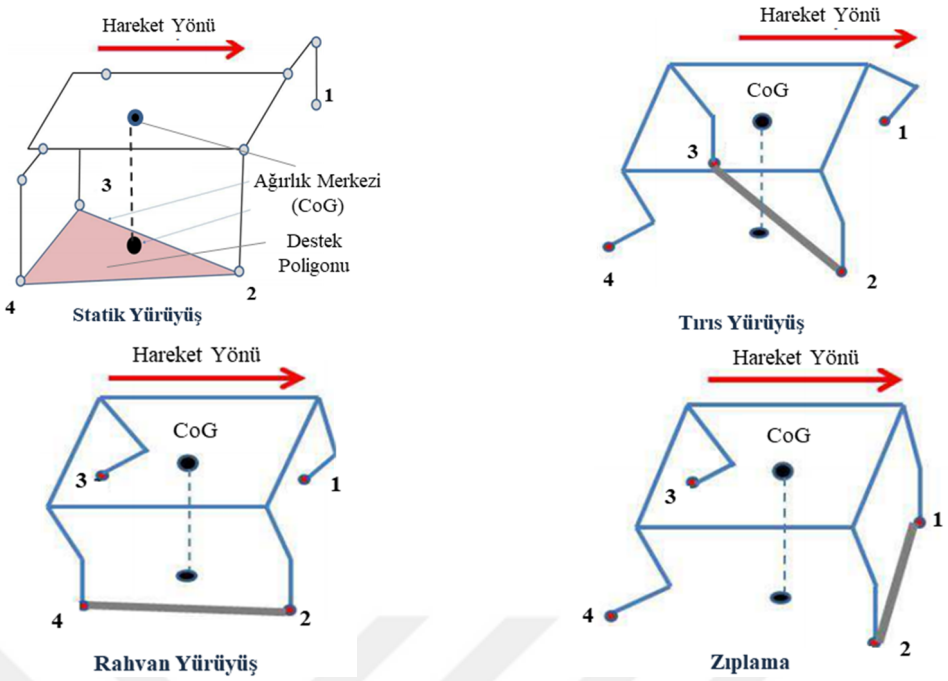
$$Görev\ Faktörü\ (\beta) = \frac{Destek\ Evresi\ Süresi}{Yürüyüş\ periyodu} \tag{5.1}$$

İki ayaklı insansı yürüyüş düşünüldüğünde; uçuş ve destek evreleri arasında her iki ayağın da yerde oluğu belli bir süre olması gerektiği için görev faktörü 0.5'ten büyük olur. İnsanın koşma hareketinde ise, her iki ayağında yerden kesildiği anlar olduğu için görev faktörü 0.5'ten küçük olur. Benzer durumlar dört ayaklı yürüyüş için düşünüldüğünde; yürüyüş boyunca en az üç ayağın sürekli yerde olduğu statik yürüyüşte görev faktörü 0.5'ten büyük, çapraz veya yanal bacakların birlikte hareket ettiği diyagonal yürüyüşlerde (tırıs, rahvan vb.) görev faktörü 0.5 ve belli anlarda üç veya tüm ayakların yerden kesildiği dinamik yürüyüşlerde (koşma, dörtnala vb.) ise görev faktörü 0.5'ten küçük olur. Genel olarak, bir yürüyüşte görev faktörü ne kadar büyük ise yürüyüş o kadar dengeli ve yavaş olur denebilir.

Bacaklı yürüyen robotlarda, yürüyüş genel olarak statik ve dinamik olarak iki temel bölüme ayrılmıştır. Statik yürüyüş; robot ağırlık merkezinin zemindeki iz düşümünün yürüyüş periyodu boyunca, yerdeki ayakların zeminde oluşturduğu destek (support) poligonu içinde kaldığı dengeli yürüyüş olarak tanımlanır. Bu poligon, gövde ağırlığının destek fazındaki ayaklara dağılımını sağlar. Ağırlık merkezinin destek poligonu dışına çıkması, robotun dengesini kaybettiği ve devrildiği anlamına gelir. Statik yürüyüşte sürekli bir denge hali olduğu için, robot daha kararlı ve basit hareketler ile yürüyebilir. Dinamik yürüyüş ise; yürüyüş sırasında yerdeki ayakların zeminde sürekli bir destek poligonu oluşturmaması nedeniyle (örneğin zıplama veya koşma sırasında ayakların havada olduğu anlarda) kararsızdır. Yani robot, dinamik yürüyüşün herhangi bir anında dengesini kaybedebilir. Dinamik bir sistemin tasarımının ve analizinin zor olması sebebiyle, yürüyüş çalışmaları için genellikle statik yürüyüş tercih edilmektedir. Her iki yürüyüşte de eklemlerin açısal konum ve hızlarının kontrol edilmesi gerekir. Ancak, dinamik yürüyüş daha hızlı olsa bile, dinamik hareketli bir robotun kontrolü daha zor ve karmaşıktır. Bu sebeple bacaklı yürüyüş alanındaki araştırmacılar statik yürüyüş planları üzerine çalışmalarını yoğunlaştırmışlardır (Fukuda ve ark., 2012; Donner, 2013).

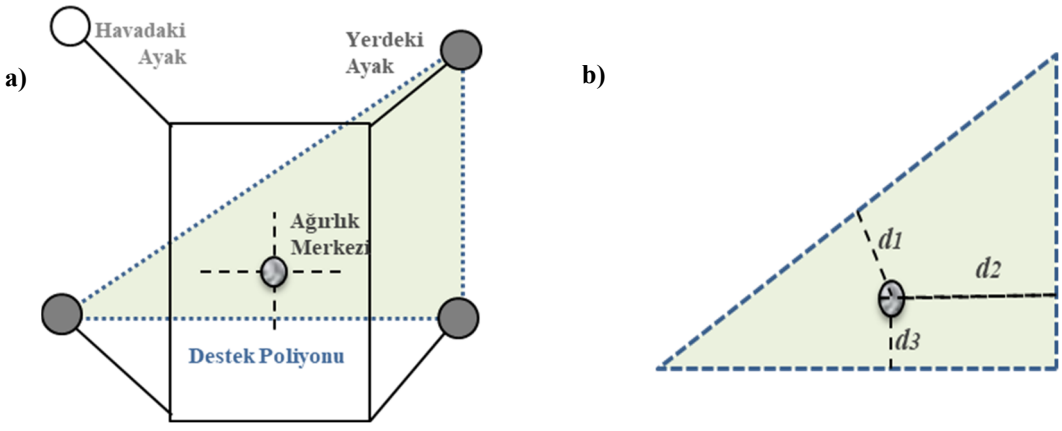
Yürüyen bir robotun ana işlevi, istikrarlı bir hareketi sağlamak ve sürdürebilmektir. Diğer bir ifadeyle, düşmeden/devrilmeden yürüyüş sürecinde dengede kalmaktır. Yürüyen robotlardaki kararlılık, öncelikle denge halinde olup olmadığı ile ilgilidir. Bununla birlikte, mümkünse, robot gövde konumunun denge durumuna ne kadar yakın veya uzak olduğu hakkında bir fikir edinmek için kararlılık derecesinin ölçülmesi önem arz eder.

Yürüyen robotların dengesi üzerine araştırmalar, 1968 yılında McGhee ve Frank tarafından, ideal bir yürüyüşün statik denge kriterinin tanımlanması ile başlamıştır. Robot ağırlık merkezinin zemindeki yatay iz düşümü, yerdeki ayakların oluşturduğu destek poligonunun içinde ise, robotun statik olarak kararlı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrı bir kararlılık ölçütü olarak, ağırlık merkezinin iz düşümünün destek poligonu sınırlarına olan en kısa mesafeyi hesaplayıp bunu *Kararlılık Marjı (Stability Margin)* olarak tanımlamışlardır. Bu yaklaşımı, böceklerden ilham alarak, ideal bir robotun kütlesiz bacaklara sahip olduğunu varsayarak ve dinamik etkileri ihmal ederek geliştirmişlerdir. Sonrasında, dinamik etkileri içeren kararlılık marjları ile ilgili çalışmalar da yapmışlardır. Kararlı bir yürüyüş için, üçten fazla bacak gerektiğini ve sayı artıkça destek poligon alanının ve dolayısıyla kararlığının artacağını belirtmişlerdir. (De Santos ve ark., 2007). Dört ayaklı yürüyüş çeşitlerine göre destek poligonu (üçgeni) Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4. Dört ayaklı yürüyüş çeşitlerine göre destek poligonu

Dört ayaklı bir robotun statik yürüyüşünde oluşan destek poligonu (üçgeni) ve kararlılık marjı Şekil 5.5'te belirtilmiştir. Statik yürüyüşte en az üç ayak yerde olduğu için, ağırlık merkezi iz düşümü destek üçgeni içinde kaldığı sürece robot dengededir ve kararlılık marjı $S_m=min\ (d_1, d_2, d_3)$'dür. İki ayağın yerde olduğu dinamik yürüyüşlerde ise, destek poligonu bir çizgi şeklinde olduğu için, ağırlık merkezi izdüşümü bu çizgiyle çakıştığı takdirde robot dengededir ve kararlılık marjı $S_m=min\ (d_1)$'dir. Yer ile temasın kesilebildiği bazı dinamik yürüyüşlerde, özellikle engebeli yüzeylerdeki yürüyüşlerde ise, sistem kararsız davranış gösterir ve kararlılık marjı gövdenin minimum potansiyel enerjisine bağlı olarak $S_m=min\ (Mgh)$ şeklinde ifade edilir. Burada, M robotun toplam kütlesi, g yer çekimi ve h gövdenin yerden yüksekliğidir (Siciliano ve Khatib, 2016).



Şekil 5.5. Dört ayaklı yürüyüşte **a)** Destek poligonu ve **b)** Kararlılık marjı

Robot dengesinin sağlanması ve kararlılığının sürdürülebilmesi amacıyla, statik ve dinamik yürüyüş için farklı yaklaşımlar mevcuttur. Statik yürüyüşte, yaygın olarak ZMP (Zero Moment Point- Sıfır Moment noktası) (Vukobratović ve Borovac, 2004) gibi dengeleme yöntemleri kullanılmaktadır. ZMP yöntemi; hareketli tüm robot uzuvlarının, yer ile temas eden ayakların konumlarına göre oluşan momentlerinin toplamının sıfıra eşitlenmesi ve bu durumun yürüyüş boyunca korunması prensibine dayanır. Statik yürüyüşte, robot ağırlık merkezinin destek poligonu içinde kalacak şekilde ZMP'ye taşınması ile gövdenin kararlılığı sağlanmaktadır. Bunun için ZMP noktası hesaplanır ve bu noktayı takip edecek yörüngeyi sağlayan eklem hareketliliği ters kinematik yöntemler ile belirlenir. Dinamik yürüyüşte ise, destek poligonu oluşmadığı için, ZMP ve Arabalı Ters Sarkaç (Cart-Table Model)'ın birlikte kullanıldığı yöntemlerinin yanı sıra, genellikle SLIP (Spring Loaded Inverted Pendulum-Yay Eklenmiş Ters Sarkaç) (Raibert, 1986) modeli kullanılır. Bacaklı robotların aktif olarak dengelenmesi konusunda önemli bir dönüm noktası olan ve ilk olarak tek bacaklı zıplayan robotların denge kontrolüne uygulanan SLIP yöntemi, daha sonra dört bacaklı robotlar için de geliştirilmiştir. ZMP gibi yöntemlerin aksine SLIP, çok yönlü harekete imkân sağlayabilmesi sebebiyle, hızlı ve dinamik yürüyüşlerin kontrolü için uygulanabilmektedir.

5.2. Dört Ayaklı Yürüyüş Çeşitleri

Yürüme, kara canlılarının yaya olarak hareket etme yolu ya da şekli olarak ifade edilebilir. Bacaklı yürüyüş ise, ayak yerleşimlerinin döngüsel bir örüntüsü şeklinde değişim hareketi olarak tanımlanabilir. Bacaklı hareket ile ilgili ilk araştırmalar, doğada yaygın bulunan biyolojik canlıların yürüyüşlerinin gözlemlenmesi, anlaşılması ve matematiksel olarak formülize edilmesine dayanmaktadır. Hayvanların, farklı dizilimlerdeki bacak hareketini tekrar tekrar gerçekleştirmesi sonucu farklı yürüyüşler sergiledikleri gözlemlenmiştir. Bu yürüyüşlerin genellikle, sıralı bacak hareketleri ve periyodik adımlar atarak gerçekleştiği anlaşılmıştır.

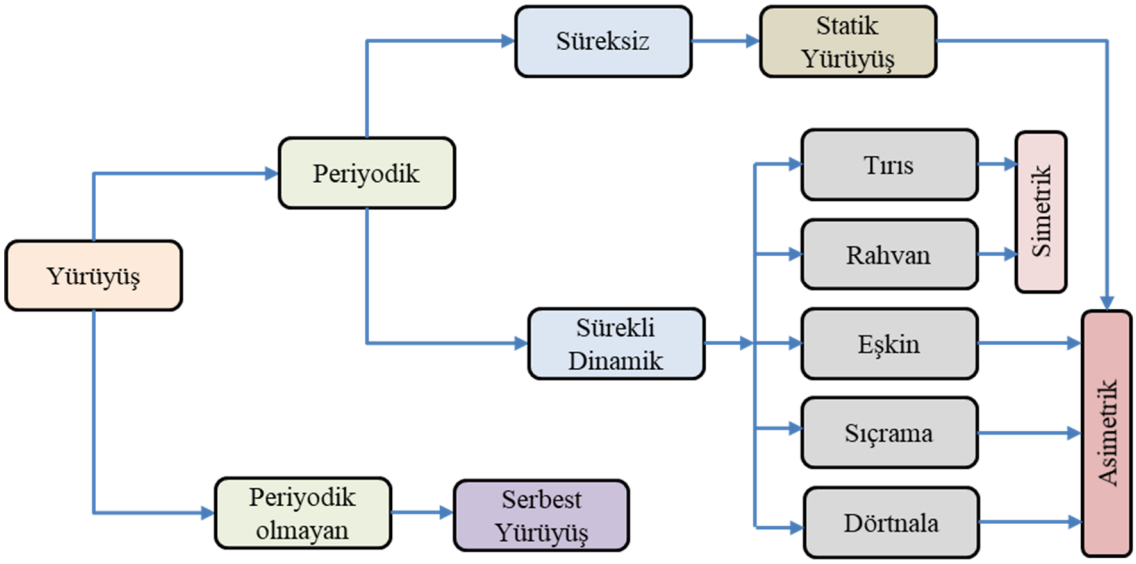
McGhee ve Frank, yürüyüşü modellemek amacıyla, sıralı bacak hareketini tanımlayan bir matematiksel modelin formülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Sadece düz arazi koşulları için geçerli olan bu matematiksel formülasyonu teorik olarak anlamlıdır, ancak düzensiz zeminde gerçek bacaklı robotlara uygulamak için yetersidir. Bu nedenle, daha sonraki araştırmacılar düzensiz araziye uygun yürüyüş çeşitleri geliştirmeye başlamışlardır (Jiménez ve Gonzalez de Santos, 1997).

Yürüyüş karakteristiklerine göre temel sınıflandırmalar yapılmıştır. Tüm bacakların aynı anda hareket ettiği, vücudun sürekli hareket halinde olduğu yürüyüş, Sürekli Yürüyüş (Continuous Gait) olarak adlandırılmıştır. Memeliler ve böcekler düzenli arazilerde genellikle sürekli yürüyüş sergilerler. Arazi düzensizlikleri sürekli bir yürüyüşü sürdürmeye imkân vermeyebilir. Bu sebeple, bacak ve gövde hareketlerini düzenleyerek yürüyüşlerini daha güvenli bir hale dönüştürebilirler. Düzensiz arazilerde ise, tüm ayaklar yerde güvenli bir şekilde destek evresinde iken, gövdelerini ileri/geri hareket ettirirler ve gövde denge halinde iken adım atarak hareket ederler. Gövde hareketi kesikli olduğu için bu yürüyüş Süreksiz Yürüyüş (Discontinuous Gait) olarak adlandırılmıştır. Süreksiz yürüyüş gerçek bacaklı robotlar için daha uygulanabilir olmasının yanı sıra daha dengeli bir hareket sağlar. Bu sebeple, sıralı bacak hareketinin gerçekleştirildiği süreksiz yürüyüşler düzensiz arazi şartları için daha uygundur. Arazi düzensizliklerine bağlı olarak, yürüyüş esnasında adım hareketinin periyodikliği bozulabilir. Bu nedenle, yürüyüş periyodik (periodic) ve periyodik olmayan/serbest (non-periodic) olarak iki büyük grupta ifade edilebilir. Genel bir ifadeyle, bir yürüyüş döngüsünde ayakların yerden kalkması ve tekrar yere inmesi aynı şekille ve aynı sürede gerçekleşiyor ise, yürüyüş periyodik olarak tanımlanır (De Santos ve ark., 2007).

Yürüyüş genellikle bacakların birbirlerine göre hareketine bağlı olarak Simetrik (symmetrical) ve Asimetrik (asymmetrical) olarak sınıflandırılır. Simetrik bir yürüyüşte, sağ ve sol bacak çiftleri (yanal veya çapraz bacakların) birlikte, eş zamanlı aynı hareketi gerçekleştirirler. Asimetrik yürüyüşte ise, tüm bacaklar farklı zamanlarda, aynı hareketi belirli faz farkları ile gerçekleştirirler. Tırıs ve rahvan gibi simetrik yürüyüşte bacaklar çiftler halinde hareket ettiği için, yürüyüşün görev faktörü 0.5 olur. Ancak, ön/arka bacakların birlikte hareket etiği zıplama veya sıçrama hareketi ise, asimetrik olarak sınıflandırılır. Asimetrik yürüyüşler, bacaklar arasında mükemmel simetrinin olmadığı yürüyüşler olarak da tanımlanabilir. Yürüyüş boyunca en az üç ayağın yerde olduğu statik ve asimetrik yürüyüşte görev faktörü 0.5'ten büyük, dörtnala koşma gibi dinamik ve asimetrik yürüyüşte ise görev faktörü 0.5'ten küçüktür.

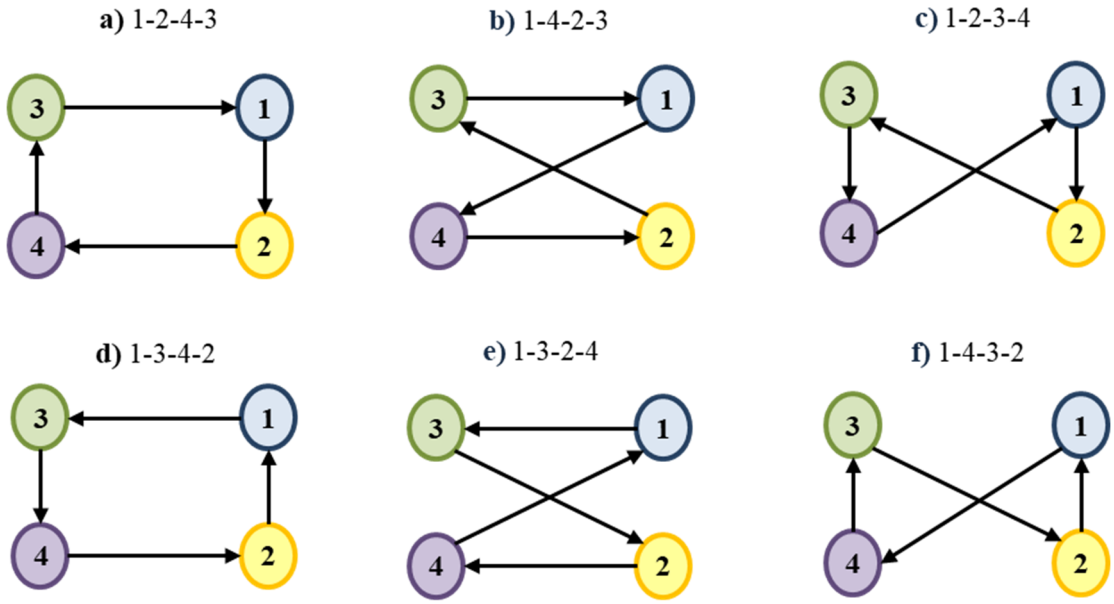
Yürüyüşlerin matematiksel modellerinin tanımlamasına yönelik ilk çalışmalar dört ayaklı sistemler üzenine odaklanmıştır. Araştırmacılar, hangi dörtlü yürüyüş diziliminin (sequence) statik denge açısından daha avantajlı olduğunu anlamaya çalışmışlardır. İlk olarak McGhee, yürüyüş dizilimlerini tanımlayan bir notasyon tanıtmıştır. *n* adet bacak sayısına sahip bir robot için *(n-1)!* adet yürüyüş dizilimi olacağını belirtmişlerdir. Dört ayaklı bir robot için 6 adet dizilim mevcuttur (McGhee, 1967).

Hayvanların hareketleri üzerine yapılan araştırmalar sonucu, karakteristiklerine göre temel yürüyüş sınıflandırması Şekil 5.6'da belirtilen şeklinde yapılmıştır.



Şekil 5.6. Karakteristiklerine göre temel yürüyüş sınıflandırması

Şekil 5.7'de dört ayaklı statik yürüyüşe ait hareket dizilimleri verilmiştir. Statik yürüyüş, aşağıda belirtilen dizilimlerden birine göre adıma atarak gerçekleşir. Bu dizilimlerin birbirlerine göre avantajlı/dezavantajlı yönleri vardır. Örneğin; **b)** 1-4-2-3 ve **e)** 1-3-2-4'ün diğerlerine göre gövde dengesi açısından, **a)** 1-2-4-3 ve **d)** 1-3-4-2'nin ise sağa/sola dönüş için daha avantajlı olduğu belirtilmektedir.



Şekil 5.7. Dört ayaklı statik yürüyüşe ait bacakların hareket dizilimi

Yürüyüş, belirli bir hız aralığı ile karakterize edilen periyodik örüntü hareketi olarak da tanımlanabilir. Yürüyüş hızı veya gövdenin ilerleme hızı seçilen yürüyüşün çeşidine bağlı olarak gerçekleşir. Diğer bir ifadeyle, yürüyüş çeşitlerinin sınıflandırılması yürüyüş hızına göre yapılır. Bacaklı robotların hareketlerini daha verimli hale getirmek için, yürüyüş çeşitleri üzerine araştırma ve geliştirme çalışmaları uzun yıllardır devam etmektedir. Gövde ve uzuv oranlarının robot tasarımı açısından çok elverişli olması sebebiyle, dört ayaklı yürüyüşte genellikle köpeklerin yürüyüş hareketi referans alınır. Yürüyüş çeşitlerinin anlaşılması, tasarlanan referans hızlarda ve kararlı bir robot hareketinin elde edilmesi ve kontrolü bakımından önemlidir.

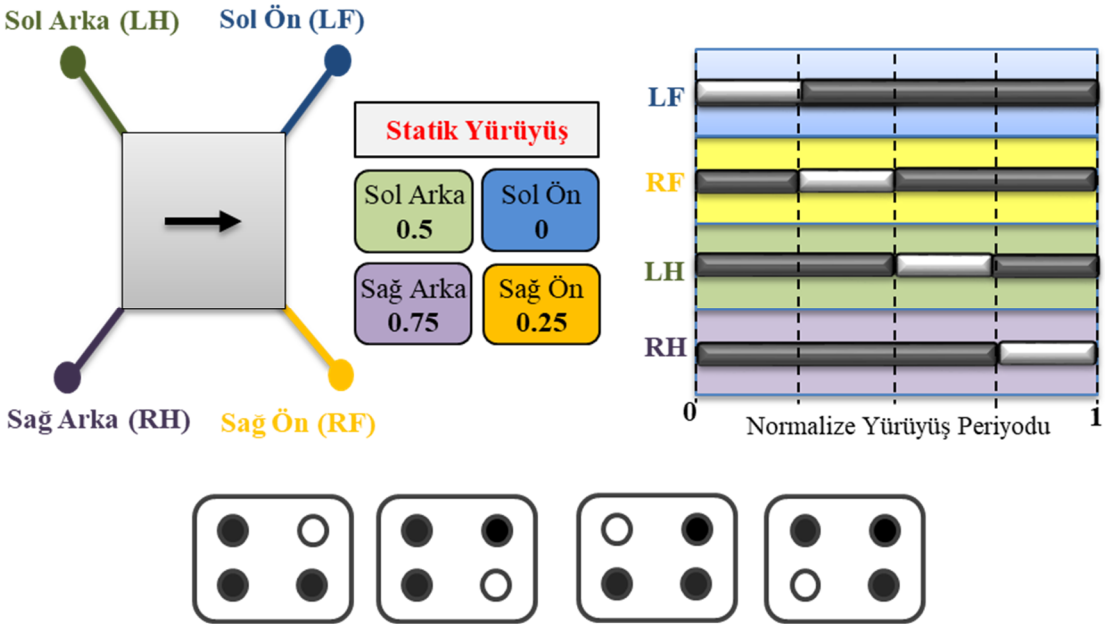
Hayvanlar fiziksel yapılarının farklı olması sebebiyle, benzer yürüyüş çeşitlerini farklı hızlarda gerçekleştirebilirler. Bu sebeple, farklı fiziksel boyutlardaki canlıları, yürüyüş çeşitleri açısından kıyaslayabilmek amacıyla, yürüyüş hızını normalize eden *Froude Number* isimli bir değer kullanır. Froude değeri hayvanların yürüyüş çeşitlerini tanımlayabilmek adına önemli bir parametredir. Diğer bir ifadeyle, fiziksel boyutlardan bağımsız olarak, hayvanlar ile robotların yürüyüş hızı bakımdan karşılaştırılabilmesine imkân sağlar. Örneğin, insanların froude değeri genellikle, yürüyüş ile koşma arasında yaklaşık 0.5'tir. Dört ayaklı yürüyen memeli canlıların ise, statik yürüyüş ile tırıs yürüyüş arasında froude değeri yaklaşık 0.5'tir ve yaklaşık 2.5 froude değerinden sonra dörtnala koşma gerçekleştir. Froude değeri, Denklem (5.2)'de belirtildiği gibi hesaplanır. Burada; v , gövdenin ortalama ilerleme hızı, h, gövdenin yerden yüksekliği g, yer çekimi ivmesidir (Haynes ve Rizzi, 2006).

$$Froude\ değeri = \frac{(v)^2}{(h)(g)} \tag{5.2}$$

Yürüyüş çeşitleri; istenilen gövde hızı başta olmak üzere, enerji tüketimi, arazi şartları ve robotun fiziksel boyutları gibi birçok faktöre bağlı olarak incelenebilir ve sınıflandırılabilir. Yaygın olarak kullanılan dört ayaklı yürüyüş çeşitleri, hızlarına göre üç temel grupta incelenebilir. Yürüyüş çeşitleri; diğerlerine kıyasla daha yavaş bir robot hareketi sağlayan statik yürüyüş, orta hızlarda hareket sağlayan dinamik ve simetrik yürüyüş çeşitleri olan tırıs ve rahvan yürüyüşler ve son olarak, robotun daha yüksek hızlarda hareketine imkân veren asimetrik eşkin yürüyüş, dörtnala ve sıçrama olarak sınıflandırılabilir. Bu temel dört ayaklı yürüyüş çeşitlerinin ilgili görseller üzerinden detaylı tanıtımı aşağıda sunulmuştur.

Statik Yürüyüş (Walking)

Statik yürüyüş, genel olarak daha yavaş ancak denge açısından daha kararlı bir yürüyüştür. Çünkü, emekleme (crawl) yürüyüş olarak da adlandırılan statik yürüyüşün herhangi bir anında, zemin ile temas halinde (yani destek evresinde) en az üç ayak vardır. Bir ayak zeminden yükselip adım atarken, diğer üç ayak zemindedir. Bir ayak adım hareketi için uçuş evresine başladığında, diğer ayaklar destek evresindedir ve aynı ayak tekrar destek evresine geçince, bir sonraki ayak uçuş evresine başlar. Bu şekilde tüm ayaklar adım hareketlerini sıralı bir şekilde gerçekleştirir. Bu yürüyüşte, ayaklar çoğunlukta destek evresinde olduğu için, destek ve uçuş evrelerine ait süreleri uygun oranlarda ayarlanmalıdır. Ayrıca, istenen uzuvların hareketliğinin sağlanabilmesi için kinematik kısıtlar göz önüne alınmalıdır. Statik yürüyüşte, bir ayak uçuş evresinde iken, diğerleri zemin ile temas halinde gövdeyi süreksiz olarak ileri hareket ettirirler. Dinamik yürüyüşlerin aksine, destek poligonu üçgen şeklindedir ve gövde ağırlık merkezinin iz düşümü bu üçgenin alanı içinde tutularak, dengenin korunması kolaydır. Özellikle at, köpek gibi birçok hayvan için statik yürüyüş, düzensiz arazilerde tercih ettikleri yüksek hız gerektirmeyen, standart bir yürüyüştür. Kuyruk ve baş hareketleri ile, ağırlık merkezlerinin destek üçgeni içinde kalmasını kolayca sağlayabilirler. Ayrıca, çok yönlü zorlu hareketler ve ani ivmelenmeler gerçekleşmediği için, statik yürüyüş enerji tüketimi bakımından verimli bir yürüyüştür (Santos ve Jimenez, 1995).

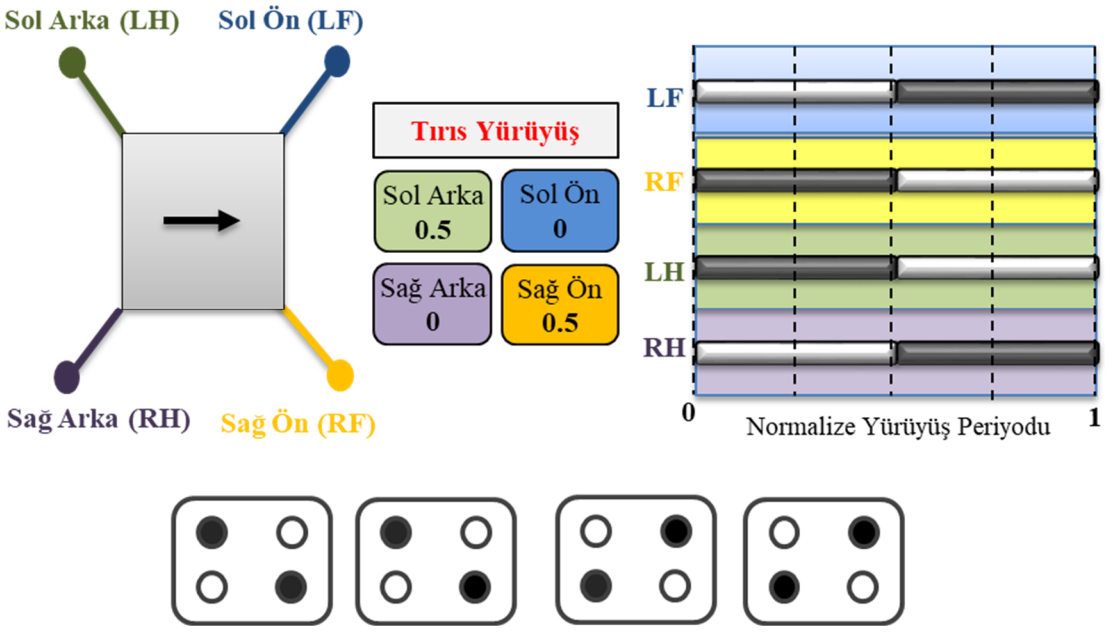


Şekil 5.8. Statik yürüyüşe ait faz farkları, yürüyüş diyagramı ve ayak dizilimleri

Dört ayaklı statik yürüyüşün görev faktörü en az $\beta = 0.75$ olur. Robotun denge kararlığını artırmak amacıyla, bir bacağın adım hareketini tamamlaması ile sıradaki diğer ayağın uçuş evresine başlaması arasında bir gecikme tanımlanırsa, görev faktörü 0.75'ten fazla olur ve dolayısıyla gövde hızı düşer. Şekil 5.8'de statik yürüyüşe ait bacaklar arasındaki faz farkları, yürüyüş periyodu sürecinde ayakların destek (siyah renk) ve uçuş (gri renk) evrelerini belirten yürüyüş diyagramı ve ayak dizilimlerine ait görseller belirtilmiştir. Bacaklar, numaralandırma yerine daha anlaşılır olması amacıyla kısaltmalar kullanılarak tanımlanmıştır. Statik yürüyüş için, Sol Ön (LF)-Sağ Ön (RF)-Sol Arka (LF)-Sağ Arka (RF) hareket dizilimi (Şekil 5.7'deki 1-2-3-4 dizilimi) tercih edilmiştir.

Tırıs Yürüyüş (Trot Gait)

Tırıs yürüyüş, sağ ve sol çapraz (diyagonal) bacakların birlikte (senkronize) hareket ettiği, simetrik, statik yürüyüşe göre daha hızlı bir yürüyüş çeşididir. Yürüyüş boyunca iki ayak yerde destek evresinde iken, diğer iki ayak uçuş evresinde olduğu için destek üçgeni yerine destek çizgisi oluşur. Bu sebeple denge açısından kararsız bir dinamik yürüyüştür. Ancak, destek evresinde çapraz bacakların olması, diğer dinamik yürüyüşlere göre daha dengeli bir hareket sağlar. Bu durum, enerji tüketimi ve hız arasında daha optimal çözümler sunabilir. Bu nedenle tırıs yürüyüş, dört bacaklı robot için yaygın kullanılan ve temel bir yürüyüş çeşididir (Harris ve De Ruffieu, 2016).



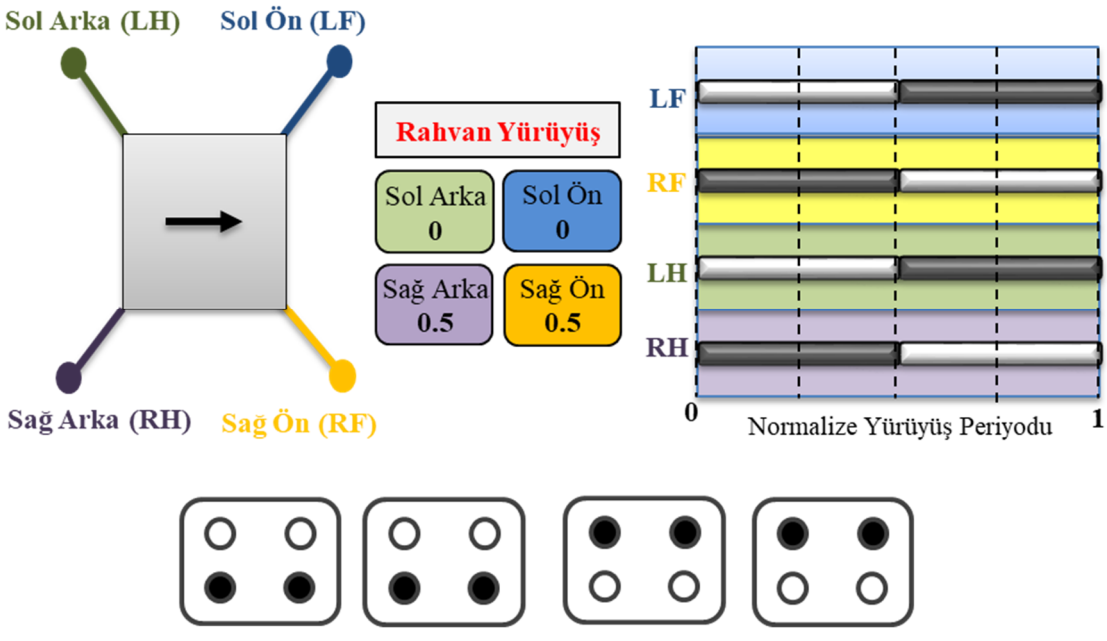
Şekil 5.9. Tırıs yürüyüşe ait faz farkları, yürüyüş diyagramı ve ayak dizilimleri

Tırıs yürüyüşte, destek veya uçuş evresindeki ayak sayısının, toplam ayak sayısına oranı aynı ve sabit olduğu için görev faktörü en az $\beta = 0.5$'tir. Şekil 5.9'da tırıs yürüyüşe ait bacaklar arasındaki faz farkları, yürüyüş periyodu boyunca ayakların destek ve uçuş evrelerini belirten diyagram ve ayak dizilimlerine ait görseller sunulmuştur.

Rahvan Yürüyüş (Pace Gait)

Rahvan yürüyüş, tırıs yürüyüşten farklı olarak sağ-sol çapraz ayakların aksine, yanal (lateral) ayakların birlikte senkronize hareket ettiği, tırıs yürüyüş ile aynı hızda simetrik bir yürüyüş çeşitlidir. Yürüyüş boyunca, sırasıyla sağ veya sol taraftaki ayak çifti destek evresinde, diğer yandaki ayaklar ise uçuş evresindedir. Tırıs yürüyüşe benzer şekilde, destek üçgeni yerine destek çizgisi oluşur. Ancak destek evresi yanal ayaklar ile sağlandığı için daha kararsız durumlar oluşabilir. Yanal ayak çiftinin, çapraz çifte kıyasla, destek evresinde robot gövdesini daha fazla ileri itme gücü sağlayabilmesi, rahvan yürüyüşün avantajı olarak söylenebilir. Hayvanların da sıklıkla sergilemediği rahvan yürüyüş, öncelikli yürüyüş olan tırısa nazaran nadiren tercih edilir. Atlar, özel eğitilerek rahvan yürüyüş gerçekleştirebilirler ve binici açısından çok rahatsız edici bir yürüyüştür.

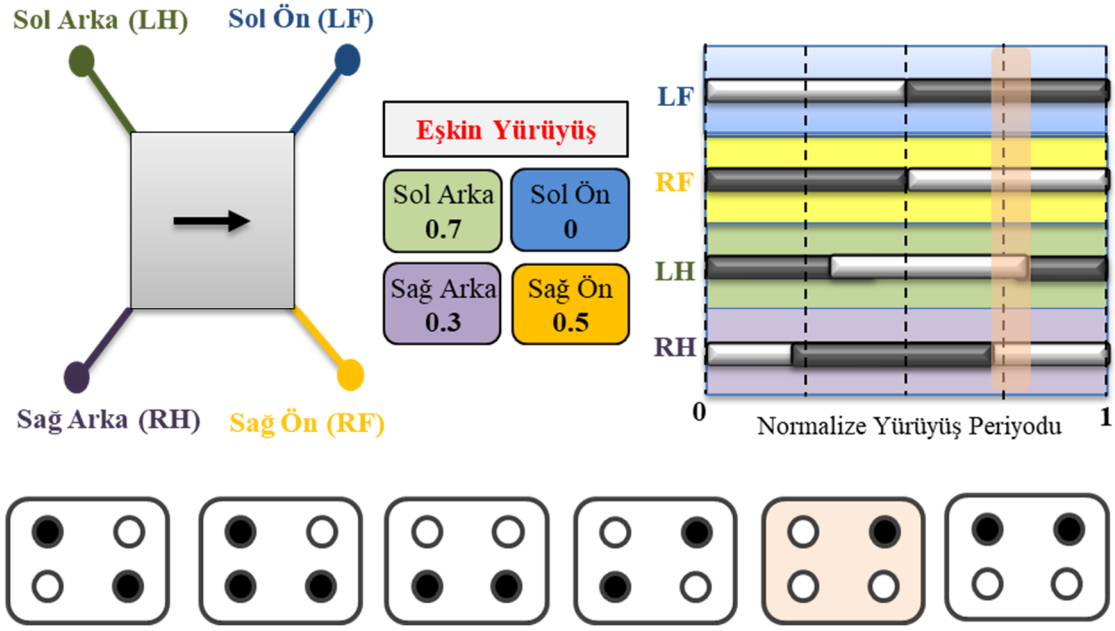
Tırısa benzer şekilde görev faktörü en az $\beta = 0.5$ olur. Şekil 5.10'da rahvan yürüyüşe ait bacaklara ait faz farkları, yürüyüş periyodu boyunca ayakların destek ve uçuş evrelerini belirten diyagram ve ayak dizilimlerine ait görseller sunulmuştur.



Şekil 5.10. Rahvan yürüyüşe ait faz farkları, yürüyüş diyagramı ve ayak dizilimi

Eşkin Yürüyüş (Canter Gait)

Eşkin yürüyüş, tırıs ve rahvan yürüyüşün aksine, yürüyüş periyodu içinde üç ayak uçuş evresinde iken, diğer ayağın belli bir süre tek başına destek evresinde olduğu asimetrik ve dinamik bir yürüyüş çeşitlidir. Toplam uçuş evresi daha fazla olduğu için görev faktörü azalır, bu sayede tırıs ve rahvan yürüyüşe göre ortalama gövde hızı artar. Ön ayaklar, tırıs yürüyüş ile benzer hareket gerçekleştirir, ancak arka ayakların toplam destek evre süresi azalır. Eşkin yürüyüş, aynı yürüyüş periyoduna sahip simetrik tırıs yürüyüşten, göreceli olarak daha hızlı ve daha kararsız asimetrik yürüyüşler için bir geçiş yürüyüş olarak tanımlanabilir. Tırısa kıyasla daha hızlı ancak dörtnala koşmadan daha yavaş tempolu bir yürüyüştür. Dört bacaklı yürüyen hayvanların sıklıkla sergilediği, doğal bir yürüyüştür. Eşkin yürüyüş dizilimi, hem çapraz hem de yanal bacak çiftlerinin birlikte hareket ettiği durumları da içerir (Bhatti ve ark., 2017).

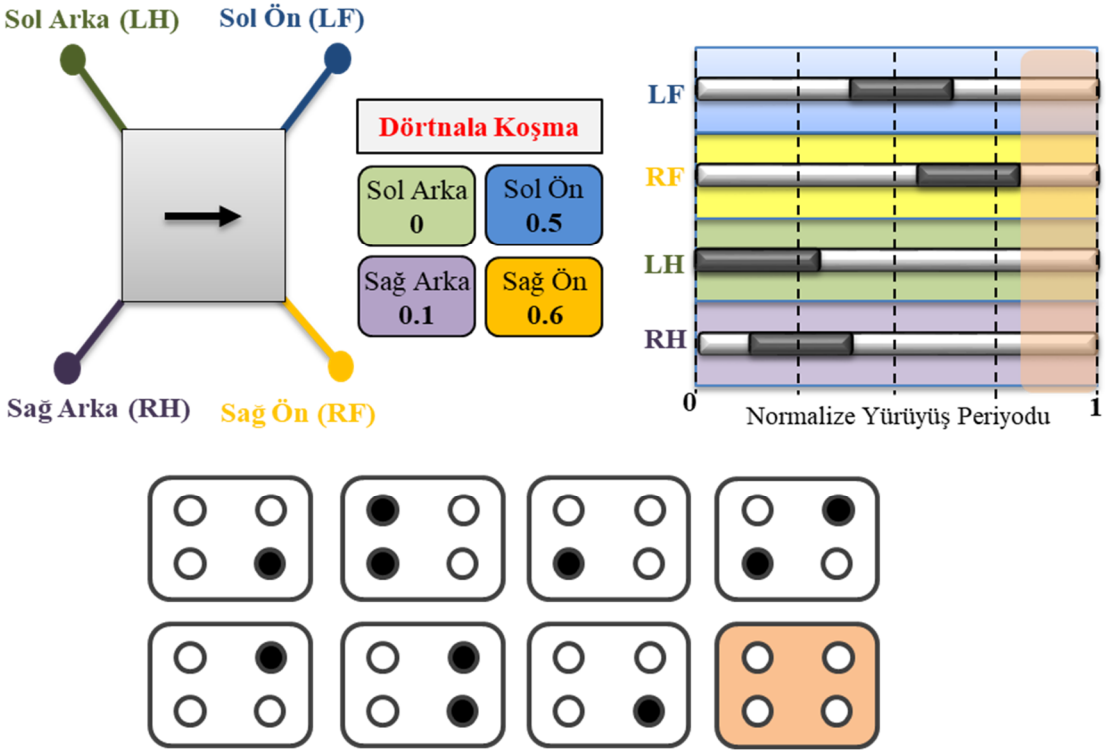


Şekil 5.11. Eşkin yürüyüşe ait faz farkları, yürüyüş diyagramı ve ayak dizilimi

Şekil 5.11'de eşkin yürüyüşe ait bacaklar arası faz farkları, ayakların destek ve uçuş evrelerini belirten yürüyüş diyagramı ve ayak dizilimlerine ait görseller verilmiştir. Eşkin yürüyüşte görev faktörü, sadece tek bacağın destek evresinde olduğu (Şekil 5.11'deki turuncu alan) süreye bağlı olarak $\beta < 0.5$'den daha küçük, yaklaşık $0.4 \sim 0.5$ arasında olur. Böylece, daha yüksek bir ilerleme hızı elde edilmesine karşın, robotun denge kararlığı azalır veya değişkenlik gösterebilir.

Dörtnala Koşma (Gallop)

Dörtnala koşma; tırıs/rahvan yürüyüşteki simetrik adım dizilimlerini ve sıçrama, eşkin yürüyüşlerdeki gibi simetrik olmayan dizilimleri içeren, genellikte tek ayağın destek evresinde olduğu, yüksek hızlara çıkabilen, asimetrik bir dinamik koşma çeşidir. Ön bacaklar arası faz farklarına göre değişen, enine (transverse) ve dönel (rotary) dörtnala koşma olmak üzere, farklı hızlarda iki farklı dörtnala hareket vardır. Atlar, sıklıkla enine dörtnala hareketi tercih ederken, çita ve antilop gibi yüksek hızlı kara canlıları yüksek hızlarda dönel dörtnala hareketi sergilerler. Koşmanın, yürüyüşe göre en belirgin farkı, hareket süresince tüm ayakların aynı anda yerden kesildiği durumların olması denebilir. Tüm ayakların uçuş evresinde olduğu bu durumda, destek üçgeninden veya çizgisinden söz edilemeyeceği için oldukça kararsız bir gövde hareketi oluşabilir. Ayrıca, destek evrelerinde, zemin tepki kuvvetlerinden ve yerçekiminden kaynaklı yüksek momentler oluşur. Bu nedenle gövde, yürüyüş döngüsü buyunca dengelenmeye muhtaçtır. Dengeli bir dörtnala koşma için esnek uzuvlu yapılara ve gelişmiş dinamik kontrol yöntemlerine ihtiyaç vardır. Bu sebeple, yüksek hız avantajı sunabilmesine rağmen, dörtnala koşma bacaklı robotikte yaygın uygulanamamaktadır. Boston Dynamic firmasının geliştirdiği *WildCat* isimli dörtnala koşabilen robot, nadir uygulamalardandır (Ubellacker, 2016).

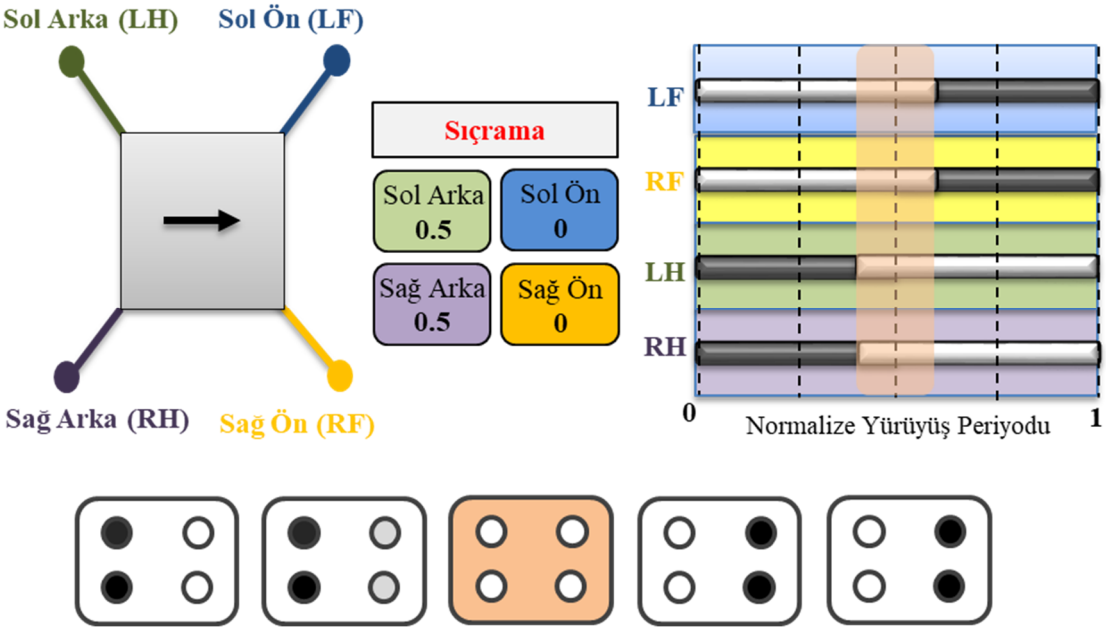


Şekil 5.12. Dörtnala koşmaya ait faz farkları, yürüyüş diyagramı ve ayak dizilimi

Şekil 5.12'de dörtnala koşmaya ait, bacakların birbirlerine göre faz farkları, ayakların destek ve uçuş evrelerini belirten yürüyüş diyagramı ve ayak dizilimlerine ait görseller verilmiştir. Tüm ayakların yerden kesildiği, destek evresinin oluşmadığı durumların (Şekil 5.12'deki turuncu alan) süresine bağlı olarak dörtnala koşmanın görev faktörü $\beta < 0.5$'den daha küçük, yaklaşık 0.3 olarak gerçekleşir.

Sıçrama (Bound)

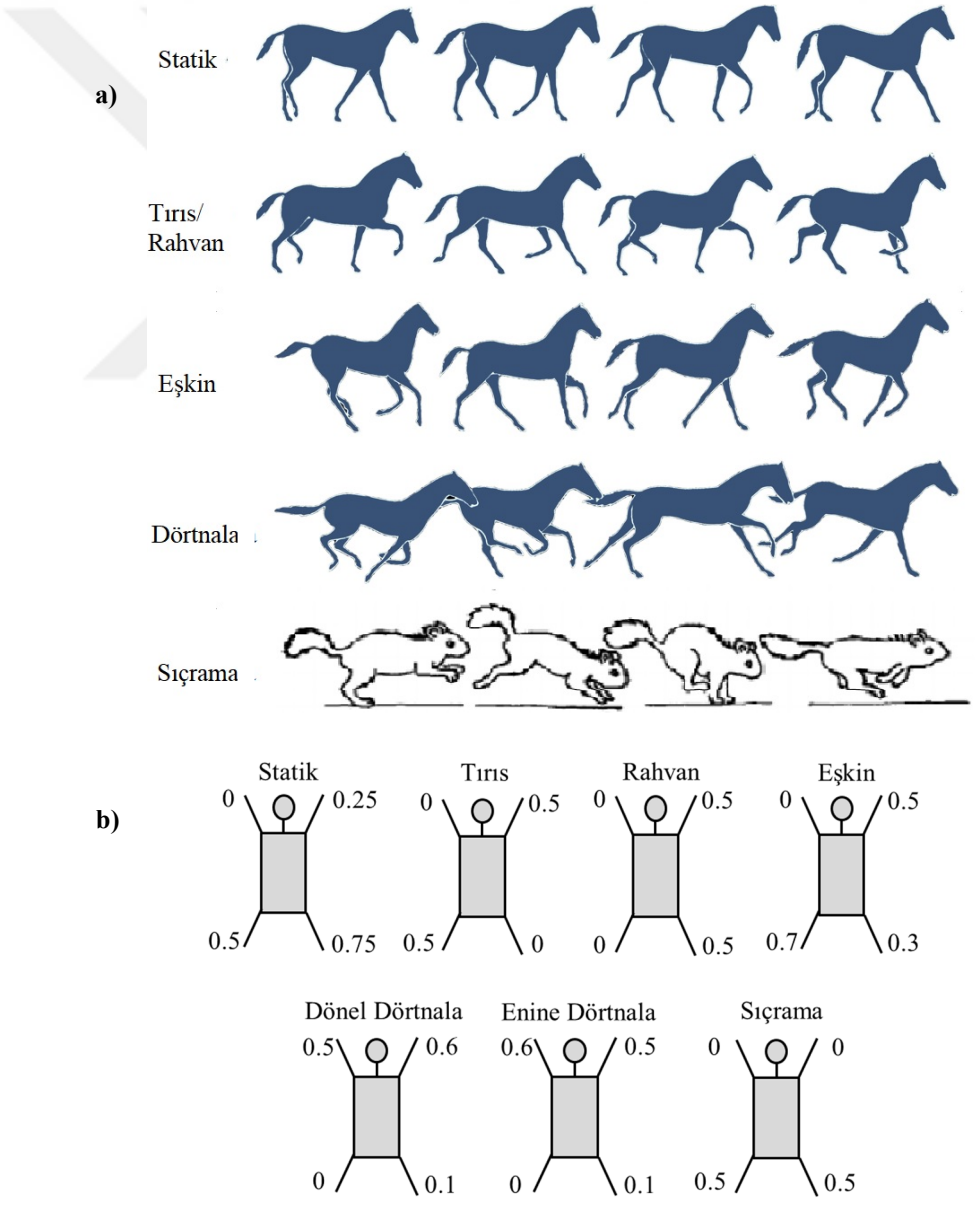
Genellikle, küçük boyutlarda ve ani hızlanabilen tavşan, sincap gibi hayvanların sergilediği sıçrama (veya zıplama) hareketi; ön veya arka ayakların bir çift halinde hareketi ile gerçekleşen ancak asimetrik olarak tanımlanan, robotun boyutlarına bağlı olarak çok yüksek hızlara imkân verebilen, dinamik bir harekettir. Arka ayaklar destek evresinde iken, gövdeyi havadaki ön ayaklar ileriye iter. Destek evresi arka ayaklardan ön ayaklara geçerken, tüm ayakların yerden kesildiği ve gövdenin yerden yükseldiği bir durum oluşur. Bacakların gövde hareketine etkisi olmayacağı bu durum, tam bir uçuş evresi olarak tanımlanamaz. Sıçrama ile yüksek hızlara ulaşılabilir, ancak destek çizgisi ile gövde ağırlık merkezi arasındaki mesafenin genellikle fazla olması, yer çekiminin etkisiyle büyük ve değişken kararsızlıklara sebep olabilir. Kısa adım mesafeleri seçilse bile gövdenin yunuslama (pitch) kararlılığı bozulabilir. Bu nedenle, dörtnala koşmada olduğu gibi, hareket süresince gövde dengelenmeye muhtaçtır (Ubellacker, 2016).



Şekil 5.13. Sıçrama ait faz farkları, yürüyüş diyagramı ve sıralaması

Şekil 5.13'te sıçrama hareketine ait, bacakların birbirlerine göre faz farkları, ayakların destek ve uçuş evrelerini belirten yürüyüş diyagramı ve ayak dizilimlerine ait görseller sunulmuştur. Destek evresinin ön veya arka ayak çiftleri ile gerçekleştirilmesine rağmen, tüm ayakların yerden kesildiği ve gövdenin havalandığı sıçrama durumu (Şekil 5.1.12'deki turuncu alan), destek evresinin yürüyüş periyodu içindeki oranının azalmasına neden olur. Yani, sıçrama hareketinde görev faktörü $\beta<0.5$'den oldukça küçük, yaklaşık 0.2 olarak gerçekleşir.

Dört ayaklı kara canlılarının yaygın olarak sergilediği temel yürüyüşler; statik, tırıs, rahvan yürüyüşleri ile dörtnala koşmaya ve sıçrama hareketine ait görseller ve bacakların birbirlerine göre durumunu tanımlayan faz farkları Şekil 5.14'te verilmiştir.



Şekil 5.14. Temel dört ayaklı yürüyüşlere ait **a)** görseller ve **b)** faz farkları

5.3. Yürüyüş Planlaması ve Kontrolü

Dört ayaklı hayvanların üstün hareket kabiliyetleri ile zorlu arazi şartlarında ustalıkla sergiledikleri çevik hareketler, araştırmacıların dört ayaklı yürüyüş (quadrupedal locomotion) çalışmalarına ilham kaynağı olmuştur. Yürüyüş planlaması, dört ayaklı hareket ve kontrolü için kritik, zorlu bir konudur. Referans yürüyüş planlamasının amacı, istenen yürüyüşü gerçekleştirmeye yönelik adım hareketlerini ve bu hareketleri sağlayacak olan eklemler için uygun açısal konumları üretmektir. Kontrolcü tasarımının amacı ise, eklemlerin denetimini sağlayarak, arzu edilen kriterlere uygun ve gövde dengesini koruyarak ideal bir yürüyüşü kararlı bir şekilde sürdürmektir.

Doğadaki dört ayaklı canlıların sergiledikleri yürüyüşlerden ilham alarak gerçekleştirilen yürüyüş planlamaları; minimum enerji tüketimi, optimum yörünge hesaplaması ve makine öğrenmesi gibi konuları da içerir. Böylece, hayvan yürüyüşlerine benzer ve onların hareketleri ile uyumlu eklemlere ait açısal konum değişimlerinin üretilmesi hedeflenir. Doğal bir yürüyüş planlaması elde etmek için; hareketin sürekli ve dengeli olması, eklem hareketliliğinin hayvanlara benzer şekilde belli alt ve üst limitler arasında sınırlandırılması ve adım hareketinin yürüyüş boyunca tekrarlanabilir olması gibi temel kriterler dikkate alınır (Mishra, 2014).

Muybridge (1899), atların koşma hareketlerini resimleyen ve bacaklarını nasıl hareket ettirdiğini inceleyen ilk araştırmacıdır. 19. yüzyıldan itibaren, çeşitli hayvanların periyodik hareketlerini tanımlamak ve yürüyüş analizi yapabilmek için farklı yürüyüş örüntü (gait patterns) modellerini önermiştir (Abourachid, 2003). Coros ve ark. (2011), bir köpeğin farklı yürüyüş modellerini, grafiksel yazılımlar ile başarılı bir şekilde simüle etmişlerdir. Elde edilen bulgular, özellikle köpek ve benzer boyutlardaki hayvanların yürüyüşü ile ilgili çalışmalara değerli katkılar sunmuştur. Ancak, hayvanların kinematik/dinamik yapılarının ve çalışma prensiplerinin farklı ve karmaşık olması sebebiyle, onların hareket kabiliyetlerini bir robotik sisteme aktarabilmek, halen ciddi zorluklar içermektedir (Lee, 2011; Maes ve Abourachid, 2013).

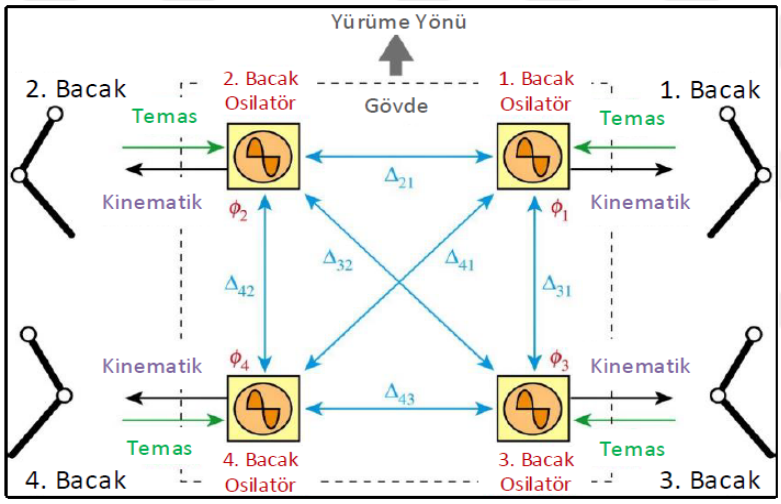
Bacaklı robotlar için hareket planlama yöntemlerini, temel yaklaşımlarına göre üç ana başlıkta incelemek mümkündür. Bunlar; yaygın olarak kullanılan yörünge tabanlı analitik ve beynin sinir sistemini (neural system) modelleyen yöntemler, son yıllarda geliştirilmeye devam edilen sezgisel (heuristics) yöntemler, örneklemeye dayalı optimizasyon (sampling-based optimization) ve makine öğrenmesi (machine learning) temelli yöntemlerdir.

Genel olarak, bir referans yürüyüş yörüngesini oluşturmak için, sistematik bir şekilde sürekli kendini tekrar eden, periyodik ve ritmik hareketleri üreten analitik yöntemler kullanılır. Literatürde dört ayaklı yürüyüşler için eliptik, karışık parabol ve kompozit sikloid eğrisi şeklinde adım yörüngesi üreten yöntemler mevcuttur. Aynı adım yörüngesi ile yürüyüş boyunca benzer bir hareket elde edilir. Sistemin doğrusal olmayan kinematiği nedeniyle eklem hareketliliği, referans adım yörüngesine bağlı ters kinematik bağıntılar ile kolayca elde edilemeyebilir. Bu sebeple, doğrudan eklemlerin açısal konumlarını veren, üçüncü dereceden polinom yaklaşımı ile adım yörüngesi tasarlama yöntemleri de literatürde mevcuttur. Yürüyüş alanındaki engebeler gibi olası kısıtlamalar ile başa çıkabilmek veya analitik hesaplama yükünü azaltabilmek için, referans adım yörünge profilini tekrar düzenleyebilmek amacıyla enterpolasyon yapılabilir. Fiziksel olarak gerçekleştirilebilir bir adım hareketi üretebilmek için, enterpolasyon fonksiyonlarının uygun seçilmesi gerekir (Gor ve ark., 2015b).

Yaygın olarak kullanılan diğer bir referans yörünge sentezi yöntemi, beynin sinir sisteminden esinlenilerek geliştirilen Merkezi Örüntü Üretimi (MÖÜ, Central Pattern Generators, (CPG))'de bacaklı robotik çalışmalarında oldukça benimsenmiştir. Yürüyen robotlar üzerine yürütülen sinir sistemleri tabanlı çalışmalarda, periyodik hareketler üretmek için MÖÜ kullanılır ((Taga, 1995; Righetti ve Ijspeert, 2008). Barasuol ve ark. (2013), MÖÜ tabanlı bir yörünge üreteci kullanarak, dört ayaklı yürüyüş için bir kontrol algoritması sunmuşlardır. MÖÜ yönteminde, referans sentezlemek için sinirsel ve doğrusal olmayan osilatörler kullanılır. MÖÜ, diferansiyel bir denklem sistemi ile temsil edildiğinden, bir yörünge elde etmek için denklemlerin sayısal olarak çözülmesi gerekir. Bu sebeple sinir tabanlı yöntemler, robotun hareket kontrolü için basit ve sağlam çözümler sunabilmesine rağmen, mühendislik alanında uygulamaları oldukça zordur (Tymoshchuk ve Paterega, 2009). Righetti ve Ijspeert (2008), dört ayaklı yürüyüş için yaygın kullanılan Hopf osilatörü tabanlı bir MÖÜ yöntemi sunmuşlardır. Denklem (5.3)'te Hopf osilatörü'ne ait MÖÜ mimarisi formüle edilmiştir.

$$\dot{x} = \alpha\left(1 - \frac{4x^2}{{L_X}^2} + \frac{y^2}{{L_y}^2}\right)x + \omega x$$
$$\dot{y} = \beta\left(1 - \frac{4x^2}{{L_X}^2} + \frac{y^2}{{L_y}^2}\right)y - \omega x + \sum \Delta_{\emptyset ijy_i} \qquad (5.3)$$
$$\omega = \frac{\omega_{destek}}{e^{-by} + 1} + \frac{\omega_{uçuş}}{e^{by} + 1}$$

Burada, β ve α değişkenleri osilatörün çıktısı olan x ve y değişkenlerinin limit çevrime yakınsama hızını belirler. L_X, adım uzunluğu ve L_y, adım yüksekliğidir. ω, osilatörün frekansını (ω_{destek}, ayağın destek evresindeki, $\omega_{uçuş}$, uçuş evresindeki frekansını) belirtir, b ise, destek ve uçuş evresi arasındaki geçiş hızını tanımlayan pozitif ve sabit bir değerdir. $\Delta_{\emptyset ij}$, bacak osilatörleri arasında bağlantıyı sağlayan yürüyüşün faz farklarını temsil eden bağlantı matrisidir. $\emptyset_i$, bacaklar arası faz değişimini ifade eder. Şekil 5.15'de MÖÜ mimarisini şematik gösterimi ve tırıs yürüyüşe ait faz farklarını içeren örnek bir bağlantı matrisi verilmiştir (Bakırcıoğlu, 2020). Şekilden de anlaşılacağı üzere, osilatör bağlantı matrisi ayakların konum bilgilerini kullanarak, faz farklarına göre bacak ösilatörleri arasında bir ilişki kurar. Ijspeert (2008), MÖÜ hakkında kapsamlı bir derleme çalışması sunmuştur.



$$\Delta_{\emptyset ij} = \begin{bmatrix} 0 & \pi & 0 & \pi \\ \pi & 0 & \pi & 0 \\ 0 & \pi & 0 & \pi \\ \pi & 0 & \pi & 0 \end{bmatrix}$$

Şekil 5.15. MÖÜ mimarisini şematik gösterimi ve tırıs yürüyüşe ait bağlantı matrisi

Yürüyüş planlaması için, basit modeller üzerinden sezgisel yöntemlerin kullanımı oldukça yaygındır. *Scout II* (Poulakakis ve ark., 2005) ve *KOLT* (Estremera ve Waldron, 2008) isimli robotların sıçrayarak ve dörtnala koşma gibi dinamik yürüyüşlerinde sezgisel yöntemler kullanılmıştır. Seok ve ark. (2013), çok yüksek hızlarda koşabilen *MIT Cheetah* robotun hareket planlaması ve kontrolü için tasarlanmış kuvvet profilleri yöntemini kullanmışlardır (Park ve Kim, 2015). Sezgisel yöntemler, matematiksel olarak ifade edilmesi zor ve karmaşık yürüyüş problemlerinin çözümünde halen oldukça kullanışlı yöntemlerdir. Bacaklı robotların yürüyüş hareketlerini manuel olarak tasarlamak ve kontrol etmek mümkündür, ancak iyi çözümler bulmak oldukça uzun ve zor olabilir. Bu sebeple, yürüyüş planlama problemine otomatik olarak optimize edilmiş çözümler üreten yöntemler daha hızlı ve güçlüdür (Gehring, 2017).

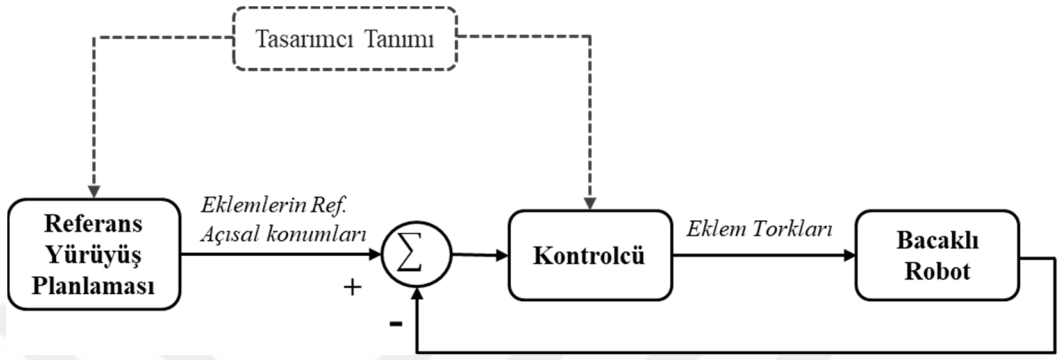
Örneklemeye dayalı optimizasyon yöntemleri, yürüyüş ve kontrol parametrelerini manuel olarak ayarlamak ve uygun hareket desenlerini seçmek yerine, uygun değerleri otomatik olarak ayarlayan optimizasyon algoritmalarının geliştirilmesini içerir. Doğadaki hayvanların sergiledikleri öğrenme ilkelerinden esinlenilerek tasarlanan, sezgisel amaç fonksiyonları kullanılır. Mastalli (2017), dört ayaklı koşma, sıçrama gibi yüksek dinamik karakteristiğe sahip hareketler için optimal yürüyüş planlaması ve kontrol sağlayan, örneklemeye dayalı bir optimizasyon algoritması sunmuştur.

Makine öğrenmesi temelli yöntemler, bacaklı robotun geçmiş dinamik hareketlerinden toplanan verileri kullanarak yürüyüş planlaması oluşturmayı amaçlar. Geniş bir ifadeyle makine öğrenmesi, geçmişteki hatalardan kaçınarak yeni doğru kararlar almayı amaçlar. Denetimli ve denetimsiz öğrenme olarak iki farklı uygulaması vardır. Denetimli uygulamada, öğrenme algoritmasının iyi veya kötü yürüyüş örnekleri içeren bir eğitim verisi bulunur. Denetimsiz uygulamada ise hiçbir eğitim verilmez, algoritmanın yürüyüş için gerekli yaklaşımların ne olduğuna kendisinin karar vermesi beklenir. Buchli ve ark. (2017), yürüyüş planlaması için analitik çözümler içermeyen, dinamik öğrenme metodu (reinforcement learning) önermişlerdir (Orsolino, 2019).

Çok serbestlik dereceli, doğrusal olmayan, çok girişli-çıkışlı robotları kontrol etmek karmaşıktır. Bacaklı robotlar için en önemli zorluk, robotun zemin ile süreksiz bir şekilde temas halinde hareket ederken denge kararlığının sağlanmasıdır. Genel olarak bacaklı yürüyüş için geliştirilen bir kontrolcünün amacı, robotun istenen referans hızda ve yönde hareket etmesi için uygun bacak ve vücut hareketleri dizisinin kararlı denetimini sağlayabilmek olarak tanımlanabilir. Robotun kontrolü doğrudan referans adım yörünge planlamasına ve kontrolüne bağlı olarak sağlanabilir. Basit yöntemler ile modellenebilse dahi, çok kütleli yapısı nedeniyle, özellikle yüksek hızlardaki karmaşık dinamik hareketler için gelişmiş kontrolcü yaklaşımları gerekir. Ayrıca farklı problemler için farklı kontrolcü yöntemleri gerekebilir. Standart bir kontrolcü ile farklı yürüyüşler ve durumlar için genel bir optimum çözüm elde etmek zordur. Çoğu zaman daha karmaşık ve masraflıdır. Bu sebeple, yürüyüş çeşitline göre hibrit kontrol yaklaşımları geliştirilir.

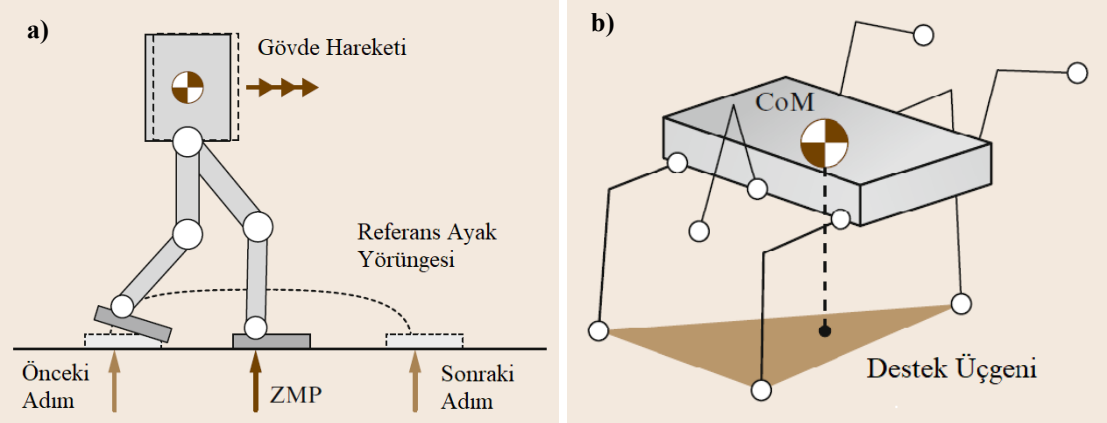
Dört ayaklı bir robot kontrolcüsünün öncelikli tasarım kriteri, robotun referans adım hareketlerini gerçekleştirebilmesi ve düşmeden yürüyebilmesidir. Yürüyüşün kararlılığını korumak için gövdenin yüksekliği ve oryantasyonu gibi değişkenlerin yanı sıra, yürüyüşün yönünü de arzu edilen referans değerlere göre denetleyebilmelidir. Ayrıca, kontrolcünün çevreden veya zeminden gelen küçük bozucu girişlere karşı dayanıklı olması ve enerji tüketimi açısından da yeterince verimli olması istenir.

Bacaklı robotların yürüyüş hareketinin genel kontrol blok diyagramı Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Bu kontrol yaklaşımı dört ayaklı robotlar için de benzer şekildedir. Kısaca açıklamak gerekirse, tasarlanan referans yörüngeyi sağlayacak eklemlere ait açısal konumlar üretilir ve geri beslemeli kontrolü gerçekleştirilir. Tasarlanan kontrolcü, açısal konum hata değerine karşılık gelen eklem tork girişlerini üreterek, sistemi denetler.



Şekil 5.16. Bacaklı robotların yürüyüş kontrolünün genel blok diyagramı

Ayaklı yürüyüş ve denge problemine yönelik, Raibert'ın çalışmalarından sonraki en önemli gelişme, Sıfır Moment Noktası (Zero Moment Point-ZMP) yönteminin sunulmasıdır (Vukobratović ve Borovac, 2004). Zemin düzleminde, ayak ucuna gelen tepki kuvvetlerinin gövdeye göre momentlerinin sıfır olduğu noktayı ifade eden bu yöntem, yürüyüş sistemleri için bir denge kriteri olarak kabul edilmiş, Honda'nın insansı robotu *ASIMO* için başarılı bir şekilde uygulanmıştır. ZMP yöntemi, yaygın olarak iki ayaklı yürüyüş için kullanılmasının yanı sıra dört ayaklı robot gövdesin dengelenmesi içinde kullanılmaktadır (Winkler ve ark., 2015). İki ayaklı yürüyüşün klasik ZMP uygulamalarında, ZMP yürüyüş modelini gerçekleştirmek için, arabalı-masa (cart-table) ve ters sarkaç dengeleme mekanizmaları kullanılmıştır. ZMP, dengeleme kütlesi ile kontrol edilir ve robot tasarlanmış ayak yörüngesinde hareket eder. Modern uygulamalarda ise, öngörülen ZMP yörüngelerine uygun gövde hareketi gerçekleştirilir (Şekil 5.17a). Eklemlerin açısal konumları yerine, ayak ucu yörüngesi referans olarak verilir. Ayak ucu ile gövdenin ters kinematik bağıntılarına göre yürüyüş hareketi tanımlanır. İki ayağın aksine dört ayaklı robotlarda, statik dengeyi koruyabilmek için ayakların planlama seçeneği daha fazladır. Bu nedenle araştırmacılar, statik olarak istikrarlı bir hareket için genellikle yürüyüş planlamasına odaklanmışlardır. Şekil 5.17b'de görüldüğü üzere, gövde ve bacakların atalet etkilerinin ihmal edildiği, gövde ağırlık merkezine (COM) ait iz düşümünün destek üçgeni içinde kalması; düşmemeyi garanti eden ve yaygın kullanılan bir denge kriteridir (Kajita ve Espiau, 2008).



Şekil 5.17. a) Modern ZMP uygulaması ve **b)** Çok ayaklı robotun destek üçgeni

Yürüyüş planlamasını ve kontrolünü ele almanın bir başka yolu ise, yürüyüşü model-tabanlı optimal bir kontrol problemi olarak formüle etmektir. Bu yaklaşımda, sistemin tüm durum değişkenlerini ve eklemlerin hareketini tanımlayan tüm gövde (whole-body) modeli kullanılır. Model tabanlı kontrol performansı çoğunlukla, dört ayaklı robot için tasarlanan dinamik modellere bağlıdır. Tüm dinamikleri tanımlanan bir modelin kullanılması veya basitleştirilmiş bir modelin kullanılması durumuna göre kontrolcü performansı değişkenlik gösterebilir. Model tabanlı yöntemler, bacaklı yürüyüş hareketinin optimal kontrol çözümleri için uzun süredir kullanılmaktadır (Morimoto ve ark., 2003; Remy, 2011; Carpentier ve ark., 2016).

Dört ayaklı robotların denetimi için, yaygın kullanılan geleneksel PID, LQR ve bunların hibrit formları gibi doğrusal kontrolcülerin yanı sıra, yapay sinir ağı ve/veya bulanık mantık tabanlı kontrol teknikleri ile ilgili çalışmalara, adım hareketi için optimal kontrolcü tasarımı çalışmalarının yer aldığı Bölüm 4'te yer verilmiştir. Bunun haricinde, kontrol yöntemleri ile ilgili literatürde son yılarda gerçekleştirilmiş çalışmalardan öne çıkanları aşağıda özetlenmiştir:

Neunert ve ark. (2016), *HyQ* robotunun tüm gövde ve yürüyüş denetimi için; sürekli, ardışık, ikinci dereceden (continuous-time sequential quadratic) bir kontrol problemi formüle ederek, farklı bir yaklaşım önermişlerdir. Tam dinamik model kullanılan bu yöntemin, oldukça hızlı benzetim sonuçlar verebildiğini belirtmişler ancak gerçek zamanlı uygulamasını yapmamışlardır.

Fahmi ve ark. (2019b), yürüyüş planlamasını; robot dinamiğini, eyleyicileri ve eklemlerin hareket limitlerini, zemin temas kuvvetleri de içeren ikinci dereceden bir tüm gövde kontrol problemi (Whole Body Control -WBC) olarak ele almışlarıdır. Önerdikleri yöntemi *HyQ* robotunda deneysel olarak uygulamışlardır. Ayak ucu sürtünme

kuvvetlerine karşı kontrolcünün tepkisini ve robotun kendi kendini yeniden dengeleyebilmesini analiz etmişlerdir. Önerilen yöntemin mevcut yöntemlere kıyasla, yüksek dinamik hareketlerin doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi için daha üstün olduğunu bildirmişlerdir.

Ayrıca Fahmi ve ark. (2019a), WBC yöntemini temel alarak, Yumuşak Arazi Adaptasyonu ve Uygunluk Tahmini (Soft Terrain Adaptation and Compliance Estimation- STANCE) isimli yeni bir algoritma önermişlerdir. Önerilen bu yöntemin WBC'ye göre, zeminin yumuşaklığından kaynaklı belirsizliklerin sebep olduğu denge performansındaki olumsuz etkileri gidererek, arazi bilgisini de kullanarak, *HyQ* robotunun farklı türdeki zeminlerde hareketine olanak sağladığını belirtmişlerdir.

Gehring ve ark. (2017), *ANYmal* isimli robotun farklı yürüyüş çeşitlerinde yürüyüşü ve bu çeşitleri arası geçiş hızlı bir şekilde sağlamak için ardışık, ikinci dereceden, bir formülasyon sunmuşlardır. Bu yöntemin, yürüyüş için sistem dinamiklerini yeterince temsil eden, basit bir ters sarkaç modeli tabanlı ve hiyerarşik gövde kontrolünün kullanıldığı, yüksek doğrulukta ve gürbüz çözümler sunabilen bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir.

Neunert ve ark. (2018), ayak ucu kontak kuvvetlerini de içeren, tam dinamik bir model üzerinden optimal ayak ucu konumlarını hesaplayan, doğrusal olmayan bir tüm gövde model öngörülü (kestirimci) kontrol (whole-body nonlinear model predictive control) yaklaşımı önermişler, *HyQ ve ANYmal* robotlarında deneysel olarak uygulamışlardır. Önerilen yöntemin, periyodik veya düzensiz olan yüksek dinamiklik gerektiren görevler için uygulanabilir olduğunu, gövde kontrolünde yüksek bir performans sunabildiğini belirtilmişlerdir.

Liu ve ark. (2016), dört ayaklı bir robotun, dengeli bir şekilde düzlemsel yürüyüşüne yönelik, zemin tepki kuvvetlerinin ihmal edildiği bir ayak yörünge planlama metodu sunmuşlardır. Robotun, D-H parametrelerini kullanarak kinematik analizini yapmışlar ve yürüyüş simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Konum, hız, ivme değişkenlerine ait elde edilen benzetim sonuçları; robotun kayma/çarpma olmadan düz bir yüzeyde sürekli, düzgün ve dengeli bir yürüyüş sergileyebildiğini göstermiştir.

Li ve ark. (2016), dört ayaklı yürüyüş planlaması ve kontrolü için, hibrit Sıfır Moment Noktası (ZMP) ve Merkezi Örüntü Üretimi (CPG) tabanlı yeni bir kontrol algoritması önermişler ve deneysel olarak doğrulamışlardır. Önerdikleri hibrit CPG-ZMP kontrol algoritmasının, referans gövde yörüngesinin verimli bir şekilde gerçekleştirilebilmesi ve denge kontrolü için katkı sağlayabildiğini belirtilmişlerdir.

Cho ve ark. (2016), geliştirdikleri *Jinpong* isimli, hidrolik tahrikli dört ayaklı robotun yürüyüşü sırasında, dışardan gelen dış kuvvetlere karşı deneyimli bir şekilde direnç gösterebilmesi ve dengesini koruyarak engebeli yüzeylerde yürüyebilmesi için bir metot önermişler ve deneysel olarak doğrulamışlardır.

Owaki ve Ishiguro (2017) Tokyo üniversitesinde, dört ayaklı bir robotun sadece hız parametrelerini değiştirerek, yürüyüş şekilleri arası geçişin (gait transitions) kendiliğinden sağlanabileceğini başarıyla kanıtlamışlardır. Bu çalışma ile birlikte değişken hızların, yürüyüş şekilleri arasındaki geçişlere etkisi tam olarak ortaya konulmuştur. Her bacağın, diğer bacaklardaki yükü algılayarak gövdeyi desteklemeye devam ettiği basit bir yöntem kullanmışlardır. Bu çalışmanın, dört ayaklı robotların hızları değiştiğinde nasıl esnek ve verimli bir yürüyüş gerçekleştirebileceğinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacağını, birçok farklı yaklaşım için temel nitelikte olup geniş bir uygulama alanı bulabileceğini belirtilmişlerdir.

Khorram ve Moosavian (2017), dört ayaklı bir robotun harici dış kuvvetlere karşı gövde dengesini sağlamaya yönelik bir kontrolcü tasarlamışlardır. Düzgün ve engebeli arazi şartlarında harekete uygun, tam dinamik bir robot modeli oluşturmuşlardır. Önerdikleri PD tabanlı kontrolcü, robotun dengesini tekrar sağlayabilmesi için gerekli ivmelenmeleri hesaplayabilmektedir. Maksimum hızlandırmaları hesaplamak için en küçük kareler metodu kullanan, gerçek zamanlı bir optimizasyon algoritması kullanmışlardır. Optimizasyon kısıtları, gövde denge kararlılığının korunması ve ayaklardaki kaymanın önlenmesi olarak belirlemişlerdir. Geliştirdikleri kontrolcüyü ve optimizasyon algoritmasını deneysel olarak test etmişlerdir. Robotun engebeli arazilerde, çok yüksek harici dış kuvvetlere karşı bile konumunu ve yönünü hassas olarak ayarlayabildiğini bildirmişlerdir.

6. DÖRT AYAKLI ROBOTUN DİNAMİK MODELLENMESİ VE YÜRÜYÜŞ SİMÜLASYONLARI

Önceki bölümlerde, dört ayaklı robotların; literatür taraması, kinematik/dinamik analizi, adım hareketinin optimal kontrolü, yürüyüş çeşitleri, planlaması ve kontrolü gibi birçok konu detaylı olarak incelenmiş ve sunulmuştur. Önceki bölümlerdeki çalışmalar temel alınarak, bu bölüm kapsamında; Dört Ayaklı bir Robot (4AR)'un, farklı yürüyüş çeşitleri ile düz ve engebeli yüzeylerde yürüyüş analizine yönelik kapsamlı simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Bir sistemin, nihai olarak seri üretimine geçinceye kadar, gerçek performansının tam anlamıyla anlaşılması zordur. Mekanik sistemler genellikle, tasarım ve geliştirme süreçlerinde farklı gereksinimlere göre test edilir ve doğrulanır. Bu testleri gerçek prototipler üzerinde yapmak maliyetli, zorlu ve risklidir. Bu sebeple, dinamik bir sistemin tasarım doğrulamasını yapmak, verimliliğini artırmak ve maliyetini azaltmak amacıyla ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems)[1] gibi çok kütleli dinamik modelleme programları kullanılır. ADAMS (sanal dinamik modelin tasarlandığı) ve MATLAB (kontrolcünün tasarlandığı ve dinamik modele girişlerin üretildiği) programlarının eş çalıştırılması ile mekanik sistemlerin benzetimi matematiksel formasyonları azaltan güçlü bir simülasyon yöntemdir (Gu ve Chen, 2016). Bu sayede, sistemin hareketi ve kontrolü arasındaki karmaşık etkileşimler incelenebilir, yönetilebilir. Kontrol algoritmalarının hızlı ve etkili bir şekilde tasarlanmasını, test edilmesini ve sistem performansı üzerindeki etkisinin incelenmesini sağlar. Ayrıca, modelin ve kontrolcünün esnek bir şekilde yeniden düzenlenebilir olması, zamandan ve maliyetten tasarruf sağlar (Brezina ve ark., 2011).

Çok kütleli sistemlerin dinamik analizi ve simülasyonunda yaygın tercih edilen ADAMS programı kullanılarak; deneysel uygulamaları ve testleri başarıyla yapılmış literatürde öne çıkan bir robota (*HyQ2max*) ait fiziksel boyutlar, kinematik yapı ve eyleyici özellikleri dikkate alınarak 4AR'ın dinamik modellemesi gerçekleştirilirmiştir. 4AR'ın yürüyüş kontrolü için, birçok yürüyüş çeşidi için uygulanabilir, adaptif bir PD tork kontrolcü tasarımı MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. ADAMS ve MATLAB programlarının eş çalıştırılması yöntemi kullanılarak düz ve engebeli yüzeylerde yürüyüş benzetimleri yapılmış, kapsamlı değerlendirmeler sunulmuştur.

[1] MSC Software Corporation® ADAMS Release Guide, 2018

Dört ayaklı robotların, dinamik modeller üzerinden MATLAB ve ADAMS yazılımlarını kullanılarak, kontrolcü tasarımı ve yürüyüş analizleri hakkında literatürde öne çıkan çalışmalardan bazıları şöyledir:

Guan ve ark. (2004), *Biosbot* isimli dört ayaklı robotun yürüyüşü için biyolojik canlılardan esinlenerek bir kontrolcü tasarlamışlardır. Deneysel çalışmaların yanı sıra, MATLAB ve ADAMS yazılımları ile simülasyon çalışmaları da sunmuşlardır.

He ve Ma (2005), ADAMS simülasyon yöntemi ile dört ayaklı bir yürüyüş makinesinin tırıs yürüyüşü için, başlangıç şartlarının destek evresi üzerindeki etkisini araştırmışlar ve en uygun başlangıç şartlarını önermişlerdir.

Rong ve ark. (2012b), dört ayaklı bir robotun sagital düzlemde, ileri yönlü, düz yürüyüşüne yönelik, MATLAB/Simulink ortamında bir kinematik analiz ve simülasyon çalışması sunmuşlardır.

Hua ve ark. (2012), hesaplamaları MATLAB'da, simülasyonları ise ADAMS yazılımında gerçekleştirdiği, dört ayaklı bir robotun statik yürüyüşü ile ilgili bir çalışma sunmuşlardır. Benzer çalışmalara kıyasla daha uygun olduğunu belirttikleri, farklı bir adım yörüngesi önermişlerdir.

Lee (2014), sistemin kinematiğini MATLAB ortamında kodlayarak, dört ayaklı bir robotun statik yürüyüşüne ait simülasyon çalışması gerçekleştirmiştir. Düzlemsel bir dört ayaklı robotun, temel Newton yöntemleri kullanarak, dinamik denklemlerini elde etmiştir. Ancak daha doğru sonuçlar elde etmek için, daha gerçekçi fiziksel parametreler ile ayak ucuna etkiyen zemin tepki kuvvetlerinin de dahil edildiği analizler yapılması gerektiğini belirtmiştir.

Rong ve ark. (2014), hidrolik tahrikli dört ayaklı bir robot için parametre tasarımı gerçekleştirdikleri çalışmalarında, ters kinematik çözümlemeler için MATLAB'ı, eklemlerin maksimum kuvvet gereksinimi belirlemek için ise, ADAMS'ı kullanmışlardır. Ayrıca, doğruların ve poligonlarının birleşimi şeklinde tasarlanabilen bir adım yörüngesi tanıtmışlardır.

Bu tez kapsamında, gerçeğe daha yakın ve hızlı bir sanal modelleme imkânı sunabilen ADAMS yazılımında tasarlanan 4AR'ın dinamik model ile MATLAB/Simulink ortamında tasarlanan ve destek/uçuş evreleri için değişken kazançlara sahip adaptif PD tork kontrolcü eş zamanlı çalıştırılarak; robotun, düz bir zeminde farklı yürüyüş çeşitlerinin ve engebeli bir yol parkurunda statik yürüyüşünün ayrı ayrı simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle, 4AR'ın düz bir zeminde ve dört farklı yürüyüş çeşitleri için düzlemsel olarak yürüyüş simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmaları sonucunda, sisteme ait tüm durum değişkenlerinden (gövde, eklemler, ayak ucu konumları vb.) elde edilen sonuçlar grafiksel olarak sunulmuş ve ayrıntılı olarak incelenmiştir. Robotun konum, hız, tork vb. değişkenlerinin incelenmesinin yanı sıra, değişkenlerin referans değerlerine göre hata değerlerinin değişimi de araştırılmıştır. Sonrasında, farklı düzensizliklere sahip engebeli bir yol parkurunda dengeli ve kararlı yürüyüş kontrolüne yönelik bir kontrol mimarisi geliştirilmiş, 4AR'ın engebeler içeren bir parkurda statik yürüyüşünün simülasyonu ve detaylı analizi gerçekleştirilmiştir.

6.1. Çok Kütleli Dinamik Modelin Oluşturulması ve Eş Simülasyon

Bölüm 3'te kapsamlı bir şekilde sunulan, 4AR'a ait kinematik ve dinamik denklemleri içeren matematiksel modeller; sistemin tanımlanması ve anlaşılması açısından oldukça faydalıdır, ancak tam bir dinamik modelden farklıdır. Çünkü; uzuvların, kütlelerin yoğunlaştırılmış bir şekilde kütle merkezinde ifade edildiği üniform çubuklar olarak tasarlanması ve birçok sadeleştirmelerin, kabullerin yapılması gibi nedenlerden dolayı matematiksel modeller, gerçek modellerden oldukça uzaklaşabilmektedir. Bu nedenle, özellikle çok serbestlik dereceli sistemlerin daha gerçeğe yakın modellenmesi için dinamik modelleme programları tercih edilir.

4AR'ın dinamik modeli, dinamik sistemlerin simülasyonunda yaygın kullanılan, tüm değişkenlere ait ölçümlerin alınabildiği ve analiz edilebildiği, MSC ADAMS yazılımında oluşturulmuştur. 4AR'ın kinematik yapısı, uzuv boyutları, kütleleri, eklemlerin sönüm ve sertlik değerleri vb. gibi birçok tasarım parametresinin belirlenmesinde; literatürde başarılı deneysel uygulamaları bulunan, *HyQ* (Semini, 2010) robotunun gelişmiş versiyonu olan *HyQ2Max* (Semini ve ark., 2017) isimli bir robota ait parametreler kullanılmıştır. Doğrusal olmayan etkileri de içeren 4AR'ın dinamik modeli, tüm sistem elemanlarının birebirleriyle ve zeminle etkileşimlerini kapsamlı bir şekilde incelenme imkânı verecek şekilde modellenmiştir.

ADAMS ve MATLAB arasında bir eş simülasyon (birlikte çalıştırılması/koşturulması) gerçekleştirmek için, sistem modelinin kurulması ve simülasyon çalışmaları genel olarak üç ana adımda izah edilebilir.

İlk adım; gerekli tüm geometrik parametreleri, kısıtları ve torkları/kuvvetleri içeren, tam olarak tanımlanmış ADAMS modelinin oluşturulması ve sistemin giriş-çıkış

değişkenlerinin tanımlanmasıdır. Durum değişkenlerine, kolayca ayırt edilebilmesi için, birbirinden farklı ve özel karakterler içermeyen isimler verilmelidir. Değişken isimleri program tarafından otomatik de yapılabilmektedir, ancak değişken sayısının fazla olması halinde karışıklıklar olabilmektedir. Öncelikle, çıkışlar yani kontrolcünün denetleyeceği değişkenler belirlenir. Girişler ise, kontrolcünün ürettiği ve dinamik modele gönderdiği değişkenler olarak belirlenir. Böylece, ADAMS modeli ile MATLAB kontrol sistemi arasında haberleşme için kapalı bir döngü tanımlanmış olur. Giriş ve çıkışlar, durum değişkeni tanımlama komutu (state variable) ile oluşturulur. Ayrıca, çıkışlar bir ölçüm değişkenine de tanımlanabilir. Simulink'ten gönderilen, yani kontrolcünün ürettiği değerler kullanacağı için, dinamik modele sabit herhangi bir tork girişi tanımlanmaz.

İkinci adımda; ADAMS/View'de oluşturulan model, bir *CMD* uzantılı dosya ile dışa aktarılır. Bu dosya kullanılarak MATLAB/Simulink sistemin ADAMS model bloğu (plant block) modeli elde edilir. ADMAS bloğu Simulink ara yüzü ile tam uyumlu olduğu için kopyala/yapıştır ile kontrol sistemine kolayca entegre edilebilir. Daha sonra dinamik modelin kontrolüne yönelik, Simulink'te genel bir kontrol sistemi tasarlanır. Bu aşamada, ADAMS'tan aktarılan dosyaların ve MATLAB dosyalarının aynı dizininde çalıştığından emin olunmalıdır. ADAMS'ta tanımlanan giriş-çıkış değişkenlerin diziliş sırasının, Simulink'te elde edilen model ile birebir aynı olması gerektiğine dikkat edilmelidir. Ayrıca, her iki programda, fiziksel büyüklükler için aynı birim standardının kullanılması gerekir. ADAMS'da genellikle SI birimleri kullanılmaktadır. Simulink'te farklı birimler kullanıldığı durumlarda birim dönüşleri yapılmalıdır.

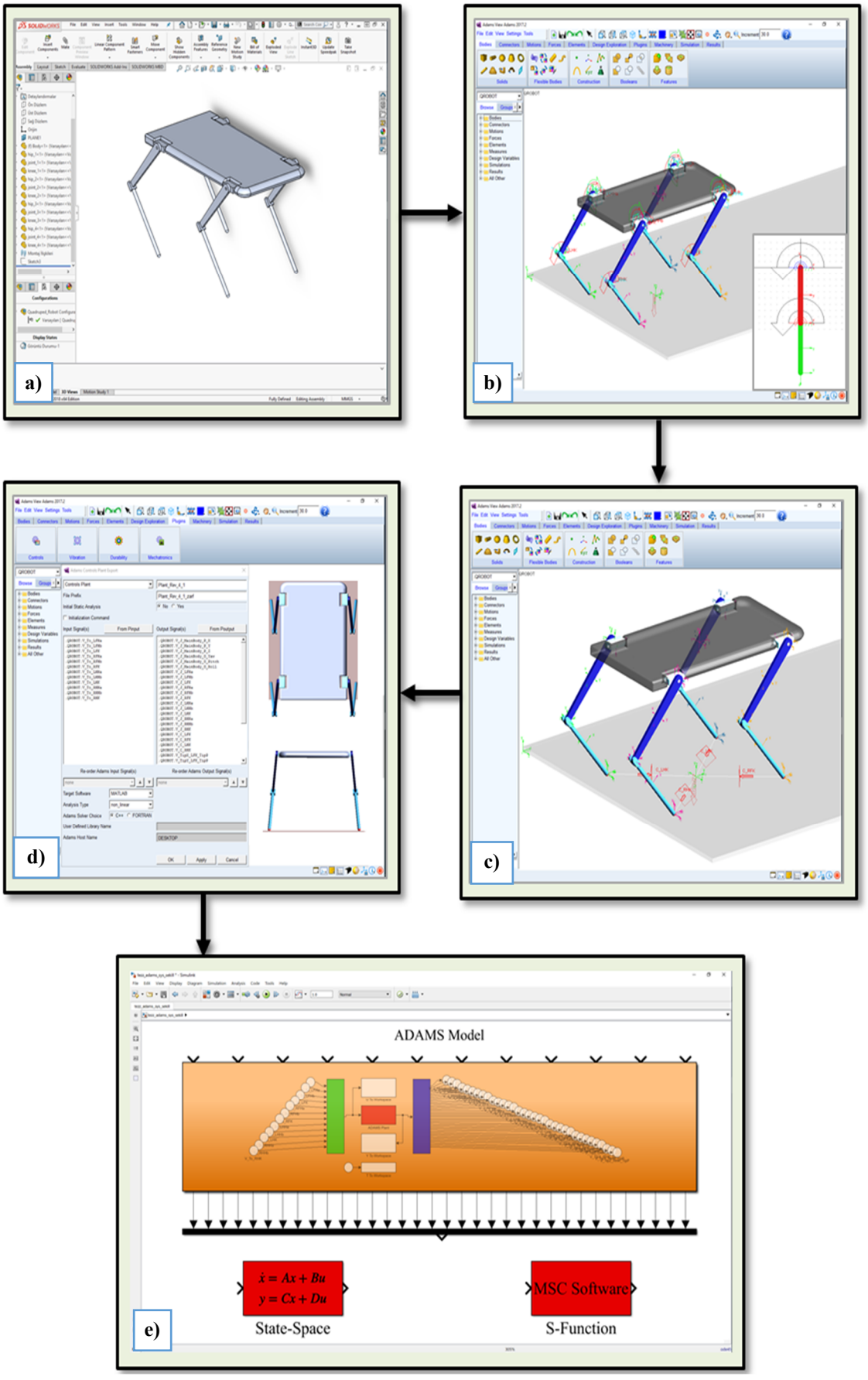
Üçüncü adımda; Simulink dosyası çalıştırılarak, eş simülasyon gerçekleştirilir. Öncesinde, ADAMS tarafından oluşturtulan *m-dosyası* işletilmelidir. Simülasyon süresince ADAMS yazılımı kapalı olarak arka planda çalıştırılabileceği gibi, sistemin hareketini gözlemlemek amacıyla Simulink dosyasıyla birlikte çalıştırılabilme seçeneği de mevcuttur. Ancak bu seçenek işlem yükünü attıracağı için simülasyonu yavaşlatır. Eş simülasyon için dinamik modelin kurulması ve dışa aktarılması ile ilgili tüm aşamalar Şekil 6.1'deki görsellerde belirtilmiş ve detaylı olarak açıklanmıştır.

Başlangıçta, her biri 3 serbestlik dereceli dört bacak ve bir hareketli gövdeden oluşan toplamda 12 serbestlik dereceli 4AR'ın üç boyutlu katı modeli (CAD); koordinat sistemleri, fiziksel geometrisi, boyutları, sınır koşulları, kütleleri ve ataletleri tanımlanarak katı modelleme programında tasarlanmıştır. Katı model, tanımlanan tüm özellikleri ile birlikte *parasolid (*.x_t)* formatına dönüştürülerek, ADAMS/View ara yüzüne transfer edilmiştir (Şekil 6.1a).

ADAMS ortamında, bacak uzuvlarının birbirlerine ve bacağın gövdeye göre hareketliliği tanımlamıştır. Tüm uzuvlar, ayırt edici olması amacıyla, kısaltmalar kullanılarak farklı şekilde ifade edilmiştir. Her bir bacağa ait eklemler, dönel mafsallarla (connector) birbirine ilişkilendirilmiştir. Bu aşamada, tüm bacaklarda aynı ilişkilendirmeleri tanımlamak ve farklı bacaklardaki benzer eklemlere ait değişkenleri birbirlerine göre inceleyebilmek için, mafsal koordinat sistemlerinin ve dairesel hareket yönlerinin her bir bacak için aynı olmasına özen gösterilmiştir. Sisteme hareketlilik kazandırmak ve simule etmek için dönel mafsallara zamana bağlı doğrudan açısal konum veya tork girişleri tanımlanmalıdır. Deneysel uygulamalarda eyleyicilerin tork girişi üreteceği düşünülerek, bu tez kapsamında 4AR'ın tork tabanlı kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple, her bir ekleme *VARVAL* komutu ile değişken tork girişi tanımlanmıştır. Böylece, dinamik modelin Simulink ile haberleşmesiyle, kontrolcünün eklemler için ürettiği tork değerleri mafsallara uygulanabilir (Şekil 6.1b).

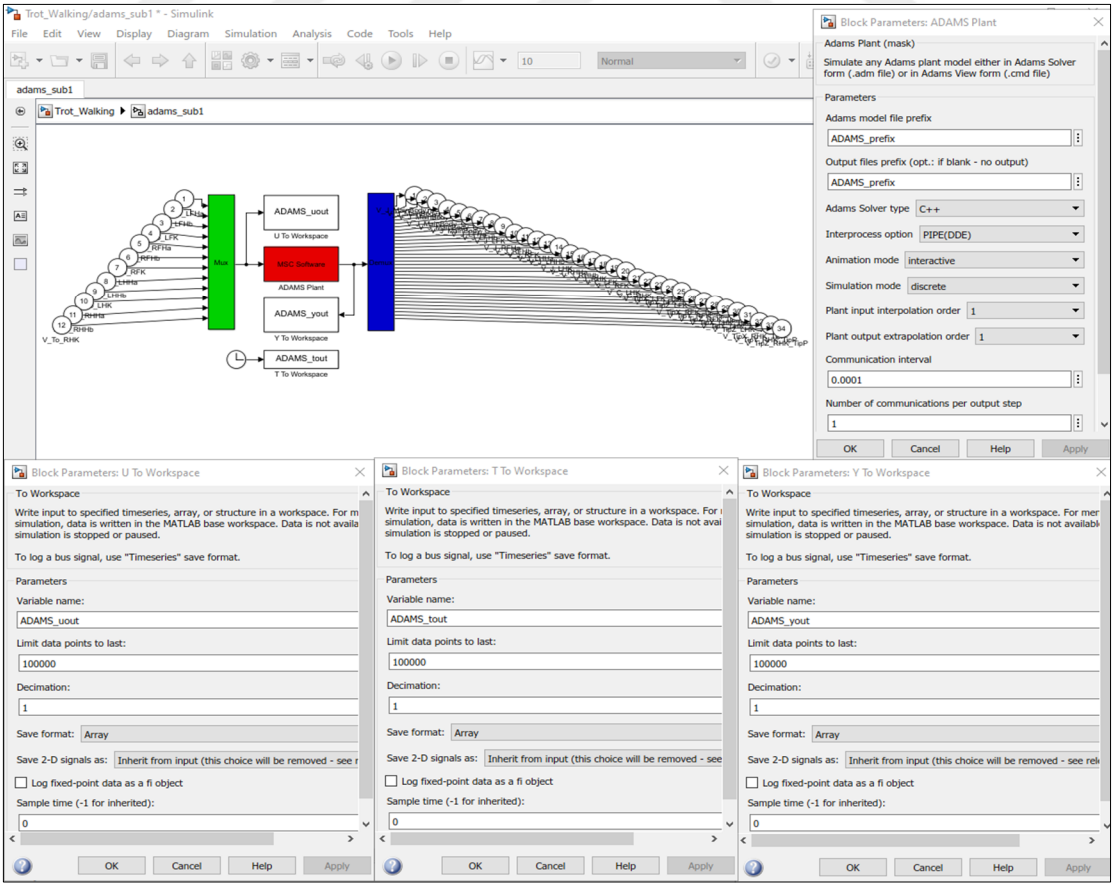
Sonrasında, en öneli hususlardan biri olan ayaklar ile zemin arasında dinamik ilişkinin kurulması gerçekleştirilmiştir. Öncelikle robotun yürüyüş gerçekleştireceği katı bir zemin oluşturulmuştur. İki katı yüzey arasında etkileşimi ve temas kuvvetlerini tanımlayan *Contact* komutu ile her bir ayak ucu ile zemin ilişkilendirilmiştir. Ayak ucuna etki eden zemin tepki kuvvetlerini belirleyen, sertlik ve sönüm değerleri, statik ve dinamik sürtünme katsayıları gibi kontak parametreleri tanımlanmıştır. Kontak tasarımı ve parametrelerin tayini, yumuşak kontak (soft contact) yöntemine dayalı gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, daha çok sayısal hesaplamalara gereksinim duyan sert kontak (hard contact) yöntemine kıyasla, daha doğru ve etkili çözümler sunabilmektedir. Daha dengeli bir hareket elde etmek ve işlem yükünü azaltabilmek için yumuşak kontak yöntemleri yaygın tercih edilmektedir. (Gehring ve ark., 2014). Ayak ucu ile zemin arasındaki kontak parametreleri, Coulomb sürtünmesi ve düşey yöndeki normal kuvvetlerin etkileri temel alınarak; sertlik ve sönüm değerleri sırasıyla k_N= $4x10^5$ (N/m) ve b_N= $1x10^3$ (Ns/m) olarak, statik ve dinamik sürtünme katsayıları, ayakların kayma dinamiği ihmal edilmeden, sırasıyla μ=1ve γ=0.8 olarak tayin edilmiştir (Şekil 6.1c).

Elde edilen ADAMS modeli ile MATLAB/Simulink arasında eş simülasyon için sistemin tüm giriş ve çıkış değişkenleri zamana bağlı parametrik fonksiyonlar şeklinde tanımlanmalıdır. Bu nedenle, 4AR'ın dinamik modeli üzerinden; gövdeye, eklemlere, ayak ucu ve zemin etkileşimine ait tüm dinamik değişkenlerin ölçümleri (measures) alınarak, fonksiyonlar şeklinde sistemin çıkış durum değişkenleri olarak ve benzer şeklinde eklem torkları ise, sistemin kontrolcü girişleri olarak tanımlanmıştır (Şekil 6.1d).



Şekil 6.1. 4AR dinamik modelin oluşturulma aşamalarına ait görseller

Eş simülasyon çalışmalarında haberleşme için sistem dinamik modeli, MATLAB'ın tanıyabileceği formatta ADAMS'dan transfer edilmiştir. *Adams Controls Plant Export* ara yüzünde sistemin giriş ve çıkışlarına ait parametrik değişkenler belirtilmiştir. *C++* veya *FORTRAN* yazılım dilleri kullanılarak, haberleşmeyi sağlayan bir *m-dosyası* oluşturulmuştur. Bu m-dosyası MATLAB'da işletilmiş ve *adasms_sys* komutu ile 4AR'ın modelini içeren bir Simulink dosyası elde edilmiştir. Bu dosyada, sistemin doğrusal olmayan ADAMS modeli (*adams_sub*), durum-uzay formunda ifade edilmiş doğrusal modeli ve S-Function formundaki modeli olmak üzere toplamda üç farklı tipte model mevcuttur. Bu tez kapsamındaki simülasyonlarda, doğrusal olmayan karakteristiklerini de inceleyebilmek ve daha gerçekçi sonuçlar elde edebilmek amacıyla sistemin doğrusal olmayan *adams_sub* modeli kullanılmıştır. Modelin, her bir bacakta üçer adet olmak üzere toplamda 12 adet tork kontrol girişi vardır. Modelin çıkışları ise; gövde oryantasyonunun değişimlerine ait 6 adet, eklemlerin açısal konum değişimlerine ait 12 adet, ayak ucu tepki kuvvetlerinin değişimine ait 4 adet ve ayak uçların x-y-z konum değişimlerine ait 12 adet olmak üzere, toplamda 34 adet durum değişkeninden oluşur (Şekil 6.1d).



Şekil 6.2. Simulink ortamına aktarılan dinamik modele ait ekran görüntüsü

MATLAB/Simulink ortamına aktarılan 4AR dinamik modeli (Şekil 6.2) üzerinden, ayak ucunun zeminle etkileşimine göre kendini uyarlayabilecek şekilde tasarlanan PD temelli adaptif kontrol sistemi ADAMS ile birlikte çalıştırtılarak, robotun farklı çeşitlerdeki yürüyüş simülasyonu ve analizi gerçekleştirilmiştir.

6.2. Adaptif PD Tork Kontrolcü Tasarımı

Hareketli bir gövdeye sahip, çok serbestlik dereceli robotlar için kontrolcü tasarımı oldukça karmaşık ve zorlu bir süreçtir. Bacaklı robotlar için en önemli zorluk, süreksiz yani kesikli bir şekilde destek evresinde olan ve yürüyüş boyunca değişen bacaklar ile gövde hareketinin kararlı bir şekilde sağlanmasının yanı sıra, düzensiz arazilerde robotun zemin ile etkileşiminin denetlenmesidir. Bu bacaklı robotların kontrolcü tasarımında, yürüyüş performansı ve belirsizliklere karşı sağlamlık birlikte ele alınmalıdır (Fankhauser, 2018).

Robotikte, eklemlerin ve uç işlevcilerin tork kontrolünün temel bir gereksinim olduğu uzun yıllardır bilinmektedir (Whitney, 1985). Onlarca yıldır, robot eklemlerinin tork kontrolüne yönelik teorik çalışmalar sürdürülmektedir (Hogan, 1985b). İlk zamanlardaki çalışmalarda; donanım, yazılım ve algılayıcı ekipman teknolojileri, ileri düzey uygulamalar için çok kısıtlı çözümler sunabilmekteydi. Ancak günümüz robot teknolojileri, tork temelli kontrol yaklaşımlarının uygulanmasına daha çok imkân sunabilmektedir.

Dört ayaklı eklemli robotların tasarımında eyleyiciler genellikle katı uzuvlara bağlanır ve üzerinde atalet yükü oluşur. Bu nedenle yaygın olarak, katı uzuvlara sahip bir robot için kontrolcünün ürettiği girişler, genelleştirilmiş tork veya kuvvet olarak belirlenir. Elektrik tahrikli robotlarda tork doğrudan eyleyici tarafından üretilir. Hidrolik silindirler ile tahrik edilen robotlarda ise, eklem torkları silindir kuvveti ile uzvun kol boyunun çarpılmasıyla hesaplanır. Yani dört ayaklı robotlarda kuvvet veya tork kontrolü, birbiri yerine kullanılabilir ve aynı şeyi ifade eder (Semini, 2010). İyi bir kontrol performansı elde etmek için, tork girişlerini yüksek doğrulukta hesaplayıp denetlemek önemlidir (Boaventura, 2013).

Dört ayaklı robotların yürüyüş simülasyonu üzerine yapılan çalışmalarda bacak hareketliliği genellikle, sistemin girişi doğrudan eklemlerin açısal konum olacak şekilde denetlenmiştir. Bu durumda, robotun yüksek performansta bir adım yörünge takibi için, konum kontrolcü kazançlarının olduğunca yüksek ayarlanması gerekebilir.

Ancak, yüksek kontrolcü kazançları, küçük açısal konum hatalarında, büyük eklem hareketlerinde ve ayak ucun ile zemin etkileşiminde ani tepki kuvvetlerin oluşmasına sebep olabilir. Bu durumda, robotun hassas kontrolü zorlaşır ve hareket kabiliyeti katılaşır. Robotun hareketindeki katılık, çevre ve/veya insanlarla uygun bir etkileşim kurabilmesini olumsuz etkiler. Sert ve keskin hareketliliğe sahip bir robot, bir engele çarptığında oluşan yüksek kuvvetler insanları yaralayabilir, robota veya çevreye zarar verebilir. Tork kontrolü ise, bacağın daha uyumlu bir adım hareketi için gerekli eklem açısal konumlarını gerçekleştirecek torkları üreterek, daha yumuşak ve hassas bir adım yörünge kontrolü sunar (Boaventura, 2013).

Dört ayaklı robotların kontrol edilebilmesi, yani ayaklarının üzerinde kararlı bir şekilde dengede kalarak yürüyebilmesi, uygun ve tatmin edici bir kontrol sisteminin tasarlanmasını gerektirir (Channon ve ark., 1996). Dört ayaklı robotların kontrol sisteminin tasarımında PID tabanlı teknikler, eklem torklarının ve gövdenin kontrolü için yaygın olarak tercih edilir (Hutter ve ark., 2016). Ayrıca, doğrusal olmayan yapay sinir ağları ve bulanık mantık tabanlı yaklaşımlar da mevcuttur (Yildirim, 2008).

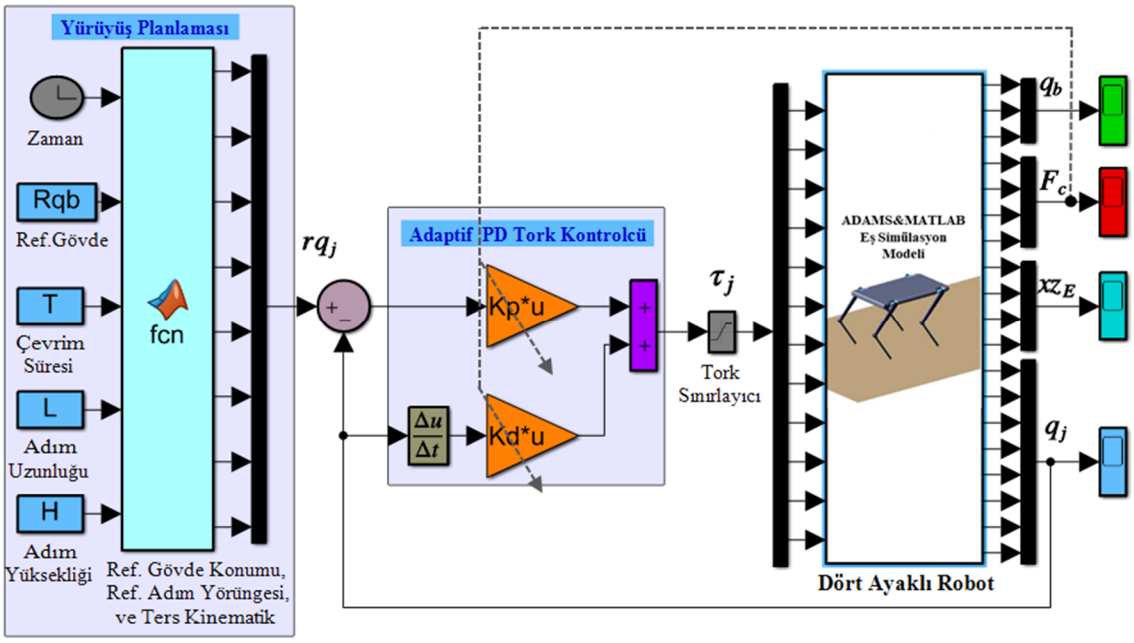
PID kontrolcü, endüstriyel uygulamaların yansıra, robotik sistemlerin kontrolü için de oldukça yaygın kullanılan, doğrusal, basit, sağlam ve esnek bir denetleyicidir. Birçok basit kontrol problemi için ilk tercih edilen ve standart bir kontrolcü olan PID kontrolcü, gerekli performans gereksinimlerinin sağlanması şartıyla, karmaşık kontrol problemlerinde bile çok iyi çözümler sunabilir. Standart geri beslemeli bir PID kontrolcü, her bir değişken için hata değerleri kullanarak, üç temel kontrolcü kazancına bağlı olarak bir çıkış değeri üretir. Hata değeri oransal kazanç katsayısı (k_p) ile, toplam hata integral kazanç katsayısı (k_i) ile, hatanın değişimi ise türevsel kazanç katsayısı (k_d) ile çarpılır ve üçü toplanarak kontrolcü çıkış hesaplanır. PID kontrolcünün performansı, doğrudan bu üç kazanç katsayısının sistem gereksinimlerine göre en uygun şekilde ayarlanmasına bağlıdır (Åström ve Wittenmark, 2013).

Farklı gereksinimlere bağlı olarak, P, PI ve PD kontrolcü yaklaşımları mevcuttur. Dört ayaklı robotların teorik ve uygulama çalışmalarında, işlem yükünü azaltmak için PID kontrolcünden daha çok, PD ve PI kontrolcü türleri tercih edilmektedir. Çeşitli belirsizlikler ve harici bozucu girişler nedeniyle oluşan yüksek hata ve hata değişimlerine hızlı bir tepki verebilmek için, türevsel kazancın etkisi ile ivmeli hareketler üretebilen PD kontrolcü (Khorram ve Moosavian, 2017), simülasyon tabanlı teorik çalışmalarda sıklıkla tercih edilir.

Deneysel uygulamalarda ise, türevsel kazancın sensör verilerindeki yüksek gürültünün etkisiyle kararsızlık problemlerine sebep olabilmesi nedeniyle, genellikle PI kontrolcü (Boaventura ve ark., 2013) kullanılmaktadır. Belirsizliklerin ve dışarıdan etki eden olası bozucuların olmadığı veya en az olduğu durumlarda, yürüyüşün gereksinimlere göre çok iyi ayarlanmış, optimal kazançlara sahip PD kontrolcü ile, bir miktar maksimum aşmaya rağmen en az kalıcı durum hatası ile hızlı bir yükselme ve oturma süresi sağlayabilir (Sutyasadi ve Parnichkun, 2016). Bu tez kapsamında, özellikle engebeli parkurdaki olası bozucular, belirsizlikler ve kararsızlıklar nedeniyle, yürüyüş simülasyonları için uyarlamalı yani adaptif bir PD kontrolcü tercih edilmiştir.

Bölüm 2'de, dört ayaklı robotlar için genel kontrol yaklaşımları ve literatür araştırması sunulmuştur. Bölüm 4'te ise, adım hareketinin sezgisel algoritmalar ile optimal kontrolüne yönelik çalışmalarda, farklı yaklaşımlar ile PID, LQR gibi doğrusal kontrolcülerin yanı sıra doğrusal olmayan BMK tasarımları da gerçekleştirilmiş, analizler yapılmıştır. Bu kapsamda dört ayaklı robotların kontörlü ile ilgili detaylı açıklamalara ve güncel teorik ve deneysel çalışmalara yer verilmiştir.

Bu bölümde 4AR'ın engebesiz, düz bir zeminlerde yürüyüş denetimi için; robotun ADAMS dinamik modelini, yürüyüş planlamasını ve ters kinematik çözümlemelerini içeren, zemin tepki kuvvetine göre farklı kazançlar alabilen adaptif PD tabanlı tork kontrolcüye ait MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan genel kontrol blok şema Şekil 6.3'te sunulmuştur.



Şekil 6.3. 4AR'ın düz zeminde yürüyüş simülasyonuna ait genel kontrol şeması

Genel kontrol sistemi; dinamik model, yürüyüş planlaması ve kontrolcü olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Bir önceki bölümde tanıtılan 4AR dinamik modelinin girişleri, kontrolcünün ürettiği her bir ekleme ait tork değerleridir. Çıkış değişkenleri ise sırasıyla; gövdenin konum ve oryantasyonu (q_b), her bir bacağa ait ayak ucu kontak kuvvetleri (F_c), gerçekleşen ayak ucu düzlemsel yörünge konumları (xz_{Au}) ve her ekleme ait gerçekleşsen açısal konumlar (q_j)'dır. Eklemlerin açısal konumlarının, geri beslenerek kapalı çevrim kontrolü gerçekleştirilmektedir. Eklemlerin hareketine bağlı diğer değişkenler ise, açık çevrim olarak denetlenmekte ve tüm değişkenler ölçülmektedir.

Yürüyüş planlamasında, yürüyüş süresince istenen gövde konumu (x_G, y_G, z_G), oryantasyonu (ϕ_G, θ_G, ψ_G) ve her bacağın ayak ucu adım yörüngesine ait referans konumlarına (x_{Au}, y_{Au}, z_{Au}) göre ters kinematik hesaplamaları kullanılarak, eklemlere ait referans açısal konumlar ($\phi_{LFK}\ \theta_{LFU}\ \theta_{LFB} \ldots\ \phi_{RHK}\ \theta_{RHU}\ \theta_{RHB}$) üretilir. Siciliano ve Khatib (2016), bacaklı robotların yürüyüş planlaması hakkında ayrıntılı açıklamalar sunmuşlardır. Gor ve ark. (2015a) ve Gor ve ark. (2015b), dört ayaklı robotların ayak ucu yörünge tasarımı, kontrolü ve analizi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bu tez kapsamında, 4AR'ın yürüyüş simülasyonları için, yarım daire profilindeki ayak ucu adım yörüngesi (Şekil 4.6) tasarlanmıştır. Referans ayak ucu yörüngesinin, sabit koordinat sistemine göre x ve z eksenine ait konumlarının üretimi Denklem (6.1)'de, zamana (t) bağlı birer fonksiyon şeklinde formülize edilmiştir.

$$x_i(t) = \frac{L}{2} - \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \beta_i\right) * \frac{L}{2}$$
$$z_i(t) = \min\{h, \max\{0, \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \beta_i\right) * H\} \quad (6.1)$$

Burada; L adım uzunluğu (0,2 m), H adım yüksekliği (0,1 m), h bacağın (kalça koordinat sisteminin) yerden yüksekliği (0,6 m), $T=(t_{st} + t_{sw})$ toplam yürüyüş periyodu (0.5 sn); destek (t_{st}) evresi süresi ve salınım (t_{sw}) süresi, β yürüyüş çeşitlerine göre değişkenlik gösteren faz farkı ve $i=1..4$ ise bacakları temsil eder.

4AR'ın adım hareketinde, ayak ucunun zemin ile temas durumuna göre eklemlerin tork gereksinimi değişkenlik göstermektedir. Ayak ucunun zeminle temas halinde olduğu destek evresi boyunca eklemlere yüksek ve ani yüklerin gelebileceği ve hızlı bir gövde hareketi için bu süresinin mümkün olduğunca kısa olması gerektiği düşünüldüğünde, destek evrensinde yüksek eklem torklarının oluşması kaçınılmazdır.

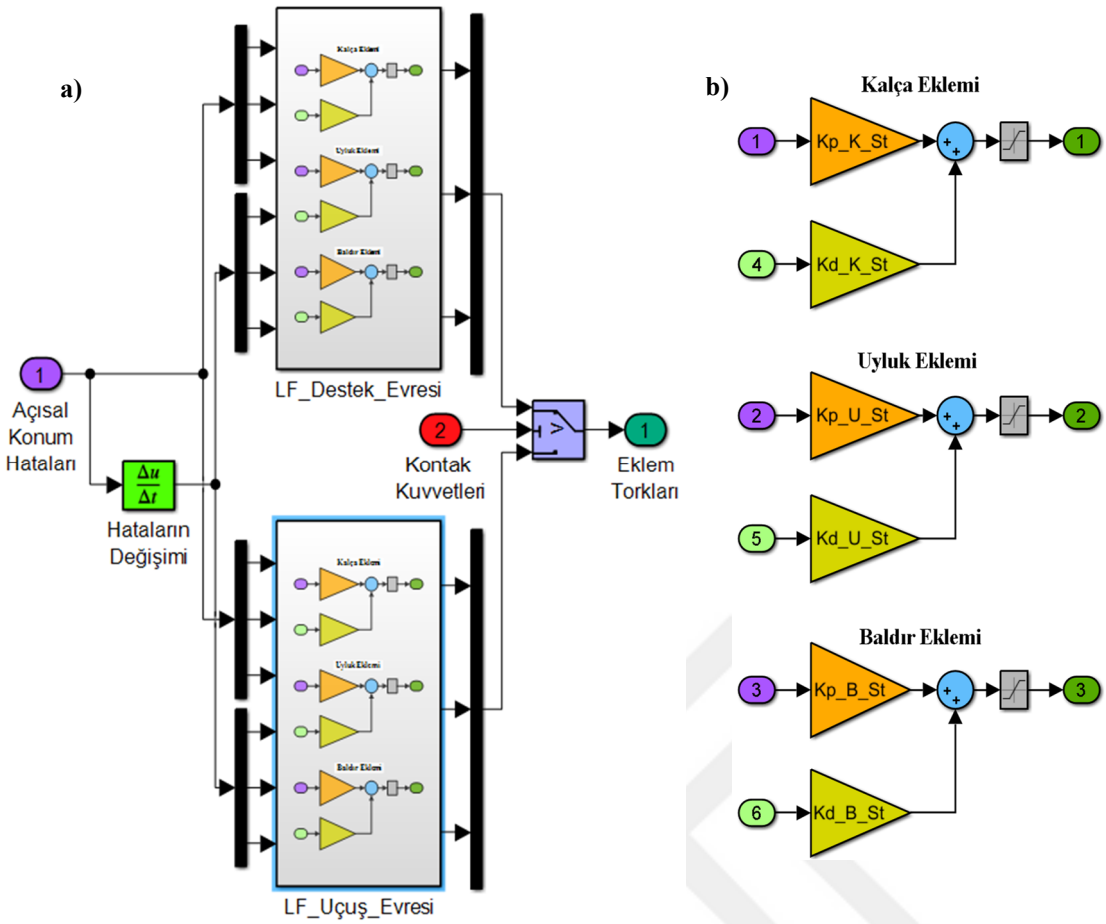
Destek evresinin aksine, ayak ucunun havada olduğu ve gövde ağırlığının diğer bacaklar tarafından taşındığı uçuş evresinde ise, bacağın kendi ağırlığını taşıyarak adım yörüngesini takip etmesi için daha düşük ve öngörülebilir torklar oluşması beklenir. Bu sebeple, adım hareketi boyunca eklemlerin tork gereksinimlerine uygun, yürüyüş sırasında ayak ucunun destek ve uçuş evrelerine göre kendi kazançlarını ayarlayabilen adaptif bir kontrolcü gerekir.

Adaptif veya uyarlamalı kontrol, başlangıçta belirsiz veya değişken parametrelere adapte olan, yani güncellenerek değişen şartlara uyum sağlayan, tasarımcı tanımlı bir kontrol yöntemidir. Geleneksel ve gürbüz kontrol teknikleri sadece değişimlerin belirli ve sınırlı olduğu durumlarda etkili kontrol sağlayabilirken, uyarlamalı kontrol ise herhangi bir sınıra gerek duymadan, kendisine tanımlanan değişim kuralarına göre etkili bir kontrol performansını garanti edebilir (Åström ve Wittenmark, 2013).

4AR'ın yürüyüş kontrolüne yönelik, ani ve yüksek tork değişimlerini önlemeye yönelik, adım hareketi sırasında ayak ucunun zemin ile etkileşim halinde olduğu destek evresi ve ayak ucunun havada olduğu uçuş evresi için ayrı ayrı PD kontrolcü kazançları ayarlanmış ve bu fazlara göre yürüyüş sırasında değişkenlik gösteren adaptif PD tabanlı tork kontrolcü tasarlanmıştır. Bacağın destek ve uçuş evresi için farklı değerlerde tanımlanan oransal (P) ve türevsel (D) kontrolcü kazançlarına sahip PD tabanlı kontrolcü, gerçekleşen eklemlere ait açısal konumlar ile referans değerleri arasındaki hataya göre tork girişlerini düzenler ve böylece istenen yürüyüşün denetimini sağlar. Destek ve uçuş evreleri için, tasarlanan adaptif PD tabanlı kontrolcünün çıkışına ait, için matematiksel ifadeler Denklem (6.2)'de sunulmuştur.

$$\begin{cases} u(t)_i = k_{p_{st_i}}\, e(t)_i + \, k_{d_{st_i}} \left(\frac{de}{dt}\right)_i & F_c > 0 \\ u(t)_i = k_{p_{sw_i}}\, e(t)_i + \, k_{d_{sw_i}} \left(\frac{de}{dt}\right)_i & F_c = 0 \end{cases} \tag{6.2}$$

Burada; *i=1,2.3…12* eklem numarasını ifade eder. Ayak ucu kontak kuvvetinin (F_c) sıfırdan büyük veya eşit olma durumuna göre belirlenen, destek (*st*) ve uçuş (*sw*) evreleri için farklı oransal ve türevsel kazançlar ile farklı kontrolcü çıkışları (*u(t)*), yani eklem torkları ($\tau_{LFK}\, \tau_{LFU}\, \tau_{LFB}$ … $\tau_{RHK}\, \tau_{LHU}\, \tau_{LHB}$) elde edilir. Bir bacak yapısının adaptif PD tabanlı tork kontrolcüsüne ait MATLAB/Simulink modeli ve adımın destek evresine ait (uçuş evresi de benzer şekilde) alt blok Şekil 6.4'te verilmiştir.

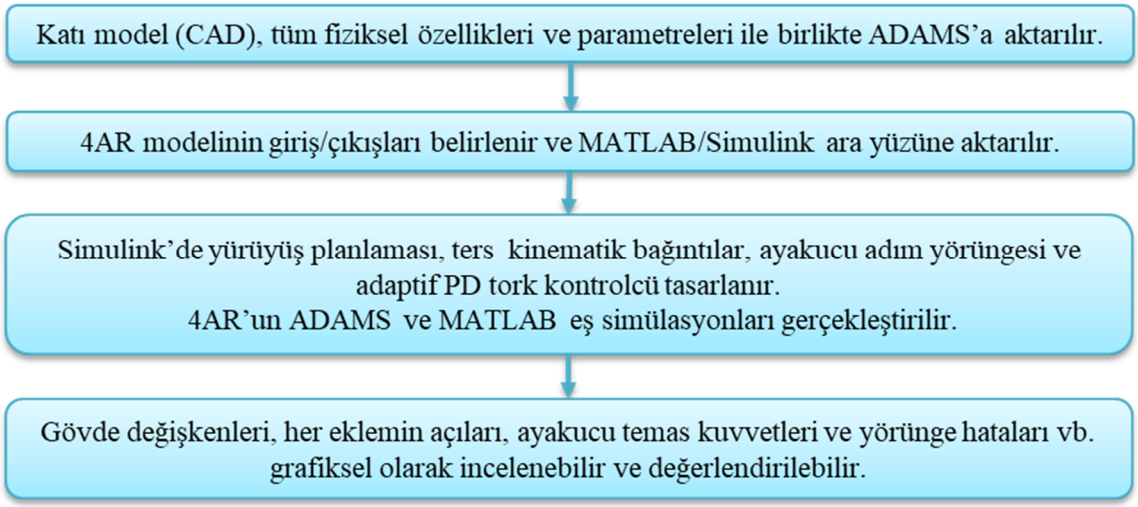


Şekil 6.4. Adaptif PD tabanlı tork kontrolcü **a)** Simulink modeli ve **b)** alt bloğu

Yürüyüş boyunca zeminden gelen kontak kuvvetlerine göre, her bir bacağın adım döngüsü içinde destek (kontak kuvveti sıfırdan büyük ise) evresinde mi yoksa uçuş evresinde mi (kontak kuvveti sıfırdan büyük ise) olduğu tespit edilerek, kontrolcüye bir anahtarlama (switch) sinyali gönderilmek ve kontrolcü kazançları güncellenmektedir.

6.3. Düz Zeminde Yürüyüş Simülasyonu

Bu bölüm kapsamında; 4AR'ın engebesiz, düz bir zeminde, dört farklı yürüyüş çeşidinde, ileri yönlü düzlemsel yürüyüşüne ait simülasyonlar ve değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Bölüm 6.1'de elde edilen ADAMS dinamik modeli ve Simulink'te tasarlanan yürüyüş planlaması ve kontrolcü birlikte çalıştırılarak, Bölüm 5.2'de detaylı tanıtılan Statik, Tırıs, Rahvan ve Eşkin yürüyüş çeşitlerinde, ADAMS&MATLAB eş simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 4AR'ın yürüyüşüne ait eş simülasyon süreçlerini sırasıyla özetleyen akış şeması Şekil 6.5'te sunulmuştur.



Şekil 6.5. Yürüyüş simülasyon süreçlerinin akış şeması

Gövdeye ait değişkenlerinin ve her bir bacağın eklemlerine ait açısal konumları ve torkları, ayağa etkiyen zemin tepki kuvvetleri ve ayak ucu yörünge takip performansları gibi birçok durum değişkeninin, yürüyüş simülasyonları boyunca zaman bağlı değişimleri ve referans değerlerine göre gerçekleşen hata değişimleri grafiksel formlarda sunulmuş ve incelenmiştir. Yürüyüş verileri çizelgeler halinde derlenmiş ve değerlendirilmiştir. Bacaklar ve bacaklara ait eklemler, Şekil 3.5 ve Çizelge 3.2'de tarif edilen dilsel kısaltmalar kullanılarak ifade edilmiştir.

Tez kapsamında, robotun sağa/sola dönmeden, sagital düzlemde doğrusal yönde yürüyüşü incelenmiştir. Dönüş hareketini belirleyen kalça eklemlerinde (ϕ_K) değişim sabit şeklide gerçekleşeceği için, sistemin genelleştirilmiş koordinatlarının dizlimi $q = [x_G \;\; z_G \;\; \theta_G \;\; \theta_{LFU} \; \theta_{LFB} \; \ldots \; \theta_{RHU} \; \theta_{RHB}]^T$ olarak düzenlenmiştir. Ancak bacakları biraz dışa açarak gövdenin denge ve kararlığını artırmak amacıyla, 5 derece açılacak şekilde kalça eklemlerine sabit tork girişleri tanımlanmıştır.

Simülasyon çalışmalarında, farklı yürüyüş çeşitleri için farklı PD kazanç katsayıları tasarlanmıştır. Kontrolcü katsayıları, temel Ziegler–Nichols yöntemleri (Ziegler ve Nichols, 1942) ve Bölüm 4'te gerçekleştirilen bacağın adım hareketinin kontrolüne yönelik çalışmalardan elde edilen tecrübeyeler ve deneme–yanılma yöntemleri kullanılarak ayarlanmıştır. Uygun, uygulanabilir tork değerleri üretebilmek ve gerçekçi benzetimler yapabilmek için, HyQ2max (Semini ve ark., 2015c; Semini ve ark., 2017) robotu için tayin edilen azami tork değerleri dikkate alınmıştır. Bu sebeple PD kontrolcünün tork çıkışları, uyluk eklemleri için ± 245 Nm ile ve baldır eklemleri için ise ± 250 Nm ile sınırlandırılmıştır.

6.3.1. Statik yürüyüşün sayısal çözümleri

Statik yürüyüş, en az üç ayağın daima yerde olduğu ve bacakların sıralı bir şekilde adım atmasıyla gerçekleşen bir yürüyüş şeklidir. Bir ayak zeminden yükselip uçuş fazına geçerken, diğer üç ayak zeminde destek fazındadır ve destek poligonu oluşur. Bu poligon toplam gövde ağırlığının destek fazındaki ayaklara dağılımını sağlar. Ayaklardan üçünün yürüyüş boyunca daima destek evresinde olacağı şekilde, Çizelge 6.1'de belirtilen bacaklar arası faz farklarına göre bir statik yürüyüş planlaması yapılmıştır. Burada, uçuş (açık mavi) ve destek (koyu mavi) evrelerindeki faz farkları görülmektedir. Yürüyüş periyodu, uçuş evresinde yarısına (*T/2*) düşürülerek, destek evresinde ise bir buçuk katına (*3T/2*) çıkarılarak, bacakların sırayla adım atması sağlanmıştır.

Çizelge 6.1. Statik yürüyüş boyunca bacaklara ait faz farkları

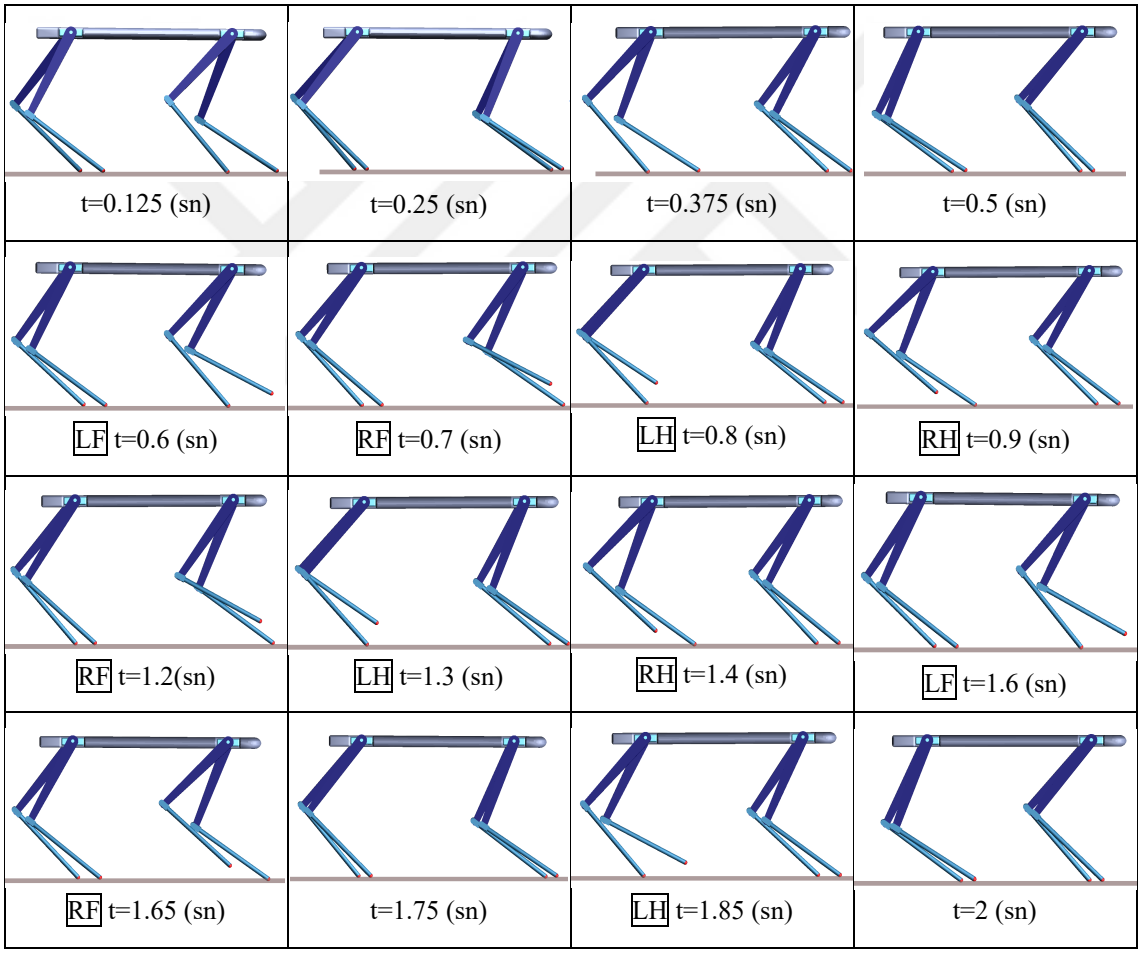
	$0 < t < T/4$	$T/4 < t < T/2$	$T/2 < t < 3T/4$	$3T/4 < t < T$
$\boldsymbol{\beta_{LF}}$	0	2π/3	2π/3	2π/3
$\boldsymbol{\beta_{RF}}$	−π/3	−π	π/3	π/3
$\boldsymbol{\beta_{LH}}$	−2π/3	-2π/3	−2π	0
$\boldsymbol{\beta_{RH}}$	−π	-π	−π	−3π

Yürüyüş hızı yani gövdenin ortalama ilerleme hızı (V_G), genel olarak yürüyüş tipine göre değişmekle birlikte; adım uzunluğu (L), yürüyüş periyodu (T), destek ve uçuş evrelerinin süreleri gibi yürüyüş parametrelerine bağlı olarak gerçekleşir. Tez kapsamında incelenen 4AR için bu parametreler, büyük boyutlu robotların yürüyüş hızları (yaklaşık 0.2 ~ 1 m/s) dikkate alınarak belirlenmiştir.

Dört ayaklı bir robotun ortalama hızı, yürüyüş boyunca çapraz veya yanal bacak çiftlerinin destek evresinde olduğu simetrik tırıs veya rahvan yürüyüşü dikkate alınarak, $V_G=(2*L)/T$ olarak hesaplanır. Tırıs yürüyüşte iki bacak çiftinden birisi sürekli destek evresinde olduğu için, görev faktörü, $\alpha_{tırıs} = 0.5$ olur. Görev faktörü artarsa ($\alpha>0.5$), yani yürüyüş döngüsü içinde toplam destek evre süresi artarsa, yürüyüş daha dengeli ancak daha yavaş bir hızda gerçekleşir. Görev faktörü azaldığında ($\alpha<0.5$) ise, tam tersi yürüyüş hızlanır ancak kararsızlıklar artabilir. Sonuç olarak gövdenin ortalama hızı, yürüyüşün görev faktörüne bağlı olarak, tırıs yürüyüş referans alınarak $\dot{x}_{G_{statik}} = V_{G_{statik}} = \left[\frac{2L}{T}\ \frac{\alpha_{tırıs}}{\alpha_{statik}}\right]$ hesaplanır (Kimura ve ark., 1989). Bu şekilde, 4AR'ın statik yürüyüşünde (α_{statik} = 0.75) gövdenin ortalama hızı 0.533 m/s olarak gerçekleşmiştir.

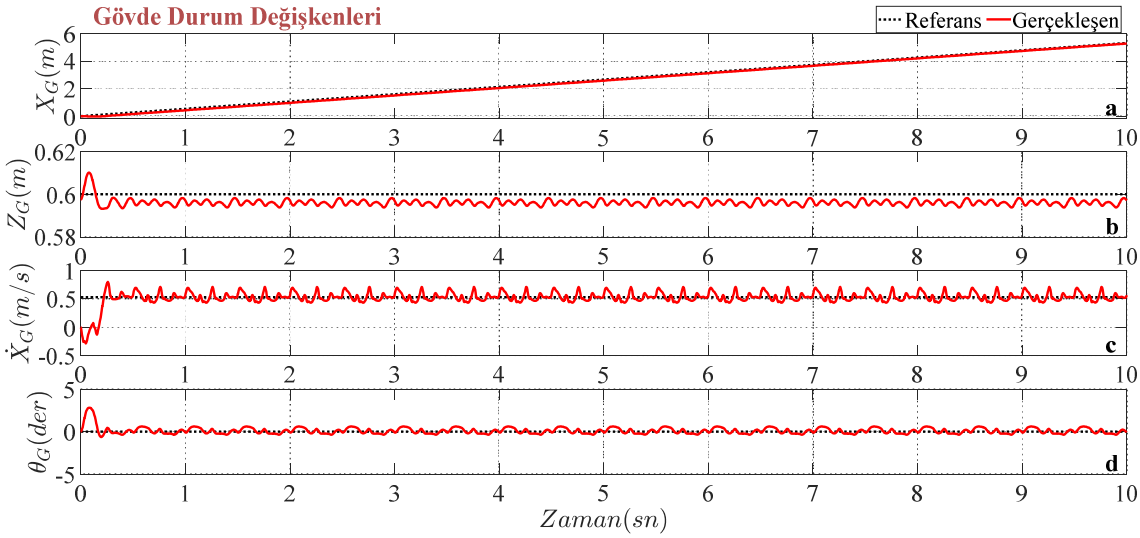
4AR'ın statik yürüyüşüne ait MATLAB&ADAMS eş simülasyonu gerçekleştirilmiş ve sonuçlar grafiksel formlarda sunulmuştur. Adaptif PD kontrolcüye ait kazançlar; destek evresi için $kp_{(st)}=[260,\ 390,\ 260,\ 390,\ 260,\ 390,\ 260,\ 390]$ ve $kd_{(st)}=[2.6,\ 7.3,\ 2.6,\ 7.3,\ 2.6,\ 7.3,\ 2.6,\ 7.3]$, uçuş evresi için $kp_{(sw)}=[52,\ 46.8,\ 52,\ 46.8,\ 52,\ 46.8,\ 52,\ 46.8]$ ve $kd_{(sw)}=[0.78,\ 0.7,\ 0.78,\ 0.7,\ 0.78,\ 0.7,\ 0.78,\ 0.7]$ olarak ayarlanmıştır. Statik yürüyüş periyodu, $T_{statik}=(t_{st}+t_{sw})=(0.325+0.125)=0.5\ sn$ olarak tanımlanmıştır.

Genel olarak sistem değişkenleri, ilk yürüyüş döngüsü içinde (0.5 sn) referans değerlerine ulaşmış ve kararlı bir yürüyüş sürdürülmüştür. Toplam simülasyon süresi 10 saniye olarak belirlenmiş, ilk 2 saniyelik kısmına (4 yürüyüş döngüsüne) ait robotun anlık görüntüleri Şekil 6.6'da (açık mavi uçuş evresindeki bacak) verilmiştir.

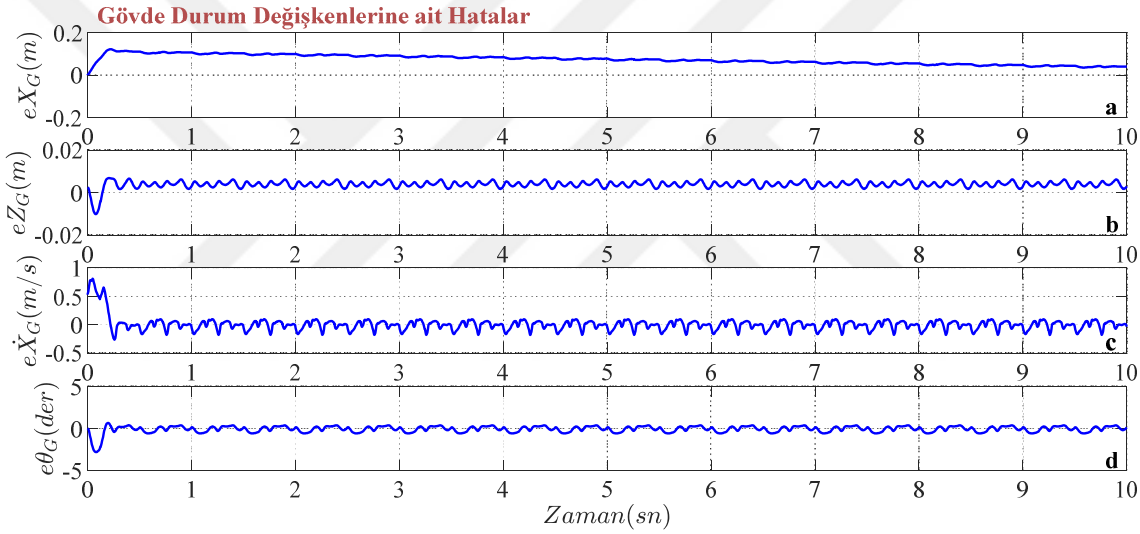


Şekil 6.6. Statik yürüyüş eş simülasyonuna ait anlık ekran görüntüleri

Statik yürüyüş boyunca, gövde değişkenlerinin (yataydaki ve düşeydeki konumları, ortalama doğrusal hızı, yunuslama açısı $(x_G\ z_G\ \dot{x}_G\ \theta_G)$) ve referans değerlerine göre hata değerlerinin değişimlerine ait simülasyon sonuçları Şekil 6.7a, 6.7b, 6.7c, 6.7d ve Şekil 6.8a, 6.8b, 6.8c, 6.8d'de sırasıyla verilmiştir.



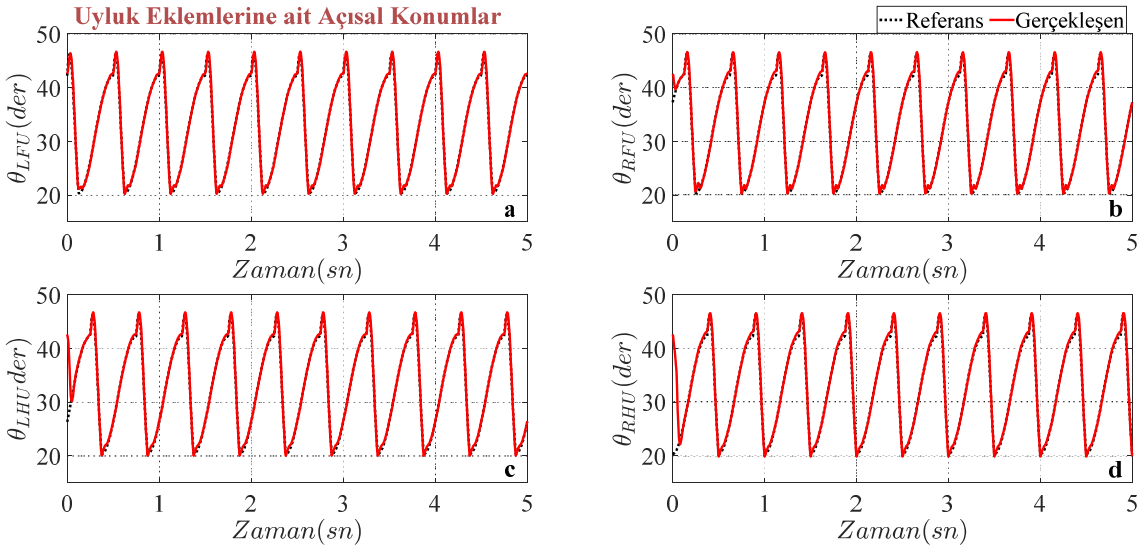
Şekil 6.7. Statik yürüyüş – Gövde durum değişkenlerine ait sonuçlar



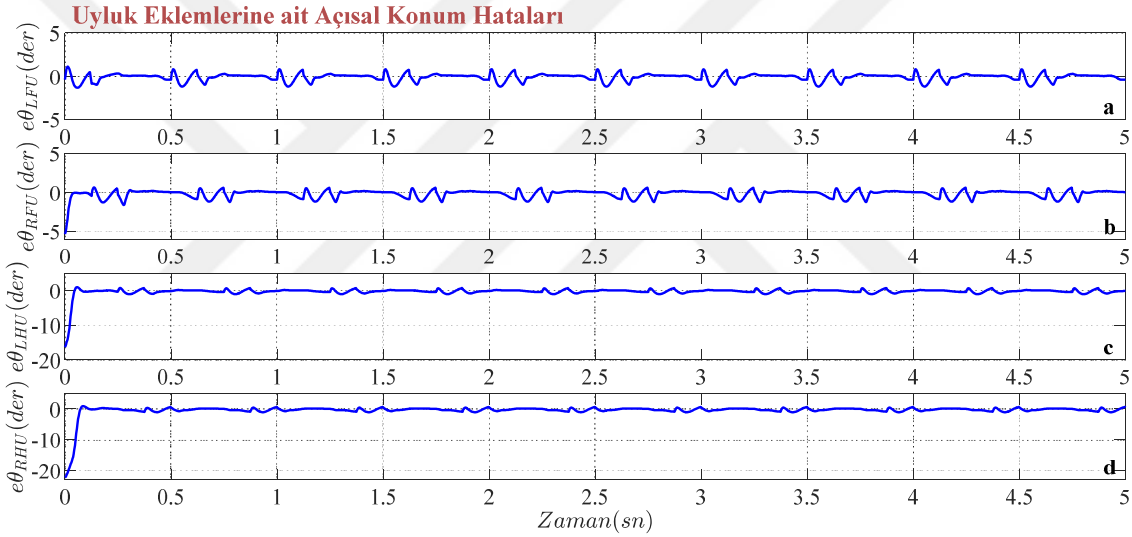
Şekil 6.8. Statik yürüyüş – Gövde durum değişkenlerine ait hatalar

Statik yürüyüşün ilk 5 saniyelik kısmı için, bacak sıralmasına göre, uyluk eklemlerinin açısal konumlarının (θ_{LFU} ... θ_{RHU}) ve hata değerlerinin ($e\theta_{LFU}$ ... $e\theta_{RHU}$) değişimlerine ait simülasyon sonuçları Şekil 6.9a, 6.9b, 6.9c, 6.9d ve Şekil 6.10a, 6.10b, 6.10c, 6.10d'de sırasıyla verilmiştir. Uyluk eklemlerine ait tork girişlerinin değişimi Şekil 6.11a, 6.11b, 6.11c, 6.11d'de sunulmuştur.

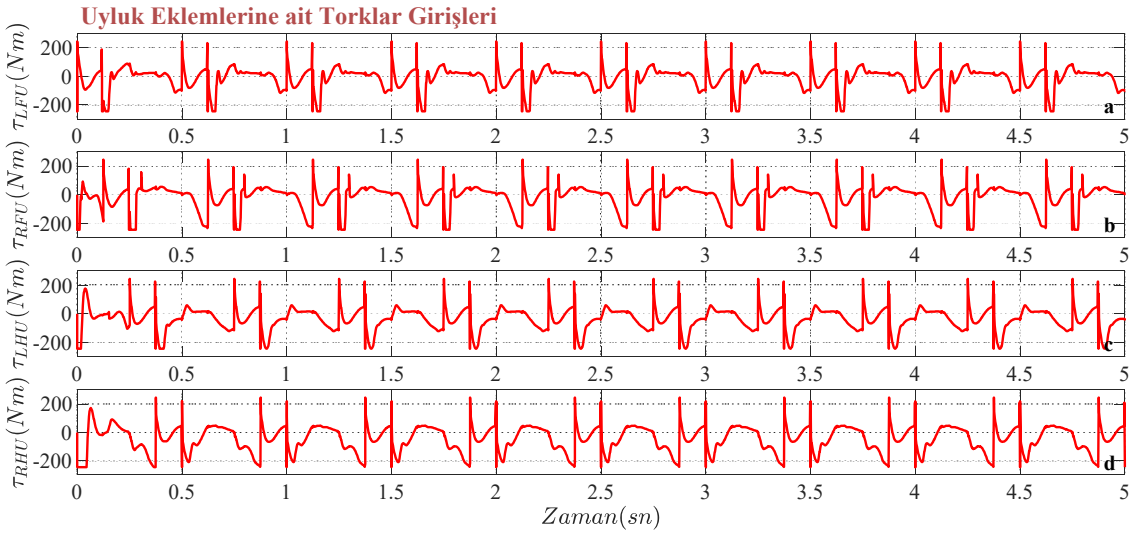
Benzer şekilde statik yürüyüşte, baldır eklemlerinin açısal konumlarının (θ_{LFB} ... θ_{RHB}) ve hata değerlerinin ($e\theta_{LFU}$ ... $e\theta_{RHU}$) değişimlerine ait simülasyon sonuçları, bacak sırasına göre, Şekil 6.12a, 6.12b, 6.12c, 6.12d ve Şekil 6.13a, 6.13b, 6.13c, 6.13d'de sırasıyla verilmiştir. Baldır eklemlerine ait tork girişlerinin değişimi Şekil 6.14a, 6.14b, 6.14c, 6.14d'de sunulmuştur.



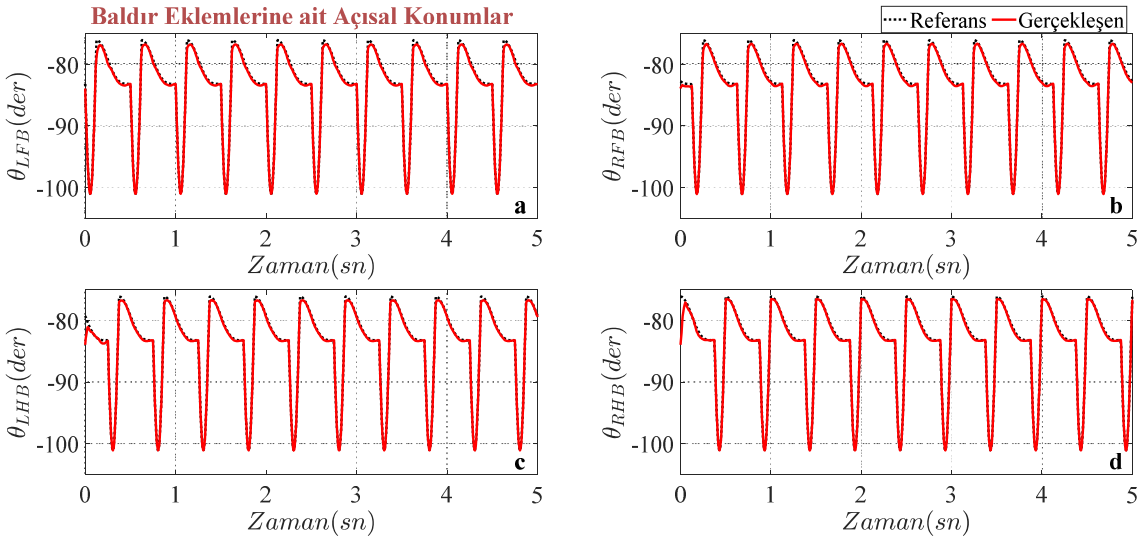
Şekil 6.9. Statik yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait açısal konumlar



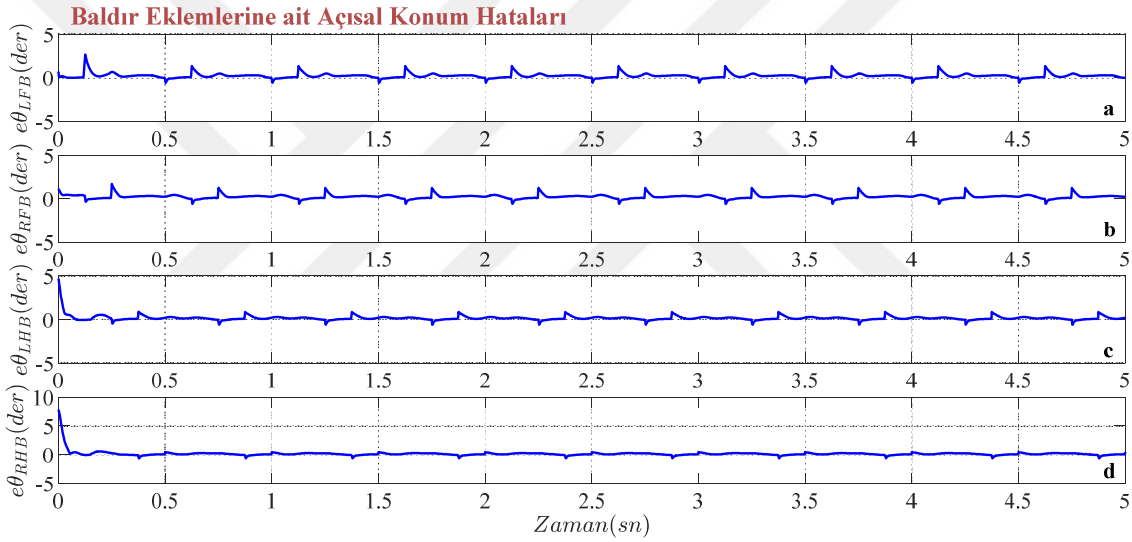
Şekil 6.10. Statik yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait açısal konum hataları



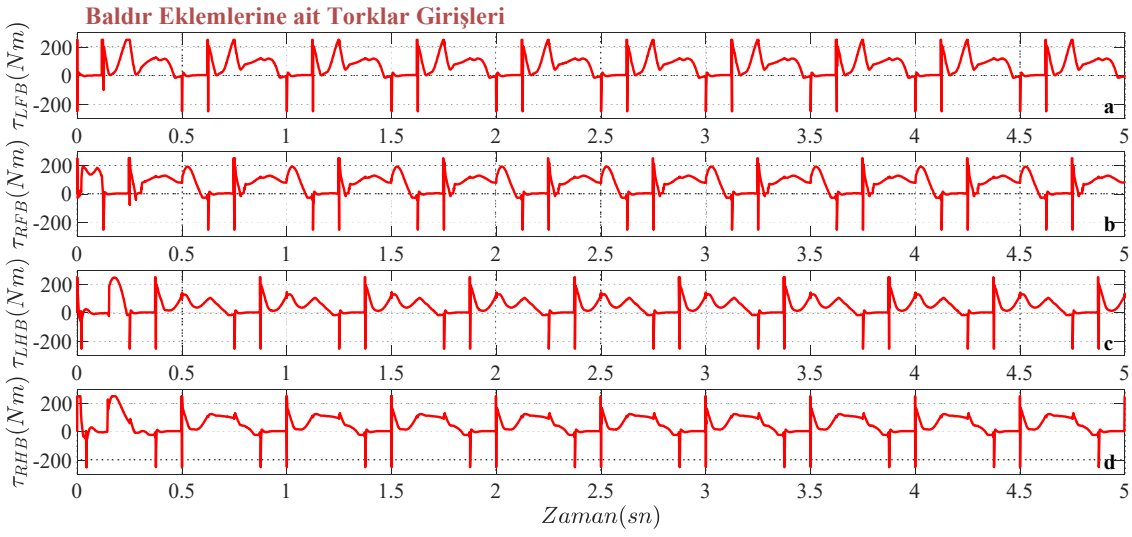
Şekil 6.11. Statik yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait tork girişleri



Şekil 6.12. Statik yürüyüş – Baldır eklemlerine ait açısal konumlar

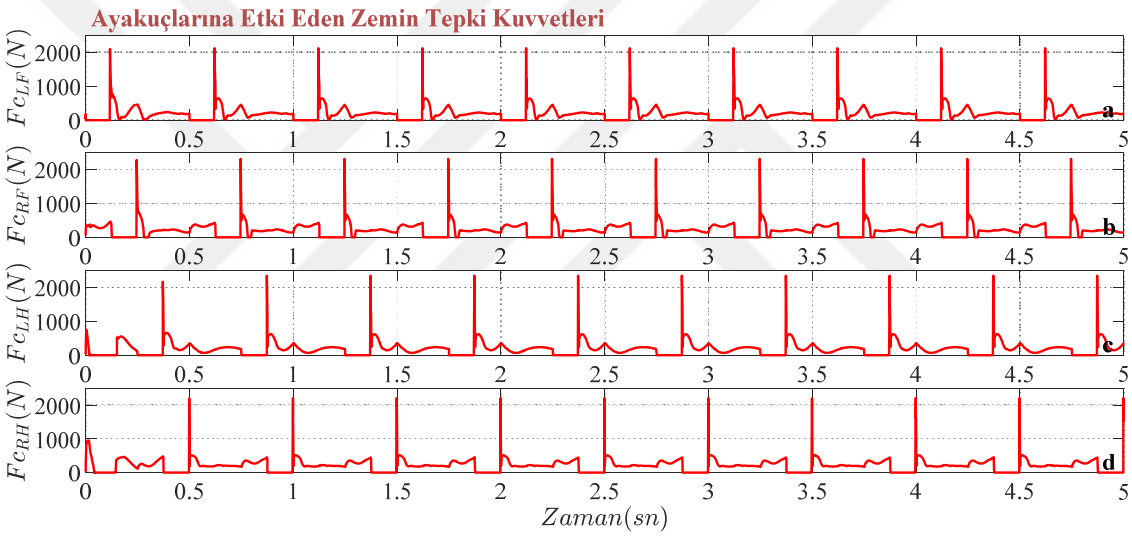


Şekil 6.13. Statik yürüyüş – Baldır eklemlerine ait açısal konum hataları

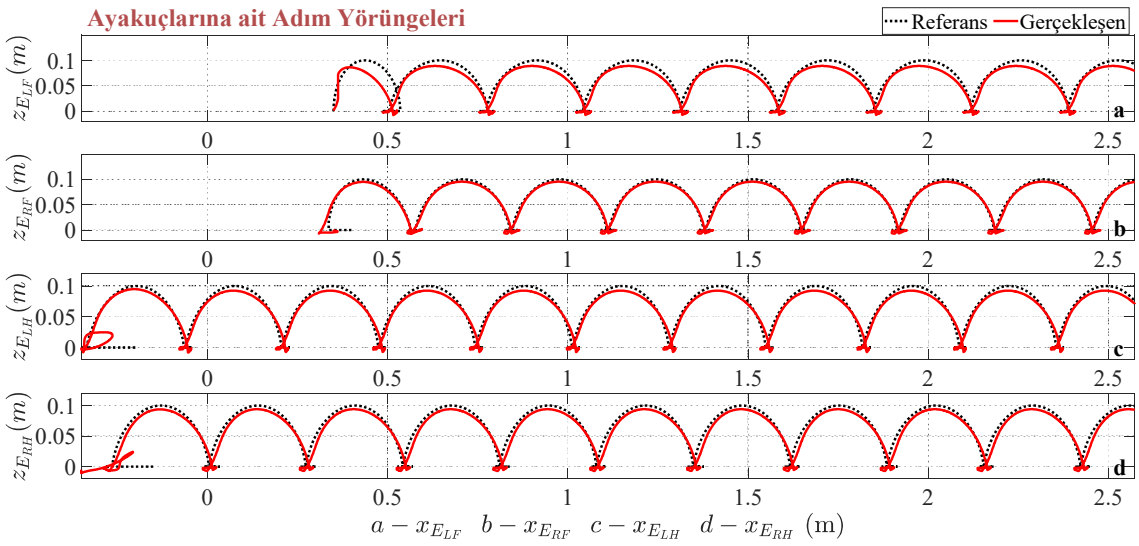


Şekil 6.14. Statik yürüyüş – Baldır eklemlerine ait tork girişleri

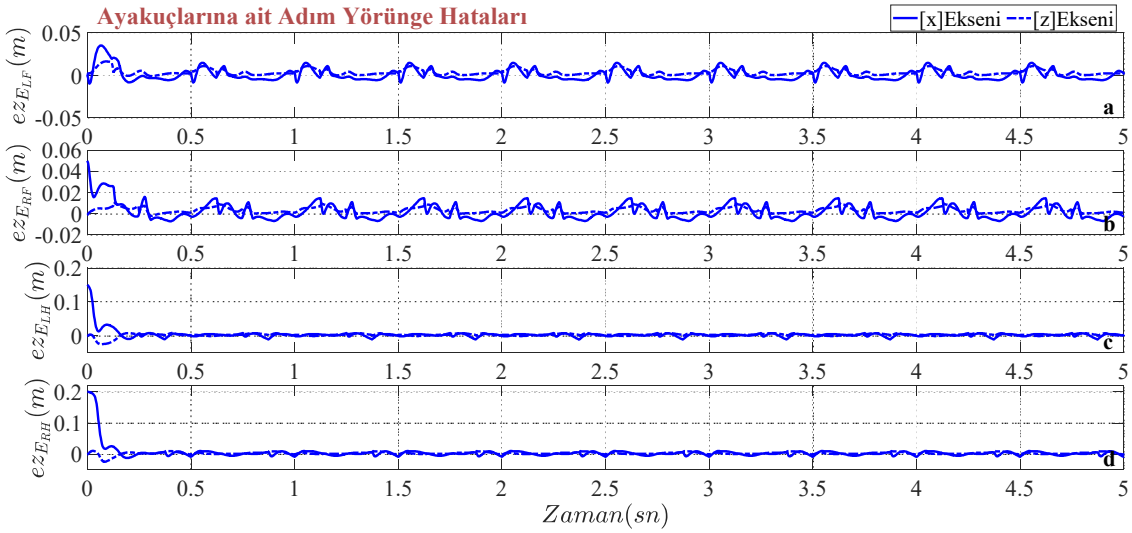
Statik yürüyüşün ilk 5 saniyelik kısmında, ayakuçlarına etki eden zemin tepki kuvvetlerinin ($F_{c_{LF}}$ ... $F_{c_{RH}}$) değişimi Şekil 6.15a, 6.15b, 6.15c, 6.15d'de bacak sırasına göre verilmiştir. En yüksek zemin tepki kuvvetleri, uçuş evresinde tekar destek evresine geçişte oluşmaktadır. Şekil 6.16a, 6.16b, 6.16c, 6.16d'de, herbir bacak için ayakuçlarının izledikleri düzlemsel adım yörüngeleri, Şekil 6.17a, 6.17b, 6.17c, 6.17d'de ise referans ile gerçekleşen yörünge arasındaki hata değişimleri sırasıyla sunulmuştur. Ayak ucu yörünge izleme perfromaslarını daha iyi inceleyebilmek amacıyla, statik yürüyüşün ilk 2 saniyelik kısmına ait, ön (LF, RF) ve arka (LH, RH) bacakların yörünge x-z eksenlerindeki konumları ve izleme hatalarının değişimleri, Şekil 6.18a, 6.18b, 6.18c, 6.18d, 6.18e, 6.18f'de ve Şekil 6.19a, 6.19b, 6.19c, 6.19d, 6.19e, 6.19f'de sırasıyla, ayrıntılı olarak sunulmuştur.



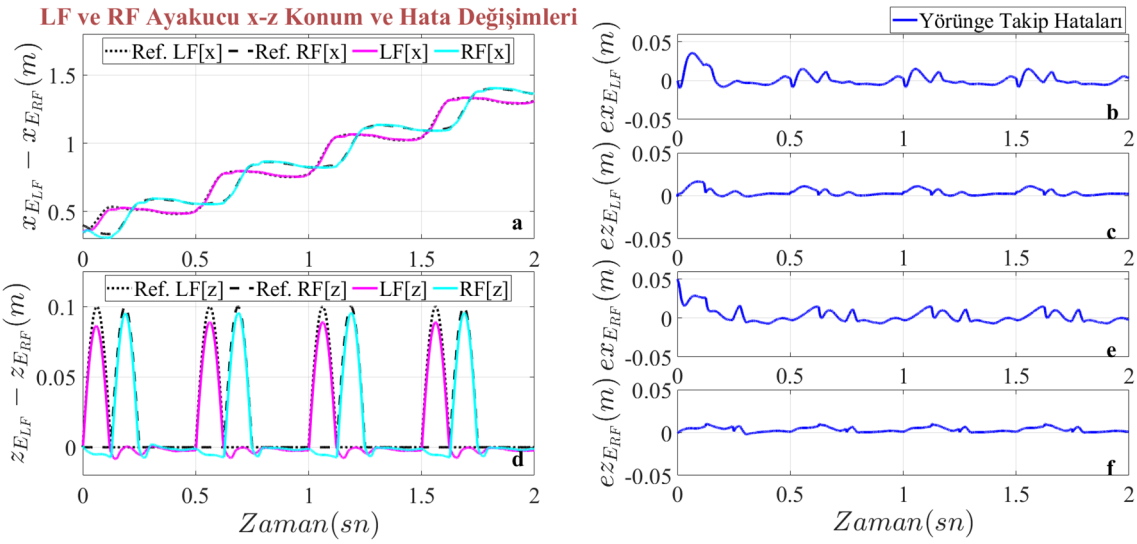
Şekil 6.15. Statik yürüyüş – Ayakuçlarına etki eden zemin tepki kuvvetleri



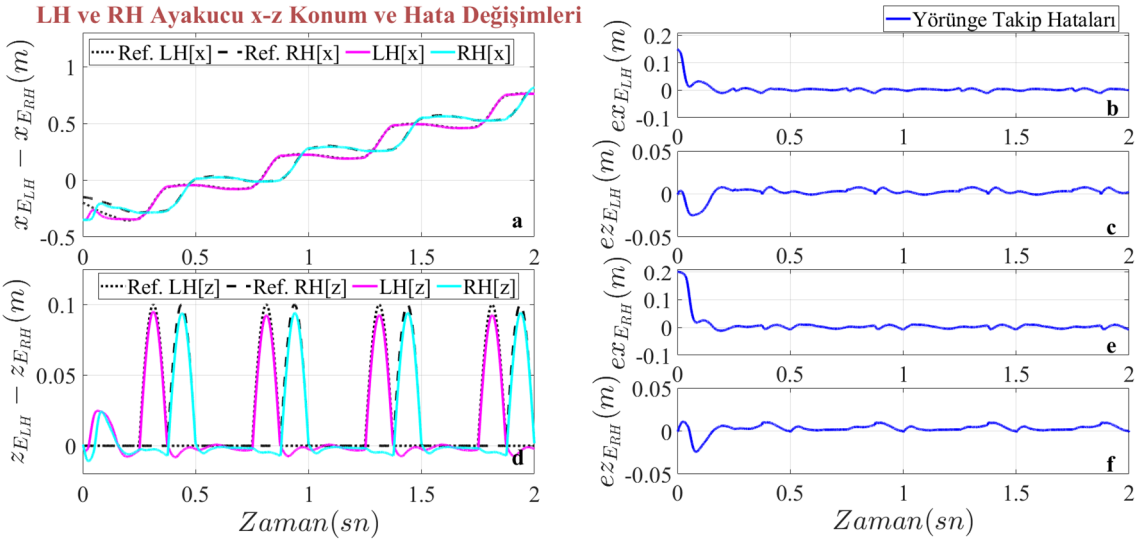
Şekil 6.16. Statik yürüyüş – Ayakuçlarına ait adım yörüngeleri



Şekil 6.17. Statik yürüyüş – Ayakuçlarına ait adım yörünge hataları



Şekil 6.18. Statik yürüyüş – LF ve RF ayakuçlarının x-z konumları ve hataları



Şekil 6.19. Statik yürüyüş – LH ve RH ayakuçlarının x-z konumları ve hataları

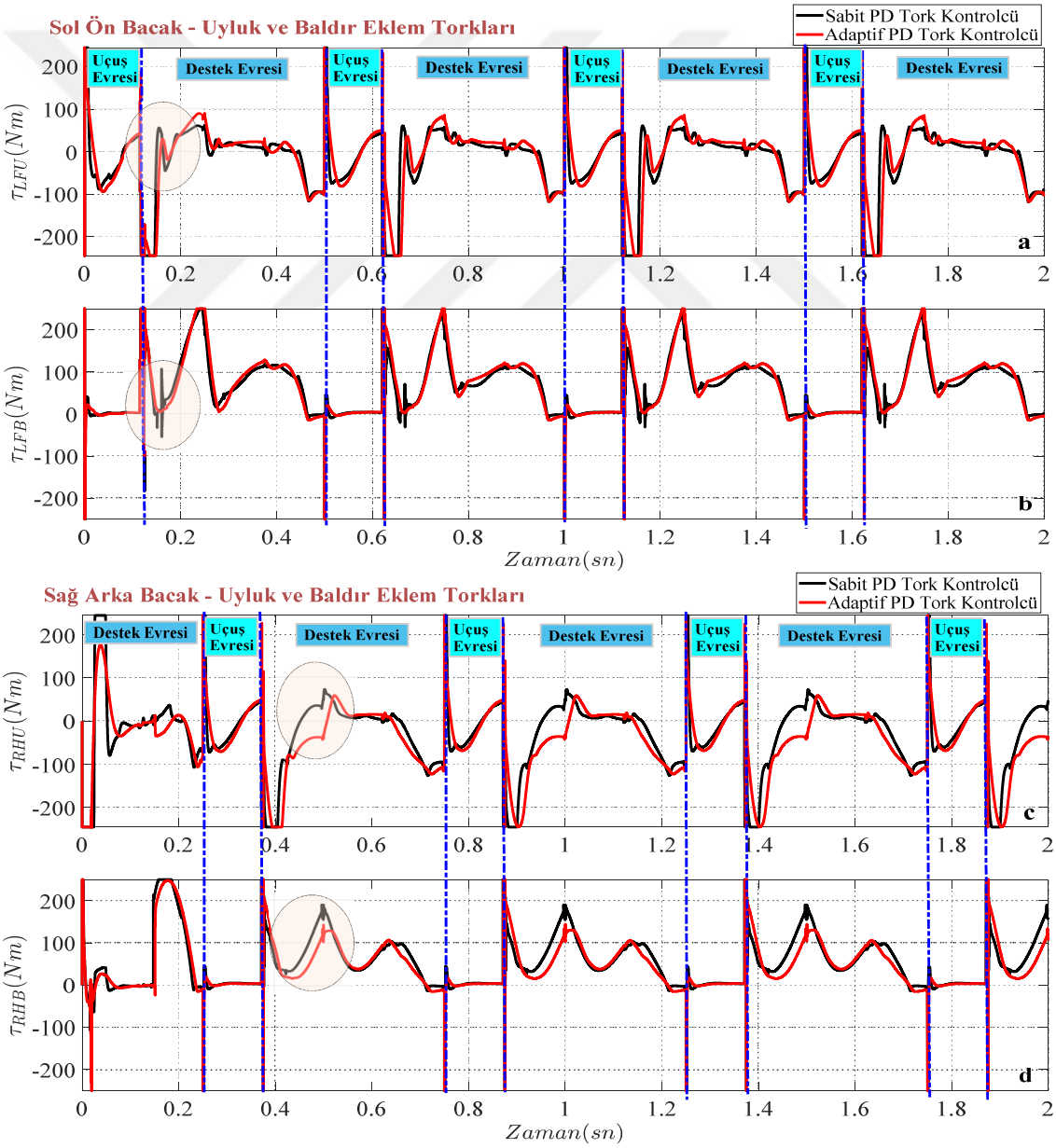
Statik yürüyüşte, ayakların adım yörünge takip performanslarını ayrıntılı olarak inceleyebilmek amacıyla, sistemin geçici rejim cevabından sonraki kararlı yürüyüşün ilk periyodundaki (0.5-1 sn arası), yörünge takip hataları yüzdesel olarak araştırılmıştır. Sol ön bacağın (LF); x, z yönlerindeki ve x-z düzlemindeki maksimum − ortalama yüzde hataları sırasıyla, % 2.4 − % 0.6, % 11.1 − % 3.7 ve % 11.3 − % 3.8'dir. Sağ ön bacağın (RF) ise sırasıyla; % 2.5 − % 0.7, % 9.9 − % 3.3 ve % 10.2 − % 3.4'tür. Benzer şekilde sol arka bacağın (LH) sırasıyla; % 1.2 −% 0.4, % 7.7 − % 3.2 ve % 7.8 − % 3.3'tür. Sağ arka bacağın (RH) ise sırasıyla; % 1.4 − % 0.6, % 9.9 − % 3.5 ve % 10.0 − % 3.6'dır.

4AR'ın statik yürüyüş simülasyonunda; gövde durum değişkenlerine, her bir bacak için uyluk ve baldır eklemlerinin açısal konumlarına, x ve z koordinatları için ayak ucu yörüngelerine ait, referans ve gerçekleşen değerleri arasındaki, maksimum ve ortalama hata değerlerine ait veriler ayrıntılı olarak Çizelge 6.2'de sunulmuştur.

Çizelge 6.2. Statik yürüyüş – Sistem değişkenlere ait maks. ve ort. hata değerleri

Uzuv		Değişken	Birim	Maksimum Hata	Ortalama Hata
Gövde		ex_G	m	0.121	0.073
		ez_G	m	0.010	0.004
		$e\dot{x}_G$	m/s	0.812	0.067
		$e\theta_G$	derece	2.820	0.284
Uyluk Eklemi		$eLFU$	derece	1.303	0.299
		$eRFU$	derece	5.315	0.328
		$eLHU$	derece	16.31	0.398
		$eRHU$	derece	22.27	0.554
Baldır Eklemi		$eLFB$	derece	2.668	0.249
		$eRFB$	derece	1.703	0.255
		$eLHB$	derece	4.693	0.191
		$eRHB$	derece	7.822	0.206
Ayak ucu Konumları	*LF*	exE_{LF}	m	0.0354	0.0049
		ezE_{LF}	m	0.0165	0.0037
	RF	exE_{RF}	m	0.0500	0.0051
		ezE_{RF}	m	0.0103	0.0033
	LH	exE_{LH}	m	0.1500	0.0042
		ezE_{LH}	m	0.0248	0.0034
	RH	exE_{RH}	m	0.2001	0.0057
		ezE_{RH}	m	0.0242	0.0036

Destek ve uçuş evresine ait zemin etkileşimlerinin dinamik karakteristiklerinin farklı olması nedeniyle, bu evreler için uyluk ve baldır eklemlerinin tork gereksinimleri de değişkenlik göstermektedir. Bu sebeple, adaptif bir tork kontrolcü kullanılmıştır. Kazançların değişken olmasının etkinliğini incelemek amacıyla, statik yürüyüşte, adaptif ve sabit kontrolcünün (uçuş everesinde de, destek evresindeki kazançların kullanıldığı), sol ön ve sağ arka bacaklara ait uyluk ve baldır eklemleri için ürettiği tork değişimleri, sırasıyla Şekil 6.20a, 6.20b ve 6.20c, 6.20d'de karşılaştırılmıştır. Şekillerden anlaşılacağı üzere; adaptif kontrolcü daha düşük ve düzenli, daha az yön değiştiren değerler üreterek, ani kuvvetlerin oluşumunu azaltan tork değişimleri gerçekleştirmiştir. Özellikle uçuş evresinden, destek evresine geçiş anında oluşan ani aşmaların azalmasını sağlamıştır.



Şekil 6.20. Adaptif ve sabit kazançlı PD tork kontrolcünün karşılaştırılması

6.3.2. Tırıs yürüyüşün sayısal çözümleri

Tırıs yürüyüş, çapraz (diagonal) bacakların simetrik olarak adım atmasıyla gerçekleşen dinamik bir yürüyüş çeşididir. Çapraz bacak çiftlerinden biri uçuş evresinde iken diğer bacak çifti daima destek evresindedir. Destek poligonu oluşmasa da çapraz iki bacağın sürekli destek fazında olması nedeniyle, diğer dinamik yürüyüşlere kıyasla daha dengeli bir yürüyüştür. Statik yürüyüşe göre daha hızlı ve diğer dinamik yürüyüşlere göre daha kararlı olması sebebiyle tırıs oldukça yaygın kullanılır. Çizelge 6.3'te, tırıs yürüyüş boyunca bacakların birbirlerine göre faz farkları belirtilmiştir. Çizelgede bacakların, uçuş (açık mavi) ve destek (koyu mavi) evrelerindeki faz farkları gösterilmiştir.

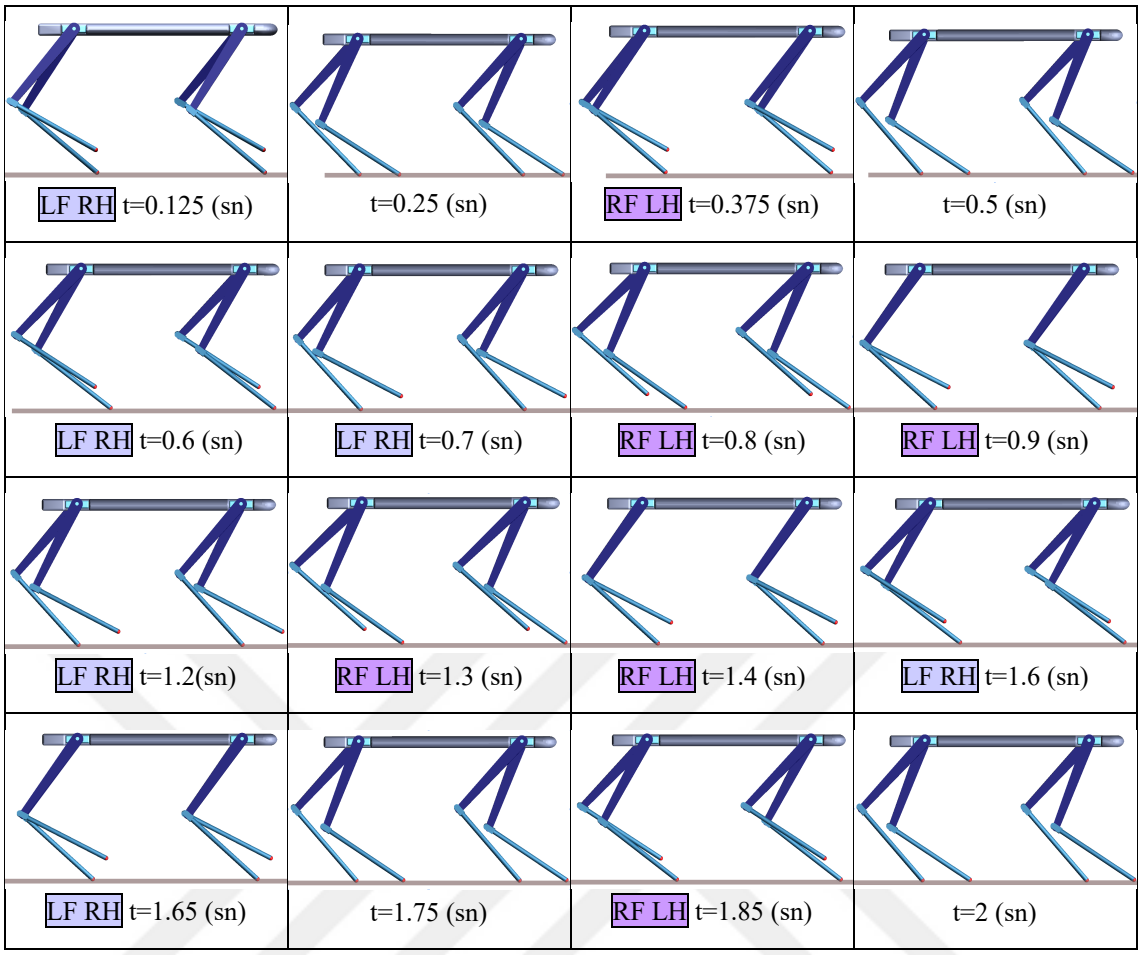
Çizelge 6.3. Tırıs yürüyüş boyunca bacaklara ait faz farkları

	$0 < t < T/4$	$T/4 < t < T/2$	$T/2 < t < 3T/4$	$3T/4 < t < T$
$\boldsymbol{\beta_{LF}}$	0	0	π	π
$\boldsymbol{\beta_{RF}}$	π	π	0	0
$\boldsymbol{\beta_{LH}}$	π	π	0	0
$\boldsymbol{\beta_{RH}}$	0	0	π	π

Dört bacaktan ikisi sürekli destek evresinde olduğu için, tırıs yürüyüşün görev faktörü, $\alpha_{tırıs} = 0.5$'tir. Tırıs yürüyüşte gövdenin ortalama hızı, $\dot{x}_{G_{tırıs}} = V_{G_{tırıs}} = \left[\frac{2L}{T}\right]$ olarak hesaplanır. Bu şekilde, 4AR'ın tırıs yürüyüşünde gövdenin ortalama hızı 0.8 m/s olarak gerçekleşmiştir.

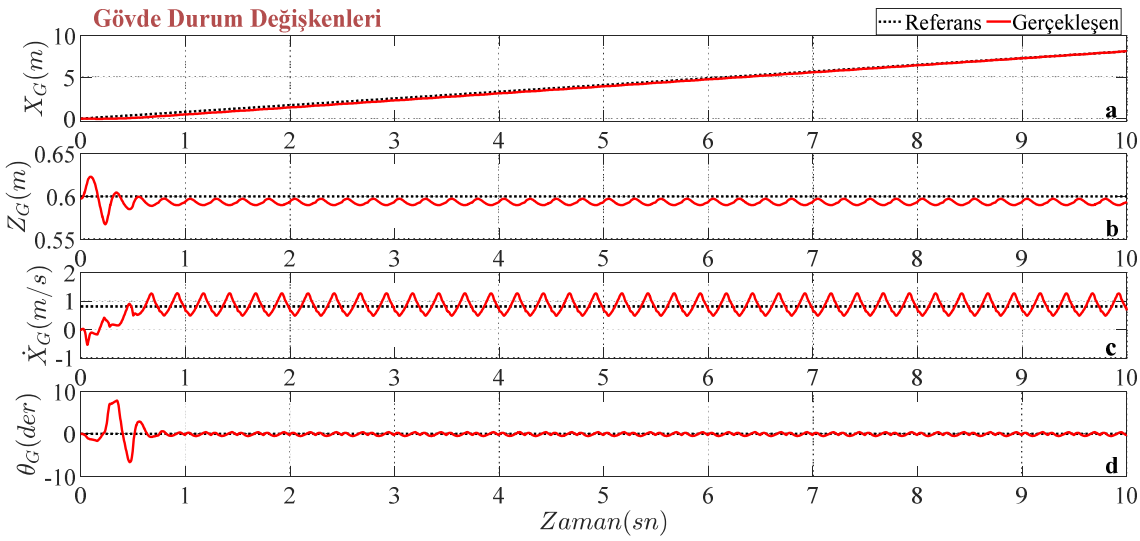
4AR'ın tırıs yürüyüşüne ait MATLAB&ADAMS eş simülasyonu gerçekleştirilmiş ve sonuçlar grafiksel formlarda sunulmuştur. Adaptif PD kontrolcüye ait kazançlar; destek evresi için $kp_{(st)}=[312, 468, 312, 468, 312, 468, 312, 468]$ ve $kd_{(st)}=[2.8, 8.1, 2.8, 8.1, 2.8, 8.1, 2.8, 8.1]$, uçuş evresi için $kp_{(sw)}=[62.4, 56.1, 62.4, 56.1, 62.4, 56.1, 62.4, 56.1]$ ve $kd_{(sw)}=[0.85, 0.77, 0.85, 0.77, 0.85, 0.77, 0.85, 0.77]$ olarak ayarlanmıştır. Tırıs yürüyüş periyodu $T_{tırıs}=(t_{st}+t_{sw})=(0.25+0.25)=0.5\ sn$ olacak şekilde tanımlanmıştır.

4AR'ın tırıs yürüyüşü için simülasyon süresi 10 saniye olarak belirlenmiştir. Yürüyüşün ilk 0.5 saniyesinde, sistemin durum değişkenleri referans değerlerine ulaşmış ve sonrasında robot geçici rejimden çıkıp sürekli ve kararlı bir şekilde tırıs yürüyüşünü sürdürülmüştür. Tırıs yürüyüşün ilk 2 saniyelik kısmına ait robotun anlık görüntüleri Şekil 6.21'de (açık ve koyu mor, uçuş evresindeki çapraz bacak çiftleri) verilmiştir.

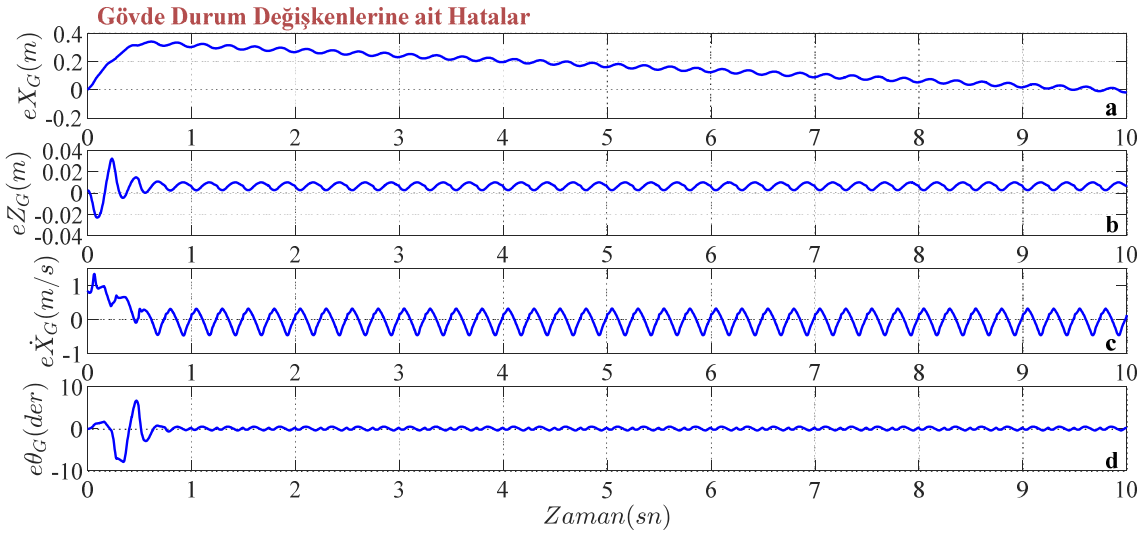


Şekil 6.21. Tırıs yürüyüş eş simülasyonuna ait anlık ekran görüntüleri

Tırıs yürüyüş simülasyonunda, gövde değişkenlerinin (x_G z_G $\dot{x}_G$ θ_G) ve hata değerlerinin (ex_G ez_G $\dot{ex}_G$ $e\theta_G$) değişimlerine ait sonuçlar sırasıyla Şekil 6.22a, 6.22b, 6.22c, 6.22d ve Şekil 6.23a, 6.23b, 6.23c, 6.23d'de verilmiştir.



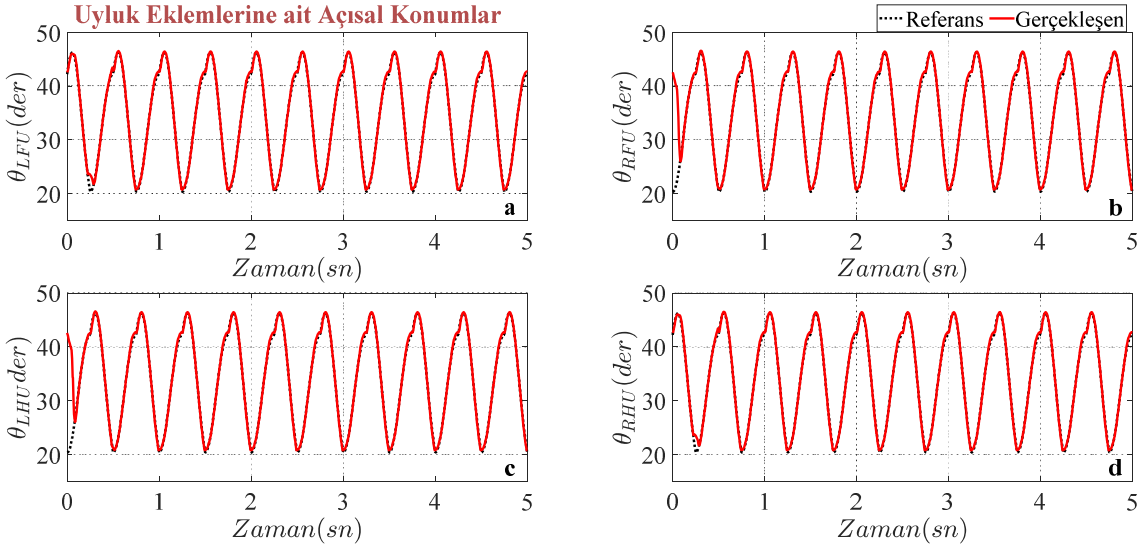
Şekil 6.22. Tırıs yürüyüş – Gövde durum değişkenlerine ait sonuçlar



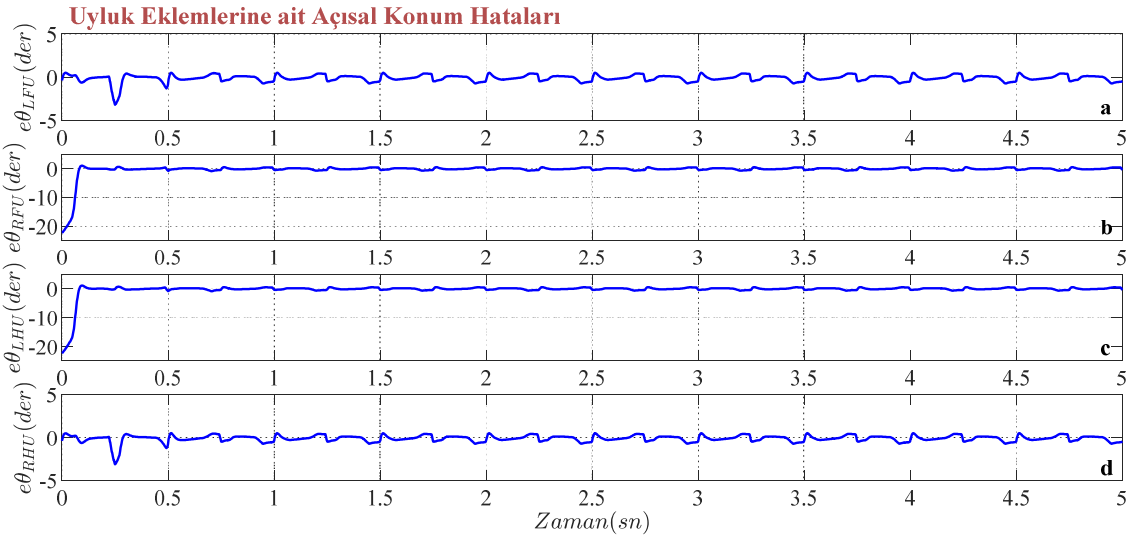
Şekil 6.23. Tırıs yürüyüş – Gövde durum değişkenlerine ait hatalar

Tırıs yürüyüşün ilk 5 saniyelik kısmı için, uyluk eklemlerinin açısal konumlarının (θ_{LFU} ... θ_{RHU}) ve hata değerlerinin ($e\theta_{LFU}$ ... $e\theta_{RHU}$) değişimlerine ait simülasyon sonuçları Şekil 6.24a, 6.24b, 6.24c, 6.24d ve Şekil 6.25a, 6.25b, 6.25c, 6.25d'de bacak sırasına göre verilmiştir. Uyluk eklemlerine ait tork girişlerinin değişimi Şekil 6.26a, 6.26b, 6.26c, 6.26d'de sunulmuştur.

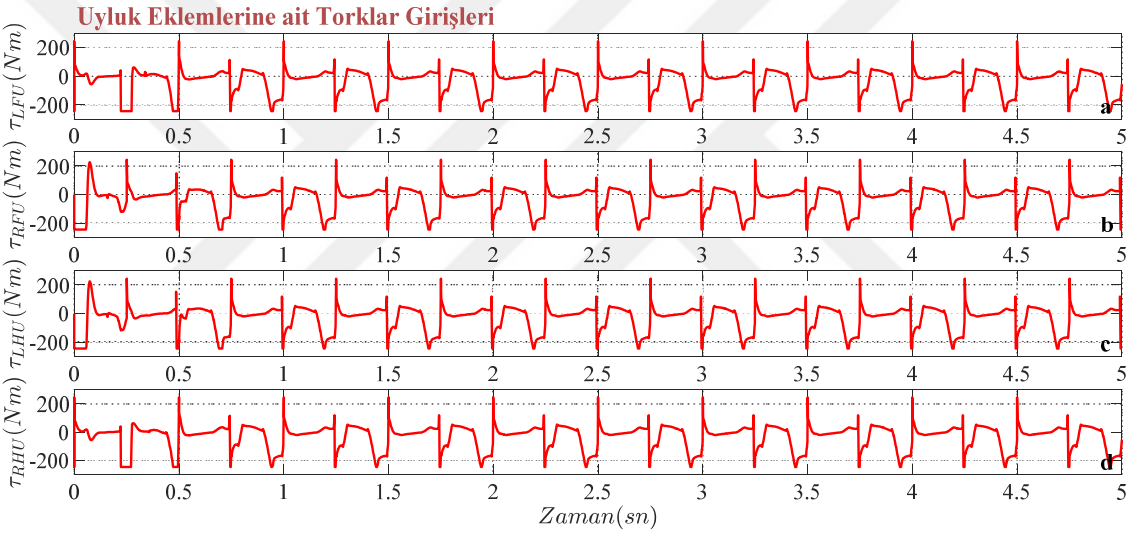
Benzer şekilde tırıs yürüyüşte, baldır eklemlerinin açısal konumlarının (θ_{LFB} ... θ_{RHB}) ve hata değerlerinin ($e\theta_{LFU}$ ... $e\theta_{RHU}$) değişimlerine ait simülasyon sonuçları, bacak sırasına göre, Şekil 6.27a, 6.27b, 6.27c, 6.27d ve Şekil 6.28a, 6.28b, 6.28c, 6.28d'de sırasıyla verilmiştir. Baldır eklemlerine ait tork girişlerinin değişimi Şekil 6.29a, 6.29b, 6.29c, 6.29d'de sunulmuştur.



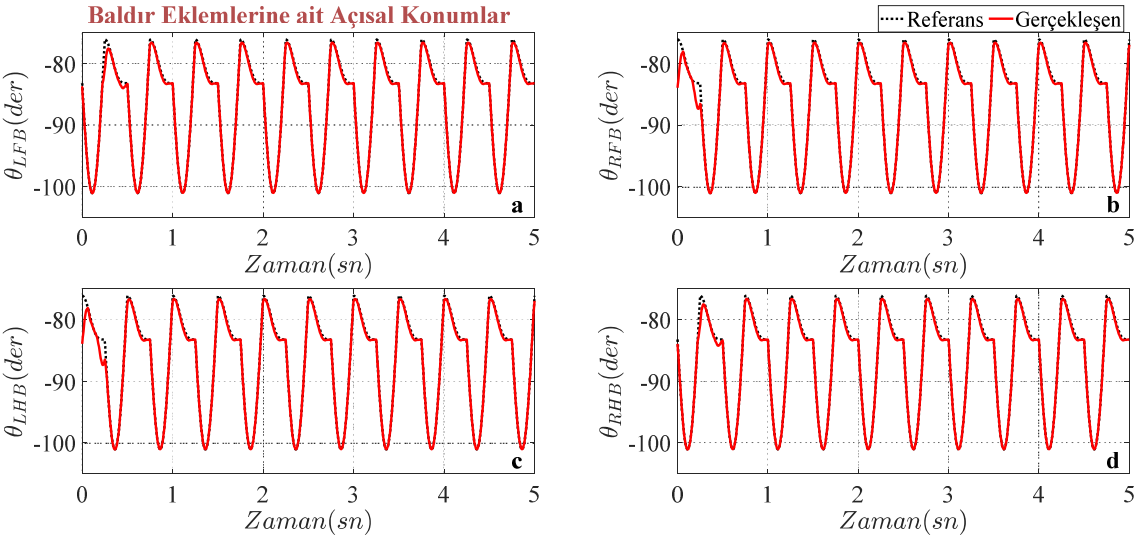
Şekil 6.24. Tırıs yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait açısal konumlar



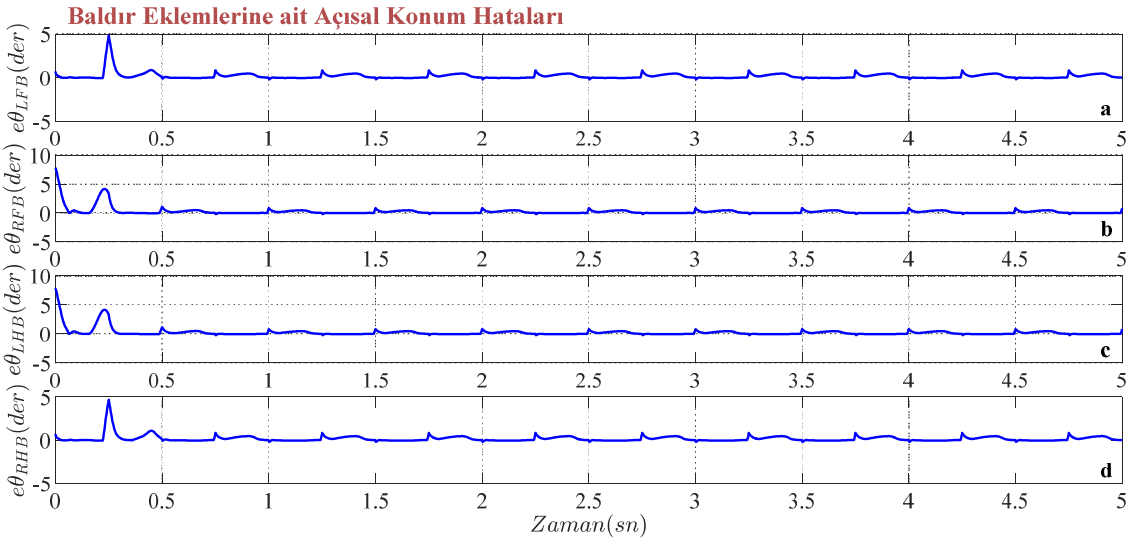
Şekil 6.25. Tırıs yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait açısal konum hataları



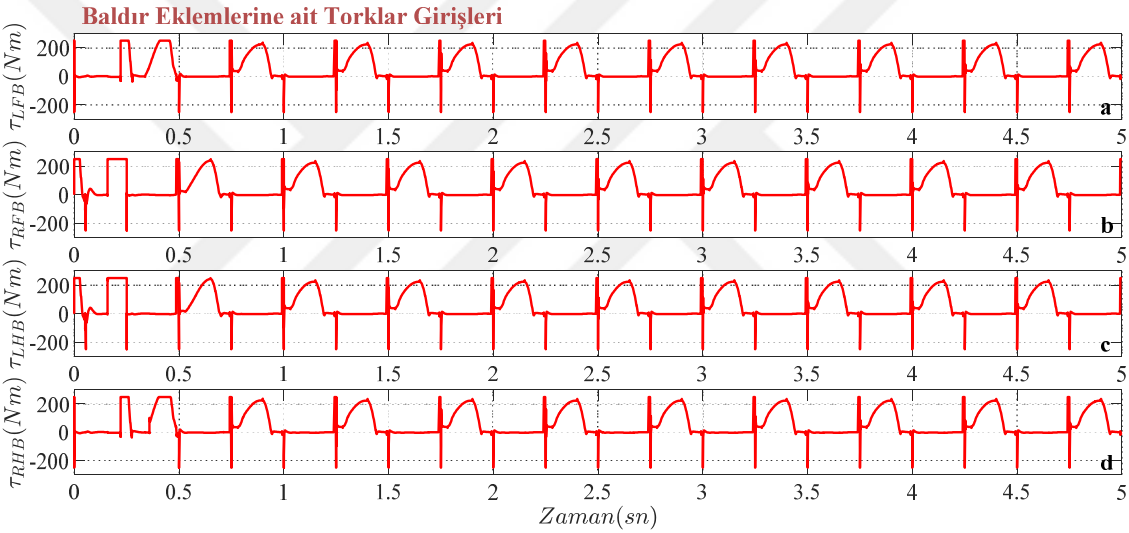
Şekil 6.26. Tırıs yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait tork girişleri



Şekil 6.27. Tırıs yürüyüş – Baldır eklemlerine ait açısal konumlar

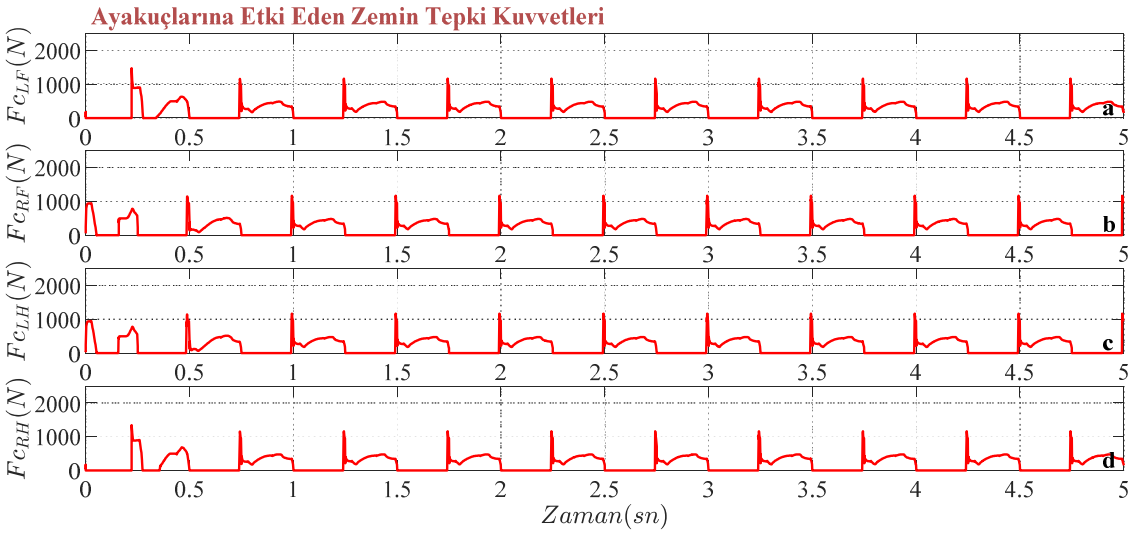


Şekil 6.28. Tırıs yürüyüş – Baldır eklemlerine ait açısal konum hataları

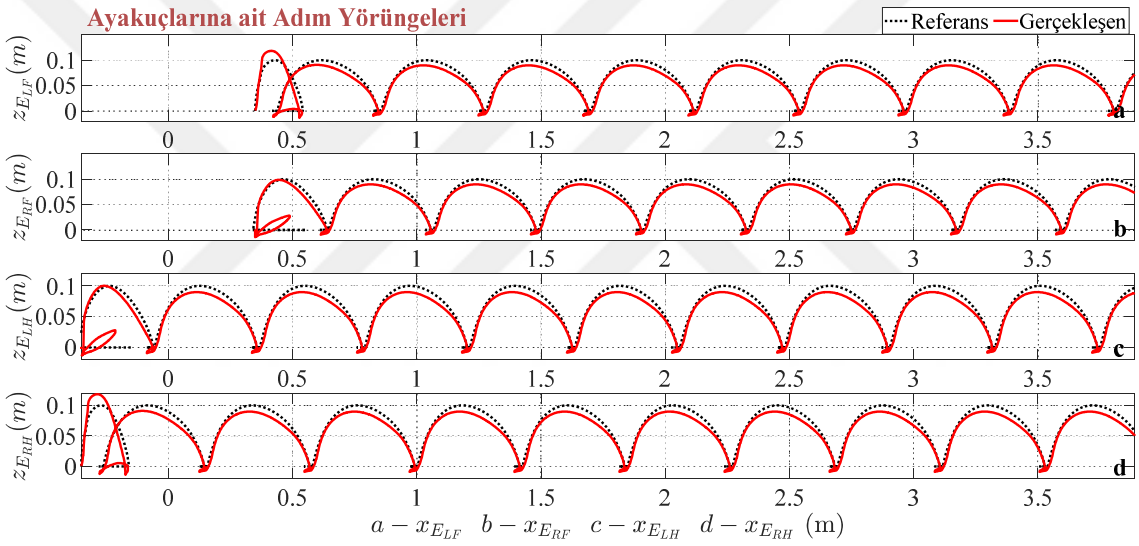


Şekil 6.29. Tırıs yürüyüş – Baldır eklemlerine ait tork girişleri

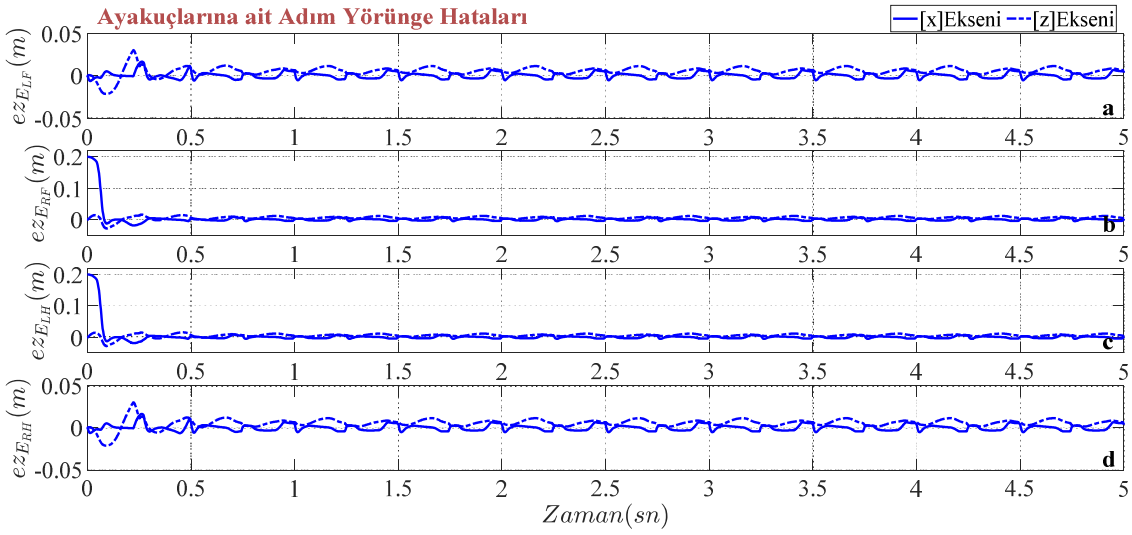
Tırıs yürüyüşün ilk 5 saniyelik kısmında, ayakuçlarına etki eden zemin tepki kuvvetlerinin ($F_{c_{LF}}$ ... $F_{c_{RH}}$) değişimi bacak sırasına göre, Şekil 6.30a, 6.30b, 6.30c, 6.30d'de verilmiştir. En yüksek tepki kuvvetleri, çapraz bacak çiftlerinin destek evreleri arasında oluşmuştur. Şekil 6.31a, 6.31b, 6.31c, 6.31d'de her bir bacak için ayak uçlarının izledikleri düzlemsel adım yörüngeleri, Şekil 6.32a, 6.32b, 6.32c, 6.32d'de ise referans yörünge ile gerçekleşen yörünge arasındaki hata değişimleri, sırasıyla sunulmuştur. Ayrıca, tırıs yürüyüşün ilk 2 saniyelik kısmında, ön (LF, RF) ve arka (LH, RH) bacakların yörünge x-z eksenlerindeki konumları ve izleme hatalarının değişimleri, Şekil 6.33a, 6.33b, 6.33c, 6.33d, 6.33e, 6.33f'de ve Şekil 6.34a, 6.34b, 6.34c, 6.34d, 6.34e, 6.34f'de sırasıyla, ayrıntılı olarak sunulmuştur.



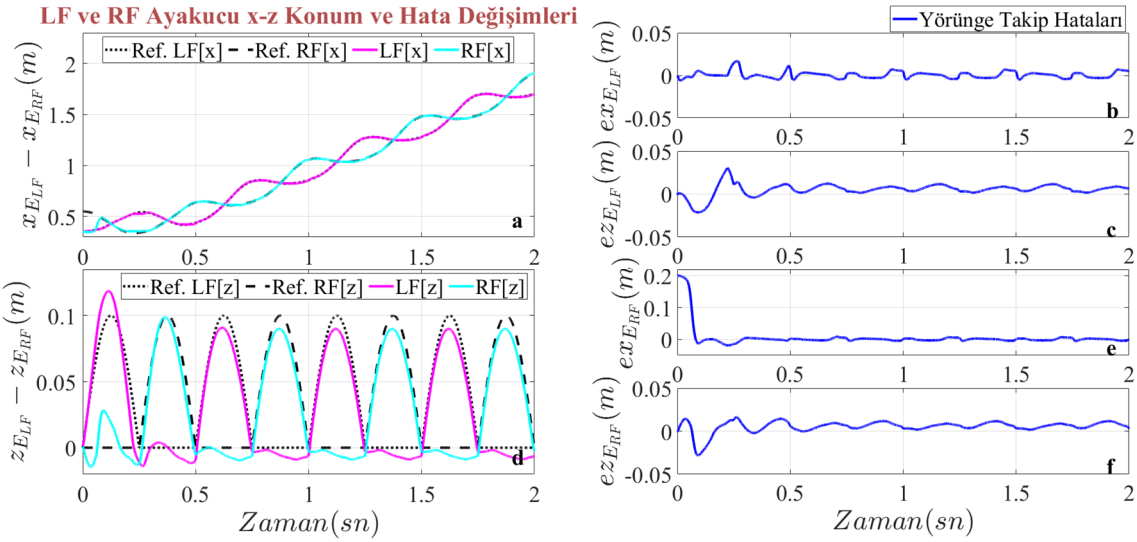
Şekil 6.30. Tırıs yürüyüş – Ayakuçlarına etki eden zemin tepki kuvvetleri



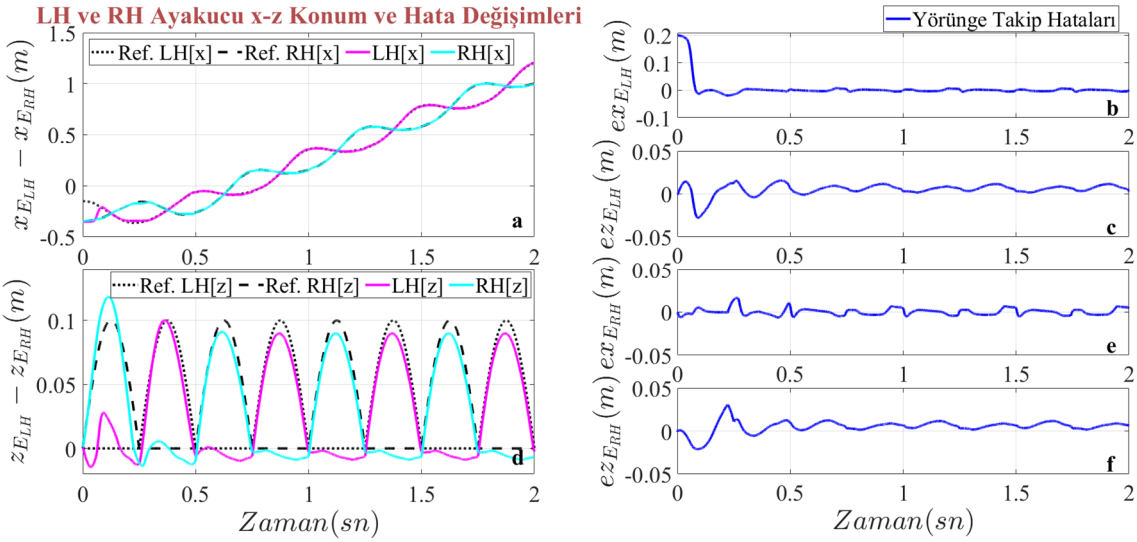
Şekil 6.31. Tırıs yürüyüş – Ayakuçlarına ait adım yörüngeleri



Şekil 6.32. Tırıs yürüyüş – Ayakuçlarına ait adım yörünge hataları



Şekil 6.33. Tırıs yürüyüş – LF ve RF ayakuçlarının x-z konumları ve hataları



Şekil 6.34. Tırıs yürüyüş – LH ve RH ayakuçlarının x-z konumları ve hataları

Tırıs yürüyüş simülasyonunda, sistemin geçici rejim cevabından sonraki kararlı yürüyüşün ilk periyodunda (0.5-1 sn arası), ayak ucu yörünge izleme hataları yüzdesel olarak araştırılmıştır. Sol ön bacağın (LF); x, z yönlerindeki ve x-z düzlemindeki maksimum − ortalama yüzde hataları sırasıyla, % 1.7 − % 0.4, % 12.2 − % 6.1 ve % 12.3 − % 6.2'dir. Sağ ön bacağın (RF) ise sırasıyla; % 1.4 − % 0.3, % 11.6 − % 6.1 ve % 11.7 − % 6.3'tür. Benzer şekilde sol arka bacağın (LH) sırasıyla; % 1.4 − % 0.3, % 11.7 − % 6.2 ve % 11.8 − % 6.2'dir. Sağ arka bacağın (RH) ise sırasıyla; % 1.5 − % 0.4, % 12.3 − % 6.0 ve % 12.5 − % 6.1'dir. 4AR'ın statik yürüyüş simülasyonunda; gövde ve eklem durum değişkenlerine, x ve z koordinatları için ayak ucu yörüngelerine ait, maksimum ve ortalama hata değerleri ayrıntılı olarak Çizelge 6.4'te sunulmuştur.

Çizelge 6.4. Tırıs yürüyüş – Sistem değişkenlere ait maks. ve ort. hata değerleri

Uzuv	Değişken		Birim	Maksimum Hata	Ortalama Hata
Gövde	ex_G		m	0.340	0.165
	ez_G		m	0.032	0.007
	$e\dot{x}_G$		m/s	1.348	0.236
	$e\theta_G$		derece	7.835	0.414
Uyluk Eklemi	$eLFU$		derece	3.173	0.273
	$eRFU$		derece	22.27	0.493
	$eLHU$		derece	22.27	0.493
	$eRHU$		derece	3.117	0.271
Baldır Eklemi	$eLFB$		derece	4.805	0.192
	$eRFB$		derece	7.822	0.245
	$eLHB$		derece	7.822	0.245
	$eRHB$		derece	4.670	0.193
Ayak ucu Konumları	LF	exE_{LF}	m	0.0167	0.0027
		ezE_{LF}	m	0.0304	0.0065
	RF	exE_{RF}	m	0.2002	0.0040
		ezE_{RF}	m	0.0282	0.0065
	LH	exE_{LH}	m	0.2002	0.0040
		ezE_{LH}	m	0.0279	0.0065
	RH	exE_{RH}	m	0.0166	0.0027
		ezE_{RH}	m	0.0303	0.0065

6.3.3. Rahvan yürüyüşün sayısal çözümleri

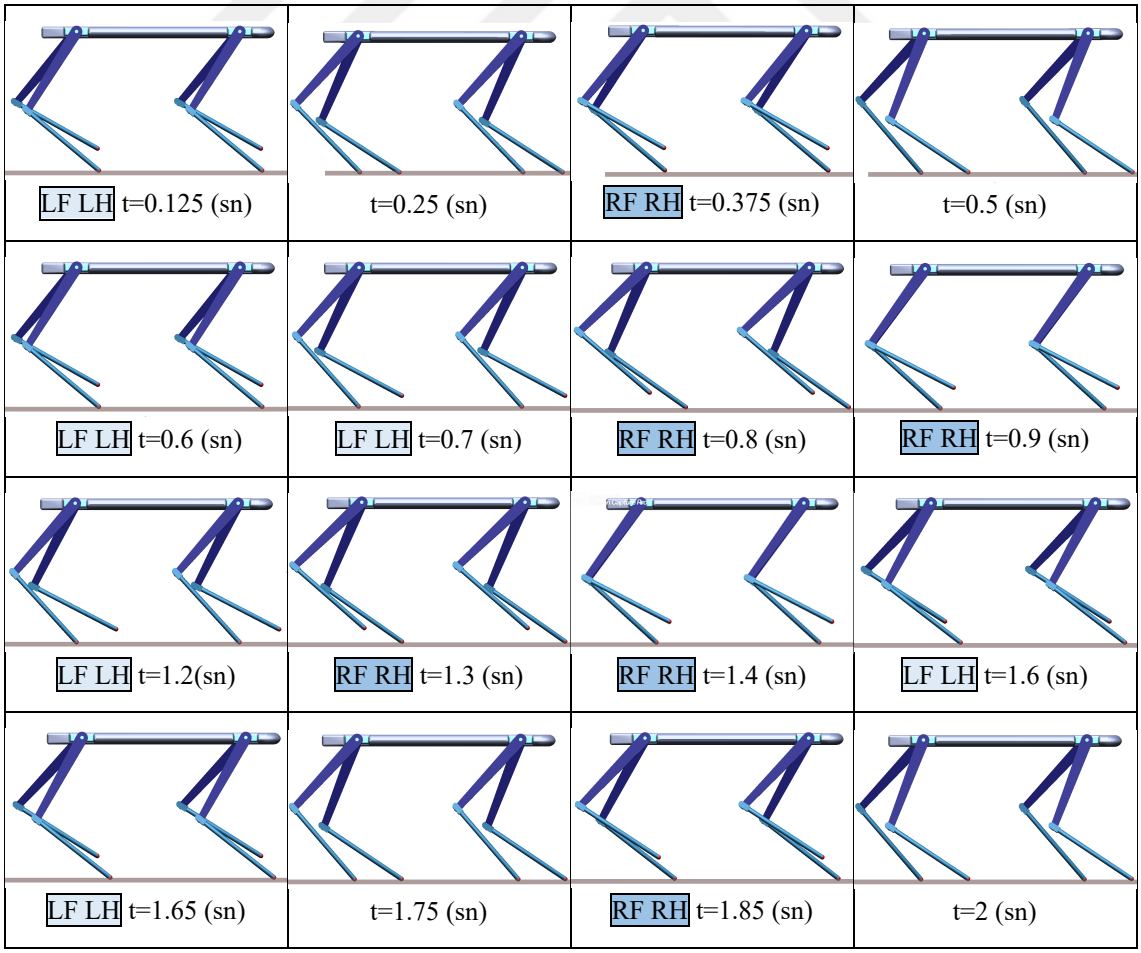
Rahvan yürüyüş, tırıs yürüyüşten farklı olarak sağ/sol yandaki bacak çiftlerinin simetrik olarak adım atmasıyla gerçekleşen dinamik bir yürüyüş çeşididir. Sağ veya sol yanlardaki bacak çiftlerinden biri uçuş evresinde iken, diğeri destek evresindedir. Tırıs yürüyüş ile benzer karakteristiktedir. Ancak, hayvanların nadir tercih ettiği bir yürüyüş olduğu için robotik uygulamalarda da yaygın kullanılmaz. Tırıs yürüyüştekine benzer şekilde, sürekli iki bacak destek evresinde olduğu için, rahvan yürüyüşün görev faktörü, $\alpha_{rahvan}=0.5$'tir. Dolasıyla, 4AR'ın rahvan yürüyüşünde gövdenin ortalama hızı $\dot{x}_{G_{rahvan}} = V_{G_{rahvan}} = \left[\frac{2L}{T}\right]$, yani 0.8 m/s olarak gerçekleşmiştir. Çizelge 6.5'te, rahvan yürüyüş boyunca bacakların birbirlerine göre, uçuş (açık mavi) ve destek (koyu mavi) evrelerindeki faz farkları belirtilmiştir.

Çizelge 6.5. Rahvan yürüyüş boyunca bacaklara ait faz farkları

	$0 < t < T/4$	$T/4 < t < T/2$	$T/2 < t < 3T/4$	$3T/4 < t < T$
$\boldsymbol{\beta_{LF}}$	0	0	π	π
$\boldsymbol{\beta_{RF}}$	π	π	0	0
$\boldsymbol{\beta_{LH}}$	0	0	π	π
$\boldsymbol{\beta_{RH}}$	π	π	0	0

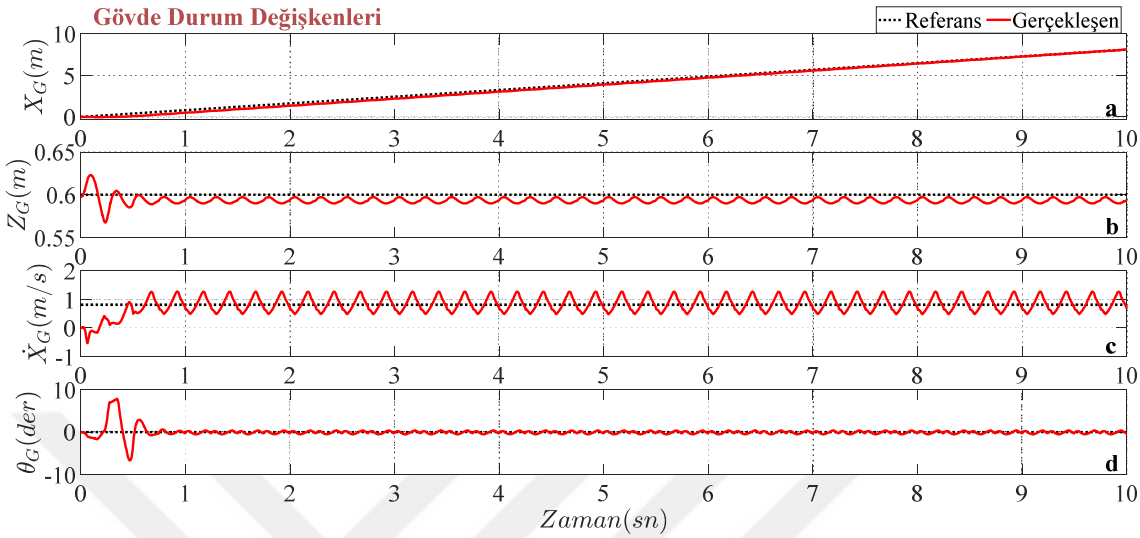
4AR'ın rahvan yürüyüşüne ait MATLAB&ADAMS eş simülasyonu gerçekleştirilmiş ve sonuçlar grafiksel formlarda sunulmuştur. Tırıs ile aynı yürüyüş dinamiklerine sahip olması nedeniyle, rahvan yürüyüş kontrolü için de tırıs yürüyüş için ayarlanan adaptif PD kontrolcü kazançları kullanılmıştır. Aynı şekilde, yürüyüş periyodu $T_{rahvan}=(t_{st} + t_{sw})=(0.25+0.25)=0.5$ saniye olarak tanımlanmıştır.

4AR'ın rahvan yürüyüş simülasyonu, tırıs yürüyüşe benzer şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.35'te, rahvan yürüyüşün ilk 2 saniyelik kısmına ait robotun anlık görüntüleri (açık ve koyu mavi, uçuş evresindeki yanal bacak çiftleri) verilmiştir.

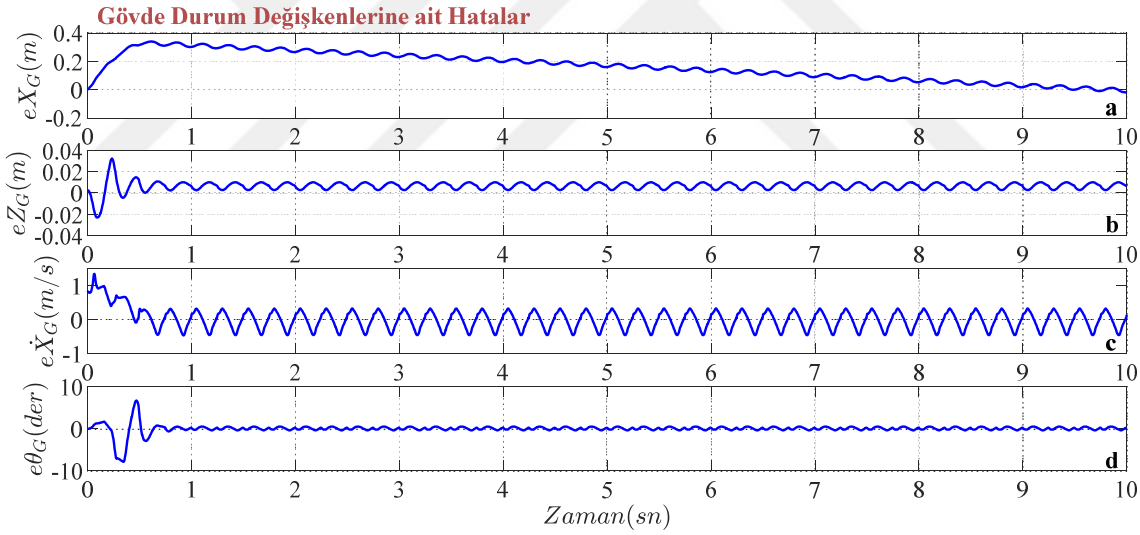


Şekil 6.35. Rahvan yürüyüş eş simülasyonuna ait anlık ekran görüntüleri

Rahvan yürüyüş simülasyonunda, gövde değişkenlerinin (x_B z_B $\dot{x}_B$ θ_B) ve hata değerlerinin (ex_B ez_B $e\dot{x}_B$ $e\theta_B$) değişimlerine ait sonuçlar sırasıyla Şekil 6.36a, 6.36b, 6.36c, 6.36d ve Şekil 6.37a, 6.37b, 6.37c, 6.37d'de verilmiştir.

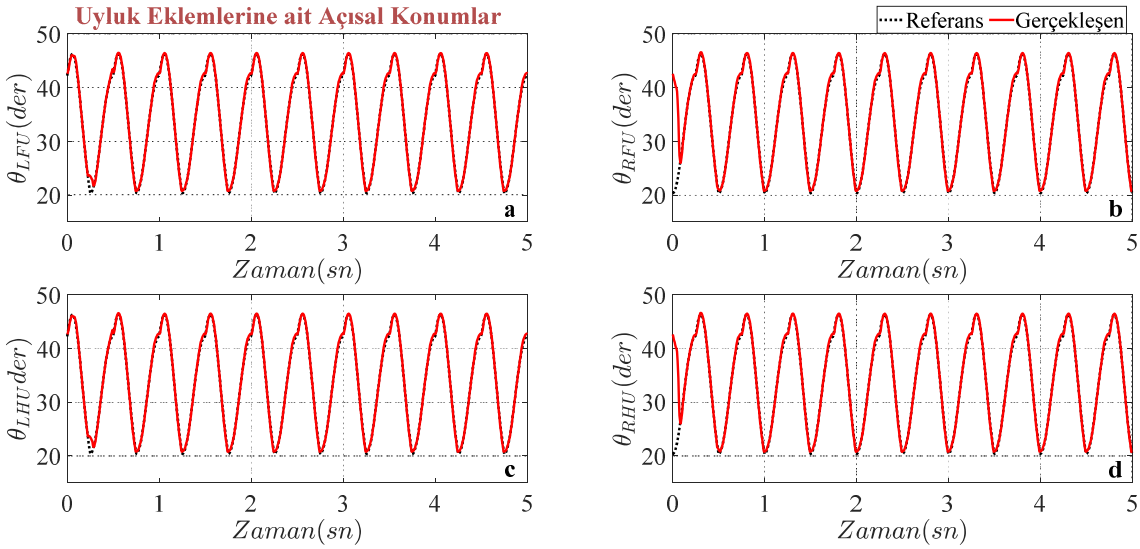


Şekil 6.36. Rahvan yürüyüş – Gövde durum değişkenlerine ait sonuçlar

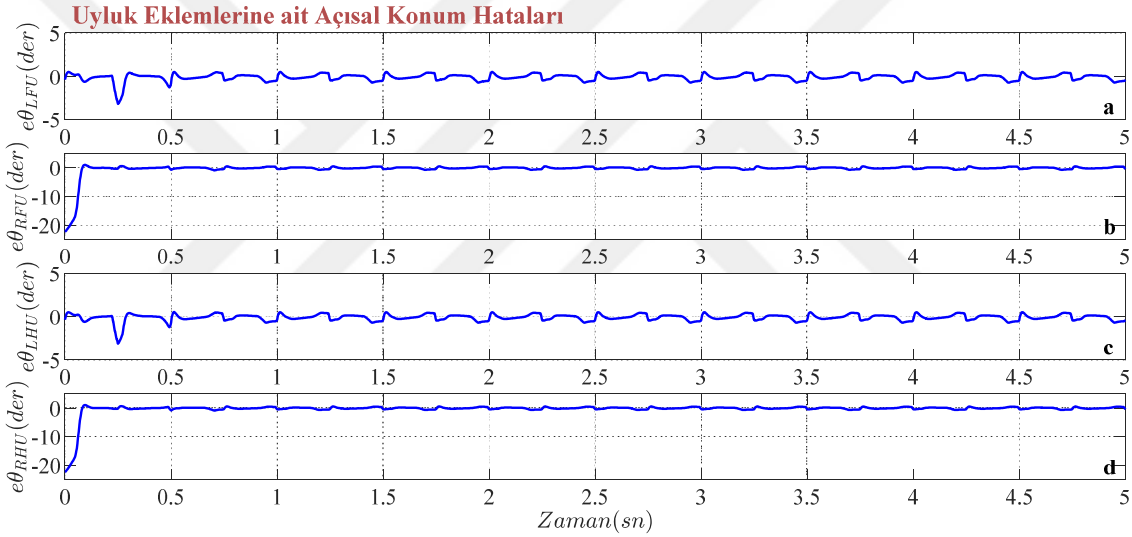


Şekil 6.37. Rahvan yürüyüş – Gövde durum değişkenlerine ait hatalar

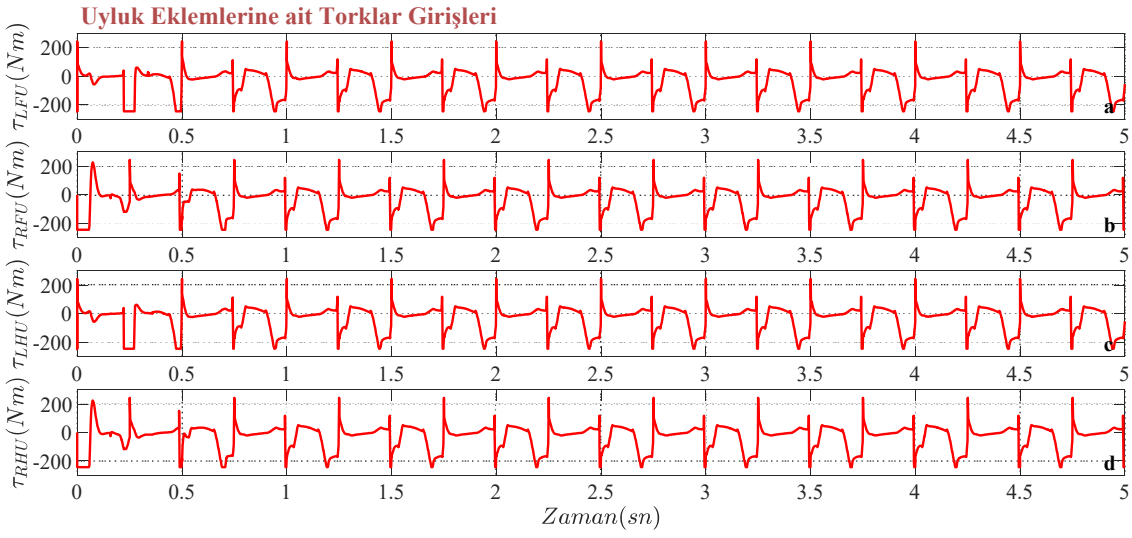
Rahvan yürüyüşün ilk 5 saniyelik kısmı için, bacak sırasına göre, uyluk ve baldır eklemlerinin açısal konumlarının (θ_{LFU} ... θ_{RHU}), (θ_{LFB} ... θ_{RHB}) ve hata değerlerinin ($e\theta_{LFU}$ ... $e\theta_{RHU}$), ($e\theta_{LFU}$ ... $e\theta_{RHU}$) değişimlerine ait sonuçları Şekil 6.38a, 6.38b, 6.38c, 6.38d ve Şekil 6.39a, 6.39b, 6.39c, 6.39d'de; 6.41a, 6.41b, 6.41c, 6.41d ve Şekil 6.42a, 6.42b, 6.42c, 6.42d'de sırasıyla verilmiştir. Baldır ve uyluk eklemlerine ait tork girişlerinin değişimi ise Şekil 6.40a, 6.40b, 6.40c, 6.40d'de ve Şekil 6.43a, 6.43b, 6.43c, 6.43d'de sırasıyla sunulmuştur.



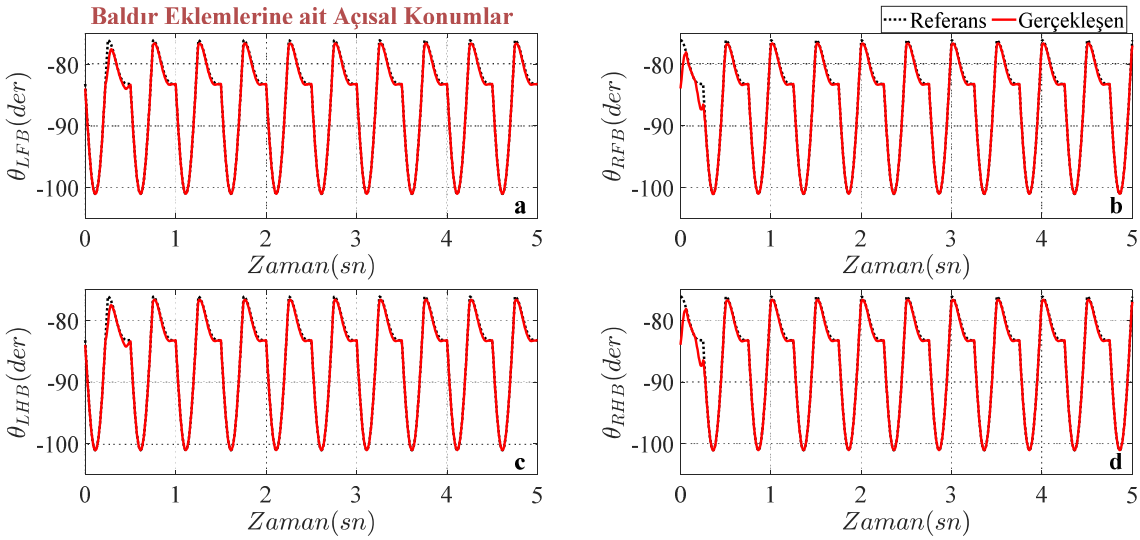
Şekil 6.38. Rahvan yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait açısal konumlar



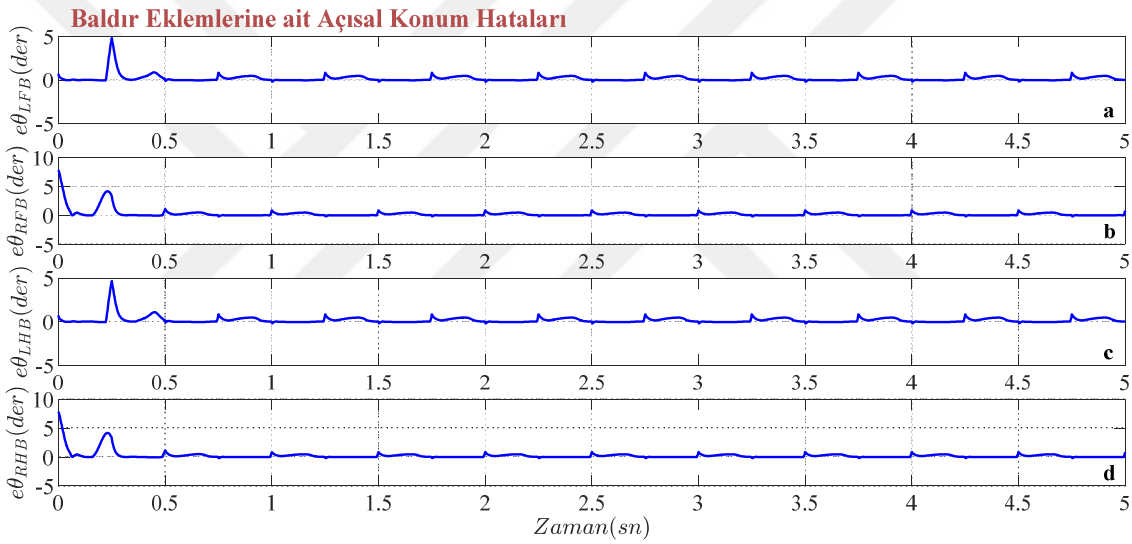
Şekil 6.39. Rahvan yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait açısal konum hataları



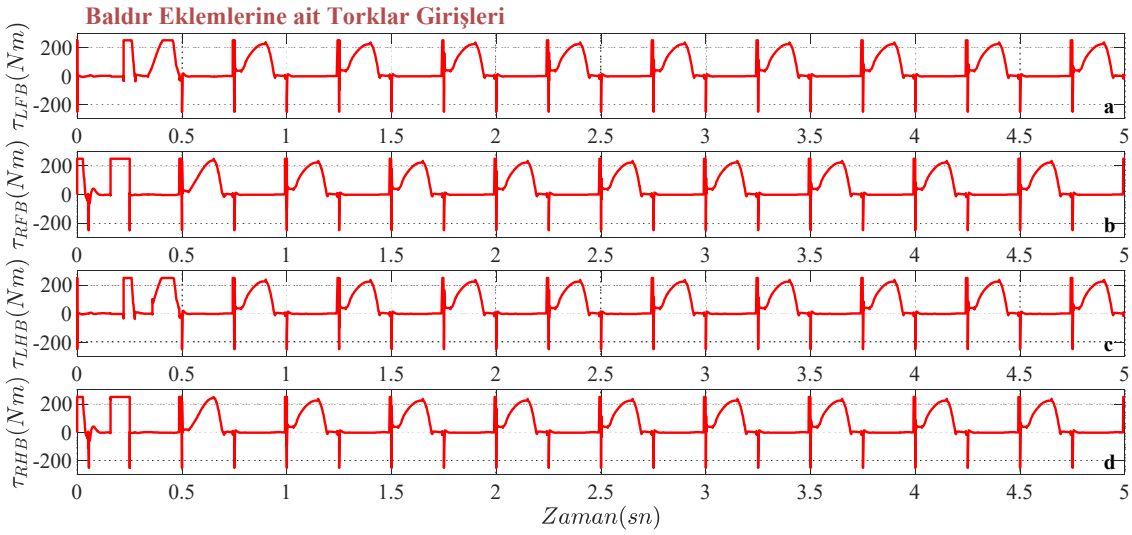
Şekil 6.40. Rahvan yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait tork girişleri



Şekil 6.41. Rahvan yürüyüş – Baldır eklemlerine ait açısal konumlar

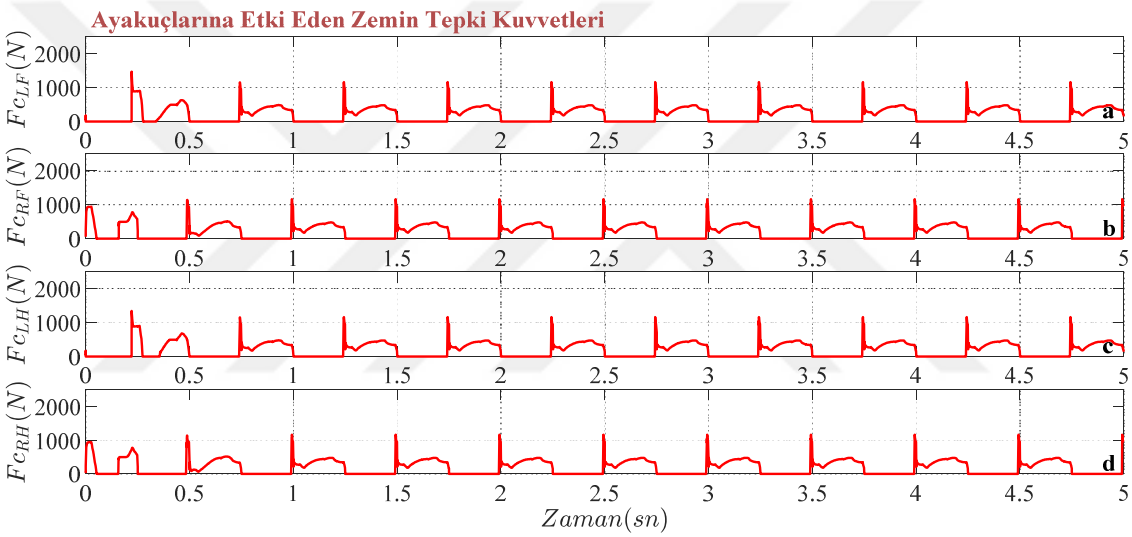


Şekil 6.42. Rahvan yürüyüş – Baldır eklemlerine ait açısal konum hataları

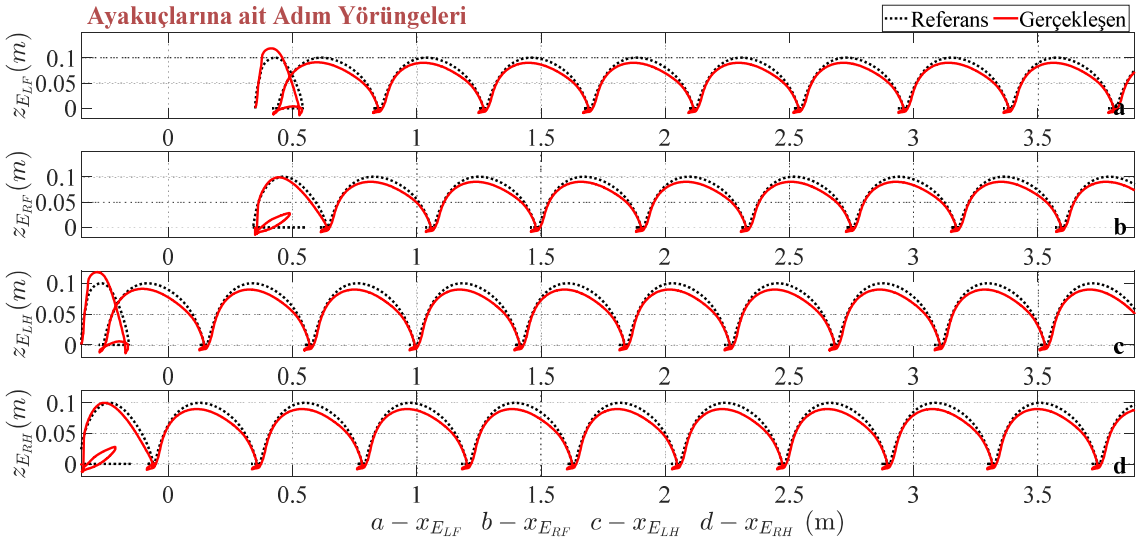


Şekil 6.43. Rahvan yürüyüş – Baldır eklemlerine ait tork girişleri

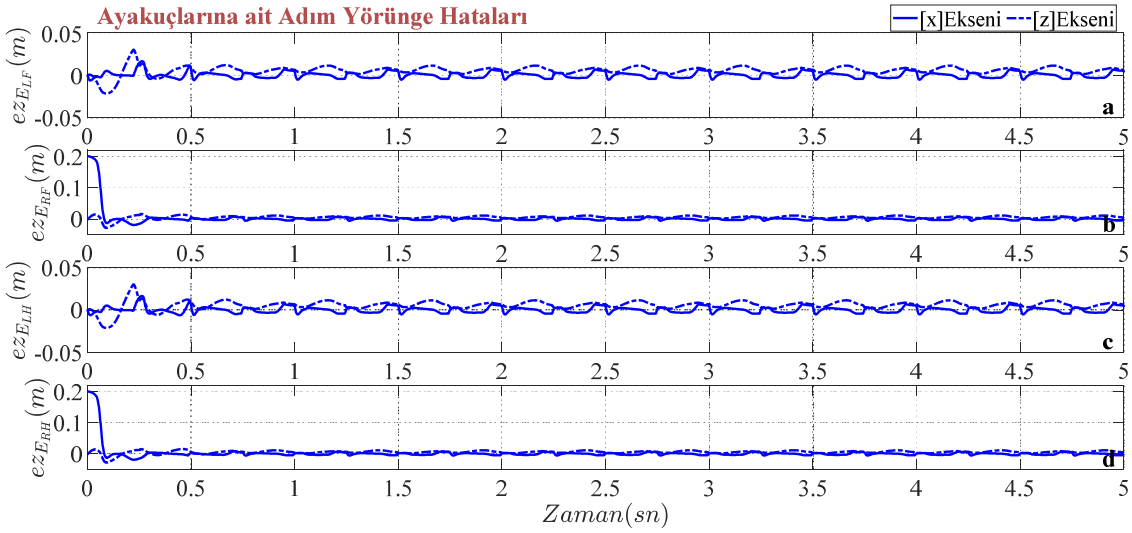
Rahvan yürüyüşün ilk 5 saniyelik kısmında, ayakuçlarına etki eden zemin tepki kuvvetlerinin ($F_{c_{LF}}$ ... $F_{c_{RH}}$) değişimi bacak sıralamasına göre Şekil 6.44a, 6.44b, 6.44c, 6.44d'de verilmiştir. En yüksek tepki kuvvetleri, çapraz bacak çiftlerinin destek evreleri arasında oluşmuştur. Şekil 6.45a, 6.45b, 6.45c, 6.45d'de her bir bacak için ayak uçlarının izledikleri düzlemsel adım yörüngeleri, Şekil 6.46a, 6.46b, 6.46c, 6.46d'de ise referans yörünge ile gerçekleşen yörünge arasındaki hata değişimleri, sırasıyla sunulmuştur. Ayrıca, rahvan yürüyüşün ilk 2 saniyelik kısmında, ön (LF, RF) ve arka (LH, RH) bacakların yörünge x-z eksenlerindeki konumları ve izleme hatalarının değişimleri, Şekil 6.47a, 6.47b, 6.47c, 6.47d, 6.47e, 6.47f'de ve Şekil 6.48a, 6.48b, 6.48c, 6.48d, 6.48e, 6.48f'de sırasıyla, detaylı olarak sunulmuştur.



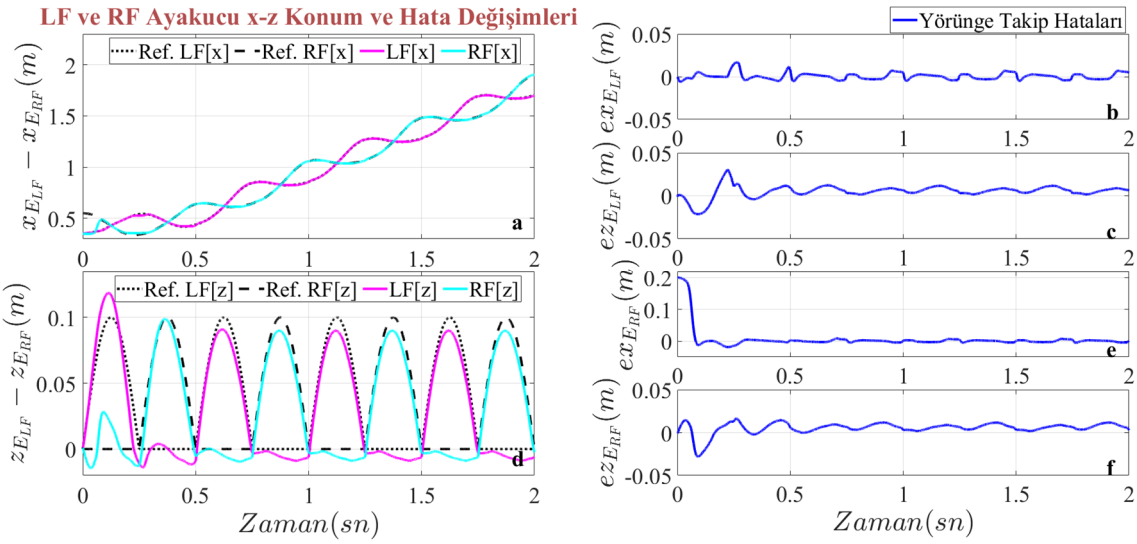
Şekil 6.44. Rahvan yürüyüş – Ayakuçlarına etki eden zemin tepki kuvvetleri



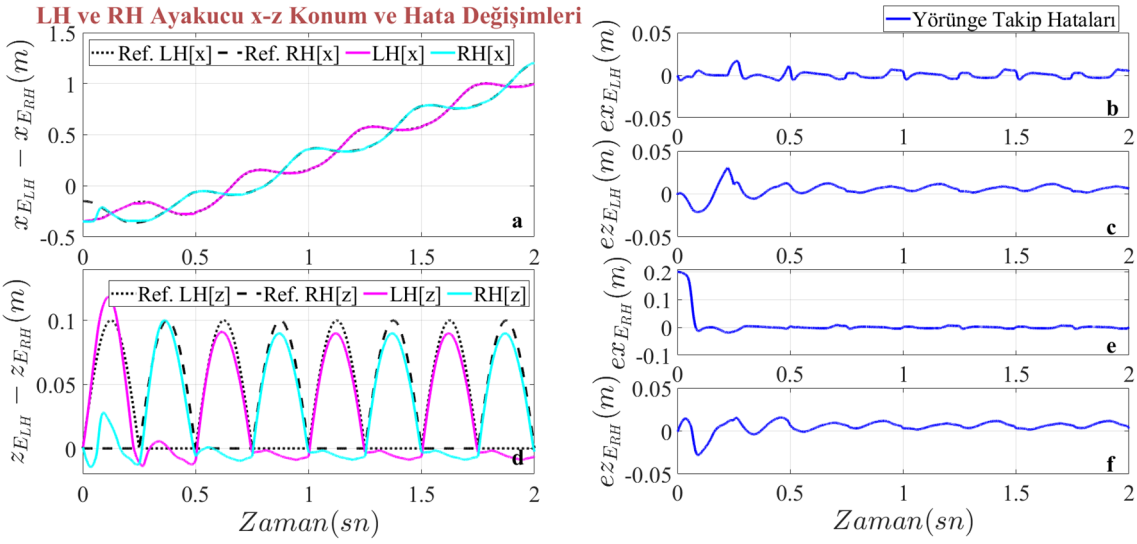
Şekil 6.45. Rahvan yürüyüş – Ayakuçlarına ait adım yörüngeleri



Şekil 6.46. Rahvan yürüyüş – Ayakuçlarına ait adım yörünge hataları



Şekil 6.47. Rahvan yürüyüş – LF ve RF ayakuçlarının x-z konumları ve hataları



Şekil 6.48. Rahvan yürüyüş – LH ve RH ayakuçlarının x-z konumları ve hataları

Rahvan yürüyüş simülasyonunda, sistemin geçici rejim cevabından sonraki kararlı yürüyüşün ilk periyodunda (0.5-1 sn arası), yörünge takip hataları yüzdesel olarak araştırılmıştır. Hatalar tırıs yürüyüşe yakın değerlerde gerçekleşmiştir. Sol ön bacağın (LF); x, z yönlerindeki ve x-z düzlemindeki maksimum − ortalama yüzde hataları sırasıyla, % 1.8 − % 0.4, % 12.3 − % 6.2 ve % 12.4 − % 6.1'dir. Sağ ön bacağın (RF) ise sırasıyla; % 1.3 − % 0.4, % 11.7 − % 6.1 ve % 11.8 − % 6.2'dir. Benzer şekilde, sol arka bacağın (LH) sırasıyla; % 1.6 − % 0.4, % 12.4 − % 6.1 ve % 12.4 − % 6.1'dir. Sağ arka bacağın (RH) ise sırasıyla; % 1,4 − % 0.4, % 11.6 − % 6.1 ve % 11.57 − % 6.1'dir.

4AR'ın rahvan yürüyüş simülasyonunda; gövde ve eklem durum değişkenlerine, x ve z koordinatları için ayak ucu yörüngelerine ait, maksimum ve ortalama hata değerleri ayrıntılı olarak Çizelge 6.6'da sunulmuştur.

Çizelge 6.6. Rahvan yürüyüş – Sistem değişkenlere ait maks. ve ort. hata değerleri

Uzuv	Değişken	Birim	Maksimum Hata	Ortalama Hata
Gövde	ex_G	m	0.340	0.165
	ez_G	m	0.032	0.007
	$e\dot{x}_G$	m/s	1.348	0.236
	$e\theta_G$	derece	7.835	0.414
Uyluk Eklemi	$eLFU$	derece	3.173	0.273
	$eRFU$	derece	22.27	0.493
	$eLHU$	derece	3.117	0.271
	$eRHU$	derece	22.27	0.493
Baldır Eklemi	$eLFB$	derece	4.805	0.192
	$eRFB$	derece	7.822	0.245
	$eLHB$	derece	4.671	0.194
	$eRHB$	derece	4.670	0.245
Ayak ucu Konumları	exE_{LF}	m	0.0168	0.0028
LF	ezE_{LF}	m	0.0304	0.0066
	exE_{RF}	m	0.2002	0.0040
RF	ezE_{RF}	m	0.0282	0.0066
	exE_{LH}	m	0.0167	0.0028
LH	ezE_{LH}	m	0.0304	0.0066
	exE_{RH}	m	0.2002	0.0040
RH	ezE_{RH}	m	0.0279	0.0066

6.3.4. Eşkin yürüyüşün sayısal çözümleri

Eşkin yürüyüş; ön bacaların tırıs yürüyüş ile benzer, arka bacakların ise farklı fazlara sahip olduğu asimetrik ve dinamik bir yürüyüş çeşididir. Yürüyüş periyodu içinde kısa bir süreliğine, üç ayak uçuş evresinde iken bir ayak destek evresindedir. Bu sayede toplam destek evresi oranı azalır ve tırısa kıyasla daha hızlı bir yürüyüş elde edilir. Yüksek hızlarda koşma ve zıplama için bir geçiş yürüyüşü olarak nitelendirilebilir. Çizelge 6.7'de, eşkin yürüyüş boyunca bacakların birbirlerine göre faz farkları belirtilmiştir. Çizelgede bacakların, uçuş (açık mavi) ve destek (koyu mavi) evresindeki faz farkları gösterilmiştir.

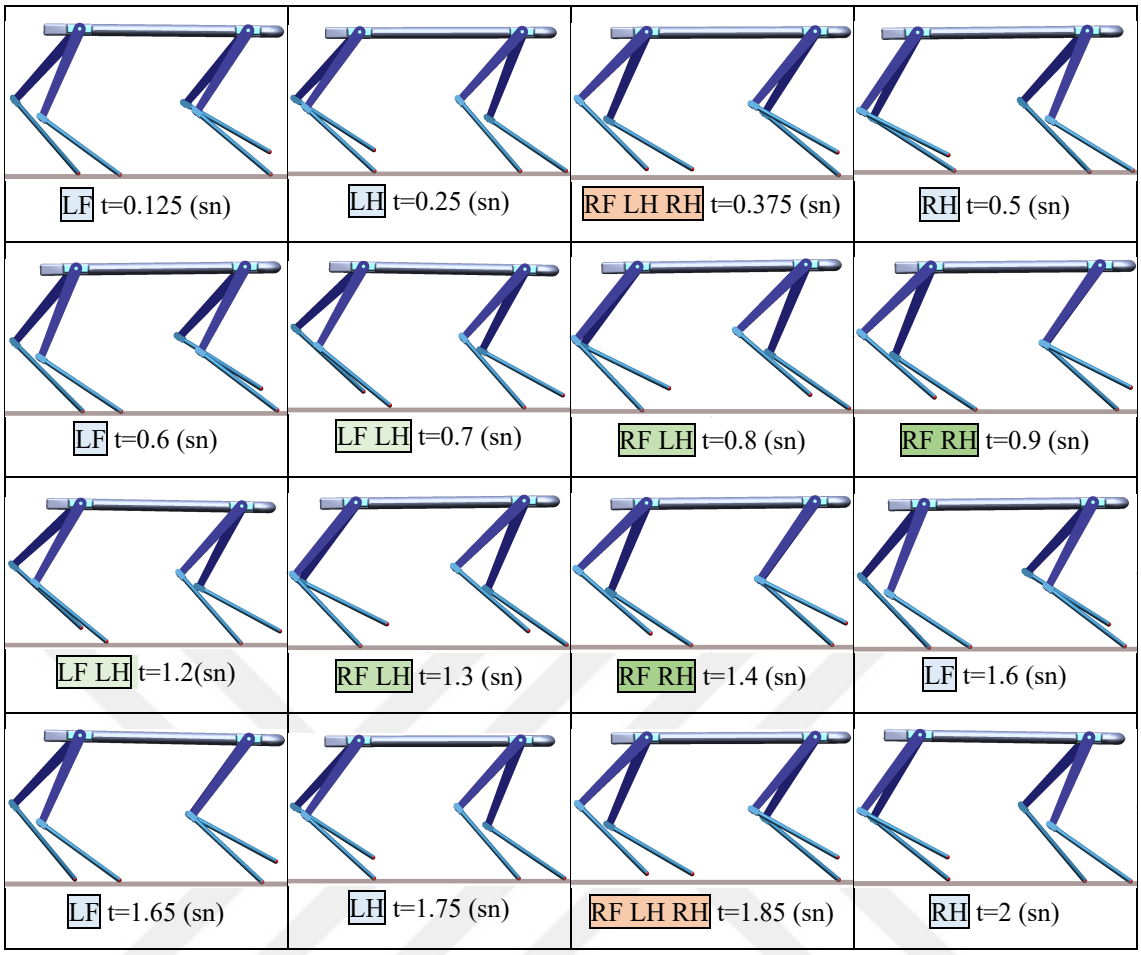
Çizelge 6.7. Eşkin yürüyüş boyunca bacaklara ait faz farkları

	$0 < t < T/4$	$T/4 < t < T/2$	$T/2 < t < 3T/4$	$3T/4 < t < T$
$\boldsymbol{\beta_{LF}}$	0	0	π	π
$\boldsymbol{\beta_{RF}}$	π	π	0	0
$\boldsymbol{\beta_{LH}}$	$1.4\,\pi$	$0.6\,\pi$		
$\boldsymbol{\beta_{RH}}$	0	$1.4\,\pi$		$0.6\,\pi$

Yürüyüş periyodunda belli bir süre tek ayak destek evresinde olduğu için, eşkin yürüyüşün görev faktörü yaklaşık, $\alpha_{eşkin} \approx 0.45$ olur. Eşkin yürüyüşte gövdenin ortalama hızı yaklaşık, $\dot{x}_{G_{eşkin}} = V_{G_{eşkin}} = \left[\frac{2L}{T}\,\frac{\alpha_{tırıs}}{\alpha_{eşkin}}\right]$ olarak hesaplanır. Bu şekilde, 4AR'ın eşkin yürüyüşünde gövdenin ortalama hızı yaklaşık 0.9 m/s olarak gerçekleşmiştir.

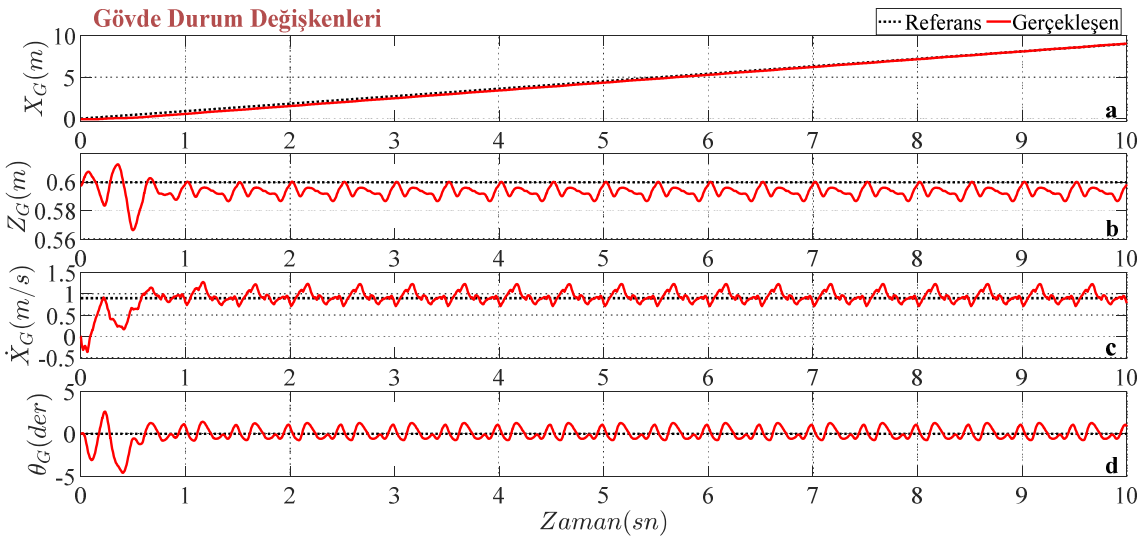
4AR'ın eşkin yürüyüşüne ait simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiş ve sonuçlar grafiksel formlarda sunulmuştur. Adaptif PD kontrolcüye ait kazançlar; destek evresi için $kp_{(st)}$=*[325, 487.5, 325, 487.5, 325, 487.5, 325, 487.5]* ve $kd_{(st)}$=*[3, 8.3, 3, 8.3, 3, 8.3, 3, 8.3],* uçuş evresi için $kp_{(sw)}$=*[65, 58.5, 65, 58.5, 65, 58.5, 65, 58.5]* ve $kd_{(sw)}$=*[0.89, 0.8, 0.89, 0.8, 0.89, 0.8, 0.89, 0.8]* olarak ayarlanmıştır. Eşkin yürüyüş periyodu $T_{eşkin}$= $(t_{st} + t_{sw})$=*(0.25+0.25)=0.5* saniye olacak şekilde tanımlanmıştır.

Diğer yürüyüşlere benzer şekilde, 4AR'ın eşkin yürüyüş için simülasyon süresi 10 saniye olarak belirlenmiştir. Eşkin yürüyüşün ilk 2 saniyelik kısmında, robot hareketinin anlık görüntüleri Şekil 6.21'de (uçuş evresinde olan ayaklar; sarı-tek ayak, açık ve koyu yeşil- çift ayak, turuncu-üç ayak) verilmiştir.

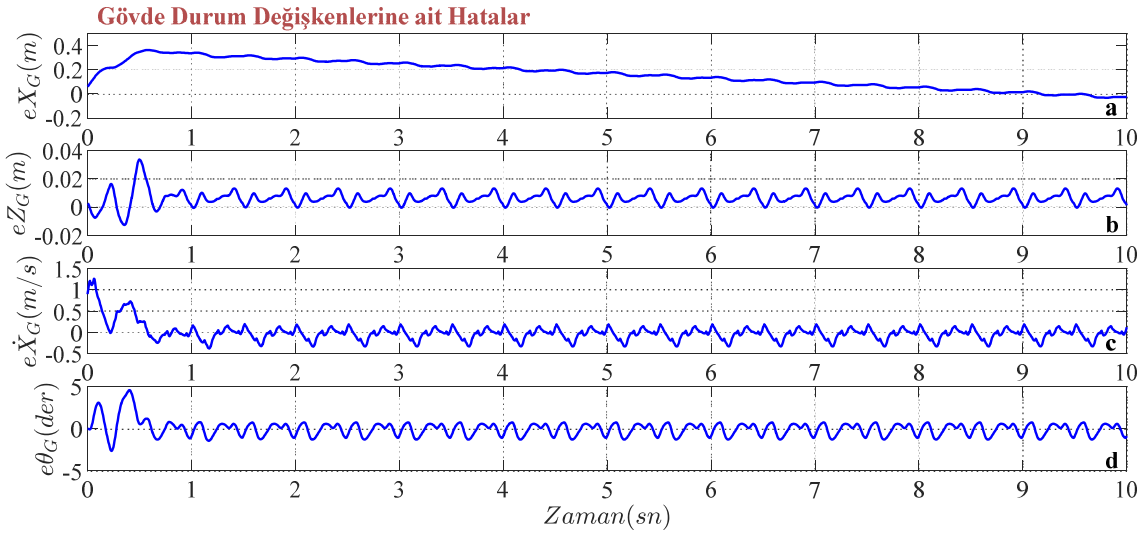


Şekil 6.49. Eşkin yürüyüş eş simülasyonuna ait anlık ekran görüntüleri

Eşkin yürüyüş simülasyonunda, gövde değişkenlerinin (x_B z_B $\dot{x}_B$ θ_B) ve hata değerlerinin (ex_B ez_B $\dot{ex}_B$ $e\theta_B$) değişimlerine ait sonuçlar sırasıyla Şekil 6.50a, 6.50b, 6.50c, 6.50d ve Şekil 6.51a, 6.51b, 6.51c, 6.51d'de verilmiştir.



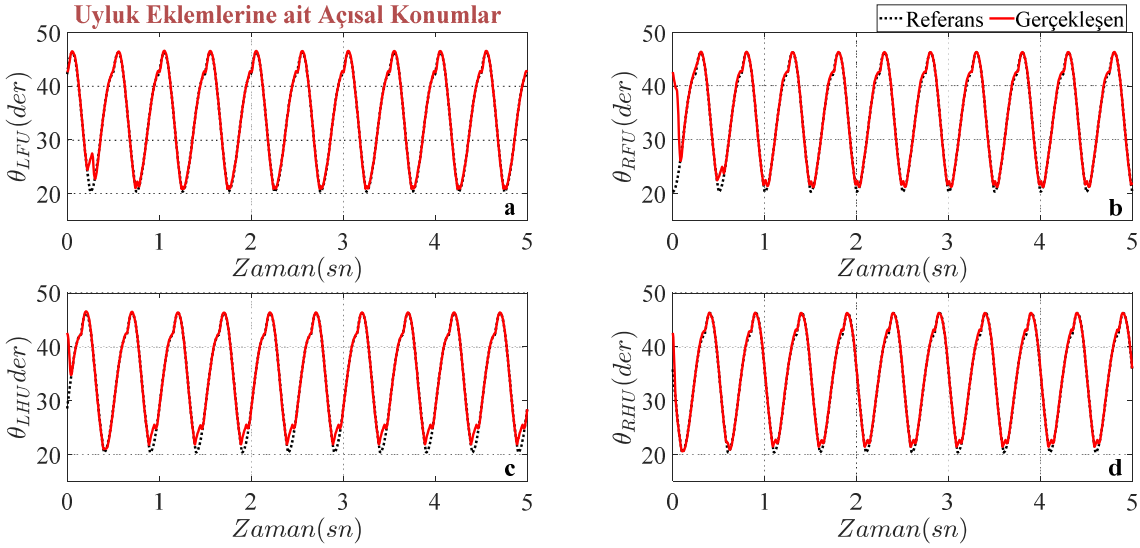
Şekil 6.50. Eşkin yürüyüş – Gövde durum değişkenlerine ait sonuçlar



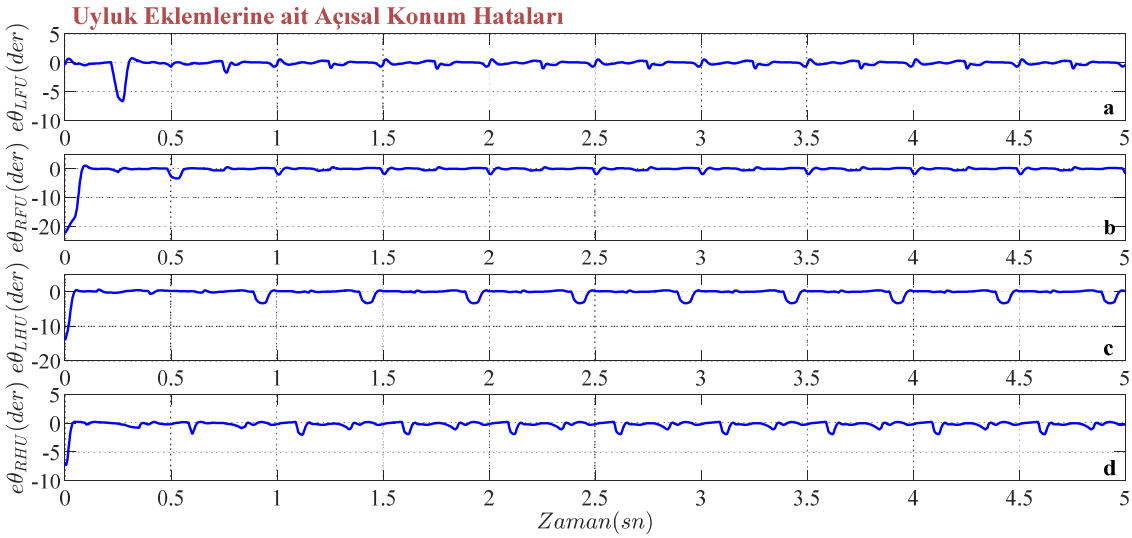
Şekil 6.51. Eşkin yürüyüş – Gövde durum değişkenlerine ait hatalar

Eşkin yürüyüşün ilk 5 saniyelik kısmı için, uyluk eklemlerinin açısal konumlarının (θ_{LFU} ... θ_{RHU}) ve hata değerlerinin ($e\theta_{LFU}$ ... $e\theta_{RHU}$) değişimlerine ait simülasyon sonuçları Şekil 6.52a, 6.52b, 6.52c, 6.52d ve Şekil 6.53a, 6.53b, 6.53c, 6.53d'de bacak sırasına göre verilmiştir. Uyluk eklemlerine ait tork girişlerinin değişimi ise, Şekil 6.54a, 6.54b, 6.54c, 6.54d'de sunulmuştur.

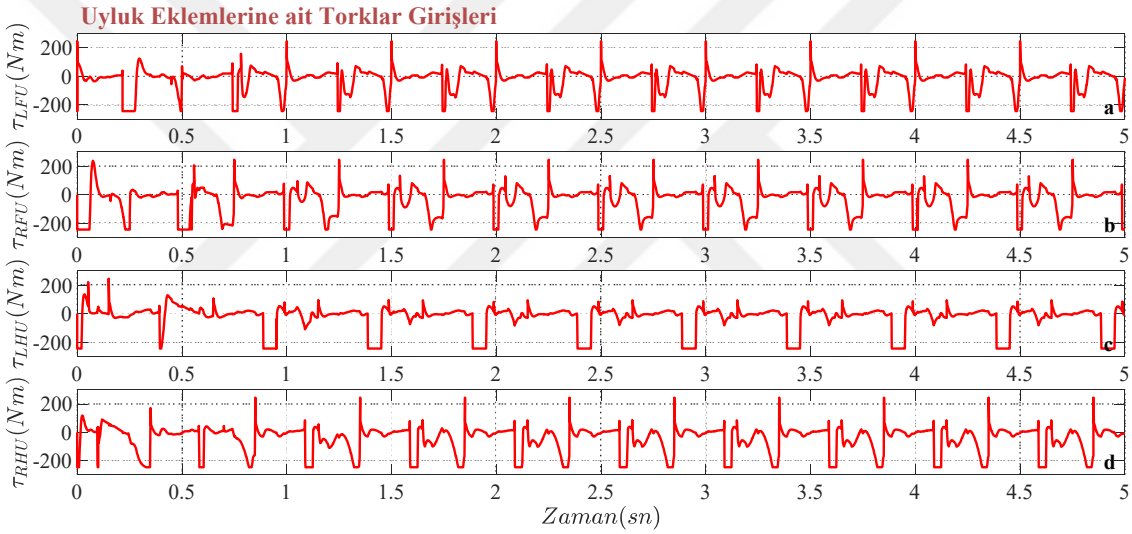
Benzer şekilde eşkin yürüyüşte, baldır eklemlerinin açısal konumlarının (θ_{LFB} ... θ_{RHB}) ve hata değerlerinin ($e\theta_{LFU}$ ... $e\theta_{RHU}$) değişimlerine ait simülasyon sonuçları, bacak sıralamasına göre, Şekil 6.55a, 6.55b, 6.55c, 6.55d ve Şekil 6.56a, 6.56b, 6.56c, 6.56d'de sırasıyla verilmiştir. Baldır eklemlerine ait tork girişlerinin değişimi ise, Şekil 6.57a, 6.57b, 6.57c, 6.57d'de sunulmuştur.



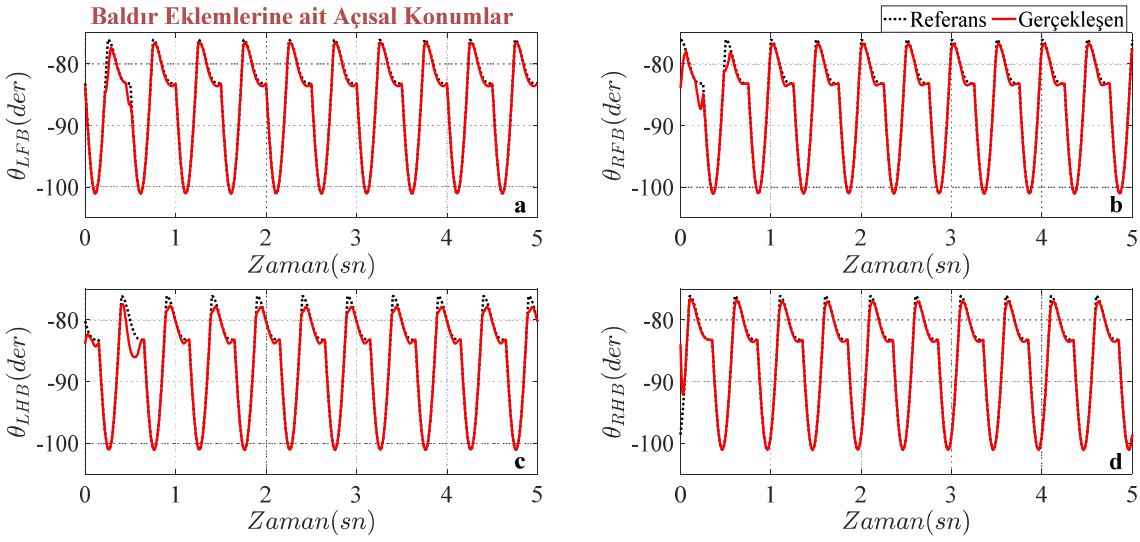
Şekil 6.52. Eşkin yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait açısal konumlar



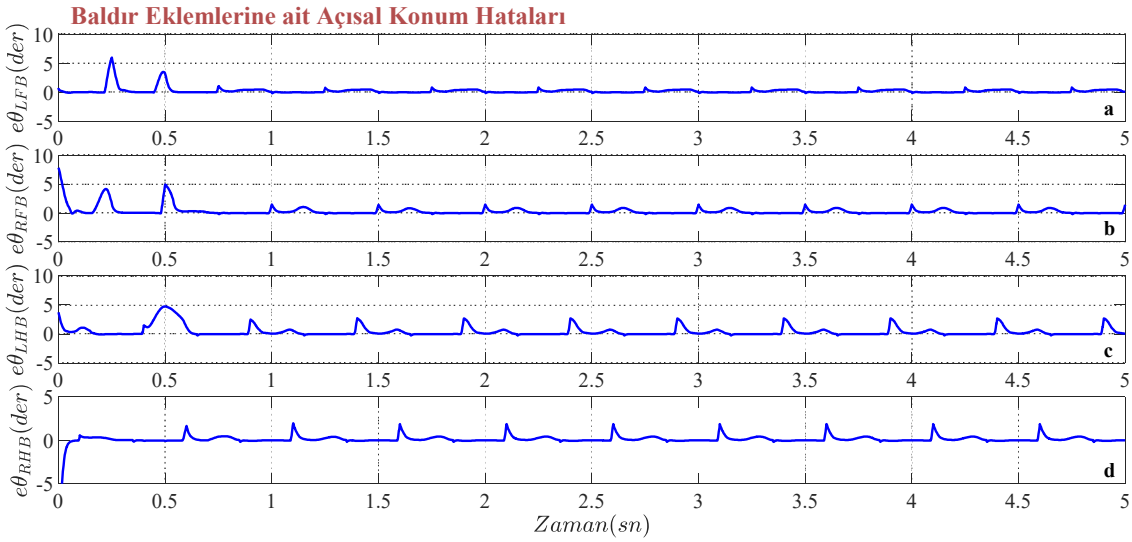
Şekil 6.53. Eşkin yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait açısal konum hataları



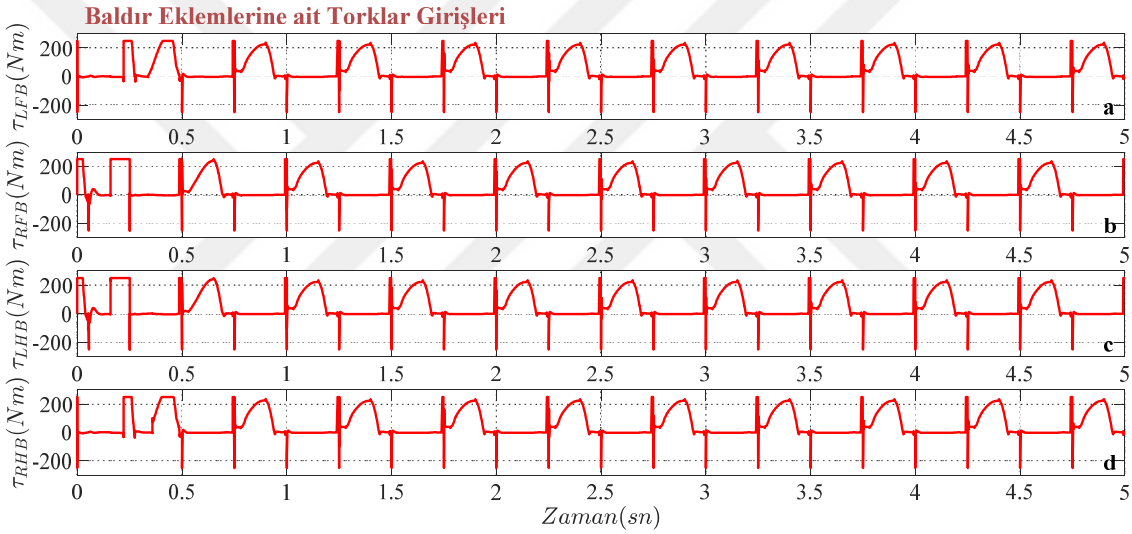
Şekil 6.54. Eşkin yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait tork girişleri



Şekil 6.55. Eşkin yürüyüş – Baldır eklemlerine ait açısal konumlar

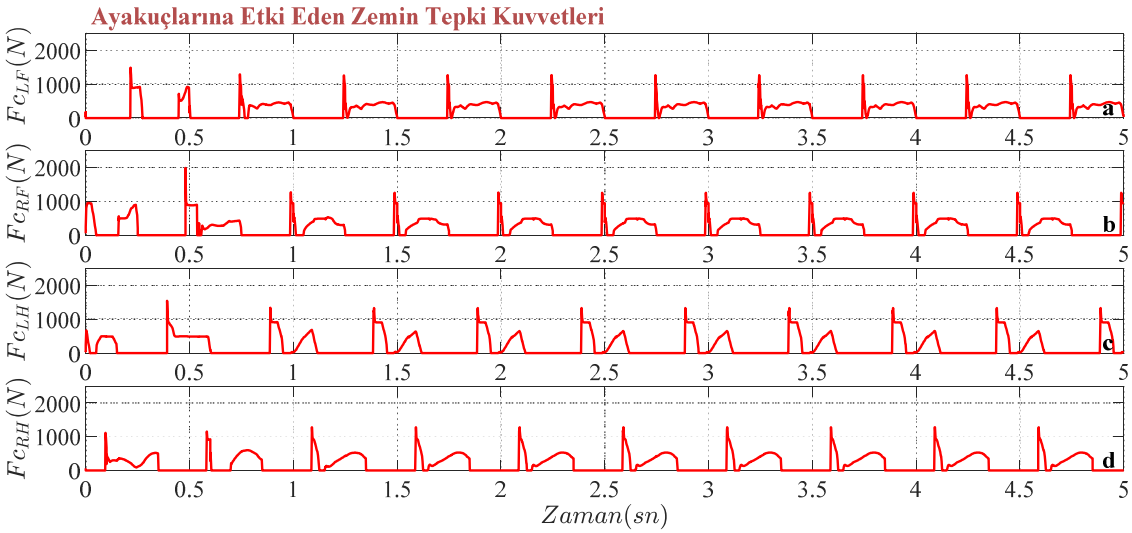


Şekil 6.56. Eşkin yürüyüş – Baldır eklemlerine ait açısal konum hataları

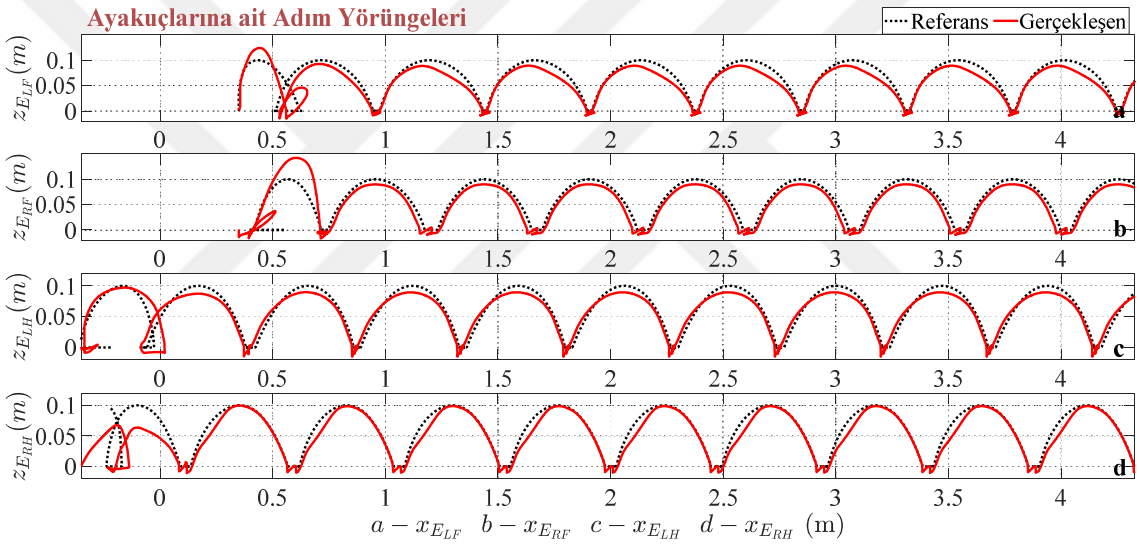


Şekil 6.57. Eşkin yürüyüş – Baldır eklemlerine ait tork girişleri

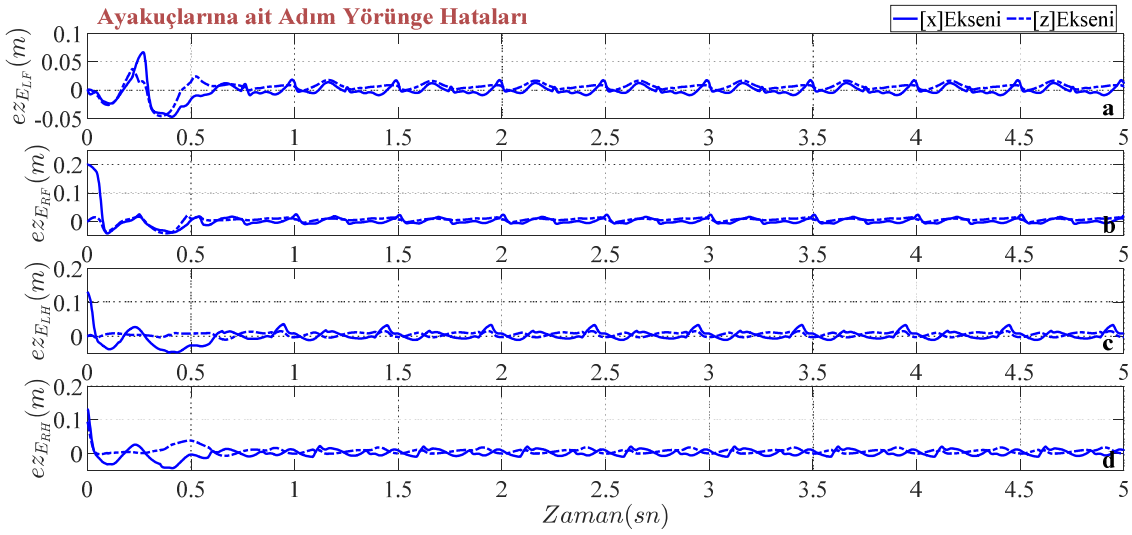
Eşkin yürüyüşün ilk 5 saniyelik kısmında, ayak uçlarına etki eden zemin tepki kuvvetlerinin ($F_{c_{LF}}$ ... $F_{c_{RH}}$) değişimi bacak sıralamasına göre, Şekil 6.58a, 6.58b, 6.58c, 6.58d'de verilmiştir. Şekil 6.59a, 6.59b, 6.59c, 6.59d'de herbir bacak için ayak uçlarının izledikleri düzlemsel adım yörüngeleri, Şekil 6.60a, 6.60b, 6.60c, 6.61d'de ise referans yörünge ile gerçekleşen yörünge arasındaki hata değişimleri sırasıyla sunulmuştur. Ayrıca, tırıs yürüyüşün ilk 2 saniyelik kısmında, ön (LF, RF) ve arka (LH, RH) bacakların ayakuçlarına ait x-z eksenlerindeki konumları ve izleme hatalarının değişimleri, Şekil 6.61a, 6.61b, 6.61c, 6.61d, 6.61e, 6.61f'de ve Şekil 6.62a, 6.62b, 6.62c, 6.62d, 6.62e, 6.62f'de sırasıyla, ayrıntılı olarak sunulmuştur.



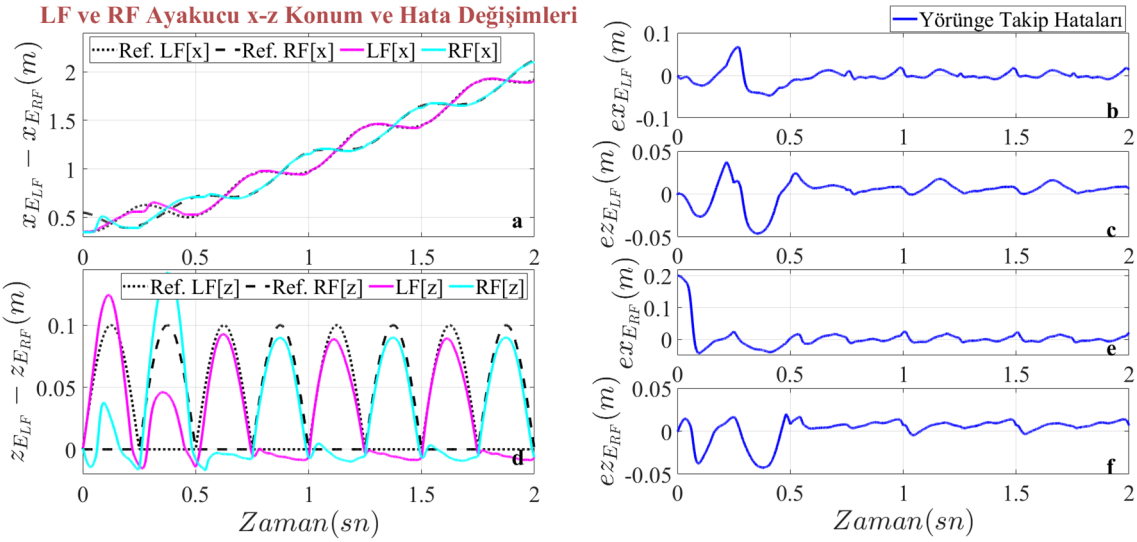
Şekil 6.58. Eşkin yürüyüş – Ayakuçlarına etki eden zemin tepki kuvvetleri



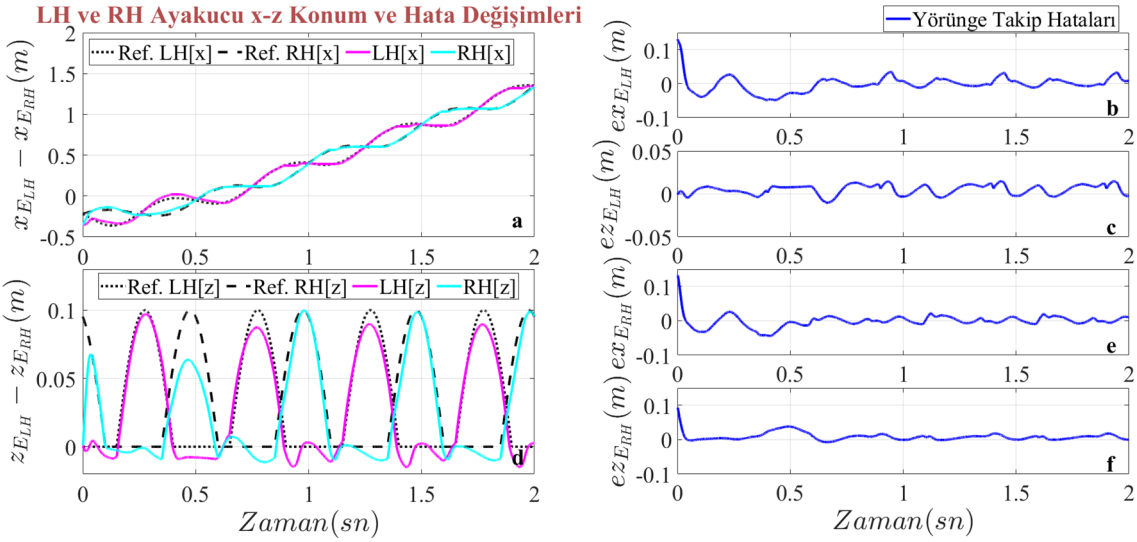
Şekil 6.59. Eşkin yürüyüş – Ayakuçlarına ait adım yörüngeleri



Şekil 6.60. Eşkin yürüyüş – Ayakuçlarına ait adım yörünge hataları



Şekil 6.61. Eşkin yürüyüş – LF ve RF ayakuçlarının x-z konumları ve hataları



Şekil 6.62. Eşkin yürüyüş – LH ve RH ayakuçlarının x-z konumları ve hataları

Eşkin yürüyüş simülasyonunda, sistemin geçici rejim cevabından sonraki kararlı yürüyüşün ilk periyodunda (1-1.5 sn arası), yörünge takip hataları yüzdesel olarak araştırılmıştır. Sol ön bacağın (LF); x, z yönlerindeki ve x-z düzlemindeki maksimum − ortalama yüzde hataları sırasıyla, % 1.3 − % 0.4, % 17.7 − % 6.9 ve % 17.8 − % 6.9'dur. Sağ ön bacağın (RF) ise sırasıyla; % 2.1 − % 0.5, % 13.5 − % 7.2 ve % 13.7 − % 7.2'dir. Benzer şekilde Sol arka bacağın (LH) sırasıyla; % 2.0 − % 0.6, % 14.8 − % 6.7 ve % 15.0 − % 6.7'dir. Sağ arka bacağın (RH) ise sırasıyla; % 1.6 − % 0.5, % 17.7 − % 6.5 ve % 17.8 − % 6.4'tür. 4AR'ın statik yürüyüş simülasyonunda; gövde ve eklem durum değişkenlerine, x ve z koordinatlarındaki ayak ucu yörüngelerine ait, maksimum ve ortalama hata değerleri ayrıntılı olarak Çizelge 6.8'de sunulmuştur.

Çizelge 6.8. Eşkin yürüyüş – Sistem değişkenlere ait maks.ve ort. hata değerleri

Uzuv	Değişken		Birim	Maksimum Hata	Ortalama Hata
Gövde	ex_G		m	0.361	0.164
	ez_G		m	0.033	0.006
	$e\dot{x}_G$		m/s	1.261	0.1218
	$e\theta_G$		derece	4.588	0.6418
Uyluk Eklemi	$eLFU$		derece	6.682	0.277
	$eRFU$		derece	22.28	0.539
	$eLHU$		derece	14.11	0.530
	$eRHU$		derece	7.269	0.318
Baldır Eklemi	$eLFB$		derece	5.983	0.241
	$eRFB$		derece	7.823	0.323
	$eLHB$		derece	4.725	0.440
	$eRHB$		derece	14.67	0.219
Ayak ucu Konumları	LF	exE_{LF}	m	0.0669	0.0065
		ezE_{LF}	m	0.0460	0.0076
	RF	exE_{RF}	m	0.2002	0.0085
		ezE_{RF}	m	0.0423	0.0077
	LH	exE_{LH}	m	0.1301	0.0101
		ezE_{LH}	m	0.0149	0.0066
	RH	exE_{RH}	m	0.1315	0.0078
		ezE_{RH}	m	0.0941	0.0069

6.4. Engebeli Parkurda Yürüyüş Simülasyonu

Tekerlekli araçlara kıyasla, bacaklı robotların düzensiz arazilerde hareketinin planlaması ve kontrolü zorlu ve geliştirilmeye açık bir konudur (Focchi ve ark., 2020). Bu sebeple bacaklı hareketin denetimi için yürüyüş planlaması ile gövde hareketinin reaktif kontrol stratejiler ile birleştirildiği yaklaşımlar gerekebilir (Mastalli, 2017) .

Yeryüzündeki canlıların ve robotların hareket etmesi için en ideal olan düz, engebesiz yüzeylerdir. Ancak, günlük ortamdaki arazilerin birçoğu düz değildir, eğimli ve engebeli araziler günlük yaşamımızda çok yaygındır. Özellikle dört ayaklı biyolojik canlılar için; yokuş çıkmak/inmek, yükselti ve çukur gibi engebeli alanlarda yürümek zor değildir. Çevrelerini ve hareket ettikleri zemini, görsel duyuları ve ayaklarına gelen kuvvetler aracılığıyla algılarlar ve sinir sistemleri ile vücut duruşlarını otomatik olarak düzenlerler. Böylece farklı arazilere kolayca adapte olabilirler. Ancak bu durum, bulunduğu ortam ve zemin şartları hakkında herhangi bir bilgisi olmayan, dört ayaklı bir robot söz konusu olduğunda, karmaşık bir sorun haline gelmektedir. Biyolojik canlıların düzensiz arazilerde mükemmel yürüyüşü, *BigDog, HyQ, StarlETH, AnyMal, LittleDog* gibi birçok başarılı dört ayaklı robot için ilham kaynağı olmuştur. Dört ayaklı robotların zorlu arazilerde hareket edebilmesi için, yüzeyin durumunu tespit etmesi ve yürüyüşünü buna göre ayarlaması gereklidir. Bunu sağlamak için, gelişmiş eyleyiciler ve tork kontrol teknikleri, hassas kuvvet ve konum sensörleri, görüntülemeye dayalı ortam haritalaması ve yürüyüş planlaması gibi pahalı yazılım ve donanımlar gerekir (Yu ve ark., 2018) .

Literatürde, engebeli arazide hızlı ve sağlam bir hareket için, farklı hiyerarşik planlama ve kontrol mimarileri önerilmiştir. Bunlardan en öne çıkanları, DARPA destekli engebeli arazilerde yürüyüş öğrenme programı (DARPA Learning Locomotion Program) kapsamında geliştirilen iki yaklaşım şöyledir. Kolter ve ark. (2008) engebeli arazide yürüyüş için üç temel alt planlama ve kontrol sistemi önermiştir. Bunlar;

- Yürüyüşün planlamasını içeren yüksek seviye planlayıcısı (high-level planner),
- Gövdenin yörünge planlamasını içeren düşük seviye planlayıcısı (low-level planner)
- Adım hareketine ve gövdeye ait referans yörüngeleri denetleyen düşük seviye kontrolcü (low-level controller)'dür.

Benzer şekilde Kalakrishnan ve ark. (2011), üç ana alt sistem kullanmışlardır. Bunlar;

- Gövde yörünge planlayıcısı (body path planner)
- Yürüyüş boyunca ayakların adım atacağı konumların planlayıcısı (footstep planner)
- Yüzer tabanlı ters dinamik kontrolcü (loating-base inverse dynamics controller)'dür.

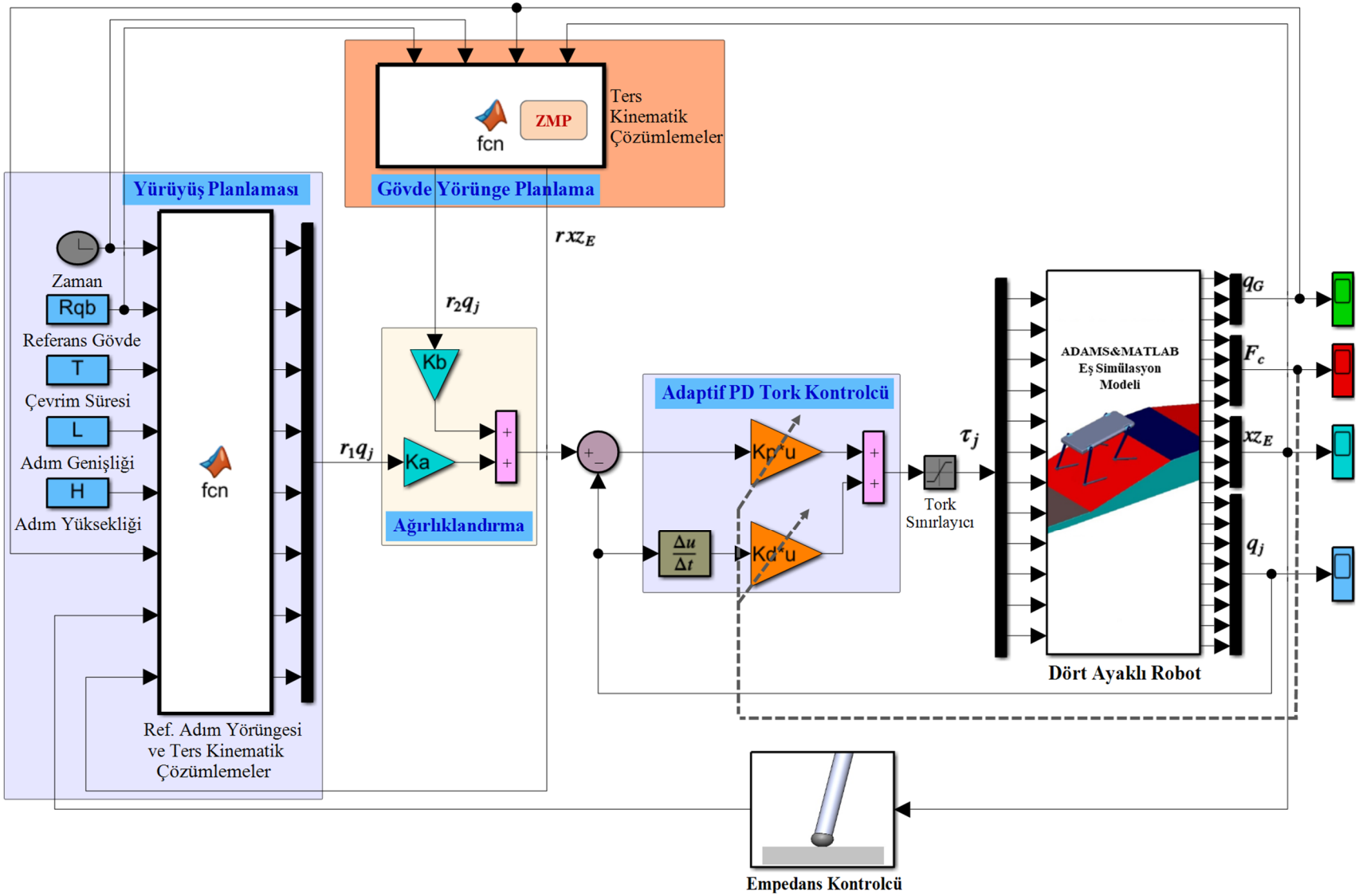
İnsanlar ve diğer bacaklı canlılar, engebeli bir arazide görsel ve işitsel yeteneklerinin yanı sıra zeminle etkileşimden oluşan kuvvet duyularını da kullanır, sinir sisteminin denetiminde gövde duruşunu ve adım hareketini ayarlayarak hareket ederler. Benzer şekilde, dört ayaklı bir robotun engebeli arazilerde yürüyüş gerçekleştirebilmesi için zemindeki düzensizlikler hakkında (yükselti farklılıkları, eğim vb.) bilgi sahibi olması gerekir. Robot, yürüyüş gerçekleştireceği arazi hakkında bilgileri gelişmiş kameralar ve sensörler aracılığıyla elde edebilir. Engebeli arazideki düzensizlikleri tanımlamak ve kararlı bir yürüyüş gerçekleştirmek için kullanılan yöntemler genel olarak iki farklı yaklaşım şeklinde ifade edilebilir.

Temel yaklaşım; robotun etkileşimli olarak hareket ettiği zemin hakkında önceden öğretilmiş veya gerçek zamanlı bir bilgiye sahibi olmadığı, ayak ucu kuvvet sensörü ile elde ettiği tepki kuvvetlerini ve empedans konum-kuvvet kontrol yöntemlerini kullanarak, sürekli adım yörüngesini ve gövde duruşunu tekrar düzenleyip, dengeli bir yürüyüş gerçekleştirdiği yöntemlerdir. Bu yaklaşım, yüksek donanım ve yazılım gerektirmeyen, işlem yükü düşük, kolay uygulanabilir bir yöntemler içermesine karşın, hızlı bir yürüyüş sunamayabilir.

Diğer yaklaşım ise, robotun hareket edeceği arazi hakkında önceden öğretilmiş ve/veya 360 derece ortam haritalaması yapabilen kameralar ile gerçek zamanlı (online) bilgi sahibi olabildiği, adım atacağı konumların önceden tasarlandığı ve/veya gerçek zamanlı verilere göre güncellenebildiği, görüntüleme ve haritalandırma tabanlı bir yürüyüş gerçekleştirebildiği yöntemlerdir. Bu yaklaşım ise, daha hızlı ve etkili çözümler sunabilme kapasitesi ile çevik hareketler için daha uygun olmasına rağmen, oldukça yüksek teknolojik ekipmanlar ve yazılımalar gerektiren, hesaplama yükü oldukça fazla, uygulanabilirliği karmaşık ve halen geliştirilmeye açık bir yaklaşımdır.

Bu tez kapsamında, 4AR'ın engebeli yüzeylerde yürüyüş kontrolü için ayak ucu zemin tepki kuvvetlerine göre, empedans kontrol yaklaşımı ile ön tasarımı yapılan adım yörüngesini güncelleyen, zemin düzensizliklerine ve güncel ayak ucu konumlarına göre, ters kinematik çözümlemeler ve ZMP tekniği ile gövdenin duruşunu ve ağırlık merkezinin konumunu ayarlayan bir yaklaşım önerilmiş ve uygulanmıştır.

4AR'ın farklı engebeler içeren bir parkurda, MATLAB&ADAMS eş yürüyüş simülasyon kontrolü için; yürüyüş planlamasını, gövdenin yörünge planlamasını, ayak ucu zemin tepki kuvvetlerinin empedans tabanlı kuvvet-konum kontrolünü ve eklemlerin PD tabanlı adaptif tork kontrolünü gerçekleştiren, farklı alt katmanlardan oluşan, Simulink ortamında tasarlanan genel kontrol mimarisi Şekil 6.63'te sunulmuştur.



Şekil 6.63. 4AR'ın engebeli yürüyüş simülasyonuna ait genel kontrol blok şeması

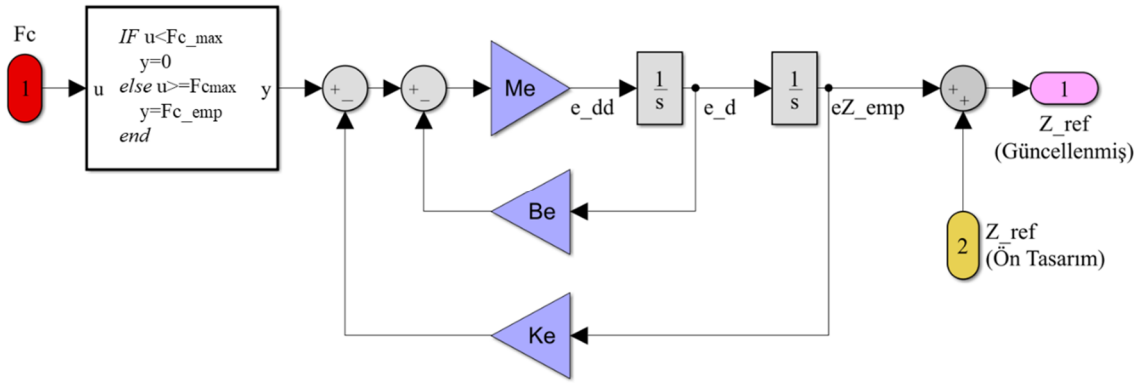
6.4.1. Ayak ucunun empedans tabanlı konum-kuvvet denetimi ve gövdenin denge kontrolü

Gövde kontrolü, belirsizliklere ve beklenmedik arazi düzensizliklerine karşı sağlam olmalı ve aynı zamanda robotun istenen yürüyüş hareketine de uygun olmalıdır. Sadece yürüyüş planlanmasının ürettiği referans açısal konumları ve bunları sağlayan tork girişleri üretmeye yönelik tasarlan bir kontrolcü, engebeli arazide robotun denge kararlılığını garanti edemez. Denge kararlılığı azalabilir, hatta beklenmedik durumlara uyum sağlanamaz ise, robotun tamamen dengesi bozulabilir. Bu sorun, ters dinamik çözümlemeler ve öngörülen olası temas kuvvetleri kullanılarak hesaplanabilir (Buchli ve ark., 2009; Mistry ve ark., 2010). Ancak yanlış tahmin edilen temas kuvvetleri kontrolcünün performansını önemli ölçüde etkiler. Bu yanlış tahminler ile hesaplanan yürüyüş için gerekli tork girişleri, tutarsız referans gövde yörüngeleri üretebilir.

Bu sorunların üstesinden gelmek için, klasik eklem uzay kontrolün (joint space control)'den farklı olarak, robot uç işlevcinin dinamiklerini dikkate alan görev uzay kontrol (task space control) teknikleri önerilmiştir (Song, 1998). Klasik eklem uzay kontrol yaklaşımı basit, hızlı ve kolay uygulanabilir olmasına karşın doğrusal olmayan sistemler için uygulaması oldukça karmaşıktır. Görev uzay kontrol yaklaşımları ise, dinamik etkileri dikkate alan, karmaşık sistemlerin kontrolcü performansını artıran, yüksek hız ve hassasiyet sunabilen yöntemlerdir. Bu sebeple, robot gövdesinin hareket planlaması ve kontrolü için daha uygun bir metodoloji sunabilir, engebeli arazi senaryolarına kolayca uyum sağlayabilir (Mastalli, 2017).

Şekil 6.63'te sunulan, engebeli yürüyüş için geliştirilen genel kontrol şemasında görülebileceği üzere, 4AR'ın yürüyüş planlaması düz zemindekine benzer şekilde tasarlanmıştır. Eklem torklarının kontrolü, düz zemindeki yürüyüş için tasarlanan, ayak ucu kontak kuvvetine göre belirlenen adım hareketinin destek ve uçuş evreleri için değişken kazançlı adaptif PD tork kontrolcü ile sağlanmıştır.

Robotun engebeli yüzey ile uyumlu hareketini sağlamak amacıyla, görev uzay kontrol yaklaşımıyla, empedans tabanlı konum-kuvvet kontrolcü tasarımı eklenmiştir. Zemindeki düzensizliklere göre değişkenlik gösteren ayak ucu temas kuvvetlerinin geri beslendiği empedans kontrolcü, ayak ucu ile zemin arasındaki kuvvet ve konum etkileşimini düzenler ve referans adım yörüngelerini yürüyüş boyunca sürekli günceller. Engebeli yüzeylerde yürüyüş için tasarlanan empedans kontrolcü tasarımına ait alt blok şema Şekil 6.64'te sunulmuştur.



Şekil 6.64. Engebeli yüzeyler için tasarlanan empedans kontrolcü blok şeması

Empedans tabanlı kuvvet-konum kontrol tekniği, engel tanımlanmış bir yörüngede adım hareketinin yörünge kontrolünün incelendiği Bölüm 4.6'da detaylı olarak izah edilmiştir. Engebeli parkurda yürüyüş simülasyonu çalışmalarında, destek evresi boyunca kontrollü ve sürekli bir ayak ucu ile zemin etkileşimi sağlamak amacıyla, ADAMS modelinden elde edilen ve empedans kontrolcüye geri beslenen ayakuçlarına ait temas kuvvetleri (F_c) için bir maksimum değer (F_{c_max}) ve bir referans empedans değeri (F_{c_emp}) tanımlanmıştır. Ayak ucu düz olmayan, düzensiz bir zeminle etkileşim halinde iken, temas kuvveti maksimum değerden büyük olduğu anda ($F_c \geq F_{c_max}$) empedans kontrolcü devreye girerek, istenilen ayak ucu empedans kuvvetine göre (F_{c_emp}) ayak ucunun düşeydeki (z ekseninde) konumunu denetler ve ön tasarım referans adım yörüngesinin günceller. Böylece, gövde kararlılığını bozacak öngörülemeyen yüksek tepki kuvvetlerinin oluşumunu önleyerek, engebeli yüzeyde dengeli bir yürüyüş sağlar. Empedans kontrolcüye ait kuvvet-konum ilişkisinin matematiksel ifadesi Denklem 6.3'te verilmiştir. $F_{c_max}=1000\ N$, $F_{c_emp}=500\ N$ değerleri ve kazanç katsayıları $M_e=50$, $B_e=4000$, $K_e=6000$ deneme-yanılma teknikleri ile belirlenmiştir. Her bir ayak için aynı şekilde empedans kontrolcü tasarımı yapılmıştır.

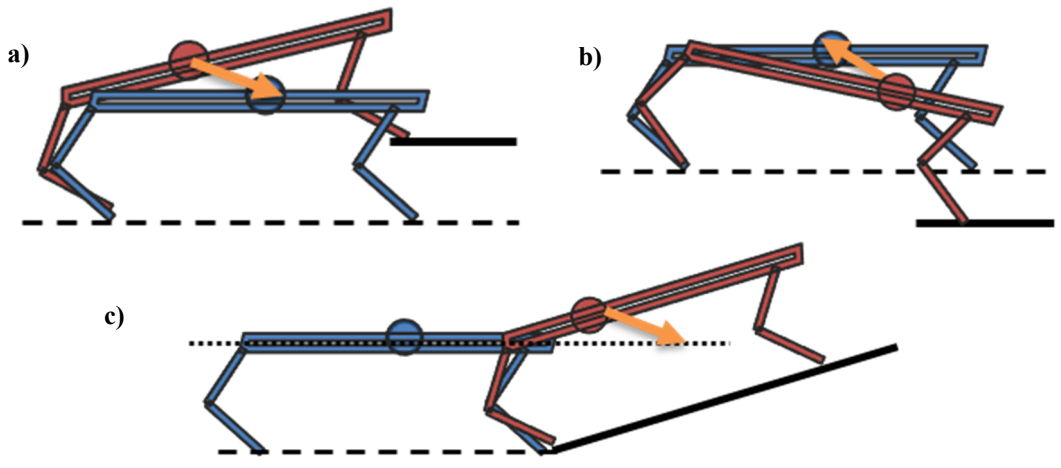
$$F_c = M(\Delta\ddot{z}) + B(\Delta\dot{z}) + K(\Delta z) \tag{6.3}$$

Referans yürüyüş parametrelerine göre tasarlanan yürüyüş planlamasını ve empedans kontrolcü tarafından güncellenen adım yörüngesini gerçekleştirecek bacak eklemlerine ait referans açısal konumları, ters kinematik çözümlemeler ile yürüyüş planlama bloğunda hesaplanır. Gövde yörünge planlama bloğunda ise, zemindeki düzensizliklere göre empedans kontrolcü tarafından güncellenen ayak ucu konumlarına

karşın dengeli bir gövde duruşunu garanti eden, eklemlere ait referans açısal konumlar ters kinematik bağıntılar kullanılarak hesaplanır. Yürüyüş planlama bloğunda hesaplanan, eklemlere ait referans açısal konumlar (r_1q_j) ile gövde yörünge planlama bloğunda hesaplanan açısal konumları (r_2q_j), birbirlerine göre oranlayıp, birleştirmek için bir ağırlıklandırma işlemi uygulanır.

Ağırlıklandırma bloğunda, adım hareketi için gerekli ayak ucu koordinatlarını sağlayan referans açısal konumlar (r_1q_j) $Ka=0.6$ sabit katsayısı ile çarpılarak, $Kb=0.4$ sabit katsayısı ile çarpılan gövdenin kendini dengelemesi için gerekli ayak ucu konumlarını sağlayan referans açısal konumlar (r_2q_j) ile toplanır. Böylece, gövdeye ait değişkenlerin de geri beslemeli kontrolü gerçekleştirilir. Tamamen tasarımcı tanımlı olan katsayılardan da anlaşılacağı üzere, yürüyüşün tasarlanan yürüyüş planına uygun gerçekleşmesi, dengeli bir gövde duruşunun sağlanmasına göre daha fazla öncelenmiştir. Farklı engebelere ve yürüyüş çeşitlerine göre bu katsayılar farklı şekilde ayarlanabilir.

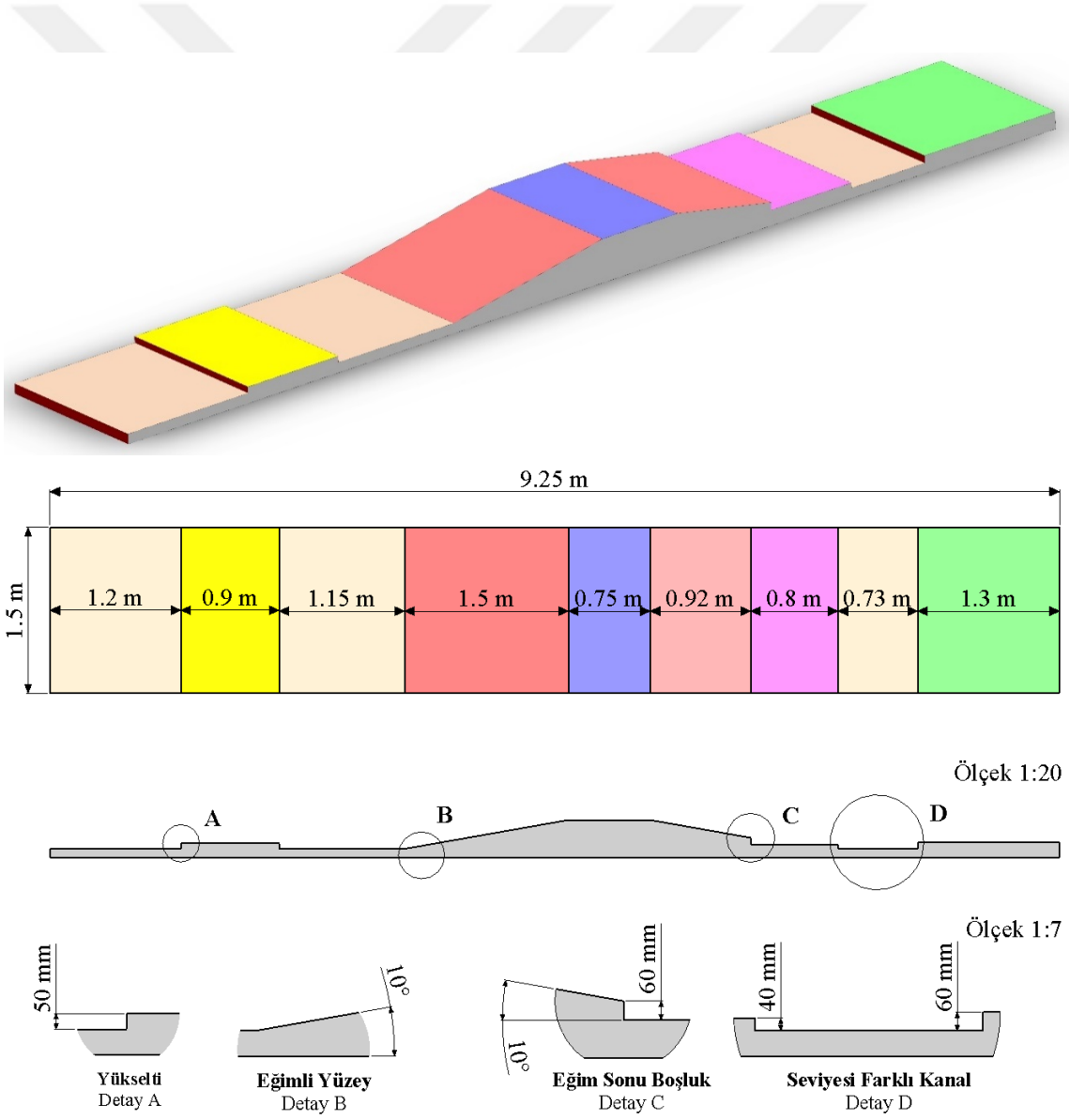
Ayrıca, gövde yörünge planlaması bloğunda, gövdenin dengesini artırmak ve daha kararlı yürüyüş sağlamak amacıyla, düzlemsel ZMP tekniği yaklaşımıyla ve ayak uçlarına göre gövdenin konum ve oryantasyonunu tanımlayan tüm gövde ters kinematik bağıntılar (Bölüm 3.3'te detaylı açıklanan) kullanarak, düzensiz bir zeminde yer değiştiren gövde ağırlık merkezinin yatayda gövdenin ortasında, düşeyde ise zeminden belli bir yükseklikte sabit tutulmasına yönelik gövde yönelimi planlanmıştır. Şekil 6.65'te yükselti, boşluk ve eğimli zemin için, ZMP yaklaşımıyla gövde kontrolünü açıklayan görseller sunulmuştur. Görsellerden de anlaşılacağı üzere, düzensizliğin tipine göre gövde ağırlık merkezi, yerden belli bir seviyede ve gövdenin ortasında olacak şekilde gövdenin ileri-geri, yukarı aşağıya düzlemsel yönelimi sağlanmaktadır.



Şekil 6.65. **a)** Yükselti, **b)** boşluk ve **c)** rampa için ZMP tabanlı gövde yönelimleri

6.4.2. Engebeli yürüyüş parkurunun tasarımı

4AR'ın engebeli yüzeylerde yürüyüş simülasyonu için, literatürdeki dört ayaklı robotların engebeli arazilerde yürüyüşü üzerine teorik ve deneysel çalışmalarda belirtilen fiziksel boyutlara uygun; yükselti, eğimli yüzey, boşluk ve seviyesi farklı kanal engebeleri/düzensizlikleri içeren bir parkur tasarlanmıştır. Parkurundaki düzensizliklerin tanımlanması ve boyutlandırılması; 4AR'ın engebeli yüzeylerde yürüyüş kontrolü için geliştirilen eklem tork kontrolünün, ayak ucu empedans kontrolünün ve ZMP tabanlı gövde denge ve konum kontrolünün birlikte sağlandığı kontrol mimarisinin performanslarının değerlendirilmesine yönelik gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.66'da engebeli parkurunun üç boyutlu modeli, düzensizlikler ve boyutları sunulmuştur.



Şekil 6.66. Engebeli yürüyüş parkuru, düzensizlikler ve boyutları

Gerçeğe yakın bir simülasyon geçekleştirebilmek amacıyla, engebeli parkurda tanımlanan düzensizlikler ve fiziksel boyutları; *HyQ* (Semini, 2010) ve *HyQ2max* (Semini ve ark., 2017) robotlarının engebeli arazilerde yürüyüş testleri için oluşturulan parkurlar (Barasuol ve ark., 2013; Focchi ve ark., 2013; Winkler ve ark., 2015; Aceituno-Cabezas ve ark., 2018) (Bölüm 2.3., Şekil 2.16, Şekil 2.18, Şekil 2.20) ve engebeli parkurda yürüyüş ile ilgili simülasyon çalışmalarında tasarlanan parkurlar (Park ve Park, 2012; Krishna ve ark., 2013; Wang ve ark., 2017; Han ve ark., 2018; Yu ve ark., 2018; Li ve ark., 2019) (Bölüm 2.4, Şekil 2.22) referans alınarak, literatürdeki değerlere uygun şekilde tasarlanmıştır. Tez kapsamlıda önerilen ve Şekil 6.66'da görülen engebeli parkurdaki düzensiz yüzeyler aşağıda açıklanmıştır.

- Detay A'da görüldüğü üzere, literatürde genellikle bacak boyunun %10~%20'si aralığında belirlenen, 50 mm boyutunda bir yükselti tanımlanmıştır.
- Detay B'de görüldüğü üzere, literatürde yaygın olarak kullanılan 10° eğim değerinde tasarlanmış bir rampa tanımlanmıştır.
- Detay C'de görüldüğü üzere, aynı şekilde 10 derece eğime sahip bir ters rampa ve ters rampanın bitimine yakın bir konumda, gövdenin denge karlılığını zorlayacak, 50 mm derinliğinde bir boşluk tanımlanmıştır.
- Detay D'de görüldüğü üzere, başlangıcı 40 mm derinliğinde ve sonu 60 mm yüksekliğinde olacak şekilde seviye farkına sahip bir kanal tanımlanmıştır.

6.4.3. Engebeli zeminlerde yürüyüşün sayısal çözümleri

Tasarlanan engebeli parkurda, 4AR'ın düzensiz yüzeylerde MATLAB&ADAMS eş yürüyüş simülasyonu gerçekleştirilmiş ve sonuçlar grafiksel formlarda sunulmuştur. Yürüyüş planlamasının tasarımı, daha dengeli ve temel bir yürüyüş çeşidi olması sebebiyle, Bölüm 5.2'de detaylı tanıtılan statik yürüyüşe göre gerçekleştirilmiştir.

Engebeli parkurdaki yürüyüşte, eklem açşısal konumlarını denetleyen adaptif PD tork kontrolcüye ait kazançlar; destek evresi için $kp_{(st)}=[247, 370, 247, 370, 247, 370, 247, 370]$ ve $kd_{(st)}=[2.7, 7.6, 2.7, 7.6, 2.7, 7.6, 2.7, 7.6]$, uçuş evresi için $kp_{(sw)}=[49.5, 47, 49.5, 47, 49.5, 47, 49.5, 47]$ ve $kd_{(sw)} = [0.82, 0.78, 0.82, 0.78, 0.82, 0.78, 0.82, 0.78]$ olarak ayarlanmıştır.

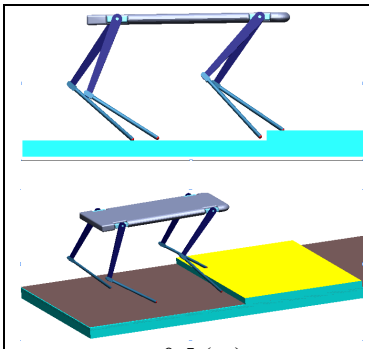
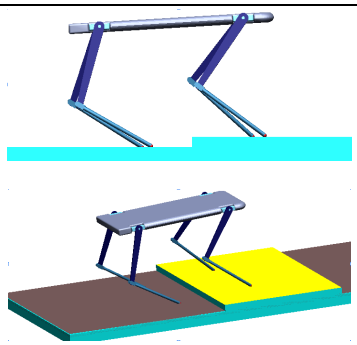
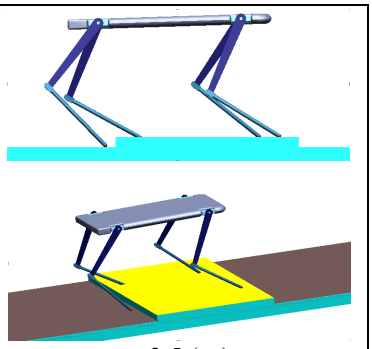
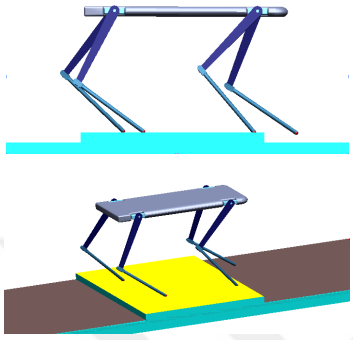
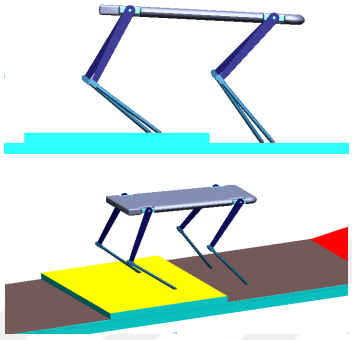
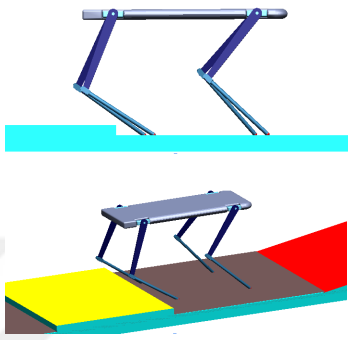
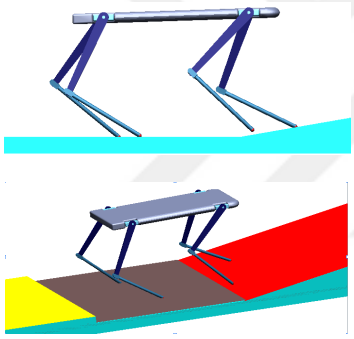
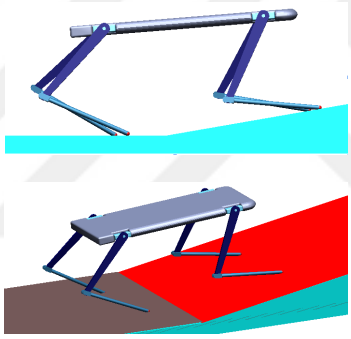
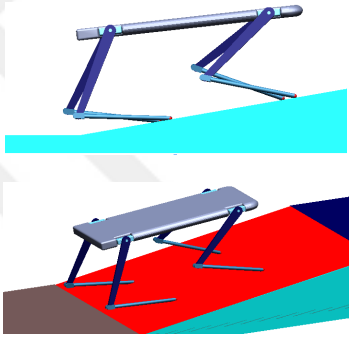
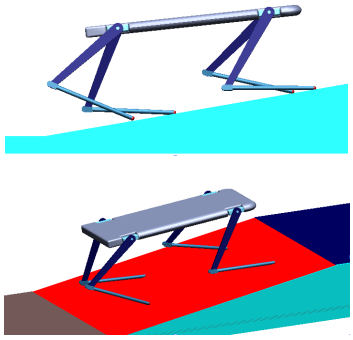
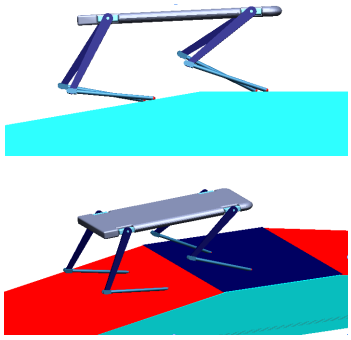
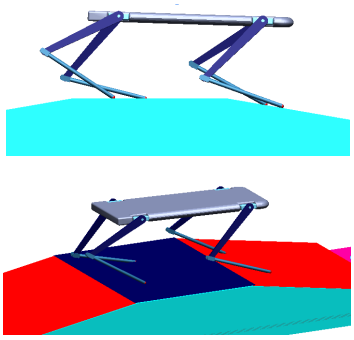
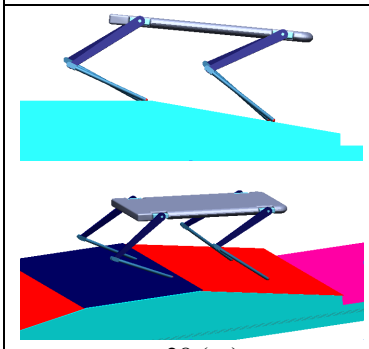
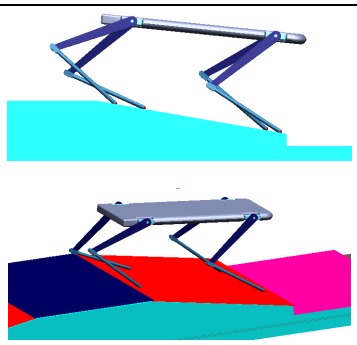
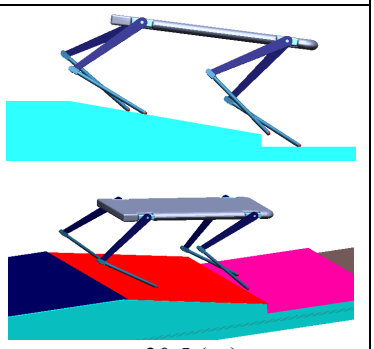
Düz zemindeki statik yürüyüşteki kontrolcü kazançlardan farklı olarak, ani zemin tepkilerinden kaynaklı maksimum aşmaları azaltmak için oransal etki (*kp*) biraz azaltılırken, kontrolcünün kararsız durumlarda daha hızlı tepki verebilmesi amacıyla türevsel etki (*kd*) biraz artırılmıştır.

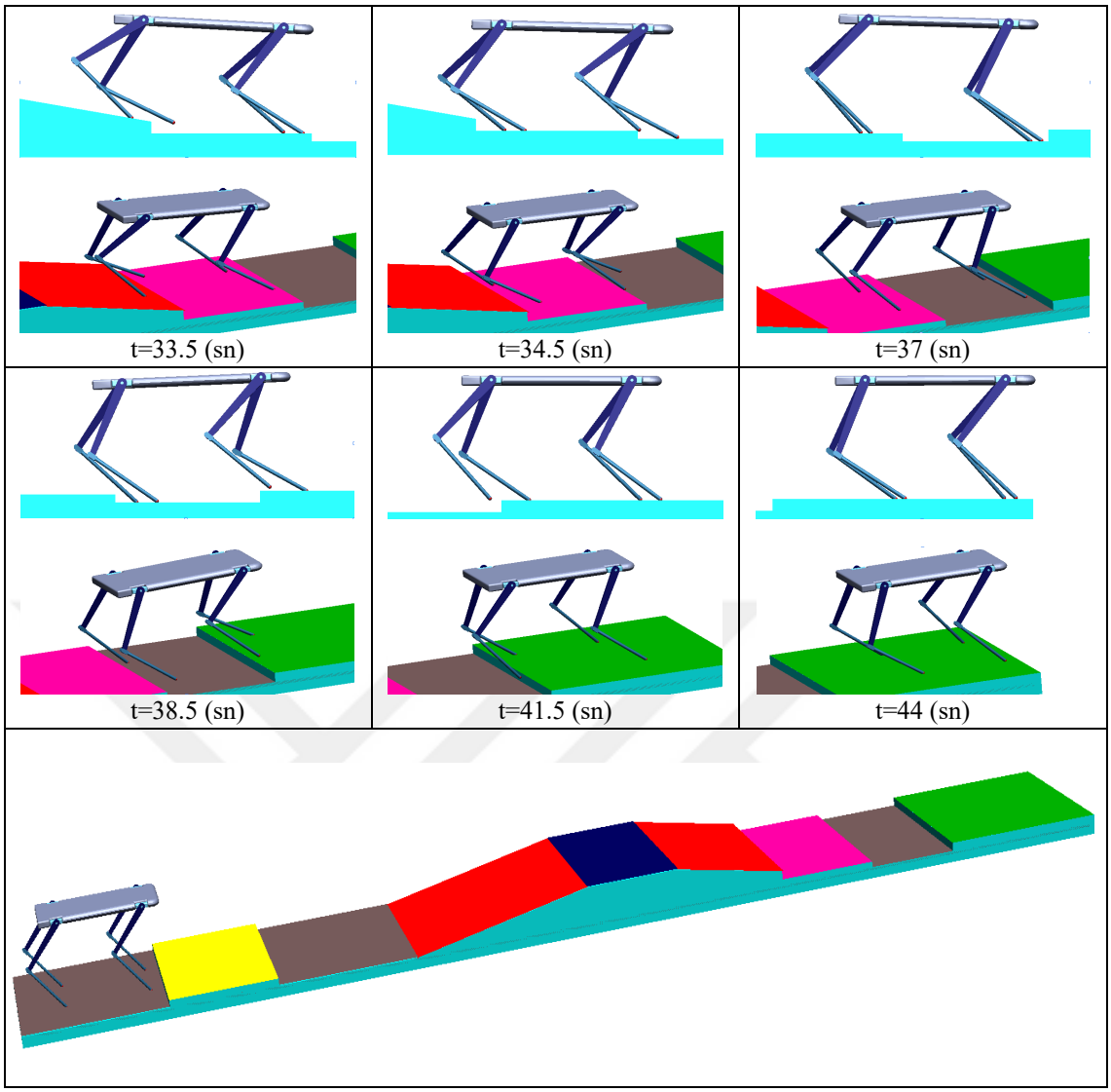
Düz zemine kıyasla, düzensiz zeminlerde daha dengeli ve dolayısıyla daha yavaş bir yürüyüş hareketinin tasarlanması gerekir. Bu sebeple, engebeli parkurdaki statik yürüyüş periyodu, $T_{engebe_statik}=(t_{st}+t_{sw})=(1.5+0.5)=2$ saniye olarak tanımlanmıştır. Düz zeminlerdeki yürüyüş simülasyonlarında belirlenen adım yörüngesine ait değerler (adım uzunluğu $L=0.2\ m$ ve yüksekliği $H=0.1\ m$) ön tasarım olarak ayarlanmıştır. Ancak yürüyüş boyunca adım yörüngesi, ayak ucu zemindeki düzensizliklere bağlı olarak güncellenmektedir. Ayrıca, robotun ters rampa boyunca yürüyüşünde, ayakların kayma ile kararsız durumların oluşabileceği öngörülerek, adım uzunluğu yarıya indirilmiştir.

Zemindeki düzensizlikler, sürekliliği bozan kararsız durumlar ve adım yörüngesinin yürüyüş boyunca değişkenlik göstermesi nedeniyle, engebeli bir yüzeyde hareketin ortalama hızını hesaplamak zordur. Simülasyon çalışmasında 4AR, yaklaşık 0.8 m uzunluğundaki engebeli parkuru 44 saniyede tamamlamış ve gövdenin ortalama hızı yaklaşık 0.18 m/s olarak gerçekleşmiştir. Literatürdeki mevcut engebeli yürüyüş simülasyon çalışmalarında belirtilen, robot gövdesine ait ortalama ilerleme hızları; 0.026 m/s (Zhang ve ark., 2019a), 0.05 m/s (Wang ve ark., 2017), 0.1 m/s (Park ve Park, 2012) olarak gerçekleşmiştir. *HyQ* robotunun, engebeli yürüyüş deneysel çalışmalarında ise, 0.15 m/s (Aceituno-Cabezas ve ark., 2018) olarak gerçekleşmiştir.

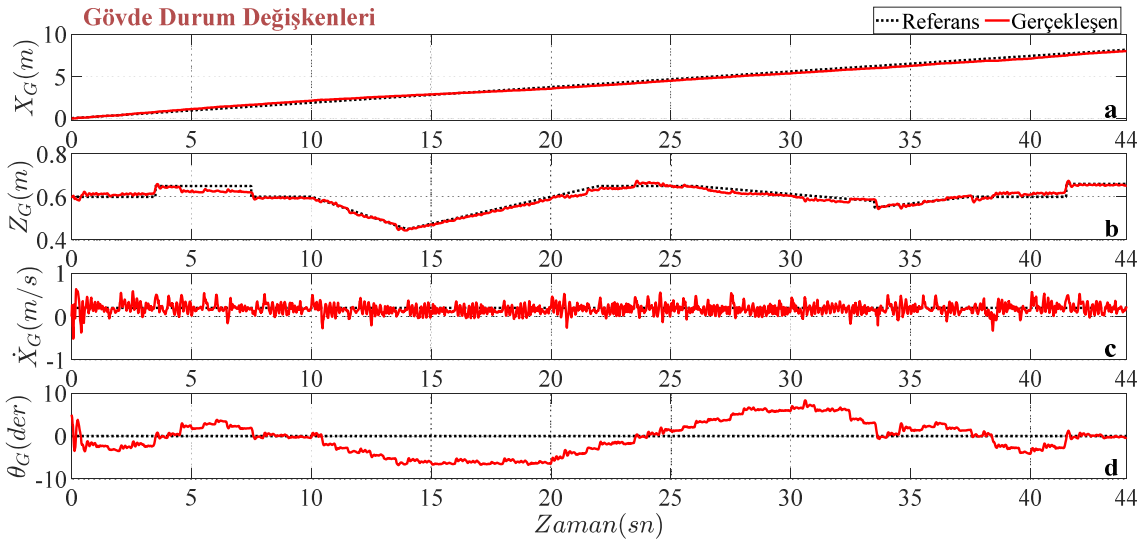
Bölüm 6.3'teki simülasyon çalışmalarına benzer şekilde gerçekleştirilen MATLAB&ADAMS eş yürüyüş simülasyonunda 4AR, denge ve kararlılığını koruyarak düzensizlikleri başarılı bir şekilde geçmiş ve engebeli yürüyüş parkurunu tamamlamıştır. Simülasyon süresinin tamamını kapsayan, robotun düzensiz yüzeylerdeki (yükselti, rampa çıkış ve iniş, boşluk ve seviyesi farklı kanal) yürüyüşüne ait, düzlemsel ve perspektif olmak üzere iki farklı görünüşteki anlık görüntüler Şekil 6.67'de kapsamlı olarak sunulmuştur.

Engebeli parkurda yürüyüş boyunca, gövde değişkenlerinin (yatakdaki ve düşeydeki konumları, ortalama doğrusal hızı, yunuslama açısı ($x_G\ z_G\ \dot{x}_G\ \theta_G$)) değişimlerine ait simülasyon sonuçları Şekil 6.68a, 6.68b, 6.68c, 6.68d'de ve gövde değişkenlerinin referanslar değerlerine göre oluşan hata değişimlerine ($ex_G\ ez_G\ \dot{ex}_G\ e\theta_G$) ait simülasyon sonuçları ise Şekil 6.69a, 6.69b, 6.69c, 6.69d'de grafiksel olarak, sırasıyla sunulmuştur.

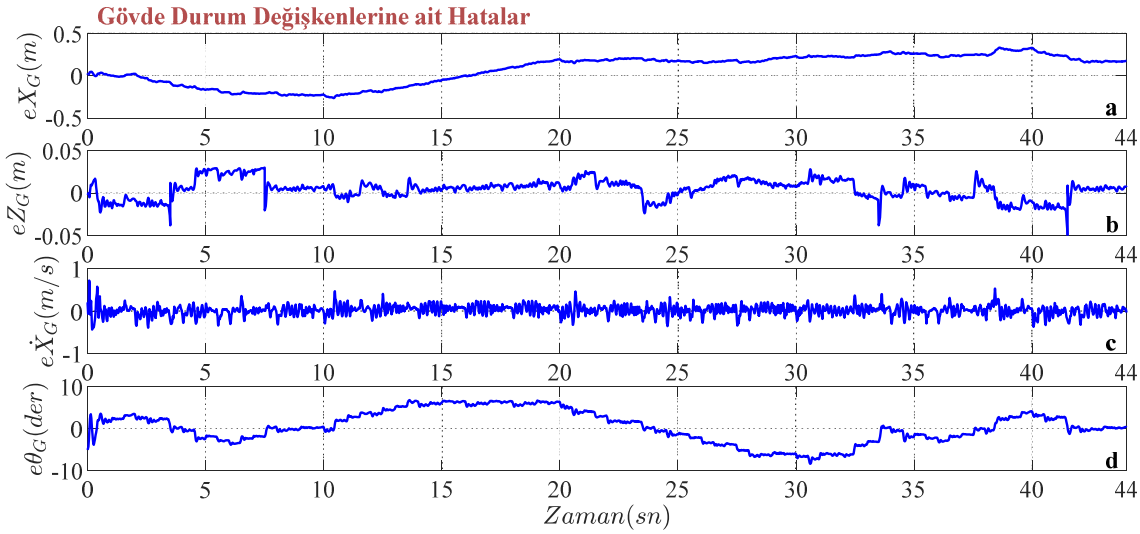
 t=0.5 (sn)	 t=2 (sn)	 t=3.5 (sn)
 t=4.5 (sn)	 t=6 (sn)	 t=8 (sn)
 t=10.5 (sn)	 t=13(sn)	 t=16 (sn)
 t=17.5 (sn)	 t=22(sn)	 t=25.5(sn)
 t=28 (sn)	 t=29.5 (sn)	 t=30.5 (sn)



Şekil 6.67. Engebeli parkruda yürüyüşe ait anlık ekran görüntüleri



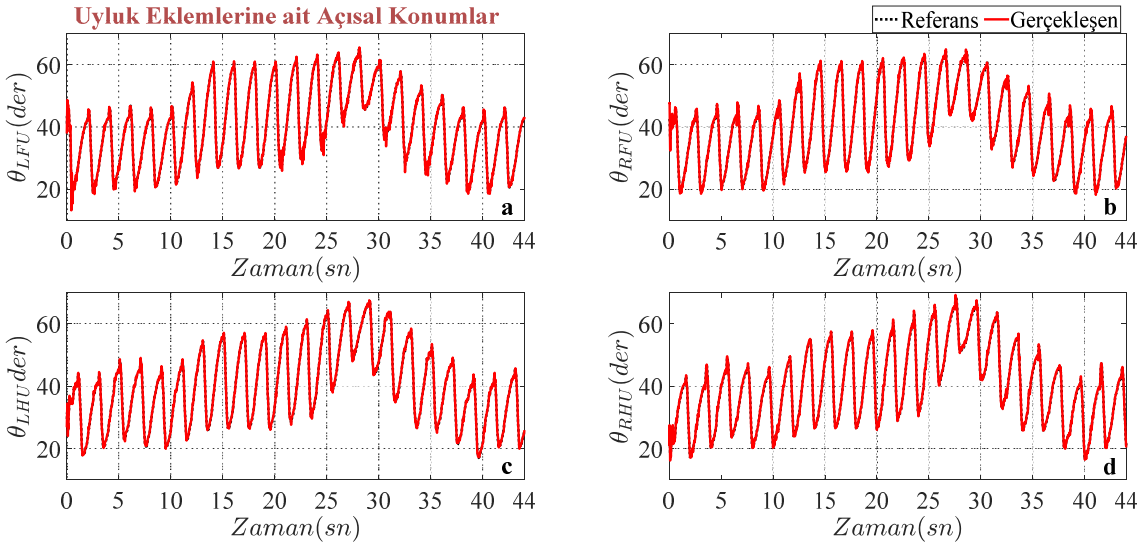
Şekil 6.68. Engebeli yürüyüş – Gövde durum değişkenlerine ait sonuçlar



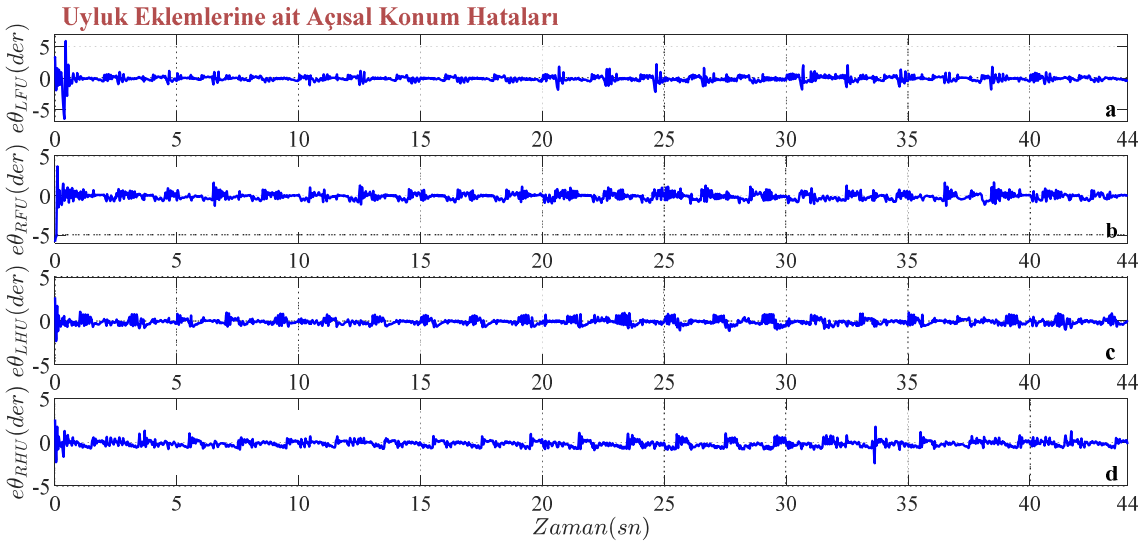
Şekil 6.69. Engebeli yürüyüş – Gövde durum değişkenlerine ait hatalar

4AR'ın engebeli parkurdaki statik yürüyüşü boyunca, uyluk eklemlerinin açısal konumlarının (θ_{LFU} ... θ_{RHU}) ve hata değerlerinin ($e\theta_{LFU}$ ... $e\theta_{RHU}$) değişimlerine ait simülasyon sonuçları Şekil 6.70a, 6.70b, 6.70c, 6.70d ve Şekil 6.71a, 6.71b, 6.71c, 6.71d'de, bacakların sıralamasına göre verilmiştir. Uyluk eklemlerine ait tork girişlerinin değişimi Şekil 6.72a, 6.72b, 6.72c, 6.72d'de sunulmuştur.

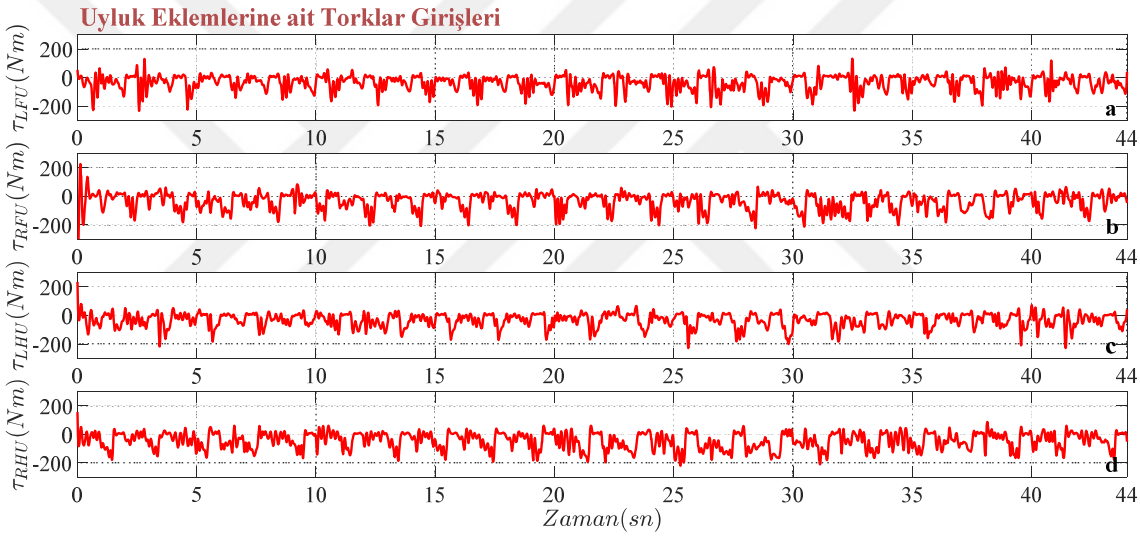
Benzer şekilde, baldır eklemlerinin açısal konumlarının (θ_{LFB} ... θ_{RHB}) ve hata değerlerinin ($e\theta_{LFU}$ ... $e\theta_{RHU}$) değişimlerine ait simülasyon sonuçları, bacak sıralamasına göre, Şekil 6.73a, 6.73b, 6.73c, 6.73d ve Şekil 6.74a, 6.74b, 6.74c, 6.74d'de, sırasıyla verilmiştir. Baldır eklemlerine ait tork girişlerinin değişimi ise Şekil 6.75a, 6.75b, 6.75c, 6.75d'de sunulmuştur.



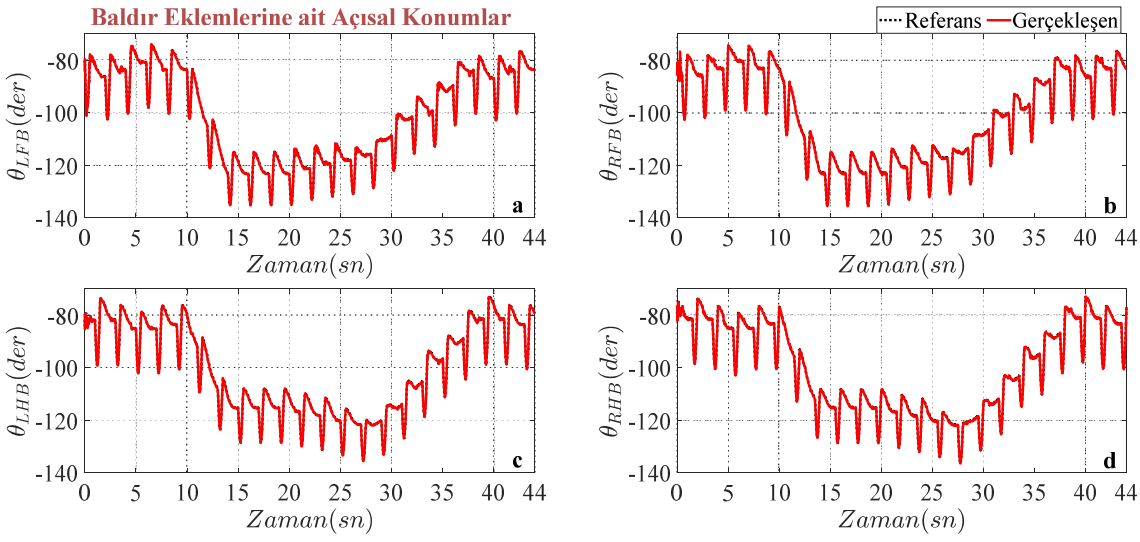
Şekil 6.70. Engebeli yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait açısal konumlar



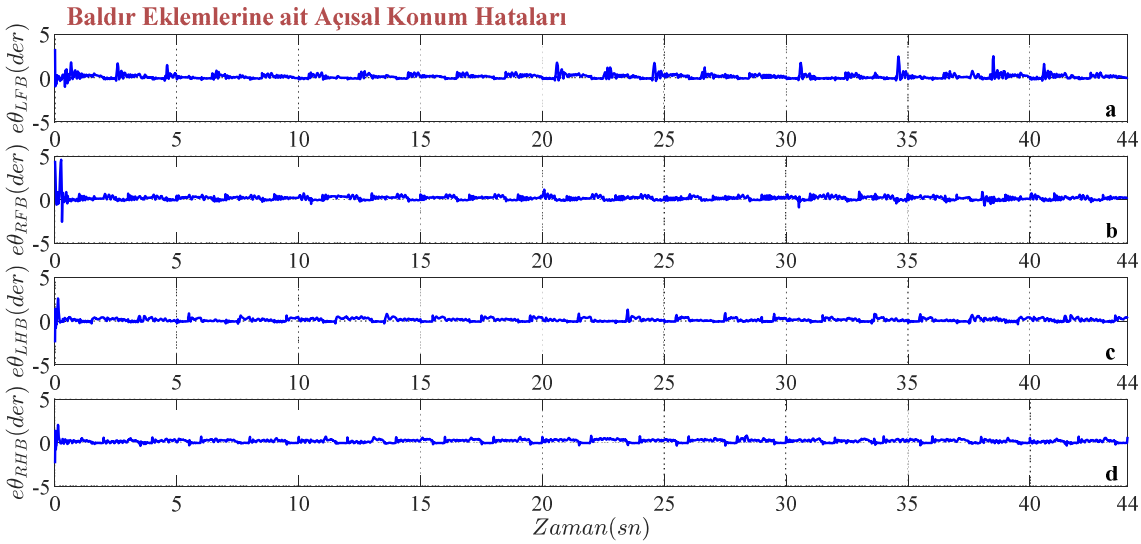
Şekil 6.71. Engebeli yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait açısal konum hataları



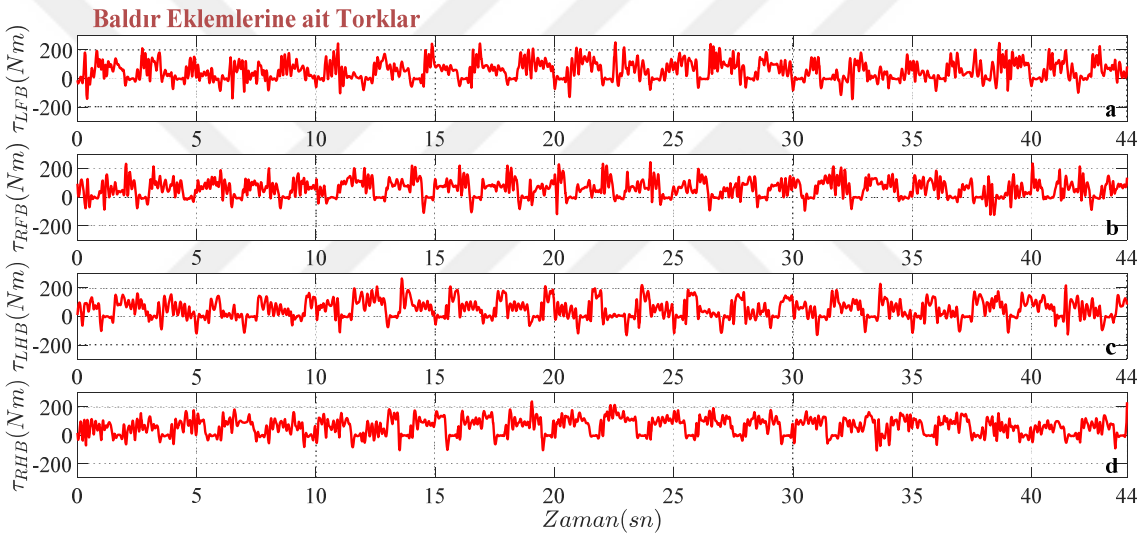
Şekil 6. 72. Engebeli yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait tork girişleri



Şekil 6.73. Engebeli yürüyüş – Baldır eklemlerine ait açısal konumlar



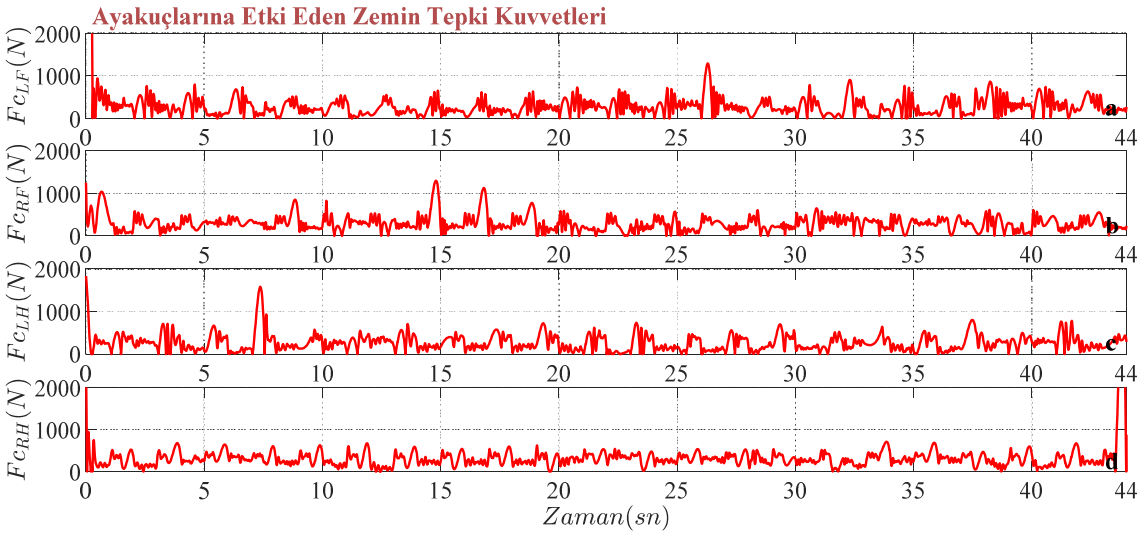
Şekil 6.74. Engebeli yürüyüş – Baldır eklemlerine ait açısal konum hataları



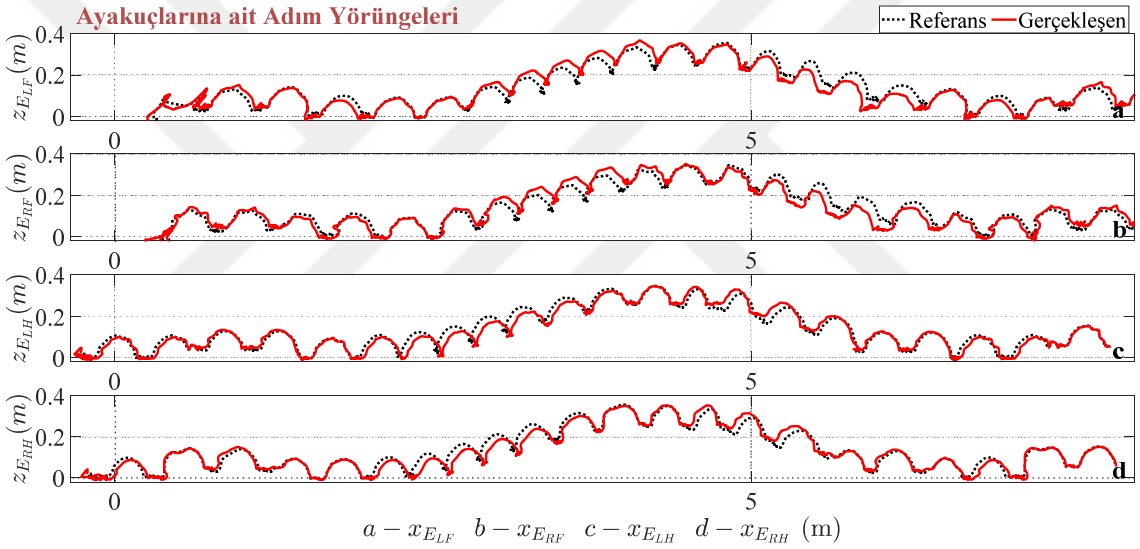
Şekil 6.75. Engebeli yürüyüş – Baldır eklemlerine ait tork girişleri

Engebeli parkurda hareket boyunca, ayakuçlarına etki eden zemin tepki kuvvetlerinin ($F_{c_{LF}}$ ... $F_{c_{RH}}$) değişimi, Şekil 6.76a, 6.76b, 6.76c, 6.76d'de bacak sıralamasına göre sunulmuştur. Öngörülebileceği üzere, ayak ucunun düzensiz zeminlere ilk temas anında en yüksek tepki kuvvetleri oluşmaktadır. Şekil 6.77a, 6.77b, 6.77c, 6.77d'de her bir bacağa ait ayakuçlarının izledikleri düzlemsel adım yörüngeleri; Şekil 6.78a, 6.78b, 6.78c, 6.78d'de ise, referans değerleri ile gerçekleşen yörünge arasındaki hata değişimleri sırasıyla verilmiştir.

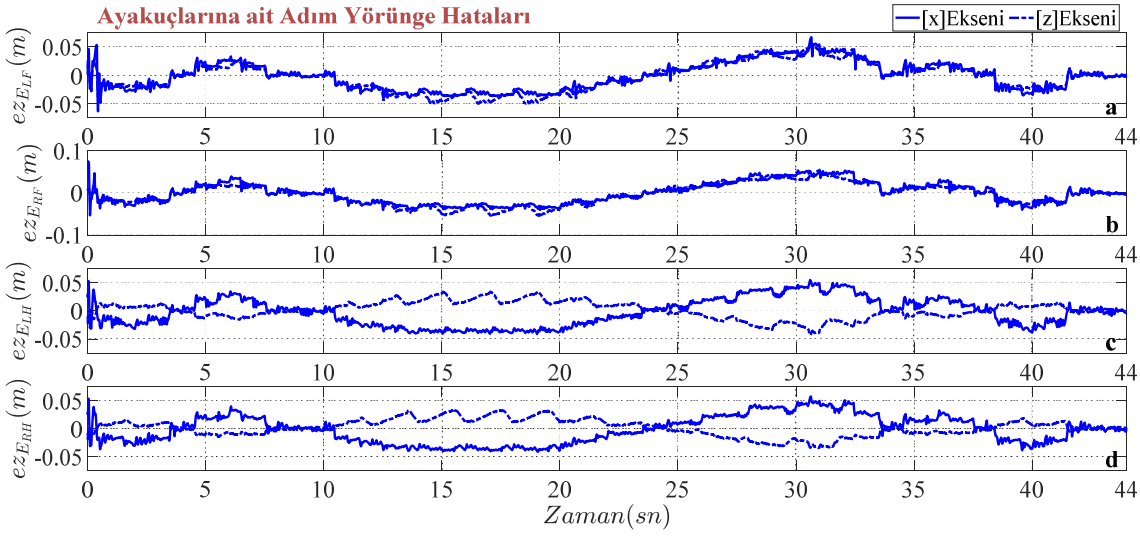
Ayak ucu yörünge takip perfomasını kapsamlı incelemek amacıyla, ön (LF, RF) ve arka (LH, RH) ayak uçlarının x ve z eksenlerindeki konumları ve yörünge takip hatalarının değişimleri, her bir engebe için ayır ayrı grafiklerde sunulmuştur.



Şekil 6.76. Engebeli yürüyüş – Ayakuçlarına etki eden zemin tepki kuvvetleri



Şekil 6.77. Engebeli yürüyüş – Ayakuçlarına ait adım yörüngeleri



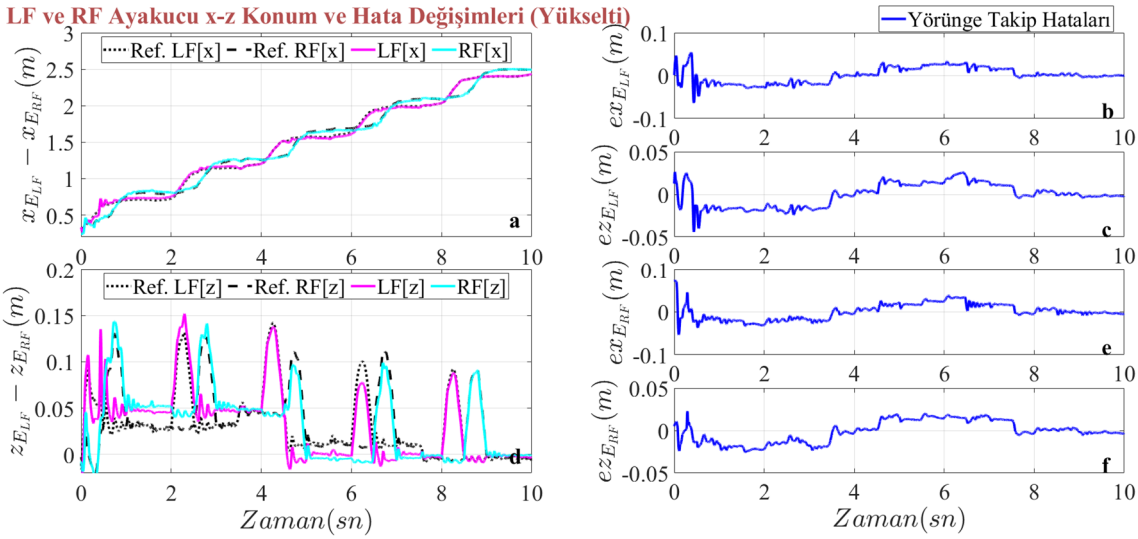
Şekil 6.78. Engebeli yürüyüş – Ayakuçlarına ait adım yörünge hataları

Engebeli parkurun yükselti kısmı için, ön ve arka bacakların ayak ucularına ait x ve z eksenlerindeki referans ve gerçekleşen konumlar ile yörünge izleme hatalarının değişimleri, Şekil 6.79a, 6.79b, 6.79c, 6.79d, 6.79e, 6.79f'de ve Şekil 6.80a, 6.80b, 6.80c, 6.80d, 6.80e, 6.80f'de, sırasıyla sunulmuştur.

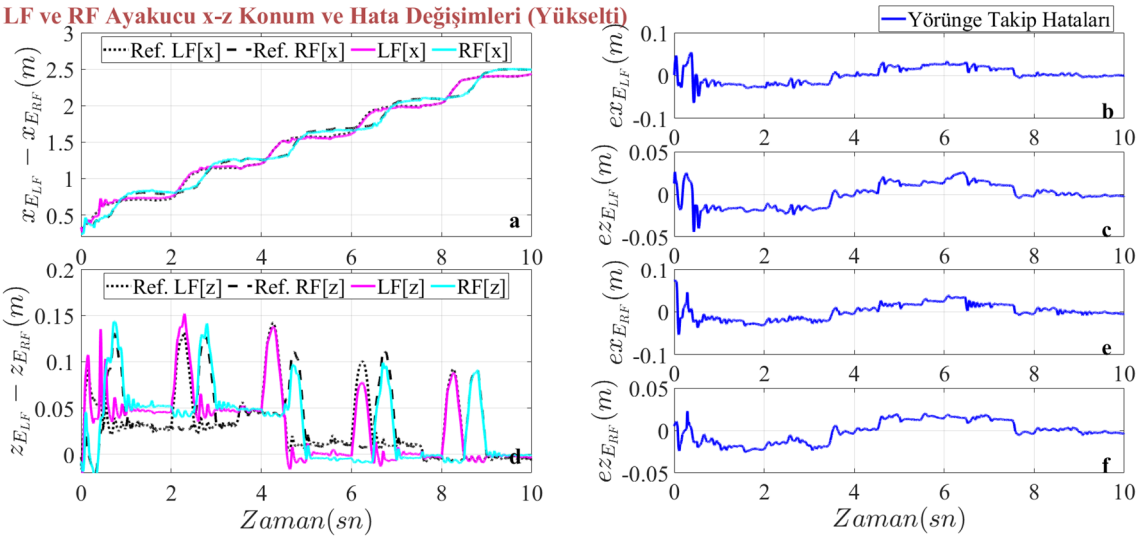
Benzer şekilde, eğimli yüzey için Şekil 6.81a, 6.81b, 6.81c, 6.81d, 6.81e, 6.81f'de ve Şekil 6.82a, 6.82b, 6.82c, 6.82d, 6.82e, 6.82f'de sırasıyla sunulmuştur.

Benzer şekilde, eğim sonu boşluk için Şekil 6.83a, 6.83b, 6.83c, 6.83d, 6.83e, 6.83f'de ve Şekil 6.84a, 6.84b, 6.84c, 6.84d, 6.84e, 6.84f'de sırasıyla sunulmuştur.

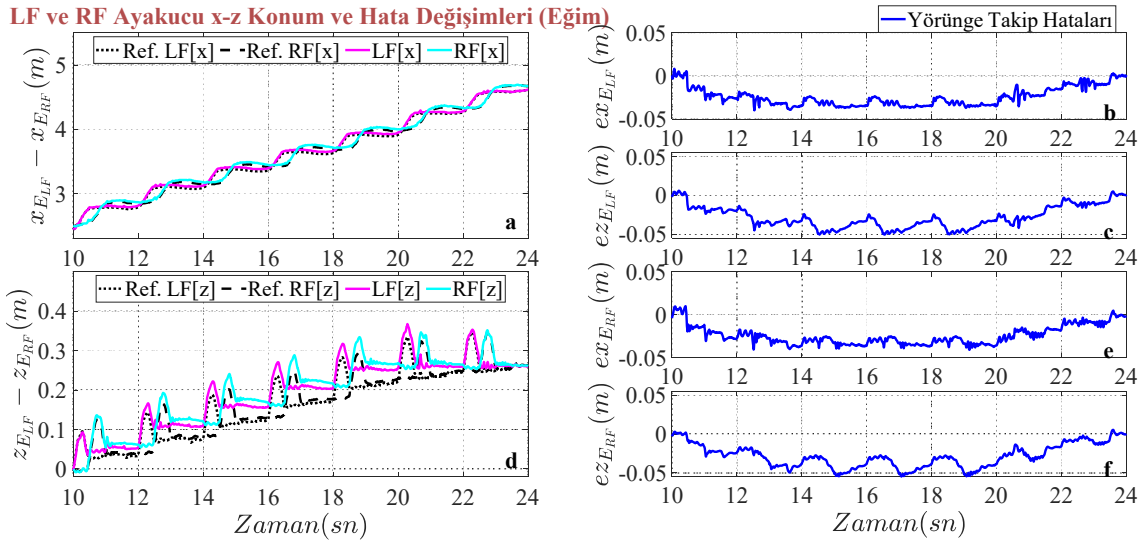
Benzer şekilde, seviye farklı kanal için Şekil 6.85a, 6.85b, 6.85c, 6.85d, 6.85e, 6.85f'de ve Şekil 6.86a, 6.86b, 6.86c, 6.86d, 6.86e, 6.86f'de sırasıyla sunulmuştur.



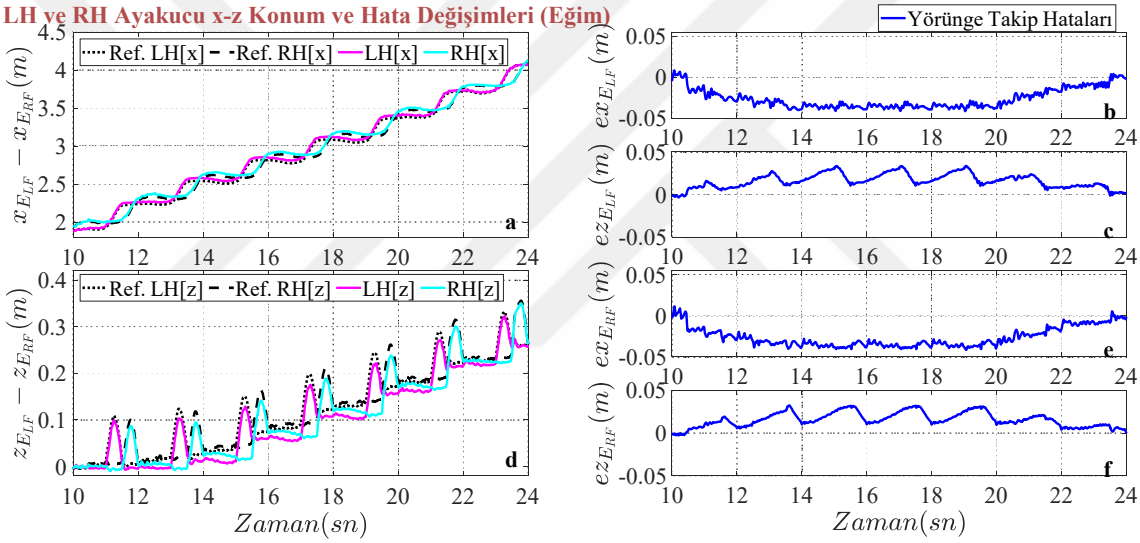
Şekil 6.79. Engebeli yürüyüş – LF, RF ayak ucu konumları ve hatalar (Yükselti)



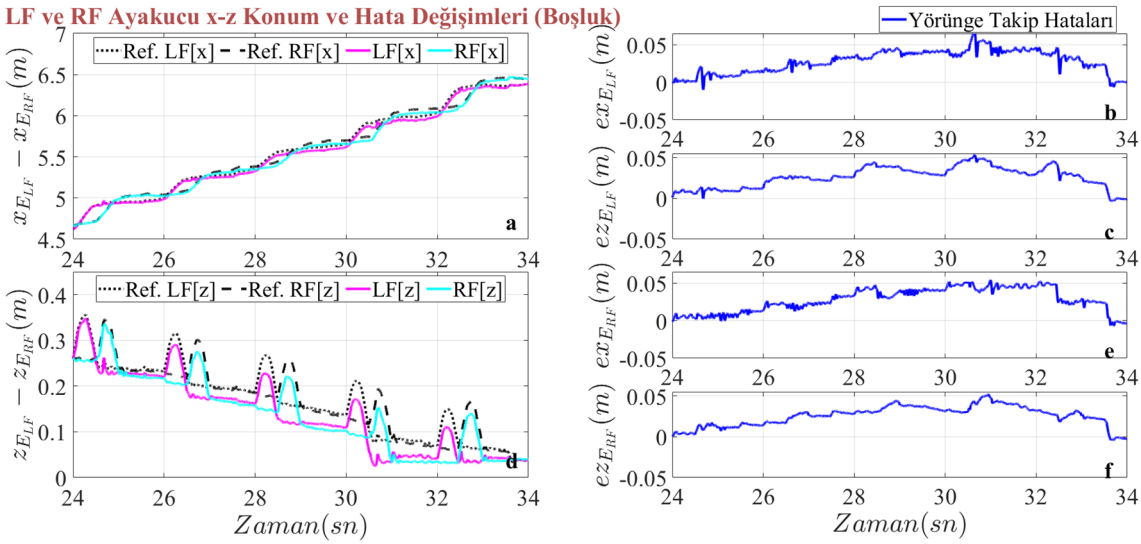
Şekil 6.80. Engebeli yürüyüş – LH,RH ayak ucu konumları ve hatalar (Yükselti)



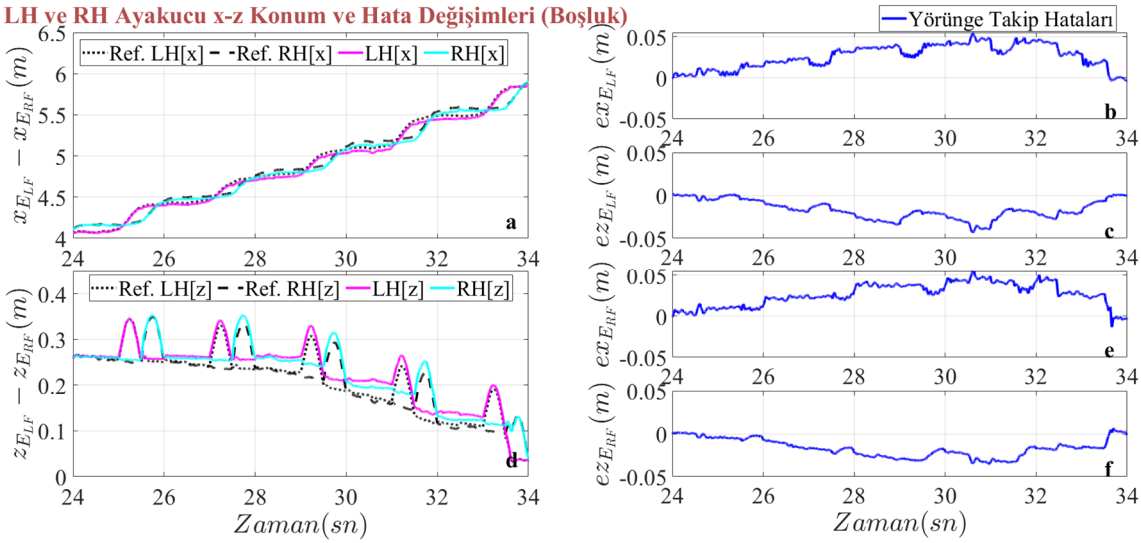
Şekil 6.81. Engebeli yürüyüş – LF, RF ayak ucu konumları ve hatalar (Eğim)



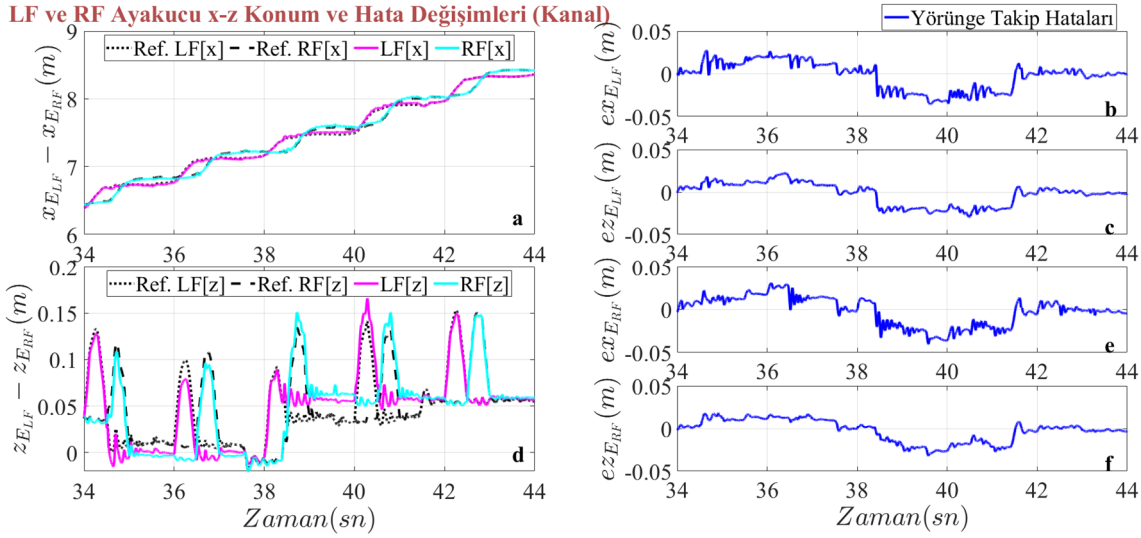
Şekil 6.82. Engebeli yürüyüş – LH, RH ayak ucu konumları ve hatalar (Eğim)



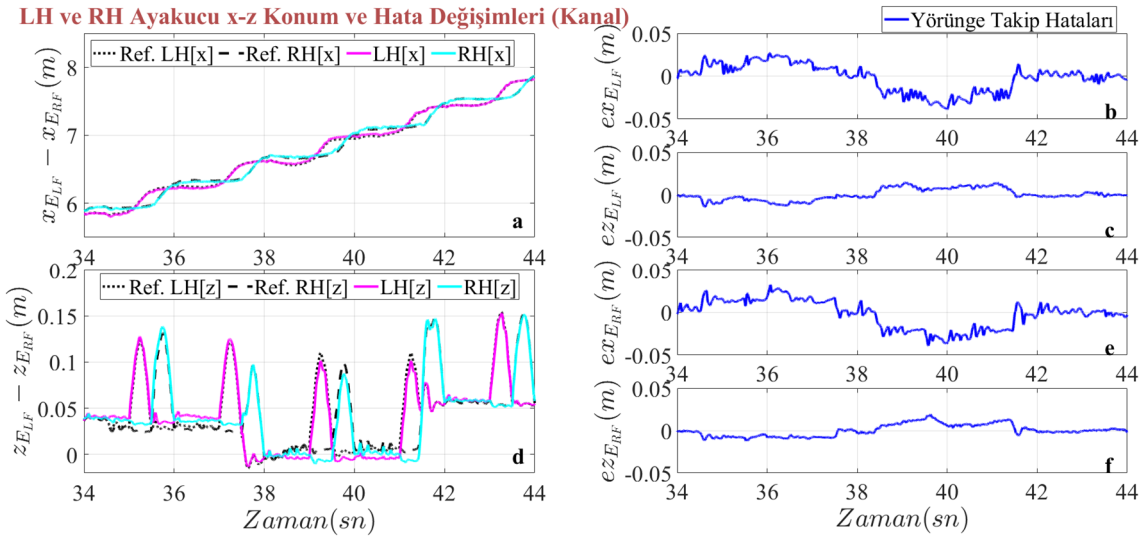
Şekil 6.83. Engebeli yürüyüş – LF, RF ayak ucu konumları ve hatalar (Boşluk)



Şekil 6.84. Engebeli yürüyüş – LH, RH ayak ucu konumları ve hatalar (Boşluk)



Şekil 6.85. Engebeli yürüyüş – LF, RF ayak ucu konumları ve hatalar (Kanal)



Şekil 6.86. Engebeli yürüyüş – LH, RH ayak ucu konumları ve hatalar (Kanal)

Engebeli parkurda yürüyüş simülasyonunda, ayakuçlarının yörünge takip hataları, robotun tasarlanan her bir engebedeki hareketi ayrı ayrı ele alınarak, yüzdesel olarak araştırılmıştır. Düzensiz zeminlerde yürüyüş kararlılığının sürekli değişmesi nedeniyle maksimum hata yerine ortalama hata değerleri daha anlamlı olmaktadır.

Robotun parkurun yükselti tanımlanmış kısmındaki yürüyüşüne ait; x, z yönlerindeki ve x-z düzlemindeki ortalama yüzde hataları, her bir ayak ucu için sırasıyla şöyledir. Sol ön bacağın (LF); % 0.6, % 11.2 ve % 11.3'tür. Sağ ön bacağın (RF); % 0.7, % 10.6 ve % 10.7'dir. Sol arka bacağın (LH) ise; % 0.6, % 6 ve % 6.1'dir. Sağ arka bacağın (RH); % 0.7, % 6.2 ve % 6.3'tür.

Benzer şekilde, eğimli yüzeydeki (rampa) yürüyüşüne ait; x, z yönlerindeki ve x-z düzlemindeki ortalama yüzde hataları, her bir ayak ucu için sırasıyla şöyledir. Sol ön bacağın (LF); % 1.2, % 28.1 ve % 28.2'dir. Sağ ön bacağın (RF); % 1.1, % 28.2 ve % 28.3'tür. Sol arka bacağın (LH) ise; % 1.3, % 15.8 ve % 15.9'dur. Sağ arka bacağın (RH); % 1.2, % 16 ve % 16.1'dir.

Benzer şekilde, eğim sonu boşluk kısımda yürüyüşüne ait; x, z yönlerindeki ve x-z düzlemindeki ortalama yüzde hataları, her bir ayak ucu için sırasıyla şöyledir. Sol ön bacağın (LF); % 1.5, % 26.1 ve % 26.3'tür. Sağ ön bacağın (RF); % 1.6, % 25.7 ve % 25.9'dur. Sol arka bacağın (LH) ise; % 1.4, % 16.6 ve % 16.8'dir. Sağ arka bacağın (RH); % 1.5, % 17 ve % 17.1'dir.

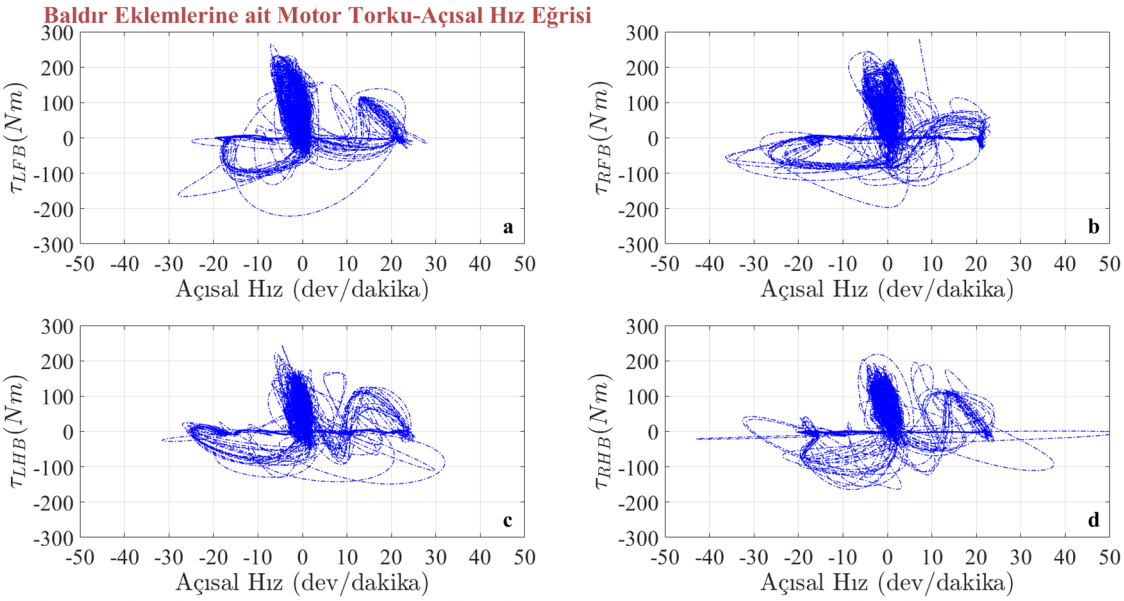
Benzer şekilde, seviyesi farklı kanalda yürüyüşüne ait; x, z yönlerindeki ve x-z düzlemindeki ortalama yüzde hataları, her bir ayak ucu için sırasıyla şöyledir. Sol ön bacağın (LF); % 0.7, % 10.9 ve % 11'dir. Sağ ön bacağın (RF); % 0.8, % 10.5 ve % 10.6'dır. Sol arka bacağın (LH) ise; % 0.6, % 5.5 ve % 5.7'dir. Sağ arka bacağın (RH); % 0.7, % 5.8 ve % 5.9'dur.

4AR'ın engebeli parkurda yürüyüş simülasyonunda; gövde ve eklemlerin durum değişkenlerine ait, x ve z koordinatları için ayak ucu yörüngelerine ait, ortalama hata değerleri, her bir engebedeki yürüyüş için ayrı ayrı, kapsamalı olarak Çizelge 6.9'da sunulmuştur.

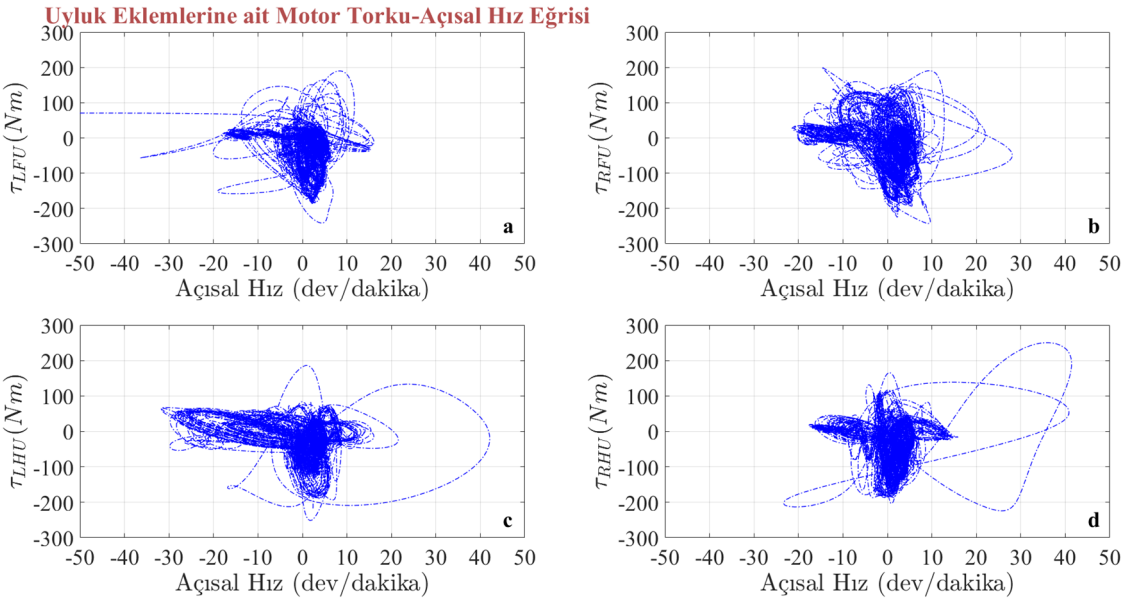
Ayrıca, 4AR'un uygulanabilirliği açısından önem arz eden ve uygun eyleyicinin belirlenebilmesi amacıyla kullanılan, uyluk ve baldır eklemlerine ait tork-açısal hız eğrileri, Şekil 6.87a, 6.87b, 6.87c, 6.87d'de ve Şekil 6.88a, 6.88b, 6.88c, 6.88d'de, her bir bacak için sırasıyla sunulmuştur. Grafiklerdeki eğriler, motor üreticileri tarafından sunulan kataloglardaki kritik motor limit çizgilerinin altında kalacak şekilde, robot eklemleri için uygun eyleyiciler seçimi yapılabilir.

Çizelge 6.9. Engebeli yürüyüş – Sistem değişkenlere ait maks. ve ort. hata değerleri

Uzuv	Değişken	Birim	Maksimum − Ortalama Hata			
			Yükselti	***Eğimli Yüzey***	***Eğim Sonu Boşluk***	***Seviye Farklı Kanal***
Gövde	ex_G	m	0.235 − 0.134	0.265 − 0.141	0.284 − 0.198	0.330 − 0.239
	ez_G	m	0.038 − 0.013	0.025 − 0.008	0.038 − 0.010	0.051 − 0.008
	$e\dot{x}_G$	m/s	0.714 − 0.091	0.469 − 0.090	0.401 − 0.083	0.528 − 0.091
	$e\theta_G$	derece	5.010 − 1.658	6.788 − 4.393	8.331 − 4.258	4.144 − 1.568
Uyluk Eklemi	$eLFU$	derece	6.509 – 0.330	1.887 – 0.255	2.220 − 0.347	1.847 − 0.258
	$eRFU$	derece	5.834 – 0.318	1.268 − 0.263	1.268 − 0.348	1.657 − 0.298
	$eLHU$	derece	2.690 − 0.260	0.922 − 0.234	1.143 − 0.274	0.978 − 0.230
	$eRHU$	derece	2.636 − 0.286	1.102 − 0.261	2.390 − 0.360	1.265 − 0.253
Baldır Eklemi	$eLFB$	Derece	3.326 – 0.210	1.751 – 0.224	1.742 – 0.202	2.496 – 0.227
	$eRFB$	derece	4.567 – 0.236	1.148 – 0.219	0.912 – 0.206	0.866 – 0.180
	$eLHB$	derece	2.574 – 0.175	1.301 – 0.198	0.919 – 0.161	0.787 – 0.172
	$eRHB$	derece	2.366 – 0.183	0.782 – 0.220	0.801 – 0.216	0.720 – 0.181
Ayak ucu Konumları	*LF* exE_{LF}	m	0.063 – 0.210	0.040 – 0.024	0.067 – 0.028	0.035 – 0.013
	LF ezE_{LF}	m	0.044 – 0.011	0.050 – 0.028	0.053 – 0.026	0.029 – 0.011
	RF exE_{RF}	m	0.073 – 0.015	0.041 – 0.024	0.054 – 0.028	0.041 – 0.014
	RF ezE_{RF}	m	0.025 – 0.010	0.055 – 0.028	0.052 – 0.025	0.032 – 0.010
	LH exE_{LH}	m	0.052 – 0.014	0.041 – 0.026	0.054 – 0.026	0.039 – 0.013
	LH ezE_{LH}	m	0.023 – 0.006	0.033 – 0.016	0.043 – 0.016	0.014 – 0.005
	RH exE_{RH}	m	0.053 – 0.014	0.042 – 0.026	0.056 – 0.026	0.039 – 0.013
	RH ezE_{RH}	m	0.020 – 0.006	0.032 – 0.016	0.035 – 0.017	0.018 – 0.006



Şekil 6.87. Engebeli yürüyüş – Uyluk eklemlerine ait tork-açısal hız eğrileri



Şekil 6.88. Engebeli yürüyüş – Baldır eklemlerine ait tork-açısal hız eğrileri

Eyleyici seçiminde en belirleyici etkenlerden biri, eklemlerin açısal hızlarına göre tork gereksinimlerinin değişimleridir. Şekil 6.88'de eklemlere ait tork-açısal hız eğrileri engebeli parkurda yürüyüş için sunulmuştur. Düz bir zemindeki yürüyüşe kıyasla daha fazla tork gereksinimi olacağı için sadece engebeli parkurdaki değişimler verilmiştir. Düz zeminler için de bu eğriler benzer veya daha küçük değerlerde gerçekleşecektir. Yani, engebeli parkurda yürüyüş için seçilen bir motor düz zemin için de yeterli olacaktır. Bunun yanında motor seçiminde, büyük boyut ve ağırlıktan kaynaklanan dezavantajların da göz ardı edilememesi gerekir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, dört ayaklı bir robotun engebeli yüzeylerde yürüme analizi ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. Sistemin fiziksel tasarımı ve detaylı kinematik/dinamik analizleri sunulmuştur. Bacağın hareketine yönelik, referans adım yörüngenin en az hata ile kontrolü için daha önce önerilmeyen algoritmalar ile özgün optimal kontrolcü tasarımları, farklı modelleme ve kontrol yaklaşımları gerçekleştirilmiştir. Devamında, dört ayaklı bir robota (HyQ2max) ait geometrik ve fiziksel özellikleri kullanılarak tez kapsamında incelenen 4AR'ın dinamik modeli elde edilmiş, özgün bir kontrol mimarisi önerilerek robotun düz bir yüzeyde ve farklı engebeler içeren bir parkurda kontrolcü ve modelleme yazılımlarının (MATLAB ve ADAMS) eş zamanlı çalıştırılması ile yürüyüş simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Giriş bölümünde, tez genel hatları ile özetlenmiş, temel motivasyonu oluşturan etkenler izah edilmiş, literatüre yapılan katkılar ve özgün yönleri belirtilmiştir (Çizelge 1.1). Bu bölümde ise, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde elde edilen çıktılar ve genel sonuçlar, bir bütünlük arz edecek şekilde, ana ve alt başlıklara göre sırasıyla aşağıda sunulmuş ve değerlendirilmiştir.

- Bölüm 2'de, literatürdeki sınırlı derlemlerin aksine, dört ayaklı robotlar hakkındaki temel ve güncel çalışmalar sunulmuştur. Tarih sırasına göre robotların gelişimlerini içeren genel bir bakışın ardından; sistemin modellenmesi, kontrolü, eyleyici seçimi ve yürüyüşü ile ilgili deneysel ve benzetim çalışmalarının açıklandığı, geniş kapsamlı ve sistematik bir literatür derlenmiştir. Tezin kaynak araştırması kısmının, bu alandaki Türkçe literatürün genişlemesine katkı sağlayabileceği, gelecekteki çalışmalar için rehberlik edebileceği düşünülmektedir.

- Bölüm 3'te, genel teorik esaslar ve formülasyonlar verilerek tüm gövdenin ileri ve ters kinematik denklemleri elde edilmiş. Denklemler MATLAB ortamına aktarılarak dört ayaklı robotlar için bir ters kinematik programı geliştirilmiştir. Çizelge 3.3'teki örnek hesaplamalardan da anlaşılacağı üzere bu program; referans ayak ucu konumlarına ve gövde konum ve oryantasyonuna karşılık gelen, eklemlerin açısal konumlarını kolayca hesaplayabilmekte, ayrıca robota ait görseller sunabilmektedir. Bu program, farklı amaçlara yönelik ve farklı fiziksel özelikteki robotların tasarımında, hızlı ve etkili kinematik çözümlemelerin yapılmasında katkı sağlayacaktır.

- Bacaklı robotik alanında öne çıkan uygulamalar, özelikle *HyQ* ve *StarlETH* isimli robotların inşa süreçleri, tek bacak yapısının tasarımı ve kontrolü temelli başlamış ve sürdürülmüştür. Robotun, dengeli ve kararlı bir şekilde referans yürüyüş planını (yürüyüş çeşidi, gövde hızı vb.) gerçekleştirebilmesi, adım hareketinin denetimine bağlıdır. Bu sebeple Bölüm 4'te, bacağın dinamik modeli üzerinden, ayak ucunun referans adım yörüngesini en az hata ile takip edebilmesi amacıyla, güncel ve temel algoritmalar kullanılarak optimal kontrolcü tasarımları gerçekleşirmiştir. Bu bölümde sunulan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

  - ✓ Öncelikle, benzer parametrelere sahip BA ve kıyaslama amaçlı PSO, GA kullanılarak PID kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Yörünge takip hatlarının normunu ifade eden amaç fonksiyonunu, BA'nın 63.9'a, PSO'nun 67.9'a ve GA'nın ise 74.1'e kadar indirgeyebildikleri (sırasıyla, 30.9, 33.8 ve 39.1 dakika sürede), benzer tork girişlerine karşın BA'nın, daha hızlı bir yakınsama ile daha etkili bir performans sağlayabildiği görülmüştür.

  - ✓ Sonrasında, farklı bir kontrol yaklaşımı geliştirmek amacıyla, PID kontrolcü tasarımına benzer şekilde, Q ve R ağırlık matrislerinin ve kazançları optimize edilerek ayarlandığı hibrit bir LQR-PID kontrolcü tasarlanmıştır. Yörünge takip hatalarının ortalamasını ifade eden amaç fonksiyonunu, BA'nın 0.46'ya (32.7), PSO'nun 1.21'e, GA'nın ise 1.45'e kadar indirgeyebildiği indirgeyebildikleri (sırasıyla, 32.7, 21.9 ve 31.6 dakika sürede), BA daha uzun sürdüğü ancak daha etkin bir arama yapabildiği, benzer tork girişleri ile daha tatmin edici bir performans sağlayabildiği görülmüştür.

  - ✓ Doğrusal kontrol yaklaşımlarını çeşitlendirmek amacıyla, üyelik fonksiyonları ve kural tabanı dahil tüm tasarım parametrelerinin AA ve kıyaslama amaçlı GA ile optimize edildiği BMK tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ön tasarımı yapılan BMK'nın, kullanıcı tanımı gerektirmeden, toplamda 47 parametresine ait optimum değerler birlikte aranmıştır. Ortalama yörünge hata değerlerini içeren amaç fonksiyonunu, AA'nın 1.48'e ve GA'nın 2.38'e kadar indirgeyebildiği (sırasıyla 26.2 ve 7.8 saat sürede), her iki algoritmanın da ön tasarım haline göre daha yüksek performansta bir BMK tasarımı yapabildiği, ancak AA'nın daha uzun bir sürede ancak daha etkili bir yakınsama sunabildiği görülmüştür.

- ✓ Sonuç olarak, tasarlanan optimal kontrolcülerin performansları birbirlerine göre kıyaslandığında; PID-BA, LQRPID – BA ve BMK – AA'nın 5 mm'den az bir hata ile adım yörüngesini başarılı bir şekilde gerçekleştirebildiği, LQRPID – BA'nın diğerlerine göre daha düşük hata (1~2 mm) ile en iyi performansa sahip olduğu, PID – BA'nın başlangıçla daha kararsız bir cevap olsa da kabul edilebilir hata değerlerinde (3~4 mm), BMK – AA'nın ise daha az yön değiştiren hata değerlerinde (2~3 mm) ve doğrusal olmayan yapısı sayesinde daha düşük tork girişleri üreterek daha esnek çözümler sunabildiği anlaşılmıştır (Şekil 4.23). Kontrolcü tasarımına yönelik önerilen özgün yaklaşımlar, özellikle tasarımcı tanımlaması ve deneyimi gerektirmeyen, hızlı ve optimal BMK tasarımı, bu alandaki çalışmalara katkı sağlayabilecek ve farklı sistemler içinde kolayca uygulanabileceği beklenmektedir.

- ✓ Engel tanımlanmış bir yörüngede adım hareketinin kontrolüne yönelik; ayak ucunun yüzey ile konum-kuvvet etkileşiminin empedans kontrolcü ile, eklemlerin tork kontrolünü ise PID kontrolcü ile denetlendiği, PID-Emp kontrolcü tasarlanmıştır. Bacağın, ayak ucu tepki kuvvetlerine göre referans yörüngesini güncelleyerek, 130 mm yüksekliğinde ve 50 mm genişliğinde engeli başarılı aşabildiği görülmüştür. Düzensiz yüzeylerde dengeli bir yürüyüş için temel teşkil eden bu çalışma, ayak ucu ile zemin arasında etkileşimi inceleyen ilgi çalışmalar için katkı sağlayabilecek niteliktedir.

- ✓ Yürüyüş çalışmalarına yönelik hızlı benzetim sağlamak amacıyla, dört ayaklı bir robot (HyQ2max) bacağının kütle, atalet, eklem sertlik ve sönüm değerleri vb. gibi dinamik parametreleri ile 3-DoF bir bacak yapısı tasarlanmış, dinamik modeli üzerinden doğrusal durum-uzay modeli elde edilmiştir ve doğrulanmıştır. Sistemin kontrolcü çeşitliliğini artırmak için, daha önce literatürde önerilmeyen PIλDμ kontrolcü tasarımı önerilmiştir. Kesir derecelerinin (λ, μ), eklemlerin denetimi üzerindeki etkinliğini araştırmak amacıyla; adım hareketi için gerekli aralıklardaki birim basamak girişlere karşın, PIλDμ kontrolcü ile aynı kazançlara sahip klasik PID kontrolcünün cevap özellikleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda FOPID-3, PID kontrolcüye kısayla; kabul edilebilir değerlerde ve ortalama %15 daha az kalıcı durum hatasına ($e(t)$) karşın, maksimum aşma ($MaxOS$) olmadan, yükselme

zamanında (*tr*) yaklaşık % 60 ve oturma zamanında (*ts*) ise yaklaşık % 50 azalma sağlayabildiği, tork değerlerinin ise benzer şekilde değişim gösterdiği anlaşılmıştır. Ayrıca, kesir derecelerini daha optimum ayarlanması ile PIλDμ kontrolcünün performansının iyileştirilebileceği anlaşılmıştır. Kesir derecelerinin, sistem cevabı üzerinde etkilerine yönelik elde edilen tecrübelerin benzer çalışmalara katkı sağlaması beklenmektedir.

- Ayaklı yürüyüş ile ilgili bilinmesi gereken temel esasların bir bütün olarak izah edildiği Bölüm 5'te, ayaklı yürüyüş hakkında terim ve kavramlar belirtilmiş, 6 farklı yürüyüş çeşidi detaylı görseller ile tanıtılmış ve avantaj/dezavantajlarına göre kapsamlı açıklamalar sunulmuştur. Yürüyüş planlaması ve kontrolü üzerine yaygın yaklaşımlara ve güncel çalışmalara yer verilmiştir. Bu bölümde sunulan bilgilerin, benzer çalışmalara rehberlik edeceği öngörülmektedir.

- Tezin ana kısmını oluşturan Bölüm 6'da, diğer bölümlerde gerçekleştirilen çalışmalar ve kazanılan tecrübeler doğrultusunda 4AR'ın; dinamik modellenmesi, özgün bir kontrol mimarilerinin geliştirilmesi, düz bir yüzeyde 4 farklı çeşitte yürüyüşüne ve standartlara uygun şekilde tasarlanmış farklı engebelileri içeren özgün bir parkurda yürüyüşüne yönelik, ADAMS&MATLAB eş simülasyon yöntemi kullanılarak simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlardan elde edilen sayısal sonuçlar ve alt başlıklar halinde kısaca aşağıda özetlenmiştir.

  - ✓ *HyQ* robotu temelli geliştirilen *HyQ2max* robotuna ait fiziksel boyutlar, atalet, sertlik ve sönüm vb. dinamik parametreleri ve maksimum tork sınırlamaları gibi tasarım kriterleri referans alınarak (Bölüm 3.2), farklı çalışmalarda da kullanılabilecek, özgün bir 4AR dinamik modeli (Bölüm 6.1) elde edilmiştir. ADAMS'ta robotun modellenmesi, zemin ile etkileşimin (kontak) tanımlanması, MATLAB ile eş simülasyonu ile ilgili konularda, benzer çalışmalara katkı sağlayabilecek bilgiler sunulmuştur.

  - ✓ Sabit kazançlı kontrolün aksine; ayağın zemin ile etkileşim halinde olduğu destek ve havada olduğu uçuş evreleri için farklı kazançlara sahip Adaptif PD kontrolcü tasarlanmıştır. Bu sayede, ani zemin tepki kuvvetlerinin azalması ve daha düzenli ve düşük değerlerde tork değişimleri elde edilmiştir. (Şekil 6.20).

- ✓ Yürüyüş çalışmalarının başlıca performans kriteri robotun dengesini koruması ve gövde değişkenlerine ait referans değerlerin en az hata ile sağlanabilmesidir. Dengeli bir yürüyüş, gövdenin yerden yüksekliğini (Z_G) koruyarak ve en az yunuslama açısı (θ_G) ile hareketine bağlıdır. Düz zeminde statik, tırıs/rahvan ve eşkin yürüyüş için $Z_G - \theta_G$ değişkenlerine ait maksimum hata değerleri sırasıyla; 0.01 m − 2.8 derece, 0.03 m − 7.8 derece, 0.035 m − 4.5 derecedir. Engebeli parkurda yürüyüşte ise, robot yunuslama açısı 0.05 m − 8.3 derecedir. Robotun, yunuslama açısı 10 dereceden fazla olduğunda devrilme eğilimine girdiği ve yerden yükseklik referans değerinin 0.6 m olduğu düşünüldüğünde; elde edilen hata değenlerinin kritik değerlerin altında kaldığı görülmüştür.

- ✓ Öngörülemeyen dinamik etkiler nedeniyle, daha düşük hızlardakine kıyasla yüksek hızlarda yürüyüş, istenen yürüyüş planlamasının ve kontrolün sağlanmasını zorlaştırmaktadır. Bu sebeple, düz zemin için ortalama gövde ilerleme hızı ($\dot{x}_G$), literatürdeki büyük ölçekli robotların (yüklü haldeki), 0.2~1 m/s aralığındaki ortalama yürüyüş hızları referans alınarak tayin edilmiştir. (Frigerio ve ark., 2017; Soharu ve ark., 2019). 4AR'ın statik, tırıs/rahvan ve eşkin için yürüyüş hızları sırasıyla; 0.53 m/s, 0.8 m/s ve 0.9 m/s olarak gerçekleşmiştir. 4AR'ın dengeli ve kararlı bir şekilde birçok düzensiz yüzeyleri aşarak ilerlediği engebeli parkurdaki hızı ise; literatürde 0.026~0.15 m/s aralığında belirtilen ortalama hızların (Aceituno-Cabezas ve ark., 2018; Zhang ve ark., 2019a) üstüne ve 0.18 m/s'ye kadar artırılmıştır.

- ✓ Benzer çalışmalarda yeterince incelenmeyen ancak planlanan yürüyüşün gerçekleşmesinde kritik öneme sahip diğer önemli bir performans kriteri ise; ayak ucunun, referans adım yörüngesini en az hata ile takip edebilmesidir. Çünkü, robotun yürüyüş planına uygun, dengeli yürüyüşü, tasarlanan adım hareketini yüksek oranda gerçekleştirebilmesine bağlıdır. Düz zeminde yürüyüşte, adım yörüngesinin takibine ait yüzde hata; Gor ve ark. (2015b)'nin simülasyon çalışmalarında yaklaşık %3~%20 aralığında gerçekleşmiş, Kitano ve ark. (2016)'nın *TITAN-XIII* robotu üzerindeki deneysel çalışmalarında ise %11 olarak geçekleşmiştir. 4AR'ın düz zeminde statik, tırıs/rahvan ve eşkin yürüyüşünde x ve z yönlerindeki yörünge hataları sırasıyla; %1.2~%11.3, %1.3~%12.4, %1.3~%17.8 aralığında gerçekleşmiştir.

Engebeli parkurda yürüyüşte ise, zemindeki düzensizliklere bağlı olarak, en fazla %28'e kadar yükselmiş, ancak ortalaması %10 civarında gerçekleşmiştir. Sonuç olarak, önerilen kontrol mimarisi için önemli bir başarı göstergesi olan adım yörüngesine ait hata değerlerinin, literatür değerlerine uygun ve robotun denge kararlılığını koruyabilmesi için gerekli kabul edilebilir düzeylerde tutularak, planlanan yürüyüşün gerçekleşmesi sağlanmıştır.

- ✓ Uyluk ve baldır eklemlerine ait açısal konum hataları, yürüyüşün geçici rejim (0-0.5 sn) süresince maksimum değerleri almıştır. Sonrasındaki kararlı hareket boyunca ise, yürüyüş çeşidine göre değişmekle birlikte, en fazla 5~8 derece aralığında gerçekleşmiştir.

- ✓ Ayak ucuna gelen tepki kuvvetleri, robotun düz yüzeyde yürüyüşünde, uçuş evresinden destek evresine geçişte en yüksek değerlere ulamış, ortalamada 500 N civarında gerçekleşmiştir. Engebeli parkurda yürüyüşte ise, empedans kontrol yaklaşımı ile, düzensiz yüzeylerden gelen tepki kuvvetlerinin 500~1000 N aralığında denetimi sağlanmıştır. Bu değerlerin yüzeyin sertlik ve sönüm değerlerine göre değişkenlik gösterebildiği anlaşılmıştır.

- ✓ Sistemin deneysel uygulanabilmesinde, özellikle eyleyici seçiminde, torkların açısal hıza göre değişimi belirleyici olmaktadır. Engebeli parkurdaki yürüyüşte eklemlere ait tork-açısal hız eğrileri (Şekil 6.87-88) incelendiğinde, eklem torklarının değişimleri, *HyQ2max* robotuna ait motorların maksimum tork değerinin (250 Nm)'in altında kaldığı ve tez kapsamında önerilen simülasyon çalışmalarının deneysel olarak da uygulanabileceği anlaşılmıştır.

Yukarıda belirtilen sonuçlar haricinde, tezde sunulan grafik ve çizelgelere dayalı farklı çıkarımların ve değerlendirmelerin yapılması mümkündür. Tez kapsamında elde edilen sonuçlar, devamı niteliğindeki çalışmalar ile iyileştirilebilir ve/veya farklı yaklaşımlar ile geliştirilebilir.

Önemli bir kilometre taşı niteliğindeki *BigDog (2005)* ve ilk kapsamlı akademik çalışmaların sunulduğu *HyQ (2008), StarlETH (2012)* temelinde, son yılarda dört bacaklı robot alanında önemli çalışmalar sürdürülmektedir. Büyük bütçeler ve ekip çalışması gerektirmesi sebebiyle, deneysel uygulama çalışmaları sınırlı kalmakta ve dolayısıyla dört ayaklı yürüyen robotların geliştirilmesi ve ticarileşmesi yavaş ilerlemektedir.

Yakın gelecekte dört ayaklı robotların, kullanım amacına ve yerine göre, sistemin tümüne veya belirli bir kısmına yönelik; fiziksel boyutlandırma, yürüyüş planlaması, ortam haritalaması, enerji verimliliği, makine öğrenmesi, kontrolcü/boyut/süreç optimizasyonu vb. gibi birçok konuda, disiplinler arası başarılı çalışmaların yürütülmesi ve yüksek motivasyona sahip bu alanda önemli gelişimlerin kaydedilmesi kaçınılmazdır.

Dört ayaklı robotlar üzerine, her biri ayrı bir araştırma ve tez konusu olabilecek öneriler ve belli başlı çalışma alanları aşağıda kısaca özetlenmiştir.

- Yürüyüş planlama ve kontrolüne yönelik yaklaşımlar çeşitlendirilerek ve/veya geliştirilerek; robotun sağa/sola dönüş hareketine, merdiven çıkabilmesine, dış bozucu kuvvetler altında dengelenmesine yönelik çalışmalar yapılabilir.

- Engebeli arazide yürüyüş çalışlarındaki en önemli problem, robotun hareket ettiği ortamı ve/veya yüzeyi nasıl algılayacağıdır. Bu tez kapsamında, ayak ucu ve zeminin konum-kuvvet etkileşimi empedans tabanlı denetlenerek dengeli bir yürüyüş sağlanmıştır. Arazideki düzensizlikleri haritalanmasına ve buna uygun yürüyüş planlamasının tasarımına yönelik algoritmalar geliştirerek, robotun önceden tanımlanmış düzensiz bir arazide yürüyüş simülasyonları yapılabilir. Ayrıca, uygun bütçelerin sağlanabilirse, gelişmiş kamera ve sensörler ile robotun gerçek zamanlı arazi tanımlamasına yönelik çalışmalar yapılabilir.

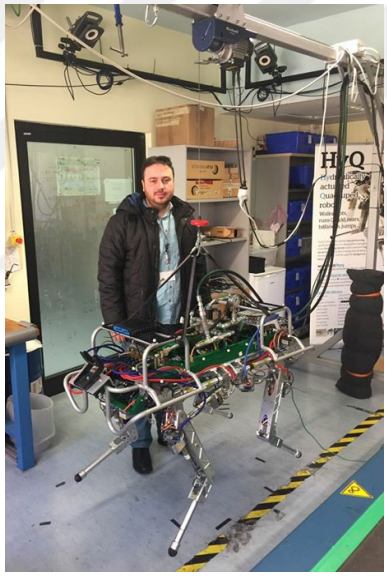
- Adım yörüngesinin en az hata ile sağlanmasına yönelik kontrolcü tasarımı, dengeli bir yürüyüş için önem arz etmektedir. Tez kapsamında, temel bir adım yörüngesinin sağlanmasına yönelik, güncel ve yaygın sezgisel algoritmalar ile kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Gelecek çalışmalarda, önerilen kontrolcüler farklı yaklaşımlar ile çeşitlendirilebilir ve/veya performansları iyileştirilebilir.

- Kontrolcü optimizasyonun yansıra, fiziksel boyutların optimizasyonuna yönelik çalışmalar yapılabilir. Özellikle, destek ve uçuş evreleri arası geçişte oluşabilen ve gövde dengesini bozabilecek nitelikteki, ayak ucuna gelen tepki kuvvetlerini en aza indirmeye yönelik optimum referans adım yörüngeleri tasarlanabilir.

- Tezde, statik yürüyüşün yanı sıra, tırıs, rahvan ve nadir incelenen eşkin tipi dinamik yürüyüşler analiz edilmiştir. Uygun yürüyüş planları, kontrol mimarisi ve zemin modelleri geliştirilerek dörtnala koşma ve sıçrama gibi yüksek dinamik hareketlere yönelik, tek başına bir araştırma konusu olabilecek çalışmalar yapılabilir.

- Diğer bir önemli konu ise, robotun verimliliği açısından önemli arz eden enerji tüketimidir. Tez kapsamında, sistemin tork girişlerine ait değişimler grafiksel olarak sunulmuştur. Bu veriler temelinde, tork gereksinimi azaltmaya yönelik, enerji verimliliğini konu alan çalışmalar yapılabilir.

Sonuç olarak, tez kapsamında, dört ayaklı robotlar hakkında geniş bir bilgi birikimi ve tecrübe elde edilmiştir. Tezdeki çalışmaların belirli kısımları makale olarak yayınlanmış veya ulusal/uluslararası konferanslarda bildiri olarak sunulmuş, kalan kısımların ise yayınlanmasına yönelik çalışmalar devam etmektedir. Tecrübelerinden istifade etmek amacıyla, *HyQ* robotunun geliştirildiği İtalyan Teknoloji Enstitüsü (ITT) ziyaret edilmiştir (Şekil 7.1). Tüm bu tecrübelerin ışığında, daha ileri düzey teorik çalışmaların sürdürülmesi ve deneysel olarak uygulanması hedeflenmektedir.



Şekil 7.1. İtalyan Teknoloji Enstitüsü (ITT) − HyQ robotu

Gelişmiş donanım ve yazılım teknolojilerine sahip, askeri ve sivil amaçlara yönelik kullanılabilecek, özgün yönleri artırılmış dört ayaklı bir robotun inşa sürecinde bir basamak olarak nitelendirilebilecek bu tez çalışmasının sunduğu; geniş literatür derlemesinin ve tasarım, kontrol, optimizasyon gibi konulardaki kapsamlı çalışmaların gelecekteki çalışmalara rehberlik edebileceği, farklı yöntemlerin ve stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlayabileceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

Abourachid, A, 2003, A new way of analysing symmetrical and asymmetrical gaits in quadrupeds, *J Comptes rendus biologies*, 326 (7), 625-630.

Aceituno-Cabezas, B, Dai, H., Mastalli, C, Focchi, M., Radulescu, A, Caldwell, D G., Cappelletto, J., Grieco, J. C, Fernández-López, G. ve Semini, C, 2018, Simultaneous contact, gait, and motion planning for robust multilegged locomotion via mixed-integer convex optimization, *IEEE Robotics and Automation Letters* 3(3), 2531 - 2538.

Adak, Ö. K., 2013, Quadruped locomotion reference synthesis wıth central pattern generators tuned by evolutionary algorithms, Ms. Thesis, *Sabanci University*.

Al-Mahturi, A ve Wahid, H., 2017, Optimal tuning of linear quadratic regulator controller using a particle swarm optimization for two-rotor aerodynamical system, *J Int. J. Electr. Comput. Energ. Electron. Commun. Eng.*, 11 (2), 184-190.

Albu-Schaffer, A ve Hirzinger, G., 2002, Cartesian impedance control techniques for torque controlled light-weight robots, *IEEE International Conference on Robotics and Automation* Washington, DC, USA, 657-663.

Alexander, R., 1990, Three uses for springs in legged locomotion, *J International Journal of Robotics Research*, 9 (2), 53-61.

Anon, 1967, Logistical vehicle off-road mobility project TCCO 62–5, *US Army Transportation Combat Developments Agency,Fort Eustis, VA*

Åström, K. J. ve Wittenmark, B, 2013, Adaptive control, Courier Corporation, p. 592.

Ayala, H. V. H. ve dos Santos Coelho, L., 2012, Tuning of PID controller based on a multiobjective genetic algorithm applied to a robotic manipulator, *J Expert Systems with Applications*, 39 (10), 8968-8974.

Bakırcıoğlu, V., Şen, M. A ve Kalyoncu, M., 2016a, Adaptive neural-network based fuzzy logic (ANFIS) based trajectory controller design for one leg of a quadruped robot, *5th International Conference on Mechatronics and Control Engineering*, Venice, Italy, 82-85.

Bakırcıoğlu, V., Şen, M. A ve Kalyoncu, M., 2016b, Optimization of PID controller based on the bees algorithm for one leg of a quadruped robot, *MATEC Web of Conferences*, Barcelona, Spain, 1-4.

Bakırcıoğlu, V., 2020, Dört ayaklı hidrolik tahrikli bir robotun modellenmesı ve uygulaması, Doktora Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi*, Konya

Bakırcıoğlu, V. ve Kalyoncu, M., 2020, Bacaklı robotların yürüme stratejileri üzerine bir literatür taraması, *J Politeknik Dergisi*.

Barasuol, V., Buchli, J., Semini, C, Frigerio, M., De Pieri, E. R. ve Caldwell, D G., 2013, A reactive controller framework for quadrupedal locomotion on challenging

terrain, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Karlsruhe,Germany, 2554-2561.

Barasuol, V., Villarreal-Magaña, O. A, Sangiah, D, Frigerio, M., Baker, M., Morgan, R., Medrano-Cerda, G. A, Caldwell, D G. ve Semini, C, 2018, Highly-integrated hydraulic smart actuators and smart manifolds for high-bandwidth force control, *J Frontiers in Robotics AI*, 5 (51), 1-15.

Bellicoso, C D, Gehring, C, Hwangbo, J., Fankhauser, P. ve Hutter, M., 2016, Perception-less terrain adaptation through whole body control and hierarchical optimization, *IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, Cancun, Mexico, 558-564.

Bennani, M. ve Giri, F., 1996, Dynamic modelling of a four-legged robot, *J Journal of Intelligent Robotic Systems*, 17 (4), 419-428.

Bhatti, Z., Waqas, A ve Mahesar, A W., 2017, Gait analysis and biomechanics of quadruped motion for procedural animation and robotic simulation, *Bahria University Journal of Information & Communication Technologies (BUJICT)*, 10 (2), 1-7.

Bibalan, P. T. ve Featherstone, R., 2009, A study of soft contact models in simulink, *Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA)*, Sydney, Australia, 2-4.

Bilgic, H. H., Sen, M. A ve Kalyoncu, M., 2016, Tuning of LQR controller for an experimental inverted pendulum system based on the bees algorithm, *J Journal of Vibroengineering*, 18 (6), 3684-3694.

Bloesch, M., 2017, State estimation for legged robots-kinematics, inertial sensing, and computer vision, *ETH Zurich*, Switzerland

Boaventura, T., Focchi, M., Frigerio, M., Buchli, J., Semini, C, Medrano-Cerda, G. A ve Caldwell, D G., 2012a, On the role of load motion compensation in high-performance force control, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Algarve, Portugal, 4066-4071.

Boaventura, T., Semini, C, Buchli, J., Frigerio, M., Focchi, M. ve Caldwell, D G., 2012b, Dynamic torque control of a hydraulic quadruped robot, *IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*, Algarve, Portugal, 1889-1894.

Boaventura, T., 2013, Hydraulic compliance control of the quadruped robot HyQ, PhD Thesis, *University of Genoa, Italy*.

Boaventura, T., Medrano-Cerda, G. A, Semini, C, Buchli, J. ve Caldwell, D G., 2013, Stability and performance of the compliance controller of the quadruped robot HyQ, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Tokyo, Japan, 1458-1464.

Boston Dynamics, C, 2020, Boston Dynamics Company, Waltham, Massachusetts, ABD, https://www.bostondynamics.com:

Brezina, T., Hadas, Z. ve Vetiska, J., 2011, Using of co-simulation ADAMS-SIMULINK for development of mechatronic systems, *14th International Conference Mechatronika*, Teplice, Slovakia, 59-64.

Buchli, J., Kalakrishnan, M., Mistry, M., Pastor, P. ve Schaal, S., 2009, Compliant quadruped locomotion over rough terrain, *IEEE/RSJ international conference on Intelligent robots and systems (IROS)*, Missouri, USA, 814-820.

Buchli, J., Farshidian, F., Winkler, A, Sandy, T. ve Giftthaler, M., 2017, Optimal and learning control for autonomous robots, *ETH (Swiss Federal Institute of Technology), Zurich*.

Buehler, M., Playter, R. ve Raibert, M., 2005, Robots step outside, *Int. Symp. Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM)*, IImenau, Germany, 1-4.

Buehler, M., Grimminger, F., Campbell, D ve Raibert, M., 2006, Biologically inspired robots at boston dynamics, *J bionic Industrie Congress*, Berlin, Germany.

Carpentier, J., Tonneau, S., Naveau, M., Stasse, O. ve Mansard, N., 2016, A versatile and efficient pattern generator for generalized legged locomotion, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Stockholm, Sweden., 3555-3561.

Channon, P. H., Hopkins, S. H. ve Pham, D T., 1996, Optimal control of an n-legged robot, *J Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems*, 210 (1), 51-63.

Chen, D, Gong, C, Xing, F., Zhou, C, Qi, M. ve Wang, L., 2019a, The effect of head movement on the bounding gait of a quadruped robot with an active spine, *J Advances in Mechanical Engineering*, 11 (9), 1687814019876184.

Chen, J., San, H. ve Wu, X., 2019b, Gait regulation of a bionic quadruped robot with antiparallelogram leg based on CPG oscillator, *J Complexity*, 2019, 1-11.

Chen, X., Watanabe, K., Kiguchi, K. ve Izumi, K., 2002, An ART-based fuzzy controller for the adaptive navigation of a quadruped robot, *J IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 7 (3), 318-328.

Chen, X., Gao, F., Qi, C, Tian, X. ve Wei, L., 2015, Kinematic analysis and motion planning of a quadruped robot with partially faulty actuators, *J Mechanism Machine Theory*, 94, 64-79.

Chen, X. Q., Chen, Y. Q. ve Chase, J. G., 2009, Mobiles robots-past present and future: Mobile robots-state of the art in land, sea, air, and collaborative missions, p.

Cho, J., Kim, J. T., Kim, J., Park, S. ve Kim, K., 2016, Simple walking strategies for hydraulically driven quadruped robot over uneven terrain, *Journal of Electrical Engineering Technology*, 11 (5), 1433-1440.

Coros, S., Karpathy, A, Jones, B, Reveret, L. ve Van De Panne, M., 2011, Locomotion skills for simulated quadrupeds, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, New York, United States, 59.

Cunha, T. B, Semini, C, Guglielmino, E., De Negri, V. J., Yang, Y. ve Caldwell, D G., 2009, Gain scheduling control for the hydraulic actuation of the HyQ robot leg, *Proc of COBEM*, Gramado, Brazil.

Das, K. R., Das, D ve Das, J., 2015, Optimal tuning of PID controller using GWO algorithm for speed control in DC motor, *International Conference on Soft Computing Techniques and Implementations (ICSCTI)*, Faridabad, India, 108-112.

Dat, T. T. K. ve Phuc, T. T., 2014, A Study on Locomotions of Quadruped Robot, In: AETA 2013: Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences, Eds: Springer, p. 595-604.

De Santos, P. G., Garcia, E. ve Estremera, J., 2007, Quadrupedal locomotion: an introduction to the control of four-legged robots, Springer Science & Business Media, p.

Denavit, J., 1955, A kinematic notation for low pair mechanisms based on matrices, *ASME J. Appl. Mech.*, 22, 215-221.

Donner, M. D, 2013, Real-time control of walking, *USA*, Springer Science & Business Media, p.

El-Zonkoly, A M., Khalil, A A ve Ahmied, N. M., 2009, Optimal tunning of lead-lag and fuzzy logic power system stabilizers using particle swarm optimization, *J Expert Systems with Applications*, 36 (2), 2097-2106.

Estremera, J. ve Waldron, K. J., 2008, Thrust control, stabilization and energetics of a quadruped running robot, *J The International Journal of Robotics Research*, 27 (10), 1135-1151.

Fahmi, S., Focchi, M., Radulescu, A, Fink, G., Barasuol, V. ve Semini, C, 2019a, STANCE: Locomotion adaptation over soft terrain, *IEEE Transactions on Robotics (T-RO)*, 1-15.

Fahmi, S., Mastalli, C, Focchi, M. ve Semini, C, 2019b, Passive whole-body control for quadruped robots: Experimental validation over challenging terrain, *J IEEE Robotics Automation Letters*, 4 (3), 2553-2560.

Fankhauser, P., Hutter, M., Gehring, C, Bloesch, M., Hoepflinger, M. A ve Siegwart, R., 2013, Reinforcement learning of single legged locomotion, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Tokyo, Japan, 188-193.

Fankhauser, P., 2018, Perceptive locomotion for legged robots in rough terrain, PhD Thesis, *University of Genoa*, Italy.

Fankhauser, P., Bjelonic, M., Bellicoso, C D, Miki, T. ve Hutter, M., 2018, Robust rough-terrain locomotion with a quadrupedal robot, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Brisbane, Australia, 1-8.

Fankhauser, P. ve Hutter, M., 2018, ANYmal: A unique quadruped robot conquering harsh environments, *J Research Features* (126), 54-57.

Focchi, M., Guglielmino, E., Semini, C, Boaventura, T., Yang, Y. ve Caldwell, D G., 2010, Control of a hydraulically-actuated quadruped robot leg, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2010)*, Anchorage, Alaska, 4182-4188.

Focchi, M., 2013, Strategies to improve the impedance control performance of a quadruped robot, PhD Thesis, *University of Genoa*, Italy.

Focchi, M., Barasuol, V., Havoutis, I., Buchli, J., Semini, C ve Caldwell, D G., 2013, Local reflex generation for obstacle negotiation in quadrupedal locomotion, In: Nature-Inspired Mobile Robotics, Eds: World Scientific, p. 443-450.

Focchi, M., Medrano-Cerda, G. A, Boaventura, T., Frigerio, M., Semini, C, Buchli, J. ve Caldwell, D G., 2016, Robot impedance control and passivity analysis with inner torque and velocity feedback loops, *J Control Theory and Technology*, 14 (2), 97-112.

Focchi, M., Del Prete, A, Havoutis, I., Featherstone, R., Caldwell, D G. ve Semini, C, 2017, High-slope terrain locomotion for torque-controlled quadruped robots, *J Autonomous Robots*, 41 (1), 259-272.

Focchi, M., Orsolino, R., Camurri, M., Barasuol, V., Mastalli, C, Caldwell, D G. ve Semini, C, 2020, Heuristic planning for rough terrain locomotion in presence of external disturbances and variable perception quality, In: Advances in Robotics Research: From Lab to Market, Eds: Springer, p. 165-209.

Frank, A A, 1968, Automatic control systems for legged locomotion machines, PhD Thesis, *Unıversıty Of Southern Calıfornıa* Los Angeles.

Frigerio, M., Barasuol, V., Focchi, M., Caldwell, D G. ve Semini, C, 2017, Validation of computer simulations of the HyQ robot, *20th International conference on climbing walking robots (CLAWAR 2017)*, Porto Polytechnic, Portugal.

Fukuda, T., Hasegawa, Y., Sekiyama, K. ve Aoyama, T., 2012, Multi-locomotion robotic systems: New concepts of bio-inspired robotics, 81, springer, p.

Gao, F., Qi, C, Sun, Q., Chen, X. ve Tian, X., 2014, A quadruped robot with parallel mechanism legs, *IEEE international conference on Robotics and automation (ICRA 2014)*, Hong Kong, China, 2566-2566.

Gehring, C, Coros, S., Hutter, M., Bloesch, M., Hoepflinger, M. A ve Siegwart, R., 2013, Control of dynamic gaits for a quadrupedal robot, *IEEE international conference on Robotics and automation (ICRA 2013)*, Karlsruhe, Germany, 3287-3292.

Gehring, C, Diethelm, R., Siegwart, R., Nützi, G. ve Leine, R., 2014, An evaluation of moreau's time-stepping scheme for the simulation of a legged robot, *International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (ASME 2014)*, New York, USA

Gehring, C, 2017, Planning and control for agile quadruped robots, PhD Thesis, *ETH Zurich*, Switzerland

Gehring, C, Bellicoso, C D, Fankhauser, P., Coros, S. ve Hutter, M., 2017, Quadrupedal locomotion using trajectory optimization and hierarchical whole body control, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2017)*, Marina Bay Sands, Singapore, 4788-4794.

Gilardi, G. ve Sharf, I., 2002, Literature survey of contact dynamics modelling, *J Mechanism Machine Theory*, 37 (10), 1213-1239.

Glocker, C, 2013, Simulation of hard contacts with friction: An iterative projection method, In: Recent Trends in Dynamical Systems, Eds: Springer,Basel, p. 493-515.

Gor, M. M., Pathak, P. M., Samantaray, A K., Yang, J.-M. ve Kwak, S. W., 2015a, Control oriented model-based simulation and experimental studies on a compliant legged quadruped robot, *J Robotics Autonomous Systems*, 72, 217-234.

Gor, M. M., Pathak, P. M., Samantaray, A K., Yang, J. M. ve Kwak, S. W., 2015b, Control of compliant legged quadruped robots in the workspace, *J Simulation*, 91 (2), 103-125.

Grandia, R., Farshidian, F., Dosovitskiy, A, Ranftl, R. ve Hutter, M., 2019, Frequency-aware model predictive control, *J IEEE Robotics Automation Letters*, 4 (2), 1517-1524.

Grebenstein, M., Albu-Schäffer, A, Bahls, T., Chalon, M., Eiberger, O., Friedl, W., Gruber, R., Haddadin, S., Hagn, U. ve Haslinger, R., 2011, The DLR hand arm system, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2011)*, Shanghai, China, 3175-3182.

Greenwood, D T., 2006, Advanced dynamics, *New York, USA*, Cambridge University Press, p. 425.

Grzelczyk, D ve Awrejcewicz, J., 2019, Modeling and control of an eight-legged walking robot driven by driven by different gait generators, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 19 (5), 76-89.

Gu, C ve Chen, X., 2016, A novel universal reducer integrating a planetary gear mechanism with an RCRCR spatial mechanism/Integracija planetnega gonila in prostorskega mehanizma RCRCR v novem univerzalnem reduktorju, *J Strojniski Vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 62 (12), 730-741.

Guan, X., Zheng, H. ve Zhang, X., 2004, Biologically inspired quadruped robot biosbot: modeling, simulation and experiment, *2nd International Conference on Autonomous Robots and Agents (ICARA 2004)*, Palmerston North, New Zealand, 261-266.

Han, S., Chen, Y., Ma, G., Zhang, J. ve Liu, R., 2018, Gait planning and simulation analysis of a new amphibious quadruped robots, *J Journal of Robotics Mechatronics*, 30 (2), 257-264.

Harris, S. E. ve De Ruffieu, F. L., 2016, Horse gaits, balance, and movement: Revised Edition, Howell Book House New York, p. 194.

Haynes, G. C ve Rizzi, A A, 2006, Gaits and gait transitions for legged robots, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2006)*, Orlando, FL, USA, 1117-1122.

He, D ve Ma, P., 2005, Effects of initial stance of quadruped trotting on walking stability, *J International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2 (1), 3-6.

Heijnen, H., 2014, Learning jumping maneuvers for a quadrupedal robot, MSc Thesis, *ETH Zurich*, Switzerland

Hoffmann, M. ve Simanek, J., 2017, The merits of passive compliant joints in legged locomotion: Fast learning, superior energy efficiency and versatile sensing in a quadruped robot, *J Journal of Bionic Engineering*, 14 (1), 1-14.

Hogan, N., 1985a, Impedance control: An approach to manipulation: Part II—Implementation, *ASME, Transactions, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 107 (1), 8-16.

Hogan, N., 1985b, Impedance control: An approach to manipulation: Part I—Theory, *ASME, Transactions, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 107 (1), 1-7.

Hua, N., Ronglei, S., Xiaofeng, H. ve Xi, H., 2012, Static gait control for quadruped robot, *International Conference on Intelligent Robotics and Applications (ICIRA 2012)*, Montreal, Quebec, 376-384.

Hubacher, S., 2014, Optimization of the low-level torque controller of the quadruped robot HyQ, MSc Thesis, *ETH-Zürich*, Switzerland

Hui-shu, M. ve Jian-Jun, F., 2018, Foot trajectory planning and optimization simulation of low foot-terrain impact by quadruped robot based on the trot gait, *J Journal of Electrical Electronic Engineering*, 6 (1), 26-30.

Hutter, M., Gehring, C, Bloesch, M., Hoepflinger, M. A, Remy, C D ve Siegwart, R., 2012a, StarlETH: A compliant quadrupedal robot for fast, efficient, and versatile locomotion, In: Adaptive Mobile Robotics, Eds: Azad, A K. M., *USA*: World Scientific, p. 483-490.

Hutter, M., Holenstein, C, Fenner, D, Remy, C D, Hoepflinger, M. A ve Siegwart, R., 2012b, Improved efficiency in legged running using lightweight passive compliant feet, In: Adaptive Mobile Robotics, Eds, *USA*: World Scientific, p. 491-498.

Hutter, M., 2013, StarlETH & Co-design and control of legged robots with compliant actuation, PhD Thesis, *ETH Zurich*, Switzerland

Hutter, M., Remy, C D, Hoepflinger, M. A ve Siegwart, R., 2013, Efficient and versatile locomotion with highly compliant legs, *J IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18 (2), 449-458.

Hutter, M., Sommer, H., Gehring, C, Hoepflinger, M., Bloesch, M. ve Siegwart, R., 2014, Quadrupedal locomotion using hierarchical operational space control, *J The International Journal of Robotics Research*, 33 (8), 1047-1062.

Hutter, M., Gehring, C, Jud, D, Lauber, A, Bellicoso, C D, Tsounis, V., Hwangbo, J., Bodie, K., Fankhauser, P. ve Bloesch, M., 2016, Anymal-a highly mobile and dynamic quadrupedal robot, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2016)*, Daejeon, South Korea, 38-44.

Hutter, M., Gehring, C, Lauber, A, Gunther, F., Bellicoso, C D, Tsounis, V., Fankhauser, P., Diethelm, R., Bachmann, S. ve Blösch, M., 2017, ANYmal-toward legged robots for harsh environments, *J Advanced Robotics*, 31 (17), 918-931.

Hyon, S., Abe, S. ve Emura, T., 2003a, Development of a biologically inspired biped robot KenkenII, *Japan-France Congress on Mechatronics & 4th Asia Europe Congress on Mechatronics*, Fukuoka, Japan, 404-409.

Hyon, S. H., Emura, T. ve Mita, T., 2003b, Dynamics-based control of a one-legged hopping robot, *J Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems Control Engineering*, 217 (2), 83-98.

Ijspeert, A J., 2008, Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review, *J Neural networks*, 21 (4), 642-653.

Jiménez, M. A ve Gonzalez de Santos, P., 1997, Terrain-adaptive gait for walking machines, *J The International Journal of Robotics Research*, 16 (3), 320-339.

Juang, C-F., Hung, C-W. ve Hsu, C-H., 2014, Rule-based cooperative continuous ant colony optimization to improve the accuracy of fuzzy system design, *J IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 22 (4), 723-735.

Kajita, S. ve Espiau, B, 2008, Legged robots, In: J Springer handbook of robotics, Eds: Springer, Berlin, Heidelberg, p. 361-389.

Kalakrishnan, M., Buchli, J., Pastor, P., Mistry, M. ve Schaal, S., 2011, Learning, planning, and control for quadruped locomotion over challenging terrain, *J The International Journal of Robotics Research*, 30 (2), 236-258.

Kanojiya, R. G. ve Meshram, P. M., 2012, Optimal tuning of PI controller for speed control of DC motor drive using particle swarm optimization, *International Conference on Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APCET 2012)*, Andhra Pradesh, India, 1-6.

Kazerooni, H., Houpt, P. ve Sheridan, T., 1986, Robust compliant motion for manipulators, Part II: Design method, *J IEEE Journal on Robotics Automation*, 2 (2), 93-105.

Keller, O.-H., 1960, EA Maxwell, General Homogeneous Coordinates in Space of Three Dimensions *J Zeitschrift Angewandte Mathematik und Mechanik*, 40 (7-8).

Kennedy, J. ve Eberhart, R., 1995, Particle swarm optimization (PSO), *Proc IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia*, Perth, Western Australia, 1942-1948.

Khan, H., 2015, MiniHyQ - development of a lighweight highly-dynamic hydraulic quadruped robot, PhD Thesis, *University of Genoa*, Italy.

Khan, H., Kitano, S., Frigerio, M., Camurri, M., Barasuol, V., Featherstone, R., Caldwell, D G. ve Semini, C, 2015, Development of the lightweight hydraulic quadruped robot—MiniHyQ, *IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA 2015)*, Boston, MA USA, 1-6.

Khatib, O., 1987, A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation, *J IEEE Journal on Robotics Automation*, 3 (1), 43-53.

Khorram, M. ve Moosavian, S. A A, 2017, Push recovery of a quadruped robot on challenging terrains, *J Robotica*, 35 (8), 1670-1689.

Kim, J. T., San Cho, J., Park, B-Y., Park, S. ve Lee, Y., 2013, Experimental investigation on the design of leg for a hydraulic actuated quadruped robot, *IEEE 44th International Symposium on Robotics (ISR 2013)*, Seoul, Korea, 1-5.

Kimura, H., Shimoyama, I. ve Miura, H., 1989, Dynamics in the dynamic walk of a quadruped robot, *J Advanced Robotics*, 4 (3), 283-301.

Kimura, H., Akiyama, S. ve Sakurama, K., 1999, Realization of dynamic walking and running of the quadruped using neural oscillator, *J Autonomous Robots*, 7 (3), 247-258.

Kimura, H., Fukuoka, Y. ve Cohen, A H., 2007, Biologically inspired adaptive walking of a quadruped robot, *J Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical Engineering Sciences*, 365 (1850), 153-170.

Kitano, S., Hirose, S., Horigome, A ve Endo, G., 2016, TITAN-XIII: Sprawling-type quadruped robot with ability of fast and energy-efficient walking, *J Robomech Journal*, 3 (8), 1-16.

Koivumäki, J., Mattila, J., Semini, C ve Caldwell, D G., 2017, Stability-guaranteed nonlinear model-based control of hydraulically actuated lightweight structures, *ASME/BATH Symp. on Fluid Power and Motion Control (FPMC 2017)*, Florida, USA

Kolter, J. Z., Rodgers, M. P. ve Ng, A Y., 2008, A control architecture for quadruped locomotion over rough terrain, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2008)*, Pasadena, CA, USA, 811-818.

Krishna, P. M., Kumar, R. P. ve Srivastava, S., 2013, Dynamic gaits and control in flexible body quadruped robot. 1st International Conference on Machines and Mechanisms (iNaCoMM2013). IIT Roorkee, India**:** 706-713.

Krishnan, V. L., Pathak, P. M., Sardana, L. ve Jain, S. C, 2010, Simulation and experimental studies on walking robot with flexible legs, *4th International Conference on Integrated Modeling and Analysis in Applied Control and Automation (IMAACA 2010)*, Fes, Morocco, 11-19.

Krupp, B T. ve Pratt, J. E., 2006, A power autonomous monopedal robot, *The International Society for Optical Engineering (SPIE 2006)*, Washington DC, USA, 1-12.

Kumar, G. ve Pathak, P. M., 2013, Dynamic modelling & simulation of a four legged jumping robot with compliant legs, *J Robotics Autonomous Systems*, 61 (3), 221-228.

Lal, D K., Barisal, A K. ve Tripathy, M., 2016, Grey wolf optimizer algorithm based fuzzy PID controller for AGC of multi-area power system with TCPS, *J Procedia Computer Science*, 92, 99-105.

Lee, D V., 2011, Effects of grade and mass distribution on the mechanics of trotting in dogs, *J Journal of Experimental Biology*, 214 (3), 402-411.

Lee, K., 2014, The mathematical model and computer simulation of a quadruped robot, *J Mechanical Engineering, Milwaukee School of Engineering*, 1025, 1-8.

Lei, J., Zhu, J., Xie, P. ve Tokhi, M. O., 2017, Joint variable stiffness of musculoskeletal leg mechanism for quadruped robot, *J Advances in Mechanical Engineering*, 9 (4), 1-11.

Li, J., Wang, J., Yang, S. X., Zhou, K. ve Tang, H., 2016, Gait planning and stability control of a quadruped robot, *J Computational Intelligence Neuroscience*, 2016, 1-13.

Li, X., Gao, H., Li, J., Wang, Y. ve Guo, Y., 2019, Hierarchically planning static gait for quadruped robot walking on rough terrain, *J Journal of Robotics*, 2019, 1-12.

Liston, R. A ve Mosher, R. S., 1968, A versatile walking truck. In Proceedings of the Transportation Engineering Conference. Institution of Civil Engineers,London, England

Liu, G. ve Yang, W., 2000, Learning and tuning of fuzzy membership functions by simulated annealing algorithm, *Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems. Electronic Communication Systems (APCCAS 2000)*, Tianjin, China, 367-370.

Liu, M., Xu, F., Jia, K., Yang, Q. ve Tang, C, 2016, A stable walking strategy of quadruped robot based on foot trajectory planning, *3rd International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE 2016)*, Beijing, China, 799-803.

Machado, J. A T. ve Silva, M. F., 2006, An overview of legged robots, *International symposium on mathematical methods in engineering (MME 2006)*, Ankara, Turkey.

Maes, L. ve Abourachid, A, 2013, Gait transitions and modular organization of mammal locomotion, *J Journal of Experimental Biology*, 216 (12), 2257-2265.

Makita, S., Murakami, N., Sakaguchi, M. ve Furusho, J., 1999, Development of horse-type quadruped robot, *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 1999)*, Tokyo, Japan,, 930-935.

Mastalli, C, 2017, Planning and Execution of Dynamic Whole-Body Locomotion on Challenging Terrain, PhD Thesis, *University of Genoa*, Italy.

Mastalli, C, Havoutis, I., Focchi, M., Caldwell, D ve Semini, C, 2020, Motion planning for quadrupedal locomotion: coupled planning, terrain mapping and whole-body control, *arXiv preprint arXiv:2003.05481*., 1-17.

McGeer, T., 1990, Passive dynamic walking, *The International Journal of Robotics Research*, 9 (2), 62-82.

McGhee, R. B, 1967, Finite state control of quadruped locomotion, *J Simulation*, 9 (3), 135-140.

Meng, J., Li, Y. ve Li, B, 2015, A dynamic balancing approach for a quadruped robot supported by diagonal legs, *J International Journal of Advanced Robotic Systems*, 12 (10), 1-11.

Michele, F., 2013, Strategies to improve the impedance control performance of a quadruped robot, PhD Thesis, *University of Genoa*, Italy.

Mikić, D, Desnica, E., Radivojević, N., Ašonja, A ve Milićević, V., 2017, Software modeling of multi-degree-of-freedom motion system using matrices, *J Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences Engineering*, 39 (9), 3621-3633.

Mirjalili, S., Mirjalili, S. M. ve Lewis, A, 2014, Grey wolf optimizer, *J Advances in engineering software*, 69, 46-61.

Mishra, A K., 2014, Design, simulation, fabrication and planning of bio-inspired quadruped robot, MSc Thesis, *Indian Institute of Technology Patna*, India

Mistry, M., Buchli, J. ve Schaal, S., 2010, Inverse dynamics control of floating base systems using orthogonal decomposition, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2010)*, Anchorage, Alaska,, 3406-3412.

Morimoto, J., Zeglin, G. ve Atkeson, C G., 2003, Minimax differential dynamic programming: Application to a biped walking robot, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)*, Las Vegas, NV, USA, 1927-1932.

Murphy, M. P., Saunders, A, Moreira, C, Rizzi, A A ve Raibert, M., 2011, The LittleDog robot, *International Journal of Robotics Research*, 30 (2), 145-149.

Muybridge, E., 1899, Animals in motion:, *London*, Chapman & Hall, p.

Muybridge, E., 1985, Horses and other animals in motion: 45 classic photographic sequences, *University of Pennsylvania*, Dover Publications, p.

Nath, K. ve Dewan, L., 2017, Optimization of LQR weighting matrices for a rotary inverted pendulum using intelligent optimization techniques, *Conference on Information and Communication Technology (CICT 2017)*, Gwalior, India, 1-6.

Neunert, M., Farshidian, F. ve Buchli, J., 2016, Efficient whole-body trajectory optimization using contact constraint relaxation, *16th International Conference on Humanoid Robots (IEEE-RAS 2016)*, Cancun, Mexico, 43-48.

Neunert, M., Stäuble, M., Giftthaler, M., Bellicoso, C D, Carius, J., Gehring, C, Hutter, M. ve Buchli, J., 2018, Whole-body nonlinear model predictive control through contacts for quadrupeds, *J IEEE Robotics Automation Letters*, 3 (3), 1458-1465.

Niquille, S. C, 2019, Regarding the pain of spotmini: Or what a robot's struggle to learn reveals about the built environment, *J Architectural Design*, 89 (1), 84-91.

Orsolino, R., 2019, Actuation-Aware Simplified Dynamic Models for Robotic Legged Locomotion, PhD Thesis, *University of Genoa*, Italy.

Owaki, D ve Ishiguro, A, 2017, A quadruped robot exhibiting spontaneous gait transitions from walking to trotting to galloping, *J Scientific reports*, 7 (277), 1-10.

Pan, X., Zhang, T., Ichter, B, Faust, A, Tan, J. ve Ha, S., 2020, Zero-shot imitation learning from demonstrations for legged robot visual navigation, *J arXiv preprint arXiv:.12971v2*, 1-7.

Panda, S. ve Padhy, N. P., 2008, Comparison of particle swarm optimization and genetic algorithm for FACTS-based controller design, *J Applied soft computing*, 8 (4), 1418-1427.

Park, H.-W., Chuah, M. Y. ve Kim, S., 2014, Quadruped bounding control with variable duty cycle via vertical impulse scaling, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, Illinois, USA, 3245-3252.

Park, H.-W. ve Kim, S., 2014, The mit cheetah, an electrically-powered quadrupedal robot for high-speed running, *Journal of the Robotics Society of Japan*, 32 (4), 323-328.

Park, H.-W. ve Kim, S., 2015, Quadrupedal galloping control for a wide range of speed via vertical impulse scaling, *J Bioinspiration Biomimetics*, 10 (2), 025003.

Park, J. ve Park, J. H., 2012, Impedance control of quadruped robot and its impedance characteristic modulation for trotting on irregular terrain, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2012)*, Algarve, Portugal, 175-180.

Pham, D ve Kalyoncu, M., 2009, Optimisation of a fuzzy logic controller for a flexible single-link robot arm using the Bees Algorithm, *7th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN 2009)*, Wales, United Kingdom, 475-480.

Pham, D T., Ghanbarzadeh, A, Koç, E., Otri, S., Rahim, S. ve Zaidi, M., 2006, The bees algorithm—A novel tool for complex optimisation problems, In: Intelligent Production Machines and Systems, Eds: Elsevier, p. 454-459.

Playter, R., Buehler, M. ve Raibert, M., 2006, Bigdog, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) 6230*, Florida, United States.

Podlubny, I., Dorcak, L. ve Kostial, I., 1997, On fractional derivatives, fractional-order dynamic systems and PIλDμ controllers, *Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control (CDC 1997)*, San Diego, CA, USA, 4985-4990.

Podlubny, I., Petráš, I., Vinagre, B M., O'leary, P. ve Dorčák, Ľ., 2002, Analogue realizations of fractional-order controllers, *J Nonlinear dynamics*, 29 (1-4), 281-296.

Potts, A S. ve Da Cruz, J. J., 2010, Kinematics analysis of a quadruped robot, *J IFAC Proceedings Volumes*, 43 (18), 261-266.

Poulakakis, I., Smith, J. A ve Buehler, M., 2005, Modeling and experiments of untethered quadrupedal running with a bounding gait: The Scout II robot, *J The International Journal of Robotics Research*, 24 (4), 239-256.

Pratt, G. A ve Williamson, M. M., 1995, Series elastic actuators, *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 1995)*, Pittsburgh, PA, USA, 399-406.

Pratt, G. A, 2002, Low impedance walking robots, *J Integrative Comparative Biology*, 42 (1), 174-181.

Pratt, J., Chew, C-M., Torres, A, Dilworth, P. ve Pratt, G., 2001, Virtual model control: An intuitive approach for bipedal locomotion, *J The International Journal of Robotics Research*, 20 (2), 129-143.

Raibert, M., 1986, Legged robots that balance, The MIT press, p. 223.

Raibert, M., Blankespoor, K., Nelson, G. ve Playter, R., 2008, BigDog, the rough-terrain quadruped robot, *IFAC Proceedings Volumes*, 41 (2), 10822-10825.

Rao, S. S., 2009, Engineering Optimization Theory and Practice USA, John Wiley & Sons.

Razmjooy, N., Ramezani, M. ve Namadchian, A, 2016, A new LQR optimal control for a single-link flexible joint robot manipulator based on grey wolf optimizer, *J Majlesi Journal of Electrical Engineering*, 10 (3), 53.

Rebula, J. R., Neuhaus, P. D, Bonnlander, B V., Johnson, M. J. ve Pratt, J. E., 2007, A controller for the littledog quadruped walking on rough terrain, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2007)*, Roma, Italy, 1467-1473.

Remy, C D, 2011, Optimal exploitation of natural dynamics in legged locomotion, PhD Thesis, *ETH Zurich*, Switzerland

Remy, C D, Baur, O., Latta, M., Lauber, A, Hutter, M., Hoepflinger, M. A, Pradalier, C ve Siegwart, R., 2011, Walking and crawling with ALoF- A robot for autonomous locomotion on four legs, *The International Journal Of Robotics Research And Application*, 47 (1), 501-508.

Righetti, L. ve Ijspeert, A J., 2008, Pattern generators with sensory feedback for the control of quadruped locomotion, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2008)*, California, USA, 819-824.

Righetti, L., Buchli, J., Mistry, M. ve Schaal, S., 2011, Inverse dynamics control of floating-base robots with external constraints: A unified view, *IEEE international conference on robotics and automation (ICRA 2011)*, Shanghai, China, 1085-1090.

Ritzmann, R. E., Quinn, R. D ve Fischer, M. S., 2004, Convergent evolution and locomotion through complex terrain by insects, vertebrates and robots, *J Arthropod Structure Development*, 33 (3), 361-379.

Rong, X., Li, Y., Ruan, J. ve Li, B, 2012a, Design and simulation for a hydraulic actuated quadruped robot, *J Journal of mechanical science technology*, 26 (4), 1171-1177.

Rong, X., Song, R. ve Li, B, 2012b, Simulation for sagittal plane motions of a quadruped robot using MATLAB and Simulink, *J Journal Of Information Computational Science*, 9 (8), 2165-2173.

Rong, X., Li, Y., Meng, J. ve Li, B, 2014, Design for several hydraulic parameters of a quadruped robot, *J Applied Mathematics Information Sciences*, 8 (5), 2465.

Rossell, J. M., Palacios-Quiñonero, F., Rubió-Massegú, J. ve Vicente-Rodrigo, J., 2015, Tracking control for a Stewart platform prototype, *International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation (ICAMIMIA 2015)*, Surabaya, Indonesia, 58-63.

Sakakibara, Y., Kan, K., Hosoda, Y., Hattori, M. ve Fujie, M., 1990, Foot trajectory for a quadruped walking machine, *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, Towards a New Frontier of Applications (IROS 1990)*, Ibaraki, Japan, 315-322.

Santos, P. G. D ve Jimenez, M. A, 1995, Generation of discontinuous gaits for quadruped walking vehicles, *Journal of Robotic Systems*, 12 (9), 599-611.

Schaal, S., 2009, The SL simulation and real-time control software package, *J University of Southern California*, p.

Semini, C, Tsagarakis, N. G., Vanderborght, B, Yang, Y. ve Caldwell, D G., 2008, HyQ-Hydraulically actuated quadruped robot: Hopping leg prototype, *2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob 2008)*, Scottsdale, AZ, USA, 593-599.

Semini, C, 2010, HyQ-design and development of a hydraulically actuated quadruped robot, *University of Genoa*, Italy.

Semini, C, Tsagarakis, N. G., Guglielmino, E., Focchi, M., Cannella, F. ve Caldwell, D G., 2011, Design of HyQ–A hydraulically and electrically actuated quadruped robot, *J Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems Control Engineering*, 225 (6), 831-849.

Semini, C, Barasuol, V., Boaventura, T., Frigerio, M., Focchi, M., Caldwell, D G. ve Buchli, J., 2015a, Towards versatile legged robots through active impedance control, *J The International Journal of Robotics Research*, 34 (7), 1003-1020.

Semini, C, Goldsmith, J., Manfredi, D, Calignano, F., Ambrosio, E. P., Pakkanen, J. ve Caldwell, D G., 2015b, Additive manufacturing for agile legged robots with hydraulic actuation, *17th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2015)*, Istanbul, Turkey, 123-129.

Semini, C, Goldsmith, J., Rehman, B U., Frigerio, M., Barasuol, V., Focchi, M. ve Caldwell, D G., 2015c, Design overview of the hydraulic quadruped robots HyQ2MAX and HyQ2CENTAUR, *15th Scandinavian International Conference on Fluid Power*, Tampere, Finland, 20-22.

Semini, C, Barasuol, V., Goldsmith, J., Frigerio, M., Focchi, M., Gao, Y. ve Caldwell, D G., 2017, Design of the hydraulically actuated, torque-controlled quadruped robot HyQ2max, *J IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22 (2), 635-646.

Semini, C, Barasuol V., Focchi, M., Boelens, C, Emara, M., Casella , S., Villarreal, O., Orsolino, R., Fink, G., Fahmi, S., Medrano-Cerda, G., Caldwell, D G., Sangiah, D, Lesniewski, J., Fulton, K., Donadon, M. ve Baker, M., 2019, Brief Introduction to the Quadruped Robot HyQReal, *Istituto di Robotica e Macchine Intelligenti 3D*

Sen, M. A ve Kalyoncu, M., 2015, Optimisation of a PID controller for an inverted pendulum using the bees algorithm, *Applied Mechanics and Materials*, 789, 1039-1044.

Sen, M. A, Bakırcıoğlu, V. ve Kalyoncu, M., 2016, Performances comparison of the bees algorithm and genetic algorithm for pid controller tuning, *5th International Conference on Mechatronics and Control Engineering (ICMCE 2016)*, Venice, Italy, , 126-130.

Sen, M. A ve Kalyoncu, M., 2016, Optimal tuning of a LQR controller for an inverted pendulum using the bees algorithm, *J Journal of Automation Control Engineering Vol*, 4 (5).

Sen, M. A, Bakircioglu, V. ve Kalyoncu, M., 2017a, Inverse kinematic analysis of a quadruped robot, *J International journal of scientific technology research*, 6 (09), 2277-8616.

Sen, M. A, Bakırcıoğlu, V. ve Kalyoncu, M., 2017b, Design and simulation impedance controller for trajectory control with obstacle of quadruped robot's leg.

International Advanced Researches & Engineering (IAREC 2017). Osmaniye, Turkey**:** 558-568.

Sen, M. A ve Kalyoncu, M., 2018, Optimal tuning of PID controller using grey wolf optimizer algorithm for quadruped robot, *J Balkan Journal of Electrical Computer Engineering*, 6 (1), 29-35.

Sen, M. A, Tinkir, M. ve Kalyoncu, M., 2018, Optimisation of a PID controller for a two-floor structure under earthquake excitation based on the bees algorithm, *J Journal of Low Frequency Noise, Vibration Active Control*, 37 (1), 107-127.

Sen, M. A, Bakırcıoğlu, V. ve Kalyoncu, M., 2019, Three degree of freedom leg desıgn for quadruped robots and fractıonal order PID (PIλDμ) based control, *Konya Journal of Engineering Sciences*.

Sen, M. A ve Kalyoncu, M., 2019, Grey wolf optimizer based tuning of a hybrid LQR-PID controller for foot trajectory control of a quadruped robot, *J Gazi University Journal of Science*, 32 (2), 674-684.

Seok, S., Wang, A, Chuah, M. Y., Otten, D, Lang, J. ve Kim, S., 2013, Design principles for highly efficient quadrupeds and implementation on the MIT Cheetah robot, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2013)*, Karlsruhe, Germany, 3307-3312.

Shah, S. V., Saha, S. K. ve Dutt, J. K., 2012, Modular framework for dynamic modeling and analyses of legged robots, *J Mechanism Machine Theory*, 49, 234-255.

Shimojima, K., Fukuda, T. ve Hasegawa, Y., 1995, Self-tuning fuzzy modeling with adaptive membership function, rules, and hierarchical structure based on genetic algorithm, *J Fuzzy sets systems*, 71 (3), 295-309.

Siciliano, B ve Khatib, O., 2016, Springer handbook of robotics, *USA*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p.

Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., Scaramuzza, D ve Arkin, R. C, 2011, Introduction to autonomous mobile robots, *Cambridge, English* MIT press, p. 472.

Silva, M. F. ve Tenreiro Machado, J. A, 2007, A historical perspective of legged robots, *J Journal of Vibration Control*, 13 (9-10), 1447-1486.

Soharu, G., Singh, R. ve Bera, T., 2019, Bond graph modelling and simulation of planar quadruple robot with different gaits, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44 (9), 7385-7397.

Song, P., 1998, Robotic manipulator control, fundamentals of task space design, PhD Thesis, *University of Toronto*

Song, S.-M. ve Chen, Y.-D, 1991, A free gait algorithm for quadrupedal walking machines, *J Journal of terramechanics*, 28 (1), 33-48.

Sutyasadi, P. ve Parnichkun, M., 2016, Gait tracking control of quadruped robot using differential evolution based structure specified mixed sensitivity robust control, *Journal of Control Science and Engineering*, 2016, 1-18.

Taga, G., 1995, A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion, *J Biological cybernetics*, 73 (2), 97-111.

Tsagarakis, N. G., Sardellitti, I. ve Caldwell, D G., 2011, A new variable stiffness actuator (CompAct-VSA): design and modelling, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2011)*, San Francisco, CA, USA, 378-383.

Tymoshchuk, P. V. ve Paterega, Y. I., 2009, Implementation of artificial neural oscillators, *5th International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design*, Polyana, Ukraine, 149-154.

Ubellacker, W. L., 2016, Real-time quadruped gait controller for rough terrain locomotion, MSc Thesis, *Massachusetts Institute of Technology*, Massachusetts, USA

Ugurlu, B, Havoutis, I., Semini, C ve Caldwell, D G., 2013, Dynamic trot-walking with the hydraulic quadruped robot—HyQ: Analytical trajectory generation and active compliance control, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2013)*, Tokyo, Japan 6044-6051.

Ur Rehman, B, Focchi, M., Frigerio, M., Goldsmith, J., Caldwell, D G. ve Semini, C, 2016, Design of a hydraulically actuated arm for a quadruped robot, *18th International Conference on CLAWAR 2015*, Zhejiang Province, China, 283-290.

Velásquez-Lobo, M. F., Ramirez-Cortés, J. M., de Jesus Rangel-Magdaleno, J. ve Vázquez-González, J. L., 2013, Modeling a biped robot on matlab/simmechanics, *23rd International Conference on Electronics, Communications and Computing (CONIELECOMP 2013)*, Puebla, Mexico, 203-206.

Verma, S. K., Yadav, S. ve Nagar, S. K., 2017, Optimization of fractional order PID controller using grey wolf optimizer, *J Journal of Control, Automation Electrical Systems*, 28 (3), 314-322.

Villarreal, O., Barasuol, V., Wensing, P. ve Semini, C, 2020, MPC-based Controller with Terrain Insight for Dynamic Legged Locomotion, *J arXiv preprint arXiv:.13842v2*, 1-8.

Vukobratović, M. ve Borovac, B, 2004, Zero-moment point—thirty five years of its life, *J International journal of humanoid robotics*, 1 (01), 157-173.

Wagner, L., Fankhauser, P., Bloesch, M. ve Hutter, M., 2017, Foot contact estimation for legged robots in rough terrain, In: Advances in Cooperative Robotics, Eds: World Scientific, p. 395-403.

Wang, Y., Wei, Q. ve Ma, T., 2019, Crawling gait planning and simulation analysis of closed-chain walking leg robot, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Kazimierz Dolny, Poland, 012072.

Wang, Z., Sun, C, Deng, G. ve Zhang, A, 2017, Locomotion planning for quadruped robot over rough terrain, *Chinese Automation Congress (CAC 2017)*, Jinan, China, 3170-3173.

Whitley, D, 1994, A genetic algorithm tutorial, *J Statistics computing*, 4 (2), 65-85.

Whitney, D E., 1985, Historical perspective and state of the art in robot force control. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 1985). Missouri, USA 2**:** 262-268.

Winkler, A, Havoutis, I., Bazeille, S., Ortiz, J., Focchi, M., Dillmann, R., Caldwell, D ve Semini, C, 2014, Path planning with force-based foothold adaptation and virtual model control for torque controlled quadruped robots, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014)*, Hong Kong, China, 6476-6482.

Winkler, A W., Mastalli, C, Havoutis, I., Focchi, M., Caldwell, D G. ve Semini, C, 2015, Planning and execution of dynamic whole-body locomotion for a hydraulic quadruped on challenging terrain, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2015)*, Seattle, WA, USA, 5148-5154.

Winter, D A, 1995, Human balance and posture control during standing and walking, *J Gait posture*, 3 (4), 193-214.

Wisama, K. ve Etienne, D, 2002, Modeling identification and control of robots, *United States*, Butterworth-Heinemann p. 473.

Witte, H., Hackert, R., Lilje, K. E., Schilling, N., Voges, D, Klauer, G., Ilg, W., Albiez, J., Seyfarth, A ve Germann, D, 2001, Transfer of biological principles into the construction of quadruped walking machines, *2nd International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo 2001)*, Bukowy Dworek, Poland, 245-249.

Xu, P., Song, R., Mao, S., Rong, X. ve Li, Y., 2016, Quadruped robot mechanism design and motion simulation based on SolidWorks and Adams, *Proceedings of the 18th International Conference on CLAWAR 2015*, Zhejiang Province, China, 454-460.

Yamazaki, K. S., 1999, The design and control of Scout I, a simple quadruped robot, PhD Thesis, *McGill University*, Canada, UK.

Yang, Y., Semini, C, Tsagarakis, N. G., Guglielmino, E. ve Caldwell, D G., 2009, Leg mechanisms for hydraulically actuated robots, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2009)*, St. Louis, MO, USA, 4669-4675.

Yildirim, Ş., 2008, Design of a proposed neural network control system for trajectory controlling of walking robots, *J Simulation Modelling Practice Theory*, 16 (3), 368-378.

Yu, C, Zhou, L., Qian, H. ve Xu, Y., 2018, Posture correction of quadruped robot for adaptive slope walking, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2018)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 1220-1225.

Zeng, X., Zhang, S., Zhang, H., Li, X., Zhou, H. ve Fu, Y., 2019, Leg trajectory planning for quadruped robots with high-speed trot gait, *J Applied Sciences*, 9 (7), 1508.

Zeng, Y., Li, J., Yang, S. ve Ren, E., 2018, A bio-inspired control strategy for locomotion of a quadruped robot, *J Applied Sciences*, 8 (56), 1-18.

Zhang, B, Shao, C, Li, Y., Tan, H. ve Jiang, D, 2019a, Dynamic simulation analysis of humanoid robot walking system based on ADAMS, *J Journal of Shanghai Jiaotong University*, 24 (1), 58-63.

Zhang, B, Shao, C, Li, Y., Tan, H. ve Jiang, D J. J. o. S. J. U., 2019b, Dynamic Simulation Analysis of Humanoid Robot Walking System Based on ADAMS, 24 (1), 58-63.

Zhang, J., Wang, C ve Zhang, J., 2014, The kinematics analysis and configuration optimize of quadruped robot, *J Open Automation Control Systems Journal*, 6, 1685-1690.

Zhang, Z. G., Kimura, H. ve Takase, K., 2006, Adaptive running of a quadruped robot using forced vibration and synchronization, *J Journal of Vibration Control*, 12 (12), 1361-1383.

Zhou, K., Doyle, J. C ve Glover, K., 1996, Robust and optimal control, *United States*, Prentice hall New Jersey, p.

Ziegler, J. G. ve Nichols, N. B, 1942, Optimum settings for automatic controllers, *J. Dyn. Sys. Meas. Control*, 64 (11), 220-222.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Muhammed Arif ŞEN
Uyruğu : T.C
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya-1987
Telefon : 0 505 492 5021
E-Posta : m.arif.sen@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı	İlçe	İl	Bitirme Yılı
Lise	Muhittin Güzel Kılınç Lisesi	Meram	Konya	2005
Lisans	Selçuk Üniversitesi, Müh.-Mim. Fakt. Makina Mühendisliği Bölümü	Selçuklu	Konya	2010
Yüksek Lisans	Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enst., Makina Teorisi ve Dinamiği ABD	Selçuklu	Konya	2014
Doktora	Konya Teknik Ünv., Lisansüstü Eğitim Enst. Makina Teorisi ve Dinamiği ABD	Selçuklu	Konya	2020

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2012- 2013	Niğde Ömer Halis Demir Ü., Mühendislik Fak. Mekatronik Mühendisliği Bölümü	Arş. Gör.
2013- 2019	Selçuk Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Bölümü	Arş. Gör.
2019-	Konya Teknik Ü. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makina Mühendisliği Bölümü	Arş. Gör.

UZMANLIK ALANI

Kontrol Teorisi, Kontrolcü Tasarımı ve Optimizasyonu, Sistem Dinamiği, Modelleme ve Simülasyon, Dört Ayaklı Robotlar, İki Tekerlekli Mobil Robotlar, Mekanik Titreşimler.

YABANCI DİLLER

İngilizce, 2017-YDS (63,75) / 2017-YÖKDİL (76,25)

BELİRTMEK İSTEDİĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

İleri Düzey MATLAB/Simulink/Simspace, MSC ADAMS Co-Simulation programlama, AutoCAD ve SolidWorks tasarım, Visual Basic ve Arduino programla bilgileri

YAYINLAR

A SCI, SCI-Expanded, ESCI Index'te Taranan Dergilerde Yayınlanan Makaleler:

A1. Bilgic H.H., **Sen M.A**, Kalyoncu M.*, "Tuning of LQR controller for an experimental inverted pendulum system based on The Bees Algorithm"*, Journal of Vibroengineering, Vol. 18, Issue 6, pp. 3684-3694, 2016. (SCI-Expanded)

A2. Sen, M. A, Tınkır, M., Kalyoncu, M., *"Optimisation of a PID controller for a two-floor structure under earthquake excitation based on the bees algorithm"*, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, Vol. 37, Issue 1, pp. 107-127, 2018. (SCI-Expanded)

A3. Sen M.A and Kalyoncu M. *"Grey Wolf Optimizer Based Tuning of a Hybrid LQR-PID Controller for Foot Trajectory Control of a Quadruped Robot"*, Gazı Unıversıty Journal Of Scıence, Vol. 32, Issue 2, pp. 674-684, 2019.(ESCI, Scopus, TR Dizin)

B Diğer Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler:

B1. Sen, M.A and Kalyoncu, M., *"Optimisation of a PID Controller for an Inverted Pendulum Using the Bees Algorithm",* Applied Mechanics and Material, Section: Manufacturing Science and Technology VI, Chapter 7: Theory and Practice of Control, Vol. 789-790, pp. 1039-1044, 2015. (Inspec, EBSCO)

B2- Sen, M.A and Kalyoncu, M., *"Optimal Tuning of a LQR Controller for an Inverted Pendulum Using The Bees Algorithm"*, Jounal of Automation and Control Engineering, Vol. 4, No. 5, pp. 384-387, October, 2016. (Inspec, IET)

B3- Bakırcıoğlu, V., **Sen, M.A** and Kalyoncu, M., *"Optimization of PID Controller Based on The Bees Algorithm for One Leg of a Quadruped Robot"*, MATEC Web of Conferences, Vol. 42, No. 03004, pp. 1-4, February, 2016. (Scopus)

B4- Sen, M.A, Bakırcıoğlu, V. and Kalyoncu, M., "Inverse Kinematic Analysis Of A Quadruped Robot", International Journal of Scientific & Technology Research, Vol. 6., Issue 09, pp. 285-289, September, 2017. (EBSCO)

B5- Sen, M.A and Kalyoncu, M.*, "Optimal Tuning of PID Controller Using Grey Wolf Optimizer Algorithm for Quadruped Robot"*, Balkan Journal of Electrical & Computer Engineering, Vol. 6., No. 01, pp. 29-35, February, 2018. (TR Dizin, Index Copernicus)

C Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında (*Proceedings*) Basılan Bildiriler:

C1. Sen, M.A, Kalyoncu, M., *"Optimisation of a PID Controller for an Inverted Pendulum Using the Bees Algorithm"*, Paper ID: N0009, International Conference on Mechatronics and Automation Science (ICMAS 2015), Paris, France, April 13-14, 2015.

C2. Sen, M.A and Kalyoncu, M., *"Optimal Tuning of a LQR Controller for an Inverted Pendulum Using The Bees Algorithm",* The 3rd International conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA 2015), Barcelona, Spain, December 21-22, 2015.

C3. Bakırcıoğlu, V., **Sen, M.A**, Kalyoncu, M., *"Optimization of PID Controller Based on The Bees Algorithm for One Leg of a Quadruped Robot"*, The 3rd International conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA 2015), Barcelona, Spain, December 21-22, 2015.

C4. Sen, M.A, Bakırcıoğlu, V., Kalyoncu, M., *"Performances Comparison of The Bees Algorithm and Genetic Algorithm for PID Controller Tuning"*, 5th International Mechatronics and Control Engineering (ICMCE 2016), Venice, Italy, December 14-17, In: Proceedings of the 5th International Conference on Mechatronics and Control Engineering. ACM, pp. 126-130, 2016.

C5. Bakırcıoğlu, V., **Sen, M.A**, Kalyoncu, M., *"Adaptive Neural-Network Based Fuzzy Logic (ANFIS) Based Trajectory Controller Design for One Leg of a Quadruped Robot"*, 5th International Mechatronics and Control Engineering (ICMCE 2016), Venice, Italy, December 14-17, 2016. In: Proceedings of the 5th International Conference on Mechatronics and Control Engineering. ACM, pp. 82-85, 2016.

C6. Sen, M.A, Bakırcıoğlu, V., Kalyoncu, M., *"Design and Simulation Impedance Controller for Trajectory Control with Obstacle of Quadruped Robot's Leg"*, International Advanced Researches & Engineering (IAREC 2017), Osmaniye, Turkey, pp. 558-568, November 16-18, 2017.

C7. Sen, M.A, Bakırcıoğlu, V., Kalyoncu, M., *"Modelling And Pid Control Of Scara Robot"*, International Conference on Engineering Technologies (ICENTE 2017), Konya, Turkey, pp. 658-661, December 07-09, 2017.

C8. Bakırcıoğlu, V., **Sen, M.A,** Kalyoncu, M., *"Obtaining Dynamic Characteristics of Electrohydraulic Servo-systems: Case-Study of Parker D1FP Proportional Valve"*, International Conference on Engineering Technologies (ICENTE 2017), Konya, Turkey, pp. 662-667, December 07-09, 2017.

C9. Sen, M.A, Bakırcıoğlu, V., Kalyoncu, M., *"Automatıc LQR Controller Tunıng Based On Grey Wolf Optımızer Algorıthm for a Quadruped Robot"*, International Vocational Science Symposium (IVSS 2018), Antalya, Turkey, pp. 419, April 26-29, 2018. *(Abstract)*

C10. Bakırcıoğlu, V., **Sen, M.A,** Kalyoncu, M., *"Motıon Analysıs Of The Robotıc Leg Mass Centre Durıng Reference Trajectory Trackıng"* 2018 International Vocational Science Symposium (IVSS 2018), Antalya, Turkey, pp. 420, April 26-29, 2018. *(Abstract)*

C11. Bakırcıoğlu, V., **Sen, M.A,** Kalyoncu, M., *"Fuzzy Logıc Controller Desıgn Based On PID Controller for a Quadruped Robot"* 2018 International Vocational Science Symposium (IVSS 2018), Antalya, Turkey, pp. 421, April 26-29, 2018. (Abstract)

C12. Gumus, M.S., **Sen, M.A,** Kalyoncu, M., *"Vıbratıon Fatıgue Analyses Of A Cantılever Beam In Transportatıon Based On Mılıtary Standard"*, International Conference on Engineering Technologies (ICENTE 2019), Konya, Turkey, pp. 382-384, October 25-27, 2019.

D Ulusal Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler:

D1. Şen, M.A, Bilgiç, H.H., Kalyoncu, M., *"Çift Ters Sarkaç Sisteminin Denge ve Konum Kontrolü için Arı Algoritması ile LQR Kontrolcü Parametrelerinin Tayini"* Mühendis ve Makina, Cilt 57, Sayı 679, s. 53-62, 2016. (EBSCO, Copernicus, TR Dizin)

D2. Şen, M.A, Bakırcıoğlu, V., Kalyoncu, M., *"Three Degree Of Freedom Leg Desıgn For Quadruped Robots and Fractıonal Order PID (PIλDμ) Based Control"* Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, cilt 8, sayı 2, s. 237-247, 2019. (TR Dizin)

E. Ulusal Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitaplarında Basılan Bildiriler:

E1. Şen, M. A, Kalyoncu, M., Tınkır, M., *"İki Tekerlekli Kendini Dengeleyebilen Bir Araç İçin Yapay Sinir Ağı ve Bulanık Mantık Tabanlı Kontrolcü Tasarımı"*, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK 2014), Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı Bildiriler Kitabı, Kocaeli, s. 682-687, 11-13 Eylül, 2014.

E2. Bilgiç, H.H., **Şen, M. A**, Yapıcı, A, Kalyoncu, M., *"Doğrusal Ters Sarkacın Denge Kontrolü İçin Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Mantık & LQR Kontrolcü Tasarımı"*, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK 2014) (Poster), Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı Bildiriler Kitabı, Kocaeli, s. 921-926, 11-13 Eylül, 2014.

E3. Şen, M.A, Kalyoncu, M., *"İki Tekerlekli Kendi Kendini Dengeleyen Robotun Yörünge Takibi için Arı Algoritması kullanarak LQR Kontrolcü Tasarımı"*, Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu (UMTS 2015), Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İYTE, İzmir, s. 666-672, 2015.

E4. Bakırcıoğlu, V., **Şen M.A,** Kalyoncu, M.*, "Dört Ayaklı Robotun Bir Bacağı için PID Kontrolcü Tasarımı ve Arı Algoritması Kullanarak Optimizasyonu"*, Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu (UMTS 2015), Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İYTE, İzmir, s. 661-665, 2015.

E5. Bilgiç, H.H., Conker, Ç., Yavuz, H., **Şen M.A,** *"Sarkaç Tipi Bir Tepe Vincinin Kontrolüne Bulanık Yaklaşım"*, Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu (UMTS 2015), Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İYTE, İzmir, s. 455-461, 2015.

E6. Şen M.A, Bakırcıoğlu, V., Kalyoncu, M., *"Üç Serbestlik Dereceli Robot Bacağı Tasarımı, Doğrusallaştırılması ve PıλDμ Tabanlı Kontrolü"*, 19. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu (UMTS 2019), 19. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İSTE, İskenderun, s. 66-71, 04-06 Eylül 2019.

E7. Bakırcıoğlu, V., **Şen M.A,** Kalyoncu, M., *"Yörünge Takibi İçin Kendinden Kazanç Ayarlamalı Bir Pıd Kontrolcü Tasarımı ve Uygulaması"*, 19. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu (UMTS 2019), 19. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İSTE, İskenderun, s. 38-45, 04-06 Eylül 2019.

E8. Yöngül, A, **Şen M.A,** Kalyoncu, M *"Dört Ayaklı Robotun Bir Bacağı İçin Hibrit Empedans Kontrolcü Tasarımı"*, 19. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu (UMTS 2019), 19. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İSTE, İskenderun, s. 308-314, 04-06 Eylül 2019.