

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZIPLAYARAK YÜRÜYEN ÇOK BACAĞLI ROBOTLARIN
DİNAMİK MODELİ VE YAPAY ZEKA
ALGORİTMALARI İLE DENETİMİ**

Servet SOYGÜDER

Tez Yöneticisi:
Doç.Dr. Hasan ALLİ

Doktora Tezi
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

ELAZIĞ 2009

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZIPLAYARAK YÜRÜYEN ÇOK BACAĞLI ROBOTLARIN
DİNAMİK MODELİ VE YAPAY ZEKA
ALGORİTMALARI İLE DENETİMİ**

Servet SOYGÜDER

Doktora Tezi
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu tez, 14.07.2009 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Hasan ALLİ

Üye: Prof. Dr. Erhan AKIN

Üye: Doç. Dr. Şahin YILDIRIM

Üye: Yrd. Doç. Dr. Orhan ÇAKAR

Üye: Yrd. Doç. Dr. Cihan ÖZEL

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu tez, kendisiyle birlikte çalışmayı bir onur olarak gördüğüm, kendi dalında zamanımızın en iyi bilim adamlarından olan, hiçbir şekilde zaman kısıtlaması gözetmeksizin bilim adına her türlü maddi ve manevi desteğini bizlere esirgemeyen ve mütevazılığın en doruğunda olan değerli hocam Sayın Doç. Dr. Hasan ALLİ' nin yönetiminde hazırlanmıştır. Bana bu olanakları sağladığı için ve çalışmam boyunca esirgemediği ilgi ve desteği için kendisine müteşekkirim. Aynı zamanda bu tezde bana yardımcı danışmanlık yapan Bilkent Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Sayın Yrd. Doç. Dr. Uluç SARANLI hocama teşekkürlerimi iletirim. Çalışmalarına jüri olarak katkılarından dolayı değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Erhan AKIN, Doç. Dr. Şahin YILDIRIM, Yrd. Doç. Dr. Orhan ÇAKAR ve Yrd. Doç. Dr. Cihan ÖZEN' e teşekkürlerimi iletirim. Bu tezin ANFIS modelleme kısmında bana yardımlarını esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet KARAKÖSE' ye ayrıca teşekkürlerimi iletirim. Aynı zamanda bu tez çalışmamda bana her türlü desteği veren ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Dr. Oğuz YAKUT' a teşekkürlerimi iletirim.

Çalışmalarım boyunca manevi desteklerini esirgemeyen eşim Pınar SOYGÜDER' e ve değerli aileme de sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Özellikle maddi ve manevi destek ve dualarını hiçbir zaman eksik etmeyen değerli annem ve babama müteşekkirim.

Servet SOYGÜDER

Haziran 2009

TEŞEKKÜR

İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER LİSTESİ

ÇİZELGELER (TABLOLAR) LİSTESİ

ÖZET

ABSTRACT

	Sayfa No
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Motivasyonu	1
1.2. Bacaklı Robotlar İle İlgili Araştırmalar	3
1.3. Aktif Denge İle İlgili Araştırmalar	8
1.4. Zıplayarak Koşan Robotlara Giriş	13
1.5. Robotlarda Üç boyutlu Hareket	18
1.6. Birden Fazla Ayak İle Koşma	19
1.7. Robotlarda ve Hayvanlarda Simetri	21
1.8. Literatüre Bakış	23
1.9. Teze Genel Bakış	26
2. TEMEL KAVRAMLAR	31
2.1. SLIP Model	31
2.1.1. Motivasyon	31
2.2. SLIP Model İle İlgili Çalışmalar	32
2.3. SLIP Model Tasarımı	33
2.3.1. SLIP Model için Gerekli Esaslar	33
2.3.2. Mekanik Parametre Tasarımı	34
2.3.3. Noktasal Kütle	34
2.3.4. Bacak Rijitlik Katsayısı	34
2.3.5. Bacak Boyu	37
2.3.6. Denetim Tasarımı	38
2.3.7. Durum Modeli	38
2.3.7.1. Evreler ve Olaylar	38
2.3.7.2. Durumlar	39
2.3.7.3. Dinamik Döngü	40
2.3.7.4. Evre Seçimi	41
2.3.7.5. Bacak Denetimi	42
2.3.7.6. Yere Dokunma ve Yerden Ayrılma Açıları	42
2.3.7.7. Süpürme Açısı	44
2.3.7.8. Enerji Dağılımı	45
2.3.7.9. İlerleme Hızı	47
2.3.7.10. Tepe Yüksekliği	49
2.3.7.11. Enerji Korunumu	49
2.4. Denetime Genel Bakış	49

	Sayfa No
2.4.1. Tepkili Denetim	51
2.4.2. Açık Denetimi	51
2.4.3. Yer-Duruş Torku	51
2.4.4. Uygun Bacak Rijitliği	51
3. BASİT DÜZLEMSEL KÜTLE-YAY TERS SARKAÇ MODEL DİNAMİĞİ	52
3.1. Motivasyon	52
3.2. Ters Sarkaç Bacak Modeli	53
3.3. SLIP Model ve Kabuller	56
3.4. Dengeli Yürüyüş için Parametreler	61
3.5. SLIP Denetim Parametreleri	62
3.6. Evre Geçişleri	62
3.6.1. Başlangıç Fonksiyonları	62
4. TEK BACAĞI ROBOTUN İKİ BOYUTLU DÜZLEMDE DİNAMİK MODELİ VE SAYISAL BENZETİMİ	65
4.1. Tek Bacaklı Zıplayarak Yürüme	65
4.2. Tek Bacaklı Robot İçin Dinamik Model	66
4.3. Metotlar	73
4.3.1. Sayısal Benzetim Oluşturulması	73
4.3.2. Analiz Seçimi	73
4.3.3. Faz Çizimleri	73
4.3.4. Geçiş Çizimleri	74
5. TEK BACAĞI İLE ZIPLAYARAK YÜRÜMEDE SAYISAL BENZETİM	76
5.1. Giriş	76
5.2. Düzlemsel Ortamda Hareket	76
5.3. Faz Eğrileri	78
5.4. Geçiş Eğrileri	81
5.5. Sisteme Dışardan Enerji Verilmesi	82
5.6. Sistemden Enerji Alınması	86
5.7. Sonuç	88
6. QUADRUPEDAL ROBOTUN DİNAMİK MODELİ	89
6.1. Giriş	89
6.2. Düzlemsel Quadrupedal Sistem Modeli	92
6.2.1. Giriş	92
6.2.2. Yer İle Bacakların Etkileşim Modeli	93
6.2.3. Bacaklara ait kutupsal koordinatlar ve Kuvvetler	95
6.2.3.1. Kinematik Denklemler	95
6.2.3.2. Sistemin Hareket Denklemleri	100
6.3. Dinamik Kapalı Döngü Modeli	102
6.3.1. Fazlar ve Olaylar	103
6.3.2. Durumlar	104
6.3.3. Durum Modeli	104
6.3.4. Faz Seçimi	105
6.4. Faz Geçişleri	106
6.5. Motivasyon	107

	Sayfa No
6.5.1. Yer-Duruş Fazı	107
6.5.2. Uçuş Fazı	108
7. QUADRUPEDAL ROBOT ZIPLAMA MODELİNİN PD İLE DENETİMİ VE SAYISAL BENZETİMİ	110
7.1. Zıplayarak Yürüme Denetimi	112
7.1.1. Yere Dokunma Açısının Denetimi	114
7.1.1.1. Uçuş Durumu	114
7.1.2. Süpürme Açısının Denetimi	116
7.1.2.1. Yer-Duruş Frenleme Durumu	116
7.2. Quadrupedal Robotun PD İle Denetimi	116
7.2.1. PD Denetim Algoritması	116
7.3. Quadrupedal Robotun PD Denetim İle Sayısal Benzetimi	119
7.3.1. Sayısal Benzetim ve Elde Edilen Grafikler	119
7.3.2. Sonuç	201
8. HEXAPOD ROBOTUN DİNAMİK MODELİ	203
8.1. Giriş	203
8.2. Düzlemsel Hexapod Sistem Modeli	205
8.2.1. Giriş	205
8.2.2. Yer İle Bacakların Etkileşim Modeli	206
8.2.3. Bacaklara ait kutupsal koordinatlar ve Kuvvetler	208
8.2.3.1. Kinematik Denklemler	208
8.2.3.2. Sistemin Hareket Denklemleri	214
8.3. Kapalı Dinamik Döngü Modeli	216
9. HEXAPOD ROBOT ZIPLAMA MODELİNİN PD İLE DENETİMİ VE SAYISAL BENZETİMİ	217
9.1. Zıplayarak Yürüme Denetimi	219
9.1.1. Yere Dokunma Açısının Denetimi	222
9.1.1.1. Uçuş Durumu	222
9.1.2. Süpürme Açısının Denetimi	223
9.1.2.1. Yer-Duruş Frenleme Durumu	223
9.2. Hexapod Robotun PD İle Denetimi	223
9.2.1. PD Denetim Algoritması	223
9.3. Hexapod Robotun PD İle Sayısal Benzetimi	227
9.3.1. Sayısal Benzetim ve Elde Edilen Grafikler	227
9.3.2. Sonuç	307
10. BULANIK MANTIK DENETİM ALGORİTMASI	310
10.1. Giriş	310
10.2. Bulanık Mantık Kavramı	310
10.2.1. Keskin Kümeler	315
10.2.2. Bulanık Kümeler	315
10.2.3. Üyelik Fonksiyonları	316
10.2.4. Bulanık Mantık Denetimi	316
10.2.4.1. Giriş Birimi Veya Bulandırıcı	317
10.2.4.2. Kural Tabanı	319
10.2.4.3. Çıkarım Mekanizması	321

	Sayfa No
10.2.4.4. Çıkış Birimi Veya Durultucu	324
10.2.5. Sugeno Tipi Bulanık Denetleyiciler	325
11. QUADRUPEDAL ROBOT ZIPLAMA MODELİNİN BULANIK MANTIK İLE DENETİMİ VE SAYISAL BENZETİMİ	328
11.1. Sistemin Morfolojisi ve Genel Kavramı	328
11.2. Bulanık Mantık Denetim Algoritma Tasarımı	328
11.3. Quadripedal Robotun Bulanık Mantık Denetim İle Sayısal Benzetimi	334
11.3.1. Sayısal Benzetim ve Elde Edilen Grafikler	334
11.3.2. Sonuç	344
12. HEXAPOD ROBOT ZIPLAMA MODELİNİN BULANIK MANTIK İLE DENETİMİ VE SAYISAL BENZETİMİ	347
12.1. Sistemin Morfolojisi ve Genel Kavramı	347
12.2. Bulanık Mantık Denetim Algoritma Tasarımı	347
12.3. Hexapod Robotun Bulanık Mantık Denetim İle Sayısal Benzetimi	354
12.3.1. Sayısal Benzetim ve Elde Edilen Grafikler	354
12.3.2. Sonuç	365
13. AĞ TABANLI BULANIK DENETİM ALGORİTMASI	367
13.1. Giriş	367
13.2. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyici Tasarımı	367
14. QUADRUPEDAL ROBOT ZIPLAMA MODELİNİN AĞ TABANLI BULANIK MANTIK DENETİM ALGORİTMASI İLE DENETİMİ VE SAYISAL BENZETİMİ	376
14.1. Sistemin Morfolojisi ve Genel Kavramı	376
14.2. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim Algoritma Tasarımı	376
14.3. Quadripedal Robotun Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim İle Sayısal Benzetimi	382
14.3.1. Sayısal Benzetim ve Elde Edilen Grafikler	382
14.3.2. Sonuç	393
15. HEXAPOD ROBOT ZIPLAMA MODELİNİN AĞ TABANLI BULANIK MANTIK DENETİM ALGORİTMASI İLE DENETİMİ VE SAYISAL BENZETİMİ	395
15.1. Sistemin Morfolojisi ve Genel Kavramı	395
15.2. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim Algoritma Tasarımı	395
15.3. Hexapod Robotun Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim İle Sayısal Benzetimi	401
15.3.1. Sayısal Benzetim ve Elde Edilen Grafikler	401
15.3.2. Sonuç	412
16. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	415
KAYNAKLAR	432

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 1.1	Bacaklı sistemlerin merdiven tırmanışı 2
Şekil 1.2	İlk yürüyen makinenin hareket mekanizması 4
Şekil 1.3	Lewis A. Rygg tarafından patenti 1983 yılında alınan mekanik at 5
Şekil 1.4	General Electric’te inşa edilen dört bacaklı adlı robot 6
Şekil 1.5	Ters Sarkaç Modeli 9
Şekil 1.6	Dinamik olarak dengelenmiş ilk mekanizma 11
Şekil 1.7	Raibert tarafından yapılan tek bacaklı zıplayan monopod robot 18
Şekil 1.8	Tek bacaklı robotun ayak yörüngesi 19
Şekil 1.9	Dört bacaklı robot için Sanal(Virtual) bacaklar 20
Şekil 1.10	Altı bacaklı robot için Sanal(Virtual) bacaklar 21
Şekil 1.11	Hayvanlarda Simetri 22
Şekil 2.1	Yay Kütle Ters Sarkaç(SLIP) Modeli 32
Şekil 2.2	Sistemin doğal frekansını tespit eğrileri 35
Şekil 2.3	Sistemin evreleri ve olayları arasındaki geçişler 39
Şekil 2.4	Bacaklı robot zıplarken oluşan beş durumlu dinamik döngü 41
Şekil 2.5	Yer-Duruş fazındaki SLIP Model 43
Şekil 2.6	Kalça motor torklarının oluşturduğu iki durum 45
Şekil 2.6.a	Bacağın yerden ayrılma açısını daha geniş tutarak robotun daha ileri zıplamasını sağlamak 45
Şekil 2.6.b	Bacağın yerden ayrılma açısını daha dar tutarak robotun daha yükseğe zıplamasını sağlamak. 45
Şekil 2.7	Evreler için denetim algoritmasına ait akış diyagramı 50
Şekil 3.1	Yürüyüşte Ters-Sarkaç bacak modeli 53
Şekil 3.2	Tek bir bacağın yer ile teması esnasındaki basit sarkaç modeli 54
Şekil 3.3	Kütle-Yay Ters Sarkaç (Spring-Loaded Inverted Pendulum (SLIP)) bacak modeli 55
Şekil 3.4	Kütle-Yay Ters Sarkaç Modelin Serbest Cisim Diyagramı(SCD) 55
Şekil 3.5	Düşey Zıplamada Oluşan Evreler ve Olaylar Simulasyonu 58
Şekil 3.6	Düşey Zıplamada oluşan Olaylar Simulasyonu 58
Şekil 3.7	Düşey Zıplamada oluşan Olay Simulasyonu (compression). 59
Şekil 3.8	Düşey Zıplamada oluşan Olay Simulasyonu (decompression). 59
Şekil 3.9	Düşey Zıplamada oluşan Olay Simulasyonu (ascent). 60
Şekil 3.10	Düşey Zıplamada oluşan Olay Simulasyonu (descent) 60
Şekil 3.11	Faz geçişleri sırasında oluşan olaylar 62
Şekil 4.1	Yer –Duruş Evresinde Tek Bacaklı Sisteme Ait Kütle-Yay Ters Sarkaç (Spring-Loaded Inverted Pendulum (SLIP)) bacak modeli 65
Şekil 4.2	Uçuş Evresinde Tek Bacaklı Sisteme Ait Kütle-Yay Ters Sarkaç (Spring-Loaded Inverted Pendulum (SLIP)) bacak modeli 70
Şekil 4.3	Robotun yer(stance) ve hava(flight) evresinde takip ettiği yörüngeler 74
Şekil 4.4	Geçiş Grafiği 75
Şekil 5.1	Düzlemsel ortamda zıplayarak yürüme 76
Şekil 5.2	Robotun kütle merkezinin düzlemsel ortamdaki konumu (Öteleme hız: 1.5 m/s, düşey konum: 0.5m, düşey hız: 0 m/s). 77
Şekil 5.3	Robotun kütle merkezinin düzlemsel ortamdaki konumu (Öteleme hız: 0.2 m/s, düşey konum: 1.2m, düşey hız: 0 m/s). 78
Şekil 5.4	Kütle merkezinin düşey konumu için faz eğrisi 79
Şekil 5.5	Kütle merkezinin düşey konumu için faz eğrisi 79
Şekil 5.6	Faz eğrisinin üç boyutlu ortamda çizimi 80
Şekil 5.7	Faz eğrisinin üç boyutlu ortamda çizimi 81
Şekil 5.8	Geçiş Grafiği 82

	Sayfa No
Şekil 5.9	Robot bacağına ait olaylar ve evreler
Şekil 5.10	Zıplayarak yürüme($k_c = 900$ N/m, $k_d = 1000$ N/m)
Şekil 5.11	Faz Eğrisi($k_c = 900$ N/m, $k_d = 1000$ N/m)
Şekil 5.12	Üç boyutlu faz eğrisi($k_c = 900$ N/m, $k_d = 1000$ N/m)
Şekil 5.13	Üç boyutlu faz eğrisi($k_c = 900$ N/m, $k_d = 1000$ N/m)
Şekil 5.14	Zıplayarak yürüme($k_c = 1000$ N/m, $k_d = 900$ N/m)
Şekil 5.15	Faz Eğrisi($k_c = 1000$ N/m, $k_d = 900$ N/m)
Şekil 5.16	Üç boyutlu faz eğrisi($k_c = 1000$ N/m, $k_d = 900$ N/m)
Şekil 5.17	Üç boyutlu faz eğrisi($k_c = 1000$ N/m, $k_d = 900$ N/m)
Şekil 6.1	Yürüme için Kütle-Yay Ters Sarkaç Modeli(SLIP)
Şekil 6.2	Düzlemsel quadrupedal model.
Şekil 6.3	Sistemin fazları ve olayları arasındaki geçişler
Şekil 6.4	Bacaklı robot zıplarken oluşan beş durumlu dinamik döngü
Şekil 7.1	Zıplayarak yürüme için sanal bacaklar
Şekil 7.2	Sanal bacaklara ait yer-duruş ve uçuş durumları
Şekil 7.3	Zıplayarak yürüme için sanal bacaklar ve düzlem içinde robot için iki-boyutlu zıplama modeli.
Şekil 7.4	Robotun Zıplayarak Yürüme Denetim Durumları
Şekil 7.5	Zıplayarak Yürüme Evreleri Sırasındaki Denetim
Şekil 7.6	Tasarlanan Denetim Algoritmasına Ait Blok Diyagram
Şekil 7.7	Dizayn edilen sistem için PD Denetim Akış Diyagramı
Şekil 7.8	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 7.8.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi,
Şekil 7.8.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
Şekil 7.8.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
Şekil 7.8.d	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.
Şekil 7.9	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 7.9.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
Şekil 7.9.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
Şekil 7.9.c	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m).
Şekil 7.9.d	Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m).
Şekil 7.10	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 7.10.a	Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).

	Sayfa No
	125
Şekil 7.10.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
Şekil 7.10.c	Robotun ön sanal bacağına göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$).
Şekil 7.10.d	Robotun arka sanal bacağına göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).
Şekil 7.11	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 7.11.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).
Şekil 7.11.b	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{\text{ön}}$ (J).
Şekil 7.11.c	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).
Şekil 7.11.d	Hatanın zaman ile değişimi (e).
Şekil 7.12	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 7.12.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
Şekil 7.12.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
Şekil 7.12.c	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{\text{ön}}$ (Nm).
Şekil 7.12.d	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).
Şekil 7.13	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 7.13.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
Şekil 7.13.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen a salınım açısı($^{\circ}$).
Şekil 7.13.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
Şekil 7.13.d	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.
Şekil 7.14	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 7.14.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
Şekil 7.14.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).

		Sayfa No
Şekil 7.14.c	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m).	130
Şekil 7.14.d	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m).	130
Şekil 7.15	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	131
Şekil 7.15.a	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).	131
Şekil 7.15.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).	131
Şekil 7.15.c	Robotun ön sanal bacağına gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$).	131
Şekil 7.15.d	Robotun arka sanal bacağına gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).	131
Şekil 7.16	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	132
Şekil 7.16.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).	132
Şekil 7.16.b	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{\text{ön}}$ (J).	132
Şekil 7.16.c	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).	132
Şekil 7.16.d	Hatanın zaman ile değişimi (e).	132
Şekil 7.17	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	133
Şekil 7.17.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).	133
Şekil 7.17.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).	133
Şekil 7.17.c	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{\text{ön}}$ (Nm)	133
Şekil 7.17.d	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).	133
Şekil 7.18	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	135
Şekil 7.18.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.	135
Şekil 7.18.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).	135
Şekil 7.18.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).	135

		Sayfa No
Şekil 7.18.d	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.	135
Şekil 7.19	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	136
Şekil 7.19.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .	136
Şekil 7.19.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).	136
Şekil 7.19.c	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m).	136
Şekil 7.19.d	Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m).	136
Şekil 7.20	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	137
Şekil 7.20.a	Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).	137
Şekil 7.20.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f (°).	137
Şekil 7.20.c	Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ (°).	137
Şekil 7.20.d	Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} (°).	137
Şekil 7.21	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	138
Şekil 7.21.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).	138
Şekil 7.21.b	Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{\text{ön}}$ (J).	138
Şekil 7.21.c	Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).	138
Şekil 7.21.d	Hatanın zaman ile değişimi (e).	138
Şekil 7.22	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	139
Şekil 7.22.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).	139
Şekil 7.22.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).	139
Şekil 7.22.c	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{\text{ön}}$ (Nm).	139

	Sayfa No
Şekil 7.22.d	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm). 139
Şekil 7.23	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki; 141
Şekil 7.23.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi. 141
Şekil 7.23.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α (alfa) salınım açısı($^{\circ}$). 141
Şekil 7.23.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m). 141
Şekil 7.23.d	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur. 141
Şekil 7.24	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki; 142
Şekil 7.24.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) . 142
Şekil 7.24.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn). 142
Şekil 7.24.c	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m). 142
Şekil 7.24.d	Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m). 142
Şekil 7.25	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki; 143
Şekil 7.25.a	Robotun arka bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m). 143
Şekil 7.25.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$). 143
Şekil 7.25.c	Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$). 143
Şekil 7.25.d	Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$). 143
Şekil 7.26	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki; 144
Şekil 7.26.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J). 144
Şekil 7.26.b	Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J). 144
Şekil 7.26.c	Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J). 144
Şekil 7.26.d	Hatanın zaman ile değişimi (e) . 144
Şekil 7.27	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki; 145

		Sayfa No
Şekil 7.27.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).	145
Şekil 7.27.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).	145
Şekil 7.27.c	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).	145
Şekil 7.27.d	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).	145
Şekil 7.28	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	147
Şekil 7.28.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.	147
Şekil 7.28.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen a salınım açısı($^{\circ}$).	147
Şekil 7.28.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).	147
Şekil 7.28.d	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.	147
Şekil 7.29	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	148
Şekil 7.29.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .	148
Şekil 7.29.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).	148
Şekil 7.29.c	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).	148
Şekil 7.29.d	Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).	148
Şekil 7.30	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	149
Şekil 7.30.a	Robotun arka bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).	149
Şekil 7.30.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).	149
Şekil 7.30.c	Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$).	149
Şekil 7.30.d	Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).	149
Şekil 7.31	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	150
Şekil 7.31.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).	150

		Sayfa No
Şekil 7.31.b	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{\text{ön}}$ (J).	150
Şekil 7.31.c	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).	150
Şekil 7.31.d	Hatanın zaman ile değişimi (e).	150
Şekil 7.32	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	151
Şekil 7.32.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).	151
Şekil 7.32.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).	151
Şekil 7.32.c	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{\text{ön}}$ (Nm).	151
Şekil 7.32.d	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).	151
Şekil 7.33	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	153
Şekil 7.33.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.	153
Şekil 7.33.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).	153
Şekil 7.33.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).	153
Şekil 7.33.d	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.	153
Şekil 7.34	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	154
Şekil 7.34.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .	154
Şekil 7.34.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).	154
Şekil 7.34.c	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m).	154
Şekil 7.34.d	Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m).	154
Şekil 7.35	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	155
Şekil 7.35.a	Robotun arka bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).	155
Şekil 7.35.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).	155

	Sayfa No
Şekil 7.35.c	Robotun ön sanal bacağıının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısıl konumu $f_{ön}$ (°).
Şekil 7.35.d	Robotun arka sanal bacağıının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısıl konumu f_{arka} (°).
Şekil 7.36	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 7.36.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).
Şekil 7.36.b	Robotun ön sanal bacağıında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).
Şekil 7.36.c	Robotun arka sanal bacağıında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).
Şekil 7.36.d	Hatanın zaman ile değişimi (e).
Şekil 7.37	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 7.37.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
Şekil 7.37.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
Şekil 7.37.c	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
Şekil 7.37.d	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).
Şekil 7.38	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 7.38.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
Şekil 7.38.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α (alfa) salınım açısı(°).
Şekil 7.38.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
Şekil 7.38.d	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.
Şekil 7.39	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 7.39.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
Şekil 7.39.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
Şekil 7.39.c	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).

	Sayfa No
Şekil 7.39.d	160
Robotun ön sanal bacağıının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m).	
Şekil 7.40	161
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 7.40.a	161
Robotun arka sanal bacağıının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).	
Şekil 7.40.b	161
Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısıl konumları f ($^{\circ}$).	
Şekil 7.40.c	161
Robotun sanal ön bacağıının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısıl konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$).	
Şekil 7.40.d	161
Robotun arka sanal bacağıının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısıl konumu f_{arka} ($^{\circ}$).	
Şekil 7.41	162
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 7.41.a	162
Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).	
Şekil 7.41.b	162
Robotun ön sanal bacağıında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{\text{ön}}$ (J).	
Şekil 7.41.c	162
Robotun arka sanal bacağıında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).	
Şekil 7.41.d	162
Kontrolörün zamana bağlı olarak hata grafiği (e).	
Şekil 7.42	163
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 7.42.a	163
Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).	
Şekil 7.42.b	163
Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).	
Şekil 7.42.c	163
Robotun ön sanal bacağıına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{\text{ön}}$ (Nm).	
Şekil 7.42.d	163
Robotun ön sanal bacağıına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).	
Şekil 7.43	165
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 7.43.a	165
Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.	
Şekil 7.43.b	165
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α (alfa) salınım açısı($^{\circ}$).	
Şekil 7.43.c	165
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).	
Şekil 7.43.d	165
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.	

		Sayfa No
Şekil 7.44	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	166
Şekil 7.44.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .	166
Şekil 7.44.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).	166
Şekil 7.44.c	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).	166
Şekil 7.44.d	Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).	166
Şekil 7.45	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	167
Şekil 7.45.a	Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).	167
Şekil 7.45.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen	167
	açısıl konumları f (°).	
Şekil 7.45.c	Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısıl konumu $f_{ön}$ (°).	167
Şekil 7.45.d	Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısıl konumu f_{arka} (°).	167
Şekil 7.46	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	168
Şekil 7.46.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).	168
Şekil 7.46.b	Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).	168
Şekil 7.46.c	Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).	168
Şekil 7.46.d	Kontrolörün zamana bağlı olarak hata grafiği (e).	168
Şekil 7.47	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	169
Şekil 7.47.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).	169
Şekil 7.47.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).	169
Şekil 7.47.c	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).	169
Şekil 7.47.d	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).	169
Şekil 7.48	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	171
Şekil 7.48.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.	171

	Sayfa No
Şekil 7.48.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$). 171
Şekil 7.48.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m). 171
Şekil 7.48.d	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur. 171
Şekil 7.49	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki; 172
Şekil 7.49.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) . 172
Şekil 7.49.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn). 172
Şekil 7.49.c	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m). 172
Şekil 7.49.d	Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m). 172
Şekil 7.50	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki; 173
Şekil 7.50.a	Robotun arka bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m). 173
Şekil 7.50.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$). 173
Şekil 7.50.c	Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$). 173
Şekil 7.50.d	Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$). 173
Şekil 7.51	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki; 174
Şekil 7.51.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J). 174
Şekil 7.51.b	Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{\text{ön}}$ (J). 174
Şekil 7.51.c	Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J). 174
Şekil 7.51.d	Hatanın zamana ile değişimi (e). 174
Şekil 7.52	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki; 175
Şekil 7.52.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m). 175
Şekil 7.52.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm). 175
Şekil 7.52.c	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{\text{ön}}$ (Nm). 175

	Sayfa No
Şekil 7.52.d	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm). 175
Şekil 7.53	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki; 177
Şekil 7.53.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi. 177
Şekil 7.53.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen a salınım açısı($^{\circ}$). 177
Şekil 7.53.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m). 177
Şekil 7.53.d	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur. 177
Şekil 7.54	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki; 178
Şekil 7.54.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) . 178
Şekil 7.54.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn). 178
Şekil 7.54.c	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m). 178
Şekil 7.54.d	Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m). 178
Şekil 7.55	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki; 179
Şekil 7.55.a	Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m). 179
Şekil 7.55.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$). 179
Şekil 7.55.c	Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$). 179
Şekil 7.55.d	Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$). 179
Şekil 7.56	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki; 180
Şekil 7.56.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J). 180
Şekil 7.56.b	Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J). 180
Şekil 7.56.c	Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J). 180
Şekil 7.56.d	Kontrolörün zamana bağlı olarak hata grafiği (e). 180
Şekil 7.57	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki; 181

		Sayfa No
Şekil 7.57.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).	181
Şekil 7.57.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).	181
Şekil 7.57.c	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).	181
Şekil 7.57.d	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).	181
Şekil 7.58	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	183
Şekil 7.58.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.	183
Şekil 7.58.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).	183
Şekil 7.58.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).	183
Şekil 7.58.d	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.	183
Şekil 7.59	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	184
Şekil 7.59.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .	184
Şekil 7.59.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).	184
Şekil 7.59.c	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).	184
Şekil 7.59.d	Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).	184
Şekil 7.60	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	185
Şekil 7.60.a	Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).	185
Şekil 7.60.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).	185
Şekil 7.60.c	Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$).	185
Şekil 7.60.d	Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).	185
Şekil 7.61	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	186
Şekil 7.61.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).	186

	Sayfa No
Şekil 7.61.b	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{\text{ön}}$ (J).
Şekil 7.61.c	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).
Şekil 7.61.d	Kontrolörün zamana bağlı olarak hata grafiği (e).
Şekil 7.62	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 7.62.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
Şekil 7.62.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
Şekil 7.62.c	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{\text{ön}}$ (Nm).
Şekil 7.62.d	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).
Şekil 7.63	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 7.63.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
Şekil 7.63.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
Şekil 7.63.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
Şekil 7.63.d	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.
Şekil 7.64	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 7.64.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
Şekil 7.64.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
Şekil 7.64.c	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m).
Şekil 7.64.d	Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m).
Şekil 7.65	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 7.65.a	Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
Şekil 7.65.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
Şekil 7.65.c	Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$).

	Sayfa No
Şekil 7.65.d	Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısıl konumu f_{arka} (°).
Şekil 7.66	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 7.66.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).
Şekil 7.66.b	Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J)
Şekil 7.66.c	Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).
Şekil 7.66.d	Kontrolörün zamana bağlı olarak hata grafiği (e).
Şekil 7.67	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 7.67.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
Şekil 7.67.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
Şekil 7.67.c	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
Şekil 7.67.d	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).
Şekil 7.68	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 7.68.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
Şekil 7.68.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı(°).
Şekil 7.68.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
Şekil 7.68.d	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.
Şekil 7.69	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 7.69.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
Şekil 7.69.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
Şekil 7.69.c	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
Şekil 7.69.d	Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).

		Sayfa No
Şekil 7.70	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	197
Şekil 7.70.a	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).	197
Şekil 7.70.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f (°).	197
Şekil 7.70.c	Robotun ön sanal bacağına gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ (°).	197
Şekil 7.70.d	Robotun arka sanal bacağına gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} (°).	197
Şekil 7.71	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	198
Şekil 7.71.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).	198
Şekil 7.71.b	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).	198
Şekil 7.71.c	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).	198
Şekil 7.71.d	Kontrolörün zamana bağlı olarak hata grafiği (e).	198
Şekil 7.72	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	199
Şekil 7.72.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).	199
Şekil 7.72.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).	199
Şekil 7.72.c	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).	199
Şekil 7.72.d	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).	199
Şekil 8.1	Düzlemsel hexapod model.	205
Şekil 9.1	Zıplayarak yürüme için sanal bacaklar	217
Şekil 9.2	Zıplayarak yürüme için sanal bacaklar ve düzlem içinde robot için iki-boyutlu zıplama modeli.	218
Şekil 9.3	Sanal bacaklara ait yer-duruş ve uçuş durumları	219
Şekil 9.4	Robotun Zıplayarak Yürüme Denetim Durumları	221
Şekil 9.5	Zıplayarak Yürüme Evreleri Sırasındaki Denetim	222
Şekil 9.6	Tasarlanan Denetim Algoritmasına Ait Blok Diyagramı	225
Şekil 9.7	Dizayn edilen sistem için PD Denetim Akış Diyagramı	226
Şekil 9.8	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	230
Şekil 9.8.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.	230
Şekil 9.8.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı(°).	230
Şekil 9.8.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).	230

		Sayfa No
Şekil 9.8.d	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.	230
Şekil 9.9	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	231
Şekil 9.9.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .	231
Şekil 9.9.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).	231
Şekil 9.9.c	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m).	231
Şekil 9.9.d	Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m).	231
Şekil 9.10	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	232
Şekil 9.10.a	Robotun orta sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).	232
Şekil 9.10.b	Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).	232
Şekil 9.10.c	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f (°).	232
Şekil 9.10.d	Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ (°).	232
Şekil 9.11	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	233
Şekil 9.11.a	Robotun orta sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{orta} (°).	233
Şekil 9.11.b	Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} (°).	233
Şekil 9.11.c	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).	233
Şekil 9.11.d	Hatanın zaman ile değişimi (e).	233
Şekil 9.12	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	234
Şekil 9.12.a	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).	234
Şekil 9.12.b	Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{\text{ön}}$ (J).	234
Şekil 9.12.c	Robotun orta sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J).	234
Şekil 9.12.d	Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).	234

		Sayfa No
Şekil 9.13	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	235
Şekil 9.13.a	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).	235
Şekil 9.13.b	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).	235
Şekil 9.13.c	Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).	235
Şekil 9.13.d	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).	235
Şekil 9.14	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	237
Şekil 9.14.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.	237
Şekil 9.14.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).	237
Şekil 9.14.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).	237
Şekil 9.14.d	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.	237
Şekil 9.15	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	238
Şekil 9.15.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .	238
Şekil 9.15.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).	238
Şekil 9.15.c	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).	238
Şekil 9.15.d	Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).	238
Şekil 9.16	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	239
Şekil 9.16.a	Robotun orta sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).	239
Şekil 9.16.b	Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).	239
Şekil 9.16.c	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).	239
Şekil 9.16.d	Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$).	239
Şekil 9.17	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	240

	Sayfa No
Şekil 9.17.a	240
Robotun orta sanal bacağıının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısai konumu f_{orta} (°).	
Şekil 9.17.b	240
Robotun arka sanal bacağıının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısai konumu f_{arka} (°).	
Şekil 9.17.c	240
Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).	
Şekil 9.17.d	240
Hatanın zaman ile değışimi (e).	
Şekil 9.18	241
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekteşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 9.18.a	241
Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).	
Şekil 9.18.b	241
Robotun ön sanal bacağıında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).	
Şekil 9.18.c	241
Robotun orta sanal bacağıında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J).	
Şekil 9.18.d	241
Robotun arka sanal bacağıında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).	
Şekil 9.19	242
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekteşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 9.19.a	242
Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değeri t_{top} (Nm).	
Şekil 9.19.b	242
Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).	
Şekil 9.19.c	242
Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).	
Şekil 9.19.d	242
Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).	
Şekil 9.20	244
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekteşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 9.20.a	244
Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.	
Şekil 9.20.b	244
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen a salınım açısı(°).	
Şekil 9.20.c	244
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).	
Şekil 9.20.d	244
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturuğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değeriğine bağlı olarak oluşturulmuştur.	
Şekil 9.21	245
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekteşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 9.21.a	245
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .	

		Sayfa No
Şekil 9.21.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{B}_y$ (m/sn).	245
Şekil 9.21.c	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m).	245
Şekil 9.21.d	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m).	245
Şekil 9.22	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	246
Şekil 9.22.a	Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).	246
Şekil 9.22.b	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).	246
Şekil 9.22.c	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).	246
Şekil 9.22.d	Robotun ön sanal bacağına gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$).	246
Şekil 9.23	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	247
Şekil 9.23.a	Robotun orta sanal bacağına gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{orta} ($^{\circ}$).	247
Şekil 9.23.b	Robotun arka sanal bacağına gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).	247
Şekil 9.23.c	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).	247
Şekil 9.23.d	Hatanın zaman ile değişimi (e).	247
Şekil 9.24	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	248
Şekil 9.24.a	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).	248
Şekil 9.24.b	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{\text{ön}}$ (J).	248
Şekil 9.24.c	Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J).	248
Şekil 9.24.d	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).	248
Şekil 9.25	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	249
Şekil 9.25.a	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).	249
Şekil 9.25.b	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{\text{ön}}$ (Nm).	249
Şekil 9.25.c	Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).	249

		Sayfa No
Şekil 9.25.d	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).	249
Şekil 9.26	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	251
Şekil 9.26.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.	251
Şekil 9.26.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen a salınım açısı($^{\circ}$).	251
Şekil 9.26.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).	251
Şekil 9.26.d	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.	251
Şekil 9.27	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	252
Şekil 9.27.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .	252
Şekil 9.27.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).	252
Şekil 9.27.c	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).	252
Şekil 9.27.d	Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).	252
Şekil 9.28	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	253
Şekil 9.28.a	Robotun orta sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).	253
Şekil 9.28.b	Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).	253
Şekil 9.28.c	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).	253
Şekil 9.28.d	Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$)	253
Şekil 9.29	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	254
Şekil 9.29.a	Robotun orta sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{orta} ($^{\circ}$).	254
Şekil 9.29.b	Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).	254
Şekil 9.29.c	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).	254
Şekil 9.29.d	Kontrolörün zamana bağlı olarak hata grafiği (e).	254
Şekil 9.30	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	255

	Sayfa No
Şekil 9.30.a	255
Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).	
Şekil 9.30.b	255
Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).	
Şekil 9.30.c	255
Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J).	
Şekil 9.30.d	255
Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).	
Şekil 9.31	256
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 9.31.a	256
Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).	
Şekil 9.31.b	256
Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).	
Şekil 9.31.c	256
Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).	
Şekil 9.31.d	256
Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).	
Şekil 9.32	258
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 9.32.a	258
Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.	
Şekil 9.32.b	258
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).	
Şekil 9.32.c	258
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).	
Şekil 9.32.d	258
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.	
Şekil 9.33	259
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 9.33.a	259
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .	
Şekil 9.33.b	259
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).	
Şekil 9.33.c	259
Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).	
Şekil 9.33.d	259
Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).	
Şekil 9.34	260
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 9.34.a	260
Robotun orta sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).	

		Sayfa No
Şekil 9.34.b	Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).	260
Şekil 9.34.c	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısıl konumları f (°).	260
Şekil 9.34.d	Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısıl konumu $f_{ön}$ (°).	260
Şekil 9.35	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	261
Şekil 9.35.a	Robotun orta sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısıl konumu f_{orta} (°).	261
Şekil 9.35.b	Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısıl konumu f_{arka} (°).	261
Şekil 9.35.c	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).	261
Şekil 9.35.d	Hatanın zaman ile değişimi (e).	261
Şekil 9.36	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	262
Şekil 9.36.a	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).	262
Şekil 9.36.b	Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).	262
Şekil 9.36.c	Robotun orta sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J).	262
Şekil 9.36.d	Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).	262
Şekil 9.37	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	263
Şekil 9.37.a	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).	263
Şekil 9.37.b	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).	263
Şekil 9.37.c	Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).	263
Şekil 9.37.d	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm)	263
Şekil 9.38	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	265
Şekil 9.38.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.	265
Şekil 9.38.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen a salınım açısı(°).	265
Şekil 9.38.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).	265

		Sayfa No
Şekil 9.38.d	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.	265
Şekil 9.39	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	266
Şekil 9.39.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .	266
Şekil 9.39.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).	266
Şekil 9.39.c	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m).	266
Şekil 9.39.d	Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m).	266
Şekil 9.40	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	267
Şekil 9.40.a	Robotun orta sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).	267
Şekil 9.40.b	Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).	267
Şekil 9.40.c	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f (°).	267
Şekil 9.40.d	Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ (°).	267
Şekil 9.41	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	268
Şekil 9.41.a	Robotun orta sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{orta} (°).	268
Şekil 9.41.b	Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} (°).	268
Şekil 9.41.c	Robotun ön-orta-arka bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).	268
Şekil 9.41.d	Hatanın zaman ile değişimi (e).	268
Şekil 9.42	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	269
Şekil 9.42.a	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).	269
Şekil 9.42.b	Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{\text{ön}}$ (J).	269
Şekil 9.42.c	Robotun orta sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J).	269
Şekil 9.42.d	Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).	269

	Sayfa No
Şekil 9.43	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki; 270
Şekil 9.43.a	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm). 270
Şekil 9.43.b	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm). 270
Şekil 9.43.c	Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm). 270
Şekil 9.43.d	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm). 270
Şekil 9.44	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki; 272
Şekil 9.44.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi. 272
Şekil 9.44.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$). 272
Şekil 9.44.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m). 272
Şekil 9.44.d	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur. 272
Şekil 9.45	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki; 273
Şekil 9.45.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) . 273
Şekil 9.45.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn). 273
Şekil 9.45.c	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m). 273
Şekil 9.45.d	Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m). 273
Şekil 9.46	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki; 274
Şekil 9.46.a	Robotun orta sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m). 274
Şekil 9.46.b	Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m). 274
Şekil 9.46.c	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$). 274
Şekil 9.46.d	Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$). 274
Şekil 9.47	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki; 275

	Sayfa No
Şekil 9.47.a	Robotun orta sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısıl konumu f_{orta} (°).
Şekil 9.47.b	Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısıl konumu f_{arka} (°).
Şekil 9.47.c	Robotun ön-orta-arka bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
Şekil 9.47.d	Hatanın zaman ile değişimi (e).
Şekil 9.48	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 9.48.a	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).
Şekil 9.48.b	Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).
Şekil 9.48.c	Robotun orta sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J).
Şekil 9.48.d	Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).
Şekil 9.49	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 9.49.a	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
Şekil 9.49.b	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
Şekil 9.49.c	Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).
Şekil 9.49.d	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).
Şekil 9.50	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 9.50.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
Şekil 9.50.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen a salınım açısı(°).
Şekil 9.50.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
Şekil 9.50.d	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.
Şekil 9.51	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 9.51.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .

		Sayfa No
Şekil 9.51.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{B}_y$ (m/sn).	280
Şekil 9.51.c	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m).	280
Şekil 9.51.d	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m).	280
Şekil 9.52	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	281
Şekil 9.52.a	Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).	281
Şekil 9.52.b	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).	281
Şekil 9.52.c	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).	281
Şekil 9.52.d	Robotun ön sanal bacağına gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$).	281
Şekil 9.53	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	282
Şekil 9.53.a	Robotun orta sanal bacağına gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{orta} ($^{\circ}$).	282
Şekil 9.53.b	Robotun arka sanal bacağına gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).	282
Şekil 9.53.c	Robotun ön-orta-arka bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).	282
Şekil 9.53.d	Kontrolörün zamana bağlı olarak hata grafiği (e).	282
Şekil 9.54	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	283
Şekil 9.54.a	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).	283
Şekil 9.54.b	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{\text{ön}}$ (J).	283
Şekil 9.54.c	Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J).	283
Şekil 9.54.d	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).	283
Şekil 9.55	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	284
Şekil 9.55.a	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).	284
Şekil 9.55.b	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{\text{ön}}$ (Nm).	284
Şekil 9.55.c	Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).	284

	Sayfa No
Şekil 9.55.d	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t^{arka} (Nm). 284
Şekil 9.56	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki; 286
Şekil 9.56.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi. 286
Şekil 9.56.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen a salınım açısı($^{\circ}$). 286
Şekil 9.56.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m). 286
Şekil 9.56.d	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur. 286
Şekil 9.57	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki; 287
Şekil 9.57.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) . 287
Şekil 9.57.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn). 287
Şekil 9.57.c	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m). 287
Şekil 9.57.d	Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m). 287
Şekil 9.58	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki; 288
Şekil 9.58.a	Robotun orta sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m). 288
Şekil 9.58.b	Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m). 288
Şekil 9.58.c	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$). 288
Şekil 9.58.d	Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$). 288
Şekil 9.59	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki; 289
Şekil 9.59.a	Robotun orta sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{orta} ($^{\circ}$). 289
Şekil 9.59.b	Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$). 289
Şekil 9.59.c	Robotun ön-orta-arka bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m). 289
Şekil 9.59.d	Hatanın zaman ile değişimi (e). 289
Şekil 9.60	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki; 290

	Sayfa No
Şekil 9.60.a	290
Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).	
Şekil 9.60.b	290
Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).	
Şekil 9.60.c	290
Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J).	
Şekil 9.60.d	290
Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).	
Şekil 9.61	291
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 9.61.a	291
Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).	
Şekil 9.61.b	291
Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).	
Şekil 9.61.c	291
Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).	
Şekil 9.61.d	291
Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).	
Şekil 9.62	293
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 9.62.a	293
Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.	
Şekil 9.62.b	293
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).	
Şekil 9.62.c	293
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).	
Şekil 9.62.d	293
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.	
Şekil 9.63	294
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 9.63.a	294
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .	
Şekil 9.63.b	294
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).	
Şekil 9.63.c	294
Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).	
Şekil 9.63.d	294
Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).	
Şekil 9.64	295
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 9.64.a	295
Robotun orta sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).	

		Sayfa No
Şekil 9.64.b	Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).	295
Şekil 9.64.c	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısıl konumları f (°).	295
Şekil 9.64.d	Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısıl konumu $f_{ön}$ (°).	295
Şekil 9.65	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	296
Şekil 9.65.a	Robotun orta sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısıl konumu f_{orta} (°).	296
Şekil 9.65.b	Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısıl konumu f_{arka} (°).	296
Şekil 9.65.c	Robotun ön-orta-arka bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).	296
Şekil 9.65.d	Hatanın zaman ile değişimi (e).	296
Şekil 9.66	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	297
Şekil 9.66.a	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).	297
Şekil 9.66.b	Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).	297
Şekil 9.66.c	Robotun orta sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J).	297
Şekil 9.66.d	Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).	297
Şekil 9.67	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	298
Şekil 9.67.a	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).	298
Şekil 9.67.b	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).	298
Şekil 9.67.c	Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).	298
Şekil 9.67.d	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).	298
Şekil 9.68	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	300
Şekil 9.68.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.	300
Şekil 9.68.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen a salınım açısı(°).	300
Şekil 9.68.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).	300

	Sayfa No
Şekil 9.68.d	300
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.	
Şekil 9.69	301
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 9.69.a	301
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .	
Şekil 9.69.b	301
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).	
Şekil 9.69.c	301
Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m).	
Şekil 9.69.d	301
Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m).	
Şekil 9.70	302
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 9.70.a	302
Robotun orta sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).	
Şekil 9.70.b	302
Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).	
Şekil 9.70.c	302
Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f (°).	
Şekil 9.70.d	302
Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ (°).	
Şekil 9.71	303
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 9.71.a	303
Robotun orta sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{orta} (°).	
Şekil 9.71.b	303
Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} (°).	
Şekil 9.71.c	303
Robotun ön-orta-arka bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).	
Şekil 9.71.d	303
Hatanın zaman ile değişimi (e).	
Şekil 9.72	304
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 9.72.a	304
Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).	
Şekil 9.72.b	304
Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{\text{ön}}$ (J).	
Şekil 9.72.c	304
Robotun orta sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J).	
Şekil 9.72.d	304
Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).	

	Sayfa No
Şekil 9.73	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki; 305
Şekil 9.73.a	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm). 305
Şekil 9.73.b	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm). 305
Şekil 9.73.c	Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm). 305
Şekil 9.73.d	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm). 305
Şekil 10.1	Bulanık mantığın uygulama alanları 312
Şekil 10.2	Üyelik ağırlık dereceleri 313
Şekil 10.3	Üyelik fonksiyonları ve giriş değerinin bu üyelik fonksiyonlarına olan üyelik derecelerinin gösterimi 314
Şekil 10.4	En çok kullanılan üyelik fonksiyonları 315
Şekil 10.5	BMD'lerin temel yapısı 316
Şekil 10.6.a	Giriş değişkeni hatanın (e) 30 sayısal değeri için üyelik fonksiyonlarına olan üyelik dereceleri 316
Şekil 10.6.b	Giriş değişkeni hata değişiminin (de) -15 sayısal değeri için üyelik fonksiyonlarına olan üyelik dereceleri 317
Şekil 10.7	Çıkış değişkeni u için tanımlanan üyelik fonksiyonları 318
Şekil 10.8.a	İma edilen bulanık küme 322
Şekil 10.8.b	Sonuç çıkış bulanık kümesi 322
Şekil 10.9	Giriş değişkenleri (x_1 ve x_2) için tanımlanan üyelik fonksiyonları 325
Şekil 11.1	Tasarlanan Sisteme Ait Blok Diyagram 329
Şekil 11.2	Zıplayarak Yürüme Evreleri Sırasında Kontrol Algoritması (Denetim iki eylemden ibarettir.) 330
Şekil 11.3	Hata (e) giriş değeri için üyelik fonksiyonu 331
Şekil 11.4	Hata değişim ($\dot{e}$) giriş değeri için üyelik fonksiyonu 331
Şekil 11.5	Çıkış değeri tork (t) için üyelik fonksiyonu 331
Şekil 11.6	Dizayn edilen sistem için Bulanık Mantık Denetim Akış Diyagramı 333
Şekil 11.7	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki; 337
Şekil 11.7.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi. 337
Şekil 11.7.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^\circ$). 337
Şekil 11.7.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m). 337
Şekil 11.7.d	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur. 337
Şekil 11.8	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki; 338
Şekil 11.8.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) . 338

		Sayfa No
Şekil 11.8.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{B}_y$ (m/sn).	338
Şekil 11.8.c	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m).	338
Şekil 11.8.d	Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m).	338
Şekil 11.9	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	339
Şekil 11.9.a	Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).	339
Şekil 11.9.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısız konumları f (°).	339
Şekil 11.9.c	Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısız konumu $f_{\text{ön}}$ (°).	339
Şekil 11.9.d	Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısız konumu f_{arka} (°).	339
Şekil 11.10	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	340
Şekil 11.10.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).	340
Şekil 11.10.b	Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{\text{ön}}$ (J).	340
Şekil 11.10.c	Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).	340
Şekil 11.10.d	Hatanın zaman ile değişimi (e).	340
Şekil 11.11	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	341
Şekil 11.11.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).	341
Şekil 11.11.b	Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri $f_{z_ön}$ (m).	341
Şekil 11.11.c	Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_{z_arka} (m).	341
Şekil 11.12	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	342
Şekil 11.12.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).	342
Şekil 11.12.b	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{\text{ön}}$ (Nm).	342
Şekil 11.12.c	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).	342
Şekil 12.1	Tasarlanan Denetim Algoritmasına Ait Blok Diyagram	348
Şekil 12.2	Zıplayarak Yürüme Evreleri Sırasında Kontrol Algoritması (Denetim iki eylemden ibarettir.)	349

	Sayfa No
Şekil 12.3	350
Hata (e) giriş değeri için üyelik fonksiyonu	
Şekil 12.4	350
Hata değişim ($\dot{e}$) giriş değeri için üyelik fonksiyonu	
Şekil 12.5	350
Çıkış değeri tork (t) için üyelik fonksiyonu	
Şekil 12.6	352
Dizayn edilen sistem için Bulanık Mantık Denetim Akış Diyagramı	
Şekil 12.7	356
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 12.7.a	356
Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.	
Şekil 12.7.b	356
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).	
Şekil 12.7.c	356
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).	
Şekil 12.7.d	356
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.	
Şekil 12.8	357
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 12.8.a	357
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .	
Şekil 12.8.b	357
Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).	
Şekil 12.8.c	357
Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m).	
Şekil 12.8.d	357
Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m).	
Şekil 12.9	358
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 12.9.a	358
Robotun orta sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).	
Şekil 12.9.b	358
Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).	
Şekil 12.9.c	358
Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısall konumları f ($^{\circ}$).	
Şekil 12.9.d	358
Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısall konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$).	
Şekil 12.10	359
Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	
Şekil 12.10.a	359
Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısall konumları f ($^{\circ}$).	
Şekil 12.10.b	359
Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısall konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$).	

	Sayfa No
Şekil 12.10.c Hatanın zaman ile değişimi (e).	359
Şekil 12.11 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	360
Şekil 12.11.a Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).	360
Şekil 12.11.b Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).	360
Şekil 12.11.c Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J).	360
Şekil 12.11.d Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).	360
Şekil 12.12 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	361
Şekil 12.12.a Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).	361
Şekil 12.12.b Robotun ön sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri $f_{z_ön}$ (m).	361
Şekil 12.12.c Robotun orta sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_{z_orta} (m).	361
Şekil 12.12.d Robotun arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_{z_arka} (m).	361
Şekil 12.13 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	362
Şekil 12.13.a Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).	362
Şekil 12.13.b Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).	362
Şekil 12.13.c Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).	362
Şekil 12.13.d Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).	362
Şekil 13.1 Beş katmandan oluşan ağ-tabanlı-bulanık mantık yapısı	368
Şekil 13.2 A bulanık kümesi için gauss üyelik fonksiyonu	368
Şekil 13.3 Ağ tabanlı bulanık mantık denetleyicinin eğitim algoritması blok diyagramı	371
Şekil 13.4 ANFIS denetim algoritmasının ana işlem penceresi	372
Şekil 13.5 Eğitim verilerinin sisteme yüklenmesi	372
Şekil 13.6 ANFIS algoritmasına ait üyelik fonksiyon sayısı ve tipleri	373
Şekil 13.7 ANFIS algoritmasına ait üyelik fonksiyon sayısı ve tiplerinin belirlenmesi	373
Şekil 13.8 ANFIS denetim algoritmasının morfolojik yapısı	374
Şekil 13.9 ANFIS denetim algoritmasına ait hata toleransının ve iterasyon sayısının belirlenmesi	374

		Sayfa No
Şekil 13.10	ANFIS denetim algoritması ile sistemin çözüm cevap grafiği	375
Şekil 13.11	ANFIS denetim algoritmasının FIS uzantılı olarak saklanması	375
Şekil 14.1	Tasarlanan Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim Algoritmasına Ait Blok Diyagram	378
Şekil 14.2	Zıplayarak Yürüme Evreleri Sırasında Denetim Algoritması (Denetim iki eylemden ibarettir.)	379
Şekil 14.3	Dizayn edilen sistem için Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim Akış Diyagramı	381
Şekil 14.4	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	385
Şekil 14.4.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.	385
Şekil 14.4.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).	385
Şekil 14.4.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).	385
Şekil 14.4.d	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.	385
Şekil 14.5	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	386
Şekil 14.5.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .	386
Şekil 14.5.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).	386
Şekil 14.5.c	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m).	386
Şekil 14.5.d	Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m).	386
Şekil 14.6	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	387
Şekil 14.6.a	Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).	387
Şekil 14.6.b	Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).	387
Şekil 14.6.c	Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$).	387
Şekil 14.6.d	Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).	387
Şekil 14.7	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;	388
Şekil 14.7.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).	388

	Sayfa No
Şekil 14.7.b	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{\text{ön}}$ (J).
Şekil 14.7.c	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).
Şekil 14.7.d	Hatanın zaman ile değişimi (e).
Şekil 14.8	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 14.8.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
Şekil 14.8.b	Robotun ön sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri $f_{z_ön}$ (m).
Şekil 14.8.c	Robotun arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_{z_arka} (m).
Şekil 14.9	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 14.9.a	Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
Şekil 14.9.b	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{\text{ön}}$ (Nm).
Şekil 14.9.c	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).
Şekil 15.1	Tasarlanan Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim Algoritmasına Ait Blok Diyagram
Şekil 15.2	Zıplayarak Yürüme Evreleri Sırasında Kontrol Algoritması (Denetim iki eylemden ibarettir.)
Şekil 15.3	Dizayn edilen sistem için Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim Akış Diyagramı
Şekil 15.4	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 15.4.a	Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
Şekil 15.4.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen a salınım açısı($^{\circ}$).
Şekil 15.4.c	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
Şekil 15.4.d	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.
Şekil 15.5	Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;
Şekil 15.5.a	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
Şekil 15.5.b	Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).

	Sayfa No
Şekil 15.5.c Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m).	405
Şekil 15.5.d Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m).	405
Şekil 15.6 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	406
Şekil 15.6.a Robotun orta sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).	406
Şekil 15.6.b Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).	406
Şekil 15.6.c Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısıl konumları f ($^{\circ}$).	406
Şekil 15.6.d Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısıl konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$).	406
Şekil 15.7 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	407
Şekil 15.7.a Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısıl konumları f ($^{\circ}$).	407
Şekil 15.7.b Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısıl konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$).	407
Şekil 15.7.c Hatanın zaman ile değişimi (e).	407
Şekil 15.8 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	408
Şekil 15.8.a Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).	408
Şekil 15.8.b Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{\text{ön}}$ (J).	408
Şekil 15.8.c Robotun orta sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J).	408
Şekil 15.8.d Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).	408
Şekil 15.9 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	409
Şekil 15.9.a Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).	409
Şekil 15.9.b Robotun ön sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri $f_{z_ön}$ (m).	409
Şekil 15.9.c Robotun orta sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_{z_orta} (m).	409
Şekil 15.9.d Robotun arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_{z_arka} (m).	409
Şekil 15.10 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;	410

		Sayfa No
Şekil 15.10.a	Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).	410
Şekil 15.10.b	Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).	410
Şekil 15.10.c	Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).	410
Şekil 15.10.d	Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).	410

ÇİZELGELER (TABLOLAR) LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 1.1 Yıllara Göre Yapılan Bacaklı Robot Çalışmaları	14
Tablo 2.1 Bazı hayvanların fiziksel özellikleri	36
Tablo 2.2 Literatürde bilinen bacaklı robotlara ait özellikler.	48
Tablo 4.1 Dinamik model için parametreler	73
Tablo 7.1 Robot Değişkenleri	112
Tablo 7.2 Robot Parametreleri	112
Tablo 7.3 Denetim Parametreleri	113
Tablo 7.4 Başlangıç Değerleri	114
Tablo 7.5 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.	128
Tablo 7.6 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.	134
Tablo 7.7 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.	140
Tablo 7.8 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.	146
Tablo 7.9 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.	152
Tablo 7.10 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.	158
Tablo 7.11 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.	164
Tablo 7.12 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.	170
Tablo 7.13 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.	176
Tablo 7.14 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.	182
Tablo 7.15 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.	188
Tablo 7.16 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.	194
Tablo 7.17 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.	200
Tablo 9.1 Robot Değişkenler	219
Tablo 9.2 Robot Parametreler	219
Tablo 9.3 Denetim Parametreleri	220
Tablo 9.4 Başlangıç Değerleri	221
Tablo 9.5 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.	236
Tablo 9.6 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.	243
Tablo 9.7 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.	250
Tablo 9.8 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.	257
Tablo 9.9 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.	264

	Sayfa No
Tablo 9.10 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.	271
Tablo 9.11 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.	278
Tablo 9.12 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.	285
Tablo 9.13 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.	292
Tablo 9.14 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.	299
Tablo 9.15 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.	306
Tablo 10.1 Bulanık denetleyici girişleri olan e (hata) ve de (hata değişimi) 'nin sırası ile $e=30$ ve $de=-15$ sayısal değerleri için üyelik fonksiyonlarında aldıkları üyelik dereceleri	317
Tablo 10.2 25 kuraldan oluşan kural tabanı	318
Tablo 10.3 x_1 ve x_2 giriş üyelik fonksiyonlarına ait üyelik dereceleri ve üyelik fonksiyonları	326
Tablo 11.1 Bulanık Mantık Denetleyicisi için tasarlanan kural tablosu	330
Tablo 11.2 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.	343
Tablo 12.1 Bulanık Mantık Denetleyicisi için tasarlanan kural tablosu	349
Tablo 12.2 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.	363
Tablo 14.1 Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyicisinde kullanılan ($5 \times 5 = 25$) kural sayısı	379
Tablo 14.2 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.	391
Tablo 15.1 Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyicisinde kullanılan ($5 \times 5 = 25$) kural sayısı	398
Tablo 15.2 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.	411
Tablo 16.1 Quadrupedal dört bacaklı robotun zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleştirilen denetim algoritmalarının hareket performansları	428
Tablo 16.2 Hexapod altı bacaklı robotun zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleştirilen denetim algoritmalarının hareket performansları	429

SİMGELER

a	: Gövde salınım açısı
f	: Gövdeye göre bacak açısı
b_z	: Ağırlık Merkezinin yer seviyesinden yükseklik değeri
$\dot{b}_z$	: Düşey z ekseninde ki hız
db_y	: Yataydaki ilk hız
b_y	: Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda aldığı deplasman
$\dot{b}_y$	: Yatay y eksenindeki öteleme hızı
$I_{ön}$	: Ön sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları
I_{orta}	: Orta sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları
I_{arka}	: Arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları
$f_{ön}$	: Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre açısal konumu
f_{orta}	: Robotun orta sanal bacağının gövdeye göre açısal konumu
f_{arka}	: Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre açısal konumu
e	: Hata
$\dot{e}$	: Hatanın değişimi
E_{top}	: Robotun sanal bacaklarında ki toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları
$E_{ön}$	: Robotun ön sanal bacaklarında oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları
E_{orta}	: Robotun orta sanal bacaklarında oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları
E_{arka}	: Robotun arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları
$f_{z_ön}$	: Robotun ön sanal bacağının yerden yüksekliği
f_{z_orta}	: Robotun orta sanal bacağının yerden yüksekliği
f_{z_arka}	: Robotun arka sanal bacağının yerden yüksekliği
t_{top}	: Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına uygulanan toplam tork değerleri
$t_{ön}$	: Robotun ön sanal bacağına uygulanan toplam tork değeri
t_{orta}	: Robotun orta sanal bacağına uygulanan toplam tork değeri
t_{arka}	: Robotun arka sanal bacağına uygulanan toplam tork değeri
z, y, z, y	: Ağırlık Merkezi Kartezyen Koordinatları
B	: Kartezyen koordinat merkezi
W	: Gövdenin kartezyen koordinat merkezi
V	: Sanal(virtual) bacaklar kartezyen koordinat merkezi
I	: Kütleli atalet momenti ile temsil
m_t	: Bacak kütlesi
m	: Robot kütlesi
d_i	: Radyal viskoz sönüm sabiti

k_i	: Bacak rijitlik sabiti
r_i	: Anlık sanal bacak boyu
t_i	: Tork
F_i	: Kuvvet
F_{ri}	: Radyal kuvvet
h_i^t	: Her bir bacağın z düşey eksenindeki konumu ile sistemin ağırlık merkezinin z düşey eksenindeki konum farkı
h_i^l	: Her bir bacağın z düşey ekseninde oluşan radyal kuvvetlerin toplamı
w_{yer}	: Doğal frekans
q_{td}	: Bacağın yere dokunma açısı
q_{swl}	: Bacağın süpürme açısı
T_{top}	: Toplam zıplama süresi
$T_{uçuş}$	: Havada uçuş süresi
T_{yer}	: Yerde kalma süresi
g	: Yer çekim ivmesi
k_p	: Orantısal denetim katsayısı
k_d	: Türevsel denetim katsayısı

ÖZET

Doktora Tezi

ZIPLAYARAK YÜRÜYEN ÇOK BACAKLI ROBOTLARIN DİNAMİK MODELİ VE YAPAY ZEKA ALGORİTMALARI İLE DENETİMİ

Servet SOYGÜDER

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

2009, Sayfa: 447

Mobil robotlar günümüz teknolojisinin bir gereği olarak laboratuvar dışında da ihtiyaç duyulmaktadır ve geleneksel tekerlekli, paletli ve raylı sistemlere sahip araçların tasarım sınırlarının aşılması için yapılan çalışmalar gün geçtikçe artan bir eğilim göstermektedir. Bu sınırları aşmak için, mobil robotların bir dalı olan bacaklı robotlar, biyolojik esinlenmelerden yararlanarak yeni tasarımlar gerçekleşmesine neden olmaktadır. Bu yeni tasarımlar daha çok bacaklı sistemleri içerir. Bu bacaklı sistemler bilinen geleneksel tasarımlardan çok daha fazla hareket kapasitesine ve çok yönlülüğe sahiptirler.

Bu amaçla bu çalışmada, bacaklı robotlardan dört bacaklı quadrupedal robot ve altı bacaklı hexapod robot modellerinin zıplayarak yürüme işlevini yapabilmeleri için dinamik model, sayısal benzetim ve denetimi gerçekleştirilmiştir. Zıplayarak yürüme işlemleri ardışık kapalı bir döngü içerisinde farklı dinamik yapıların sayısal benzetimleri kullanılarak sistemin hareketi incelenmeye çalışılmıştır. Bu sayısal çözümü mümkün olduğunca basitleştirmek ve anlaşılmasını kolaylaştırmak için Kütle-Yay Ters-Sarkaç (Spring Loaded Inverted Pendulum (SLIP)) modeli oluşturulmuştur. Bu çalışmada hem quadrupedal robotun hem de hexapod bir

robotun zıplayarak yürüyebilmesi için dinamik modeli gerçekleştirilerek sırası ile PD denetim algoritması, Bulanık Mantık denetim algoritması ve Ağ Tabanlı Bulanık Mantık (ANFIS) denetim algoritması ile denetlenmiştir. Bu çalışmada, en önemli sonuçlardan birisi sistemin yapay zeka metotları olan Bulanık Mantık denetim algoritması ve Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritmaları ile dört bacaklı quadrupedal robotun ve altı-bacaklı hexapod robotun başarılı olarak denetlenmesidir. Bu çalışma yazarın bilgisi dahilinde quadrupedal robot ve hexapod robot modellerinin zıplayarak yürüme işlevinin gerçekleştirilmesinde, literatür çalışmalarında bir ilktir. Bulanık Mantık denetleyicisi ve Ağ Tabanlı Bulanık Mantık (ANFIS) denetleyicisi ile denetlenen quadrupedal robot ve hexapod robotun sayısal benzetim sonuçlarının, literatürde ki çalışmalara nazaran performansı bakımından çok daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Ayrıca bu çalışmada zıplayarak yürümenin fazları esnasında yapılan kontrol eylem sayısı, yazarların literatür bilgisi dahilinde daha önceden yapılan çalışmalardaki kontrol eylem sayısından daha azdır. Bu çalışmada yapılan yenilik sistemin hem denetimini oldukça kolaylaştırmış olup hem de her bir döngüdeki çalışma süresini azaltarak sistemin performansını arttırmıştır.

Tasarlanan denetim algoritmalarını zıplayarak yürüme işlevini yapan bacaklı robot modellerinde uygulayabilmek ve performanslarını analiz edebilmek için birbirinden farklı dört bacaklı quadrupedal robot ve altı bacaklı hexapod robot modelleri kullanılmıştır. Bu bacaklı robot modellerinin zıplayarak yürüme işlevlerini gerçekleştirebilmeleri için her bir robot modele üç farklı denetim algoritması uygulanmıştır. Bunlar en yaygın olarak kullanılan yapay zeka denetim metotlarıdır. Sisteme ait matematiksel model elde edilmiş ve çözüm kolaylığı için durum uzay formuna dönüştürülmüştür. Sayısal çözüm için MATLAB paket programında hazırlanmış yazılım ve Ağ Tabanlı Bulanık Mantık için MATLAB paket programına ait ANFIS araç kutusundan yararlanılmıştır. Sonuçlar grafiksel olarak elde edilmiş ve değerler tablo haline getirilerek irdelenmiştir. Sonuç olarak, denetim algoritmalarının performansları dikkate alındığında Bulanık Mantık denetim algoritması ve Ağ Tabanlı Bulanık Mantık (ANFIS) denetim algoritmasının hem dört bacaklı quadrupedal robot modelinde hem de altı bacaklı hexapod robot modelinde PD denetim algoritmasından daha iyi bir performans elde edildiği ve daha iyi uygulanabilir oldukları görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Bacaklı Robot, Dinamik Model, Dört Bacaklı Robot, Quadrupedal Robot, Altı Bacaklı Robot, Hexapod Robot, Yapay Zeka, Bulanık Mantık Denetim, ANFIS.

ABSTRACT

PhD Thesis

DYNAMIC MODEL AND CONTROL WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS OF MULTI LEGGED ROBOTS WITH PRONKING GAIT

Servet SOYGÜDER

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

2009, Page: 447

The legged robots have received great attention in robotics literature because the most of the studies on mobil robots have been related to legged robots in the last years. Therefore, the tendency for studying in this area has gradually increased because the mobility of legged robots in the widest variety of terrain conditions is better than that of most existing mobile robots such as wheeled, tracked or railed robots. The most important desired features of mobil robots in today technology are the high capacity of mobility and multi-functionalities.

Dynamic model, simulation and control of quadrupedal and hexapod robots have been realized for a pronking gait in this thesis. In order to obtain the numerical simulation of the equation of motion for pronking gait, the different dynamic structures have been solved in a sequential closed loop (stance, flight). Spring Loaded Inverted Pendulum (SLIP) has been used as a dynamic model to simplify the simulation of the system and ease to understand the pronking gait. Different from the studies in the literature, the quadrupedal robot and hexapod robot with pronking gait have been controlled by Fuzzy Logic and Artificial Neural Based

Fuzzy Logic control algorithms. Although there have been a lot of control algorithms used to perform different gaits of legged-robots, the proposed fuzzy logic control (FLC) and Artificial Neural Based Fuzzy Logic (ANFIS) control algorithms for pronking gait have never been utilized to control gaits of legged-robots in the literature in the limit of authors knowledge. It has been seen that the simulation results of the quadrupedal and hexapod robots controlled by Fuzzy Logic and Artificial Neural Based Fuzzy Logic control algorithms are better than those of the existing studies in the literatures in terms of energy consumption and stability of motion.

In addition, the number of the performed control actions during the phases of pronking gait in this thesis is smaller than those of the studies in the literature. As a result, the proposed control methods in this study makes both the system control easy and the system performance increase by decreasing the run time for each loop.

In order to apply the designed control algorithms and analyze the performances of these controllers, four-legged quadrupedal robot and six-legged hexapod robot models have been considered. In addition to that, three different practical control algorithms have been applied for each robot model. These control algorithms called Fuzzy Logic and Artificial Neural Based Fuzzy Logic control algorithms have most commonly been used in robotics applications. The mathematical models of the considered systems were obtained then they were transformed in the state-space forms. For simulations, the MATLAB code was prepared and ANFIS Toolbox in MATLAB was used for the Artificial Neural Based Fuzzy Logic Controller. The obtained results were presented in graphical and table forms and examined. As a result, it has been seen that the performances and applicability of Fuzzy Logic and Neural Based Fuzzy Logic controller for pronking gait of quadrupedal robot and hexapod robot are much better than PD controller.

Keywords: Legged Robots, Dynamic Model, Four-Legged Robot, Quadrupedal Robot, Six-Legged Robot, Hexapod Robot, Artificial Intelligence, Fuzzy Control, ANFIS Control.

1.GİRİŞ

Mobil robotlar günümüz teknolojisinin ve çağdaş yaşamın bir gereği olarak laboratuvar dışında da ihtiyaç duyulmaktadır. Sınırlı hareket kapasitelerine sahip geleneksel tekerlekli, paletli ve ray sistemli araçların tasarım sınırlarının aşılması için yapılan çalışmalar, gün geçtikçe artan bir eğilim göstermektedir. Bu sınırları aşmak için biyolojik esinlenmelerden yararlanarak (biyomimetik) mobil robotlara yeni tasarımlar eklenmektedir. Bu yeni tasarımlar daha çok bacaklı sistemleri içerir. Geliştirilen bacaklı sistemler, bilinen geleneksel tasarımlardan çok daha fazla hareket kapasitesine ve çok yönlülüğe sahiptirler [1]. Bu özellikler günümüz teknolojisinde mobil robotlarda aranan en büyük özelliklerdir. Bu amaçla son yıllarda mobil robotlar üzerine yapılan çalışmaların büyük bir oranı bacaklı robotlar üzerine olmuştur.

1.1 Çalışmanın Motivasyonu

Mobil robotların en önemli özelliği her türlü arazi şartlarında hareket kabiliyetinin olmasıdır. Bundan dolayı, tekerlekli ya da paletli makinelerin aşamadığı engelleri aşmak için yürüyebilen makineler ön plana çıkmaktadır. Tekerlekler sadece belirli bir yol veya ray üzerinde gitmek zorundadırlar. Fakat birçok yer tekerlekli araçların gitmesi için uygun değildir. Birçok yer sadece hayvanların ulaşımıyla kısıtlıdır. Bundan dolayı bu tip yerlere ulaşımı yürüyebilen bacaklı makinelerle sağlayabiliriz.

Yürüyen mekanizmalarının kullanılmasının diğer bir nedeni ise bacaklarda adımların destekli ve denetimli bir biçimde atılabilmesidir. Tekerlekler sadece belirli bir güzergâhı izleyebilir. Sonuçta bacaklar ulaşılabilir en uygun adımla sınırlıyken, tekerlekler en kötü koşullar içinde sınırlıdır. Buna en iyi örnek ise, tekerleklerin adım atma gibi bir özelliği bulunmadığından dolayı merdiven çıkmada yetersiz olmaları gösterilebilir (Şekil 1.1).

Bacakların diğer bir avantajı ise, bacakların sahip olduğu yörünge ile adımların yörüngesi arasında dinamik bir dengenin olmasıdır. Sonuç olarak, yük ya da bacaklı sistemin ağırlık merkezi arazi koşullarına göre değişken olarak, yumuşak bir salınım yapar. Bacaklı sistem ayrıca engelleri de aşabilir. Bu prensiple yürüyen makineler yerin engebelerinden bağımsızdır. Yürüyen bir sistem engebeli yüzeylerde bu bağımsızlığı hızını ve performansını artırmada kullanır.



Şekil 1.1. Bacaklı sistemlerin merdiven tırmanışı

Bu tip sistemlerin başarısı bilim ve teknolojiadaki birtakım gelişmelere bağlıdır. Bacaklı bir makinenin eklem hareketlerini kontrol etmek, bacaklardaki çevrimi sağlamak, dengeyi manipüle etmek, yüzey şartlarını ölçüp iyi bir adım atışını sağlamak ve uygun adım sırasını hesaplamak için karmaşık sistemlere ihtiyaç duyar. Bunların birçoğu araştırma aşamasındadır. Eğer bu araştırmalar tamamlanırsa, engellerin ve meyillerin yarattığı olumsuzluklar çözülerek arazide verimli ve hızlı bir yürüyüş sağlanacaktır. Böylece bu araçlar endüstride, uzaysal çalışmalarda, madencilikte, deprem gibi afetlerde, tarımda ve askeri operasyonlarda faydalı olacaktır.

Bu araçları incelememizin diğer bir sebebi de insan ve hayvan yürüyüşünü anlamaktır. Sadece bir atletin zıplaması, sıçraması, koşması, hızı ve bedeninin dengelenmesi bu hareketlerin çeşitliliği ve karmaşıklığı doğrultusunda bizi hayrete

düşürecektir. Bu tip bir performans sadece profesyonel bir atletle sınırlı kalmayıp; makine, elektronik, bilgisayar ve mekatronik mühendisliği dallarının bizzat uğraş alanına giren bir bakış açısı gerektirir. Belki de en heyecanlı olay insanların kendi çocuklarının davranışlarını sürekli geliştirerek emeklemesine, yürümesine, koşmasına, zıplamasına ve tırmanmasına şahit olmasıdır.

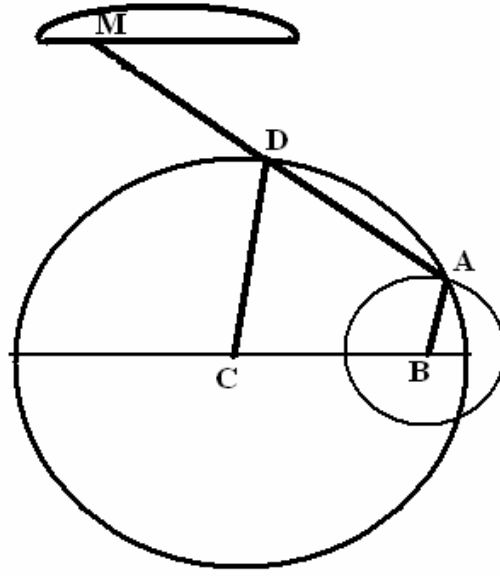
Hayvanlar özellikle büyük hareket esnekliği ve çeviklik gösterirler. Zor şartlar içeren ormanlık alanda, bataklıkta hızla hareket edebilir ve ağaçtan ağaca zıplayabilirler. Bazı hayvanlar müthiş hızlarda yüksek performansta koşarlar.

Muazzam bir şekilde bacaklarla yürümemize karşın halen bu hareketlerin denetim prensiplerini anlamada önemli tespitler elde etmekteyiz ve bunların birçoğu araştırma aşamasındadır. Hayvanlar hangi denetim mekanizmasını kullanırlar? Akla yatkın bir mekanizma üretmenin tek yolu bacaklara sahip makineler dizayn etmektir. Bu açıdan ele alırsak, makinelerin ve hayvanların aynı yürüyüşü gerçekleştirmeleri için, hayvanların denetim sistemleri makine sistemlerine uygulanarak var olan problemler çözülebilir. Makineler geliştirerek bu problemlere yeni bakış açılarıyla yaklaşabilir ve olası çözümler geliştirebiliriz. Gerçekten işleyen bir bacaklı makine yapmak çok büyük çalışmalar gerektirmektedir. Daha önceki çalışmalarda elde edilen teoriler ve denetim algoritmaları ile biyolojik çalışmalardan da esinlenerek belirli modeller gerçekleştirilebilir. Bu tip disiplinler arası çalışmalar popüler bir hale gelmiş ve biyolojinin bu konuda bacaklı robotlarda zıplama, sıçrama, koşma ve manipülasyonda katkısı olmuştur [2].

1.2. Bacaklı Robotlar İle İlgili Araştırmalar

Bu çalışmanın ana konusuna girmeden önce aktif denge üzerine yapılan çalışmalardan kısaca söz edelim.

Bacaklarla yürüyüş üzerine yapılan çalışmalar bundan yaklaşık 150 yıl öncesinde California Valisi Leland Stanford'un Eadweard Muybridge'i dört nala koşan atları incelemesi için görevlendirilmesiyle başladı. Muybridge stop-motion çekilmiş fotoğraf kareleri üzerinde hayvan hareketlerini inceledi [3, 4].



Şekil 1. 2 İlk yürüyen makinenin hareket mekanizması

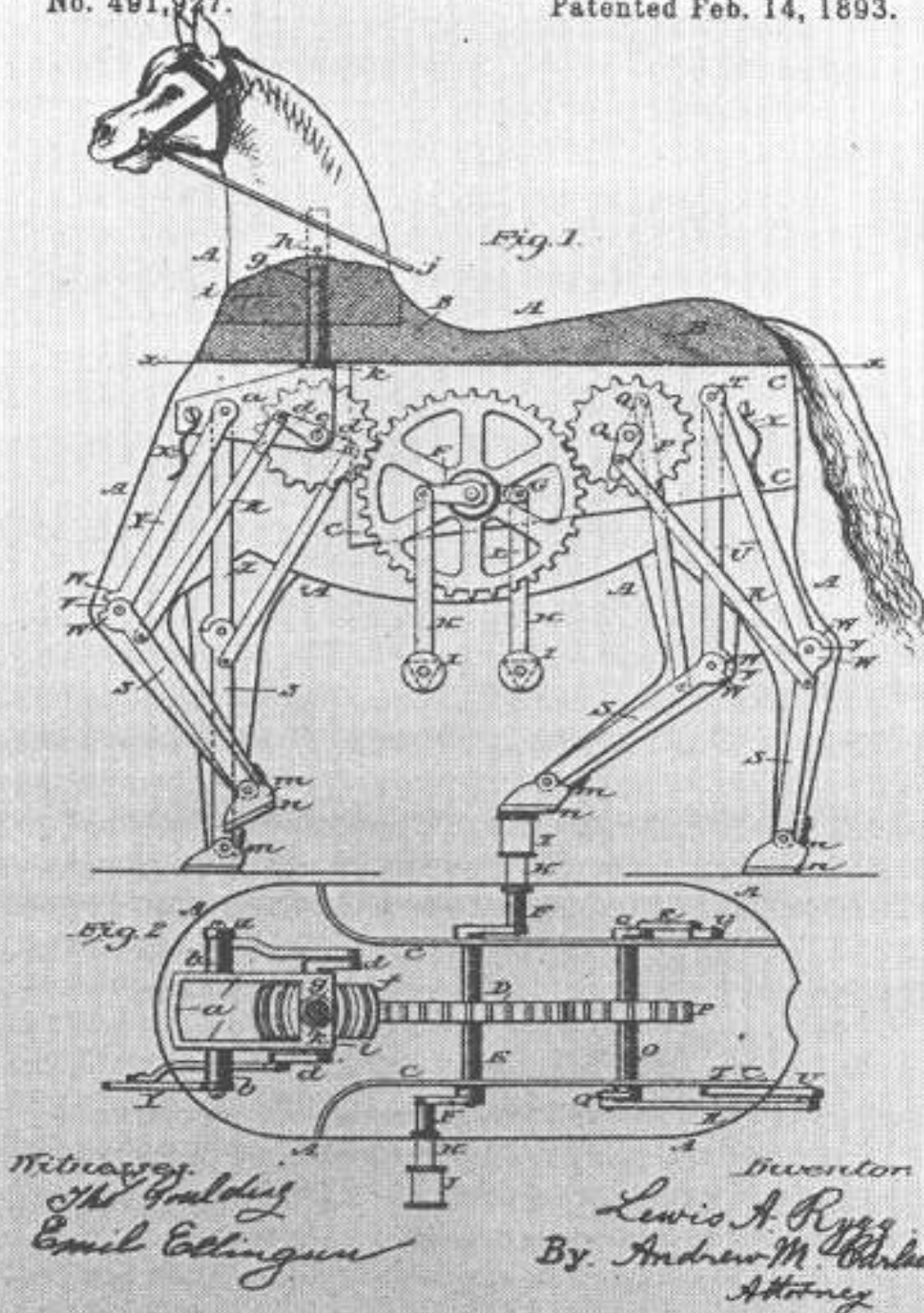
Bu tür çalışmalar Muybridge zamanında devam etti. İlk yürüyen model 1870 yılında ortaya çıktı. Bu model gövdeyi düz bir yatay eksenle hareket ettirirken ayakları adım sırasına göre aşağı yukarıya hareket ettiren kinematik bir zincir kullanıyordu (Şekil 1.2). Bu zincir orijinal olarak Rus matematikçisi Chebyshev tarafından daha önce dizayn edilmişti [5]. Bunu takiben sekiz dokuz yıllık bir çalışma süreci içinde çalışan bilim adamları iyi bir yürüyüş için ve kinematik zincir işleyişi üzerine yoğunlaştılar.

(No Model.)

L. A. RYGG.
MECHANICAL HORSE.

No. 491,927.

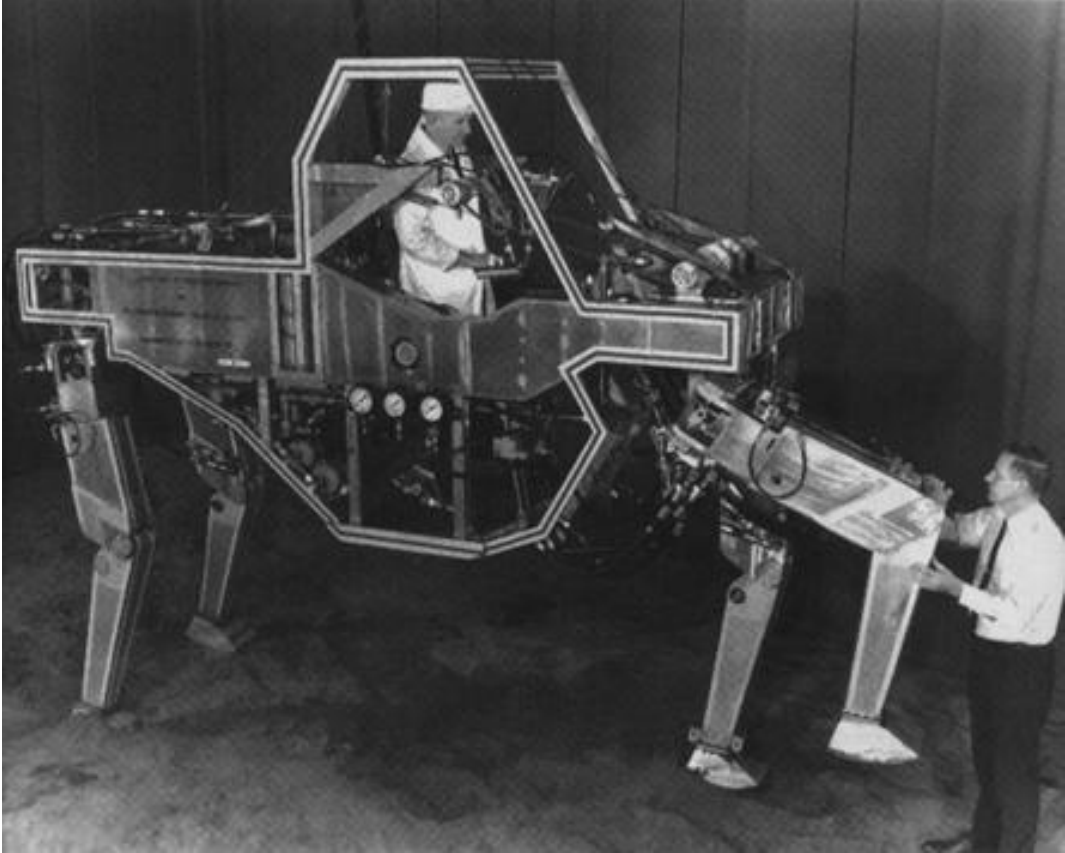
Patented Feb. 14, 1893.



Şekil 1. 3 Lewis A. Rygg tarafından patenti 1893 yılında alınan mekanik at [2].

Bu konu ile ilgili Şekil 1.3’ de ki gibi birçok dizayn önerildi [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Ancak bu tip makinaların performansı sabit bir yol ile sınırlıydı çünkü değişik arazi şartlarına göre adaptasyonları yoktu.

Ancak 1950’lerden sonra yalnızca rijit gövde üzerinde sabit mafsallı linklerin kullanımının yetersiz kaldığı görülmüş ve aynı zamanda makinelerin denetim gereğini ortaya çıkarmıştır [16]. Bir başka yaklaşım ise insan güdümlü denetimdi. Bu yaklaşımı General Electric’te Ralph Mosher kullanarak dört bacaklı yürüyen aracı yaptı, Liston ve Mosher [17]. Mosher isimli bu makina 11ft yüksekliğinde, 3000lbs ağırlığındaydı ve hidrolik olarak kumanda ediliyordu. Sürücünün el ve ayakları bir kol veya pedal aracılığı ile aracın ayaklarını kontrol ediyordu. Sürücü, bacağı bir engel üzerine sürdüğünde geri besleme kuvveti ile sürücünün aynen tepki kuvvetini hissetmesine sebep oluyordu (Şekil 1.4).



Şekil 1. 4 General Electric’te inşa edilen dört bacaklı adlı robot [17].

Mosher 20 saatlik bir alıştırmada inanılmaz bir çeviklikle kontrol edildi. Filme kaydedildiğinde 5 m/h hızla yürüdüğü, bir kenara yığılmış demiryolu raylarının üstünden tırmandığı, çamura saplanmış bir aracı ittiği ve varilleri konveyöre ittiği gözlemlenmiştir. İyi

eğitilmiş insan kontrolüne bağlı olmasına rağmen teknolojide bir dđnüm noktası yarattı ve buluş sahiplerine büyük ilerleme sağladı.

İnsan güdümlü kontrole alternatif dizayn, bilgisayarların kullanımıyla 1970li yıllarda mümkün oldu. Ohio State Üniversitesinden Robert McGhee'nin grubu 1977 de bu yaklaşımı başarıyla kullandılar [18]. Dönebilen ve basit engelleri aşabilen altı bacaklı böcek benzeri bir robot yaptılar. Burada bilgisayarın öncelikli görevi bacakları süren 18 adet motoru sürmek için kinematik eşitlikleri çözmekti. Tripod yürüyüşün her bir adımında, robotun ağırlık merkezi bacaklar tarafından sağlanan destek poligonunun üstüne düşüyordu. Daha sonra kuvvet ve görüntü duyargaları ile arazi uyumu için geri besleme sağlandı [19, 20, 21].

Gurfinkel ve ekibi eski Sovyetler Birliğinde yakın zamanlarda McGhee'nin makinasına benzeyen, aynı karakteristik ve performansta bir makine yaptı [22]. Bu makine denetim için bir bilgisayar kullanıyor; basit fonksiyonlar için büyük bir analog hesaplama sistemi kullanıyordu.

Hirose link tasarımının ve bilgisayar kontrolünün önemini kavradı ve kontrolü basite indirgeyecek ve verimi artırabilecek alışılmadık makineler tasarladı. Özel bacak yapılarına sahip ve etkili olabilen basit kontrol metotları ile yedi çeşit mekanik yılan tasarladı [23, 24]. Bacak üç boyutlu düzlemde boyutlandırılarak, ayağın kartezyen çevrimi içindeki her bir eyleyicinin hareket planının oluşturulması sağlandı.

Hirose bu bacağı yaklaşık 1m boyunda 4 ayaklı bir robot için kullandı. Her ayakta bir algılayıcı(dokunma duyargası-touch sensor) ve yağ-damperli sarkaç vardı. Ayaktaki hareketleri kontrol etmek için duyargalar ve basit algoritmalar kullanıyordu. Örneğin ayak bir engelle karşılaştığında ayak biraz geri çekiliyor, sonra yukarı kalkıyor ve daha sonra yoluna devam ediyordu. Eğer engel aşılamamışsa aynı işlem tekrarlanıyordu. Buna benzer algoritmalar robotların merdivenden inme, çıkma ve insan aracılığı olmadan diğer engellerden aşmayı sağlamışlardır [25].

McGhee [18, 19, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37], Gurfinkel [22, 38, 39] ve Hirose'nin [23, 24, 25, 40, 41] yaptıkları bu üç robot "statik sürüngeñler"(Static Crawlers) olarak sınıflandırılmıştır. Her bir kontrol için kullanılan hesaplama ve tasarım unsurları birbirinden farklıydı. Fakat denge ve kararlılık yönünden benzer yaklaşımları içeriyordu. Her seferinde uygun sayıda ayak yerde denge sağlamak için duruyordu ve aynı zamanda gövde ve ayaklarda gövdenin ağırlık merkezini koruyordu.

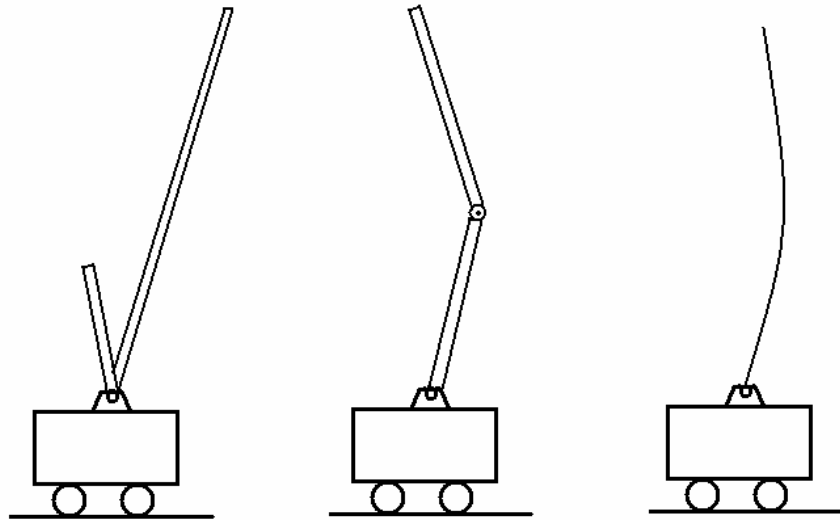
Üç boyutlu dengeli yürüyüşte, depolanmış enerji temelini kullanmak çok önemlidir. Bu tür makineler laboratuarda yüzey algılama, adım seçimi ve birtakım zorlu arazi şartlarında hareketi sağlamada kullanılmıştır. Daha sonraki yıllarda aynı sınıfa giren birtakım makineler üzerine çalışılmalar devam etmiştir [42, 43, 44].

1.3. Aktif Denge İle İlgili Araştırmalar

Bir önceki bölümde statik olarak dengelenen bacaklı makineler üzerine yoğunlaştık. Şimdi aktif olarak dengelenebilen dinamik makineler üzerinde yapılan çalışmalara değineceğiz. Bunlardan ilki ters sarkaçtır. Elimize bir çubuk alıp dengede tutmamız buna örnektir. İnsanlar tarafından bu başarılabiliyorsa, makinalar tarafından da otomatik bir şekilde yapılabilir.

Bunu ilk deneyenlerden biri Claude Shannon ismindeki bilim adamıdır [45]. Küçük bir araç yaparak geriye ve ileriye hareketiyle sarkacın salınım yapmasını sağladı. Sarkacın salınımı büyüdükçe eski konumuna dönmesi için ters yönde hareketini inceledi.

Cannon ve Stanford Üniversitesi'nden iki öğrencisi aynı anda iki sarkacın kontrolü üstünde çalıştılar. İlkinde sarkaçları alttan sabitlediler. İkincisinde birini diğerinin üzerine sabitleyip altta olanı arabaya sabitlediler (Şekil 1.5). Cannon'un ekibi tek bir girişe karşılık sarkacın iki çıkış değişkenini kontrol etmekle ilgilendiler ve bu faktörleri etkileyen sebepler üstünde durdular. Nasıl bir kuvvet uygulanmalıydı ki iki tane sarkaç aynı anda kontrol edilebilsin? Sistem girilen değerlerden ne kadar sapacaktı?



Şekil 1.5 Ters Sarkaç Modeli

Normal koordinatlar ve aç-kapa anahtarlama temeline dayalı analizler kontrol edilebilirliğin fiziksel parametreleridir. Bu değerler, sarkacın çevresindeki sınır bölgelerde anahtarlama fonksiyonunu sağlamak için kullanıldılar [46, 47]. Daha sonra bu teknikleri esnek sarkaçta denge sağlamak için geliştirdiler [48, 49]. Bu ters sarkaç çalışmaları yürüyüş çalışmaları için öncü olmuştur. Ters sarkaç modeli, bacaklı sistemlerde denge konusu üzerinde bir temel oluşturmuştur [50, 51, 52, 53, 54, 55]. Ancak hiç kimse Cannon'un analitik sonuçlarını daha karmaşık bacak uygulamaları için genişletememiştir.

Mosher ve General Electric 'teki ekibi bacaklı yürüyüş için, denge ile ilgilendi. Daha önce açıklanan dört ayaklı makinayı tasarlamaya karar vermeden önce, ilk fikirleri, insan kontrollü iki ayaklı yürüyen bir makina yapmaktı. Kendilerinden birkaç kat büyük bir makinayı kontrol etmek için insanın kabiliyeti konusunda emin olamadıkları için insan faktörü üzerinde deneylere başladılar. Deney düzeneği hareketli bir sürücü üzerinde duran 20ft uzunluğunda bir ters sarkaç' dan oluşmaktadır. Bu ters sarkaç modeli kalça ve dizden oluşan iki linkten ibarettir. Bu linklerin hareketleri diz ve kalçanın uygun hareketlerini takip etmeleri suretiyle kontrol edilmişlerdir. Deneyde 86 insan, makinanın bu işi 15 dakikadan daha az bir sürede öğrendiğini test etmişlerdir [17]. Fakat dengeli bir şekilde yürüyebilen iki ayaklı bir makinayı asla yapamadılar.

Dinamik dengelemenin(aktif dengeleme) önemi bazı dönemlerde bu konu üzerinde çalışan bilim adamlarınca anlaşılmıştır [34, 52, 56, 57, 58, 59, 60]. Fakat bu prensipleri kavramanın zor olmasından dolayı bu tip ayaklı makinalar inşa etmek gecikmiştir. Bu prensiplere dayanan deneyler 1970'lerden önce mümkün olmamıştır.

Kato ve meslektaşları dinamik yürüyüşe benzer iki ayaklı makina yaptılar [54, 61]. Makinanın on serbestlik dereceli hidrolik hareket mekanizması ile iki adet geniş ayakları vardı. Bu makine' da statik sürünge(static crawler) sınıfına giriyordu. Önceden planlanmış yörüngede ilerliyor, ayakların desteğiyle kütle merkezini dengede tutuyordu. Her ayağı atışta, denge merkez dışına doğru öne kayıyor, gövde devriliyor, hemen diğer adımın atılmasıyla destek sağlanıyordu. Desteği sağlamadan önce ayak da harekete göre pozisyon alarak pasif olarak denge eşitliği, aktif bir tepki gerektirmeden sağlanmış oluyordu. Burada gerçekleşen devrilme hareketlerinde de geliştirilmiş ters sarkaç modeli kullanılmıştır.

1984'te yapılan bir robot dinamik yürüyüşe benzer bir yürüyüş ile 0.5 m/dak hızla yürüdü [62]. Bu çalışmada dinamik dönüşümün en önemli noktası, bacaklı bir sistem çok karmaşık kontrol sistemi gerektirmeden dinamik davranış gösterebilir olmasıdır.

Dinamik olarak dengelenmiş ilk mekanizma, Miura ve Shimoyana tarafından yapılmıştır [55, 63]. Bu makine iki çubuktan oluşmaktadır. Bu iki çubuk, çubuklarla yürüyen insanlardan örnek alınmıştır (Şekil 1.6). Her ayağa bir destek noktası sağlanmaktadır ve mekanizmanın üç tane eyleyicisi vardır: Birer tane ileri geri hareket için ve bir tanede ayakların yan hareketi için kullanılmaktadır. Ayakların boyu değişmemekte; kalça kısmı ayakları kendine doğru çekmektedir; Bu yürüyüş Charlie Chaplin'in yürüyüşünü anımsatmaktadır.

Bu iki çubuk-ayaklı mekanizma da ters sarkaç modelini kullanmaktadır. Ayağın adım pozisyonu, bir ayağın yere bastığında ters salınımdan meydana gelen devrilme hareketi sonucunda yerini alıyor. Ayağın pozisyonu, arzu edilen durumla çıkış değişkeni arasındaki hesaba göre yerini alıyor. Gerekli hesaplamaları yapabilmek için, kontrol sistemi tablolaştırılmış verilerle doğrusal geri besleme bilgisini beraber kullanıyor. Kato'nun makinasının aksine bu makinada her dinamik transferden önce ve sonra statik denge söz konusudur. Bu makinada iki çubuk-ayaklar her zaman salınım halindedir.



Şekil 1.6 Dinamik olarak dengelenmiş ilk mekanizma [2]

Matsuoka, her bir adımda ayakların yerden kesilmesiyle meydana gelen, koşan bir makina yaptı. Amacı ise insandaki tekrarlayan zıplama hareketini modellemektir. Bu modelde bir gövde, kütsüz bir bacak vardı ve problemi basitleştirerek bacağın yere dokunma süresini uçuşma süresinden kısa tutma kabulünü yaptı. Koşmanın seri olduğı bu harekette, döngünün büyük bölümü havada (uçuş) geçerken destek olarak yere basma süresi kısalıyordu. Sonuçta salınımdan doğan devrilme hareketi önlenmiş olmaktadır. Bu model Matsuoka'ya, optimum zamanlı geri beslemeyle yavaş hız ve tam yerine zıplama konusunda stabilite sağlamıştır [64].

Matsuoka bu metodu test etmek için düzlemsel tek bacaklı bir makina yaptı. Bu makina yerden 10° eğimle yatık olarak dönen bir tabla üzerinde yer çekimsiz bir ortamda kumanda edilmiştir. Selenoidler ayaklara süratli hız sağlayarak destek periyodunu kısaltıyordu. Makina yerden saniyede 1 zıplamalık hızla zıplıyor ve ileri geri gidebiliyordu.

Bu konuda hali hazırda tekerlekli ve paletli mobil robotlar üzerine birçok çalışma vardır. Bunlar yüksek bir hıza sahip olmakla beraber ayaklı bir sisteme rakip olarak gösterilmemiştir. Bunun yanında navigasyon (yön bulma), lokalizasyon (saptama), ve haritalandırma konularında kayda değer sorunlar bulunmaktadır. Bu sorunlar robotların hareket kapasitelerinde büyük bir öneme sahiptirler ve bu konu üzerinde literatürde birçok çalışmalar mevcuttur.

Geleneksel birçok araç dünyanın hemen hemen yarısına erişememektedir. Bozuk ve uygun olmayan zeminlerde bacaklı makinalara ihtiyaç vardır. Geleneksel tekerlekli ve paletli sistemlerin verimine ve gücüne rağmen çeşitli koşullarda engelleri rahatlıkla aşabilecek yeterliliğe sahip olan sistem ayaklı robotlardır.

Mühendislik açısından bacaklı sistemler mevcut birçok zorluğu başarmak için aday gösterilmektedir. Geleneksel mobil robotların aksine bunları kontrol etmenin yolu dinamik yapılarını anlamaktan geçer. Bu davranışları incelemek için elimizde mevcut analitik yollar mevcuttur. Bu tip sistemlerde serbestlik derecesinin azlığı ve çokluğuna bağlı olarak geliştirilebilecek kontrol tasarımları tartışılmaktadır.

Bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar, ağırlık merkezinin ayaklar arasında kalması suretiyle statik dengenin kurulmasıyla ilgili olarak, Brooks' a ait Cenghis ve Case Western Robot II robotları gibi basit çözümlerdir [65].

Bir başka problem de bacaklı robotların karmaşık bir mekanizmadan ibaret olmalarıdır. Bacaklı robotlarda her zaman eyleyici sayısı arttıkça serbestlik derecesi artarken güvenilirlik azalmaktadır. Buna örnek olarak, Case Western Robot II' de hayvan şeklinde bir benzeşimine sahip olması düşünülerek 24 serbestlik dereceli kinematik bir karışıklığa gidilmiştir. Ancak ticari eyleyicilerin performans ve güç açısından yetersiz oluşu bir takım kısıtlamalara sebep olmuştur. Bu durumda, günümüz teknolojisi ile bu tip bir karmaşıklıkta hızda istenen hassasiyet ve denetim ancak düşüncede kalmaktadır.

Doğal olarak hayvanların birçok yürüyüşünde verimli ve güçlü olmaları onların kontrollü bir şekilde hareket etmelerinden kaynaklanmaktadır. Statik denge arzu edilmektedir; ancak dinamik dengedeki gibi yüksek hız ve verim elde edilememektedir. Ayrıca sistem, donanım yetersizliğini aşmak için asıl olarak dinamik çevreyle etkileşime girme ihtiyacı duymaktadır. Sonuç olarak birçok sistem dinamik olarak istenilen görevi gerçekleştirmede yetersiz kalmaktadır. Bu amaçla Raibert çalışmalarında dinamik dengeyi mümkün kılan robot yapmıştır [2].

Ancak robotların dinamik davranıştaki yeterliliği ele alınması gereken konulardan yalnızca bir tanesidir. Statik ve kinematikteki benzer uygulamalar üstün manevra kontrolünde uygun bir tanımlama getirmemektedir. Davranışsal temellerin içinde navigasyon ve yürümek için yüzey tespit sistemlerinin kullanılmasıyla dinamik temellerin önemi gittikçe artmıştır. Bu bağlamda uygun tasarım ve hareketteki çabukluk göze çarpan önceliklerdir [2].

1.4. Zıplayarak Koşan Robotlara Giriş

Zıplayarak koşma, yüksek hızlara ulaşmak için havada belirli süre kalma evrelerini içeren özel bir yürüyüştür. Koşma üzerine yapılan en önemli çalışmalar Marc H. Raibert ile ekibi tarafından gerçekleştirilmiştir. Farklı şekillerde bacaklı sistemler tasarlanmış ve bazıları robot olarak imal edilmiştir [2]. Bu kısımda yürüyüş üzerine birtakım tanımlamalar yapılacaktır. Bu tanımlamalar daha önceden denenmiş ve robotların koşması ve dengesi konusunda sunulmuş çalışmalardır. Amaç, doğadaki yürüyüşü anlamak ve daha iyi bacaklı robotlar tasarlamak için bilgi sağlamaktır. Bu kısım genel bir bakış niteliğinde olup, detaylar gelecek kısımda verilecektir.

Koşan robotu en basit şekilde incelemek için March H. Raibert ve ekibi tek bacaklı koşan bir robot imal ettiler. Bu robot sıçrama biçimi ile bir kanguru gibi koşuyordu. Birçok

bacakla dengelemenin zorluklarını dikkate alarak, tasarımı tek bir bacak üzerinde ele alıyordu. Dinamik denge ve dinamik modelleme tek bacaklı robotun temel sorunudur. Herhangi sayıda bacakla yürüme ve koşma için algoritmalarının geliştirilmesine tek bacaklı robotun getirdiği problem ve çözümler öncü olabilir.

Marc H. Raibert tarafından yapılan çalışmada iki temel parça vardı: Gövde ve bacak. Gövde robotun çalışmasını sağlayan eyleyiciler ve gerekli donanımı taşıyan karkastı. Bacaklar ise tek bir doğrultuda açılıp kısılabilen ve yay özelliği bulunan teleskopik bir elemandı. Duyargalar gövdenin eğim açısını, kalçanın açısını, bacakların uzunluğunu, yaydaki gerilmeyi ve yer ile temasını ölçüyordu. İlk robot düzlemde kumanda edilmek üzere sabitlendi. Böylece aşağı yukarı, ileri geri hareket ediyor ve dönebiliyordu. Robota ağırlık merkezine yakın bir yerden kablolarla gereken güç sağlanırken bilgisayardan da denetimi sağlanıyordu.

Bu robot için koşmak ve zıplamak aynıydı. Koşmaya ait çevrimin iki tane evresi vardı. Birinci evre bacağın yer ile temas ettiği “duruş” veya “destek” evresi olarak adlandırılan ve bacağın gövdenin ağırlığını desteklemesi ve sabit bir pozisyonda durması olarak gösterildi. Duruş evresinde, sistem basit bir ters-sarkaç gibi salınıyordu. “Uçuş” olarak isimlendirilen diğer evrede kütle merkezi belirli bir mesafe ilerliyor ve bacaklar yüksüz ve serbestçe hareket eder konumda oluyordu [2].

Bacaklı robot teknoloji çalışmalarının başlangıç tarihinden itibaren günümüze kadar yapılan çalışmaları aşağıda oluşturduğumuz Tablo 1.1’ de görülmektedir. Bu tabloda bacaklı makinelerin yapılış tarihleri, kimler tarafından yapıldıkları ve çalışma konusuna ait özellikler verilmiştir.

Tablo 1.1 Yıllara Göre Yapılan Bacaklı Robot Çalışmaları

TARİH	ÇALIŞMAYI YAPANLARIN ADI	YAPILAN ÇALIŞMANIN ADI
1854	Lucas [5]	İlk olarak yürüyebilen bacaklı bir mekanizmanın tasarımı.
1872	Muybridge [3-4]	Koşan hayvanların resimleri çekilerek yürüme karakterlerinin öğrenilmesi
1893	Lewis A. Rygg [6]	Mekanik at.
1945	Wallace [66]	Zıplayan tekerlekli bir mekanizma.

1950	Gabrielli and Von Karmen [67]	Hareket eden araçların enerji ile ilgili esas temelleri.
1960	Hildebrand [68]	Hayvanların hareketlerine genel bakış.
1961	Morrison [15], Space General	Sekiz bacaklı yürüyebilen robot.
1963	Cannon, Higdon and Schaefer [49]	Ters sarkaç modelinde denge için kontrol sistemi.
1968	Frank and MCGhee [31]	Phony Pony' nun basit sayısal mantık ile yürüme kontrolleri.
1968	Mosher and Liston [17]	General Electric'te inşa edilen dört bacaklı adlı robot
1969	Bekker [69]	Engeli yüzeylerde araçların hareketliliklerindeki genel problemler.
1969	Sitek [70], Bucyrus-Erie Co.	Yürüyen çubuklar.
1970	Liston [16]	Yürüyen robotlara tarihten bakış.
1972	Vukobratovic and Stepaneko [51]	Bacaklı robotlar üzerine yapılan teorik çalışmalar.
1973	Dawson and Taylor [71]	Hayvanların yürürken ve koşarken bacaklarında enerjiyi nasıl depoladıkları.
1975	Grillner [72]	Fizyoloji ile ilgili araştırmacıların harika görüşleri.
1976	Margaria [73]	Hayvan hareketlerine biyomekaniksel bakış.
1976	Wetzel and Stuart [74]	Fizyoloji ile ilgili araştırmacıların harika görüşleri.
1976	Herman [75]	Omurgalı ve omurgasızlarda hareket prensipleri.
1976	Pearson [76]	Hayvanların hareketlerine genel bakış.
1976	Marr [77]	Birbirleri ile etkileşimli olan robotlar ve biyoloji hakkında daha fazla nasıl öğrenebiliriz.
1977	Cavagna, Heglund and Taylor [78]	Hayvanların yürürken ve koşarken bacaklarında enerjiyi nasıl depoladıkları.
1977	Alexander and Goldspink [79]	Hayvan hareketlerine biyomekaniksel bakış.
1977	Hemami and Golliday [53]	Bacak hareketleri ile ilgili kontrol teoriği.

1977	McGhee [29]	Altı bacaklı yürüyen robotun bacaklarının hareket koordinatlarının sayısal olarak bilgisayar ile bulunması.
1977	Gurfinkel [22]	Altı bacaklı yürüyebilen USSR robotunun bilgisayar ile Hybrid kontrolü.
1978	McMahon and Greene [80]	İnsan bacaklarının mekanizma yapısının incelenmesi.
1979	McMahon and Grene [81]	Hayvanların yürürken ve koşarken bacaklarında enerjiyi nasıl depoladıkları.
1980	Hirose and Umetani [40]	Dört bacaklı robotların merdivenleri tırmanması, bir nesneyi geçebilmesi için kullanılan basit sensörler. Bacak mekanizmaları için basit kontroller.
1980	Kato [54]	Hidrolik iki bacaklı yürüyüş.
1980	Matsuoka [82]	Bir bacağın düzlemsel ortamda zıplarken dengelenmesi.
1981	Hoyt and Taylor [83]	Hayvan hareketlerine biyomekaniksel bakış.
1981	Miura-Shimoyama [55]	İki bacaklı mekanizmanın üç boyutlu ortamda dengeli yürümesi.
1982	Murphy [84], Carnegie Mellon University(CMU)	Düzlemsel tek-bacaklı robot olduğu yerde zıplama özelliği kazandı, 1.2m/s'lik hızla hareket özelliği kazandı, mekanik olumsuzluklar giderildi ve küçük cisimler üzerinden zıplama özelliği kazandı.
1983	Murphy [85], Carnegie Mellon University(CMU)	Tek bacaklı robot açık alanda koşturuldu ve üç boyutlu düzlemde dengelenmesi sağlandı. Hızı ise 2.2 m/s idi.
1983	Murphy [85], Carnegie Mellon University(CMU)	Murphy, dört ayaklı model için pasif dengelemeli zıplamayı keşfetti
1983	Sutherland [86]	Bilgisayar, hidrolik ve insan paylaşımlı işler. İnsan sürücülü altı bacaklı taşıyıcı robot.
1983	Odetics and Russell [42]	Altı bacaklı robotun hareket performansları.
1984	McMahon [87]	Hayvan hareketlerine biyomekaniksel bakış.
1984	Hirose [23]	Hareket eden araçların enerji ile ilgili esas temelleri.

1984	Hodgins, Koechling ve Raibert [88], Carnegie Mellon University(CMU)	Kediler ve insanların da yürüyen robotlar gibi simetrik yürüyüşe sahip olduğu bulundu.
1984	Hodgins, Koechling ve Raibert [88], Carnegie Mellon University(CMU)	Dört ayaklı koşma gerçekleştirildi. Sanal bacaklar tek bacaklı kontrol algoritmalarının kullanılmasına müsaade etti.
1985	Hodgins, Koechling ve Raibert [88], Carnegie Mellon University(CMU)	Düzlemsel iki ayaklı robot, tekli ve çift bacakla koşma esnasında yürüyüş değiştirme özelliği ile koşma işlemini gerçekleştirdi. Azami hızı 4.3 m/s' dir
1985	Hildreth and Hollerbach [89]	Birbirleri ile etkileşimli olan robotlar ve biyoloji hakkında daha fazla nasıl öğrenebiliriz.
1986	Raibert [2],Cambridge MA	Bacaklı robotlarda denge.
1989	Song and Waldron [90], Cambridge MA	Mekanik yürüme ve uyarlamalı süspansiyonlu araçlar.
1995	Pratt [91]	İki bacaklı yürüyen robotların kontrolü ve dinamiği.
1999	Guckenheimer and Johnson [92]	Hibrid sistemler.
2000	Buehler, Saranli, Papadopoulos, and Koditschek [93]	Hayvanlar ve makinaların uyarlamalı hareketleri.
2001	Hirose [94]	Çok yönlü robotlar için yeni bir bakış
2002	Saranli [95]	Altı bacaklı bir robotun dinamik modeli.
2002	McMordie [96]	Altı bacaklı bir robotun zıplayarak yürümesi.
2003	Neville and Buehler [97]	Altı bacaklı bir robotun iki bacağı ile koşması.

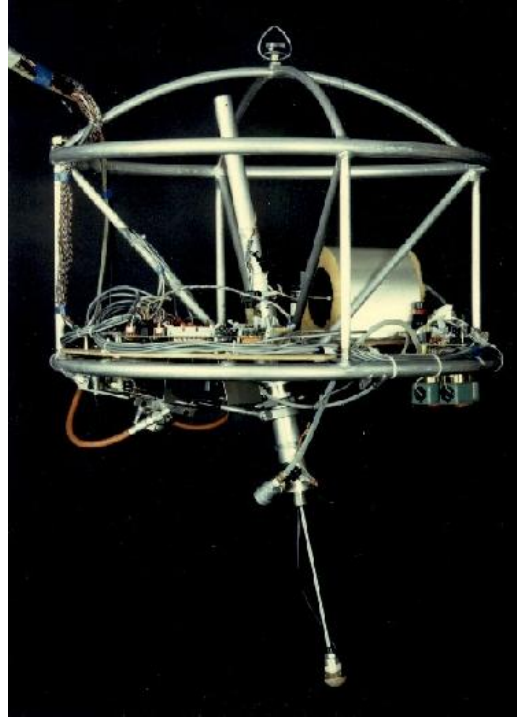
2003	Campbell and Buehler [98]	Rhex robotunun merdivenleri tırmanması.
2004	Sato [99]	Bir eğleyicili düzlemsel zıplayan robot.
2005	Poulakakis, Smith and Buehler [100]	Dört bacaklı zıplayarak yürüyen robot.
2007	Soyguder and Alli [101]	Hexapod altı bacaklı yürüyebilen bir robotun tasarımı ve prototipi.
2008	Soyguder and Alli [102]	ROBOTÜRK SA-2 isimli tek eğleyicili sekiz bacaklı robot.
2009	Soyguder and Alli [103]	SLEGS isimli merdiven tırmanabilen Hexapod Robot.

1.5. Robotlarda Üç boyutlu Hareket

Şimdiye kadar tanımladığımız sistemler düzlemde kontrol ediliyordu; ancak daha gelişmiş sistemler kendilerini üç boyutlu düzlemde dengelemek zorundadır. Düzlemsel kontrol algoritmaları, üç boyutlu hareket için genelleştirilebilir mi? Bu soruya cevap vermenin yolu, hayvanların üç-boyutta hareket yapabilmelerine karşın, onların iki boyutlu düzlemde hareketinin varsayımını yapmaktır. Kanguruların zıplayarak koşmalarını incelemek için çekilen bir film bu noktada fikir vermiştir. Ayakların önü ve arkayı geniş açılarla süpürdüğü, kuyruğun ayakların zıttı yönde süpürdüğü ve gövdenin aşağı yukarı zıpladığı gözlenmiştir. Bütün bu hareketler iki boyutlu düzlemde olmaktadır.

Sesh Murthy bu hareketlerin olduğu düzlemi ileri yönlü bir vektör ile yer çekimi vektörü ile tanımladı ve buna da “*hareket düzlemi*” adını verdi [104].

Bu fikirleri incelemek için Şekil 1.7’ de görülen ikinci bir zıplayan robot imal edilmiştir [2]. Ek olarak robota yan taraflara hareketi sağlayan mafsalları yerleştirilmiştir; böylece hem yanlara hem de öne ve arkaya hareket, ek bir mekanik düzenek olmadan sağlanmıştır. Bu robot kendi kendini zıplarken dengeleyerek azami 2.2 m/s hızla yol almıştır [2].



Şekil 1. 7 Raibert tarafından yapılan tek bacaklı zıplayan monopod robot [2].

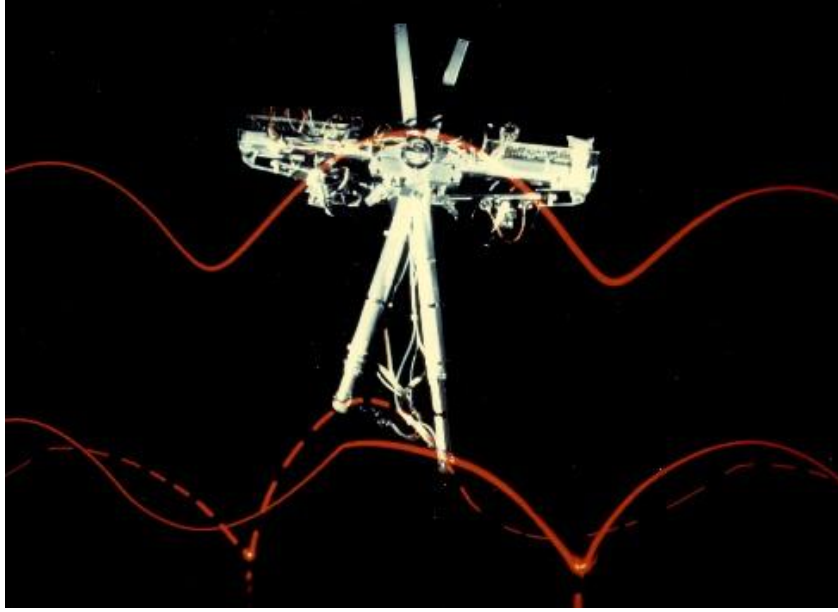
1.6. Birden Fazla Ayak İle Koşma

Bir bacaklı robotlarda olan çalışmalar elbette bu tek bacaklı sistemlere olan ilgiden doğmamıştır. Bunun amacı basit olarak aktif dengelemeyi incelemektir. Buradan çıkacak prensipler birden fazla bacaklı sistemlerin anlaşılmasında yardımcı olacaktır.

Tek bacaklı sistemde elde ettiğimiz sonuçlarla birden fazla bacaklı sistemler için kontrolü gerçekleştirebilir miyiz? Problem burada iki kısma ayrılmaktadır. İki bacaklı insan gibi koşan bir sisteme tek bacaklı sistem için oluşturulmuş algoritmalar uygulanabilir. Çünkü bacaklar sıra ile birbirini takip etmektedir. Bir evrede sadece bir bacak aktif olmaktadır; yere basmaktadır, yerden ittirilmektedir ve eyleyiciden tork uygulanmaktadır. Bu tür yürüyüşe tek bacaklı yürüyüş olan monopod adını veriyoruz. Diğer bacağın yürüyüşe karışmadığını varsayarsak tek bir bacak için kurulan zıplama, ilerleme ve duruş algoritmaları aktif olarak dengelenme için kullanılabilir. Bunu gerçekleştirmek için hangi bacağın aktif olduğunu ve diğer bacağın dışarıda kalacağını kayıt altında tutmak gerekmektedir.

Jessica Hodgins, Jeff Koechling ve Raibert tek bacaklı algoritmaları iki bacaklı robotlarda kullanmak suretiyle bu yaklaşımın verimini ölçmüşlerdir (Şekil 1.8). İki bacaklı robot tek bir bacak üstünde yolculuk edebilmiş ve ayaklar arasında geçiş yapabirmiştir. Böylece

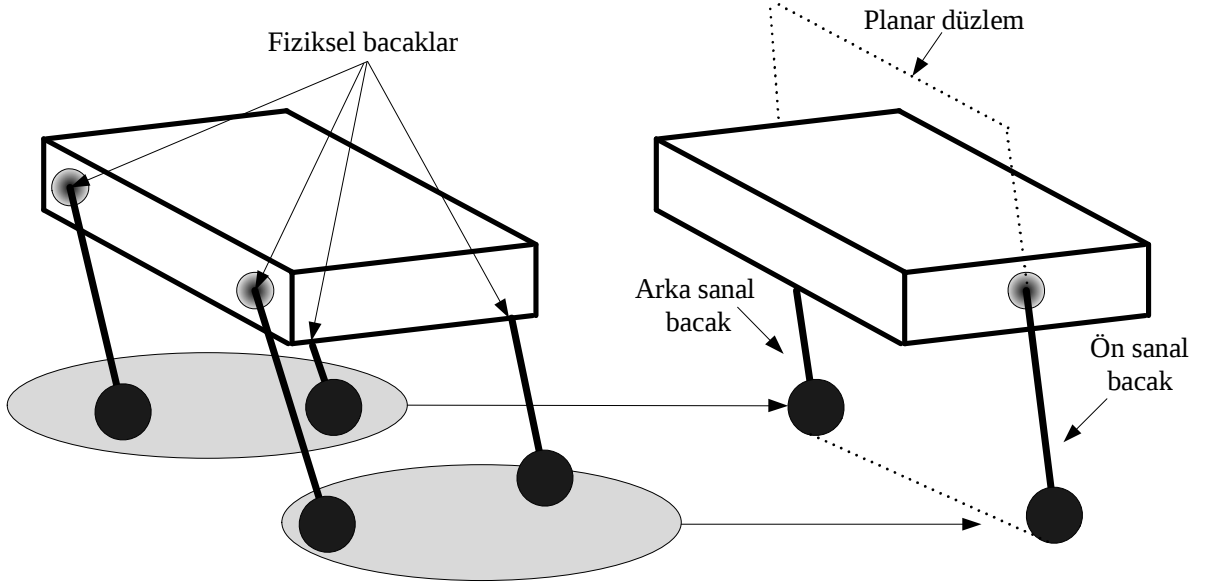
bir bacaklı sistem algoritmalarının iki bacaklı sistem üzerine uygulamanın basit olduğu bulunmuştur [88].



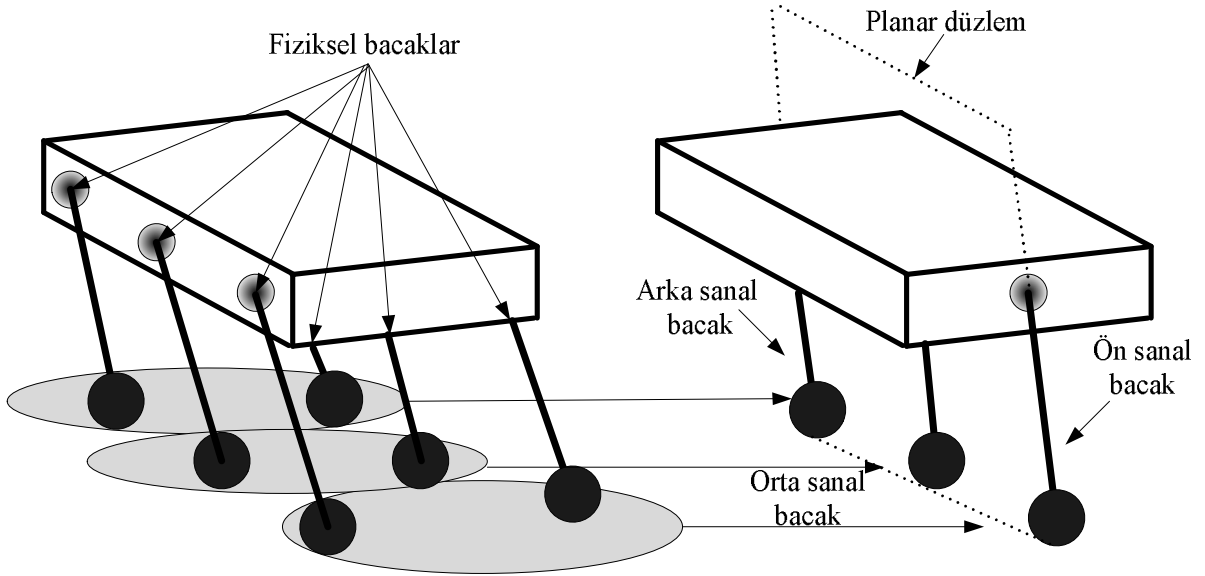
Şekil 1.8 Tek bacaklı robotun ayak yörüngesi [2].

Aynı zamanda içinde tek bir bacağın aktif olması kaydıyla bu yaklaşım birden çok bacağa uygulanabilir. Ancak yerden destek alma aşamasını eşzamanlı olarak paylaşacak bir kontrol mekanizması, bacakları tek bir eş bacak olarak kumanda edebilir. Sutherland buna **“sanal bacak”** adını vermiştir [43, 86]. Şekil 1.9 ve Şekil 1.10’ da dört bacaklı ve altı bacaklı sistemler için sanal bacak yapısı görülmektedir. Aynı anda desteği sağlayan ayaklar tek bir sanal ayak yerine geçmektedir. O zaman çoklu bacaklarda her bir çift bacak sanal bacak yapısı ile düzlemde bir tek bacağı simgeleyecek şekilde monopod, tripod ya da quadruped yürüyüş prensibiyle çalışabilir.

Bu konuyu özetlersek, altı ayaklı bir robot üçayakla modellenebilir, dört ayaklı bir robot iki ayakla modellenebilir ve iki ayaklı bir robot ise tek bacaklı modelle dengelenir ve tek bacaklı bir sistemin çözümü mevcuttur. Burada her bir çift ayak tek bir sanal ayağa indirgenecek ve tahrik sistemi sanal ayakların her birini kontrol edecektir [2].



Şekil 1.9 Dört bacaklı robot için Sanal(Virtüel) bacaklar



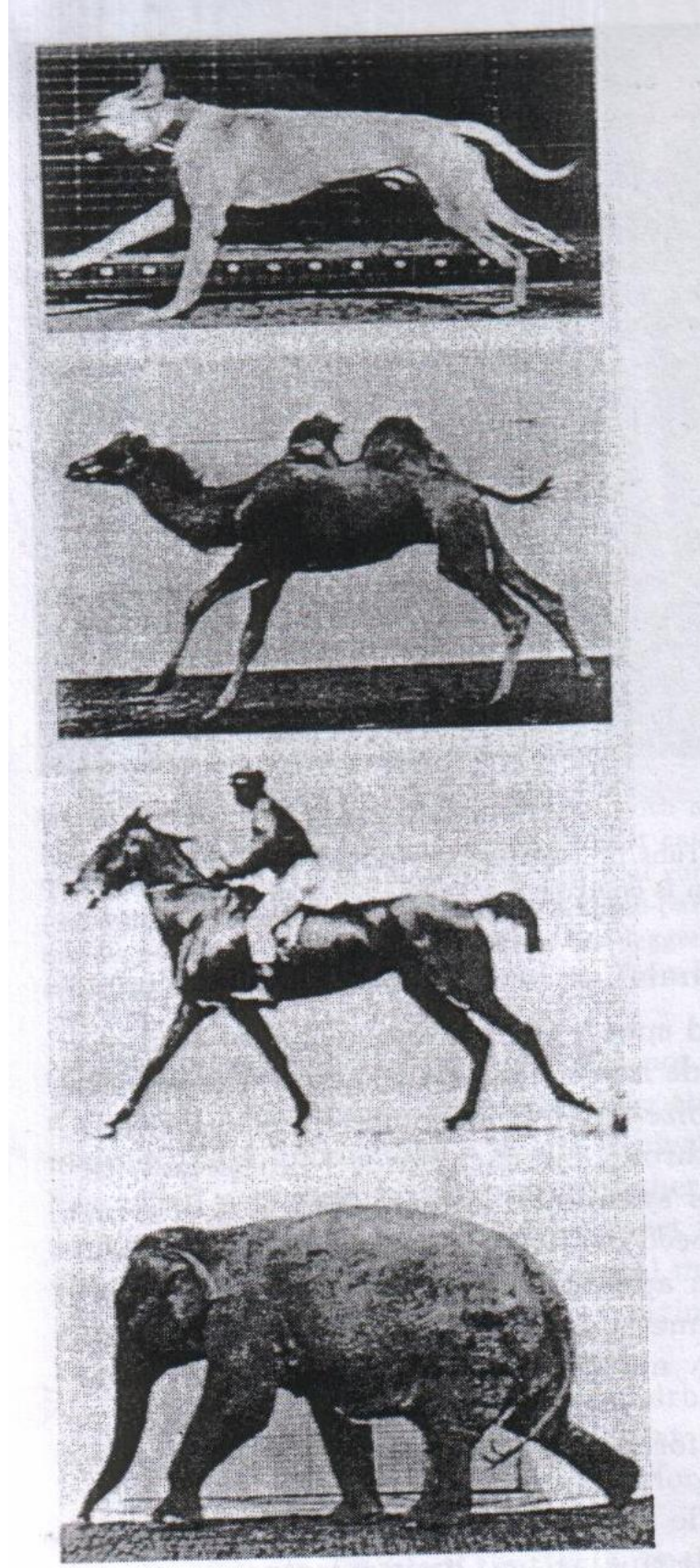
Şekil 1.10 Altı bacaklı robot için Sanal(Virtüel) bacaklar

1.7. Robotlarda ve Hayvanlarda Simetri

Simetri tüm bacaklı hayvanlarda bacakların birbirleriyle uyumlu olarak atılmasıdır. Bu hayvanlardaki bacak sayısına göre değişir. Örneğin altı bacaklı hayvanlar(böcekler) tripod şeklinde yürürler. Yani sağ ön-arka ve sol orta bacakları yer ile temas ederken, sol ön-arka ve sağ orta bacakların yer ile teması kesilerek adım atarlar. Bu her bir adımda sıralı olarak

değiştirerek yürümeyi gerçekleştirirler. Bu şekilde bacakların guruplaştırılmasına simetri denilmektedir [2]. Hayvanlardaki bu simetri olayları robotlarda da kullanılarak yürüme prensipleri oluşturulmaktadır. Ayrıca sabit bir hızda koşmak için, adımlardaki ilerleme ivmesi sıfır olmalıdır. Ayaklı robotlarda bu tip bir simetri kullanılmaktadır. Bu her adımda ayak için uygun bir pozisyon seçilmesiyle olur. Prensip olarak bu tip bir simetri, hareketi basitleştirmek için herhangi sayıda bacak ve yürüyüş şekli ile kullanılabilir.

Ayaklı robotlar için geliştirilen bu simetriler hayvanların hareketlerini anlamamızda yardımcı olur mu? Bunu anlamak için hayvanlar ve insanlar koşarken filme kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar tekil ve çift simetri kabulüne uymaktadır. Bazı durumlarda ise veriler dikkate değer bir şekilde simetrik olmaktadır (Şekil 1.11). Bu alanda Carnegie Mellon University(CMU) Leg Laboratuvarında birçok çalışmalar yapılmıştır [2].



Şekil 1.11 Hayvanlarda Simetri [4].

1.8. Literatüre Bakış

Son yıllarda mobil robotlar ile ilgili tasarım, dinamik modelleme, imalat ve farklı denetim algoritmaları konuları üzerinde birçok çalışmalar yapılmıştır [91, 92, 95, 96, 99, 101]. Mobil robotlar günümüz teknolojisinin bir gereği olarak laboratuvar dışında da ihtiyaç duyulmaktadır ve geleneksel tekerlekli, paletli ve raylı sistemlere sahip araçların tasarım sınırlarının aşılması gün geçtikçe artan bir eğilim göstermektedir. Bu sınırları aşmak için, mobil robotların bir dalı olan biyolojik esinlenmelerden yararlanarak yeni tasarımlar gerçekleştirmektir. Bu yeni tasarımlar daha çok bacaklı sistemleri içerir. Bu bacaklı sistemler bilinen geleneksel tasarımlardan çok daha fazla hareket kapasitesine ve çok yönlülüğe sahiptirler [202, 203].

Tekerlekli araçların aşamadığı engelleri aşmak için yürüyebilen araçlar ön plana çıkmaktadır. Tekerlekler sadece belirli bir yol veya ray üzerinde gitmek zorundadır ancak, birçok yer tekerlekli araçların gitmesi için uygun değildir. O halde bu tip yerlere ulaşımı yürüyebilen araçlarla sağlanabilir. Tekerlekler sadece belirli bir güzergâhı izleyebilir. Sonuçta bacaklar ulaşılabilir en uygun adımla sınırlanabilir.

Bacaklı robotlar üzerinde çalışan birçok bilim adamlarının ana hedefleri; bacaklı robotun dinamik olarak dengeli bir zıplayarak yürümesini gerçekleştirmektir. Tek bacaklı robot çalışmalarında en önemlilerinden biri Raibert isimli bilim adamına ait bir çalışmadır [2]. Bu çalışmada hedef, bacaklı robotu dinamik olarak dengeli zıplayarak yürümesidir. Robot ve bacak hareketlerinin dinamiği üzerinde yapılan çalışmalarının en önemlileri Raibert tarafından 1980 ve 1990 aralarında CMU ve MIT Leglabs laboratuvarlarında yapılmıştır [2]. Yazarın araştırmaları belirli bir yüksekliğe zıplama denetimi, ileri hız, ana gövdenin bacakları üzerinde sıkışarak kasılması ve tek bacaklı(monopod)-iki bacaklı(bipedal)-dört bacaklı(quadrupedal) robotlar ile dengeli bir yürüyüş için çeşitli yürüme karakterleri meydana getirmek olmuştur. Yazarın bu çalışmalarda denetim algoritmaları farklı yürüme karakterlerinde çok hızlı ve dengeli bir dinamik yürüyüşü ortaya koymuştur. Bu yürüme karakterlerine normal tripod yürüme, zıplama, koşma ve kangurular gibi zıplayarak yürümeyi örnek verebiliriz. Ayrıca tek bacaklı robot çalışmasına Sato tarafından geliştirilen tek tahrikli zıplayan robot çalışmasını da örnek olarak verilebilir [99].

Bacaklı sistem tasarımını gerçekleştirilmek için yapılan ilk çalışma, sistemin statik dengesini sağlamasına rağmen, yavaş bir hareket kabiliyetine sahipti. Bacaklı robot

alışmalarının en önemlilerinden biri Hiroses' e ait bir çalışmadır [94]. Robotun dengede kalabilmesi için, sistemin ağırlık merkezinin konumu yerdeki bacakların desteği ile oluşan bir poligon içinde sürmelidir [96].

Ayrıca başka dengeli dinamik tasarım çalışmaları da önerilmiştir. Dört bacaklı quadrupedal Scamper adında bir robot, Furusho ve meslektaşları tarafından tasarlanmıştır [191]. Scamper robotunun her bir bacağı iki eklemden oluşmuş olup sekiz adet denetim döngüsü ile hem hız denetimi hem de pozisyon denetimi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın ardından Kimura ve arkadaşları tarafından farklı yaklaşımlar da olmuştur. Biyolojik prensiplere dayalı olarak zıplayan Patrush adında bir robot tasarımı gerçekleştirmişlerdir [192]. Patrush robotunun her bir bacağı  eklemden ibaret olup üç serbestlik dereceli (SD) bir mekanizmadan oluşmaktadır. Kalça, diz eklemlerinde motor yerleştirilirken, bacak ucu eklemine motor yerleştirilmemiştir.

Daha farklı bacak tasarımları da önerilmiştir. Bunlara rnek olarak, dört bacaklı quadrupedal yürüme karakterine sahip Scout-II adlı robottur. Bu tasarım, Buehler, Poulakakis ve Smith tarafından gerçekleştirilmiştir. Her bir bacağın kendi ekseni etrafında dönmesi için birer motor kalçalara yerleştirilmiştir. Bacaklar ktle-yay şeklinde olup robot gövdesinin ağırlığından dolayı bacağın sıkışarak kısalması ve açılması ile bacak lineer olarak boyu değişmektedir. Ayrıca daha fazla motor ile tasarlanan robotlar vardır. Buna OSU-Stanford KOLT quadrupedal adlı robotu örnek olarak verilebilir [93].

Değişik modellerde dinamik dengeli dört bacaklı yürüyebilen robot çalışmaları önerilmiştir. Murphy ve Raibert tarafından yapılan, bacak boyu denetlenebilen zıplayan robot çalışmaları mevcuttur [85]. Bu çalışmanın ardından, Berkemeier uzaysal düzlemde basit lineer yürüyüş uygulamalarını gösteren bir çalışma gerçekleştirmiştir [194]. Daha sonra Brown ve Raibert pasif döngülü hareket koşullarını araştırdı [136]. Yazarlar sistem hareketinin iki sınır durumu hakkında araştırmalar yaptılar. Robotun yer-duruş(stance) evresini ve havadaki uçuş(flight) evresini araştırdılar. Bu araştırmalar, robotun her iki evrede de eğer uygun başlangıç değerleri verildiği takdirde pasif olarak yürüme, koşma, zıplama ve zıplayarak yürüme işlemlerinin gerçekleşebileceğini göstermiştir. Son zamanlarda biyomekanik sonuçlardan yararlanarak açık döngülü ve dinamik sistem yapıları gerçekleştirilmiştir [207, 208]. Ayrıca, Poulakakis ve arkadaşlarının tasarladığı Scout-II robotu ile, uygun başlangıç şartları ve yüksek hız altında pasif olarak dengeli yürüyüş yapılabileceğini gösterilmiştir [1, 95, 132].

Formalsky ve arkadaşları yeni bir ruh ile düzlemsel dört bacaklı quadrupedal dörtnala koşan robotun faz hareketlerini araştırmışlardır [197]. Schmiedeler ve Waldron üç boyutlu ortamda quadrupedal dörtnala koşan robotun kinematik ve dinamik yapısı üzerinde çalışma yaptılar [198]. Herr ve McMahon at şeklinde quadrupedal dörtnala koşan robot üzerinde araştırma gerçekleştirmişlerdir [152].

Aynı zamanda son yıllarda artan bir eğilimle altı bacaklı dengeli dinamik tasarım çalışmaları da yapılmıştır. Altı bacaklı robotlarda tripod yürüyüşün mevcut olması denge olayını oldukça kolaylaştırmıştır. Çünkü her bir adımda yer ile üç noktadan düzlemsel bir temas sağlandığı için robotun dengede kalması oldukça kolaylaşmıştır [101]. Hexapod robot Rhex merdivenleri ve kayalıkları tırmanarak çıkabilen bir mekanizmaya sahiptir. Bu çalışmada robotun bacakları yarım hilal şeklinde olup her bir bacak için bir adet eyleyici kullanılarak toplam 6 serbestlik dereceli (SD) bir mekanizmaya sahiptir. Bu çalışma Moore ve meslektaşları tarafından gerçekleştirilmiştir [208]. Yine bu çalışmaya benzer olarak gerçek ortamdaki insanların kullandıkları merdivenleri tırmanarak çıkabilen bir hexapod robot çalışması Campbell ve Buehler tarafından yapılmıştır [144]. Buehler ve meslektaşları tarafından bir bacaklı monopod, dört bacaklı quadrupedal Scout-II ve altı bacaklı hexapod Rhex isimli robotların dinamiği üzerinde çalışmaları mevcuttur [93, 204]. Bir başka çalışmada McMordie ve arkadaşları hexapod bir robotta kullanılan eyleyicilerin dinamik modeli ile ilgili çalışmalar yapmıştır [96]. Yine McMordie ve Buehler aynı robotun zıplayarak yürümesi için denetim algoritması üzerinde çalışma yapmışlardır [206]. Hexapod robot ile ilgili farklı bir teorik çalışma Saranlı ve Koditschek tarafından gerçekleştirilmiştir. Bunlar çalışmalarında altı bacaklı hexapod bir robotun takla atma(fliping) dinamiği üzerinde uğraşmışlardır [207]. Komsuoglu ve meslektaşları hexapod robot Rhex' in üzerinde iki farklı denetleyici modeli üzerinde çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu denetleyicilerden birisi sabit eğimli bir yokuşu tırmanacak şekilde bir kontrol algoritma modeli oluşturmak diğeri de yüksek hızda zıplayarak yürüme için bir kontrol algoritma modeli oluşturmak olmuştur [208].

Rhex, Saranlı ve arkadaşları tarafından yapılan altı bacaklı tripod yürüyebilen, zıplayabilen, takla atabilen ve zıplayarak koşabilen altı serbestlik dereceli bir robottur. Rhex' in her bir bacağı kalça kısmına yerleştirilen birer adet motordan ibarettir. Yani toplam altı adet DC motor kullanılmıştır. Bacaklar düzlemsel olarak serbestçe dönebilmektedirler [95]. Rhex robot bacakları arazi ve bulunduğu ortama göre farklı mekanizmalarda tasarlanmıştır. Bunlar bir yokuşu çıkabilecek şekilde, su da yüzebilecek şekilde, merdiven çıkabilecek şekilde ve zıplayarak koşabilecek şekilde tasarlanmıştır. Yine Saranlı ve arkadaşları her kalçasında birer

adet eyleyici bulunan bir hexapod robotun tasarımı, modellenmesi ve denetimini içeren çalışmaları mevcuttur [210].

Yukarda ki tüm çalışmaların temelini oluşturan dinamik yapı Kütle-Yay Ters-Sarkaç modelidir. SLIP modeli bacaklı robotları oluştururken bacaklı yaratıklarından esinlenerek kullanılan en basit modeldir. Bu modelin ilk yaratıcıları Cavagna [209], Alexander gibi biyoloji ile yakından ilgili insanlar tarafından ortaya atılmıştır [79]. Daha sonra birçok bilim adamları tarafından yaygın bir şekilde kullanılmıştır [1, 92, 95, 96, 152, 205, 206].

Yapılan literatür taraması sonucunda yapay zeka olarak bilinen ileri denetim algoritmalarının bir arada kullanıldığı ve karşılaştırıldığı çalışmalara rastlanmamıştır. Aynı zamanda bu çalışmada birçok yapay zeka ileri denetim teknikleri ile bacaklı robotların dengeli olarak zıplayarak yürüme işlevinde ilk defa kullanılmaktadır. Özellikle dört bacaklı quadrupedal robot ve altı bacaklı hexapod robotların zıplayarak dengeli yürüme işlevleri bulanık ağ tabanlı ileri yapay zeka denetim algoritmaları ile yazarın bilgisi dâhilinde ilk defa uygulanan yöntemlerdir. Ayrıca bu çalışmada zıplayarak yürümenin fazları esnasında yapılan denetim eylem sayısı, yazarların literatür bilgisi dahilinde daha önceden yapılan çalışmalardaki denetim eylem sayısından daha azdır. Sonuç olarak, farklı modellerde ki bacaklı robotların zıplayarak dengeli yürüyebilmesi için gerçekleştirilen ileri denetim yapay zeka algoritma uygulamaları ve zıplayarak yürümenin fazları esnasında daha az sayıda yapılan denetim eylem metotlarının bir arada uygulanması literatür açısından tezin farklılığını ortaya koymaktadır.

1.9. Teze Genel Bakış

Birinci bölümde mobil robotların günümüz teknolojisinin ve çağdaş yaşamın bir gereği olarak ihtiyaç duyulduğu hakkında genel yönleriyle bilgi verilerek çağımız teknolojisindeki yeri açıklanmıştır. Bacaklı robotların, sınırlı hareket kapasitelerine sahip geleneksel tekerlekli, paletli ve ray sistemli araçlara göre üstünlükleri açıklanmıştır. Ayrıca, farklı sayıda bacak içeren tek bacaklı(monopod), dört bacaklı(quadrupedal) ve altı bacaklı(hexapod) robotların yürümeleri, koşmaları, tırmanmaları ve zıplayarak yürüme dinamikleri hakkında genel bilgiler verilmiştir.

Takip eden bölümde bacaklı robotların dinamik yapılarının oluşturulmasında kullanılan yay-kütle ters sarkaç(SLIP) modeli üzerinde araştırmalar ortaya konmuştur. Doğadaki tüm bacaklı hayvanların modellenmesinde yaygın olarak kullanılan SLIP modelin yararları

açıklanmıştır. Modellemede doğadaki bacaklı hayvanların bacaklarının lineer bir yay gibi davrandığı açıklanmaktadır. Bu nedenle hayvanlarda her bir bacağın lineer yay gibi davrandığı düşünülmekte ve bacaklı robotların tasarımında SLIP ile modellemenin doğruluğu hakkında ki bulgular verilmektedir. Ayrıca SLIP model için gerekli esaslar açıklanmıştır. Daha sonra zıplayarak yürümede gerçekleşen kapalı dinamik döngüler hakkında durum modeli verilmiştir. Kapalı dinamik döngü içinde gerçekleşen bacaklara ait durumlar, evreler ve olaylar gibi terimlerin ne manaya geldikleri açıklanmıştır. Ayrıca sistemin denetim parametreleri hakkında genel bir araştırma yapılmıştır.

Bölüm 3’de basit düzlemsel ortamda kütle-yay ters sarkaç(SLIP) modelin dinamiği şekillerle açıklanmıştır. Model üzerinde kullanılan dinamik ve SLIP denetim parametreleri verilmiştir. Kütle-Yay Ters Sarkaç ile modellenen sistemin Serbest Cisim Diyagramı(SCD) oluşturulmuştur. Ayrıca SLIP ile modellenen tek bir bacaklı(monopod) sistemin düşey zıplamada gerçekleştirdiği sayısal benzetimler grafiklerle açıklanmıştır.

Daha sonraki bölümde tek bacaklı robotun kinematik ve dinamik modeli gerçekleştirilmiştir. SLIP ile modellenen ve zıplayarak yürüyen tek bacaklı robot modeline ait dinamik denklemler Langrange metodu ile çıkartılmıştır.

Bölüm 5’de ise bölüm 4’ de kinematik ve dinamik denklemleri çıkartılmış olan tek bacaklı robotun iki boyutlu düzlemde pasif denetim ile sayısal benzetim sonuçları grafiklerle gösterilmiştir. Ayrıca sistemin kararlılığı hakkında bilgi veren faz eğrileri ve geçiş eğrileri elde edilmiştir.

Bir sonraki bölümde dört bacaklı quadrupedal robotun düzlemsel sistem modeli tanımlanmıştır. Daha sonra sisteme ait kinematik ve dinamik model oluşturularak hareket denklemleri oluşturulmuştur. Ayrıca quadrupedal sisteme ait evreler, olaylar, evre seçim metotları ve geçiş fonksiyonları tanımlanmıştır.

Bölüm 7’de ise dört bacaklı quadrupedal robotun düzlemsel ortamda zıplama modeli tanımlanmıştır. Daha sonra sisteme ait robot değişkenleri, robot parametreleri, denetim ve başlangıç değerleri tanımlanmıştır. Ayrıca sisteme ait PD denetim metodu açıklanmıştır. Bu denetim metotların hangi evrelerde aktif olduğu belirlenmiştir. Daha sonra denetim algoritmalarının performanslarını incelemek amacıyla PD denetim algoritması ele alınmış ve düzlemsel ortamda dört bacaklı quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlevi için tasarlanan

denetim algoritmasına ait blok diyagram ve PD denetim akış diyagramı tanımlanmıştır. Bu bölümün en sonunda denetim algoritmalarının performanslarını incelemek amacıyla ilk olarak PD denetim algoritması ele alınmış ve düzlemsel ortamda dört bacaklı quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlevi gerçekleştirilerek sistem cevapları grafiksel ve tablo halinde sunulmuştur. Bu denetim algoritmasının quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlevi için uygunluğu irdelenerek tartışılmıştır.

Bölüm 8’de altı bacaklı hexapod robotun düzlemsel sistem modeli tanımlanmıştır. Daha sonra sisteme ait kinematik ve dinamik model oluşturularak hareket denklemleri oluşturulmuştur. Ayrıca hexapod sisteme ait evreler, olaylar, evre seçim metotları ve geçiş fonksiyonları tanımlanmıştır.

Takip eden bölümde altı bacaklı hexapod robotun düzlemsel ortamda zıplama modeli tanımlanmıştır. Daha sonra sisteme ait robot değişkenleri, robot parametreleri, denetim ve başlangıç değerleri tanımlanmıştır. Ayrıca sisteme ait PD denetim metodu açıklanmıştır. Bu denetim metotların hangi evrelerde aktif olduğu belirlenmiştir. Daha sonra denetim algoritmalarının performanslarını incelemek amacıyla ilk olarak PD denetim algoritması ele alınmış ve düzlemsel ortamda altı bacaklı hexapod robotun zıplayarak yürüme işlevi için tasarlanan denetim algoritmasına ait blok diyagram ve PD denetim akış diyagramı tanımlanmıştır. Bu bölümün en sonunda denetim algoritmalarının performanslarını incelemek amacıyla ilk olarak PD denetim algoritması ele alınmış ve düzlemsel ortamda altı bacaklı hexapod robotun zıplayarak yürüme işlevi gerçekleştirilerek sistem cevapları grafiksel ve tablo halinde sunulmuştur. Bu denetim algoritmasının hexapod robotun zıplayarak yürüme işlevi için uygunluğu irdelenerek tartışılmıştır.

Bölüm 10’da ise sistemin denetimi için alternatif bir çözüm olarak yapay zeka tekniklerinden biri olan bulanık mantık kullanılmıştır. Bu bölümde yapay zeka olarak bilinen ileri denetim denetimi olan Bulanık Mantık Denetleyicisinin yapısı ve morfolojisi açıklanmıştır.

Daha sonraki bölümde denetim algoritmalarının performanslarını incelemek amacıyla yazarın bilgisi dahilinde literatürde ilk olarak gerçekleştirilmiş olan bacaklı robotlar için Bulanık Mantık Denetim Algoritmasının tasarımı ele alınmış ve düzlemsel ortamda dört bacaklı quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlevi için tasarlanan denetim algoritmasına ait blok diyagram ve Bulanık Mantık Denetim akış diyagramı tanımlanmıştır. Ayrıca Bulanık Mantık Denetim sistemine ait giriş ve çıkış parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra denetim

algoritmalarının performanslarını incelemek amacıyla yazarın bilgisi dahilinde literatürde ilk olarak gerçekleştirilmiş olan Bulanık Mantık Denetim Algoritmasının uygulanması ele alınmış ve düzlemsel ortamda dört bacaklı quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlevi gerçekleştirilerek sistem cevapları grafiksel ve tablo halinde sunulmuştur. Bu denetim algoritmasının quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlevi için uygunluğu irdelenerek tartışılmıştır.

Bölüm 12’de denetim algoritmalarının performanslarını incelemek amacıyla yazarın bilgisi dahilinde literatürde ilk olarak gerçekleştirilmiş olan altı-bacaklı robot için Bulanık Mantık denetim algoritmasının tasarımı ele alınmış ve düzlemsel ortamda altı bacaklı hexapod robotun zıplayarak yürüme işlevi için tasarlanan denetim algoritmasına ait blok diyagram ve Bulanık Mantık Denetim akış diyagramı tanımlanmıştır. Ayrıca Bulanık Mantık Denetim sistemine ait giriş ve çıkış parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra denetim algoritmalarının performanslarını incelemek amacıyla yazarın bilgisi dahilinde literatürde ilk olarak gerçekleştirilmiş olan Bulanık Mantık Denetim Algoritmasının tasarımı ele alınmış ve düzlemsel ortamda altı bacaklı hexapod robotun zıplayarak yürüme işlevi gerçekleştirilerek sistem cevapları grafiksel ve tablo halinde sunulmuştur. Bu denetim algoritmasının hexapod robotun zıplayarak yürüme işlevi için uygunluğu irdelenerek tartışılmıştır.

Bir sonraki bölümde sistemin denetimi için alternatif bir çözüm olarak yapay zeka tekniklerinden biri olan Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyicisi(ANFIS) kullanılmıştır. Bu bölümde yapay zeka olarak bilinen ileri denetim olan Ağ Tabanlı bulanık Mantık Denetleyicisinin yapısı ve morfolojisi açıklanmıştır.

Bölüm 14’de ise denetim algoritmalarının performanslarını incelemek amacıyla yazarın bilgisi dahilinde literatürde ilk olarak gerçekleştirilmiş olan ANFIS denetim algoritmasının dört-bacaklı robot için tasarımı ele alınmış ve düzlemsel ortamda dört bacaklı quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlevi için tasarlanan denetim algoritmasına ait blok diyagram ve ANFIS akış diyagramı tanımlanmıştır. Ayrıca ANFIS sistemine ait giriş ve çıkış parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra denetim algoritmalarının performanslarını incelemek amacıyla yazarın bilgisi dahilinde literatürde ilk olarak gerçekleştirilmiş olan ANFIS algoritmasının uygulanması ele alınmış ve düzlemsel ortamda dört bacaklı quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlevi gerçekleştirilerek sistem cevapları grafiksel ve tablo halinde sunulmuştur. Bu denetim algoritmasının quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlevi için uygunluğu irdelenerek tartışılmıştır.

Bölüm 15’de denetim algoritmalarının performanslarını incelemek amacıyla yazarın bilgisi dahilinde literatürde ilk olarak gerçekleştirilmiş olan ANFIS denetim algoritmasının tasarımı ele alınmış ve düzlemsel ortamda altı bacaklı hexapod robotun zıplayarak yürüme işlevi için tasarlanan denetim algoritmasına ait blok diyagram ve ANFIS akış diyagramı tanımlanmıştır. Ayrıca ANFIS sistemine ait giriş ve çıkış parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra denetim algoritmalarının performanslarını incelemek amacıyla yazarın bilgisi dahilinde literatürde ilk olarak gerçekleştirilmiş olan ANFIS algoritmasının tasarımı ele alınmış ve düzlemsel ortamda altı bacaklı hexapod robotun zıplayarak yürüme işlevi gerçekleştirilerek sistem cevapları grafiksel ve tablo halinde sunulmuştur. Bu denetim algoritmasının hexapod robotun zıplayarak yürüme işlevi için uygunluğu irdelenerek tartışılmıştır.

Bölüm 16’da son olarak, tasarımı gerçekleştirilen denetim algoritmalarının uygulamaları sonucunda elde edilen sistem cevaplarına ait sayısal değerlerin tablo halinde bir araya getirilerek kıyaslanması sağlanmıştır. Bunun için, dört bacaklı quadrupedal robot modeli ile altı bacaklı hexapod robot modelinin kendi aralarında, gerçekleştirilen denetim algoritmalarının uygulamaları sonucunda elde edilen sayısal değerler bir araya getirilmiştir. Bacaklı robotların zıplayarak yürüme işlevlerinde aldıkları deplasmana göre bacak kalçalarındaki eyleyicilerin harcadıkları enerji(J) miktarı göz önünde bulundurularak irdemeler yapılmıştır. Bacaklı sistemlerin farklı başlangıç değerlerine göre elde edilen sonuçlar tablo haline getirilerek karşılaştırma yapılması sağlanmıştır. Ayrıca elde edilen sonuçlar doğrultusunda önerilerde bulunularak, gelecekte yapılması düşünülen çalışmalara değinilmiştir.

2. TEMEL KAVRAMLAR

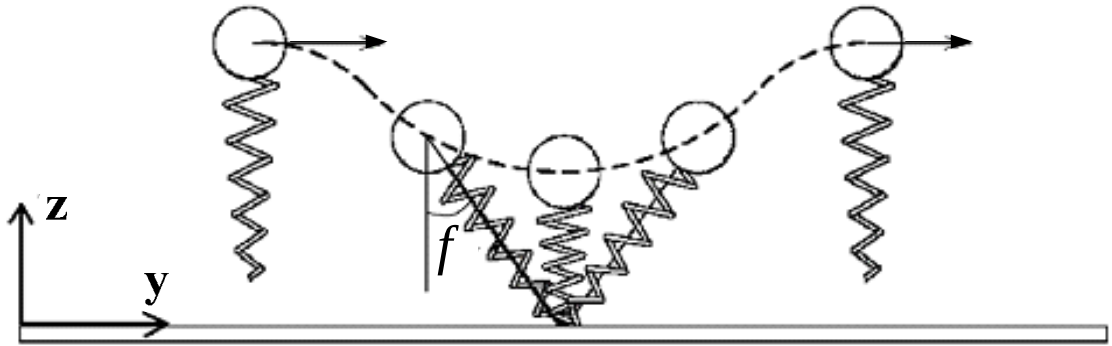
2.1. SLIP Model

2.1.1. Motivasyon

Pratik olarak bacaklı makinalar çevreyi inceleme ve savunma sanayinde kurtarma faaliyetleri için tercih edilir [105, 106]. Bunun sebebi tekerlekli araçların dağlık ve yıkılmış bina enkazları gibi engebeli arazilerde verimli olmamasıdır [107, 108]. Buna karşılık ayaklı robotlar üzerine çalışmalar devam etse de bu alan geliştirilme aşamasındadır [108, 109, 110, 111]. Bu çalışma özellikle robotlarda zıplayarak koşma ve yürüme için dinamik model geliştirme, bu tür yürüyüşleri gerçekleştirmek için yapay zeka tekniklerinden faydalanılarak, denetim algoritmaları geliştirme ve simülasyonları ile ilgilidir.

Doğaya baktığımızda hayvanlar engebeli arazilerde yüksek performans elde etmektedirler. Örneğin çitalar 31 m/s hızla koşarken kangurular 16 m/s hızla zıplarlar. Biyomekanikçi' ler hayvan hareketlerini incelerken araştırmacılar da elde edilen bulguları robot tasarımında kullanılmaktadırlar. Son otuz yıldır yay-kütle ters sarkaç(SLIP) modeli üzerinde araştırmalar yapılmaktadır [112, 113, 114, 115, 116, 117]. SLIP modeli, hayvanların kütle merkezini noktasal bir kütle, bacakları da doğrusal(lineer) bir yay olarak kabul eder [118]. Bu kabulleri ifade eden şekil Şekil 2.1' de görülmektedir. Ayakların ağırlığı da kütle merkezinde olduğu düşünülür.

Sonuç olarak SLIP modelde fiziksel bir ayak yoktur; fakat gövde merkezi ile yer arasında sanal bir ayak mevcuttur. Sanal ayak kavramı genelde modellemede ve kontrolde kütesiz ayak olarak anılmaktadır. Sanal ayak lineer bir yay gibi davranır. Bu nedenle hayvanlarda her bir bacağın lineer yay gibi davrandığı düşünülmekte ve bacaklı robotların tasarımında SLIP model kullanılmaktadır.



Şekil 2.1 Yay Kütle Ters Sarkaç(SLIP) Modeli

2.2. SLIP Model İle İlgili Çalışmalar

SLIP model robot araştırmacıları tarafından son 20 yıldır kullanılmaktadır [2, 120, 121, 122, 123]. Raibert ve meslektaşları, Carnegie Mellon Üniversitesi(CMU) ve Massachusetts Teknoloji Enstitüsünde(MIT) bu konuda ilk adımı atmışlardır. Daha sonrada yapılan bütün çalışmalar hemen hemen Raibert'in SLIP modeline dayanmaktadır. Bipedal yürüyüşe ait insan görünümünde ve SLIP modele sahip bir robot, HRP1' dir [124]. Ayrıca robotun iki kolu, iki bacağı vardır ve serbestlik derecesi oldukça fazladır. Bu da aynı şekilde sanal bacaklarla donatılan bir SLIP modeldir. Bu model için basit bir denetim sunulmaktadır. Ayaklardan biri yerde iken tek serbestlik dereceli, ikisi de yerde iken iki serbestlik dereceli kontrol uygulanmaktadır. Ancak günümüzün sınırlı teknoloji şartları yüzünden motor torku limitleri sebebinden bu çalışma uygulanamamıştır. SLIP modeli üzerine çalışmalar halen devam etse de gerçek bir SLIP model oluşturulmamıştır. Araştırmacılar karmaşık mekanizmalar kurarak deneysel çalışmalar yapmıştır. The Bow Leg Hopper isimli robot Carnegie Mellon Üniversitesinde yapılmış olup gerçek SLIP modele en yakın robottur [120].

SLIP koşarak ya da zıplayarak yürüme için oldukça uygun bir modeldir [112, 113, 125]. İki boyutlu(Sagittal) düzlemde iki serbestlik derecesi bulunmaktadır. Sistem noktasal kütle olarak düşünüldüğü için alçalma-yükselme açısı ve kütleli atalet momenti yoktur. SLIP model dinamik olarak kararlıdır ve aktif olarak dengeleme gerektirmez. Bacak yer ile temas etmek için istenilen yere dokunma açısı(touchdown angle) ile yere temas edebilir [126, 127, 128, 129].

McGill Üniversitesin'deki Ambulatory Robot Laboratuar'ında yapılan robotlardan Army Research Laboratory (ARL) çalışanları esinlenmiştir. SLIP modelde, ARL çalışanları aşağıdaki robotlarda başarılı bir şekilde modelleyip denetim etmişlerdir:

MONOPOD II: İki elektrik motoru ile tek monopod(tek bacaklı) robotun denetiminin yeterli olduğu gösterilmiştir [130].

Scout II: Dört bacaklı robot için her bir bacakta tek bir eğleyici kullanımının manevra için yeterli olduğu gösterilmiştir [131].

Rhex: Altı bacaklı hexapod robotta her bir bacak için tek bir eğleyici ve PD denetimin yeterli olduğu gösterilmiştir [132, 133].

2.3 SLIP Model Tasarımı

Şimdiye kadar oluşturulan farklı bacak sayısına sahip robot modelleri, ters sarkaç modelinin uygulamasını gerçekleştirerek tasarlanmışlardır. Sayısal benzetim(simulasyon) için SLIP modele ait mekanik parametreler ve basit kontrolör algoritmaları ilerdeki bölümlerde tasarlanmıştır. Yapılan simülasyonlar ile daha önce literatürde gerçekleştirilen gerçek deney düzeneği üzerinde yapılan uygulamaların uygunluğu ile incelenmiştir.

Bu bölümde ve daha sonraki bölümlerde tek bacaklı, dört bacaklı ve altı bacaklı robotlarda SLIP modelini anlayabilmek için gerekli esaslar sunulmaktadır. Sonra, tasarıma ait mekanik parametreler anlatılmaktadır. Daha sonra da zıplama ve zıplayarak yürümek için basit kontrol algoritmaları geliştirilmiştir.

2.3.1. SLIP Model için Gerekli Esaslar

SLIP modelin gerçekleştirilmesinde kullanılacak parametreler:

- Bacak
- Kalça eklemi
- Kalçada bir aktuatör
- Bacakta bir tane pasif yay
- Bacakta bir tane sönüm(damper) elemanı
- Bacak kütlesi gövdeğe göre ihmal edilebilecek büyüklükte olmalıdır($m_b \ll m$)
- Sanal bacak
- Sistem için uygun başlangıç şartları
- İki boyutlu düzlemsel(planar) ortam

2.3.2. Mekanik Parametre Tasarımı

Bu kısımda mekanik parametrelerin yöntemleri açıklanmıştır. SLIP model noktasal kütle ve yaylı bir bacadan oluşmaktadır. O nedenle, SLIP modelin oluşturulabilmesi için mekanik parametreler olan kütle, yay katsayısı ve bacak uzunluğunun belirlenmesi gerekir.

2.3.3. Noktasal Kütle

Bir servo eyleyici, bir bacak ve temel parçalar robot üzerinde kesin olacağından bunlar kütlelerin temel elemanlarını teşkil etmektedirler. Bu temel parçaların toplam kütlesi ile birlikte noktasal kütle olan monopod, quadroped ve hexapod robotun her birinin ana gövdesi $10kg$ ' dır.

2.3.4. Bacak rijitlik Katsayısı

Bacaktaki yay robotun istenen duruş süresine göre seçilebilir. Duruş süresi yaklaşık olarak yay titreşiminin rezonans periyodunun yarısıdır. Bu robotun direk kütle-yay modelindeki doğal frekanstan hesaplanabilir.

Yay sabitinin(k) maksimum değeri eyleyicinin açısal hızı, duruş hali ve enerji kazanımı gibi değerlerle sınırlandırılırken; minimum değeri de gidiş mesafesi ile sınırlandırılmıştır. Buna karşılık robotikte genel olarak yay sabiti için bir formülasyon bulunmamaktadır. Yay sabitinin seçimine gelince, sadece maksimum ve minimum sınırlandırılmalar bilinse dahi kolay seçilememektedir. Buna karşılık araştırmacılar genelde bu değerini için fizyolojideki değerlerden yararlanmaktadırlar.

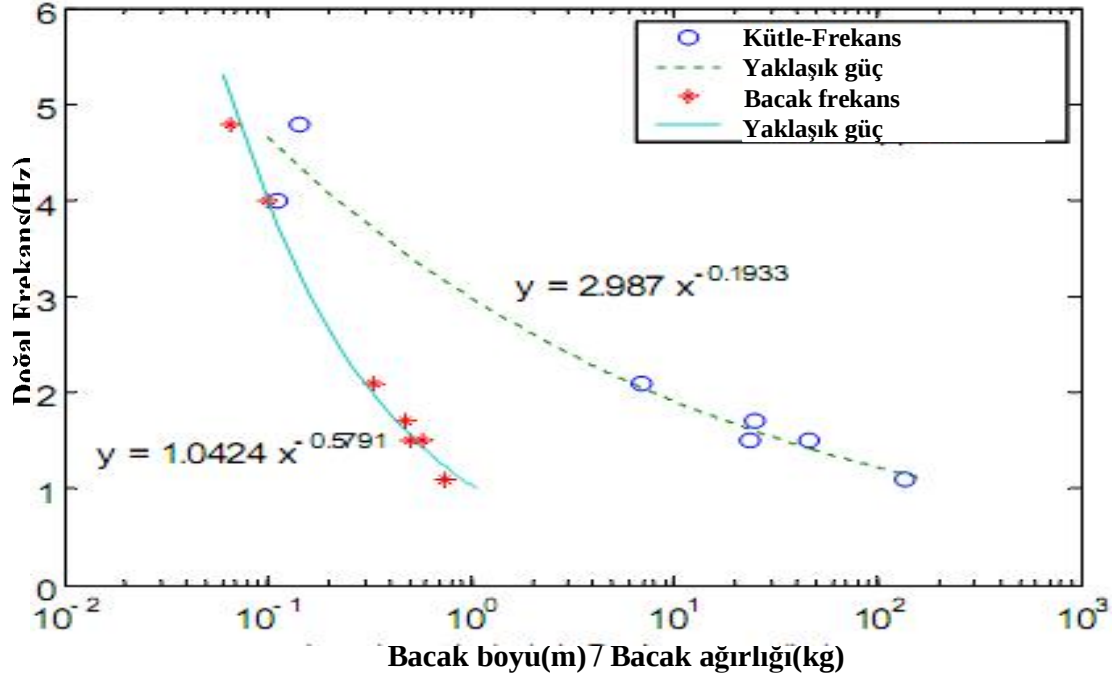
Hayvan hareketini tanımlamada en yaygın tanım, lineer bir yay olarak, ters sarkaç modelidir(SLIP). Koşan ve zıplayan hayvanlarda kütle merkezinin hareketi bacaklara lineer bir yay koyarak ele alınmıştır. Bu model genelde çoğu araştırmacılar tarafından, hayvanlardaki fizyoloji ve biyomekanik çalışmalarında kullanılmıştır [112, 113, 114, 115, 116, 117].

SLIP modelin yay katsayısı, mekanik titreşimlerindeki yay katsayısını ihtiva eder. O nedenle, yay katsayısı hareketin doğal frekansına büyük bir oranda etki eder. Bundan dolayı yapılan tüm deneysel çalışmalarda ilk önce platformun doğal frekansı araştırılmış, sonra da bunu yay katsayısının belirlenmesinde kullanılmıştır.

Ayrıca Farley' in sistemin doğal frekansını(w_n) elde etmek için bir metot uygulamıştır [117]. Şekil 2.2'de ki deneysel çalışmalarını çizdirerek iki adet formül oluşturmuştur. Bu değerler Tablo 2.1'de verilmektedir. Denklemlerden bir tanesi kütle ilişkisini, diğeri ise ayak uzunluğu ilişkisini göstermektedir.

$$f_n = 3.0m^{-0.19} \quad (2.1)$$

$$f_n = 1.0r_0^{-0.58} \quad (2.2)$$



Şekil 2.2 Sistemin doğal frekansını tespit eğrileri [99]

Tablo 2.1 Bazı hayvanların fiziksel özellikleri

Hayvan İsmi	Ağırlık M(kg)	Bacak Boyu Lo(m)	Hız U(m/sn)	Anlık Bacak Boy Değişimi(1/sn)
Kanguru Faresi	0.112	0.099	1.8	18.2
Beyaz Fare	0.144	0.065	1.1	16.9
Küçük Kanguru	6.86	0.33	3.0	9.1
Köpek	23.6	0.50	2.8	5.6
Keçi	25.1	0.48	2.8	5.8
Kırmızı Kanguru	46.1	0.58	3.8	6.6
At	135	0.75	2.9	3.9

İlk eşitlikten;

$$m = 0.5kg \text{ için } f_n = 3.4Hz \quad (2.3)$$

$$m = 1.0kg \text{ için } f_n = 3.0Hz \quad (2.4)$$

Eyleyici performansının ayak hareketinin bir ileri bir geri salınımına bağlı olmasından dolayı çok yüksek frekanslar arzu edilmez. Çok yüksek frekanslar duruş pozisyonu süresini artırır. Bunu sonucu olarak sıkıştırma için potansiyel enerjiye dönüşüm ve sonra ileriye hareket için kinetik enerjiye dönüşüm süresi de azalır. Bu frekans ve yay rijitliği için üst sınırı oluşturur. Sonuçta başlangıç olarak 3 Hz lik bir frekans göze alınabilir. ARL robotlarında zıplama için 2Hz lik bir frekans seçilmiştir [134]. Bu uzun yıllar sonucu oluşmuş bir tecrübeden kaynaklanmaktadır. Fakat daha önceki çalışmalarda yapılan robotların kütle değerleri çok büyüktür. Örnek olarak Rhex yaklaşık 8kg' dır. Eğer Farley' in metoduna göre Rhex robotunun 2.1 nolu denklemdeki eşitlik ve 8 kg' lık kütleyle göre doğal frekansını hesaplasaydı, eşdeğer bir hayvan ağırlığına göre doğal frekans 2Hz olacaktı. Bu da ARL de kullanılan doğal frekansın aynıdır. Ancak arzu edilen frekans sabit 2Hz lik bir frekans olmayıp eşitlik 2.1 nolu denklem vasıtasıyla bulunabilir. Ayrıca doğal frekans yay sabiti(k) ve kütle(m) ile ifade edilebilir:

$$f_n = \frac{1}{2p} w_n = \frac{1}{2p} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.5)$$

$$k = (2p f_n)^2 m \quad (2.6)$$

Bu metot ile hesaplamalar sadece düşey zıplama için geçerlidir ve yaklaşık olarak düzlem zıplamada kullanılabilir. Bu yaklaşımın gerçekçiliği birçok çalışmada gösterilmiştir [119, 135, 136].

Robot yere inerken, sıkıştırmada oluşan enerji kaybını azaltmak için bacak boyunca yay kullanmak uygundur. Genel olarak yere dokunmada düşey hız fazla ise, sıkıştırma ya da çarpmada ki dinamik yapı, robot dinamiğini anlamak için önemlidir [137, 138]. Bununla birlikte, eğer eksen ayak boyunca uzanan yay kullanılır ve rijitliği yeterince küçük olursa, sıkıştırma kaybı neredeyse ihmal edilebilir [129].

2.3.5. Bacak Boyu

Robotun ayak uzunluğu, ayağın ucuyla kalçadaki eksen merkezi arasındaki maksimum uzunluktur. Uçuş evresinde(flight), ayak uzunluğu hemen hemen aynıdır. Sadece ayakucundaki m_t kütesinden dolayı ihmal edilebilecek şekilde çok küçük salınımlar oluşmaktadır. Yere dokunma(touchdown) evresinde ise ayak kısalırken yay sıkışma boyu artar.

Bacak boyu için gerekli mesafe, düşey zıplama için enerji dönüşüm yasaları kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu yaklaşım Raibert'in çalışmasına dayanarak kabul edilebilir [119]. Uçuş evresinin tepe noktasında(apex), düşey hız($\dot{B}_z$) sıfır olmakta ve yay sıkışması($l_0 - l$) sıfır olmaktadır. $\dot{B}_z$ robot gövdesinin ağırlık merkezinin düşey eksenindeki ilerleme hızını, l_0 robot bacağın sıkışmamış haldeki ilk boyunu ve l ise bacağın anlık boyunu temsil etmektedir. Yer(stance) evresinin en alt seviyesinde(bottom) hız($\dot{B}_z$) sıfır olmaktadır. O nedenle, aşağıdaki eşitlik düşey zıplama için enerji dönüşüm yasalarından faydalanılarak formüle edilmiştir:

$$mgb_{z_tepe} = mgb_{z_alt} + \frac{1}{2}k(l_0 - l)^2 \quad (2.7)$$

m (kg) robotun kütesini, g (m/sn²) yerçekim ivmesini, $\dot{B}_{z_tepe}$ robot gövdesinin ağırlık merkezinin en üst tepe noktasında düşey eksenindeki ilerleme hızını, $\dot{B}_{z_alt}$ robot gövdesinin ağırlık merkezinin en alt noktasında düşey eksenindeki ilerleme hızını ve k rijitlik katsayısını temsil etmektedir.

2.3.6. Denetim Tasarımı

Daha sonra bu tezde, yürüyüş için denetleyici tasarlanacaktır. Denetleyici, yürüyüşün evreleri için gerekli olan durum modeli ve durum modelinde mevcut olan verileri içermektedir. Durum modeli, robotun dinamiğini ve bunlar arasındaki geçişleri içeren durumlar olarak tanımlanabilir. Durum modelinde, her bir bacağın hareketi ve durumu için bir tane denetim metodu vardır.

2.3.7. Durum Modeli

Durum modeli sistemin dinamiğine bağlı olarak kendini ve belirli hareketleri tanımlayan bir arkaplan olarak düşünülebilir. Bu arkaplan sistemin dinamiğini oluşturan bir kapalı döngüden ibarettir. Sistemin dinamiği uçuş ve yer evrelerinden oluşmaktadır. Bu evreler arasındaki geçişler “olaylara” bağlıdır.

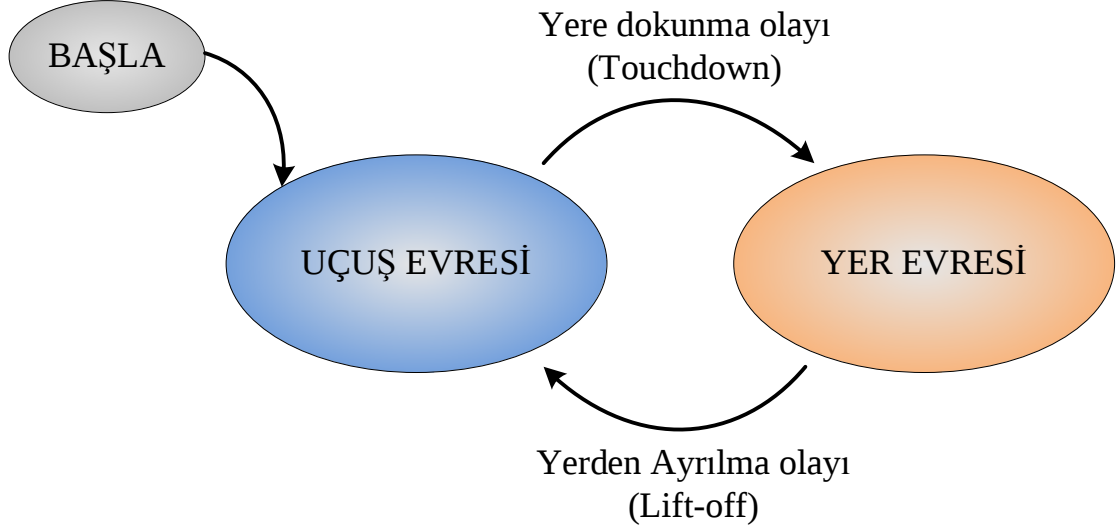
2.3.7.1. Evreler ve Olaylar

Genel olarak, bacaklı robotlar ardışık evrelerin ve olayların gerçekleştiği dinamik sistemlerdir. Bacakların durumlarına göre dinamik karakteristikleri değişmektedir. Örnek olarak bacaklar, yerde iken sadece bir manipülatör olarak, birden fazla bacak olduğunda kapalı zincir mekanizması ve bacaklar yerde olmadığında serbest ya da uçan mekanizma olarak tasarlanır.

Yer(stance) evresinde ayaklardan en az biri yerdedir ve ileri hareket için gövdeyi destekler. Bazı araştırmacılar, çok ayaklı bir robotta iki ayak eş zamanlı bu hareketi yapıyorsa bunu çifte-duruş evresi olarak adlandırırlar [139]. Fizyoloji alanında bazı araştırmacılar ise onun yerine yer ile temas evresi olarak adlandırırlar. Uçuş(flight) evresi hiçbir ayağın yere değmediği ve gövdeinin havada olduğu evredir. Bu durumlara bacak yürüyüşünde evreler olarak adlandırılırlar [119].

Bacaklı robotun zıplamasında evre değişimi için iki tane durum söz konusudur: Bacak yerde iken ve yerde değil iken durumlarıdır. Eğer bacak yerde ise, duruş evresi(stance phase) olarak adlandırılır. Bacak yerde değil ise uçuş evresi(flight phase) olarak adlandırılır. Evrelerin geçişleri ise iniş ya da yere dokunma(touchdown) ve havalanma ya da yerden temas kesme(lift-off) olmak üzere iki olay şeklindedir. Robot dengede olduğu sürece bu evreler arasında geçiş yaparak hareket çevrimine devam eder. Sonuçta bacaklı robot, bu evrelerden ikisinde gerçekleştirir ve bu evreler robotun dinamik karakterini belirler.

Şekil 2.3 bu iki evre arasındaki döngüyü göstermektedir. Görüldüğü gibi evreler olaylar boyunca gerçekleşir. Bu yürüyüş için gerekli olan en basit veri aygıtı olmaktadır ve ileride anlatılacağı gibi simülasyon için denetim şemasını teşkil etmektedir.



Şekil 2.3 Sistemin evreleri ve olayları arasındaki geçişler [118]

2.3.7.2. Durumlar

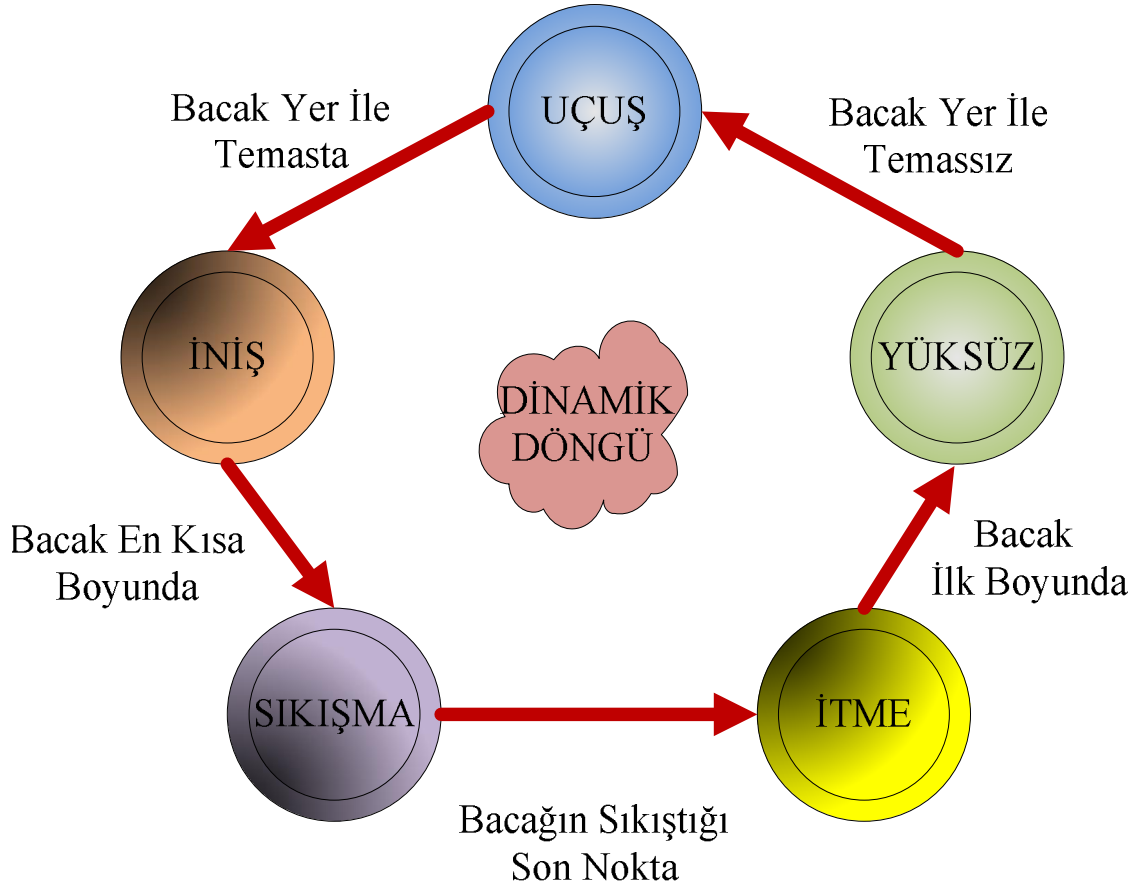
Evreler ve olayların belirlenmesinin yanında, ayakların durumunu belirlemek için dinamik karakterlerinden bağımsız olmaksızın durumlar tanımlanmalıdır. Genelde her bir durum için bir denetim metodu belirlenmektedir. Bu da yürüyüş denetiminin tamamını etkilemektedir. İki kısma ayrılmış olan olaylar, durum tanımlamaları boyunca açıkça ifade edilmelidir. Olaylar genelde denetimler arasındaki geçişte zamanlamayı ifade eder ve dinamik karakterlerin olaylarla birlikte değişme göstermesi gerekmez.

Ayrıca durumları belli sayıda kısıtlamak sistemin daha basit bir şekilde çalışması ve daha verimli olması için önemli bir etkidir. Durumlar olarak önce uçuş(flight) ve yer(stance) evreleri tanımlanmakta sonrada yere dokunma olan iniş ve yerden ayrılma olan kalkış olaylarını durumlar arasındaki geçişler olarak tanımlanabilmektedir. Burada robotun hali açıklanırken “durum” ve “evre ” terimleri eşanlamda kullanılmıştır. Her bir durum için bir denetim metodu kullanılmıştır. Denetim metotlarından bir tanesi yer evresinde diğeri ise havada iken uygulanan denetimdir.

2.3.7.3. Dinamik Döngü

Durum modeli zıplayarak yürüyüş denetimini anlatan ve kısımlara bölünmüş olaylardan ibaret bir akış diyagramını ifade eden bir kavramdır. Zıplayan bir robotun denetimi için durum ve olaylar tanımlanmış ve durum modeli diyagramı içinde kapalı bir şekilde tamamlanmıştır. Bu denetimler yer-duruş evresi ve uçuş evresi için olacaktır. Bu iki denetim metodu verimli ve

gerekli olmakla birlikte bu tip bir denetim en basit durum modeli olmaktadır. Örneğin Raibert çalışmasında, zıplayan bir robot için gerçekleşen beş durumu Şekil 2.4’ de ki gibi ifade etmektedir [119].



Şekil 2.4 Bacaklı robot zıplarken oluşan beş durumlu dinamik döngü [119]

2.3.7.4. Evre Seçimi

Robot her bir evre için farklı bir denetim eylemine(şemasına) ihtiyaç duymaktadır. Çünkü her bir evrenin dinamiği ve içerdiği denetim algoritması farklıdır. Geliştirilen bir denetim algoritma modeli ile sistemin hangi dinamik yapıyı çözeceği işlemini $s_i \in \{0,1\}$ kümesi ile kodlanmıştır. Yani bir bacak yerde ise 0 değeri havada ise 1 değeri şeklinde bacağın hangi konumda olduğunu bize ifade etmektedir. Denetimler arasında geçişi sağlamak için “refleks denetim” kullanılmıştır. Refleks denetim, robotun her bir evreye uygun zamanda geçtiğini algılaması için gerekmektedir. Yani, iniş ya da yere dokunma evresine ve yerden ayrılma ya da uçuş evresine geçişleri algılaması gerekmektedir.

2.3.7.5. Bacak Denetimi

Robot hangi evrede olduğunu bilmekte ve bacak denetiminide bu evreye göre yapmaktadır. Yer-duruş evresinde, ayak arkaya doğru bir yay çizerek yere etki kuvveti uygular. Uçuş evresinde, ayak ileriye doğru salınım yaparak kendini arzu edilen iniş açısına ya da yere dokunma açısına(touchdown angle) getirir. Burada SLIP model özelliğinden faydalanarak robotun kendini dengelemesi için ek bir çaba sarf edilmemiştir; ancak yalnızca kalkış ve iniş için ayak açıları belirlenmiştir [126, 127, 128].

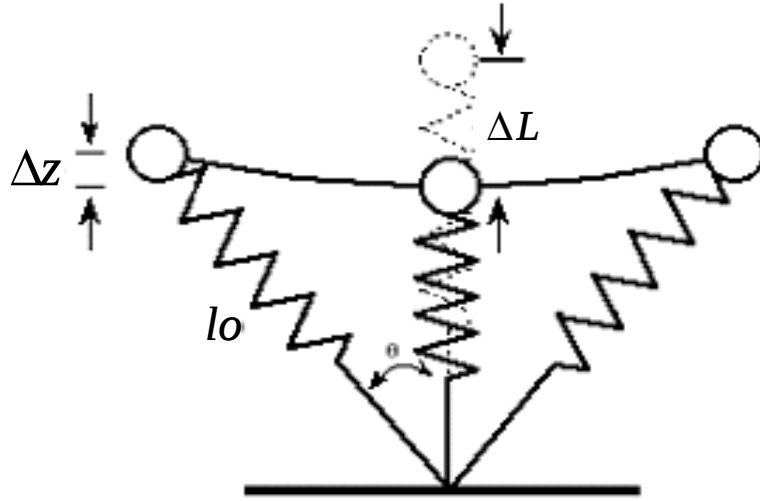
2.3.7.6. Yere Dokunma ve Yerden Ayrılma Açıları

Yere iniş açısı ya da yere dokunma açısı f^{td} ile temsil edilmektedir. Bu açı gövdenin dikey eksen ile bacağa ait kalça mafsallı eksen arasında ölçülmüştür. Bu açı robotlarda bacak sayısına bağlı olarak denetim algoritmasında referans olarak kullanılmaktadır. Bu açı değerleri ileri ki konularda denetim algoritma modellerinde verilmektedir. Kalkış açısı ya da yerden ayrılma açısı f^{lo} ile temsil edilmektedir. Aynı zamanda bu açıda robotlarda bacak sayısına bağlı olarak denetim algoritmasında referans olarak kullanılmaktadır. Kalkış açısı süpürme açısına bağlı olarak denetlenmektedir. Bacak yere dokunduktan sonra ve yerden temasını kesinceye kadar süpürdüğü açıya süpürme açısı denir. Süpürme açısı f^{swl} ile temsil edilmektedir. Bu açı değerleride ileri ki konularda denetim algoritma modellerinde verilmektedir. Bu değerler genelde deneysel sonuçlara göre belirlenmektedirler. Fakat bu değerler genelde sabit değerlerdir. Bazen belirli aralıklarda ki değerlerde de başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir.

Bacaklı hayvanlardan elde edilen verilere göre bacakların yere dokunma açıları ortalama 15° - 34° dir. Bu değerler fizyoloji açısından uygun değerlerdir [117, 119]. Araştırmalara göre iniş açısı hayvanların kütlelerine ve boyutlarına bağlı değildir; onların ileri yöndeki bağıl hızlarına bağlıdır. Bu durumda düzlemsel tek bacak için aşağıdaki ilişki gösterilmiştir. Bu ilişki tek bacağa ait SLIP modeli için ileri yönlü hız vasıtasıyla hesaplanmıştır [119]. Bu değişken bir iniş açısı içermektedir:

$$\theta_y = \frac{2l_0 \sin f^{td}}{T_s} \quad (2.8)$$

Burada $\dot{b}_y$ ileri hız, l_0 bacağın tüm uzunluğu, f^{td} iniş ya da yere dokunma açısı ve T_s ise yerde duruş süresidir. Bu eşitlikte yer-duruş evresinin ilk ve son anında bacağın boyunun eşit olduğu ve geometrik benzerliğe dayanarak iniş açısının kalkış açısına eşit ve simetri olduğu kabulü yapılmıştır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Yer-Duruş fazındaki SLIP Model [2]

Model bir yay-kütle ters sarkaç salımını anımsattığından bu sisteme ait doğal frekans 2.9 nolu denklemde verilmiştir. Bu salının yer-duruş evresinde meydana geldiğinden, yer-duruş süresi sistemin kütlesine ve bacağın rijitlik katsayısına bağlıdır. Bu ifade 2.10 nolu denklemde ifade edilmektedir;

$$w_n = \sqrt{\frac{k_l}{m}} \quad (2.9)$$

$$T_s = \frac{p}{w_n} = p \sqrt{\frac{m}{k_l}} \quad (2.10)$$

İniş ya da yere dokunma açısı için 2.11 nolu denklem düzenlenerek elde edilebilir.

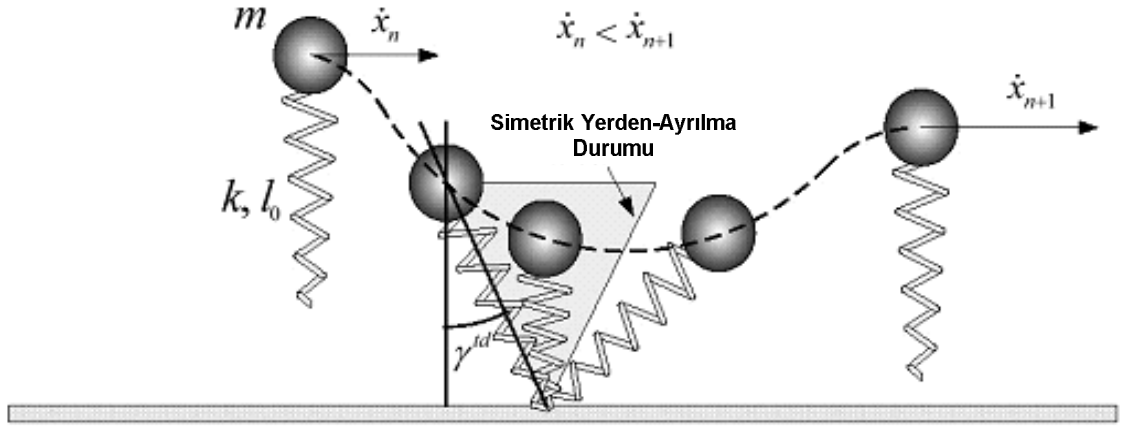
$$f^{td} = \sin^{-1} \left(\frac{\dot{b}_y T_s}{2l_0} \right) \quad (2.11)$$

2.11 nolu denklem incelenirse, iniş açısı ileri yöndeki hıza, duruş süresine ve bacak uzunluğuna bağlıdır. İleri yöndeki hız değişkendir çünkü denetime bağlıdır; fakat diğer iki parametre malzemenin mekanik karakterine bağlı olarak değişken değildir [119, 140]. Böylece 2.11 nolu denklemden iniş açısının ileri yönlü hıza bağlı olduğu anlaşılmaktadır.

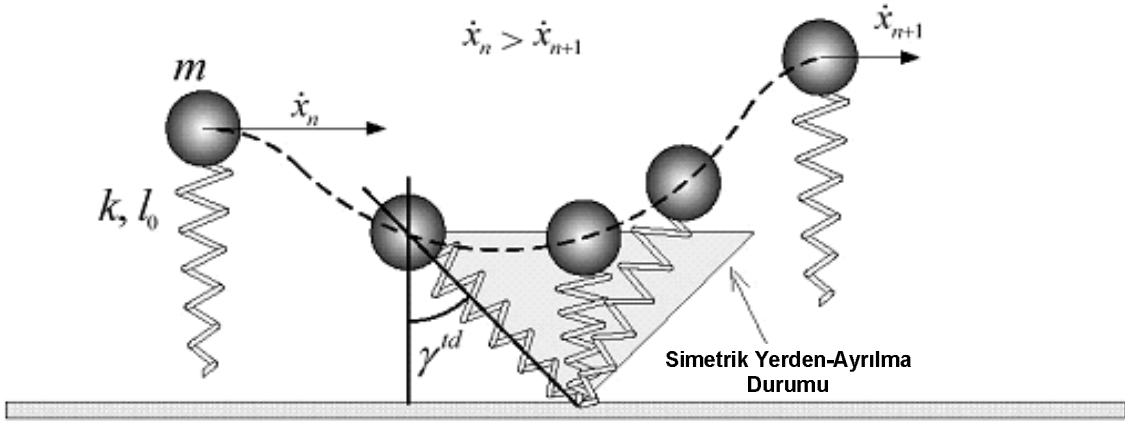
2.3.7.7. Süpürme Açısı

Süpürme açısı iniş ve kalkış açısı arasında taranan değerdir ve geometrik olarak bir simetri özelliği bulunmamaktadır(Şekil 2.6 a-b). Süpürme mesafesi korunurken, süpürmenin orta çizgisi pozitif eksende bir yere kaymaktadır. Bu kayma miktarı deneme ve yanılma yöntemi ile elde edilir ve bu dengeli bir yürümeyi devam ettirmek için istenilen bir durumdur [139].

Süpürme mesafenin kaymasının nedeni kalça torkunun düşeyde daha fazla kuvveti karşılaması ve daha hızlı olmasıdır. Eğer simetrik bir adım sağlanmış olsaydı düşey pozisyonda ve hızda bir kayıp söz konusu olacaktı. Bu da her zıplamada daha az yükseğe zıplamaya neden olacaktı. Arzu edilen yüksekliğe ulaşılabilmesi duruş evresinde kalça torkundan potansiyel enerji veya kinetik enerji kazanımının olması gerekir. Bunun için, kalça torkundan yeterli bir reaksiyon kuvveti alınması gerekir. Bu robotun yerden ayrılırken istenilen konuma ve hıza erişebilmesi içindir. Eğer süpürme aralığı düşey çizgiye yakınsa gerekli büyüklükte reaksiyon kuvveti alınmaz. Bunun yerine iniş ve kalkış açısının ara mesafesinin düşey çizgiye olan uzaklığı geniş olmalıdır. Aynı zamanda burada yay kuvvetinin korunumlu olduğu ve hiç bir enerji kaybına yol açmadığı kabul edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.6 a-b Kalça motor torklarının oluşturduğu iki durum: (a). Bacağın yerden ayrılma açısını daha geniş tutarak robotun daha ileri zıplamasını sağlamak, (b). Bacağın yerden ayrılma açısını daha dar tutarak robotun daha yükseğe zıplamasını sağlamak [118].

2.3.7.8. Enerji Dağılımı

Süpürme açısının ortasındaki eğim miktarı sadece arzu edilen zıplama yüksekliği için değil ayrıca tepki kuvveti olmadan mekanik enerjinin dağılımına da yarar.

SLIP modelindeki toplam mekanik enerji; yerçekiminden kaynaklanan potansiyel enerji, elastiklikten doğan potansiyel enerji, yatay düzlemde kinetik enerji ve düşey düzlemde kinetik enerjiden meydana gelmektedir. Buradaki enerji değerleri her bir çevrimde ve her noktada elde edilmektedir. Burada süpürme açısını kaydırdığında “Potansiyel enerji nasıl değişmektedir?”, sorusu akla gelebilir. Düşey zıplama durumunda ne süpürme açısı ne de buna bağlı eğrilik ortaya çıkmaktadır. Yani kinetik ve potansiyel enerji kalkış ve iniş durumunda aynı değere sahiptir. Bunla birlikte, düzlemsel zıplamada kinetik enerji potansiyel enerjiye veya tam tersine dönüşebilir. Enerji dağılımındaki denge kolayca bozulabilir. Bu nedenle, dengeli ve düzgün bir iş çevrimi için enerji dengesini sağlamak çok önemlidir. Buradan yola çıkarak, süpürme eğimi ve enerji dağılımı hakkında dört tane önemli noktaya değinilmiştir:

- * Kalkıştaki kinetik enerji iniştekinden küçüktür.
- * Yerçekiminden doğan kalkıştaki potansiyel enerji, iniştekinden büyüktür.
- * İnişte ileri yöndeki hızın bir kısmı kalkışta düşey hıza dönüşür
- * Kinetik ve yerçekimsel potansiyel enerji, kalkış ve iniştekiyle aynıdır. Burada enerji giriş ve çıkışlarının duruş evresi boyunca sabit durumda olduğu kabul edilir.

İlk durumda açıklanan durum, süpürme açısının eğiminden kaynaklanan kinetik enerjinin yerçekimsel potansiyel enerjiye dönüşmesidir. Zıplama hareketinin döngüsel bir şekilde sabit olması için, toplam mekanik enerji iyi dengelenmelidir. Bunun için kalkış ve inişte potansiyel enerjinin değerlerine bağlı olarak, kinetik enerjinin inişten kalkışa kadar iniş göstermesi gerekir. Bu olursa, toplam kinetik ve yerçekimsel potansiyel enerji kalkış ve inişte aynı olmaktadır.

İkinci durum, birinci duruma benzemektedir. İniş açısının mutlak değeri, kalkış açısının mutlak değerinden büyüktür. Geniş iniş açısının anlamı, iniş yüksekliğinin kısa ve dar kalkış açısının anlamı da kalkış yüksekliğinin büyük olmasıdır.

Yerçekimsel potansiyel enerji inişten kalkışa doğru artar.

Üçünü durum kinetik enerjinin dağılımıyla alakalıdır. Çünkü dar kalkış açısında, yay hareketi hızın dikey yönde dağılımını sağlar. O yüzden, yere inişte ileri yönlü hız kalkışta düşey hıza dönüşmektedir.

Dördüncü durum bu çalışmanın deneysel sonuçlarını onaylamaktadır [118]. Başarılı bir hareket çevrimi dinamik sistem düzeyinde enerjinin iyi bir şekilde kullanıldığını göstermektedir.

2.3.7.9. İlerleme Hızı

Akihiro Sato tarafından yapılan çalışmada [118], bağıl ileri yönlü hız 0.80 m/s olarak elde edilmişti. Bu değer robotun başarabileceği maksimum değer olmayabilir. Bunun sebebi akım ve tork, hız eğrisinde olduğu gibi, motor rotasyonunun yeterince doyurulmamış olmasıdır. Yüksek hız ve maksimum tork geniş bir iniş açısıyla ve kuvvetli bir ivmeyle sağlanabilir. Robot stabil bir duruma eriştikten sonra yüksek hızlarda fazla enerji tüketimine gerek duymamaktadır.

Bu çalışmada da, 0.80 m/s lik hız dikkate alınmıştır. Bununla birlikte farklı ilerleme hızları için gelecekteki çalışmalarda araştırılacaktır. 2.3.2.5.6' da anlatılacağı gibi iyi bir hareket sağlamak için farklı hızlar için farklı PD kontrol kazanç katsayıları kullanılmalıdır. Ancak, olayları daha iyi anlamak ve karşılaştırmak için tek bir hız seçmek bizim için daha anlamlı olacaktır.

Tablo 2.2' de referans olarak, ayaklı robotlar için bacak uzunlukları, hızları ve boyutsuz hızlar gösterilmiştir. Veriler, Rhex ve ROBOTÜRK SA-2 tripod yürüyüş için [141, 142], Scout II i [143], Rhex (zıplayan) [144], düzlemsel tek bacaklı zıplayan robot [145], Monopod [136], Monopod I [146], Monopod II [147], Bow Leg Hopper [148], Pnömatik monopod [149] için yapılan çalışmalarından alınmıştır. Geriye kalanlar [150] nolu referansla verilen çalışmadan alınmıştır. Sadece özel ayarlanmış Düzlemsel Bipedal Rhex ve Pnömatik monopod yüksek hızlar için yapılmıştır.

Akihiro Sato' nun çalışmasında 0.80 m/s lik hız başarı ölçütü olmaktadır. Boyutsuzlaştırma işlemine dikkat edilirse hız, uzunluğa bölündüğünde hala 1/s lik bir boyut bulunmaktadır. Referans [151] ve [152] ' e göre bu boyutsuzlaştırılmış hız olmaktadır.

Bipedal robotlar genellikle tek bacaklı robotlara göre daha hızlıdır; çünkü uçuş evresini kısaltarak duruş-yer evresinde daha seri hareketlerle ilerleme hızını artırabilir. Düzlemsel bipedal ayaklı robotlar pnömatik ve hidrolik aktuatörler içermektedir. Buna karşılık bu çalışmada SLIP zıplayan robotu DC motorla çalışmakta olup hız değeri oldukça iyidir.

Tablo 2.2 Literatürde bilinen bacaklı robotlara ait özellikler.

Bacak Sayısı	Robot İsmi	Araştırmacılar	Bacak Boyu	Öteleme Hızı	Boyutsuz Hız
			<i>m</i>	<i>m/sn</i>	<i>1/sn</i>
6	OSU Hexaod	McGhee	0.8	0.3	0.4
	USSR Hexapod	Gurfinkle	0.35	0.1	0.3
	SSA Hexapod	Sutherland	1.0	0.14	0.14
	ODEX	Odetics	1.3	0.5	0.4
	ASV	Waldron	1.90	2.2	1.2
	Rhex(Tripod gait)	Koditschek	0.17	2.17	15.9
	ROBOTÜRK SA-2 Hexapod	Soygüder, S ve Alli, H	0.19	0.054	0.28
4	PV-II	Hirose	0.87	0.5	1.1
	Quadruped	Raibert	0.66	3.0	4.5
	Scout-II	Poulakakis	0.31	1.3	4.2
	Rhex(Bounding gait)	Campbell	0.17	1.5	8.8
2	WL10-RD	Kato	0.96	0.23	0.2
	Biper-3	Miura	0.20	0.02	0.1
	Meg-2	Funabashi	0.48	0.5	1.0
	Kenkyaku	Furusho	0.72	0.8	1.1
	Planar Biped	Koechling	0.844	5.9	7.0
1	Planar one-leg hopper	Raibert	0.5	1.2	2.4
	Monopod	Raibert	0.74	2.3	3.1
	Monopod-I	Gregorio	0.70	1,2	1.7
	Monopod-II	Ahmadi	0.70	2.0	2.8
	Bow leg hopper	Brown	0.25	1.0	4.0
	Pneumatic Monopod	Harbick	0.285	1.8	6.3
	SLIP Hopper	Sato	0.12	0.8	6.7

2.3.7.10. Tepe Yüksekliği

Tepe yüksekliği robotun havada bulunduğu en yüksek mesafedir. Tepe yüksekliği genel olarak zıplama yüksekliği olarak da adlandırılır. Daha önce tasarımda ayak uzunluğu alt başlığında bahsedildiği gibi, mekanik parametrelere bağlı olarak arzu edilen yüksekliğe ulaşılmalıdır.

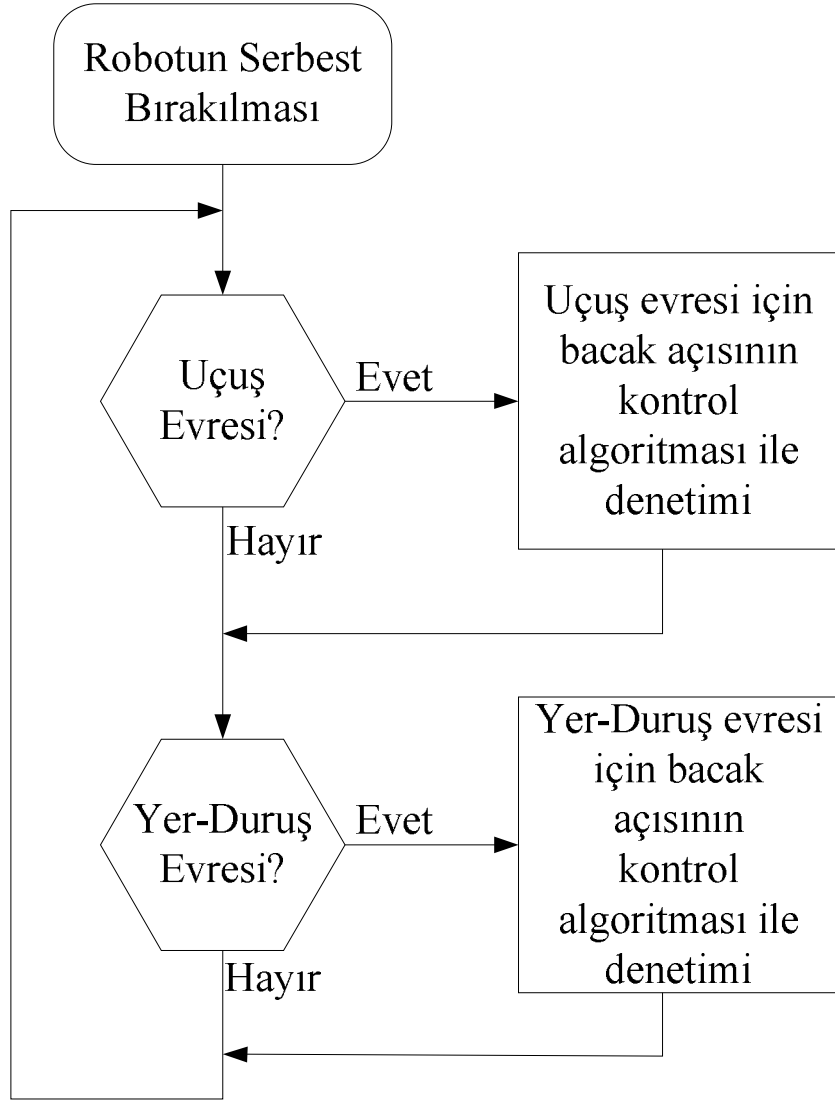
2.3.7.11. Enerji Korunumu

Daha önce tartışıldığı gibi [126, 127] ideal bir SLIP modelde enerji korunumu ve dinamik modellerle ilgili çalışmalarda bu kavram üzerinde durulmuştur [129, 153]. Hiç bir robot pratikte korunumlu değildir.

Enerji korunumu konusunda, kalça torku duruş evresi boyunca büyük miktarda enerjiye ihtiyaç duymaktadır. SLIP modelde bacağın ağırlığının olmadığı varsayılmıştır. Bu çalışmada robot, bacak ağırlığı gövde ağırlığının yanında ihmal edilerek tasarlanmıştır. Bu nedenle, robot havalandığında bacak ileri-geri birçok defa salınım yaptığında tüm dinamik sisteme enerji aktaramadığı gibi robot, potansiyel ve kinetik enerji dengesini kontrol edemez. Bu nedenden dolayı robot enerjisini duruş pozisyonunda dengelemelidir; yani mekanik enerjiyi sağlamak için kontrol duruş evresinde iş görmelidir.

2.4. Denetime Genel Bakış

Bu çalışmada tüm kontrol sistemi, performans bakımından karşılaştırabilmek için iki adet farklı denetliyicilerden oluşmuştur. İlki, kalça torkunu yer-duruş evresinde hareket ettirmek için; diğeri ise bacağı havada uçuş evresinde hareket ettirmek için kullanılmaktadır. Evreler arası geçiş fonksiyonları ile yer algılandığı zaman duruş pozisyonuna ait kontrol kısmı devreye girer. Duruş pozisyonunda denetleyici, geliştirilen denetim algoritması ile istenilen kalkış açısı ya da süpürme açısını verecek şekilde istenilen kalkış torku ya da süpürme torku elde edilir. Benzer olarak, yer tespiti algısı kesildiği zaman uçuş evresi denetliyicisi devreye girer. Denetim algoritması Şekil 2.7' de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Evreler için denetim algoritmasına ait akış diyagramı

İki kısımdan oluşan denetim algoritma sisteminin olmasının avantajları şunlardır:

- Refleks denetimle uyumlu oluşu ve adım girişi
- Açık denetimi için basit ve uygun oluşu
- Açık ortaydan uzaktayken sert oluşu (yüksek tork)
- Açık ortaya yakın iken sönümlü oluşu (düşük tork)

Şimdi burada listelenen özellikler teker teker anlatılacaktır:

2.4.1. Tepkili Denetim

Evrelere göre refleks ile denetimleri değiştirmek, her bir evrenin dinamik özellikleri farklı olduğundan gereklidir. Robot hangi evredeyse o evreye uygun denetim uygulanmalıdır.

2.4.2. Açı Denetimi

DC motorda açısal kontrolü gerçekleştirmek için yaygın olarak kullanılan birçok denetim algoritmaları mevcuttur. İleri ki bölümlerde tasarlanan denetim algoritmaları gösterilmiştir.

2.4.3. Yer-Duruş Torku

Denetim algoritmaları ile bacağın hızlı ve güçlü bir şekilde denetimini gerçekleştirmeye çalışmaktayız. Bacağı ait iniş açı doğrultusu simetri doğrultusunun açıortay doğrultusuna uzak ise yani iniş açısı geniş açı ise kalça motoru yüksek tork üretir. Sonra açıortaya yaklaşınca düşük tork üreterek yavaşlar. İnişten açıortaya gelene kadar denetleyicinin yüksek bir tork meydana getirmesi istenilen bir özelliktir.

Duruş evresi boyunca, kalça torku sayesinde ayağın yeri itmesi bir kuvvet doğurur ve robot ayaklara dik yönde ittirilir. Geniş iniş açısından dolayı robot dikeyde daha fazla kinetik enerji kazanır. Tabiki robot daha yükseğı zıpladığında potansiyel enerjiden o denli fazla yararlanılacaktır.

2.4.4. Uygun Bacak Rijitliğı

Zıplamada bacağın rijitliğı önemli bir etkindir. Birçok şekilde bu rijitlik katsayısı belirlenebilir. Bu belirleme yöntemleri uygulamalı deneysel yollarla ya da teorik olarak simülasyon çalışmalarıyla belirlenebilir. Bunlarla ilgili önemli çalışmalar mevcuttur. Simülasyon yöntemi ile rijitlik katsayısının belirlenmesi ile ilgili koşan bipedal iki ayaklı robot [129] ve deneysel bir çalışma ile ilgili ise zıplayan monopod(tek bacaklı) robot [26] çalışmaları bu yöntemlere örnek gösterilebilir.

3. BASİT DÜZLEMSEL KÜTLE-YAY TERS SARKAÇ MODEL DİNAMİĞİ

3.1. Motivasyon

Kütle-Yay Ters Sarkaç (SLIP) modeli biyomekanikçilere, kara böcekler ve insanlar gibi birçok çeşit yaratıkların hareket prensiplerinin anlaşılmasında büyük kolaylık kazandırmıştır. Bu yaratıkların yürümeleri, koşmaları, sıçramaları ve zıplamalarının modellenmesi için Kütle-Yay Ters Sarkaç modeli Şekil 3.1' de gösterilmiştir [154, 155, 156, 157, 158].

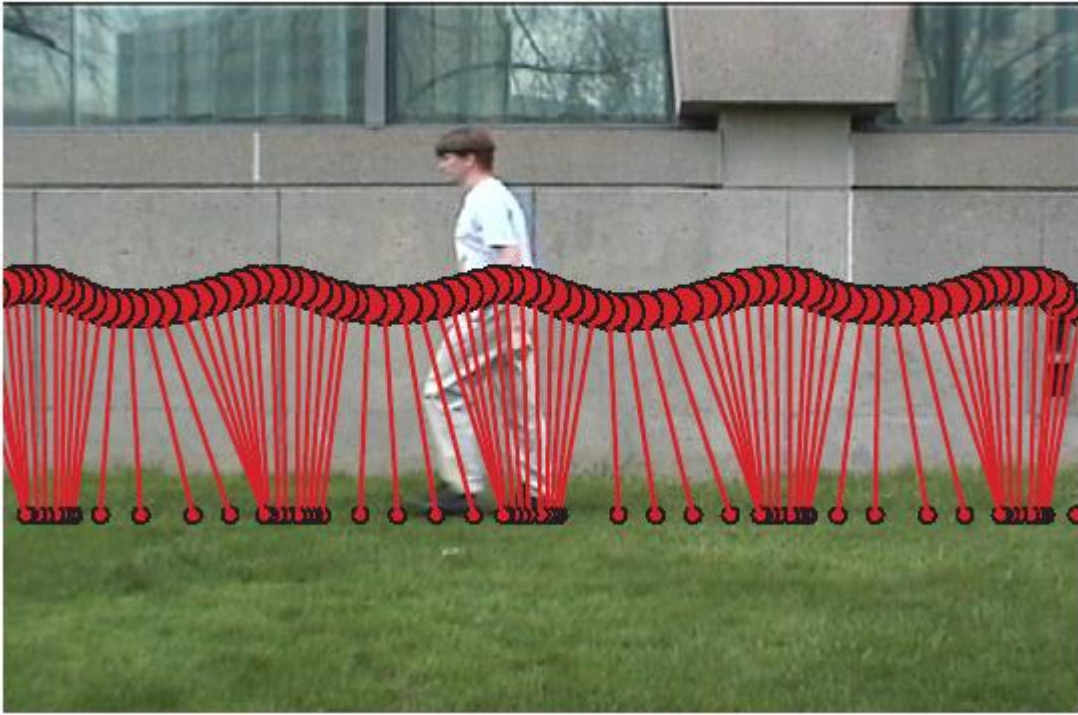
Bu model biyomekanikçiler için basit olmasına rağmen analiz ve kontrol edilmesi bakımından mühendisler için bazı zorluklar teşkil etmektedir. Model hareket bakımından karışık (hybrid) bir sistemdir. Sistem yerde ve havada farklı dinamiğe sahiptir. Özellikle yerde doğrusal olmayan bir dinamiğe sahiptir. Fakat yinede bu model yukarıda tanımlanan yaratıkların hareket prensiplerinin anlaşılmasında büyük kolaylık sağlamaktadır [159, 160]. Aynı zamanda biyolojik kanıtlar da SLIP modelinin uygun bir model olduğunu göstermiştir [161]. Bu bölümde, bu modelin robotların etkili olarak yürüme kontrolü sentezinin yapılabilirliyi incelenecektir.

SLIP modeli ile yürüme kontrolünü başarılı olarak yapan Raibert ve öğrencileridir [162]. Raibert ve öğrencileri imal ettikleri robotlarında ilerleme hız ile zıplama yüksekliklerini birbirinden bağımsız olarak denetimlerini gerçekleştirmeye çalışmışlardır. Bu çekici ve can alıcı çalışmanın başarılı sonuçları, bir dizi makalelerin gerçekleşmesine sebep olmuştur [159, 163, 164, 165].

Ayrıca bu bölümde SLIP modeli ile yürüyüş için basit bir denetim sunulmuştur. Bu model bir potansiyel enerji ya da potansiyel güce sahip olan ve sistemin yere temas halinde iken dinamiğini kolay elde edilebilecek bir yaklaşımdır. Bu sistemin dinamiği iki boyutlu düzlem yürüyüşünü temsil etmektedir. Bu düzlemsel yürüyüş modeli üç parametre içermektedir: ilerleme hızı, zıplama yüksekliği ve iş faktörü gibi parametreler robotun pürüzlü ve engebeli alanlarda yüksek seviyede başarılı bir denetimi için düşünüldüğünde çok önemli kavramlardır [166].

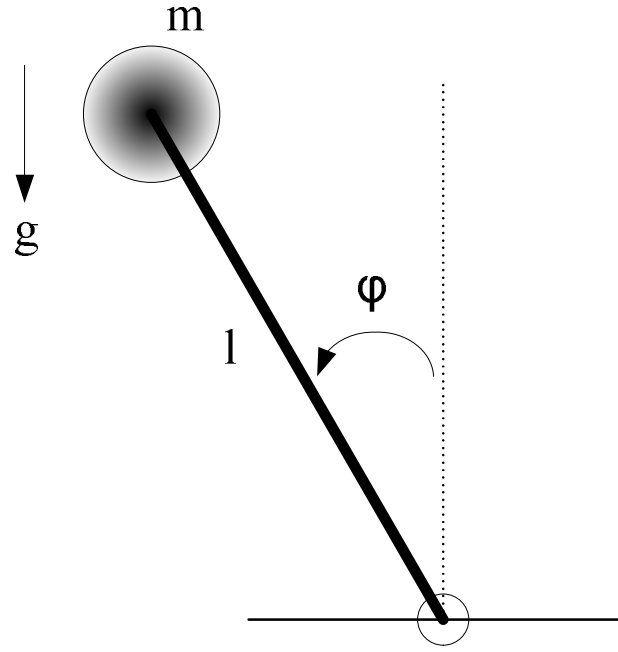
3.2. Ters Sarkaç Bacak Modeli

Ters sarkaç modeli ile yürüme arasındaki benzerlik Şekil 3.1’ de görülen resimde gösterilmeye çalışılmıştır. Bu resim bacağın kalça kısmının hareketinin video ile çekilmesi sonucu elde edilmeye çalışılmıştır [167]. Sarkaç, bacağın ayakucu ile kalçanın ağırlık merkezi arasında olan kısımdır. Sarkacın sabit olan bir ucu bacağın yer ile temas eden noktası olurken, salınım yapan diğer ucu ise kalçanın ağırlık merkezi olup, m noktasal kütlesine sahiptir. Bu benzerlik ile ters-sarkaç modelinin dinamiği, yürüme dinamiğinin anlaşılmasını kolaylaştırmıştır.



Şekil 3.1 Yürüyüşte Ters-Sarkaç bacak modeli [91]

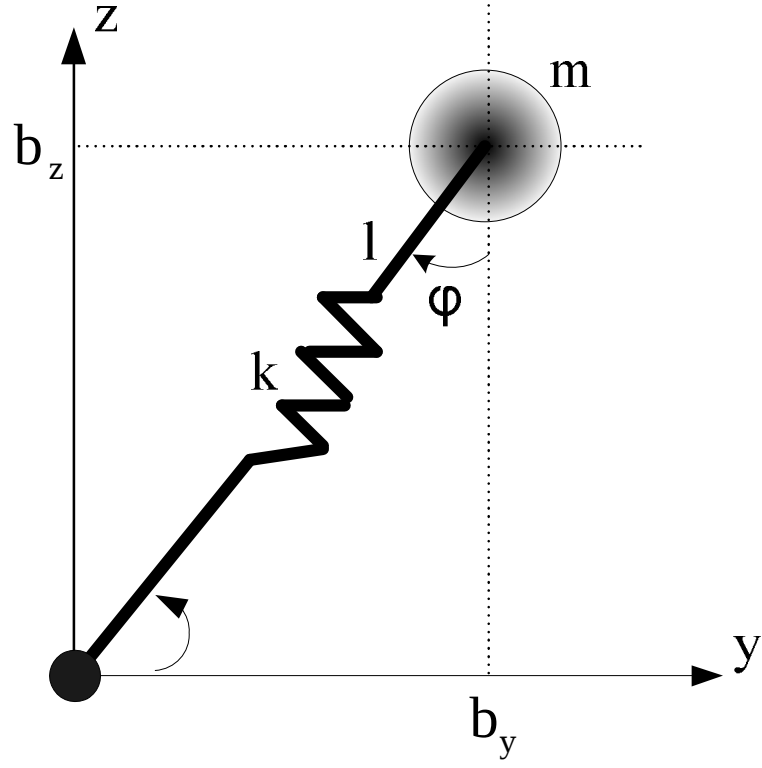
Şekil 3.2’ de l boyunda ve ucunda m noktasal kütleli bir ters sarkaç modeli gösterilmiştir. Bacağın ucu sürtünmesiz bir yüzeyde olduğu kabul edilmektedir. Noktasal kütleye(m) ise g yer çekim kuvveti etki etmektedir. Noktasal kütle yürüyen sistemin kütlesini temsil ederken, bacak ise sarkacı temsil etmektedir.



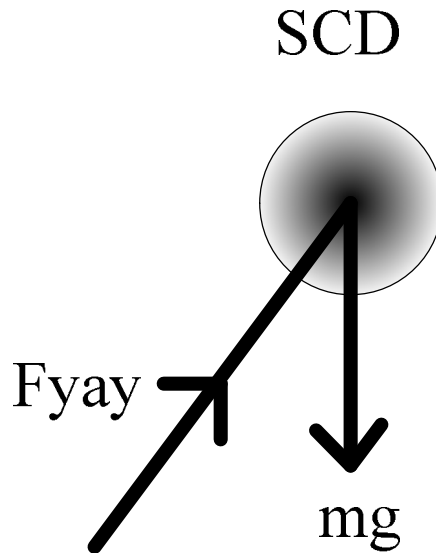
Şekil 3.2 Tek bir bacağın yer ile teması esnasındaki basit sarkaç modeli. (m gövdenin kütesini, l bacak uzunluğunu, ϕ bacağın yerde iken düşey doğrultu ile yaptığı açığı temsil eder.)

Ters-Sarkaç modelinden önemli bazı esaslar ya da sistemin davranış şekilleri çıkartılabilir. Örneğin m noktasal kütle soldan sağa doğru hareket etsin. Eğer m kütlesi sarkaç milinin yere temas eden noktasının sol tarafında ise noktasal kütle yavaşlayarak yükselecektir. Yani yer yüzeyinden yükseklik mesafesi artacaktır. Bu durumda noktasal kütle sahip olduğu kinetik enerji, yerçekimine bağlı olarak potansiyel enerjiye dönüşecektir. Eğer m kütlesi sarkaç milinin yere temas eden noktasının sağ tarafında ise noktasal kütle hızlanarak yerden yüksekliği azalacaktır. Bu durumda noktasal kütle sahip olduğu yerçekimine bağlı olarak potansiyel enerji, kinetik enerjiye dönüşerek geri dönecektir.

Ayrıca Şekil 3.3' de kütle-yay sarkaç modeli gösterildiği gibi sarkaç belli bir k değerinde rijitliğe sahiptir. Sarkacın boyu k yay sabitine bağlı olarak uzanıp ve kısalabilmektedir. Sarkaç da oluşan yay kuvveti noktasal kütle üzerine bir etki oluşturmaktadır. Radyal doğrultuda noktasal kütle hareketi yay kuvvetine, yer çekim kuvvetine ve sarkacın dönme hareketinden dolayı oluşan merkezkaç kuvvetine bağlıdır. Sistemin serbest cisim diyagramı(SCD) Şekil 3.4' de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Kütle-Yay Ters Sarkaç (Spring-Loaded Inverted Pendulum (SLIP)) bacak modeli.



Şekil 3.4 Kütle-Yay Ters Sarkaç Modelin Serbest Cisim Diyagramı(SCD).

Dairesel hareket yapan ters-sarkaç modelin dinamiği Lagrangian Metodu kullanılarak hareket denklemleri elde edilebilir. Sisteme ait dinamik modelin matematiksel ifadeleri Bölüm.4’ de daha ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu dinamik modelin matematiksel ifadesi sarkaç üzerinde oluşan yay kuvveti(F_{yay}), yer çekim kuvveti($mg\cos\varphi$) ve merkezkaç kuvvetinden($ml\dot{\varphi}^2$) oluşmaktadır. Bu sonuca göre, dönen bu sarkaç modelin dinamiği sadece doğrudan F_{yay} kuvvetinden etkilenmez. Sarkacın boyu(l) ve boyundaki değişimde($\dot{\varphi}$) sistemin dinamiğini etkilemede rolleri vardır;

$$ml^2\ddot{\varphi} = mgl \sin j - 2ml\dot{\varphi}^2 \quad (3.1)$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{g}{l} \sin j - \frac{2}{l}\dot{\varphi}^2 \quad (3.2)$$

$$m\ddot{l} = F - mg \cos j + ml\dot{\varphi}^2 \quad (3.3)$$

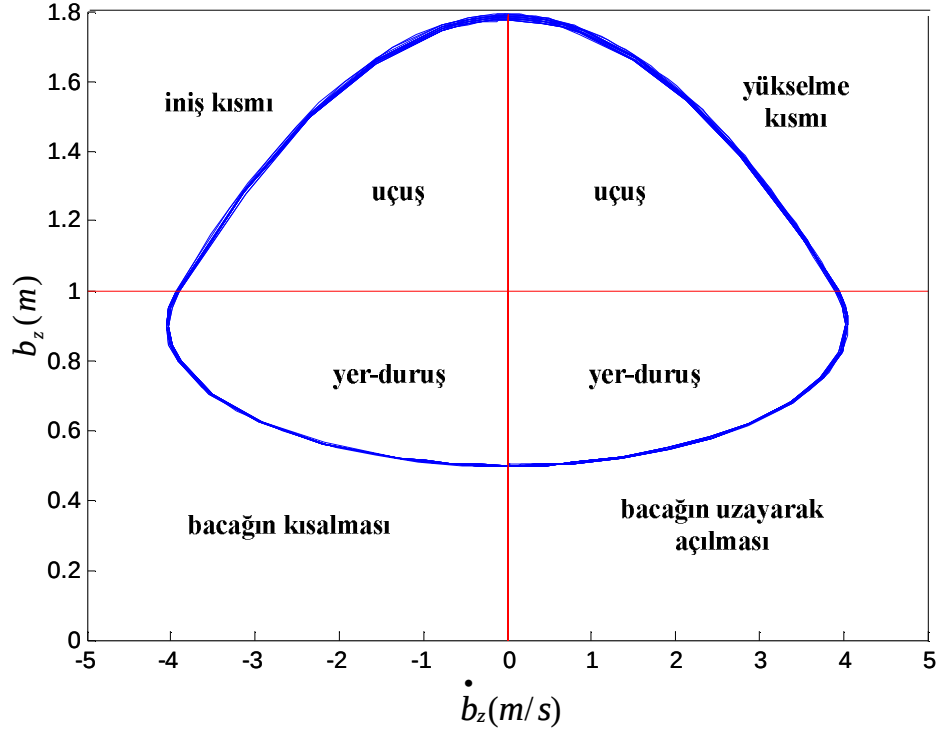
$$\ddot{l} = \frac{F}{m} - g \cos j + l\dot{\varphi}^2 \quad (3.4)$$

3.3. SLIP Model ve Kabuller

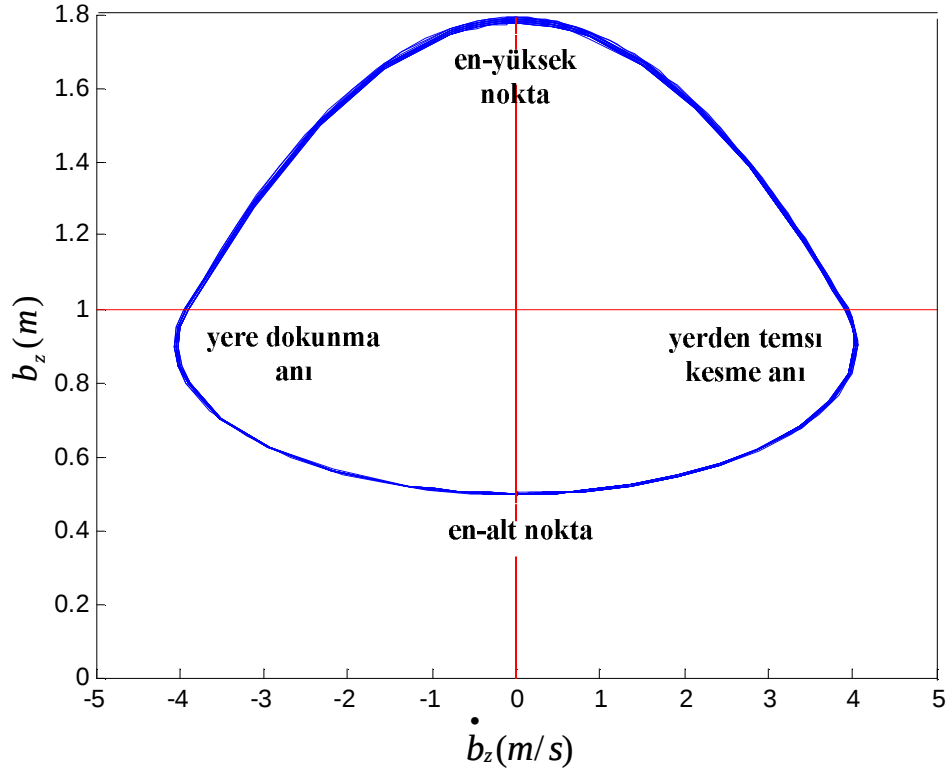
Tasarlanan model bu bölümde Şekil 3.3’ de gösterilmiştir. Bacak kütesiz olarak kabul edilmiştir. Bu kabul robot bacağının yer ile temas halinde iken dikkate alınan bir durumdur. Robotun ana gövdesi ise bacağın kalça kısmına bağlı olan yerde m noktasal kütesine sahiptir. Bacak havada iken bacağın kontrolü için ana gövdeye göre kütlesi ihmal edilebilecek 1/100 oranında bir ağırlık verilmektedir. Bacak yerde iken, yer ile temas eden ayakucu etrafında serbest olarak dönme hareketi yapabilmektedir. Bacak yer ile temas halinde iken ana gövde olan noktasal kütle bacakta oluşan radyal yay-potansiyeli $U(\xi)$ ile hareket etmektedir. Robot havada iken ana gövdeyi temsil eden noktasal kütle sadece yer-çekim kuvveti etkisi altında hareket eder. Ayrıca robotun ne yerde ne de havada iken enerji kaybının olmadığı kabul edilmektedir.

Robot hareket halinde iken her bir adımı iki fazdan oluşmaktadır. Bu fazlardan biri robot bacağının yer ile temas etme(stance) fazı diğeri ise bacağın yerden temasını keserek

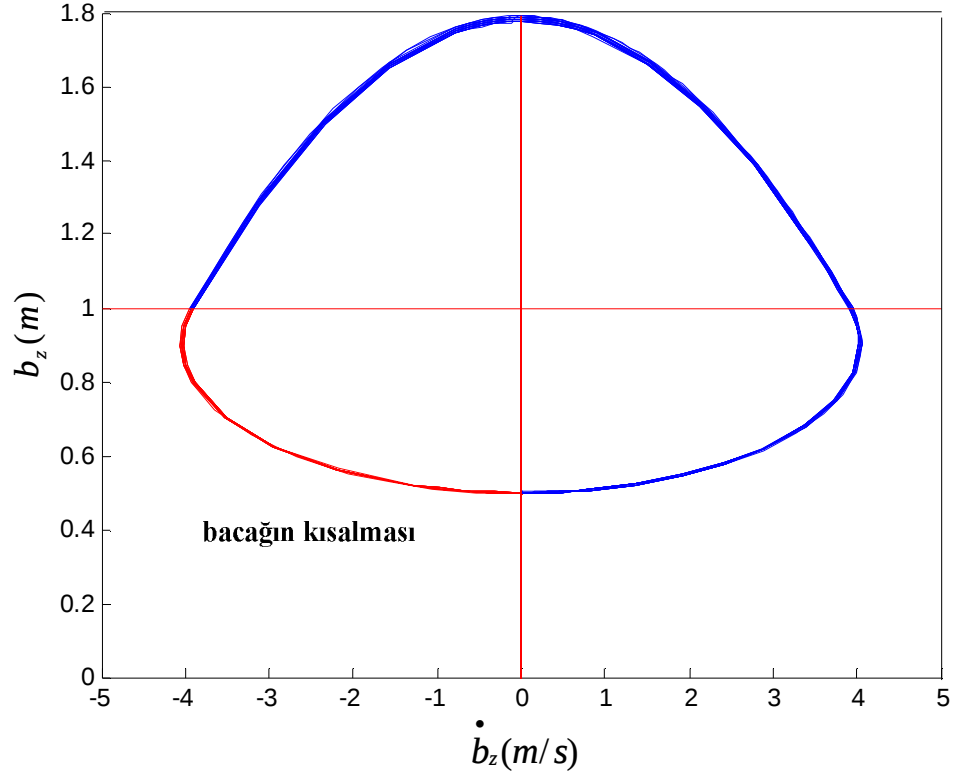
havada uçuş (flight) fazıdır. Bu fazlar Şekil 3.5’ de gösterilmiştir. Yer-duruş fazında robot bacağının ucu yer ile temas halindedir. Uçuş fazında robot bacağı yerden temasını tamamen kesmiş olup havada uçma hareketini yapmaktadır. Robot bacağının yer fazını iki kısma ayrıştırabiliriz. Bacağın sıkışarak (compression) kısılması birinci kısmı oluştururken, bacağın uzayarak açılması(decompression) da ikinci kısmı oluşturmaktadır. Bacağa ait bu kısımlar Şekil 3.5, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’ de gösterilmektedir. Benzer olarak da robot bacağının havadaki fazını iki kısma ayırabiliriz. Bacağın yerden temasını kestiği andan çıkabileceği en yüksek noktaya kadar olan zaman aralığına yükselme kısmı (ascent), çıktığı en yüksek noktadan itibaren aşağı inerek yer ile temas etme anına kadar olan zaman aralığına da iniş kısmı(descent) olarak ayırabiliriz. Bacağa ait bu kısımlar Şekil 3.5, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’ da gösterilmektedir. Bu ayrılan dört faz arasında birbirlerine geçişte çok önemli dört olay vardır. Bunlar robot bacağının yere dokunma (Touchdown) anı, bacağın sıkışmış (Bottom) haldeki anı, bacağın yerden teması kesilecek (Liftoff) ana kadar bacağın tamamen açıldığı an ve bacağın yükselerek çıktığı en yüksek yerdeki(Apex) andır. Yere dokunma anı(Touchdown), bacağın yer ile temas ettiği andır. Bacağın sıkışmış hali(Bottom), bacak yerde iken maksimum mesafede sıkıştığı andır. Yükselme anı(Liftoff), bacağın yerde iken maksimum oranda açılmış halindeki andır. En yüksek seviyedeki an (Apex), gövdenin havada en yüksek noktaya uçarak uzandığı andır. Bu fazlar Şekil 3.6 ve Şekil 3.11’ de gösterilmiştir.



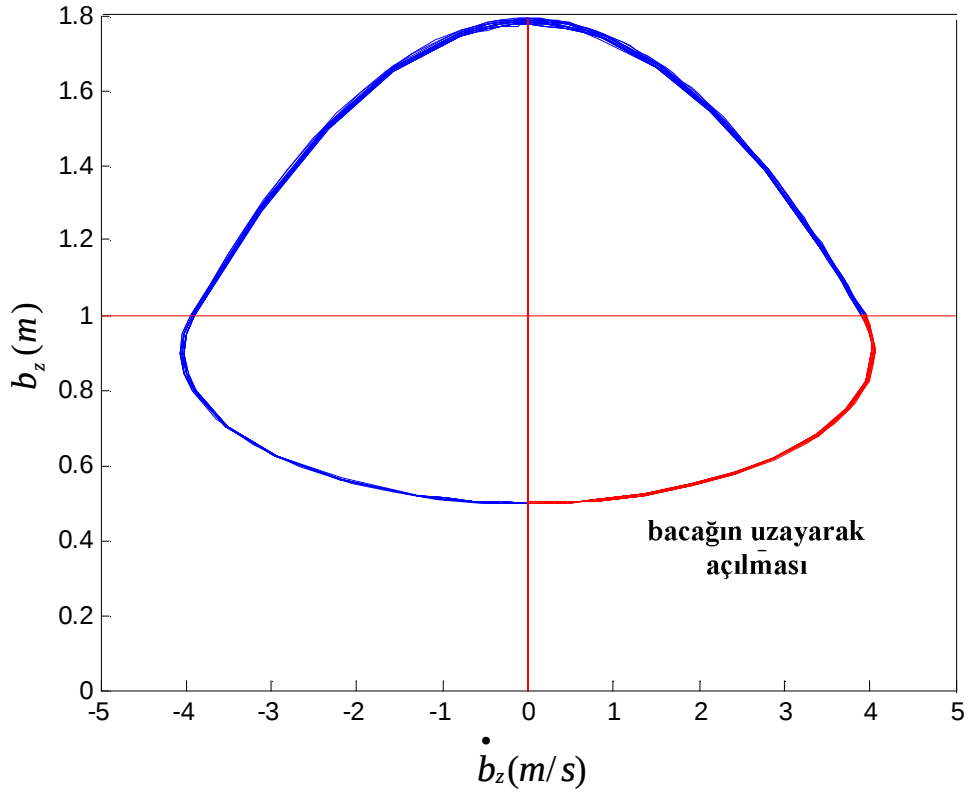
Şekil 3.5 Düşey Zıplamada Oluşan Evreler ve Olaylar Sayısal Benzetimi (Yer-Duruş(stance): Bacağın kısılması(compression) – Bacağın uzayarak açılması(decompression); Uçuş(flight): İniş kısmı(ascent) – Yükselme kısmı(descent)).



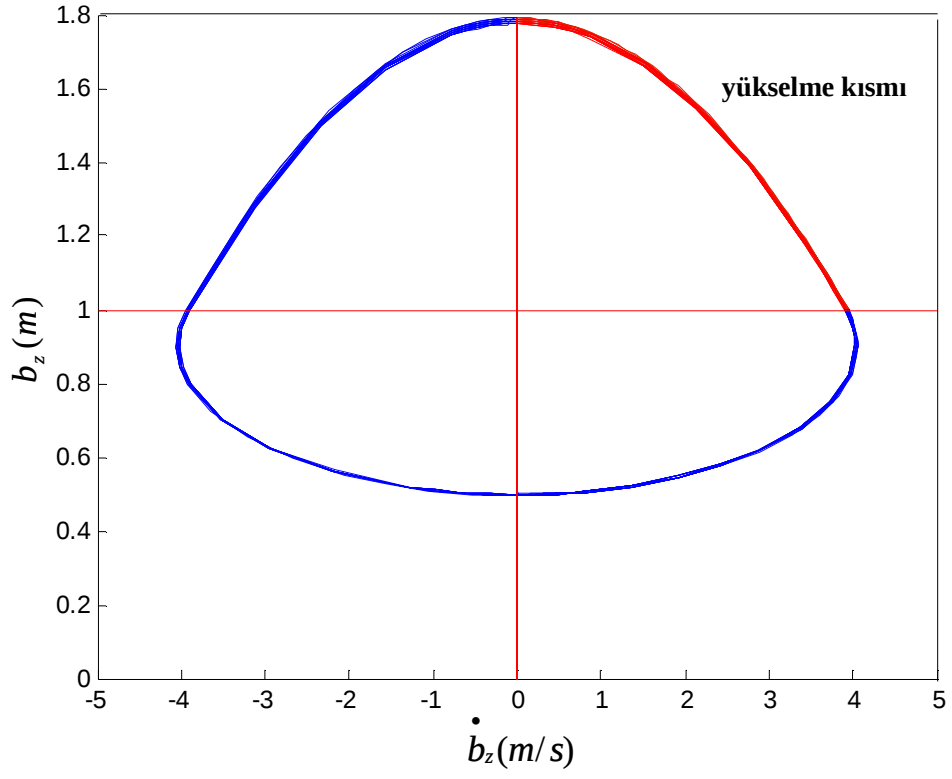
Şekil 3.6 Düşey Zıplamada oluşan Olaylar Sayısal Benzetimi (Yer dokunma anı(Toucdown) – En alt nokta(Bottom) – Yerden teması kesme anı(Liftoff) – En üst nokta(Apex)).



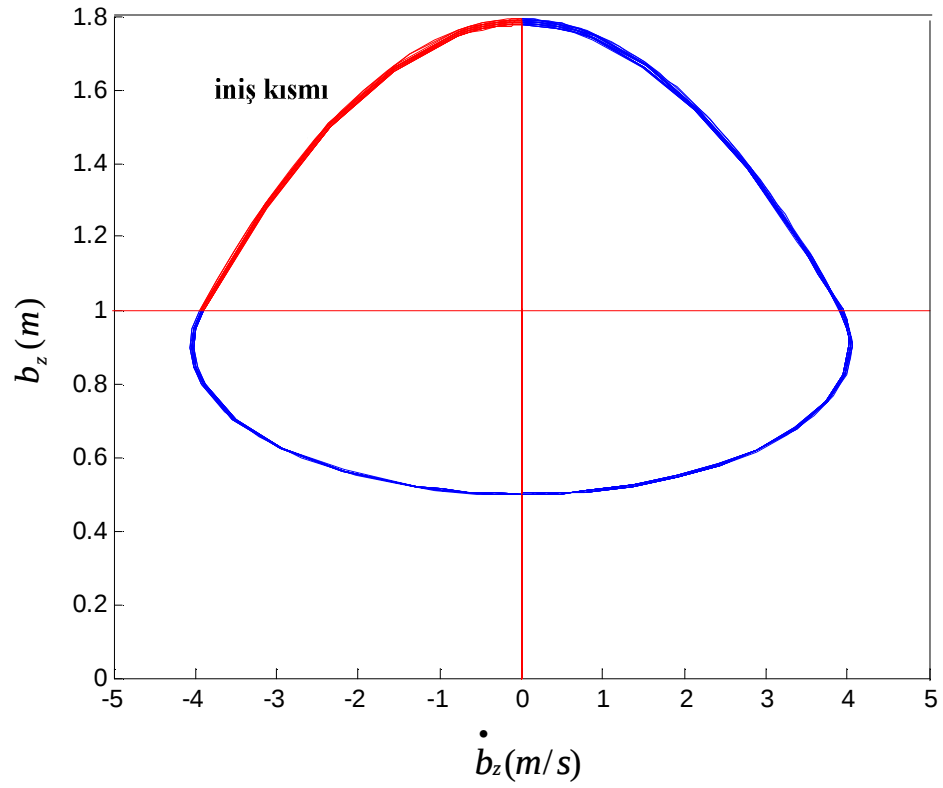
Şekil 3.7 Düşey Zıplamada oluşan Olay Sayısal Benzetimi (compression).



Şekil 3.8 Düşey Zıplamada oluşan Olay Sayısal Benzetimi (decompression).



Şekil 3.9 Düşey Zıplamada oluşan Olay Sayısal Benzetimi (ascent).



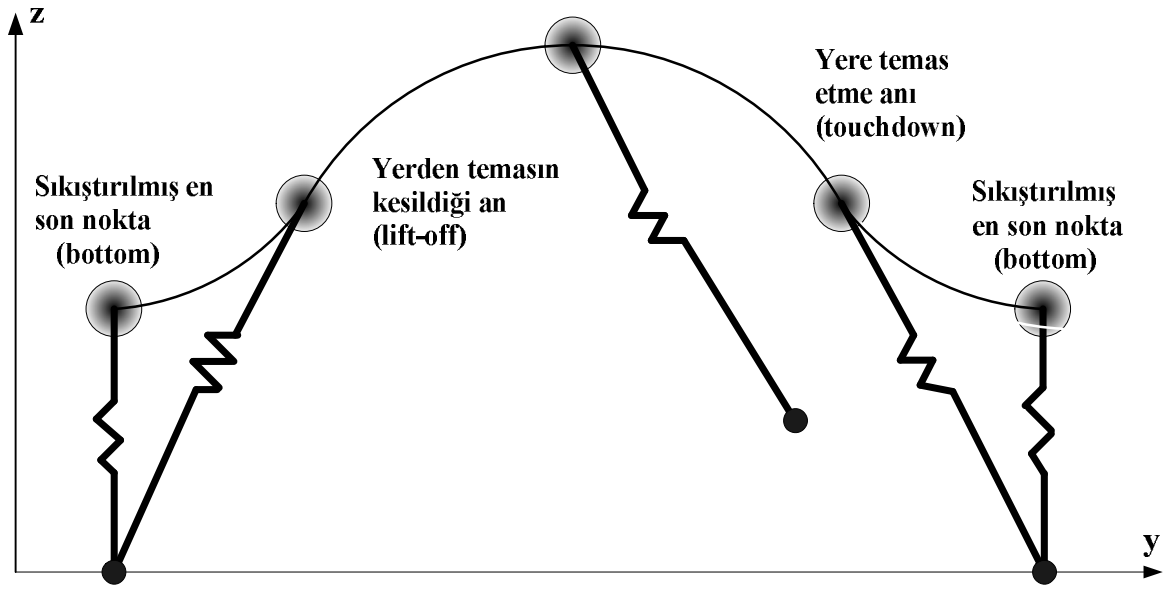
Şekil 3.10 Düşey Zıplamada oluşan Olay Sayısal Benzetimi (descent)

3.4. Dengeli Yürüyüş için Parametreler

Kütle-Yay Ters Sarkaç (SLIP) modeli, yürüyebilen tüm bacaklı hayvan çeşitlerinin esas yürüme hareket davranışlarını elde etmek için biyomekanik ve robotik literatürüne yerleşmiş en basit modellenen bir yaklaşım şeklidir [154, 155, 157, 158, 168]. Sonuç olarak, mühendislik yönünden bu modelin dengeli yürümeyi sağlayacak kontrol algoritmasının oluşturulması en büyük hedeftir. Bu dengeli yürüme fikri Raibert tarafından ortaya atılmıştır [162]. Ayrıca Schwind tarafından SLIP model davranışı ile birlikte mümkün olduğu kadar karakterize edilmiş nötür-yürüyüş modeli yapılmıştır [158, 161].

Bacaklı hayvanların dengeli yürümesinde simetri yörünge eğrisi önemli bir ölçüttür. Bu simetri eğri bacağın yerde iken maksimum oranda sıkıştığı an (bottom) olan konumuna göre alınır. Bacağın maksimum oranda sıkıştığı an (bottom) Şekil 3.11' de gösterilmiştir. Bu andaki bacağın boyu l_b ile tanımlanmıştır. Bacağın ana gövde olan noktasal kütleyle (m) göre açılma hızı $\dot{\theta}_b$ ile tanımlanmıştır. Bu fazda denetim parametrelerinden biride bacak rijitlik katsayısıdır ($k = k_c = k_d$). Bacağın kısalarak sıkıştığı andaki rijitlik katsayısı k_c , bacağın sıkıştığı en son noktadan sonra ki uzayarak açılıp uzandığı andaki rijitlik katsayısı k_d ile temsil edilmektedir. Bu tanımlanan özel parametreler yürüme tanımında adlandırılmış ve $p_b \in P_b$ ile gösterilmiştir [158, 161]. Robotun havada bulunduğu en yüksek yerdeki (apex) ana ait parametreler $p_a \in P_a$ ile tanımlanmıştır. Bu fazda (apex) ana gövde olan noktasal kütle nin yataydaki hızı $\dot{x}_{ya}$, düşeydeki yüksekliği b_{za} ile temsil edilmektedir. Bu temsiller Şekil 3.3' de gösterilmiştir.

Bu parametreler SLIP model hareketinin denetimi ve analizi için uygun koordinatlar gerektirir [158, 161]. Burada ayrıca iki koordinat daha belirlenecektir. Bu koordinatlar yere dokunma (touchdown) ve yerden ayrılmaya (liftoff) göre belirlenmektedir. Yere dokunma parametreleri $p_t \in P_t$ ile gösterilmiştir. Bacağın yere dokunma anındaki gövde ile yaptığı açı j_t , bacağın radyal hızı $\dot{r}_t$ ve açılma hızı $\dot{\theta}_t$ ile tanımlanmıştır. Benzer şekilde yerden ayrılma (liftoff) anındaki parametreler $p_l \in P_l$ ile tanımlanmışlardır. Bacağın yerden ayrılma anındaki gövde ile yaptığı açı j_l , bacağın radyal hızı $\dot{r}_l$ ve açılma hızı $\dot{\theta}_l$ ile tanımlanmıştır.



Şekil 3.11 Faz geçişleri sırasında oluşan olaylar [167]

3.5. SLIP Denetim Parametreleri

Problemin formüle edilmesi yürüyüş parametreleri ile mümkündür. Sistemin havada en yüksekte bulunduğu an(apex) durumunu aşağıdaki şekilde formüle edebiliriz [158];

$$c_a = \{c_a \mid c_a = [b_{za}, \dot{\theta}_{ya}]^T\} \quad (3.5)$$

Verilen bu perspektif göre bir sonraki adım (apex) fazına geri dönüşü başlatmak içindir;

$$f_a : c_a \times U \rightarrow c_a \quad (3.6)$$

Denetim girişleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır;

$$U = \{u \mid u = [j_t, k_c, k_d]^T\} \quad (3.7)$$

Amaç robotun havada en yüksek noktadaki (apex) durumunda denetimi başarmaktır. Bu denetim aşağıdaki gösterimle tanımlanmaktadır:

$$X_a^* = [b_{za}^*, \dot{\theta}_{ya}^*]^T \quad (3.8)$$

3.6. Evre Geçişleri

3.6.1. Başlangıç Fonksiyonları

Sistemin dinamiğinin oluşturulmasında daha önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi ardışık gerçekleşen farklı evreler içerisinde sistemin modellenmesiyle oluşmaktadır. Sistem ayrı zamanlarda yer ile temas ederken ayrı zamanlarda da yerden temasını keserek havada uçuş evresini gerçekleştirmektedir. Bu dinamik model zamana bağlı olarak kapalı bir döngü içerisinde gerçekleşmektedir. Sistem bu kapalı döngüyü farklı iki evreden oluşturmaktadır. Bu evreler her bir bacak için bacak ucundaki ayağın yer ile temas ettiği zaman dilimindeki yer-duruş(stance) evresi ile bacak ucundaki ayağın yerden temasını keserek havada uçuş(flight) evreleridir. Sistemin dinamik modelinin sayısal benzetimi bu iki evredeki farklı dinamik modellerin kapalı bir döngüde ardışık olarak çözümlenmeleri ile gerçekleşmektedirler.

Bu evrelerin meydana geldiği anları ve değişimlerinin tespitini belirlemek için zamana bağlı olarak oluşan kapalı döngüdeki yörüngeyi formüle ederek çok önemli bir çözüm elde edilmektedir. Yani kısacası sistemin yer-duruş(stance) evresinde mi yoksa havada uçuş(flight) evresinde mi olduğunu dinamik yapı içinde tanımlanan başlangıç fonksiyonlarıyla tespit etmekteyiz. Bu başlangıç fonksiyonları uçuş evresinden yer evresine geçişteki anda gerçekleşen yere dokunma(touchdown) evresi ile temsil edilen h_i^t başlangıç fonksiyonu, yer evresinde sanal bacağın sıkışarak kısaldığı en son(bottom) durumuna ait fazı temsil eden h_i^b başlangıç fonksiyonu, yer evresinden uçuş evresine geçişteki anda gerçekleşen yerden teması kesme(liftoff) evresi ile de temsil edilen h_i^l başlangıç fonksiyonu ve uçuş evresinde ana gövdenin en yüksek noktaya çıktığı(apex) fazı temsil eden h_i^a başlangıç fonksiyonu sistemin evrelerini tespit etmede kullanılmıştır. Kısacası h_i^t ve h_i^b fonksiyonları sistemin yer-duruş evresinde olduğunu bize haber verirken h_i^l ve h_i^a fonksiyonları ise sistemin uçuş evresinde olduğunu bize haber vermektedir.

Burada robota ait tüm bacaklar için düşünülen h_i^t , h_i^b , h_i^l ve h_i^a başlangıç fonksiyon koşulları birbirlerinden bağımsızdırlar. Bu fonksiyonlar aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$h_i^t = b_z - l_i \cos(f_i) \quad (3.9)$$

$$h_i^b = l_i \quad (3.10)$$

$$h_i^l = l - l_0 \quad (3.11)$$

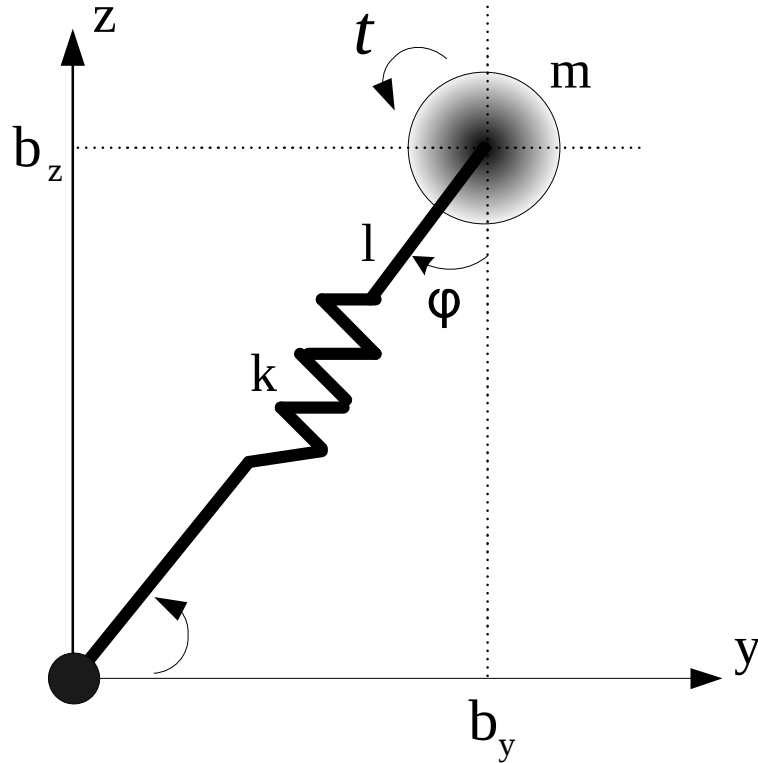
$$h_i^a = b_z \quad (3.12)$$

Yere dokunma evresine ait başlangıç fonksiyonu h_i^t her bir bacağın z düşey eksenindeki konumu ile sistemin ağırlık merkezinin z düşey eksenindeki konumları arasındaki farkı verir. Bu fark sıfır olduğunda bacak yer ile temas halindedir denir. Bu olay bize sistem yer-duruş evresindedir ve sonuç olarak yer dinamik modeli aktif olacaktır anlamına gelmektedir. Bacak yere dokunduktan sonra sıkışarak(compression) kısalıp geldiği en son durumunu ifade eden fonksiyon(h_i^b) bacak boyundaki değişimin sıfır olduğunu bildirir. Bu fazdan sonra bacağın uzayarak açılıp(decompression) ilk boyuna geldiği durumu ifade eden h_i^l fonksiyonudur. Bu bacağın ilk boyuna ulaştığını gösterir ki bacak artık yerden temasını kesmiş haldedir denir. Bu olay bize sistem uçuş evresindedir ve sonuç olarak uçuş evresi dinamik modeli aktif olacaktır anlamına gelmektedir. Uçuş evresinde sistemin çıktığı en yüksek noktadaki düşey hız değerinin sıfır olduğu ifade h_i^a fonksiyonu ile ifade edilmektedir. Sonuç olarak bu iki evre için belirtilen başlangıç fonksiyonları tüm bacaklar için uygun olarak yapılabilir.

4. TEK BACAKLI ROBOTUN İKİ BOYUTLU DÜZLEMDE DİNAMİK MODELİ VE SAYISAL BENZETİMİ

4.1. Tek Bacaklı Zıplayarak Yürüme

Bu bölümde tek bacaklı bir robotun iki boyutlu düzlemde zıplayarak yürüme olayı incelenmektedir. Bu işlem sistemin sayısal benzetimi yapılarak gerçekleştirilmeye çalışılmaktadır. Ardışık bir şekilde zıplayarak yürüme işlemleri ardışık kapalı bir döngü içerisinde farklı dinamik yapıların sayısal benzetimleri kullanılarak sistemin hareketi incelenmeye çalışılmıştır. Böyle sistemlerin sayısal analizlerini elde etmek ve sayısal olarak çözmek oldukça zor bir işlemdir. Bu sayısal çözümü mümkün olduğunca basitleştirmek ve anlaşılmasını kolaylaştırmak için Kütle-Yay Ters-Sarkaç(SLIP) modeli oluşturulmuştur. Tek bacaklı zıplayarak yürüme sistemine ait Kütle-Yay Ters-Sarkaç(SLIP) modeli Şekil 4.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Yer –Duruş Evresinde Tek Bacaklı Sisteme Ait Kütle-Yay Ters Sarkaç (Spring-Loaded Inverted Pendulum (SLIP)) bacak modeli.

SLIP model sistemin sayısal analizi için mekanik parametrelere ve ayrıca sistem için bir denetleyici gerekir. Sisteme ait sayısal benzetim için bütün gerekli bilgiler aşağıda Tablo 4.1' de verilmektedir. Bu sayısal benzetim, Matlab 7.1 ve Simulink Software Toolbox programlarını kullanarak oluşturuldu [169].

4.2. Tek Bacaklı Robot İçin Dinamik Model

Tek bacaklı robotun dinamik modeli için hem havadaki evrede(flight) hem de yer evrede(stance) uygun model olarak SLIP modeli esas olarak alınmıştır. SLIP model iki evreden oluştuğunu daha önceki bölümlerde bahsetmiştik. Sistem parabolik bir yörüngeden oluşan havadaki evre(flight) ve harmonik bir yörüngeden oluşan yerdeki evre(stance) olarak iki evreden ibarettir. Noktasal kütleyle sahip robot havadaki evrede(flight) parabolik bir yörüngeyi takip ederek uçuş hareketini gerçekleştirirken yerdeki evrede(stance) harmonik bir yörüngeyi takip etmektedir [170].

Robot bir noktasal kütleyle sahip olup, bacak kütlesi ana gövde olan noktasal kütleyle göre çok küçük bir değere sahip olduğundan ağırlıksız olarak kabul edilmektedir. Fakat robot havada iken bacağın hareketi için kalça üzerindeki motor torkunun ve bacak ataletinin etkisini hesaplamak için ana gövdeye göre çok küçük bir oranda (1/100) bacak kütlesi alınmaktadır. Robot yerde iken, SLIP model harmonik bir sistemi temsil etmektedir. Bu fazda bacak ağırlığı ihmal edilmektedir. Bacak ucundaki ayak kısmı yer yüzeyinde kaymasın diye, bacak ucu ile yer arasında temas etme kısım iğneli eklem olarak modellenmiştir [171, 172]. Yani kısacası bacak ucundaki ayak kısmının yer ile sürtünmesi ihmal edilmiştir.

Robotun yere temas ederken (touchdown) ve ayrılma (liftoff)anında oluşan çarpma etkisi ihmal edilmiştir. Her bir faz modeli için Lagrangian Metodu kullanılarak hareket denklemleri elde edilmiştir [173, 174, 175].

Dairesel hareket yapan kütle-yay ters-sarkaç ile modellenen sistemin dinamiği Lagrange Metodu kullanılarak hareket denklemleri elde edilebilir. Bu dinamik modelin matematiksel ifadesi sarkaç üzerinde oluşan yay kuvveti(F_{yay}), yer çekim kuvveti($mg\cos\phi$) ve merkezkaç kuvvetinden($ml\dot{\phi}^2$) oluşmaktadır. Bu sonuca göre, dönen bu sarkaç modelin dinamiği sadece doğrudan F_{yay} kuvvetinden etkilenmez. Sarkacın boyu(l) ve boyundaki değişimde($\dot{\phi}$) sistemin dinamiğini etkilemede rolleri vardır;

Yer-duruş evresi(stance) için;

Yer-Duruş(stance) evresinde tek bacaklı zıplayarak yürüyen sisteme ait kinetik ve potansiyel enerjilerini ifade eden denklemler aşağıdaki gibi oluşturulmuştur;

$$T_{yer-duruş_kinetik} = \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) \quad (4.1)$$

$$V_{yer-duruş_potansiyel} = \frac{1}{2}k(l-l_0)^2 + mgl \cos j \quad (4.2)$$

Lagrange denklemi L ile temsil edilirse;

$$L = T_{yer-duruş_kinetik} - V_{yer-duruş_potansiyel} \quad (4.3)$$

Sisteme ait genelleştirilmiş koordinatlar j ve l ile temsil edilmektedir;

$$z = l \cos j \quad (4.4)$$

$$\dot{z} = \dot{l} \cos j - l \dot{j} \sin j \quad (4.5)$$

$$y = l \sin j \quad (4.6)$$

$$\dot{y} = \dot{l} \sin j + l \dot{j} \cos j \quad (4.7)$$

Sisteme ait kinetik enerji denklemi tekrar düzenlenirse;

$$T = \frac{1}{2}m[(\dot{l} \cos j - l \dot{j} \sin j)^2 + (\dot{l} \sin j + l \dot{j} \cos j)^2] \quad (4.8)$$

$$T = \frac{1}{2}m[\dot{l}^2 \cos^2 j - 2\dot{l} \cos j l \dot{j} \sin j + l^2 \dot{j}^2 \sin^2 j + \dot{l}^2 \sin^2 j + 2\dot{l} \sin j l \dot{j} \cos j + l^2 \dot{j}^2 \cos^2 j] \quad (4.9)$$

$$T = \frac{1}{2} m [\dot{\theta}^2 (\cos^2 j + \sin^2 j) + l^2 \dot{\phi}^2 (\cos^2 j + \sin^2 j) - 2\dot{\theta} \cos j l \dot{\phi} \sin j + 2\dot{\theta} \sin j l \dot{\phi} \cos j] \quad (4.10)$$

Sisteme ait potansiyel enerji denklemi tekrar düzenlenirse;

$$T_{\text{yer-duruş-kinetik}} = \frac{1}{2} m (\dot{\theta}^2 + l^2 \dot{\phi}^2) \quad (4.11)$$

$$V_{\text{yer-duruş-potansiyel}} = \frac{1}{2} k l^2 - k l l_0 + \frac{1}{2} k l_0^2 + m g l \cos j \quad (4.12)$$

Langrange denklemi yeniden düzenlenirse;

$$L = \frac{1}{2} m \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m l^2 \dot{\phi}^2 - \frac{1}{2} k l^2 + k l l_0 - \frac{1}{2} k l_0^2 - m g l \cos j \quad (4.13)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = m l^2 \dot{\phi} \quad (4.15)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} \right) = m l^2 \ddot{\phi} + 2 m l \dot{\theta} \dot{\phi} \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = -m g l \sin j \quad (4.17)$$

Virtüel iş prensibinden;

$$dA = 0 dl + t dj \quad (4.18)$$

4.14 nolu denklem düzenlenirse;

$$ml^2 \ddot{j} = mgl \sin j - 2ml\dot{l}\dot{j} - t \quad (4.19)$$

Genelleştirilmiş koordinat j değişkenine göre sistemin birinci hareket denklemi 4.20 nolu denklemde gösterilmiştir;

$$\ddot{j} = \frac{g}{l} \sin j - \frac{2}{l} \dot{l} \dot{j} - t \quad (4.20)$$

$$\ddot{j} = -\frac{t}{J_{bacak}} \quad (4.21)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{l}} \right) - \frac{\partial L}{\partial l} = 0 \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{l}} = m\dot{l} \quad (4.23)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{l}} \right) = m\ddot{l} \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial L}{\partial l} = mg\dot{j}^2 + kl_0 - kl - mg \cos j \quad (4.25)$$

Virtüel iş prensibinden;

$$dA = 0dl + t dj \quad (4.26)$$

4.22 nolu denklem düzenlenirse;

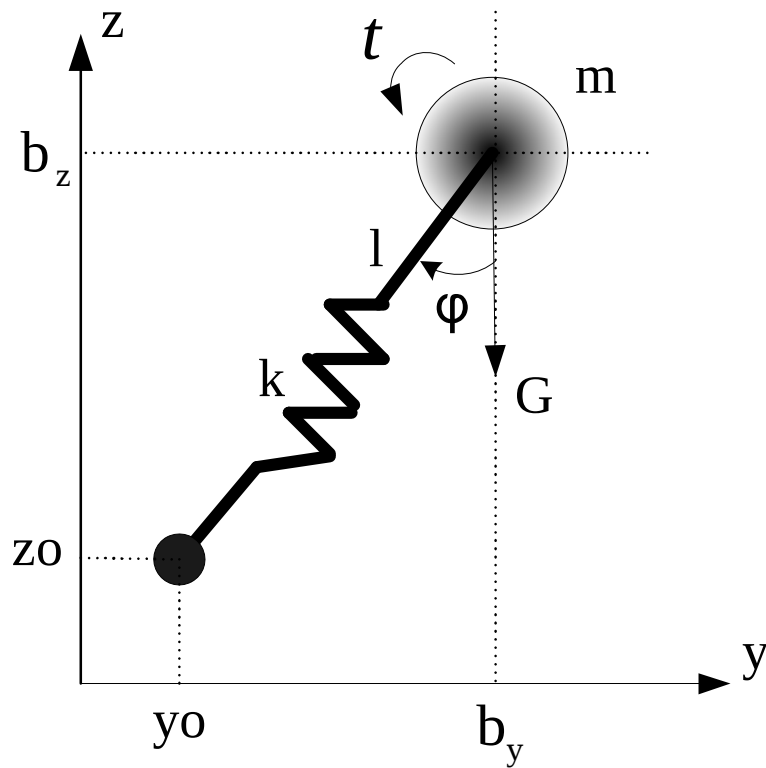
$$m\ddot{l} = k(l_0 - l) - mg \cos j + ml\dot{j}^2 \quad (4.27)$$

$$F_{yay} = k(l_0 - l) \quad (4.28)$$

Genelleştirilmiş koordinat l değişkenine göre sistemin ikinci hareket denklemi 4.29 nolu denklemde gösterilmiştir;

$$\ddot{l} = \frac{F}{m} - g \cos j + l \dot{j}^2 \quad (4.29)$$

Sisteme ait uçuş(flight) evresi Şekil 4.2' de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Uçuş Evresinde Tek Bacaklı Sisteme Ait Kütle-Yay Ters Sarkaç (Spring-Loaded Inverted Pendulum (SLIP)) bacak modeli.

Havadaki uçuş evresi(flight) için genelleştirilmiş koordinatlar z ve y ile temsil edilmektedir;

$$G = mg \quad (4.30)$$

Uçuş(flight) evresinde tek bacaklı zıplayarak yürüyen sisteme ait kinetik ve potansiyel enerjilerini ifade eden denklemler aşağıdaki gibi oluşturulmuştur;

$$T_{uçuş_kinetik} = \frac{1}{2} m \dot{z}^2 + \frac{1}{2} m \dot{y}^2 \quad (4.31)$$

$$V_{uçuş_potansiyel} = mgz \quad (4.32)$$

Langrange denklemi L ile temsil edilirse;

$$L = T_{uçuş_kinetik} - V_{uçuş_potansiyel} \quad (4.33)$$

$$L = \frac{1}{2} m \dot{z}^2 + \frac{1}{2} m \dot{y}^2 - mgz \quad (4.34)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{z}} \right) - \frac{\partial L}{\partial z} = 0 \quad (4.35)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{z}} = m \dot{z} \quad (4.36)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{z}} \right) = m \ddot{z} \quad (4.37)$$

$$\frac{\partial L}{\partial z} = -mg \quad (4.38)$$

Virtüel iş prensibinden;

$$dA = 0dz + 0dy \quad (4.39)$$

4.35 nolu denklem düzenlenirse;

$$m \ddot{z} + mg = 0 \quad (4.40)$$

Genelleştirilmiş koordinat z değişkenine göre sistemin birinci hareket denklemi 4.41 nolu denklemde gösterilmiştir;

$$\ddot{z} = -g \quad (4.41)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial L}{\partial y} = 0 \quad (4.42)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} = m\dot{y} \quad (4.43)$$

$$\frac{d}{dt} (m\dot{y}) = 0 \quad (4.44)$$

$$\frac{\partial L}{\partial y} = 0 \quad (4.45)$$

Virtüel iş prensibinden;

$$dA = 0dz + 0dy \quad (4.46)$$

4.42 nolu denklem düzenlenirse;

$$m\ddot{y} = 0 \quad (4.47)$$

Genelleştirilmiş koordinat y değişkenine göre sistemin ikinci hareket denklemi 4.48 nolu denklemde gösterilmiştir;

$$\ddot{y} = 0 \quad (4.48)$$

z düşey eksenindeki konumu, y yatay eksenindeki konumu, t kalçadaki motor torkunu ve l bacak boyunu, k bacak rijitlik kat sayısını, m noktasal kütle, G yer-çekim ivmesini ve J_{bacak} bacağa ait kütle atalet momenti temsil etmektedir. Sisteme dinamik modeline ait parametreler Tablo 4.1’ de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Dinamik model için parametreler [99]

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Kütle	m	10.0	kg
Yay rijitlik kat sayısı	k	1000	N/m
Bacak boyu	l	1	m
Bacak ataleti	J_{bacak}	2×10^{-4}	$kg\ m^2$
Yer çekim ivmesi	g	9.805	m/s^2
Kalça tork	τ	1	Nm

4.3. Metotlar

4.3.1. Sayısal Benzetim Oluşturulması

Sayısal benzetim, Matlab 7.1 ve Simulink Software Toolbox programları kullanılarak oluşturulmuştur [169]. Sistem Runge-Kutta metoduna adapte edilmiştir. Değişken adım zamanı için integrator metodu kullanılmıştır. Maksimum adım boyutu ve toleransı için 1.10^{-3} sn alınmıştır.

4.3.2. Analiz Seçimi

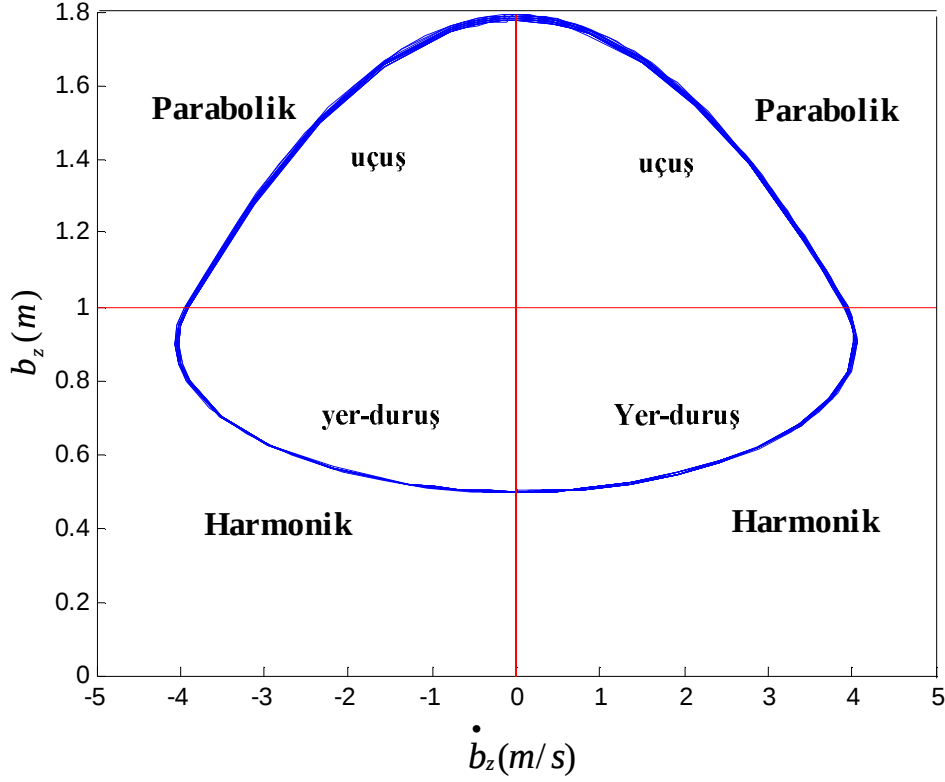
Son yirmi yıldır yapılan bacaklı robot çalışmalarında Raibert' in üç-parça denetim algoritma yöntemleri birçok araştırmacı tarafından kullanılmış ve bu denetim algoritmalarının başarısı büyük ölçüde görülmüştür [170]. Diğer bir taraftan araştırmacılar hala bacaklı robotlarda dengeli yürüme işlemi için standart ölçümleri araştırmaktadırlar [176, 177, 178, 179, 180].

4.3.3. Faz Çizimleri

Daha önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi robotun zıplaması ya da zıplayarak yürümesi kapalı bir yörünge periyodundan ibarettir [170, 176, 181, 182].

Faz grafikleri düşey eksendeki hıza karşı yatay eksendeki konumun çizilmesi ile oluşur [175]. Robot uçuş(flight) fazında iken yer çekimi kuvveti etkisi altında olan ağırlık merkezi(COM) basit bir parabolik yörünge takip eder. Robot yerdeki(stance) fazda ise basit bir

kütle-yay salınımı ile harmonik yörünge takip eder. Bu yörüngeler Şekil 4.3’ de görülmektedir. Bu çeşit kapalı yörüngeler limit çevrimi ve kararlı denge olarak adlandırılır [183, 184]. Ayrıca faz ve geçiş grafikleri sistemin dinamiğini daha iyi anlamak için oluşturulurlar [184, 185, 186].

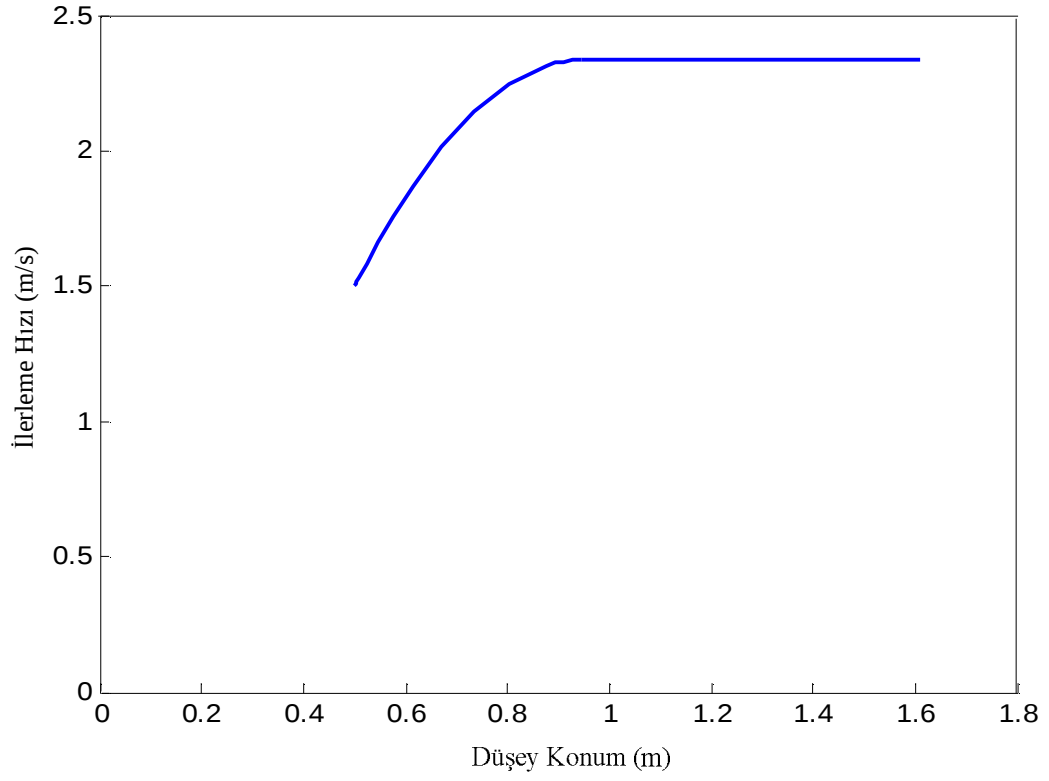


Şekil 4.3 Robotun yer(stance) ve hava(flight) evresinde takip ettiği yörüngeler.

4.3.4. Geçiş Çizimleri

Bacaklı robotların hareket denklemlerinin oluşturulması ve benzetimi sistemin dorusal(lineer) olmayan ve ayrık bir dinamik olmasından dolayı oldukça zordur. Bundan dolayı genellikle matematiksel araçların sayısal benzetimle uyumlu olması istenir. Özellikle bazı yazarların robot çalışmalarındaki kontrol ve tasarım bakımından sayısal benzetimleri yeterlidir. Periyodik yörüngenin istikrarlı ya da sabit olmasını anlamak için “nokta kroki” çizimi bir araçtır. Bu aynı zamanda bacak hareketinde “adım fonksiyonu” olarak adlandırılmıştır [178-179, 180, 187, 188, 189, 190, 191].

Geçiş grafik çizimleri sistemin düşey ekseninde öteleme hızı ile yatay ekseninde düşey mesafesinin gösterilmesi ile elde edilir. Bu gösterime geçiş çizimi denir. Sisteme ait geçiş grafiği Şekil 4.4’ de görülmektedir.



Şekil 4.4 Geçiş Grafiği

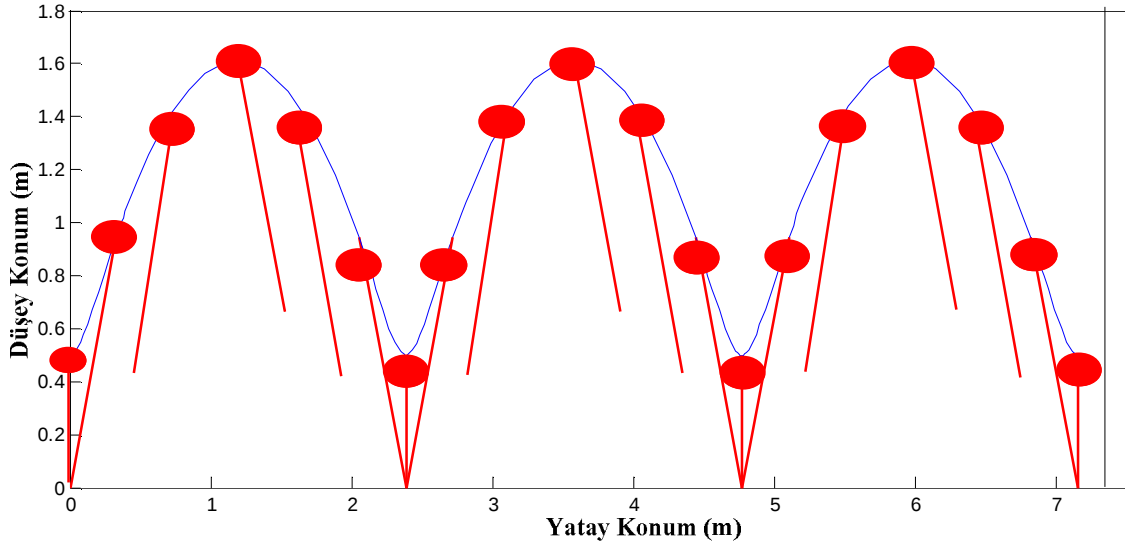
5. TEK BACAK İLE ZIPLAYARAK YÜRÜMEDE SAYISAL BENZETİM

5.1. Giriş

Sayısal Benzetim Bölüm.4’ de sisteme ait tespit edilen mekanik parametreler ve hareket denklemlerine bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal benzetimin sonucunda elde edilen grafikler sistemin SLIP(Kütle-Yay Ters Sarkaç) ile modellenmesinin mümkün olduğu kadar başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

5.2. Düzlemsel Ortamda Hareket

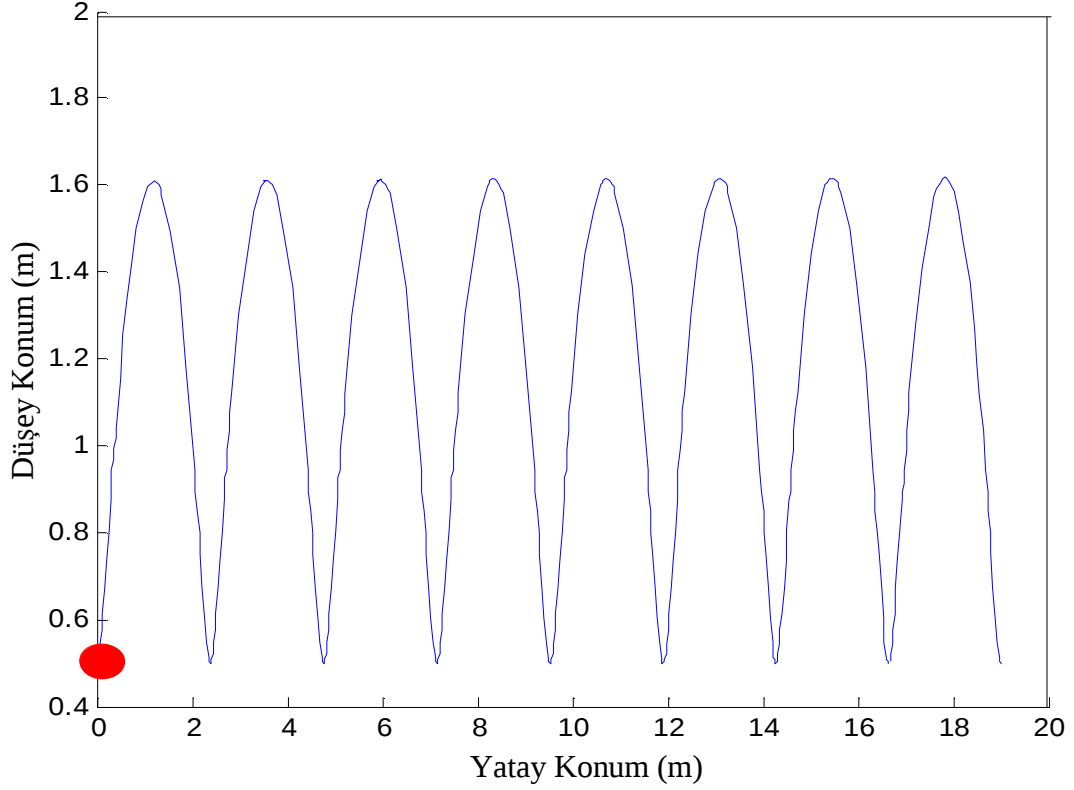
Tek bacaklı robotumuza ait başlangıç değerleri; yatay eksende öteleme hızı 1.5 m/s , düşey eksende bacak belli bir değerde sıkıştırılmış şekilde olup düşey konum 0.5 m ve düşey eksendeki hızı 0 m/s alınmıştır. Tek bacaklı robotun düzgün bir hareket çevrim döngüsü içinde ilerlediği görülmüştür. Burada bacak yerden temasını kestiği anda yer düzlemi(y-ekseni) ile oluşturduğu açının simetrisini alarak yere dokunma açısını belirlemektedir. Bu denetim algoritması ile zıplayarak yürüme işlemini gerçekleştirmektedir. Bu hareket çevrim döngüsü Şekil 5.1’ de gösterilmiştir. Bu sonuç, SLIP modelin robotun zıplayarak yürümesinde uygun bir model olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.1 Düzlemsel ortamda zıplayarak yürüme.

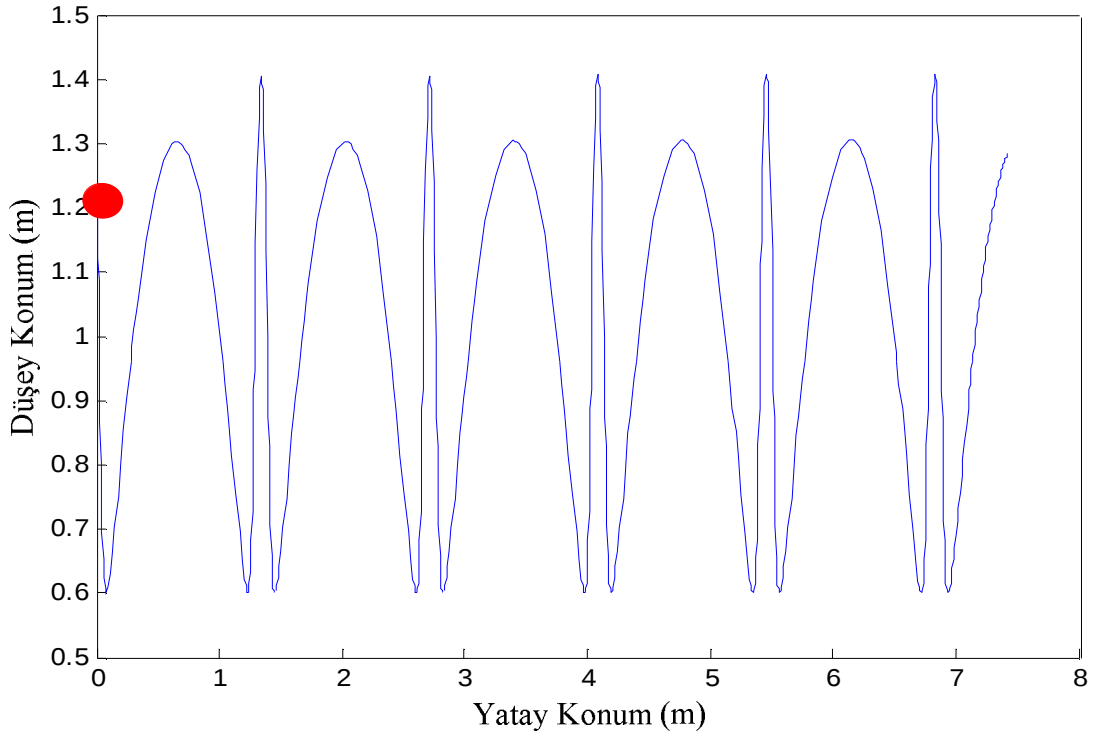
SLIP model robotun ağırlık merkezinin iki boyutlu düzlemsel ortamda ki düşey eksen (z) ve yatay eksen (y) hareket performansları Şekil 5.2’ de gösterilmiştir. Tek bacaklı robota

ait başlangıç değerleri yatay ekseninde öteleme hızı 1.5 m/s , düşey ekseninde bacak belli bir değerlerde sıkıştırılmış şekilde olup düşey konum 0.5 m ve düşey eksenindeki hızı 0 m/s alındığı zaman, tek bacaklı robotun düzgün bir hareket çevrim döngüsü içinde ilerlediği görülmektedir.



Şekil 5.2 Robotun kütle merkezinin düzlemsel ortamdaki konumu
(Öteleme hız: 1.5 m/s , düşey konum: 0.5 m , düşey hız: 0 m/s).

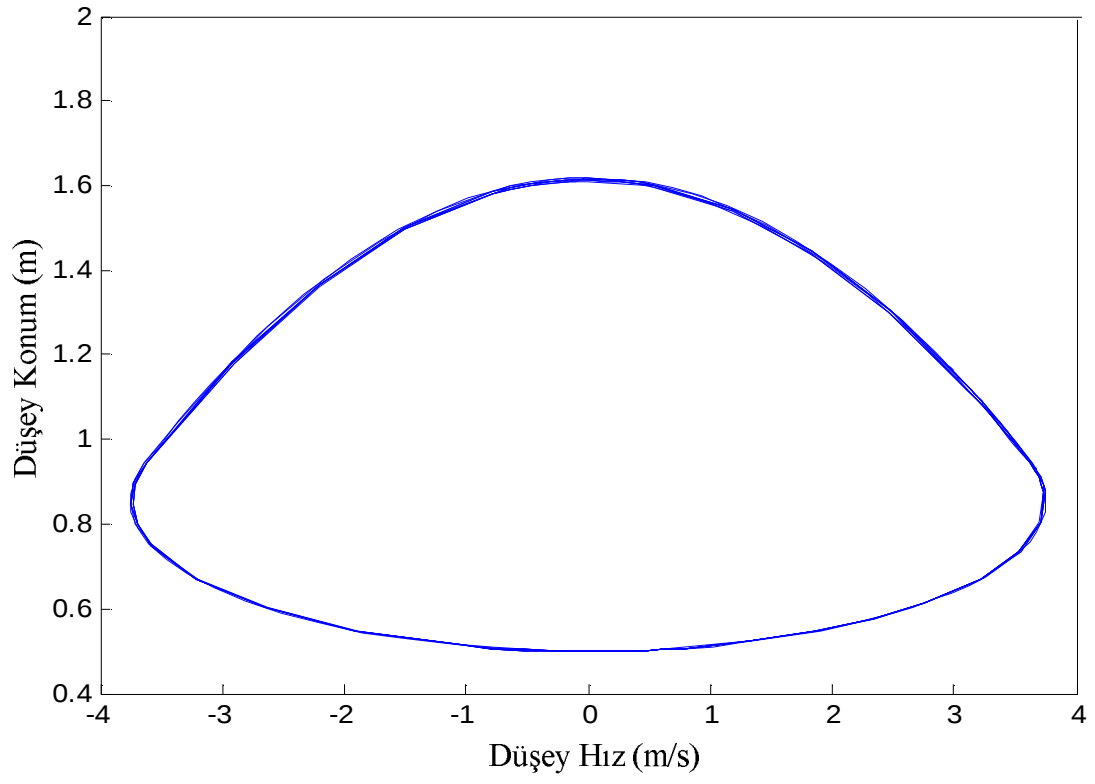
Eğer tek bacaklı robota ait farklı başlangıç değerleri; örneğin yatay ekseninde öteleme hızı 0.2 m/s , düşey ekseninde bacak belli bir yükseklikten bırakılan düşey konumu 1.2 m ve düşey eksenindeki hızı 0 m/s alınırsa, tek bacaklı robotun düzgün bir hareket çevrim döngüsü içinde ilerlediği görülmektedir. Bu başlangıç değerlerinde SLIP model robotun ağırlık merkezinin iki boyutlu düzlemsel ortamda ki düşey eksen (z) ve yatay eksenindeki (y) hareket performansları Şekil 5.3’ de gösterilmiştir.



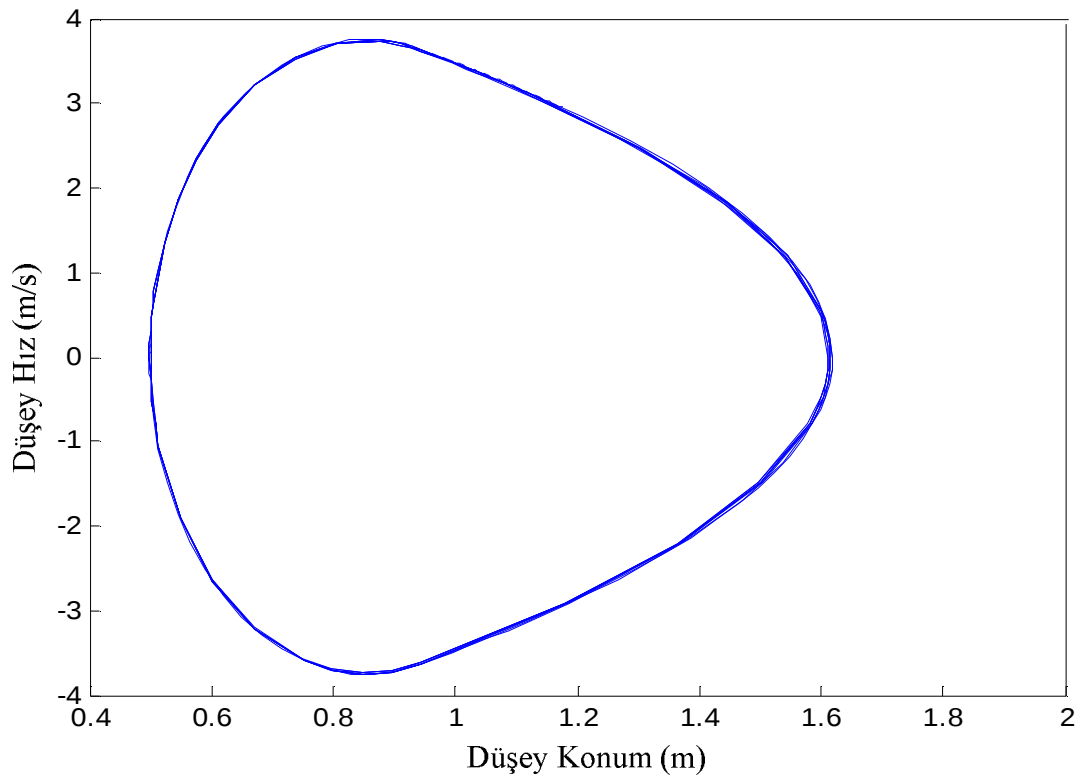
Şekil 5.3 Robotun kütle merkezinin düzlemsel ortamdaki konumu
(Öteleme hız: 0.2 m/s, düşey konum: 1.2m, düşey hız: 0 m/s).

5.3. Faz Eğrileri

Faz eğrileri robota ait ağırlık merkezinin düşey konumu için iki boyutlu ortamda çizilen yörüngelerdir. Düşey konuma karşı düşey hız değerlerinin çizimi Şekil 5.4’ de gösterilmiştir [2, 81]. Ayrıca düşey hız değerine karşı düşey konum değerlerinin çizimi Şekil 5.5’ de gösterilmiştir [174]. Bu faz eğrisine ait başlangıç değerleri yatay eksende öteleme hızı 1.5 m/s, düşey eksende bacak belli bir değerde sıkıştırılmış şekilde olup düşey konum 0.5m ve düşey eksendeki hızı 0 m/s alınarak faz eğrileri oluşturulmuştur.

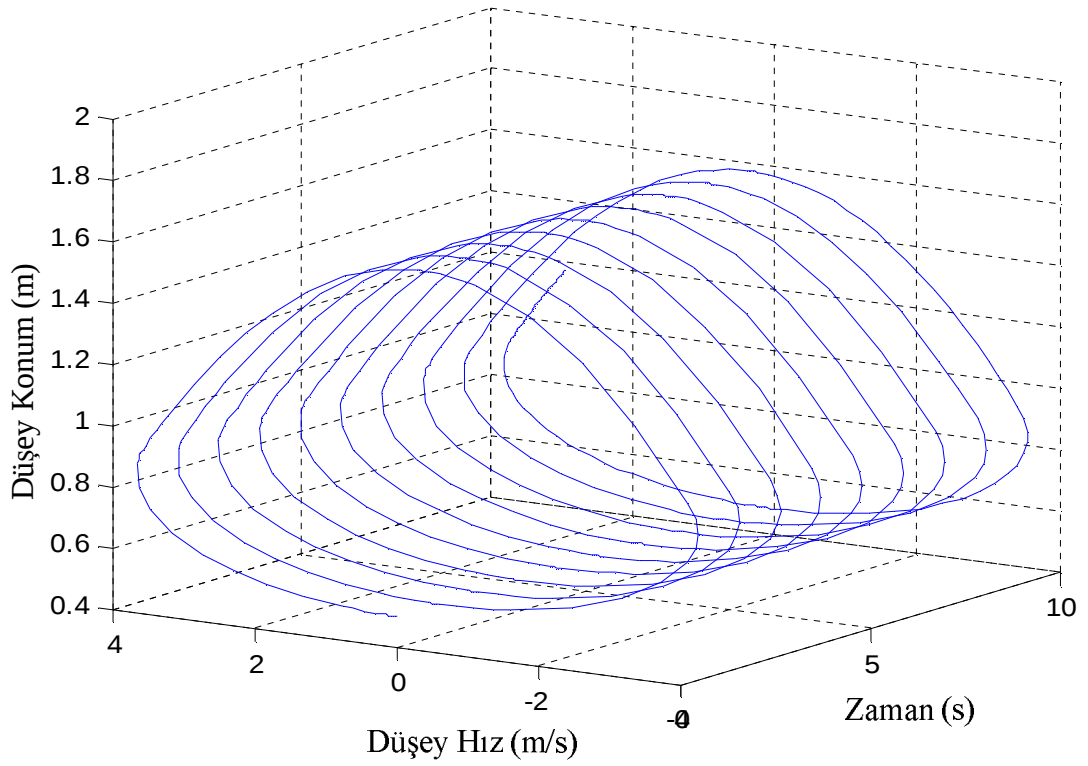


Şekil 5.4 Kütle merkezinin düşey konumu için faz eğrisi.

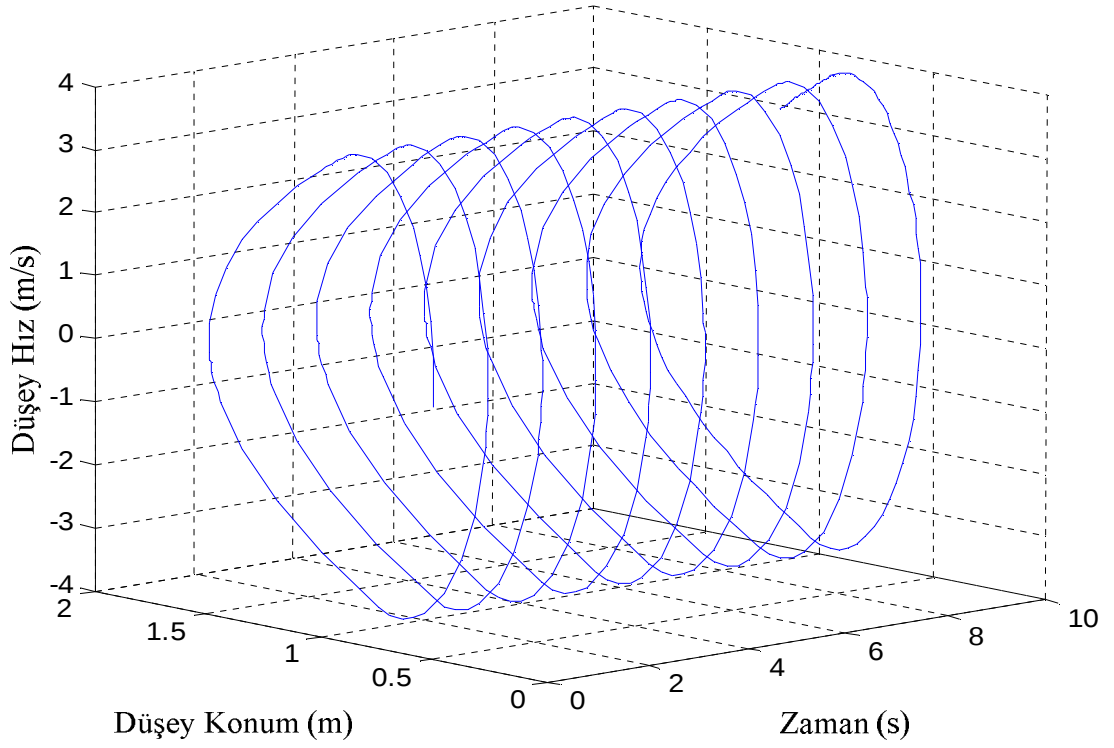


Şekil 5.5 Kütle merkezinin düşey konumu için faz eğrisi.

Aynı dataalar kullanılarak düşey konum ve düşey hız yörüngeleri için üç boyutlu ortamda faz eğrileri oluşturulmuştur. Üç boyutlu faz grafiği Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’ de gösterilmiştir. Burada üçüncü boyut olarak zaman alınmıştır. Üç boyutlu grafik helezon sarmal(spiral) şeklinde bir yapıdan oluşmaktadır. Grafikten de görüldüğü gibi faz eğrileri zaman eksenine yaklaştığı kısımlarda daha küçük çaplarda sarmal helezon eğrileri oluştuğu görülmektedir. Bu SLIP model robotun yer ile temas anı ile yerden ayrılma anlarını gösteren eğrilerdir.



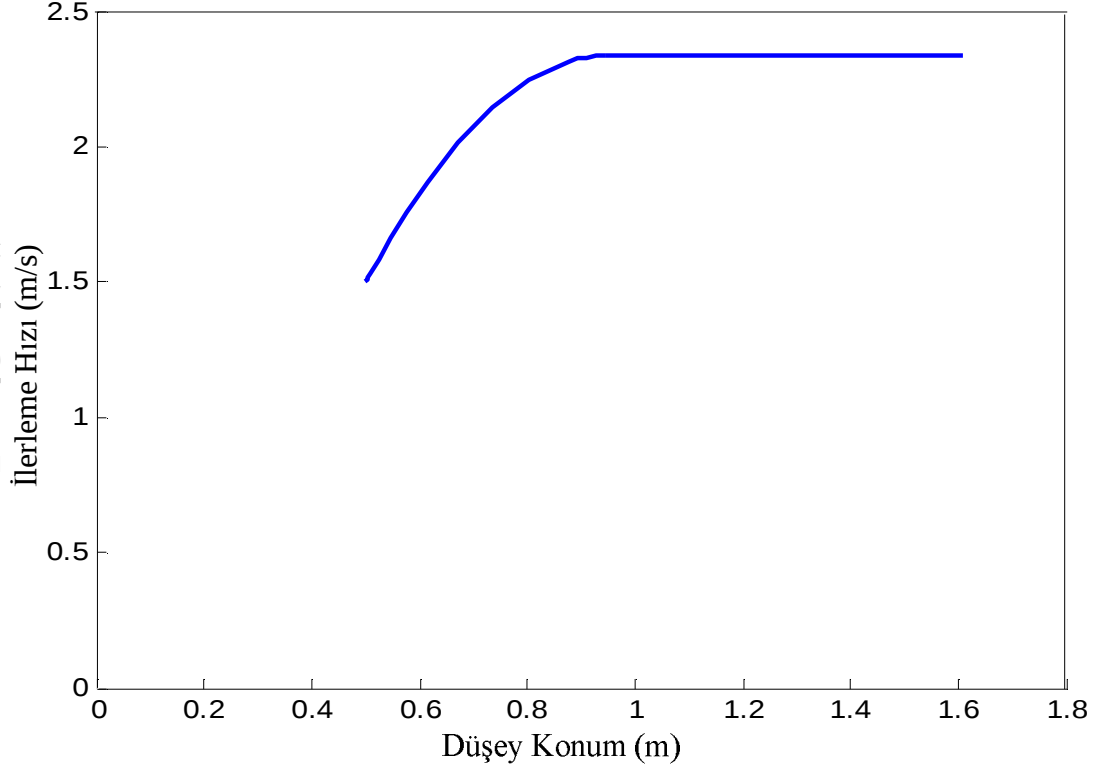
Şekil 5.6 Faz eğrisinin üç boyutlu ortamda farklı eksenlerde çizimi.



Şekil 5.7 Faz eğrisinin üç boyutlu ortamda farklı eksenlerde çizimi.

5.4. Geçiş Eğrileri

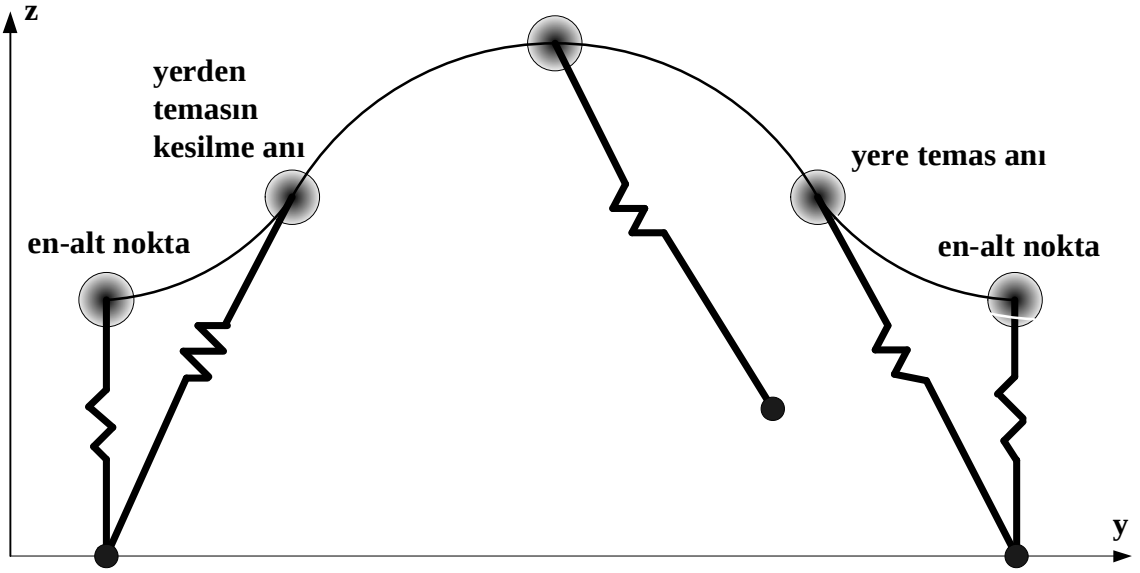
Geçiş grafik çizimleri sistemin dikey ekseninde öteleme hız değerine karşın yatay ekseninde düşey mesafe değerlerinin çizimi ile elde edilir. Bu gösterime geçiş çizimi denir. Sisteme ait geçiş grafiği Şekil 5.8’ de görülmektedir. Bu geçiş eğrisine ait başlangıç değerleri yatay ekseninde ilerleme hızı 1.5 m/s , dikey ekseninde bacak belli bir değerde sıkıştırılmış şekilde olup düşey konum 0.5 m ve dikey eksenindeki hızı 0 m/s alınarak geçiş eğrileri oluşturulmuştur.



Şekil 5.8 Geçiş Grafiği.

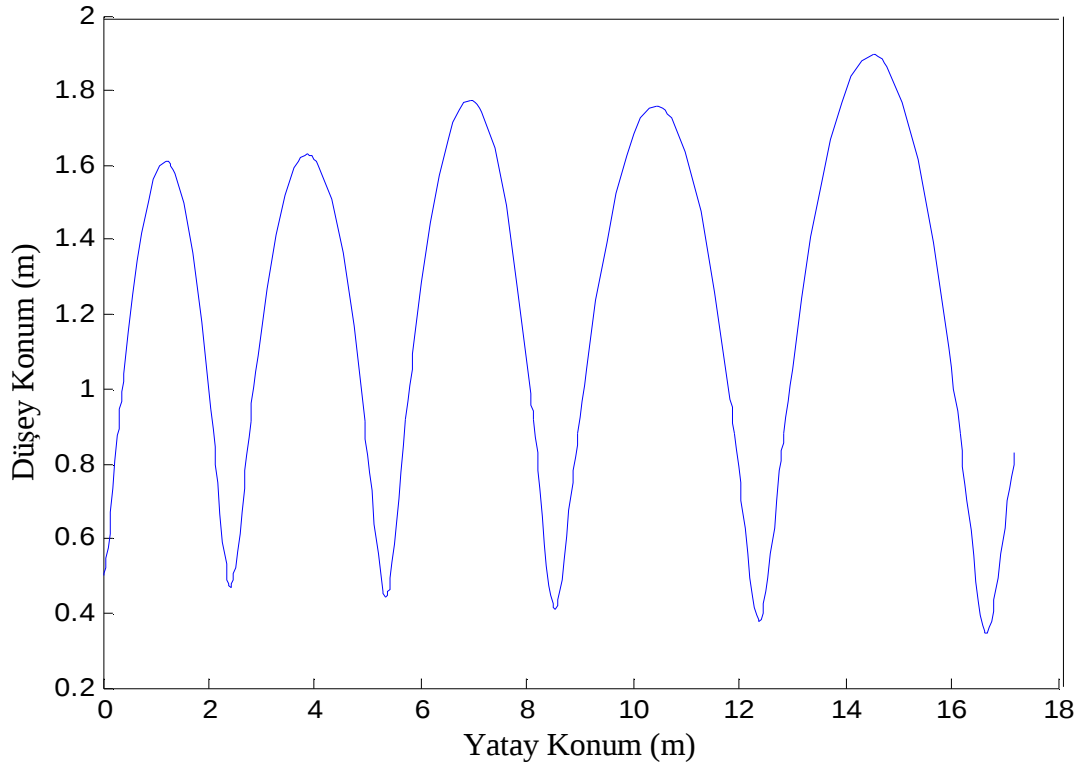
5.5. Sisteme Dışardan Enerji Verilmesi

Bu kısımda SLIP ile modellenen robotun her zıplayarak yürüme işleminin belirli bir fazında dışarıdan enerji vererek bu işlem gerçekleştirilecektir. Bunun sonucunda robot her bir adımında bir önceki adımına göre daha yükseğe ve daha uzun bir mesafede zıplayarak adımını gerçekleştirecektir. Bu olay çok basit bir işlem ile gerçekleşmektedir. Bu işlemi robotun bazı değişik fazlarına uygulayarak elde edilmektedir. Daha önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi robotun her bir adımı iki olay ve dört fazdan oluşmaktadır. Robot bacağına yer ile temas etme süresi içindeki olayına yer olayı, robotun yerden temasını kestikten sonra havada uçuş işlemine de havada uçuş olayı demiştik. Bu iki olay içerisinde de ayrı ayrı her bir olay ikişer faz gerçekleştirmektedirler. Yer olayında bacağın yere temas ettikten sonra sıkışabileceği en son yere kadar kısalması fazı olurken maksimum oranda sıkıştıktan sonra ilk boyuna gelineye kadar uzanarak açılma fazı oluştuğunu ifade edilmişti. Robotun havada uçuş olayında ise, robot yerden temasını kestikten sonra havada en yüksek noktaya kadar uçuş fazı olurken havadaki en yüksek noktadan aşağı uçarak yere temas etme noktasına kadar olan anada iniş fazı denilmektedir. Robot bacağına ait bu olaylar ve fazlar Şekil 5.9’ da gösterilmiştir.

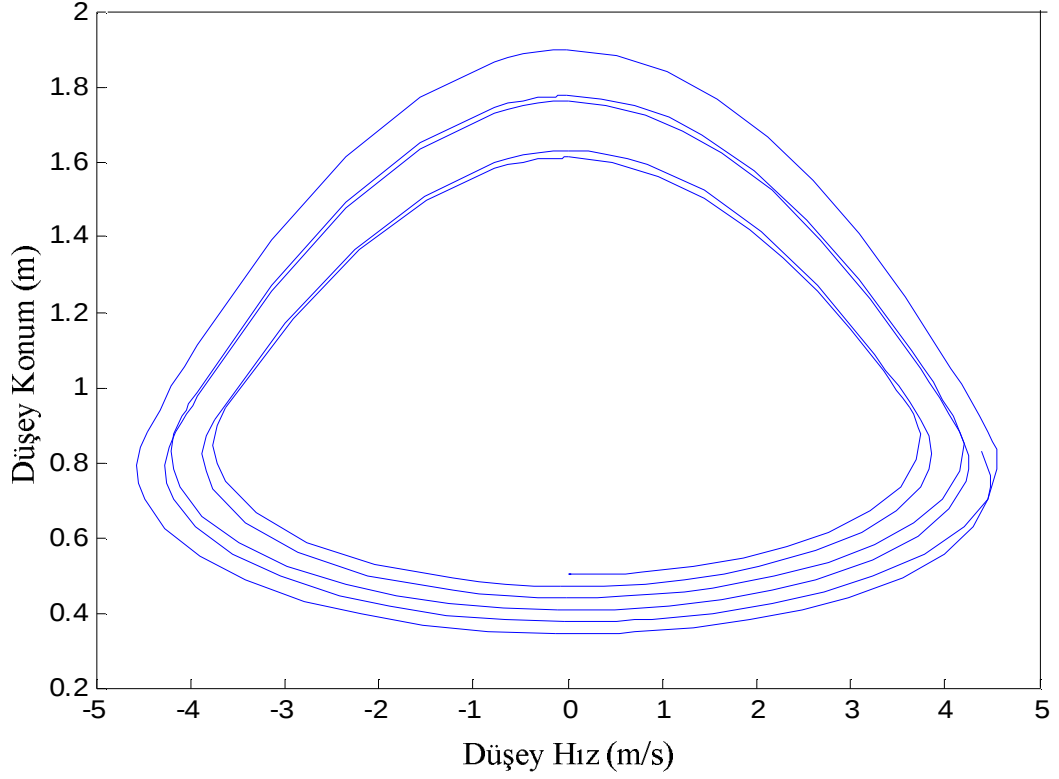


Şekil 5.9 Robot bacağına ait olaylar ve evreler

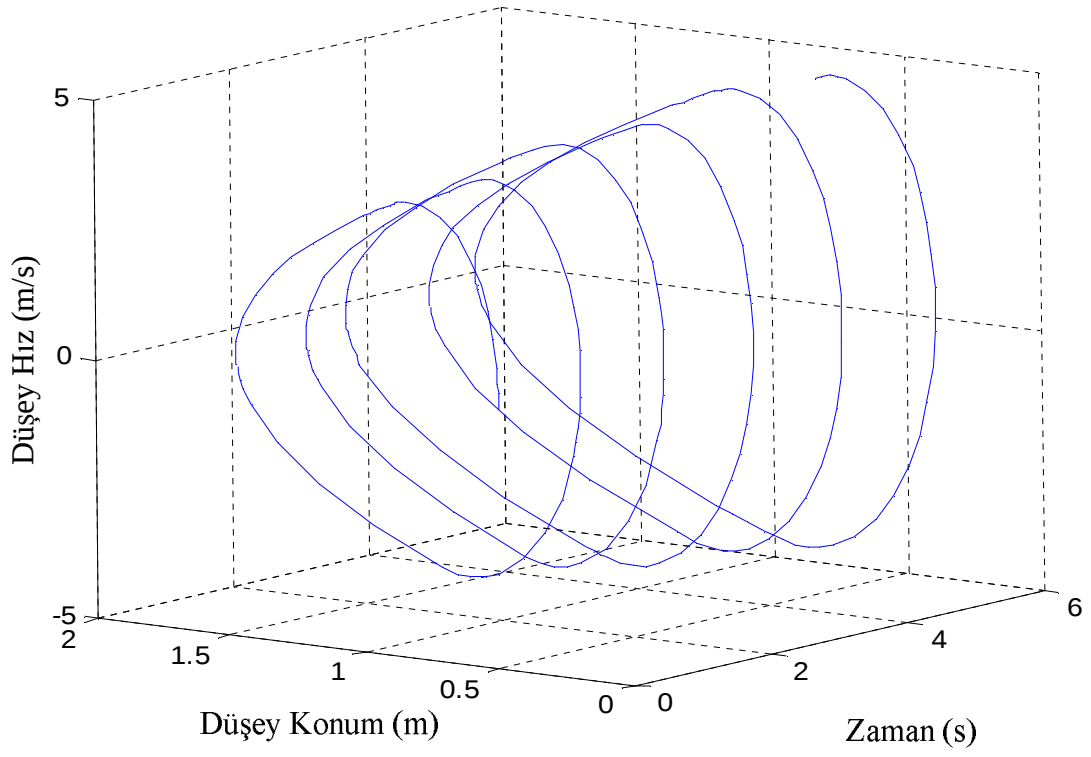
Sisteme dışardan enerji verme işlem yer olayında gerçekleşmektedir. Bu yer olayı içerisindeki bacağın sıkışma ve açılma fazı içerisinde gerçekleşmektedir. Bu fazlar içerisinde bacağın rijitlik yay kat sayısını farklı değerlerde alınması bizi sonuca ulaştırmaktadır. Yukarıdaki örneklerde alınan başlangıç değerleri kullanılarak işlem grafiklerle gösterilmeye çalışılmıştır. Burada bacağın her bir adımını gerçekleştirdiğinde sıkışma olayı esnasında bacağın rijitlik yay sabiti için $k_c = 900 \text{ N/m}$ alınırken açılma olayı esnasında bacağın rijitlik yay sabiti için $k_d = 1000 \text{ N/m}$ alınmıştır. Bu uygulama SLIP ile modellenen robotun her bir adımının bir önceki adımına göre daha yükseğe ve daha ileriye zıplamasına sebep olacaktır. Bu olayın hareket performansı Şekil 5.10' da gösterilmiştir. Sistemin faz eğrisi Şekil 5.11' de gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 5.12 ve Şekil 5.13' de üç boyutlu faz eğrileri verilmiştir.



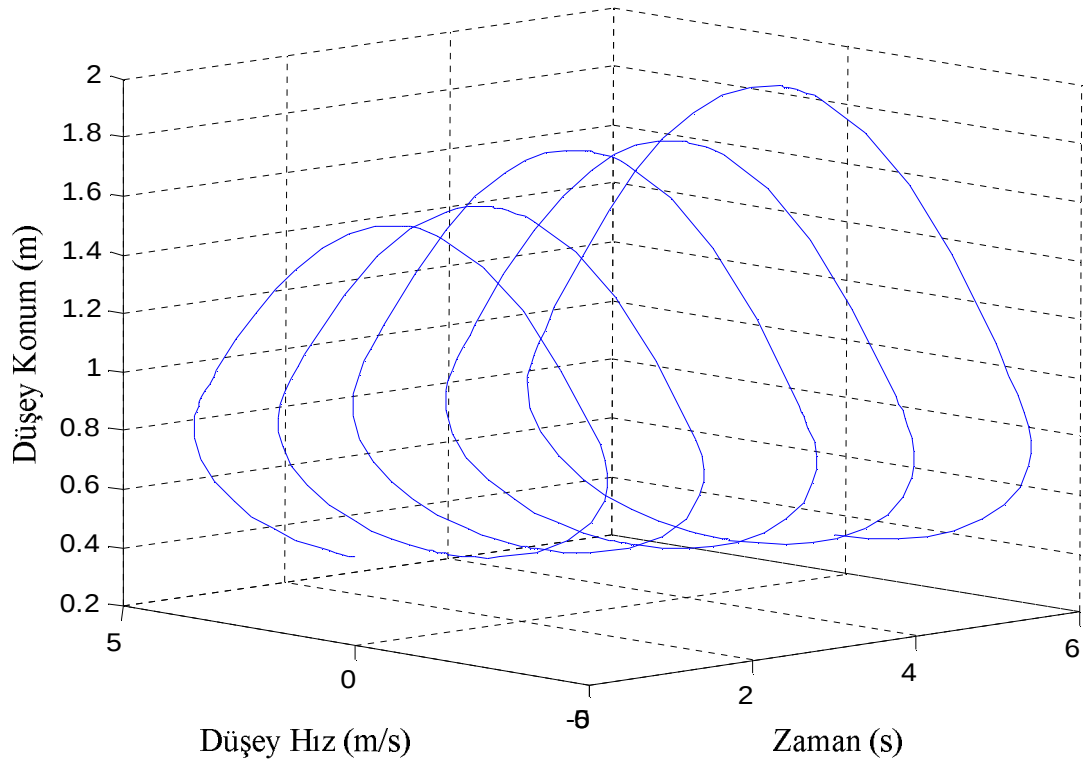
Şekil 5.10 Zıplayarak yürüme($k_c = 900 \text{ N/m}$, $k_d = 1000 \text{ N/m}$).



Şekil 5.11 Faz Eğrisi($k_c = 900 \text{ N/m}$, $k_d = 1000 \text{ N/m}$).



Şekil 5.12 Üç boyutlu faz eğrisi($k_c = 900 \text{ N/m}$, $k_d = 1000 \text{ N/m}$).

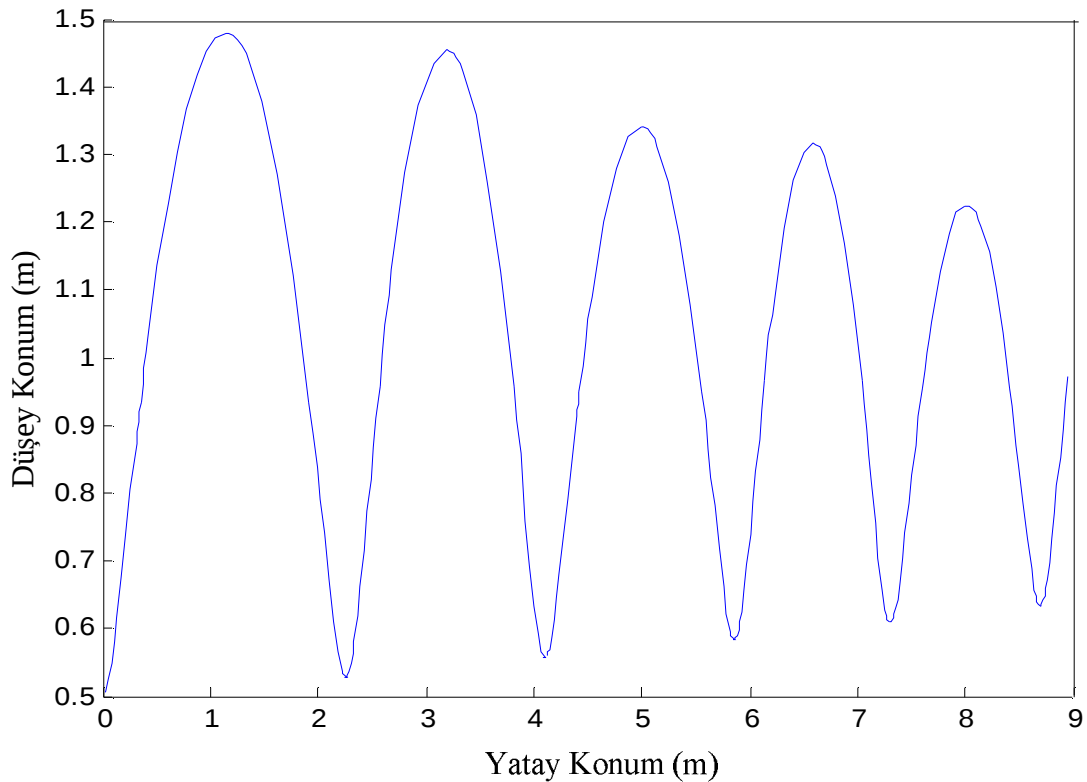


Şekil 5.13 Üç boyutlu faz eğrisi($k_c = 900 \text{ N/m}$, $k_d = 1000 \text{ N/m}$).

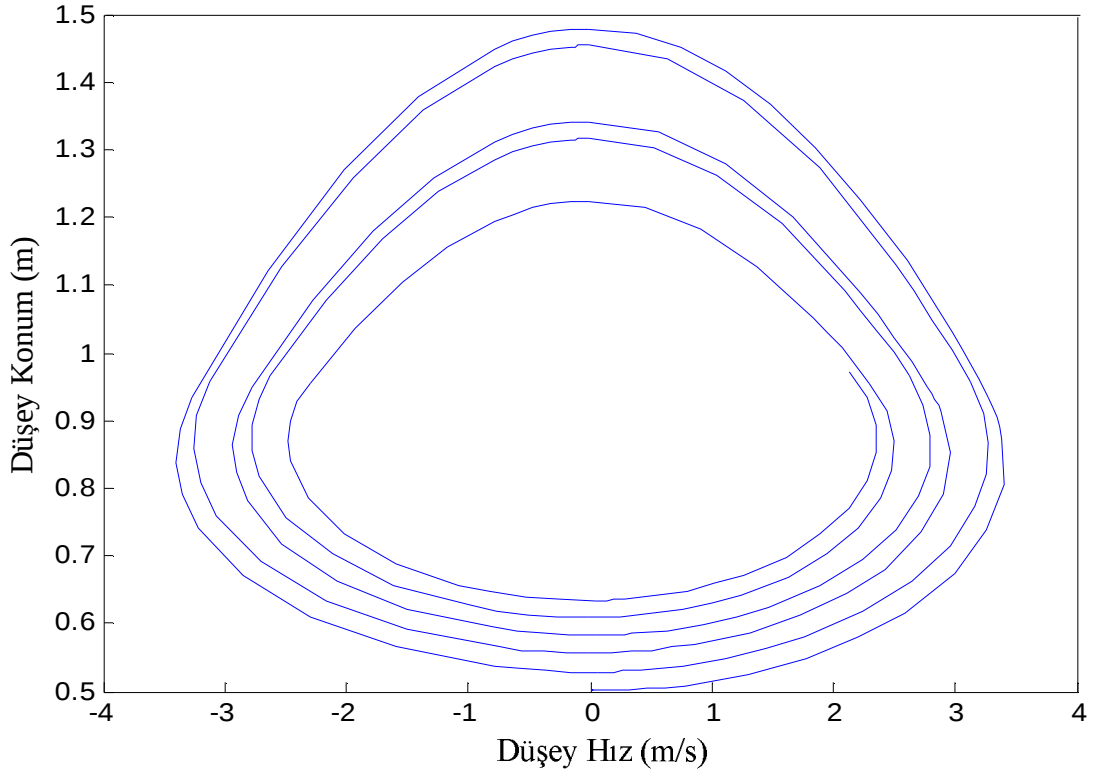
5.6. Sistemden Enerji Alınması

Bu kısımda SLIP ile modellenen robotun her zıplayarak yürüme işleminin belirli bir fazında sistemden enerji alınarak bu işlemi gerçekleştirilmektedir. Bunun sonucunda robot her bir adımında bir önceki adımına göre daha az yükseğe ve daha az bir mesafede adımını atmaktadır. Bu olay çok basit bir işlem ile gerçekleşmektedir. Bu işlemi robotun bazı değişik fazlarına uygulanarak elde edilmektedir.

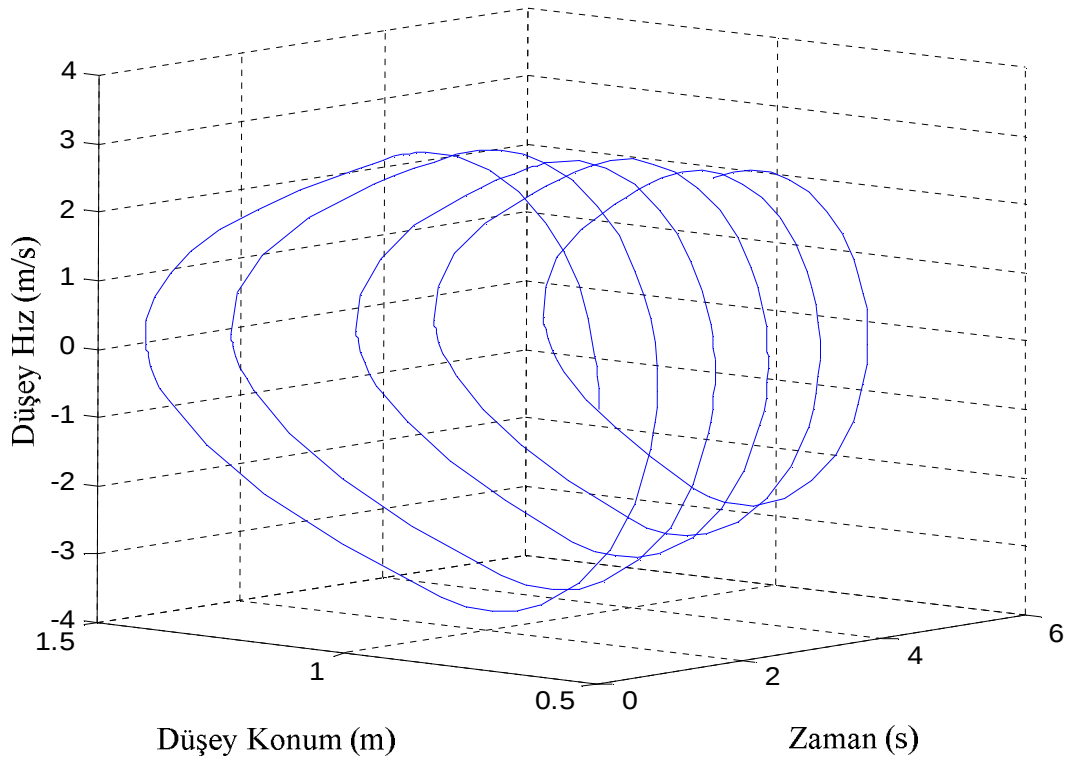
Sistemden enerji alma işlemi yer olayında gerçekleşmektedir. Bu işlem, yer olayı içerisindeki bacağın sıkışma ve açılma fazları içerisinde gerçekleşmektedir. Bu fazlar içerisinde bacağın rijitlik yay kat sayısını farklı değerlerde almamız bizi sonuca ulaştırmaktadır. Yukarıdaki örneklerde alınan başlangıç değerleri kullanılarak işlem grafiklerle gösterilmeye çalışılmıştır. Burada bacağın her bir adımını gerçekleştirdiğinde sıkışma olayı esnasında bacağın rijitlik yay sabiti için $k_c = 1000 \text{ N/m}$ alınırken açılma olayı esnasında bacağın rijitlik yay sabiti için $k_d = 900 \text{ N/m}$ alınmıştır. Bu uygulama SLIP model robotun her bir adımının bir önceki adımına göre daha az yüksekliğe ve daha az ileri zıplamasına sebep olacaktır. Bu olayın hareket performansı Şekil 5.13’ de gösterilmiştir. Sistemin faz eğrisi Şekil 5.14’ de gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’ da üç boyutlu faz eğrileri verilmiştir.



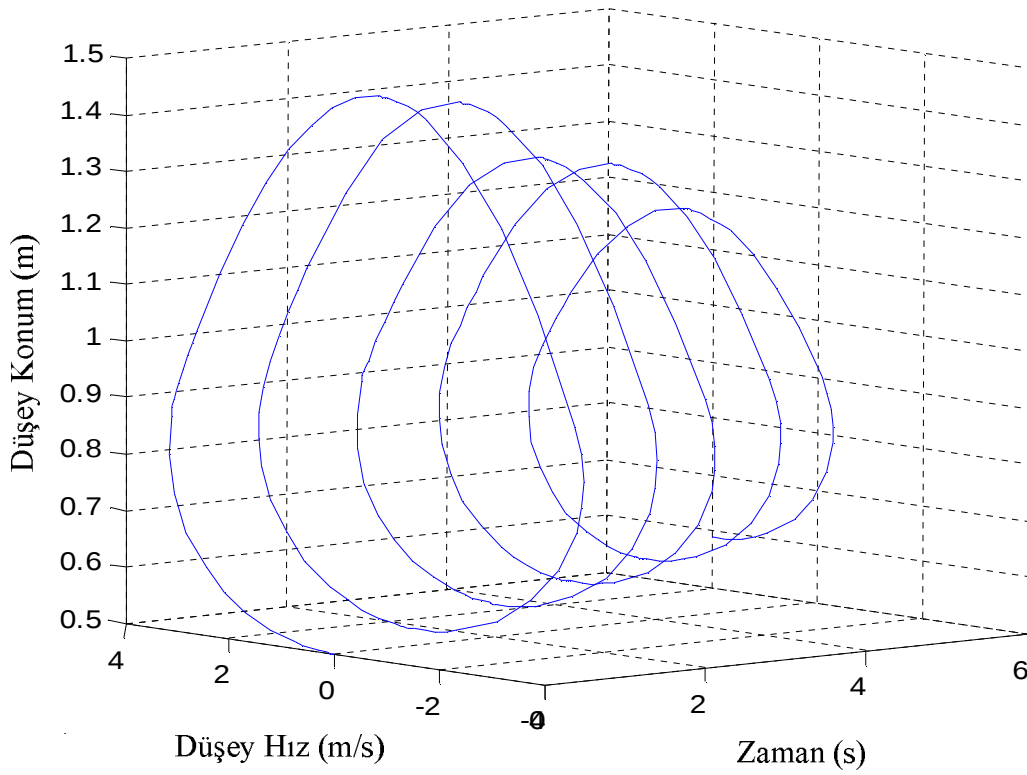
Şekil 5.14. Zıplayarak yürüme($k_c = 1000 \text{ N/m}$, $k_d = 900 \text{ N/m}$).



Şekil 5.15. Faz Eğrisi($k_c = 1000 \text{ N/m}$, $k_d = 900 \text{ N/m}$).



Şekil 5.16. Üç boyutlu faz eğrisi($k_c = 1000 \text{ N/m}$, $k_d = 900 \text{ N/m}$).



Şekil 5.17. Üç boyutlu faz eğrisi ($k_c = 1000 \text{ N/m}$, $k_d = 900 \text{ N/m}$).

5.7. Sonuç

Kütle-Yay Ters Sarkaç (SLIP) modeli, yürüeyebilen tüm bacaklı hayvan çeşitlerinin esas yürüme hareket davranışlarını elde etmek için biyomekanik ve robotik literatürüne yerleşmiş en basit bir yaklaşım şeklidir. Ayrıca Kütle-Yay Ters Sarkaç modeli biyomekanikçilere, kara böcekler ve insanlar gibi birçok çeşit yaratıkların hareket prensiplerinin anlaşılmasında büyük kolaylık kazandırmıştır. Bu model yaratıkların yürümeleri, koşmaları, sıçramaları ve zıplamalarının modellenmesinde oldukça başarılı olmuştur. Bu çalışmada SLIP ile modellenen tek bacaklı bir robotun zıplayarak yürüyüşü için basit bir pasif kontrol sunulmuştur ve sayısal benzetimi başarı ile gerçekleştirilmiştir.

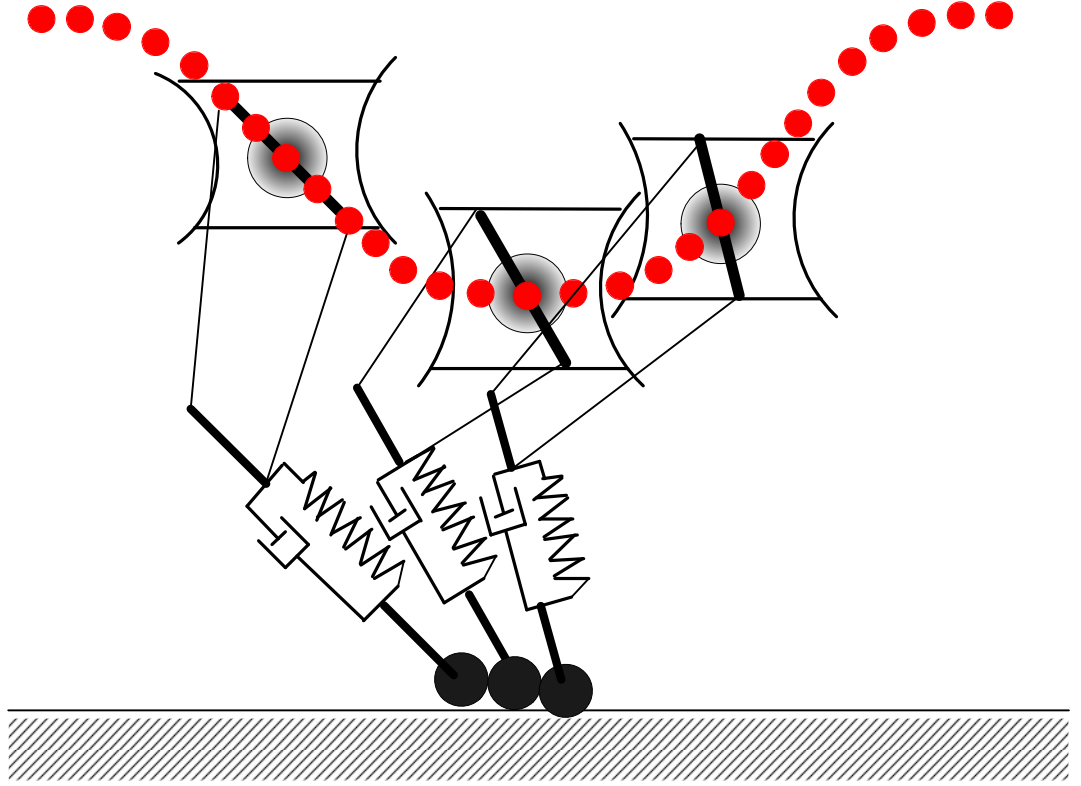
6. QUADRUPEDAL ROBOTUN DİNAMİK MODELİ

6.1. Giriş

Mobil robotlar günümüz teknolojisinin bir gereği olarak laboratuvarlar dışında da ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, geleneksel tekerlekli, paletli ve raylı sistemlere sahip araçların tasarım sınırlarının aşılması gün geçtikçe artan bir eğilim göstermektedir. Bu sınırları aşmak için, mobil robotların bir dalı olan biyomimetik, biyolojik esinlenmelerden yararlanarak yeni tasarımlar gerçekleştirilmesine neden olmaktadır. Bu yeni tasarımlar daha çok bacaklı sistemleri içerir. Bu bacaklı sistemler bilinen geleneksel tasarımlardan çok daha fazla hareket kapasitesine ve çok yönlülüğe sahiptirler.

Bacaklı sistem tasarımını gerçekleştirmek için ilk çalışma, sistem statik denge sağlamak koşulu ile yavaş bir hareket kabiliyeti ile sonuçlandı. Bacaklı robot çalışmalarında en önemlilerinden biri Hirose's Titan bilim adamına ait bir çalışmadır [94]. Robotun dengede kalabilmesi için, sistemin ağırlık merkezinin konumu yerdeki bacakların desteği ile oluşan bir poligon içinde sürmesi gereklidir [90]. Ağırlık merkezinin takip edeceği poligon ya da yörünge yapısını Şekil 6.1' de gösterilmiştir.

Bu çalışmadaki hedefimiz; dört bacaklı robotun dinamik olarak dengeli bir şekilde zıplayarak yürümesini gerçekleştirmektir. Robot ve bacak hareketlerinin dinamiği üzerinde yapılan çalışmalarının en önemlileri Raibert tarafından 1980 ve 1990 yılları aralarında CMU ve MIT Leglabs laboratuvarlarında yapılmıştır [2]. Yazarın araştırmaları; belirli bir yüksekliğe zıplama denetimi, ileri hız, ana gövdenin bacakları üzerinde sıkışarak kasılması ve tek bacaklı (monopod), iki bacaklı (bipedal), dört bacaklı (quadrupedal) robotlar ile dengeli bir yürüyüş için çeşitli yürüme karakterleri meydana getirmek olarak sıralanabilir.



Şekil 6.1 Yürüme için Kütle-Yay Ters Sarkaç Modeli(SLIP)

Ayrıca bu çalışmalardaki denetim algoritmaları farklı yürüme karakterlerinde çok hızlı ve dengeli bir dinamik yürüyüşü ortaya koymuştur. Bu yürüme karakterlerine normal tripod yürüme, zıplama, koşma ve kangurular gibi zıplayarak yürümeyi örnek verebiliriz.

Ayrıca başka dengeli dinamik tasarım çalışmaları da önerilmiştir. Dört bacaklı quadruped Scamper adında bir robot, Furusho ve meslektaşları tarafından tasarlanmıştır [191]. Scamper robotunun her bir bacağı iki eklemden oluşmuş olup sekiz adet denetim döngüsü ile hem hız denetimi hem de pozisyon denetimi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın ardından Kimura ve arkadaşları tarafından farklı yaklaşımlar getirilmiştir. Biyolojik prensiplere dayalı olarak zıplayan Patrush adında bir robot tasarımı gerçekleştirmişlerdir [192]. Patrush robotunun her bir bacağı üç eklemden ibaret olup üç serbestlik dereceli (SD) bir mekanizmadan oluşmaktadır. Kalça ve diz eklemlerinde motor yerleştirilirken, bacak ucu eklemine motor yerleştirilmemiştir.

Daha farklı bacak tasarımları da önerilmiştir. Bunlara örnek olarak, dört bacaklı quadrupedal yürüme karakterine sahip Scout-II adlı robot gösterilebilir. Bu tasarım, Buehler, Poulakakis ve Smith tarafından gerçekleştirilmiştir. Her bir bacağın kendi eksenini etrafında dönmesi için birer motor kalçalara yerleştirilmiştir. Bacaklar kütle-yay şeklinde olup robot gövdesinin ağırlığından dolayı bacağın sıkışarak kısılması ve açılması ile bacak lineer olarak boyu değişmektedir. Ayrıca daha fazla motor ile tasarlanan robotlar vardır. Buna OSU-Stanford KOLT quadrupedal adlı robotu örnek olarak verilebilir [193].

Değişik modellerde dinamik dengeli dört bacaklı yürüyebilen robot çalışmaları önerilmiştir. Murphy ve Raibert tarafından yapılan, bacak boyu denetlenebilen zıplayan robot çalışmaları mevcuttur [136]. Bu çalışmanın ardından, Berkemeier uzaysal düzlemde basit lineer yürüyüş uygulamalarını gösteren bir çalışma gerçekleştirmiştir [194]. Daha sonra Brown ve Raibert pasif döngülü hareket koşullarını araştırdı [136]. Yazarlar sistem hareketinin iki sınır durumu hakkında araştırmalar yaptılar. Robotun yer-duruş(stance) evresini ve havadaki uçuş(flight) evresini araştırdılar. Bu araştırmalar, robotun her iki evrede de eğer uygun başlangıç değerleri verildiği takdirde pasif olarak yürüme, koşma, zıplama ve zıplayarak yürüme işlemlerinin gerçekleştirebileceğini göstermiştir. Son zamanlarda biyomekanik sonuçlardan yararlanarak açık döngülü ve dinamik sistem yapıları gerçekleştirilmiştir [195, 128]. Ayrıca, Poulakakis ve arkadaşlarının tasarladığı Scout-II robotu ile, uygun başlangıç şartları ve yüksek hız altında pasif olarak dengeli yürüyüş yapılabileceğini gösterilmiştir [139, 196].

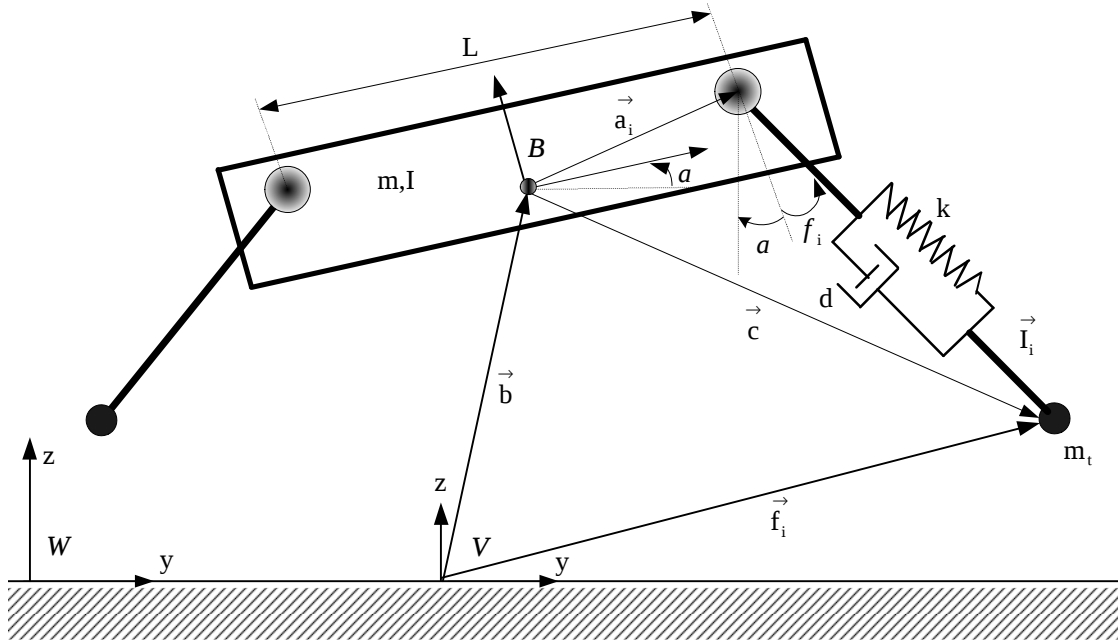
Formalsky ve arkadaşları yeni bir ruh ile düzlemsel dört bacaklı quadrupedal dört nala koşan robotun faz hareketlerini araştırmışlardır [197]. Schmiedeler ve Waldron üç boyutlu ortamda quadrupedal dört nala koşan robotun kinematik ve dinamik yapısı üzerinde çalışma yaptılar [198]. Herr ve McMahon at şeklinde quadrupedal dört nala koşan robot üzerinde araştırma gerçekleştirmişlerdir [199]. En son olarak bacaklı robot çalışmasına Rhex adındaki robotu örnek verilebilir. Rhex, Saranlı ve arkadaşları tarafından yapılan altı bacaklı tripod yürüyebilen, zıplayabilen, takla atabilen ve zıplayarak koşabilen altı serbestlik dereceli bir robottur. Rhex' in her bir bacağı kalça kısmına yerleştirilen birer adet motordan ibarettir. Yani toplam altı adet DC motor kullanılmıştır. Bacaklar düzlemsel olarak serbestçe dönebilmektedirler [92]. Rhex robot bacakları arazi ve bulunduğu ortama göre farklı

mekanizmalarda tasarlanmıştır. Bunlar bir yokuşu çıkabilecek şekilde, su da yüzebilecek şekilde, merdiven çıkabilecek şekilde ve zıplayarak koşabilecek şekilde tasarlanmıştır.

Bu bölümde, dört bacaklı quadrupedal bir robotun iki boyutlu ortamda zıplayarak yürüme olayının dinamik modeli oluşturulmuş ve daha sonraki bölümde ise sistemin sayısal benzetimi gerçekleştirilmiştir. Ardışık bir şekilde zıplayarak yürüme işlemleri ardışık kapalı bir döngü içerisinde farklı dinamik yapıların sayısal benzetimleri kullanılarak sistemin hareketi incelenmeye çalışılmıştır. Bu tür sistemlerin sayısal analizlerini elde etmek ve sayısal olarak çözmek çok zor bir işlemdir. Bu sayısal çözümü mümkün olduğunca basitleştirmek ve anlaşılmasını kolaylaştırmak için Kütle-Yay Ters-Sarkaç(SLIP) modeli oluşturulmuştur. Ayrıca SLIP model sistemin denetimi bir sonraki bölümde PD denetim ile başarılı olarak gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.

6.2. Düzlemsel Quadrupedal Sistem Modeli

6.2.1 Giriş



Şekil 6.2 Düzlemsel quadrupedal model.

Bu çalışmada düşünülen düzlemsel dört bacaklı quadrupedal model Şekil 6.2' de gösterilmiştir. İlk olarak üç referans kartezyen koordinat sistemi tanımlamaktadır. W koordinat sistemin içinde bulunduğu sabit uzay ortamının, V sanal(virtual) bacakların bulunduğu ortamın

ve B ise gövdenin ağırlık merkezine yerleştirilen kartezyen koordinat merkezini temsil etmektedir.

Sistem dört uygun bacak ve bir rijit gövdeden ibarettir. Bacakların gövdeye yerleştirildiği noktanın B kartezyen koordinat merkezine olan uzaklıkları a_i ile temsil edilmektedir. Rijit gövdenin kütlesi m kütleli atalet momenti I ile temsil edilmektedir. Gövdenin W kartezyen koordinat merkezine doğru oryantasyonu robotun α (pitch) açısı tespit eder ve aynı zamanda robotun dönme matrisinin oluşturulmasında kullanılır ve bu matris ${}^W_B R$, ile gösterilir [95]. Gövdenin V kartezyen koordinatına göre konumu b ile temsil edilmektedir.

Bacakların kütlesi gövdeye göre çok küçük bir değere sahiptirler($m_i \ll m$). Robotun uçuş evresinde dinamik modelini oluşturmak için bacak ucundaki ayaklarına gövdeye göre 1/100 oranında bir kütle değeri verilmiştir. Bu kabul bacakları havada uçuş evresinde kontrol edebilmek içindir. Ayrıca tüm bacaklar $V_i(r_i)$ potansiyelinde radyal yaylara ve d_i ile temsil edilen radyal viskoz sönüm elemanlarına sahiptirler. Her bir bacak gövdeye kalça kısmından bağımsız motorlar ile bağlanmıştır. Sistemi denetleyen bu motorlar her bir bacağı t_i ile temsil edilen tork uygulamaktadır.

Daha önceki kısımlarda da anlatıldığı gibi robot bacakları farklı iki evreye sahiptir. Bunlar yer-duruş(stance) evresi ve uçuş(flight) evreleridir. Sistem farklı evrelerde farklı dinamik yapıya sahiptir. Yer evresinde bacak ucunun yer üzerindeki V kartezyen koordinat merkezine göre konumu f_i ile temsil edilmektedir. Rijit gövde, bacaklar yer evresinde iken direk olarak bacaklarda oluşan yay ve sönüm kuvvetlerinden etkilenmektedirler. Diğer taraftan, gövde uçuş evresinde olduğu zaman bacaklarda bu kuvvetler oluşmadığından dolayı etkilenmemektedir. Bacakların bu evredeki hareketleri bacak uçlarındaki ayak kütlelerinin dinamiği ile kontrol edilmektedir. Ayrıca uçuş evresinde bacak uçlarındaki ayakların konum ve hızları sistemin bulunduğu tüm kartezyen koordinatlarından bağımsızdır.

6.2.2. Yer İle Bacakların Etkileşim Modeli

Bu kısımda bacakların yer ile etkileşimlerinin modellenmesi tespit edilecektir. Bu ise sistemin hareket denklemlerinin çıkarılmasında yardımcı olacaktır. Bilindiği gibi tasarlanan robot dört bacaklı bir sistemdir. Bu sistem ardışık bir şekilde farklı dinamik yapıların analizi ile elde edilmektedir. Bu ardışık olaylar robotun yer-duruş evresi ve havadaki uçuş evresi olarak iki

ana olaydan ibarettir. Bu nedenle bacakların havada mı yoksa yer-duruş evresinde mi gibi tespitler, oluşturulan kontrol algoritması ve durum belirleme metotları ile tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu sistemde dört çift olasılık vardır. Yani her bir bacağın iki evreden birisinde olma olasılığı vardır. Diğer bir deyişle, bir bacak ya yer ile temas halindedir ya da yerden teması kesilmiş halde havada uçuş evresindedir. Bu olaylar döngüsü dört bacak için düşünüldüğünde sistemin hareketi esnasında bacaklara ait oluşabilecek 16 durum olasılığı vardır ($2^4=16$; bacak sayısı=4, bacak evresi=2).

Geliştirilen bir kontrol algoritma modeli ile sistemin hangi dinamik yapıyı çözeceği işlemini $s_i \in \{0,1\}$ kümesinin kodlanması ile gerçekleştirilmiştir. Yani bir bacak yerde ise 0 değeri havada ise 1 değeri şeklinde bacağın hangi konumda olduğunu ifade etmektedir.

Bacakların durumlarını ifade eden modeli aşağıda verilen denklem ile ifade edilebilir:

$$M_h := \{\Omega | \Omega = (s_1, \dots, s_4)\} \quad (6.1)$$

Bacakların yer-duruş evresinde üzerlerinde oluşan yay ve sönüm kuvvetlerinin matris formatında gösterimi yararlı olacaktır:

$$S := \text{diag}(s_1, \dots, s_2) \quad (6.2)$$

Rijit gövdenin ve bacakların birlikte uzaydaki ifadesi aşağıdaki gibi verilebilir:

$$C_h := \{c_h | c_h = [b, a, f_1, \dots, f_4]^T\} \quad (6.3)$$

Burada bacakları aşağıdaki gibi bir dizin ile tanımlanabilir:

$$I := \{1, 2, 3, 4\} \quad (6.4)$$

Benzer şekilde quadrupedal bacakları da yukarıdaki gibi bir dizin ile benzer şekilde ifade edilebilir:

$$I_1 \cup I_2 = I \quad (6.5)$$

$$I_1 \cap I_2 = \emptyset \quad (6.6)$$

$$|I_1| \cup |I_2| = 2 \quad (6.7)$$

6.2.3. Bacaklara ait kutupsal koordinatlar ve Kuvvetler

6.2.3.1. Kinematik Denklemler

Bacakların yer-duruş evrelerinde yer ile etkileşimleri rijit gövde üzerine etki eden bacak kuvvetlerinin oluşmasından dolayı meydana gelmektedir. Burada önemli olan bacakların ana gövdeye göre oryantasyonu(durumu) ve konumunun bilinmesidir.

Sistemin konfigürasyonunu temsil eden $c_h \in C_h$, ana gövde kartezyen koordinatları içindeki bacak vektörü kolaylıkla hesaplanabilir:

Bacak ucundaki ayağın ana gövde ağırlık merkezine olan değişken uzunluk vektörü($\dot{\mathbf{c}}$), V eksen takımına göre tanımlanmıştır:

$$\dot{\mathbf{f}}_i = \dot{\mathbf{b}}_i + \dot{\mathbf{c}} \quad (6.8)$$

$$\dot{\mathbf{c}} = \dot{\mathbf{f}}_i - \dot{\mathbf{b}}_i \quad (6.9)$$

Ana gövdeye yerleştirilmiş hareketli eksen takımına göre tanımlanırsa ($\dot{\mathbf{c}}$):

$$\dot{\mathbf{c}} = \dot{\mathbf{a}}_i + \dot{\mathbf{I}}_i \quad (6.10)$$

$\dot{\mathbf{c}}$ vektörünü $\dot{\mathbf{f}}_i$ ve $\dot{\mathbf{b}}_i$ vektörü değişkenleri türünden yerine yazabilmek için eksen dönüşüm matrislerini kullanarak oluşturulabilir:

$$I_i = \dot{\mathbf{c}} - \dot{\mathbf{a}}_i \quad (6.11)$$

Dönüşüm matrisi aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$${}^w_B R(a) = \begin{bmatrix} \cos(a) & -\sin(a) \\ \sin(a) & \cos(a) \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

$${}^B_w R(a) = [{}^w_B R]^T = R^T(a) \begin{bmatrix} \cos(a) & \sin(a) \\ -\sin(a) & \cos(a) \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

B gövde eksen takımına göre I_i vektörünü yeniden düzenlenecek olursa,

$$\dot{\mathbf{I}}_i = R^T(a) (\dot{\mathbf{f}}_i - \dot{\mathbf{b}}) - \dot{\mathbf{a}}_i \quad (6.14)$$

$$\mathbf{r}_{\mathbf{I}_i} = \begin{bmatrix} \cos(a) \sin(a) \\ -\sin(a) \cos(a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{iy} - b_y \\ f_{iz} - b_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \partial_{iy} \\ \partial_{iz} \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

$$I_{iy} = \cos(a)(f_{iy} - b_y) + \sin(a)(f_{iz} - b_z) - \partial_{iy} \quad (6.16)$$

$$I_{iz} = -\sin(a)(f_{iy} - b_y) + \cos(a)(f_{iz} - b_z) - \partial_{iz} \quad (6.17)$$

elde edilir. 6.14 nolu denklemin zamana göre türevi alınıp, aşağıdaki düzenlemeler yapılırsa,

$$\frac{dI_i}{dt} = \dot{\mathbf{I}}_i = \frac{dR^T(a)}{dt} (\mathbf{f}_i - \mathbf{b}) + R^T(a) \left(\frac{d\mathbf{f}_i}{dt} - \frac{d\mathbf{b}}{dt} \right) \quad (6.18)$$

$$\frac{dR^T(a)}{dt} = DR^T(a), \quad \frac{da}{dt} = \dot{a}_i \quad (6.19)$$

$$\dot{\mathbf{I}}_i = DR^T(a) (\dot{\mathbf{f}}_i - \dot{\mathbf{b}}) - \dot{a}_i + R^T(a) (\dot{\mathbf{f}}_i - \dot{\mathbf{b}}) \quad (6.20)$$

$$\dot{\mathbf{I}}_i = \begin{bmatrix} -\sin(a) & \cos(a) \\ -\cos(a) & -\sin(a) \end{bmatrix} (\dot{\mathbf{f}}_i - \dot{\mathbf{b}}) \dot{a}_i + \begin{bmatrix} \cos(a) & \sin(a) \\ -\sin(a) & \cos(a) \end{bmatrix} (\dot{\mathbf{f}}_i - \dot{\mathbf{b}}) \quad (6.21)$$

$$\dot{\mathbf{I}}_i = \begin{bmatrix} -\sin(a) & \cos(a) \\ -\cos(a) & -\sin(a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{iy} - b_y \\ f_{iz} - b_z \end{bmatrix} \dot{a}_i + \begin{bmatrix} \cos(a) & \sin(a) \\ -\sin(a) & \cos(a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{f}_i^y - \dot{b}_y \\ \dot{f}_i^z - \dot{b}_z \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

$$\mathbf{f}_{iy} = -\sin(a)(f_{iy} - b_y)\mathbf{d} + \cos(a)(f_{iz} - b_z)\mathbf{d} + \cos(a)(\mathbf{f}_{iy} - \mathbf{b}_y) + \sin(a)(\mathbf{f}_{iz} - \mathbf{b}_z) \quad (6.23)$$

$$\mathbf{f}_{iz} = -\cos(a)(f_{iy} - b_y)\mathbf{d} - \sin(a)(f_{iz} - b_z)\mathbf{d} - \sin(a)(\mathbf{f}_{iy} - \mathbf{b}_y) + \cos(a)(\mathbf{f}_{iz} - \mathbf{b}_z) \quad (6.24)$$

elde edilir. $\mathbf{I}_i$ vektörü polar koordinatlarda yeniden oluşturulup, zamana göre türetilirse,

$$\mathbf{I}_i := [r_i, f_i] \quad (6.25)$$

$$r_i = \sqrt{I_{iy}^2 + I_{iz}^2} \quad (6.26)$$

$$r_i^2 = I_{iy}^2 + I_{iz}^2 \quad (6.27)$$

$$2r_i \mathbf{R}_i = 2I_{iy}\mathbf{f}_{iy} + 2I_{iz}\mathbf{f}_{iz} \quad (6.28)$$

$$\mathbf{R}_i = \frac{I_{iy}\mathbf{f}_{iy} + I_{iz}\mathbf{f}_{iz}}{r_i} \quad (6.29)$$

$$f_i = a \tan\left(\frac{I_{iy}}{-I_{iz}}\right) \quad (6.30)$$

$$f_i = a \tan 2(I_{iy}, -I_{iz}) \quad (6.31)$$

$$\mathbf{f}_i = \frac{I_{iy}\mathbf{f}_{iz} - \mathbf{f}_{iy}I_{iz}}{r_i^2} \quad (6.32)$$

olarak elde edilir.

Robot bacaklarının eklendiği kalçalarda eyleyicilerin oluşturduğu torklar olduğu gibi bacaklar üzerinde oluşan radyal yay kuvvetleri ve sönüm kuvvetleri de vardır. Şekil 6.2' de

tanımlanan düzlemsel quadripedal modeldeki bacaklar üzerinde oluşan radyal kuvvetler aşağıdaki gibi formüle edilebilir:

$$F_{ri} = -DV_i(l_0 - r_i) - d_i \dot{r}_i \quad (6.33)$$

Sonuç olarak, yer ile temas eden her bir bacak için oluşan kuvvetler aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$F_i = R(a + f_i) \begin{bmatrix} t_i / r_i \\ -F_{ri} \end{bmatrix} \quad (6.34)$$

$R(a + f_i)$ için standart eksen dönüşüm matrisi oluşturulursa:

$$R(a + f_i) = \begin{bmatrix} \cos(a + f_i) & -\sin(a + f_i) \\ \sin(a + f_i) & \cos(a + f_i) \end{bmatrix} \quad (6.35)$$

elde edilir. Her bir bacak üzerinde oluşan radyal kuvvetler tekrar düzenlenerek yazılırsa:

$$t_i = F_i \cdot r_i \quad (6.36)$$

$$F_i = t_i / r_i \quad (6.37)$$

$$F_{iy} = \cos(a + f_i) \cdot (t_i / r_i) + \sin(a + f_i) \cdot F_{ri} \quad (6.38)$$

$$F_{iz} = \sin(a + f_i) \cdot (t_i / r_i) - \cos(a + f_i) \cdot F_{ri} \quad (6.39)$$

denklemleri elde edilir.

Ancak burada, bacak kuvvetlerinin sistem yer üzerinde olduğu zaman oluştuğuna dikkat edilmelidir. Bacak uçlarındaki m_t kütesine sahip ayaklar üzerine etki eden toplam yer kuvvetlerinin değeri sıfır olarak kabul edilmektedir [95, 96]. Bu kabul bacak uçlarındaki ayakların yer ile temas ederken hiçbir şekilde yerde kaymadığını ve bir toplu iğnenin ucu gibi yere saplanarak yer-duruş evresi boyunca hem z-y düzleminde hem de z-x düzleminde

hareketsiz olduğu anlamına gelmektedir. Ayaklar(m_t) sadece bacak üzerinde oluşan yay ve sönüm kuvvetlerinden etkilenirler. Yer tarafından oluşan tepki kuvvetlerinden etkilenmezler.

Sonuç olarak, bacak üzerinde oluşan bacak kuvvetlerini kapalı vektör formunda tanımlanırsa, bu denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$t := [t_1, \dots, t_4] \quad (6.40)$$

$$F_r := [F_{r1}, \dots, F_{r4}] \quad (6.41)$$

Ayrıca yay-kütle ters sarkaç ile modellenen her bir sanal bacak üzerinde oluşan potansiyel enerji(J) V_{bacak} ile temsil edilirken sönüm enerjisi(J) de D_{bacak} ile temsil edilmektedir. Ön ve arka sanal bacaklar üzerindeki toplam enerji aşağıdaki gibi ifade edilmiştir;

$$V_{bacak_ön} = \frac{1}{2} k_{bacak_ön} (r)^2 \quad (6.42)$$

$$V_{bacak_arka} = \frac{1}{2} k_{bacak_arka} (r)^2 \quad (6.43)$$

$$D_{bacak_ön} = \frac{1}{2} d_{bacak_ön} (\dot{r})^2 \quad (6.44)$$

$$D_{bacak_arka} = \frac{1}{2} d_{bacak_arka} (\dot{r})^2 \quad (6.45)$$

$$E_{ön} = V_{bacak_ön} + D_{bacak_ön} \quad (6.46)$$

$$E_{ön} = \frac{1}{2} k_{bacak_ön} (r)^2 + \frac{1}{2} d_{bacak_ön} (\dot{r})^2 \quad (6.47)$$

$$E_{arka} = V_{bacak_arka} + D_{bacak_arka} \quad (6.48)$$

$$E_{arka} = \frac{1}{2} k_{bacak_arka} (r)^2 + \frac{1}{2} d_{bacak_arka} (\dot{r})^2 \quad (6.49)$$

Aynı zamanda yay-kütle ters sarkaç ile modellenen her bir sanal bacağı tahrik eden eyleyicilerin zıplayarak yürüme işlevi sürecinde harcadıkları güç(watt) aşağıdaki denklemler ile hesaplanmıştır;

$$P_{bacak_ön} = f_{bacak_ön} \cdot t_{bacak_ön} \quad (6.50)$$

$$P_{bacak_arka} = f_{bacak_arka} \cdot t_{bacak_arka} \quad (6.51)$$

$$P_{quadrupedal_top} = P_{bacak_ön} + P_{bacak_arka} \quad (6.52)$$

$$P_{quadrupedal_top} = f_{bacak_ön} \cdot t_{bacak_ön} + f_{bacak_arka} \cdot t_{bacak_arka} \quad (6.53)$$

6.2.3.2. Sistemin Hareket Denklemleri

Sistem basit olarak düzlemsel quadrupedal model olarak modellenmiştir. Rijit gövde bacaklar tarafından oluşturulan yay ve sönüm kuvvetleri etkisi altındadır. Sonuç olarak sisteme ait hareket denklemleri aşağıdaki formda oluşturulabilir [95]:

$$m \ddot{\theta} = \sum_{i=1}^4 s_i F_i \quad (6.54)$$

Bu denklemi bileşenler cinsinden yazacak olursak,

$$m \ddot{\theta}_y = \sum_{i=1}^4 s_i F_{iy} \quad (6.55)$$

$$m\ddot{\theta}_y = s_{-1}F_{1y} + s_{-2}F_{2y} \quad (6.56)$$

$$m\ddot{\theta}_z = \sum_{i=1}^4 s_i F_{iz} \quad (6.57)$$

$$m\ddot{\theta}_z = s_{-1}F_{1z} + s_{-2}F_{2z} \quad (6.58)$$

elde edilir. Dönmeden dolayı oluşan denklem aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$I\ddot{\alpha} = \sum_{i=1}^4 s_i (f_i - b) \times F_i \quad (6.59)$$

Burada f_i ve b vektörel formda aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{f}_i = f_{iy}\dot{j} + f_{iz}\dot{k} \quad (6.60)$$

$$\dot{b} = b_y\dot{j} + b_z\dot{k} \quad (6.61)$$

Denklem 6.60 ve 6.61 6.59 denkleminde yerine koyulup, vektörel çarpım gerçekleştirilecek olursa,

$$I\ddot{\alpha} = s_i [(f_{iy} - b_y)\dot{j} + (f_{iz} - b_z)\dot{k}] \times [F_{iy}\dot{j} + F_{iz}\dot{k}] \quad (6.62)$$

$$I\ddot{\alpha} = s_i [(f_{iy} - b_y)F_{iz}\dot{i} - (f_{iz} - b_z)F_{iy}\dot{i}] \quad (6.63)$$

$$I\ddot{\alpha} = s_i [(f_{iy} - b_y)F_{iz} - (f_{iz} - b_z)F_{iy}]\dot{i} \quad (6.64)$$

$$I\ddot{\alpha} = s_{-1}[(f_{1y} - b_y)F_{1z} - (f_{1z} - b_z)F_{1y}] + s_{-2}[(f_{2y} - b_y)F_{2z} - (f_{2z} - b_z)F_{2y}] \quad (6.65)$$

denklemini elde edilir. Benzer şekilde bacakların dinamiği için, Newton' un ikinci hareket kanunu uygulanacak olursa,

$$m_t \cdot \ddot{f}_i = (1 - s_i) F_i \quad (6.66)$$

denklemini elde edilir. Burada F_i yerine koyulup, aşağıdaki gerekli işlemler yapılacak olursa,

$$m_t \cdot \ddot{f}_i = (1 - s_i) \cdot R(a + f_i) \cdot \begin{bmatrix} t_i / r_i \\ -F_{ri} \end{bmatrix} \quad (6.67)$$

$$m_t \cdot \ddot{f}_i = (1 - s_i) \begin{bmatrix} \cos(a + f_i) & -\sin(a + f_i) \\ \sin(a + f_i) & \cos(a + f_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_i / r_i \\ -F_{ri} \end{bmatrix} \quad (6.68)$$

$$\ddot{f}_{1y} = (1 - s_{-1}) [\cos(a + f_1) \cdot (t_1 / r_1) / m_t + \sin(a + f_1) \cdot F_{r1} / m_t] \quad (6.69)$$

$$\ddot{f}_{1z} = (1 - s_{-1}) [\sin(a + f_1) \cdot (t_1 / r_1) / m_t - \cos(a + f_1) \cdot F_{r1} / m_t] \quad (6.70)$$

$$\ddot{f}_{2y} = (1 - s_{-2}) [\cos(a + f_2) \cdot (t_2 / r_2) / m_t + \sin(a + f_2) \cdot F_{r2} / m_t] \quad (6.71)$$

$$\ddot{f}_{2z} = (1 - s_{-2}) [\sin(a + f_2) \cdot (t_2 / r_2) / m_t - \cos(a + f_2) \cdot F_{r2} / m_t] \quad (6.72)$$

elde edilir.

Eğer herhangi bir bacak yer ile temas ediyorsa bu durum her bir bacak için s_i ile temsil edildiği bilinmelidir. Sadece yer ile temas eden bacakların rijit gövdenin hareketi üzerinde etkileri vardır. Ayrıca bacakların yere çarptıkları zaman, bacakların uçlarındaki ayakların hızlarının sıfır olduklarını kabul edilmektedir [95, 96] Sonuç olarak, bacakların uçlarındaki ayaklar, yerden ayrılma fazı evresi başlangıcına kadar geçen zamanda sabittirler yani yerlerinden hareket etmezler.

6.3. Dinamik Kapalı Döngü Modeli

Durum modeli, sistemin dinamiğine bağlı olarak kendini ve belirli hareketleri tanımlayan bir arka plan olarak düşünülebilir. Bu arka plan sistemin dinamiğini oluşturan bir kapalı döngüden ibarettir. Sistemin dinamiği uçuş ve yer evrelerinden oluşmaktadır. Bu evreler arasındaki geçişler “olaylara” ya da “fazlara” bağlıdır.

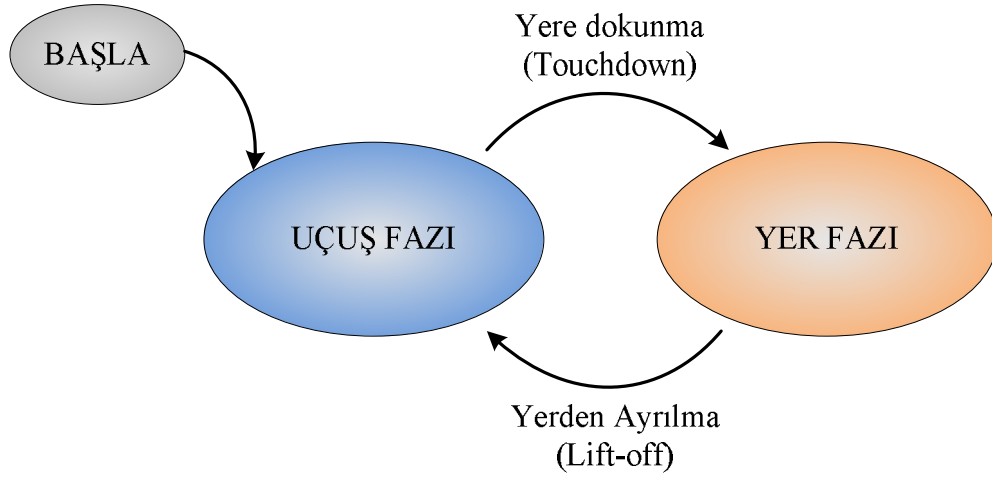
6.3.1. Fazlar ve Olaylar

Genel olarak, bacaklı robotlar ardışık olayların ve fazların gerçekleştiği dinamik sistemlerdir. Bacakların durumlarına göre dinamik karakteristikleri de değişmektedir. Örnek olarak bacaklar, yerde iken bacaklar sadece bir manipülatör olarak, birden fazla bacak olduğunda kapalı zincir mekanizması ve bacaklar yerde olmadığına serbest ya da uçan mekanizma olarak tasarlanır.

Yer evresinde ayaklardan en az biri yerdedir ve ileri hareket için gövdeyi destekler. Bazı araştırmacılar, çok ayaklı bir robotta iki ayak eş zamanlı bu hareketi yapıyorsa bunu çifte-duruş evresi olarak adlandırmaktadırlar [139]. Fizyoloji alanında ise bazı araştırmacılar ise bu deyim yerine yer ile temas evresi olarak adlandırırlar. Uçuş evresi hiçbir ayağın yere değmediği ve gövdenin havada olduğu evredir. Bu durumlara bacak yürüyüşünde fazlar olarak adlandırılırlar [2].

Bacaklı robotun zıplamasında durum ya da faz değişimi için iki tane durum söz konusudur: Bacak yerde iken ve yerde değil iken durumlarıdır. Eğer bacak yerde ise, duruş evresi olarak adlandırılır. Bacak yerde değil ise uçuş evresi olarak adlandırılır. Durum geçişleri ise iniş ya da yere dokunma ve havalanma ya da yerden teması kesme olmak üzere iki olay şeklindedir. Robot dengede olduğu sürece bu evreler arasında geçiş yaparak hareket çevrimine devam eder. Sonuçta bacaklı robot, bu evrelerden ikisini de gerçekleştirir ve bu evreler robotun dinamik karakterini belirler.

Şekil 6.3 bu iki evre arasındaki döngüyü göstermektedir. Görüldüğü gibi evreler durumlar boyunca gerçekleşir. Bu yürüyüş için gerekli olan en basit veri tabanı olmaktadır ve ileride anlatılacağı gibi simülasyon için denetim şemasını teşkil etmektedir.



Şekil 6.3 Sistemin fazları ve olayları arasındaki geçişler [99]

6.3.2. Durumlar

Fazlar ve olayların belirlenmesinin yanında, ayakların durumunu belirlemek için dinamik karakterlerinden bağımsız olmaksızın durumlar tanımlanmalıdır. Genelde her bir durum için bir denetim metodu belirlenmektedir. Bu da yürüyüş denetiminin tamamını etkilemektedir. İki kısma ayrılmış olan olaylar, durum tanımlamaları boyunca açıkça ifade edilmelidir. Olaylar genelde denetimler arasındaki geçişte zamanlamayı ifade eder ve dinamik karakterlerin olaylarla birlikte değişim göstermesi gerekmez.

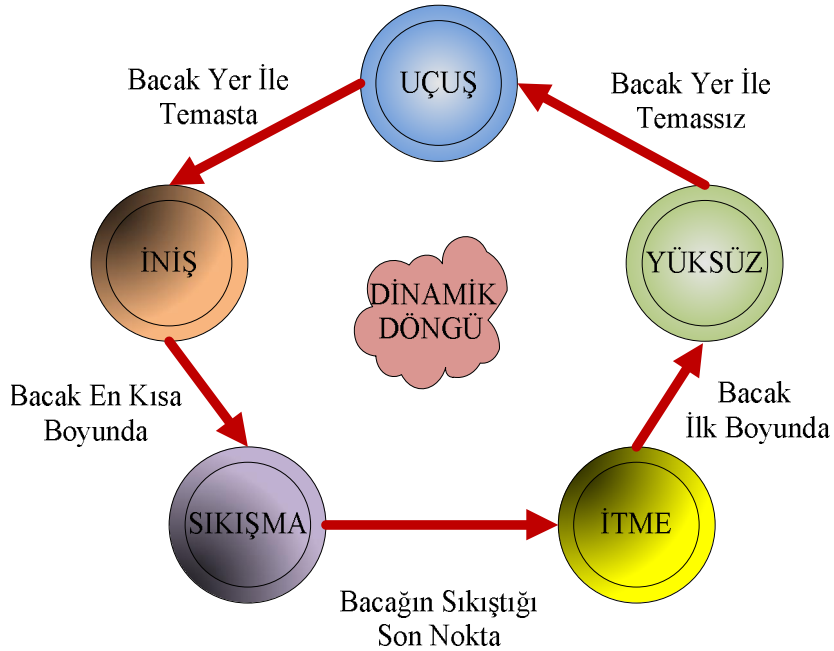
Ayrıca durumları belli sayıda kısıtlamak sistemin daha basit bir şekilde çalışması ve daha hızlı olması için önemli bir etkidir. Durumlar olarak önce uçuş ve yer evreleri tanımlanmakta sonrada yere dokunma olan iniş ve yerden ayrılma olan kalkış olaylarını durumlar arasındaki geçişler olarak tanımlanabilmektedir. Burada robotun hali açıklanırken “durum” ve “evre ” terimleri eşanlamda kullanılmıştır. Her bir durum için bir denetim metodu kullanılmıştır. Denetim metotlarından bir tanesi yer evresinde diğeri ise havada iken uygulanan denetimdir.

6.3.3. Durum Modeli

Durum modeli zıplayarak yürüyüş denetimini gösteren ve kısımlara bölünmüş olaylardan ibaret bir akış diyagramını ifade eden bir kavramdır. Zıplayan bir robotun denetimi için durum ve olaylar tanımlanmış ve durum modeli diyagramı içinde kapalı bir şekilde tamamlanmıştır. Bu denetimler yer-durmuş evresi ve uçuş evresi için olacaktır. Bu iki denetim metodu verimli ve gerekli olmakla birlikte bu tip bir denetim en basit durum modeli olmaktadır. Örneğin Raibert çalışmasında, zıplayan bir robot için gerçekleşen beş durumu Şekil 6.4’ de ki gibi ifade etmektedir [2].

6.3.4. Faz Seçimi

Robot her bir evre için farklı bir denetim eylemine ihtiyaç duymaktadır. Çünkü her bir evrenin dinamiği ve içerdiği denetim algoritması farklıdır. Geliştirilen bir denetim algoritma modeli ile sistemin hangi dinamik yapıyı çözeceği işlemini $s_i \in \{0,1\}$ kümesi ile kodlanmıştır. Yani bir bacak yerde ise 0 değeri havada ise 1 değeri şeklinde bacağın hangi konumda olduğunu ifade etmektedir. Denetimler arasında geçişi sağlamak için “refleks denetim” kullanılmıştır. Refleks denetim, robotun her bir evreye uygun zamanda geçtiğini algılaması için gerekmektedir. Yani, iniş ya da yere dokunma evresine ve yerden ayrılma ya da uçuş evresine geçişleri algılaması gerekmektedir.



Şekil 6.4 Bacaklı robot zıplarken oluşan beş durumlu dinamik döngü [2]

6.4. Faz Geçişleri

Sistemin dinamiğinin oluşturulmasında daha önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi ardışık gerçekleşen farklı evreler içerisinde modellenmesiyle oluşmaktadır. Sistem ayrıık zamanlarda yer ile temas ederken ayrıık zamanlarda da yerden temasını keserek havada uçuş evresini gerçekleştirmektedir. Bu dinamik model zamana bağlı olarak kapalı bir döngü içerisinde gerçekleşmektedir. Sistem bu kapalı döngüyü farklı iki evreden oluşturmaktadır. Bu evreler her bir bacak için bacak ucundaki ayağın yer ile temas ettiği zaman dilimindeki yer-duruş evresi ile bacak ucundaki ayağın yerden temasını keserek havada uçuş evreleridir. Sistemin dinamik modeli bu iki evredeki farklı dinamik modellerin kapalı bir döngüde ardışık olarak çözümlenmeleri ile gerçekleşmektedirler.

Bu evrelerin meydana geldiği anları ve değişimlerinin tespitini belirlemek için zamana bağlı olarak oluşan kapalı döngüdeki yörüngeyi formüle ederek önemli bir çözüm elde edilmiştir. Sistemin yer-duruş evresinde mi yoksa havada uçuş evresinde mi olduğunu dinamik yapı içinde tanımlanan başlangıç fonksiyonlarıyla tespit edilmektedir. Bu başlangıç fonksiyonları uçuş evresinden yer evresine geçişteki anda gerçekleşen yere dokunma fazı ile temsil edilen h_i^t başlangıç fonksiyonu ile yer evresinden uçuş evresine geçişteki anda gerçekleşen yerden teması kesme fazı ile de temsil edilen h_i^l başlangıç fonksiyonları sistemin evrelerini tespit etmede kullanılmıştır. h_i^t fonksiyonu sistemin yer-duruş evresinde olduğunu bize haber verirken h_i^l fonksiyonu ise sistemin uçuş evresinde olduğunu bize haber vermektedir.

Sonuç olarak h_i^t fonksiyonu bize sistemin yer-duruş evresine ait dinamik modelin aktif olacağını ve bu evreye ait hareket denklemlerinin çözüleceğini tanımlayan bir giriş fonksiyonudur. Aynı şekilde h_i^l fonksiyonu da bize sistemin uçuş evresine ait dinamik modelin aktif olacağını ve bu evreye ait hareket denklemlerinin çözüleceğini tanımlayan diğer bir giriş fonksiyonudur.

Bu çalışmada robota ait tüm bacaklar için düşünülen h_i^t ve h_i^l başlangıç fonksiyon koşulları birbirlerinden bağımsızdırlar. Bu fonksiyonlar aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$h_i^t = b_z - r_i \cos(a + f_i) \quad (6.73)$$

$$h_i^l = -p_z(F_i) = -\sin(a + f_i).(t_i / r_i) - \cos(a + f_i).F_{ri} \quad (6.74)$$

Yere dokunma evresine ait başlangıç fonksiyonu h_i^t her bir bacağın z düşey eksenindeki konumu ile sistemin ağırlık merkezinin z düşey eksenindeki konumları arasındaki farkı verir. Bu fark sıfır olduğunda bacak yer ile temas halindedir denir. Bu olay bize sistem yer-duruş evresinde olduğunu ve sonuç olarak yer dinamik modeli aktif olacağı anlamına geldiğini ifade etmektedir. Yerden teması kesme evresine ait başlangıç fonksiyonu h_i^l ise her bir bacağın z düşey ekseninde oluşan radyal kuvvetlerin toplamını verir. Bu kuvvetlerin toplam değeri sıfır olduğunda bacak artık yerden temasını kesmiş haldedir denir. Bu olay bize sistem uçuş evresinde olduğunu ve sonuç olarak uçuş evresi dinamik modeli aktif olacağı anlamına geldiğini ifade etmektedir. Sonuç olarak bu iki evre için başlangıç fonksiyonları tüm bacaklar için uygun olarak tanımlanabilir.

6.5. Motivasyon

Zıplama, her yürüme karakteri gibi iki kapalı bir döngü içinde gerçekleşen çift dinamik sistemden oluşmaktadır. Bunlar yer-duruş evresindeki dinamik sistem yapısı ve havada ki uçuş evresindeki dinamik sistem yapısıdır. Bu bölümde biz hem yer-duruş evresi hem de havada ki uçuş evresi için basit modeller tanımlayacağız. Bu modeller dört bacaklı quadruprdal robotun zıplayarak yürümesi için gerçekleştirilecektir.

6.5.1. Yer-Duruş Fazı

Yer fazı robotun bacağın yer ile temas edip, yerden teması kesilinceye kadar geçen fazdır. Bu fazda robotun ana gövdesi kütle-yay modelindeki bacakta oluşan kuvvetlerin ve kalçadaki motorun oluşturduğu momentin etkisi altında hareket etmektedir. Robota ait ana gövde yere ilk temasta bacağın sıkışabileceği son noktaya kadar yavaşlayan bir hız ile gider ve daha sonra bacak açılarak ilk boyuna kadar robot hızlanarak hareket eder. Robotun bu şekilde ki hareket ile izlediği yörünge ya da platform bir ters-sarkaç salınımını andırmaktadır. Bu salınımın doğal frekansı($w_{s\ tan\ ce}$) denklem 6.75' de verilmiştir.

$$w_{yer-duruş} = \sqrt{\frac{k_{bacak}}{m}} \quad (6.75)$$

Bu denklemde k_{leg} bacak rijitlik katsayısı m robotun kütlesini temsil etmektedir. Bu yaklaşım ile her bir bacağın yer ile temas etme süresi ($T_{s tan ce}$) kütle-yay sistem periyodunun $\frac{1}{2}$ ne denk gelmektedir:

$$T_{yer-duruş} = \frac{1}{2} \frac{2p}{w_{yer-duruş}} = p \sqrt{\frac{m}{k_{bacak}}} = p \sqrt{\frac{10kg}{3250N / m \cdot 6}} = 71ms \quad (6.76)$$

Robotun hızı yer evresinde sabit olabilir. Eğer Raibert' in yere dokunma açısı (q_{td}) dengeli yürüme için yeterli koşul olabileceğini farz edersek, daha sonra bacağın yer evresinde toplam süpürdüğü açıyı denklem 6.77' deki gibi hesaplayabiliriz. Burada ϕ robotun ortalama ileri hız değerini, T_{yer} bacağın yer ile temas etme süresini ve l bacağın boyunu temsil etmektedir.

$$q_{td} = \arcsin\left(\frac{\phi T_{yer}}{2l}\right) \quad (6.77)$$

Bu modelde özellikle bacak yere çarparken bacak ile yer arasındaki sürtünme ihmal edilmektedir. Kısacası bacak yere bir iğne ucu gibi saplanmış halde düşünerek sistem modellenmiştir. Bu kabul daha önceki bölümlerde de belirtilmişti. Ayrıca bu modelde yere çarpma etkisi, yatayda ve dönmede ki dinamik yapı yer-duruş esnasında dikkate alınmamıştır [96]. Bu yüzden sistem çok basit, yararlı ve doğruluğu tespit edilmiş olarak modellenmiştir.

6.5.2. Uçuş Fazı

Uçuş evresi bacağın yerden teması kesilerek bir sonraki adımda yer ile temas edinceye kadar geçen kısımdır. Bu evrede sisteme yer kuvvetlerinin etkisi yoktur.

Düşey hareket aşağıda verilen uçuş süresine ($T_{uçuş}$) ve yer-çekime (g) bağlı olarak bulunmuştur.

$$T_{uçuş} = \frac{2h}{g} = \sqrt{\frac{8h}{g}} \quad (6.78)$$

h robotun düşey doğrultudaki hızını, h uçuş evresinde çıktığı en yüksek noktayı, g yer çekim ivmesini temsil etmektedir.

Bu uçuş süresini aşağıdaki denklemlerden de elde edebiliriz:

$$z = n_0 + gt_{\zeta,i} \quad (v_0 = 0) \quad (6.79)$$

$$t_{\zeta,i} = \frac{h}{g} \quad (6.80)$$

$$h^2 = n_0^2 + 2gh \quad (6.81)$$

$$h = \sqrt{2gh} \quad (6.82)$$

$$T_{uçuş} = \frac{2h}{g} = \frac{2\sqrt{2gh}}{g} = \sqrt{\frac{8h}{g}} \quad (6.83)$$

Robotun her bir adımında hem yer-duruş evresinde hem de havada uçuş evresinde geçen toplam süre(T_{top}):

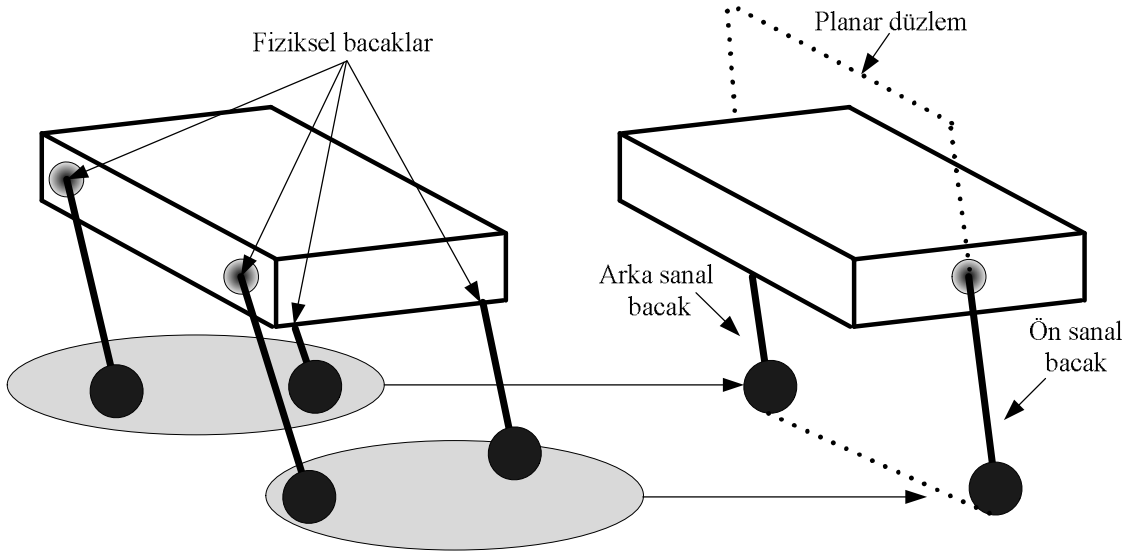
$$T_{top} = T_{uçuş} + T_{yer} \quad (6.84)$$

$$T_{top} = \sqrt{\frac{8h}{g}} + p \sqrt{\frac{m}{k_{bacak}}} \quad (6.85)$$

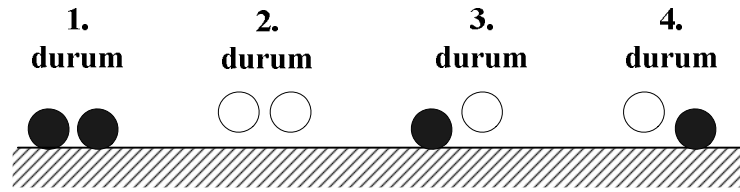
elde edilir.

7. QUADRUPEDAL ROBOT ZIPLAMA MODELİNİN PD İLE DENETİMİ VE SAYISAL BENZETİMİ

Bu bölümde zıplayarak yürüme hareketi incelenmektedir. Zıplayarak yürüme hareketinin esas temeli bir noktadan başlayarak bir doğrultuda zıplayarak yürüme hareketini gerçekleştirmektir. Bunu da düzlemsel bir uzayda gerçekleştiği kabul edilmektedir. Sistemin düzlemsel uzayda hareket ettiğini düşünürsek burada robotun ön bacaklarını birleştirip tek bir bacak gibi ve arka bacakları da birleştirip tek bir bacak gibi düşünebilir. Bu iki bacağın birleştirilerek tek bir bacak halinde modellenmesi ile oluşan yapıya sanal bacak olarak adlandırılmaktadır[2]. Bu yüzden sistem ana gövde, ön sanal bacak ve arka sanal bacak şeklinde üç ana kinematik zincir bileşenlerinden oluştuğu düşünülebilir. Modellenen düzlem ve sanal bacak yapısı Şekil 7.1’ de gösterilmiştir. Bacaklar yer-duruş evresinde yay ve sönüm modeli gibi davranmaktadırlar. Şekil 7.2’ de iki-boyutlu düzlemde model gösterilmiştir ve beş değişken parametre ile tanımlanmıştır (Denklem 7.1). Bütün bu değişkenler ve işaret sembolleri Şekil 7.2’ de gösterilmiştir ve Tablo 7.1’ de değişkenler sembolize edilmiştir. Tablo 7.2’ de ise robota ait parametreler sembolize edilmiştir.

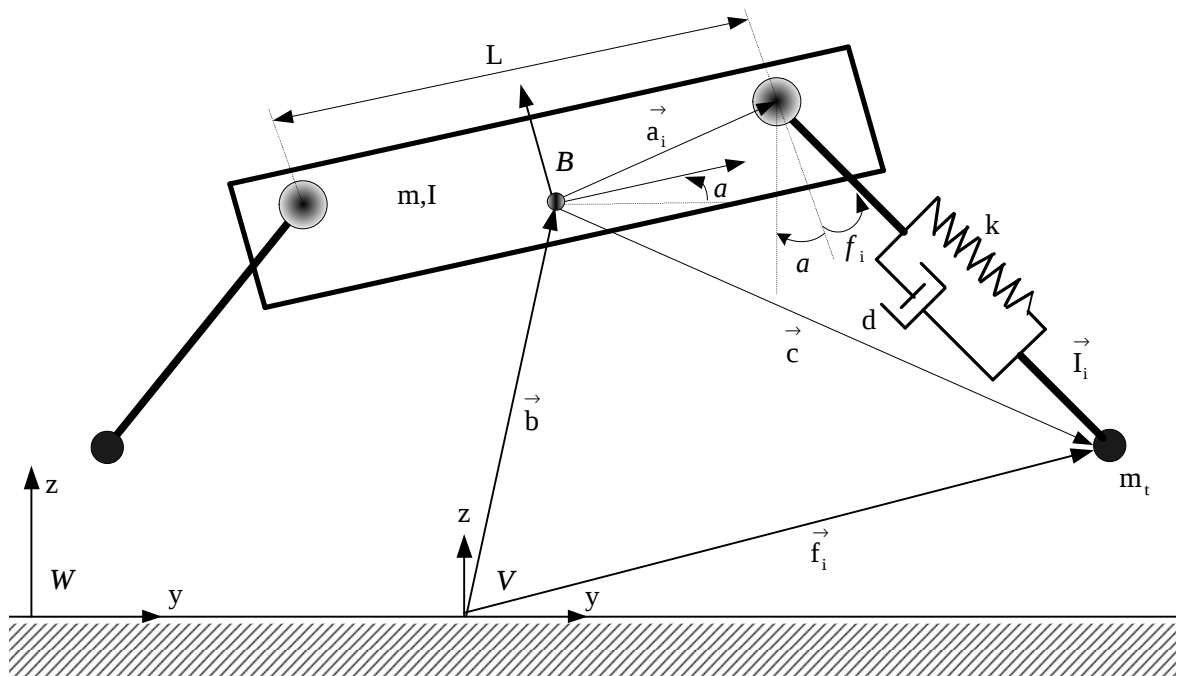


Şekil 7.1 Zıplayarak yürüme için sanal bacaklar



$$x = [z \quad y \quad a \quad f \quad r] \quad (7.1)$$

Her bir sanal bacak, robotun dört durumu içinde yer-duruş ve uçuş evrelerinde olabilirler. Birinci durumda sanal bacakların ikisi de aynı anda yer-duruş durumunda olabilirler. İkinci durumda sanal bacakların her ikisi de aynı anda havada uçuş durumunda olabilirler. Üçüncü durum ise sadece arka sanal bacak yer-duruş durumunda olabilir. Dördüncü durum da ise sadece ön sanal bacak yer-duruş durumunda olabilir. Şekil 7.3' de sanal bacaklara ait yer-duruş ve uçuş durumları gösterilmiştir. Bu evrelerin ya da durumların her birinde sistemin hareket denklemleri farklıdır. Bu sistemin ardışık zamanlarda ardışık yapılarda farklı modellerden oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 7.3 Zıplayarak yürüme için sanal bacaklar ve düzlem içinde robot için iki-boyutlu zıplama modeli.

Tablo 7.1 Robot Değişkenleri

Sembol	Tanım
z, y	Ağırlık Merkezi Kartezyen Koordinatları(COM)
a	Gövde Salınım açısı(Pitch angle)
f	Gövdeye göre bacak açısı
r	Bacak Boyu

Tablo 7.2 Robot Parametreleri [1].

Sembol	Tanım	Birim	Değer
m	Robot gövde ağırlık	kg	7.6
I	Gövde atalet moment	kgm^2	0.171
k_i	i . bacak rijitlik sabiti	N/m	1879
d_i	i . bacak sönüm sabiti	$N/(m/s)$	16.28
l_o	Bacak boyu	m	0.323
L	Robot gövde boyu	m	1
m_t	Bacak ağırlık	kg	0.076

7.1. Zıplayarak Yürüme Denetimi

Bu bölümde önerilen denetim üç adet parametre ile ifade edilmektedir. Bunlar yere dokunma açısı, bacağın yer-duruş evresinde iken ana gövdeyi ileri ötelerken taradığı süpürme açısı ve bacakları z-y düzleminde dönmesini sağlayan torkdur. Yere dokunma açısı f^{td} ile, süpürme açısı f^{swl} ile ve tork t ile temsil edilmektedirler. Tasarlanan denetleyicide robota ait ön ve arka bacaklar birbirlerinden bağımsız olarak denetlenmektedir. Her bir bacak daha önceki bölümlerde anlatılan evre ve fazları bağımsız olarak gerçekleştirmektedirler. Gerçek doğal şartlarda da zaten istenen bu yapıdaki modeldir. Burada sistemin denetimi sadece bacakların denetimi ile gerçekleştirilmektedir. Bu sistem modelinde ana gövdeye hiçbir zaman direk olarak denetim sinyalleri uygulanmamaktadır. Fakat amaç denetlenmek istenen robotun ana gövdesidir.

Literatür çalışmalarında da görüldüğü gibi zıplayarak yürümede robotun ana gövdesinin hep düzlemsel ortamda harmonik bir yörüngeyi takip etmesi istenir[1, 2, 91, 92, 96, 99].

Sistemde bu harmonik yörünge gövde salınım açısı ile temsil edilmiştir. Bu yüzden ana gövdenin salınım denetimi, sistemde bacakların denetlenmesi ile sağlanmaktadır.

Sisteme ait her bir sanal bacak için kullanılan denetim parametreleri Tablo 7.3’ de verilmiştir. Ayrıca sayısal benzetim için kullanılan başlangıç değerleri Tablo 7.4’ de gösterilmiştir. Bu denetimde özellikle robot uçuş evresinde iken sanal bacakların yere-dokunma açıları ve sanal bacaklar yerde iken süpürme açıları PD ile denetlemeye çalışılarak robotun düzlemde zıplayarak yürüme olayı gerçekleştirilmiştir.

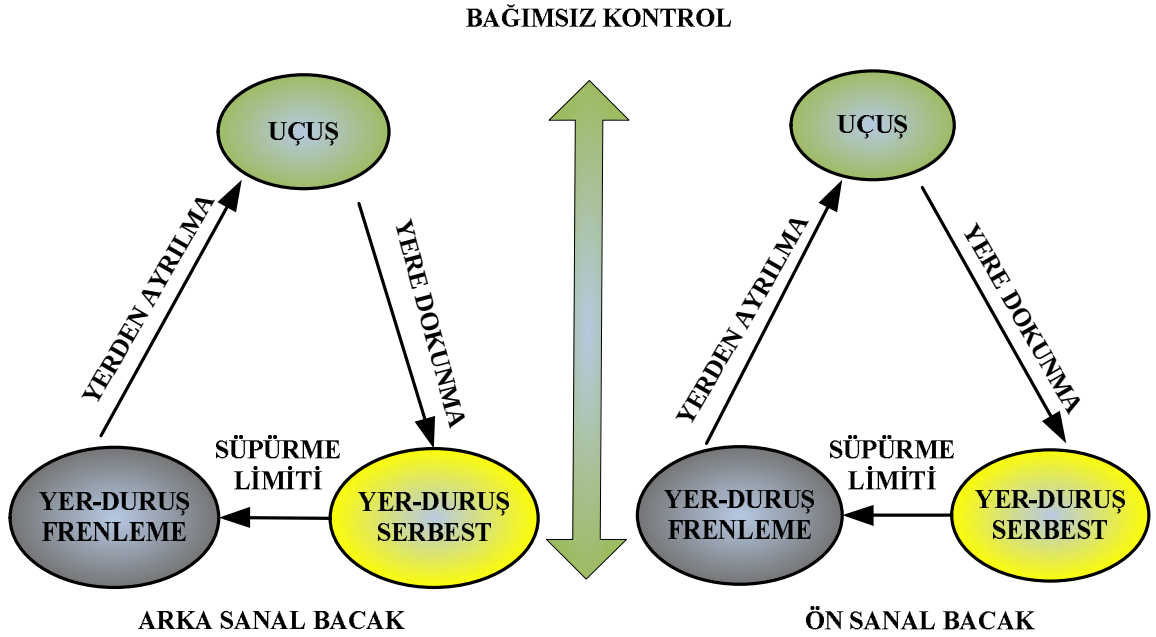
Geliştirilen denetim algoritmasında robota ait ön ve arka sanal bacaklara iki ana denetim evresi olmak üzere toplam iki evrede denetim metotları uygulanmaktadır. Bu evreler uçuş ve yer-durush frenleme metotlarından oluşmaktadır. Bu evreler ve metotlar birbirlerinden üç ana olay ile ayrılmaktadırlar. Bunlar yere dokunma, süpürme limiti ve yerden teması kesme olayları yukarıda açıklanan evreleri birbirinden ayıran olaylardır. Şekil 7.4 bu evreler ve olayları ifade eden durumu göstermektedir.

Tablo 7.3 Denetim Parametreleri [1].

Parametre	Ön sanal bacak	Arka Sanal Bacak
Yere Dokunma Açısı($^{\circ}$) (Touchdown-angle)	21	19
Süpürme Açısı($^{\circ}$) (Sweep limit angle)	0-4	0-4
Uçuş-Flight(k_p - k_d)	250,5	250,5
Yer-Stance(k_p - k_d)	300,5	300,5

Tablo 7.4 Başlangıç Değerleri [1].

Parametre	Değer	Birim
Öteleme hız($\dot{b}_y$)	2.5	m/s
Yatay konum(b_y)	1.0	m
Düşey hız($\dot{b}_z$)	0.0	m/s
Düşey konum(b_z)	0.5	m
Ön sanal bacak	21	(°)
Arka sanal bacak	19	(°)



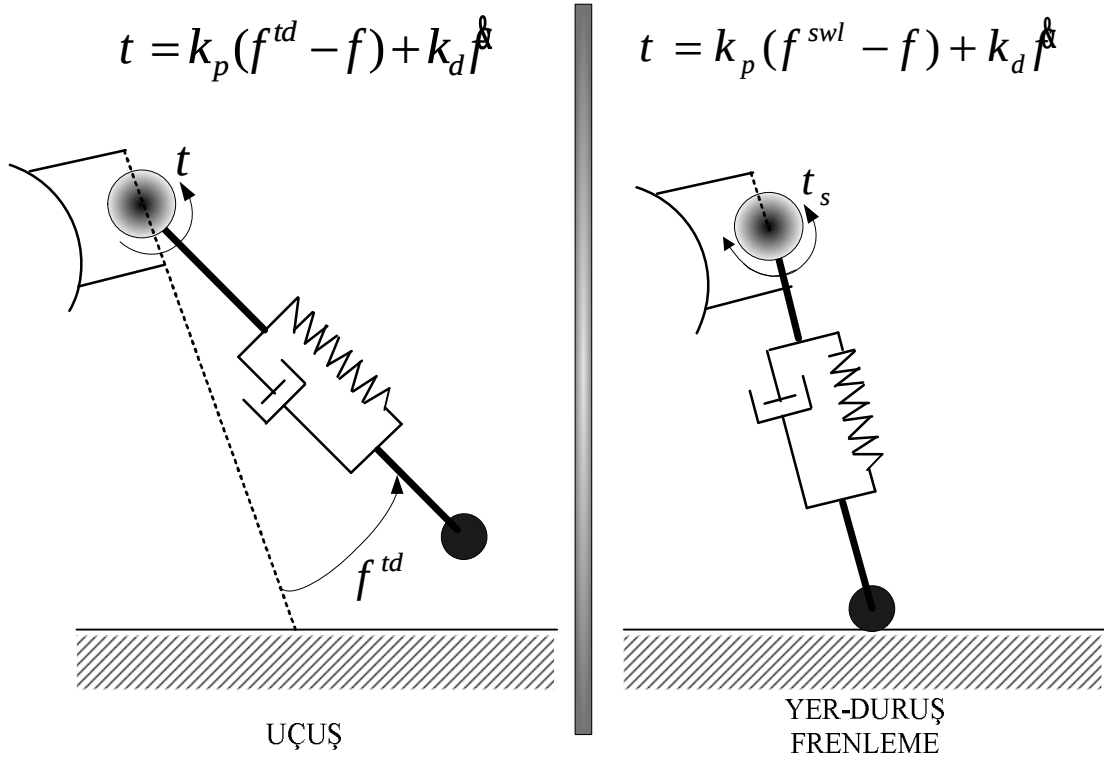
Şekil 7.4 Robotun Zıplayarak Yürüme Denetim Durumları

7.1.1. Yere Dokunma Açısının Denetimi

7.1.1.1. Uçuş Durumu

Şekil 7.5' de sisteme ait iki evrede gerçekleştirilen denetim metotları gösterilmiştir. Uçuş evresinde robota ait sanal bacaklardan herhangi birisinin yerden teması kesilmiş demektir. Bu şekildeki bir sanal bacağın havadaki uçuş evresinde biz bacağın gövdeye göre açısını her zaman denetlemeye çalıştığımız bir durumdur. Uçuş evresinden sonra bacaklar yere temas

edeceği zaman istenilen açıda yere temas etmeleri istenmektedir. Genelde bu iş uçuş evresinde bacak havada iken yapılır. Uçuş evresinde sanal bacakların yere dokunma açıları bu bölümde PD denetim ile sağlanmaktadır. Sanal bacakların gövdeye monte edildiği kalça kısmına yerleştirilen eyleyicilerin uyguladığı tork tarafından, istenilen yere dokunma açısı PD denetim ile gerçekleştirilmektedir. Sonuç olarak uçuş evresinin değişkeni olarak sanal bacağın ana gövdeye göre yere dokunma açısı alınmaktadır [200]. Ayrıca Scout II adındaki robotun istenilen periyodik hareketi içinde gövde salınımında yine direk giriş sinyali olarak yere dokunma açısı dikkate alınmıştır [1, 139, 196]. Ayrıca yer-duruş evresinde periyodik hareket için motorların uyguladığı torklar da önemli giriş parametrelerdir. Fakat bu torklar sınırlıdır. Bu yüzden etkili denetimin büyük bölümü uçuş evresinde uygulanır [1, 152].



Şekil 7.5 Zıplayarak Yürüme Evreleri Sırasındaki Denetim

7.1.2. Süpürme Açısının Denetimi

7.1.2.1. Yer-Duruş Frenleme Durumu

Şekil 7.5' de bu evre için sisteme ait denetim metodu görülmektedir. Yer-duruş evresinde her bir sanal bacak yerden temasını kesinceye kadar ana gövdeye göre taradıkları veya süpürdükleri süpürme açısı(f^{swl}) ile ifade edilmektedir. Sanal bacak yere temas ettikten

sonra gövdeye göre arkaya doğru giderken ana gövdeyi de öne doğru itmektedir. Robotun başarılı bir şekilde zıplayarak yürümesini sağlamak için bu süpürme açısı denetlenmek zorundadır. Aksi takdirde robotun kendi ataletinden dolayı yere çakılma ve takla atma olayı ile karşılaşmaktadır. Bu nedenle bu evrede süpürme açısı PD ile denetlenmektedir. Aslında buradaki amaç sanal bacaklarda potansiyel enerji tükenmeden robotu havaya zıplatmaktır ki bu da robotun yürümesi için gerekli bir işlevdir.

PD denetim her bir sanal bacak için verilen süpürme açısını taradıktan sonra bacağı o noktada tutar. Bu hem enerji tüketimi hem de hareket performansı açısından oldukça önemlidir [1]. Burada gerçekleştirilen denetim algoritmaları Raibert' in önerdiği denetleyicilerden daha basittirler. Sistemin öteleme hızı ile gövdenin kasılması için geri besleme gerekli değildir. Ayrıca sanal bacakların boylarının denetimi yapılmadan istenilen zıplayarak yürüme gerçekleştirilmiştir. Bu denetim başka zıplayarak yürüyen bacaklı robot çalışmalarında da başarılı olarak kullanılmıştır [98, 132, 201].

7.2. Quadrupedal Robotun PD İle Denetimi

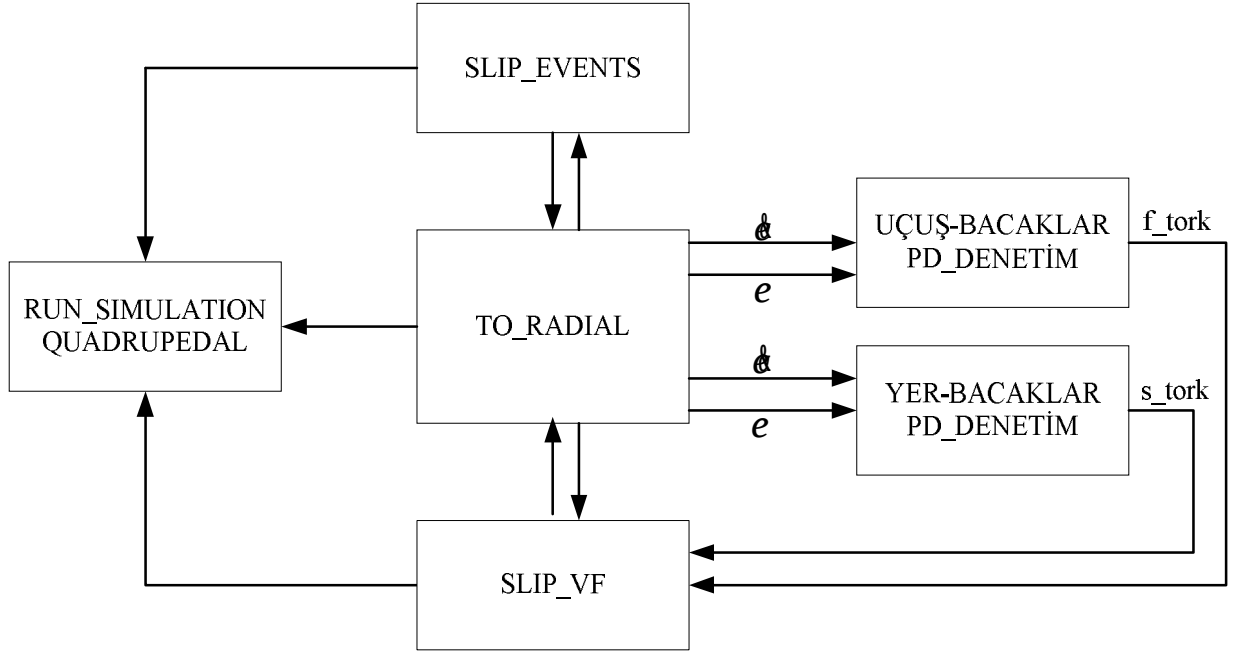
7.2.1. PD Denetim Algoritması

Dört bacaklı quadrupedal robot sisteminin modellenmesi, denetimi ve sayısal benzetimi MATLAB paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zıplayarak dengeli dinamik yürüme işlemi MATLAB paket programında bir ana program ve beş alt program olmak üzere toplam altı adet m-file' dan oluşmaktadır. Ana programı run_simulation ismi temsil ederken alt programları sırasıyla Slip_Events, To_Radial, Slip_Vf, Flight_Control ve Stance_Control isimleri ile temsil edilmektedir. Bu ana program ve alt programlar Şekil 7.6' da da görüldüğü gibi sürekli eş zamanlı olarak birbirleri ile veri alış verişinde bulunarak ilişkili çalışmaktadırlar. Ana programda sisteme ait başlangıç değerleri, robot parametreleri ve sayısal benzetime ait grafik komutları mevcuttur. Slip_Events alt programı içerisinde robotun evre ve durumlarını belirleyerek dinamik döngüyü oluşturur. Slip_Vf alt programı içerisinde ise sistemin dinamik denklemleri mevcuttur. To_Radial alt programında sisteme ait kinematik denklemler çözülmektedir. Flight_Control ve Stance_Control alt programlarında da denetim algoritmaları oluşturulmuştur.

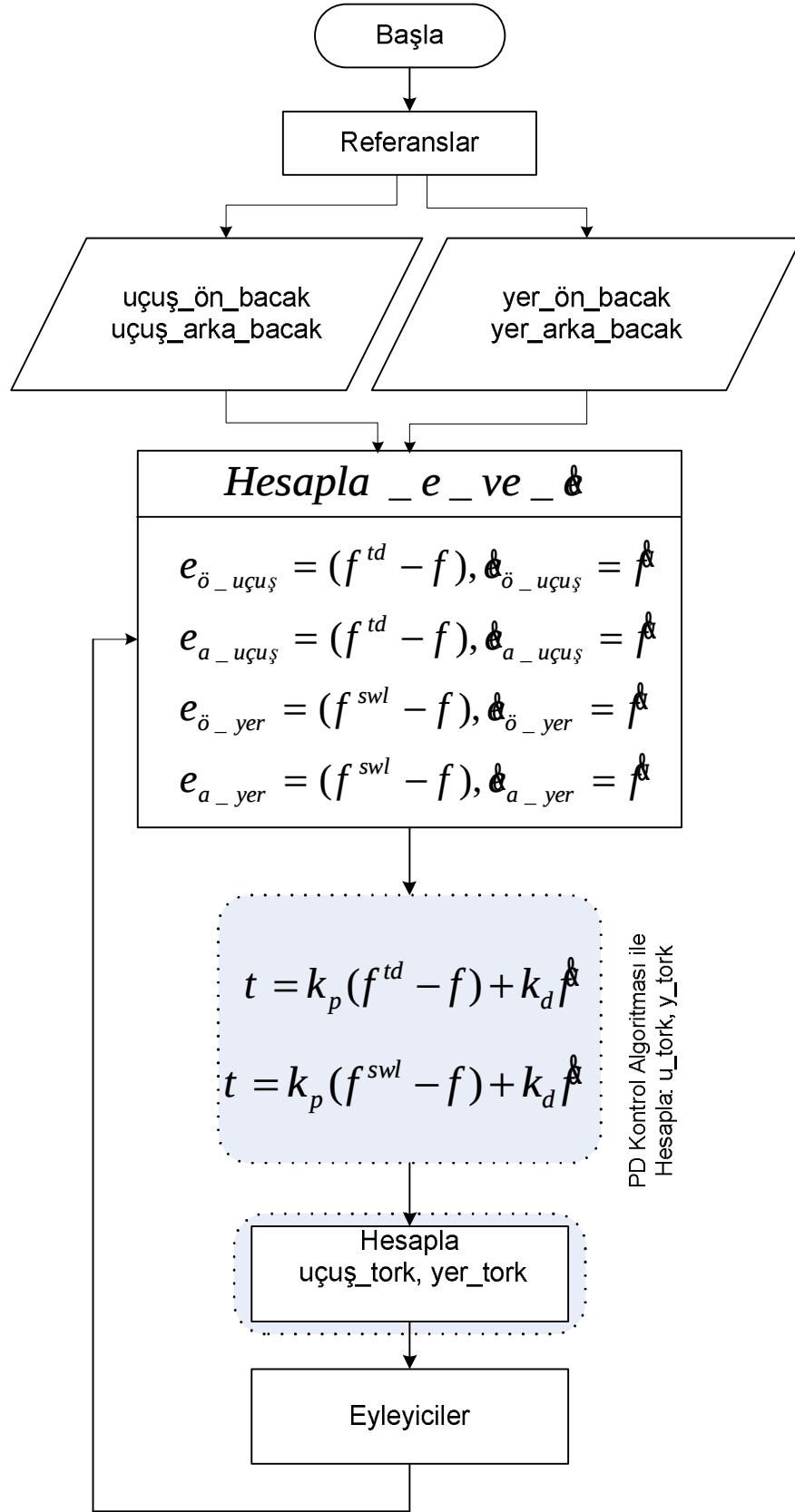
Denetim algoritmasının çıkış sinyalleri; dört bacaklı quadrupedal robotun kalça kısmında bulunan motorların PD denetim algoritması ile ürettiği uygun tork değerleridir. Burada sistem bilindiği gibi iki farklı kapalı dinamik döngüden oluşmaktadır. Zıplayarak

yürüme işlemleri ardışık kapalı bir döngü içerisinde farklı dinamik yapılardan oluşur. Quadripedal robot iki evrede ayrı ayrı denetlenerek zıplayarak dengeli dinamik yürüme eylemini gerçekleştirmektedir. Birinci evre olan uçuş evresinde ön ve arka sanal bacakların yere dokunma açıları (f^{td}), ikinci evre olan yer-duruş evresinde ise ön ve arka sanal bacakların süpürme açıları (f^{swl}) istenilen değerde olabilmeleri için PD denetim algoritması ile uygun çıkış sinyali olarak tork elde edilerek sistem denetlenmektedir. Denetim algoritmasında sistemin girişlerini e hata ve $\dot{e}$ hatanın değişim değerleri oluşturmaktadır. Burada hata, sistemin uçuş ve yer-duruş evrelerinde ön ve arka sanal bacakların gövdeye göre anlık ölçülen açı değerleri ile ön ve arka sanal bacaklar için istenilen açı değerleri arasındaki farktır. Sistemin çıkışlarını ise hata ve hatanın zamana göre anlık değişim değerlerini minimize edecek şekilde ön ve arka sanal bacakları tahrik eden motorların uyguladığı uygun tork değerleridir. Sisteme ait giriş ve çıkış değerleri Şekil 7.6 ve Şekil 7.7' de gösterilen PD denetim akış diyagramında görülmektedir.

Her bir sanal bacak için, PD denetim iki giriş ve bir çıkıştan oluşan bir sistemdir. Quadripedal robotun zıplayarak dengeli dinamik yürüyüş denetimi toplam olarak toplam dört giriş ve iki çıkıştan ibarettir. PD denetim algoritması hata (e) ve hata değişimini ($\dot{e}$) minimize ederek, sanal bacaklar için gerekli olan tork değerlerini ($t_{ön_bacak}, t_{arka_bacak}$) çıkış sinyali olarak üretirler.



Şekil 7.6 Tasarlanan Denetim Algoritmasına Ait Blok Diyagram



Şekil 7.7 Dizayn edilen sistem için PD Denetim Akış Diyagramı

7.3. Quadrupedal Robotun PD Denetim İle Sayısal Benzetimi

7.3.1. Sayısal Benzetim ve Elde Edilen Grafikler

Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki düzlemsel z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi, robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$), robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m), robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu faz eğri çizimleri, robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m), robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn), robotun ön-arka bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m), robotun ön bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m), robotun arka bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m), robotun ön-arka bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısall konumları f ($^{\circ}$), robotun ön bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısall konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$), robotun arka bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısall konumu f_{arka} ($^{\circ}$), robotun ön-arka bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J), robotun ön bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{\text{ön}}$ (J), robotun arka bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J), hatanın zaman ile değişimi (e), robotun ön-arka bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m), robotun ön-arka bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm), robotun ön bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{\text{ön}}$ (Nm) ve robotun ön bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm) gibi önemli sayısal benzetim sonuçları farklı başlangıç değerlerine göre her bir grafikte gösterilmiştir.

Sayısal benzetim grafikleri quadrupedal robotun iki boyutlu ortamda sahip olduğu başlangıç değerlerine ait gövde ve sanal bacakların duruş pozisyonunu gösteren katı modeli görünmektedir. Ayrıca bu kısımda quadrupedal robotun her bir adımdaki zıplayarak yürüme işleminde, gövdenin ve sanal bacakların z-y eksenlerine göre konumları görülmektedir.

Gövde salınım grafikleri quadrupedal robotun gövdesinin ağırlık merkezinin z-y eksenlerine göre salınımını göstermektedir. Bu salınım derecesi^(°) olarak a ile temsil edilmektedir. Bu salınım aslında fiziksel olarak yapıya sahiptir. Buda robotun zıplayarak yürüme işleminde istenen bir durumdur [2, 96, 99].

Robot gövdesinin ağırlık merkezinin z dikey eksene göre zamana bağlı olarak aldığı yükseklik değerleri b_z ile temsil edilmektedir. b_z değerlerinin takip ettiği yörünge fiziksel olarak bir harmonik yapıya sahip olması gerekmektedir [2, 96, 99].

Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulur. Faz çizimleri bize sistemin kararlılığı hakkında bilgi vermektedir. Yani robotun zıplayarak yürüme işlemi esnasında devrilip devrilmediği ya da dengeli bir yürümenin olup olmadığı hakkında bilgi vermektedir.

Grafiklerde quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, sanal bacaklara ait boylarının anlık değişimleri gösterilmektedir. Bacak boylarındaki anlık değişim r ile temsil edilmektedir. Dikkat edilirse sanal bacakların boyları sadece bacaklar yere temas ettikten sonra değişmektedir. Bacaklar yer ile temas halinde iken robotun kütesinden dolayı, yay özelliğinde olan bacaklar önce kasılarak sıkışırler daha sonra da ilk boyuna gelinceye kadar açılarak zıplama işlemini gerçekleştirirler. Bacaklar yerden temasını kestikten sonra boyları sabittir. Sadece çok küçük oranda m_t ' den dolayı bir titreşim oluşmaktadır. Bu da sisteme rahatsız edici bir etken oluşturmamaktadır [95, 96, 99].

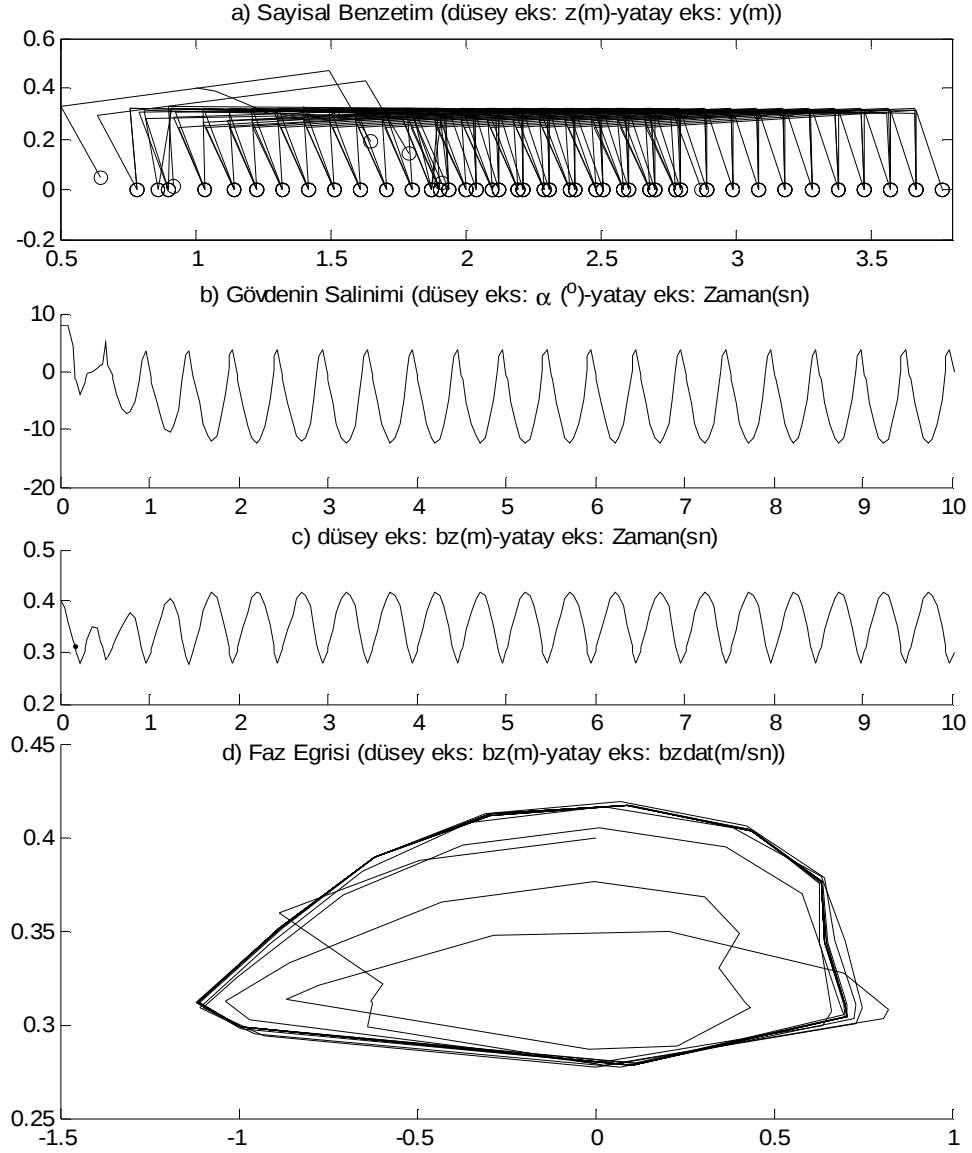
Ayrıca grafiklerde quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, sanal bacakların uçlarındaki ayakların yerden yükseklikleri gösterilmektedir. Bacakların yerden yükseklikleri f_z ile temsil edilmektedir. Sanal bacaklar yer ile temas halinde iken bu değer sıfırdır.

Aynı zamanda quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, sanal bacakların gövdeye göre açısal konumlarını (°) gösterilmektedir. Bacakların gövdeye göre açısal konumları, robot hem yerde iken hem de havada iken ardışık gerçekleşen iki kapalı döngü içerisinde denetimleri gerçekleştirilmektedir. Bacakların gövdeye göre açısal konumları f ile temsil edilmektedir. Quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, ön ve arka sanal bacakların istenilen açısal konumları elde etmek için, robot hem havada iken uygulanan

denetimde hem de yerde iken uygulanan denetim sonucunda açısai konumlara baēlı olarak oluşan hatayı göstermektedir.  n ve arka sanal bacakların zıplayarak yürüme döngüsü içinde ki istenilen yere dokunma açısı(f^{td} -touchdown angle) ve süpürme açısına(f^{swl} -sweep angle) baēlı olarak hata grafiēi elde edilmiştir.

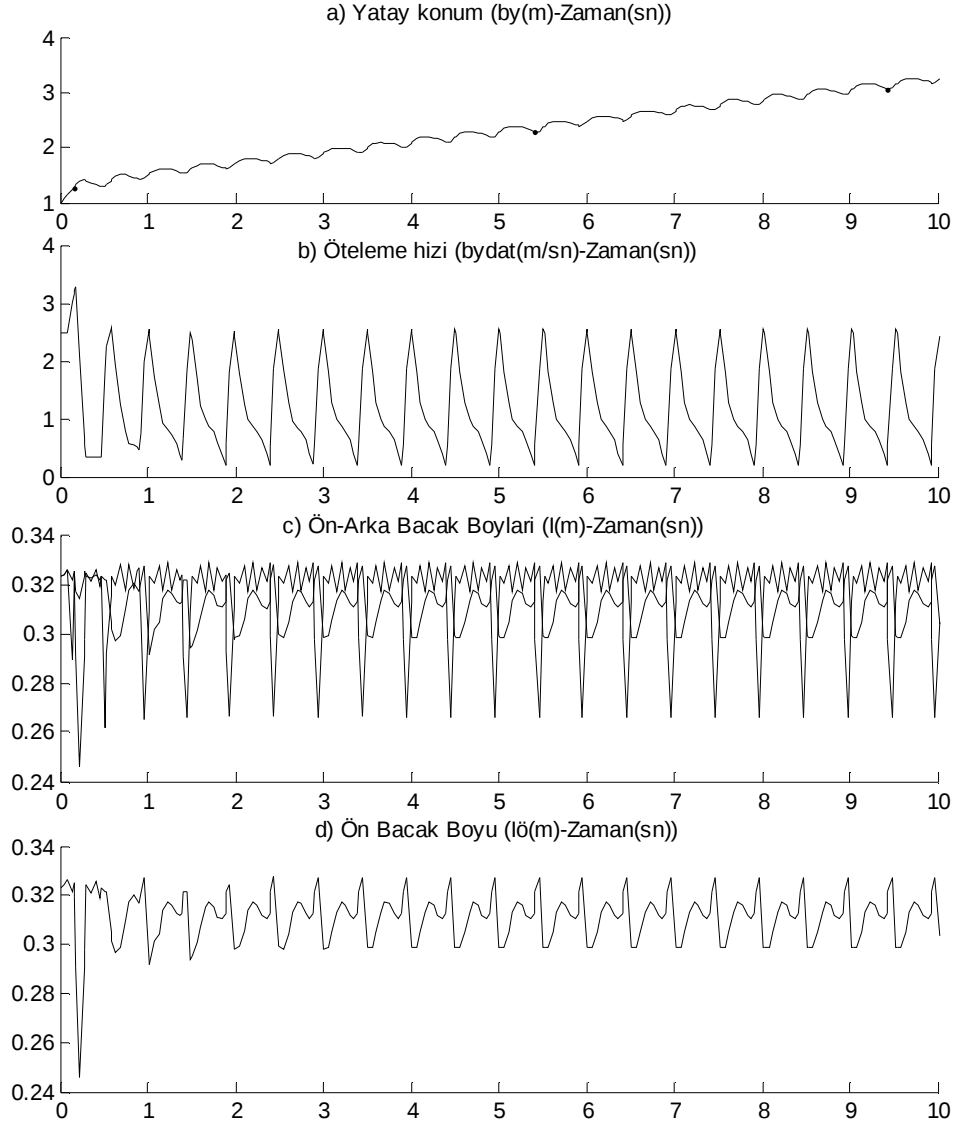
En son işlem olarak, quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, uygulanan denetim algoritmasında istenilen açıları elde etmek için çıkış sinyali olarak  n ve arka sanal bacaklara PD denetimi ile uygulanan denetim çıkış sinyali (tork) deēerleri grafiksel olarak verilmiştir.

Bu bölümde robotun farklı başlangıç deēerlerine baēlı olarak, zıplayarak yürüme işlemi sırasında gerçekleşen tüm fiziksel olayların sayısal benzetim sonuçları grafiklerde gösterilmeye çalışılmıştır. Bu sayısal sonuçlara baēlı olarak robotun belirli zaman dilimleri arasında aldıēı yol(m) ve alınan bu yol esnasında robotun her bir bacaēını tahrik eden eyleyicilerin harcadıēı g   (watt) hesaplanarak tablo şeklinde verilmiştir. Ayrıca oluşturulan her bir tabloda, zıplamaya ait her bir  rneēe ait başlangıç deēerleri verilmiştir.



Şekil 7.8 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi,
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



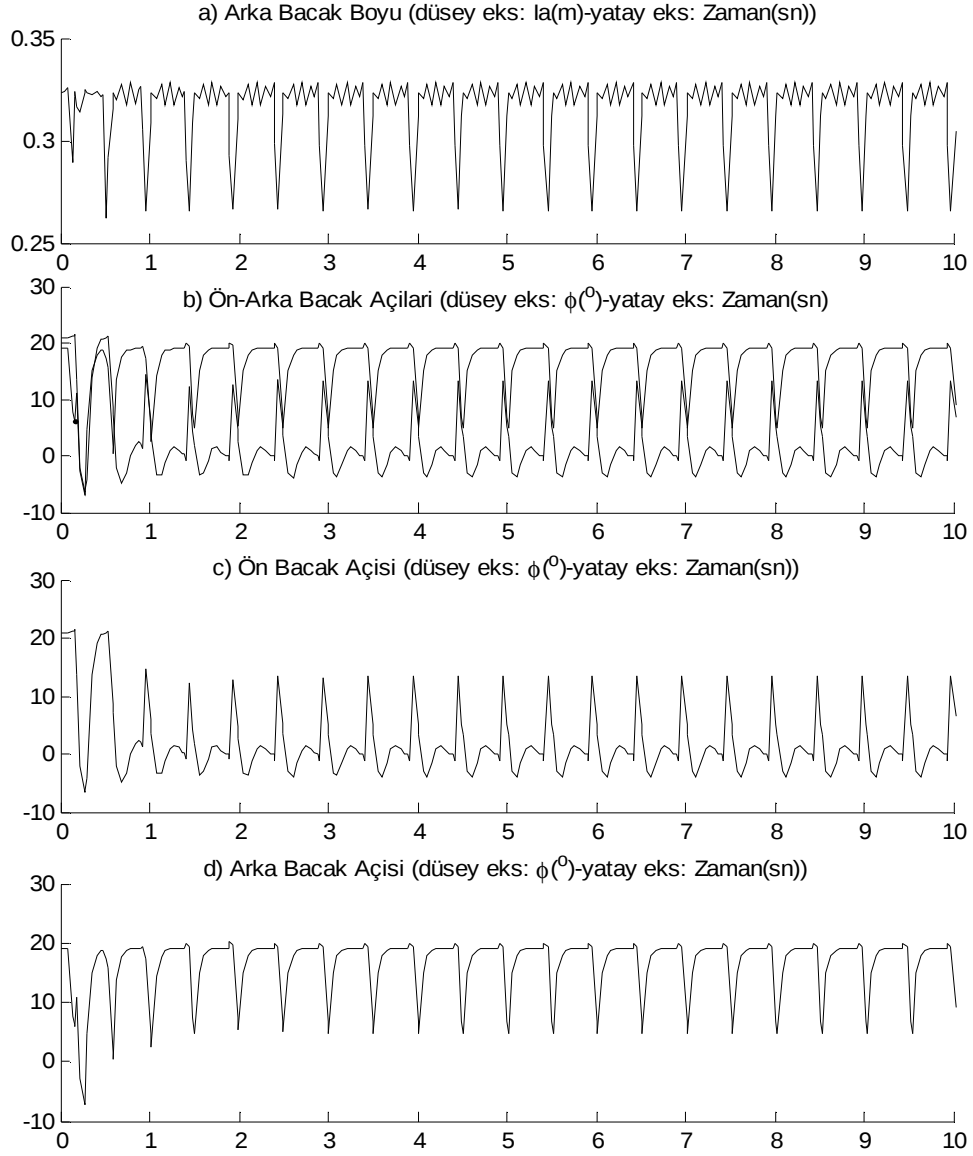
Şekil 7.9 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .

b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).

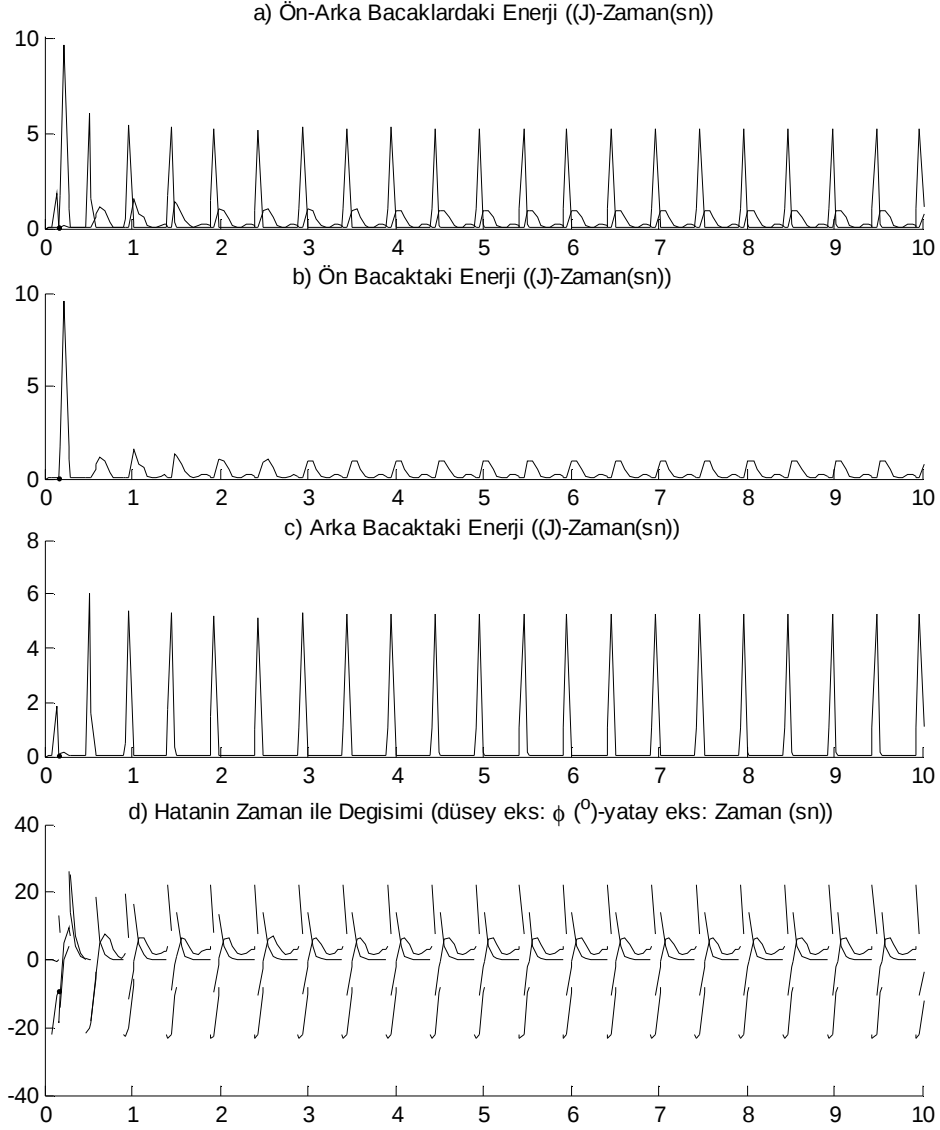
c) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).

d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



Şekil 7.10 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- c) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$).
- d) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).



Şekil 7.11 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji

miktarları E_{top} (J).

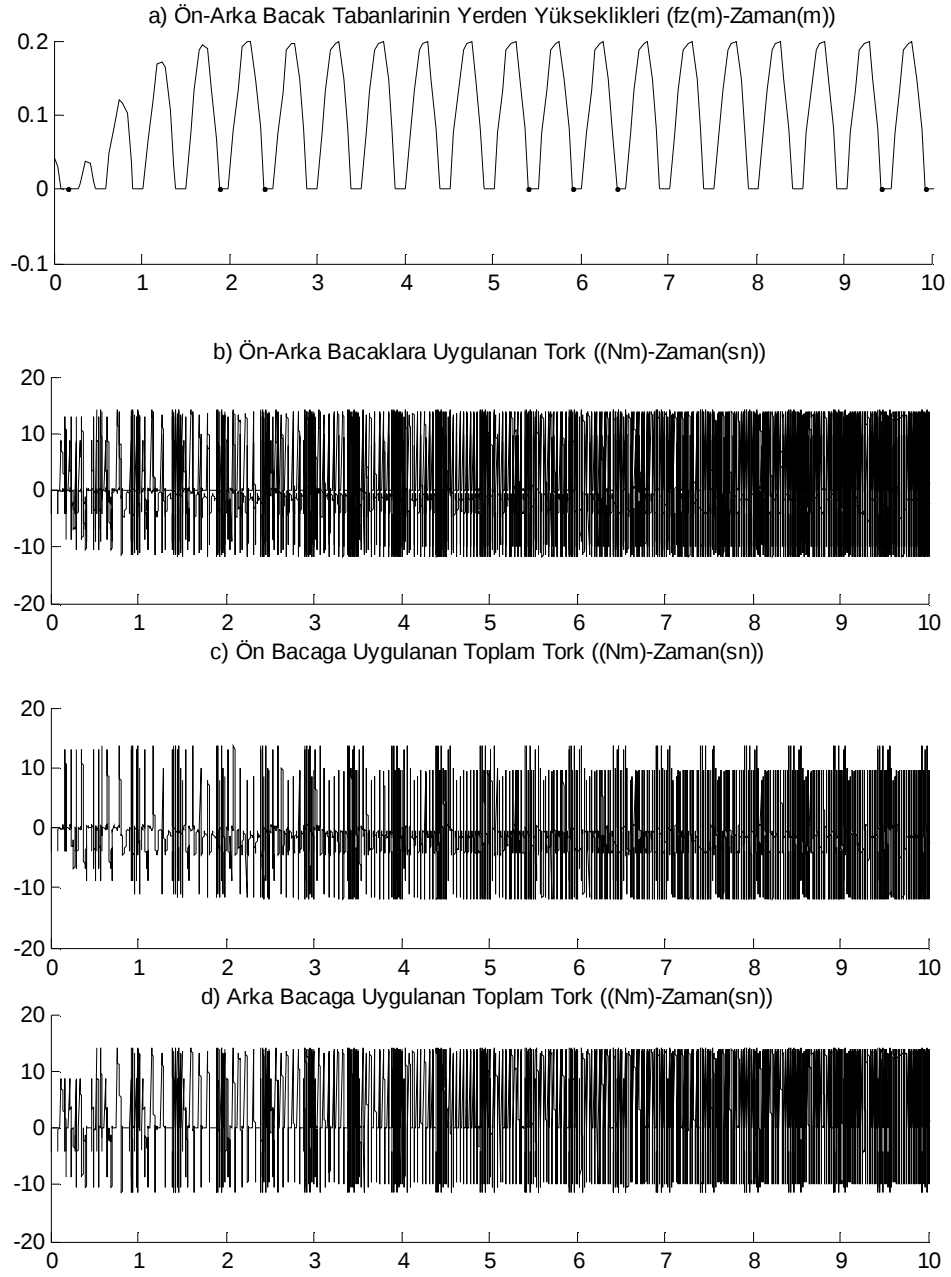
b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji

miktarı $E_{ön}$ (J).

c) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji

miktarı E_{arka} (J).

d) Hatanın zaman ile değişimi (e).

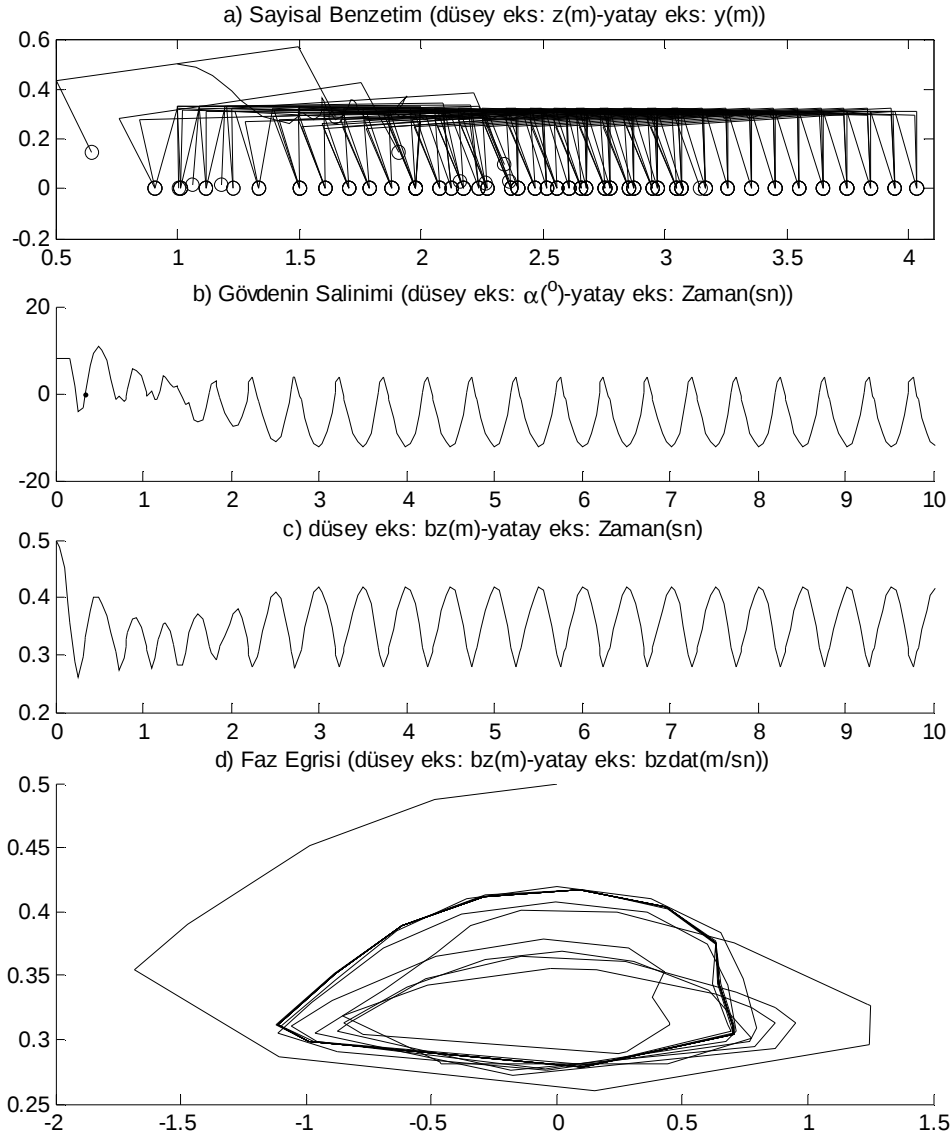


Şekil 7.12 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- c) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- d) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

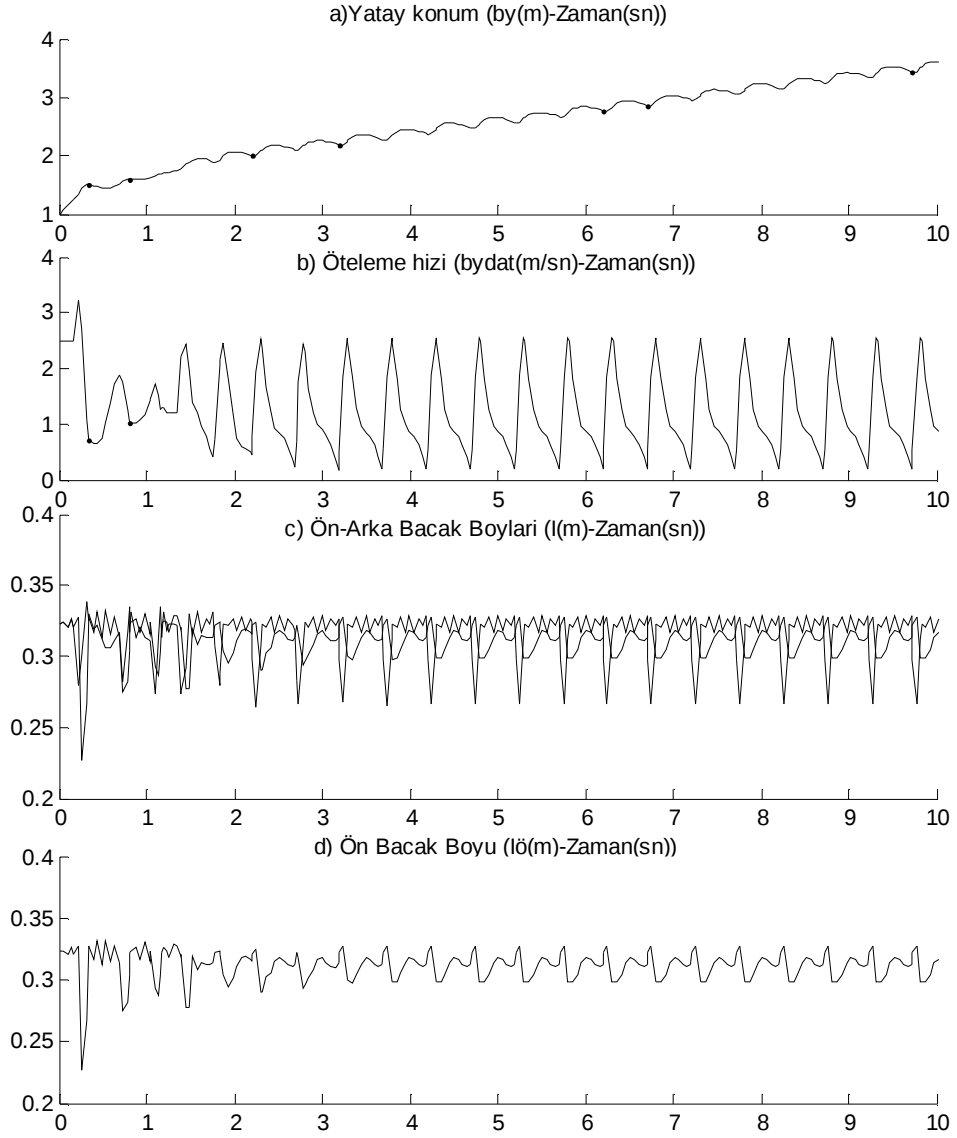
Tablo 7.5 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.

QUADRUPEDAL ROBOT				
4 bacaklı				
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ				
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)
40		8		2.5
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ				
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın harcadığı güç	Arka Bacağın harcadığı güç	Toplam harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)
3	0.5	426	470	896
5	1.2	657	731	1388
6	1.48	773	863	1636
8	2.2	1001	1125	2126
10	2.77	1237	1388	2625



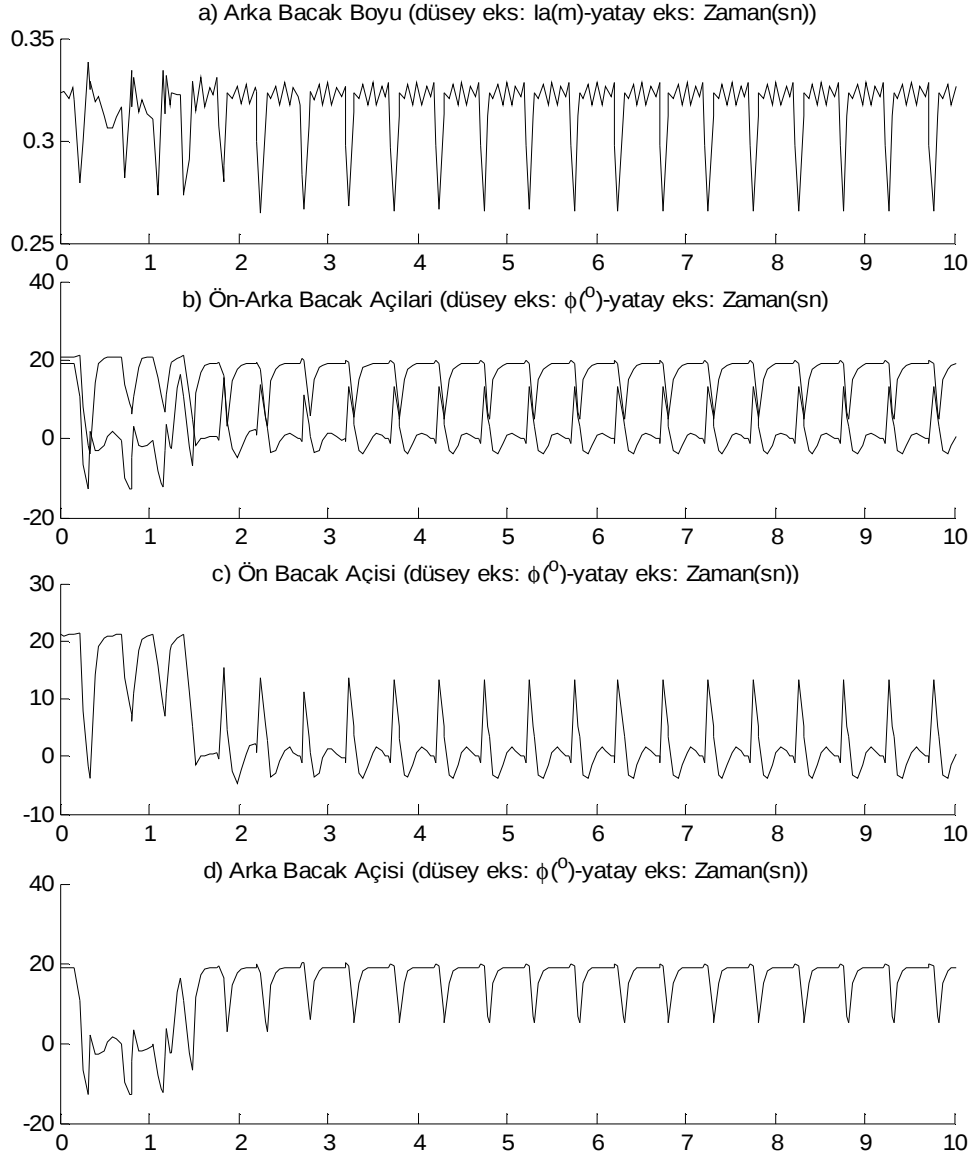
Şekil 7.13 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



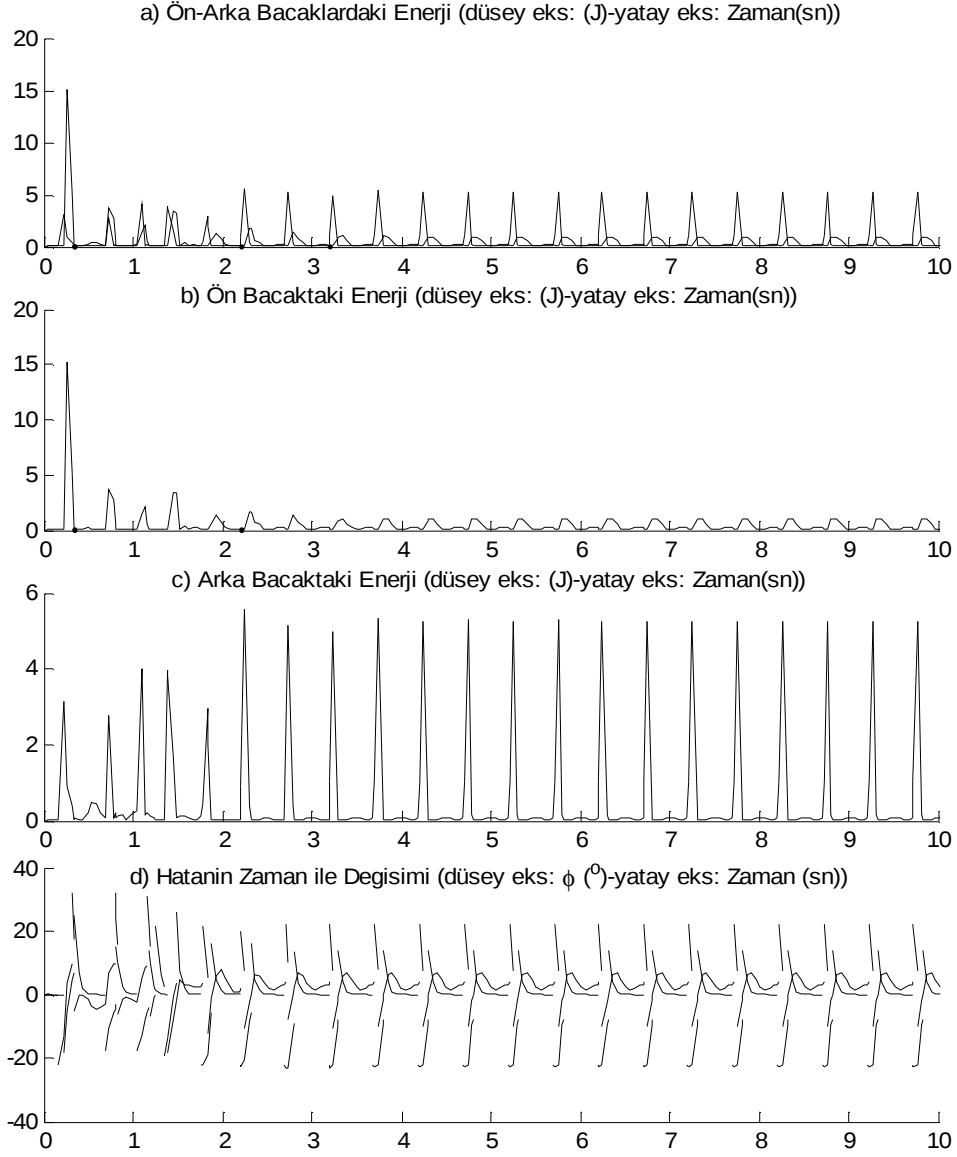
Şekil 7.14 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



Şekil 7.15 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- c) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$).
- d) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).



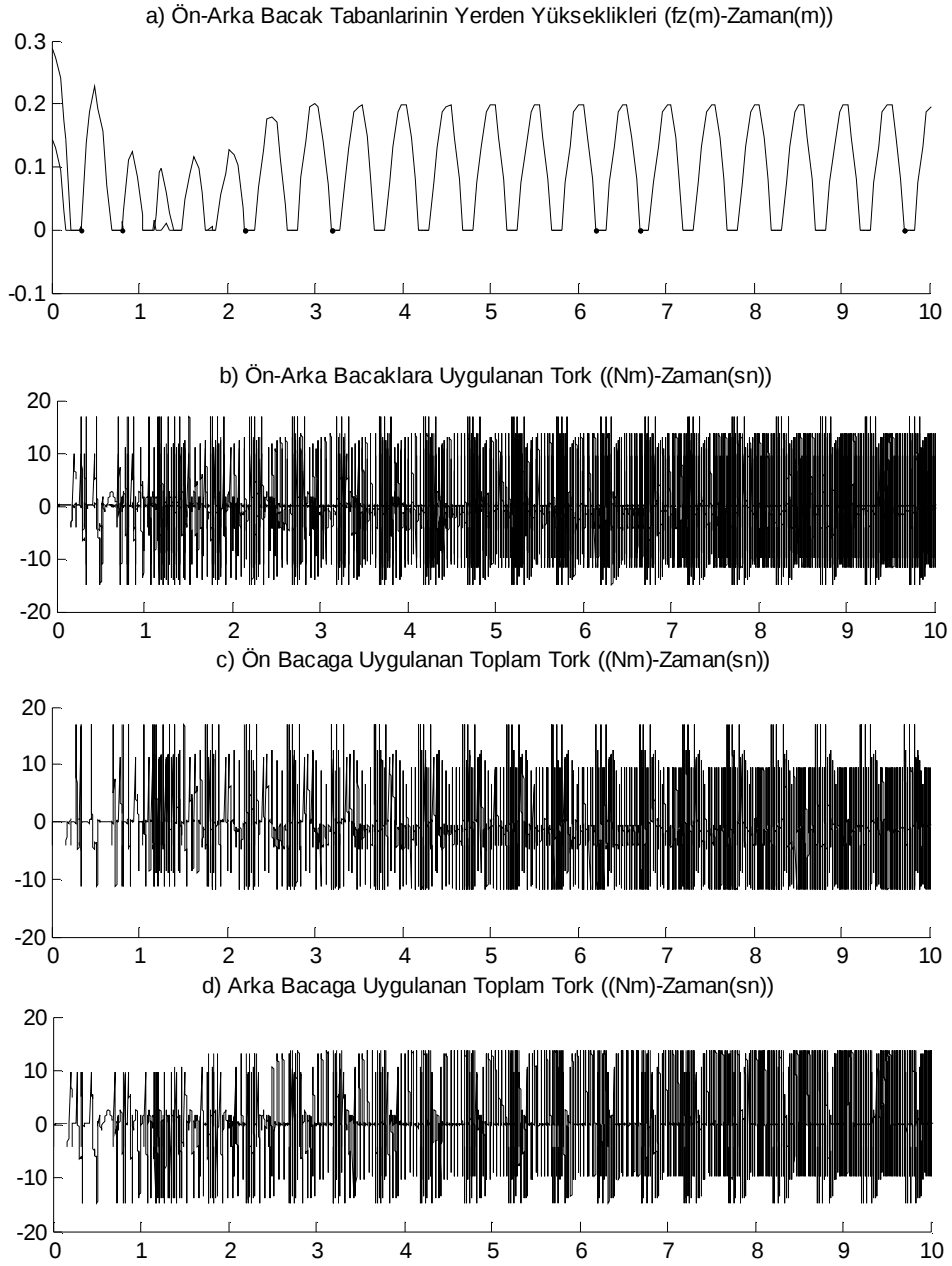
Şekil 7.16 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).

b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).

c) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).

d) Hatanın zaman ile değişimi (e).

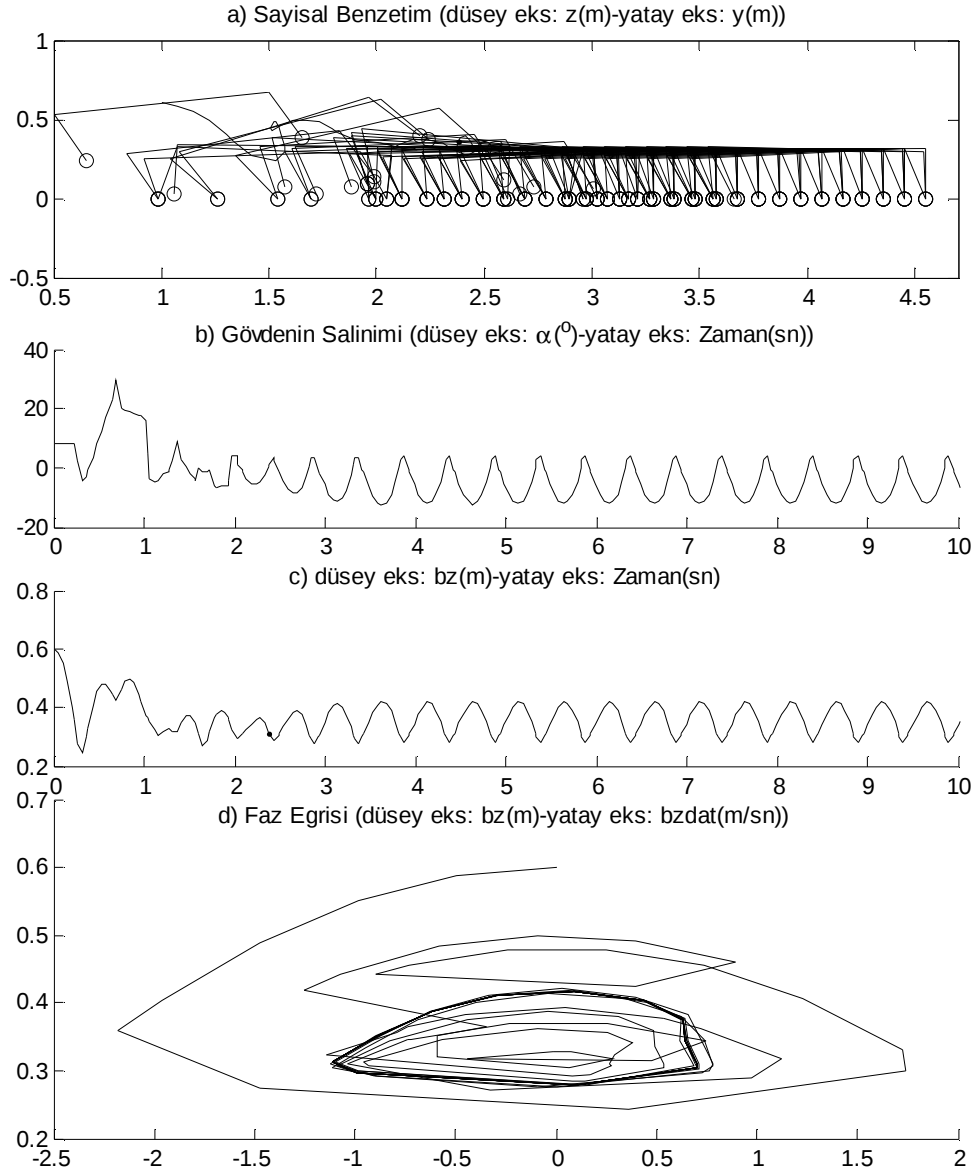


Şekil 7.17 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- c) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- d) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

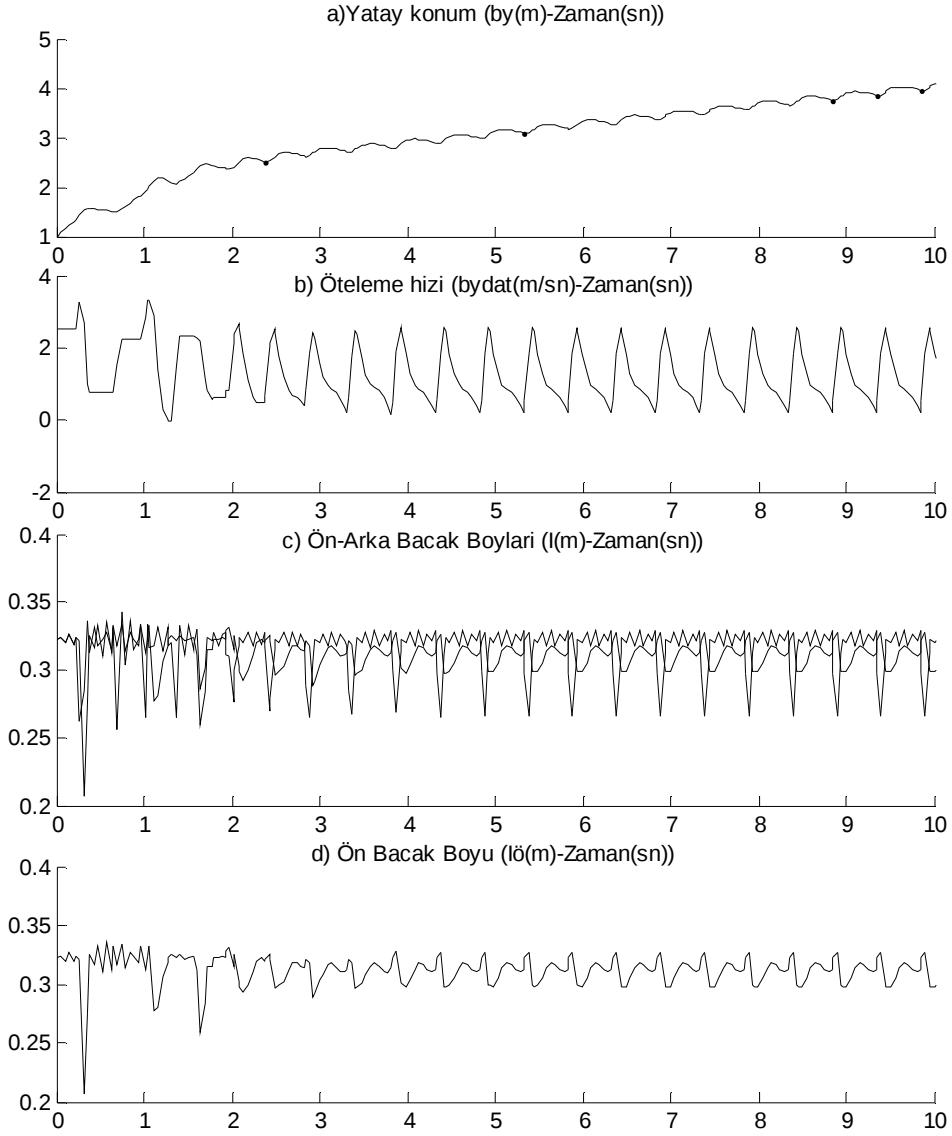
Tablo 7.6 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.

QUADRUPEDAL ROBOT				
4 bacaklı				
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ				
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)
50		8		2.5
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ				
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın harcadığı güç	Arka Bacağın harcadığı güç	Toplam harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)
3	0.65	349	434	783
5	1.37	592	724	1317
6	1.66	708	855	1563
8	2.42	919	1087	2006
10	3.15	1147	1347	2495



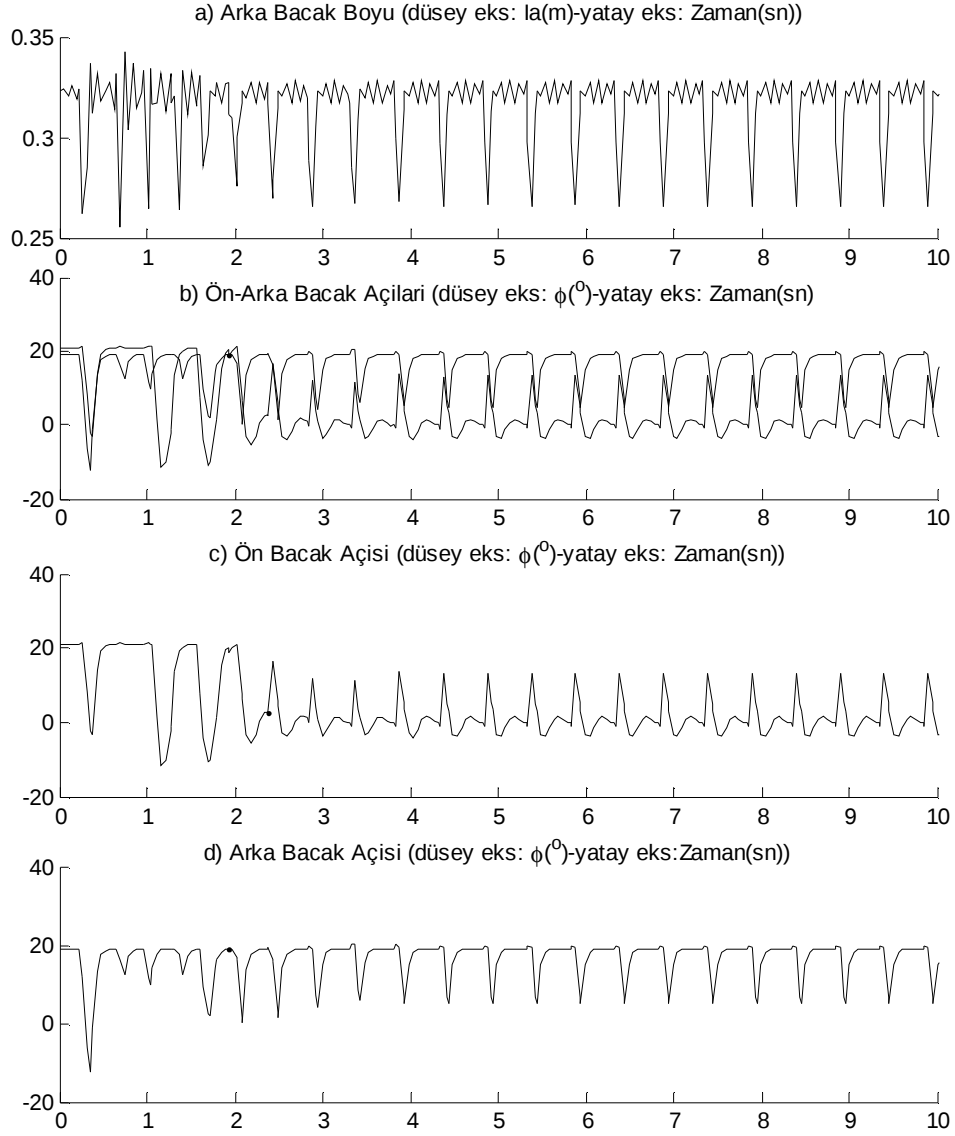
Şekil 7.18 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



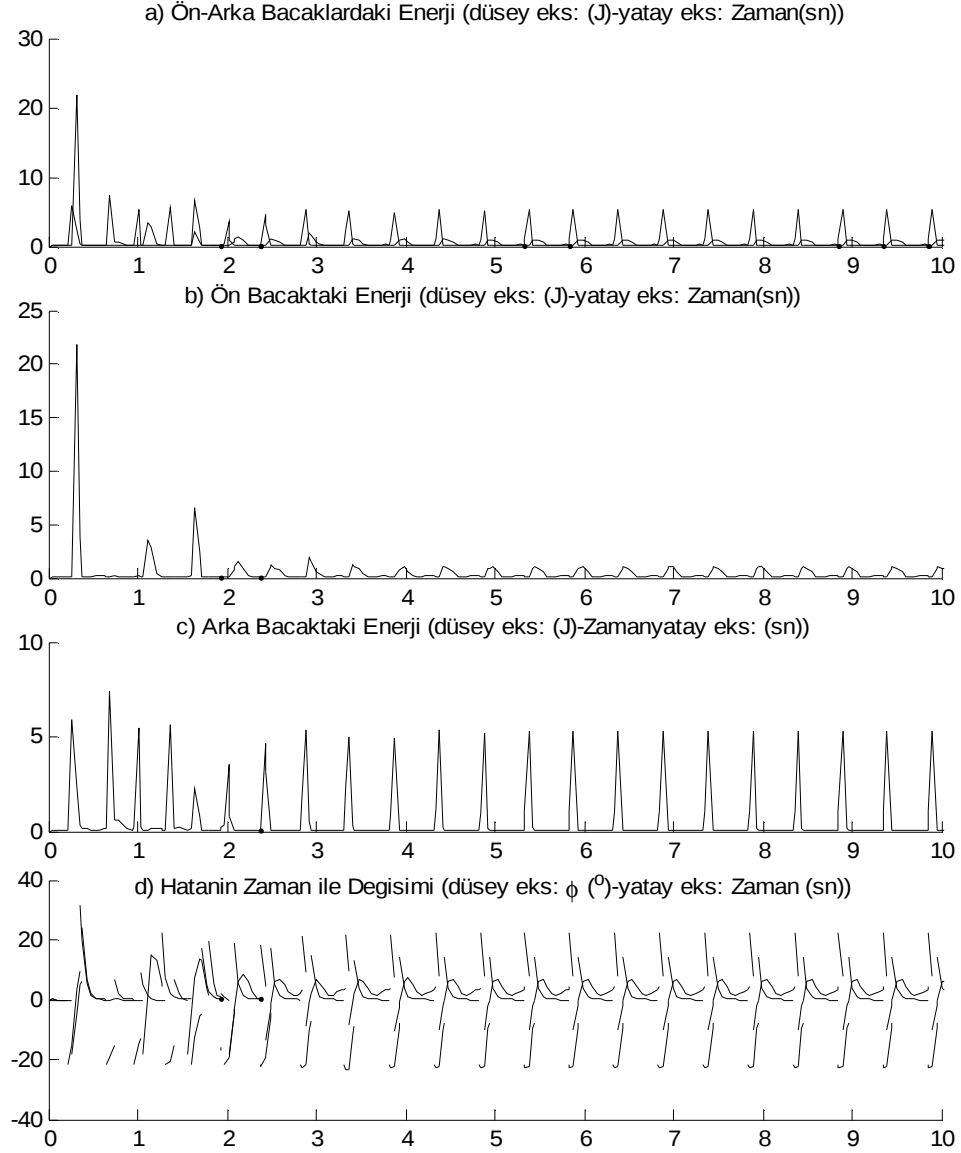
Şekil 7.19 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



Şekil 7.20 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- c) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$).
- d) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).



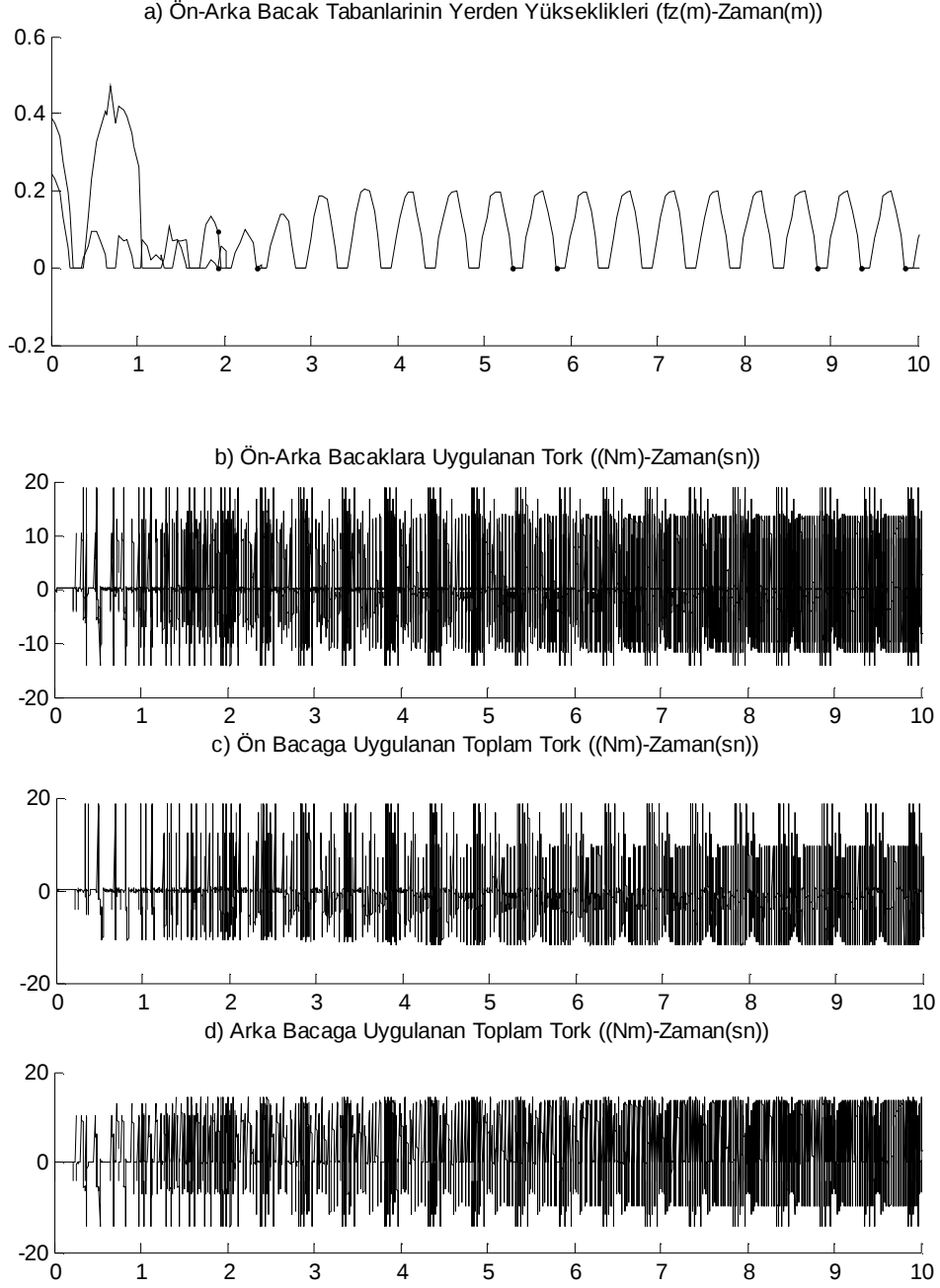
Şekil 7.21 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).

b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).

c) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).

d) Hatanın zaman ile değişimi (e).

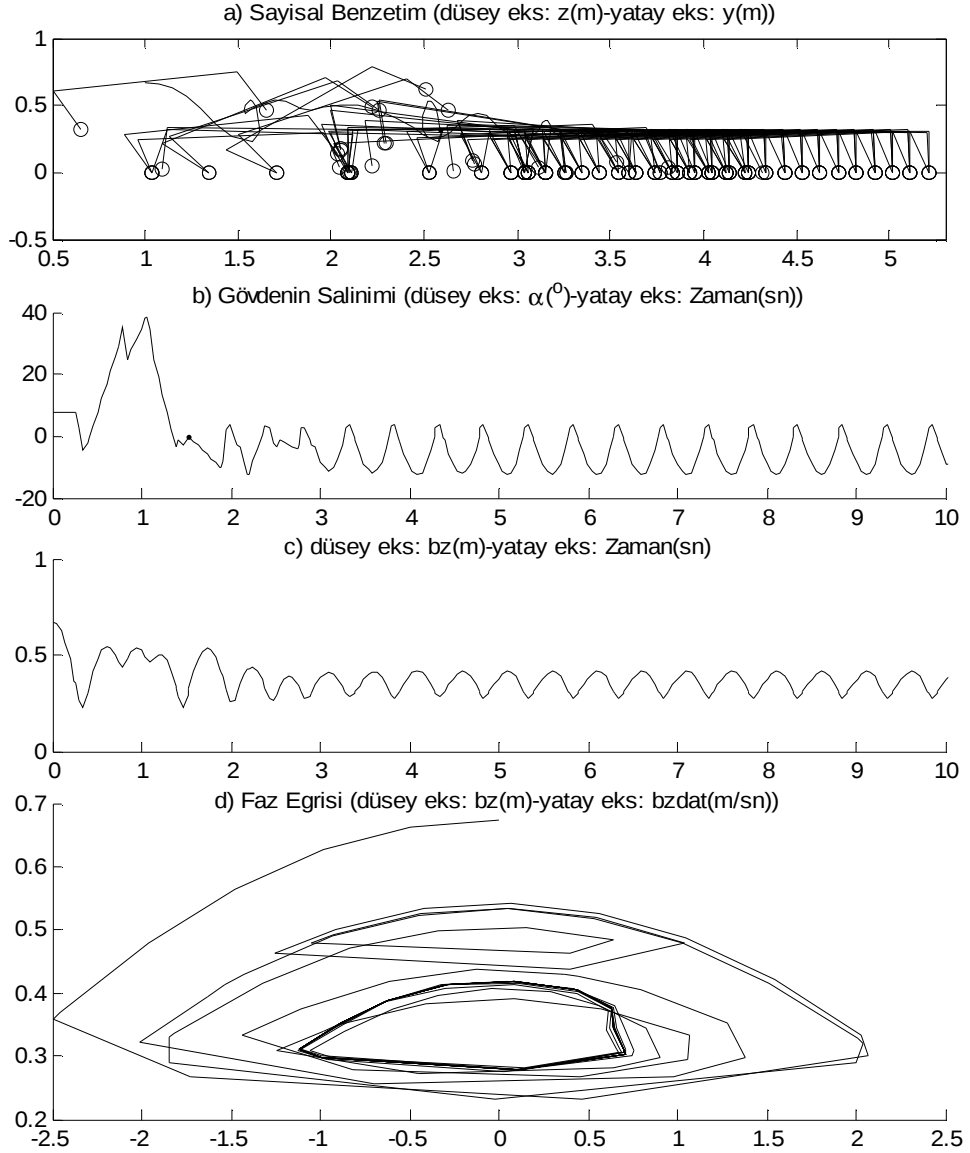


Şekil 7.22 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- c) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- d) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

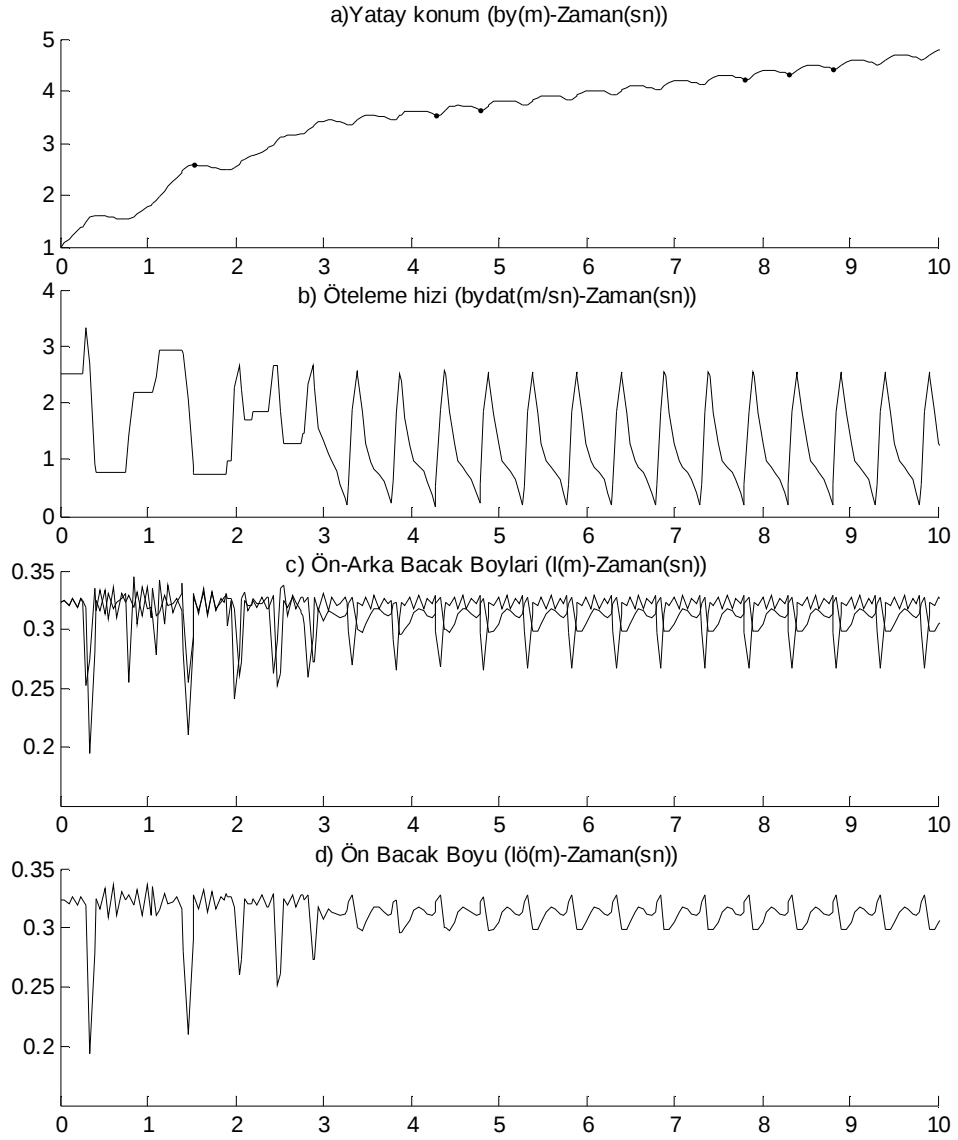
Tablo 7.7 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.

QUADRUPEDAL ROBOT				
4 bacaklı				
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ				
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)
60		8		2.5
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ				
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın harcadığı güç	Arka Bacağın harcadığı güç	Toplam harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)
3	0.8	443	417	861
5	1.63	682	692	1375
6	2.1	799	827	1626
8	2.9	1024	1085	2109
10	3.62	1258	1349	2607



Şekil 7.23 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α (alfa) salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



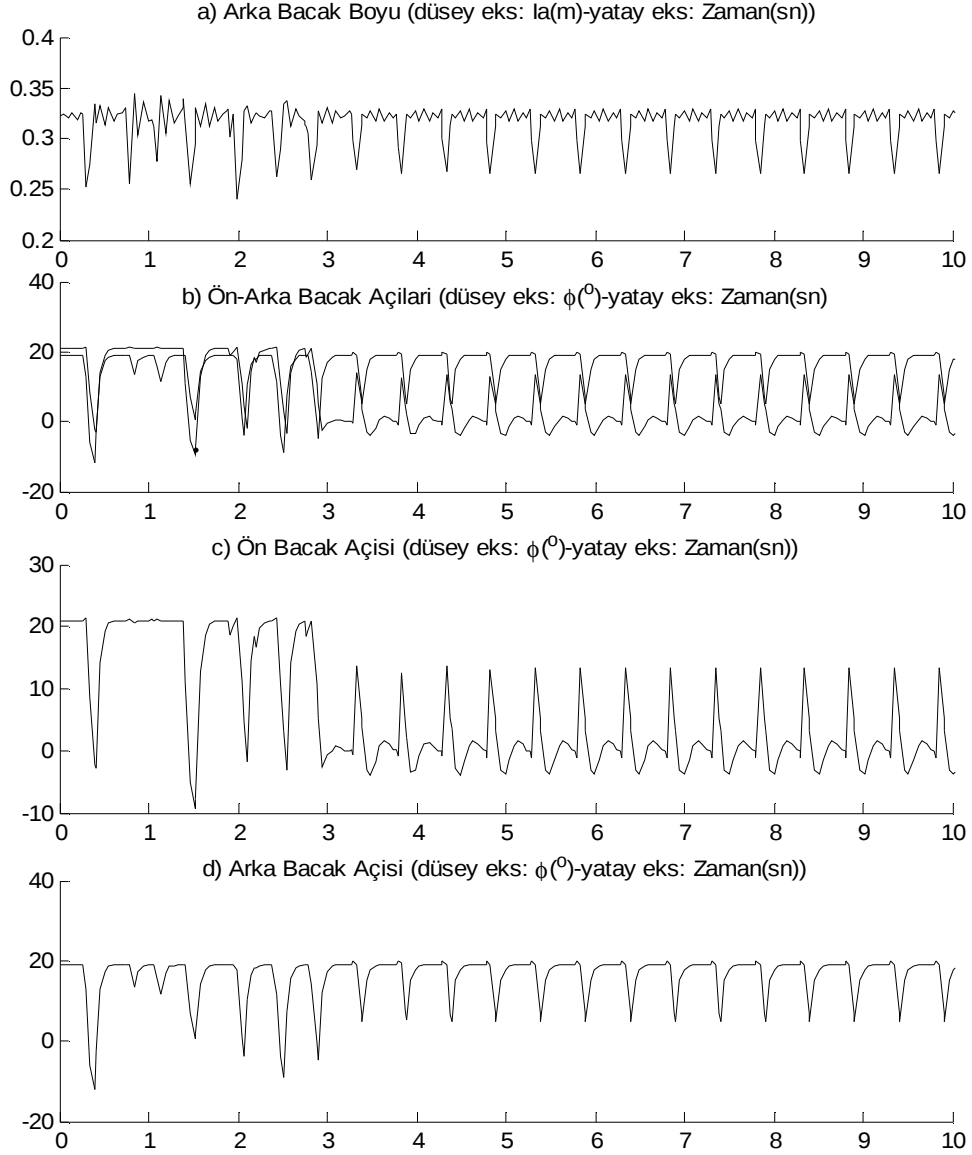
Şekil 7.24 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .

b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).

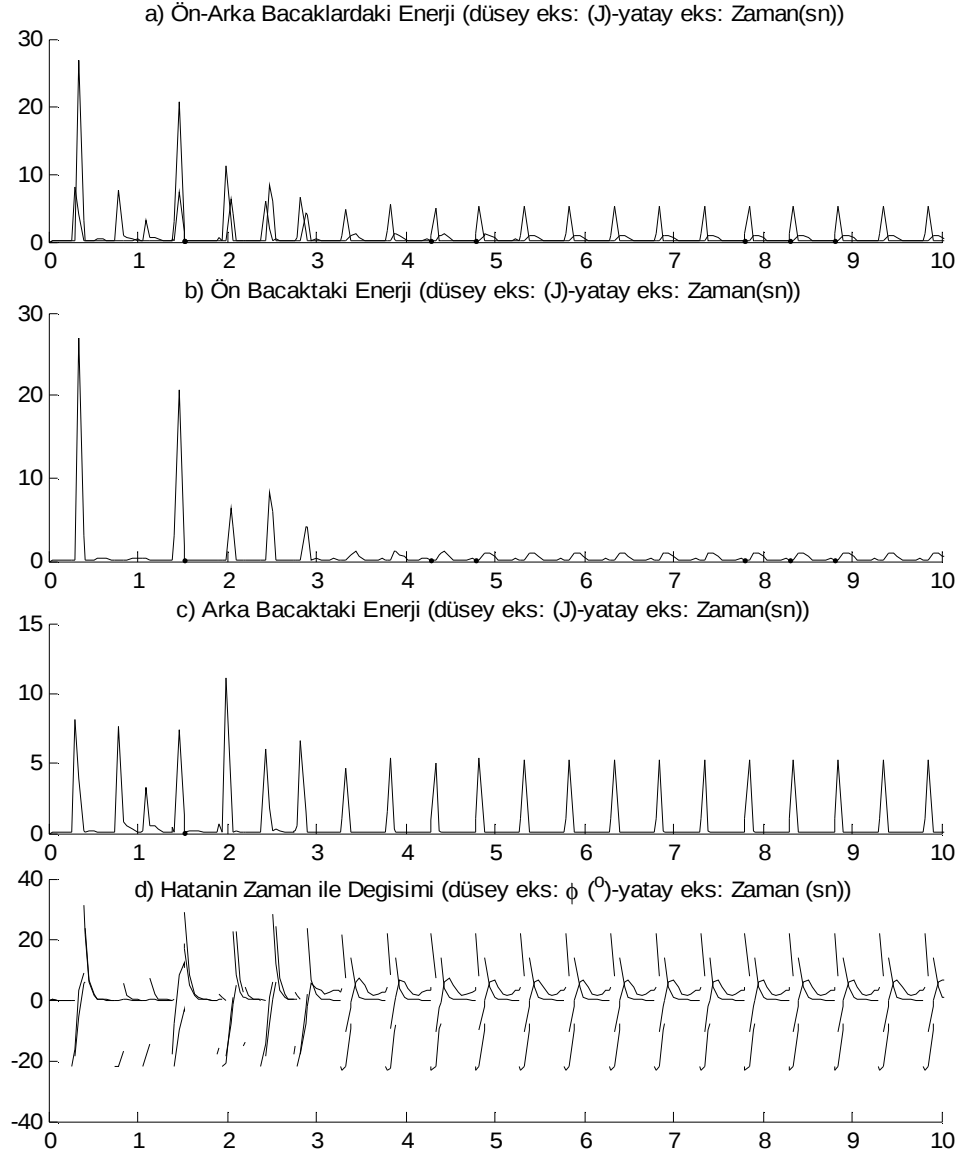
c) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).

d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



Şekil 7.25 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun arka bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- c) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$).
- d) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).



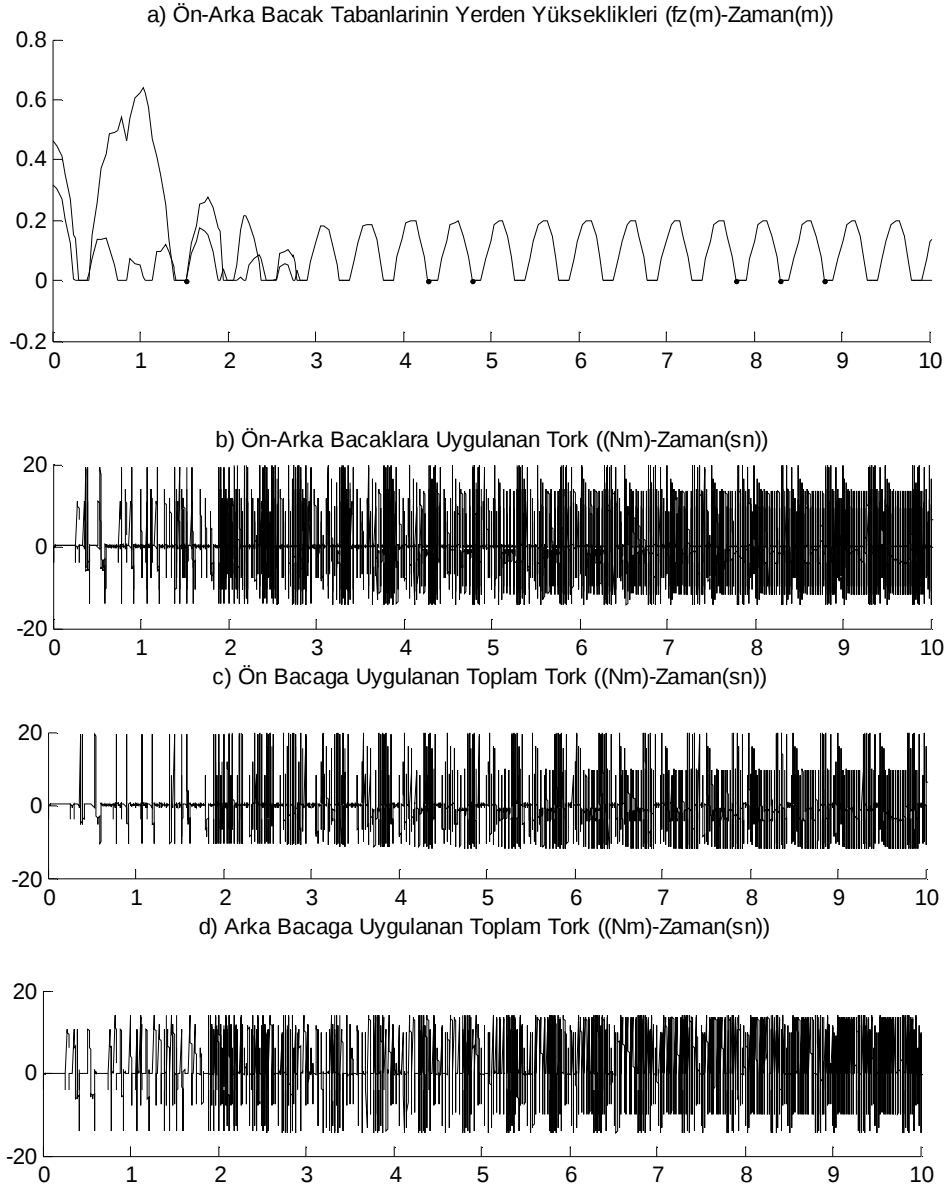
Şekil 7.26 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).

b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).

c) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).

d) Hatanın zaman ile değişimi (e).

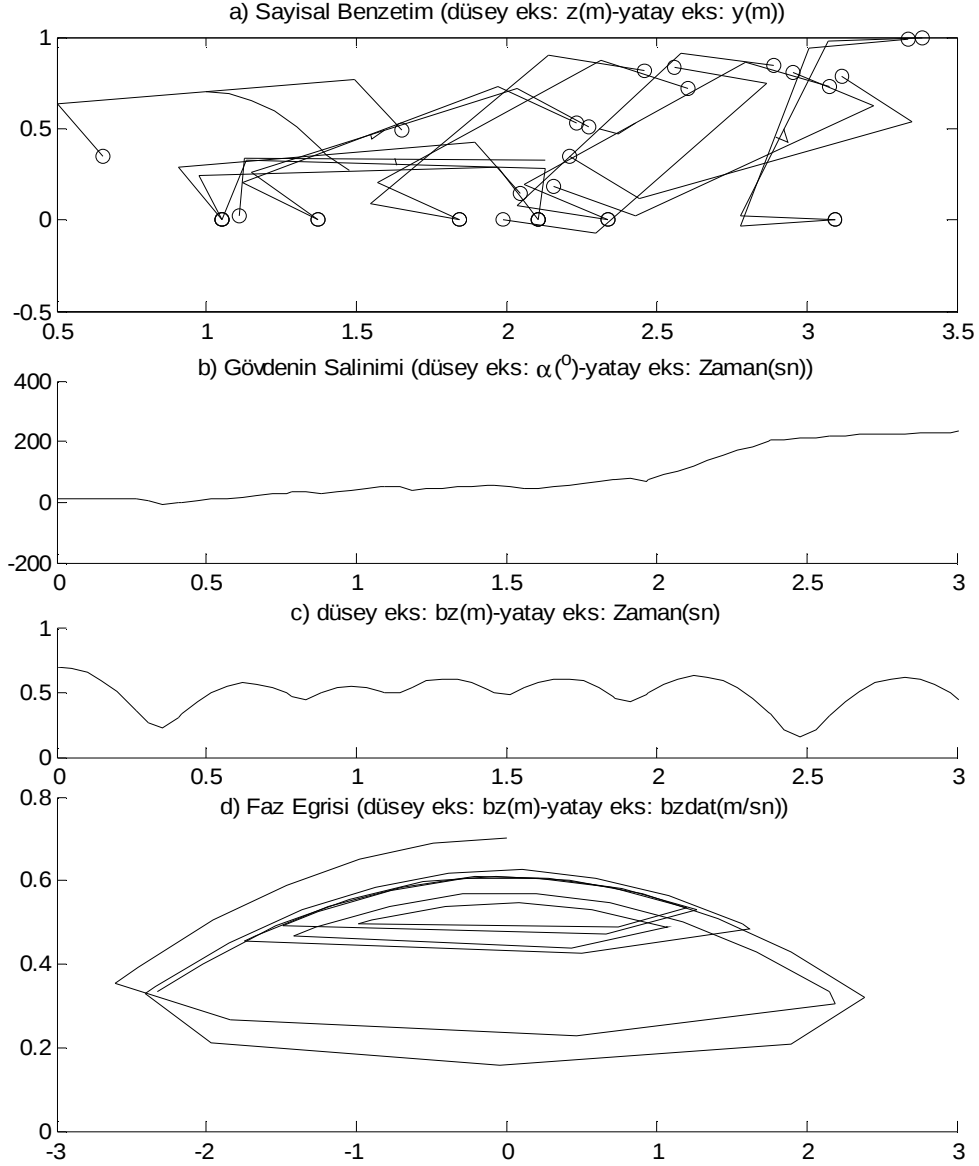


Şekil 7.27 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- c) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- d) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

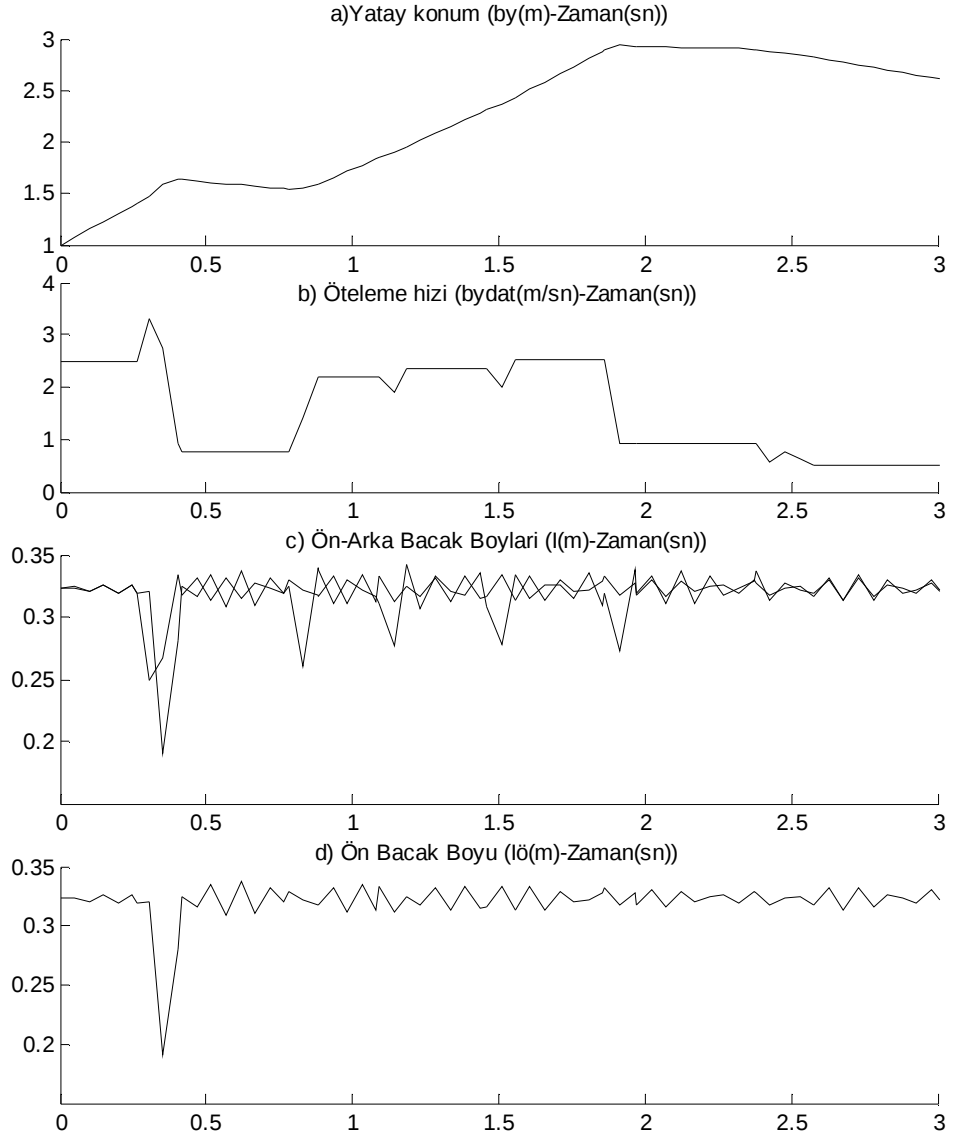
Tablo 7.8 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.

QUADRUPEDAL ROBOT				
4 bacaklı				
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ				
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)
67.5		8		2.5
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ				
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın harcadığı güç	Arka Bacağın harcadığı güç	Toplam harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)
3	0.92	485	412	897
5	1.88	710	689	1400
6	2.45	821	807	1629
8	3.51	1050	1068	2118
10	4.3	1282	1333	2616



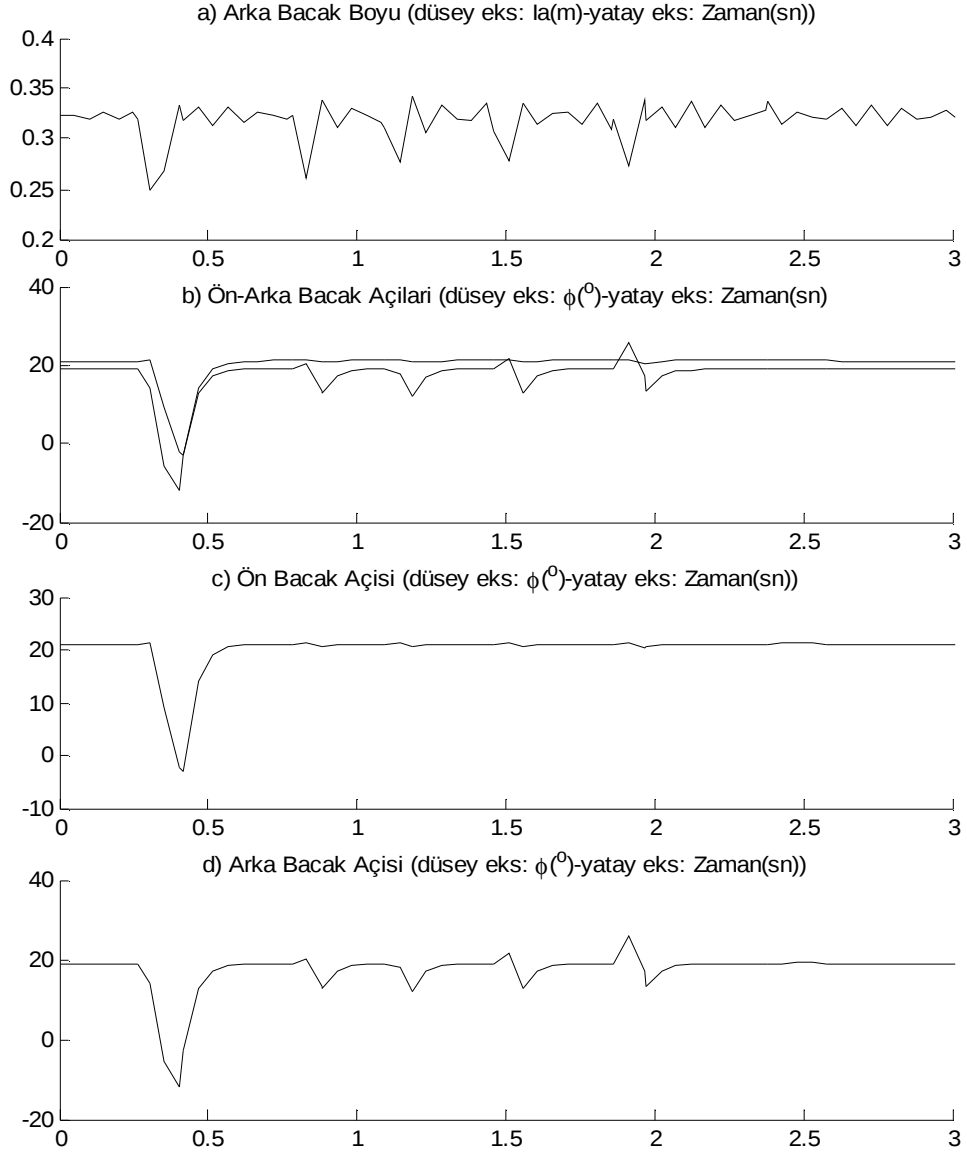
Şekil 7.28 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayisal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı(0).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



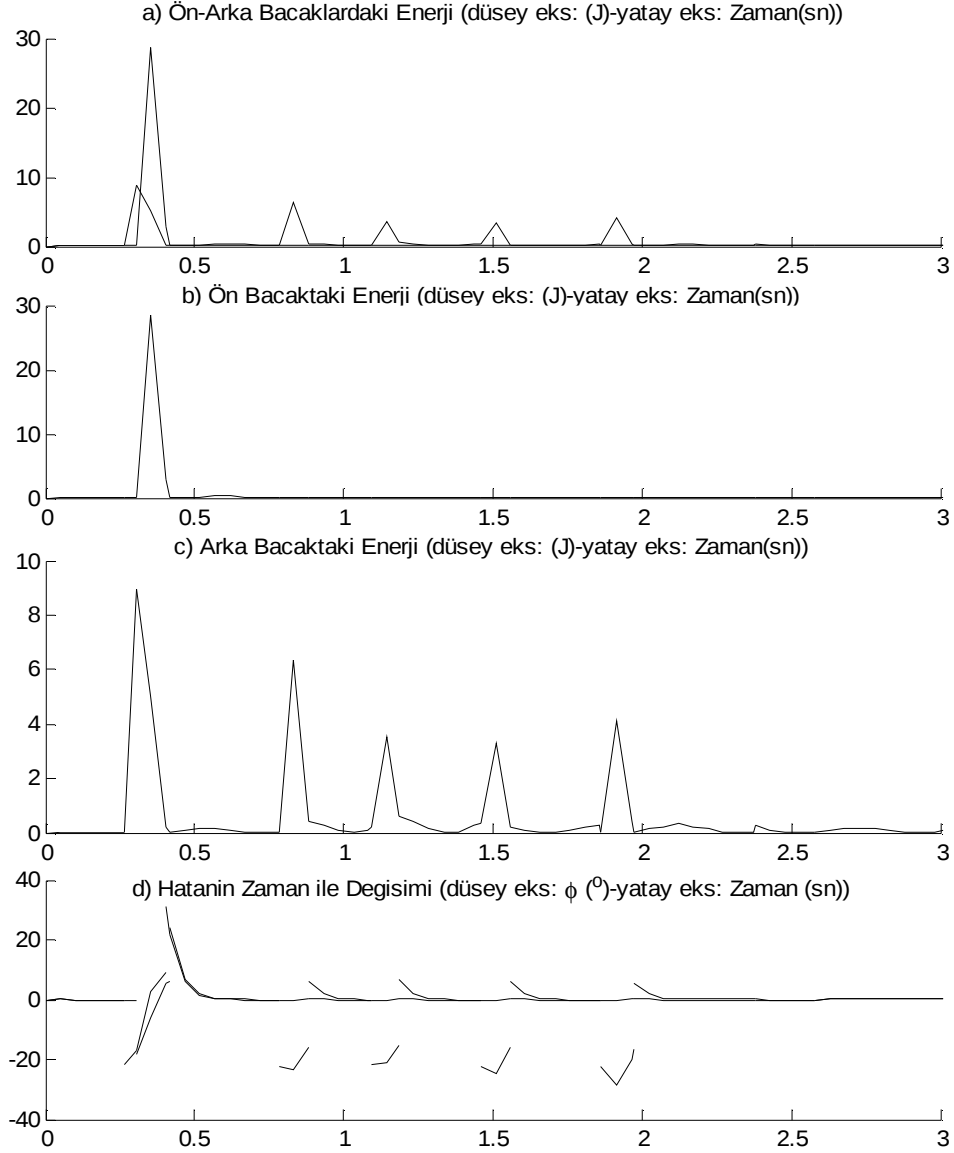
Şekil 7.29 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



Şekil 7.30 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun arka bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- c) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$).
- d) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).



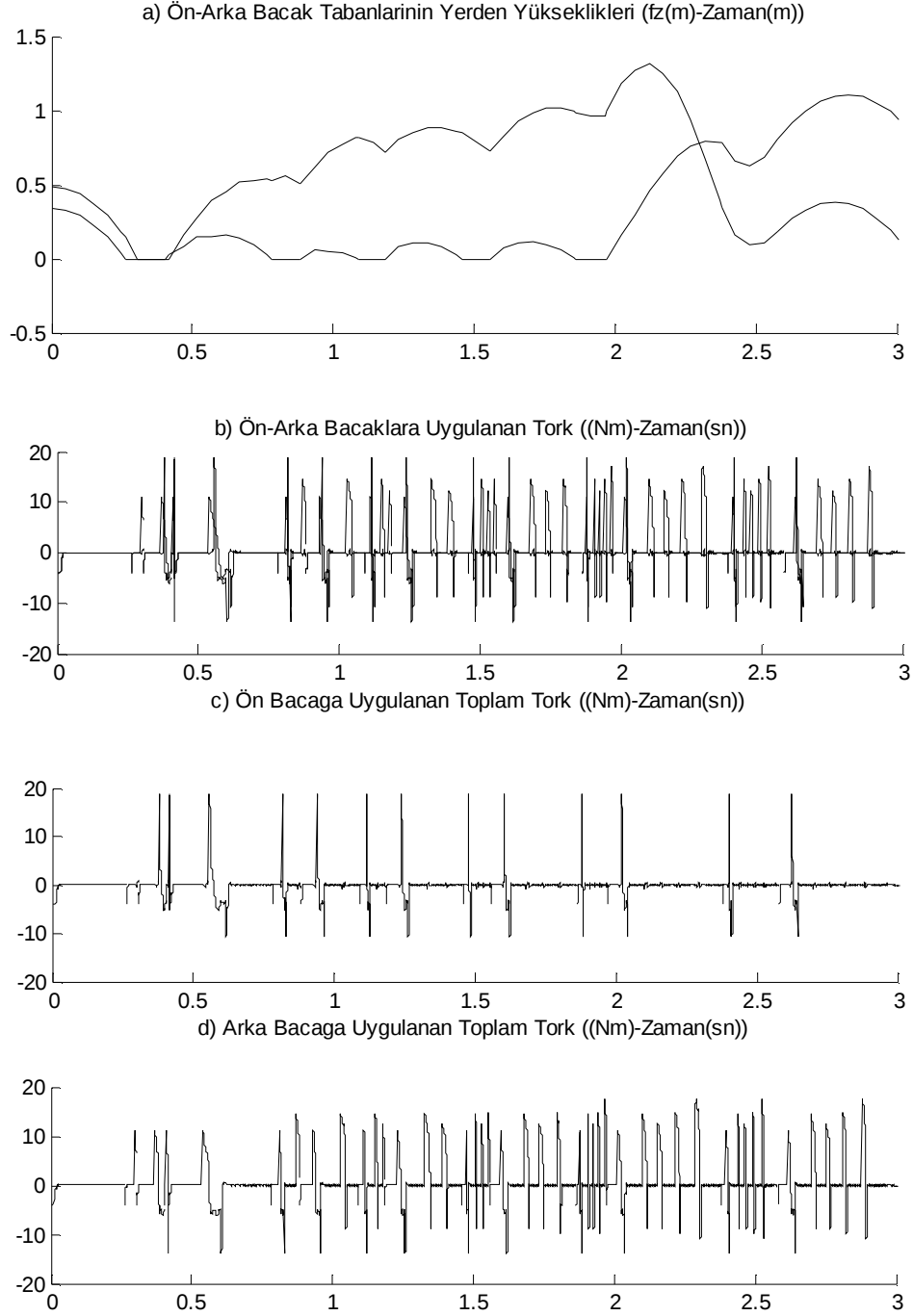
Şekil 7.31 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).

b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).

c) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).

d) Hatanın zaman ile değişimi (e).

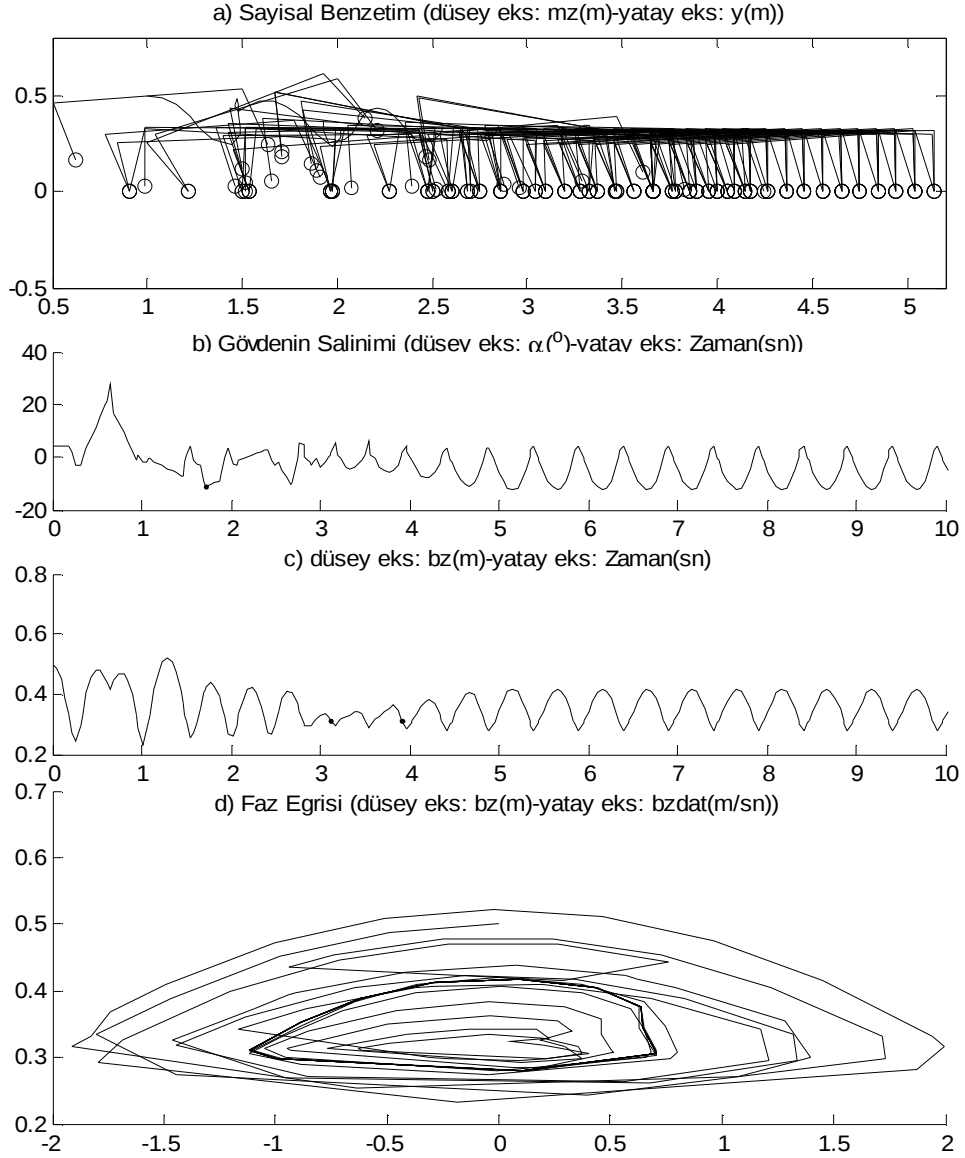


Şekil 7.32 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- c) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- d) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

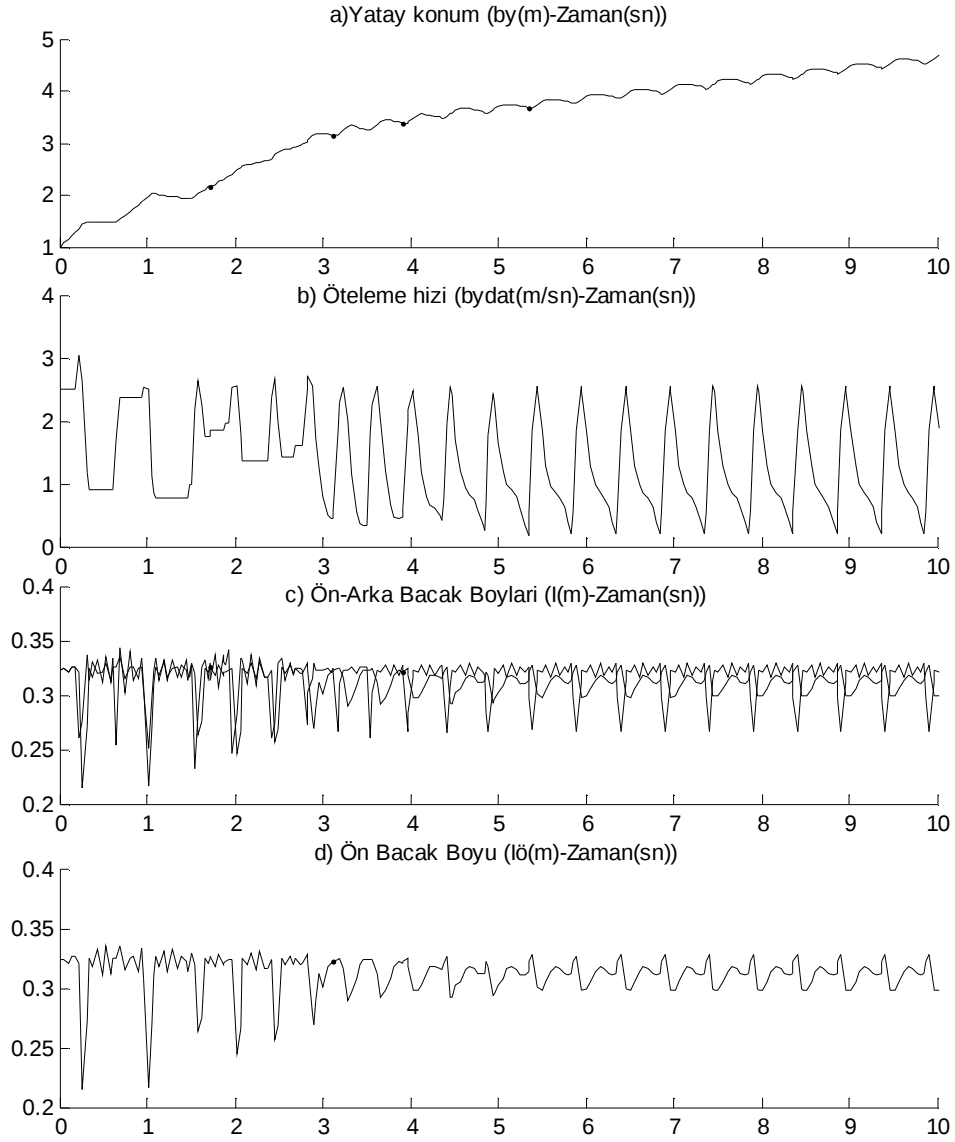
Tablo 7.9 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.

QUADRUPEDAL ROBOT				
4 bacaklı				
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ				
Robotun bırakıldığı yükseklik	Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı	
b_z (cm)	a (°)		db_y (m/sn)	
70	8		2.5	
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ				
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın harcadığı güç	Arka Bacağın harcadığı güç	Toplam harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)
3	2.3	763	436	1199



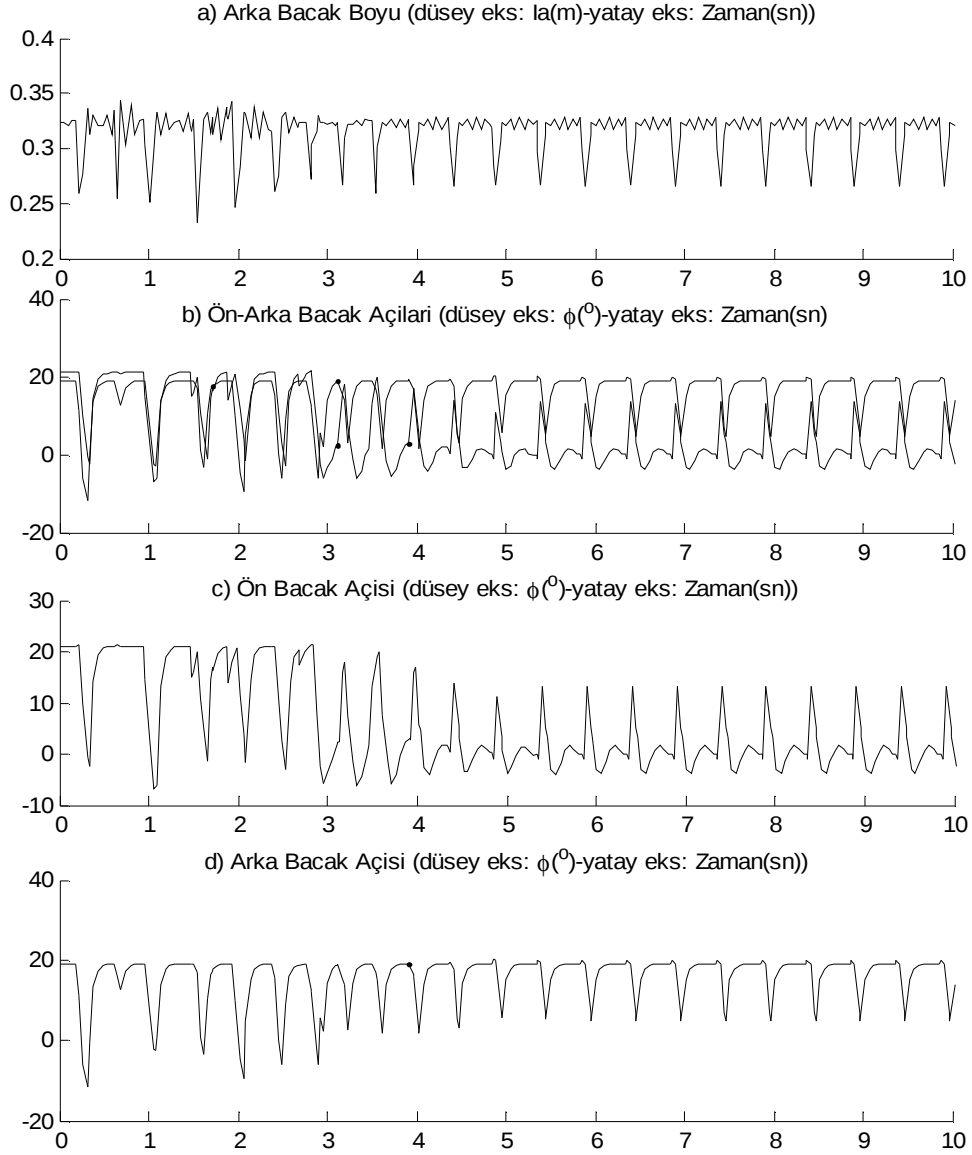
Şekil 7.33 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



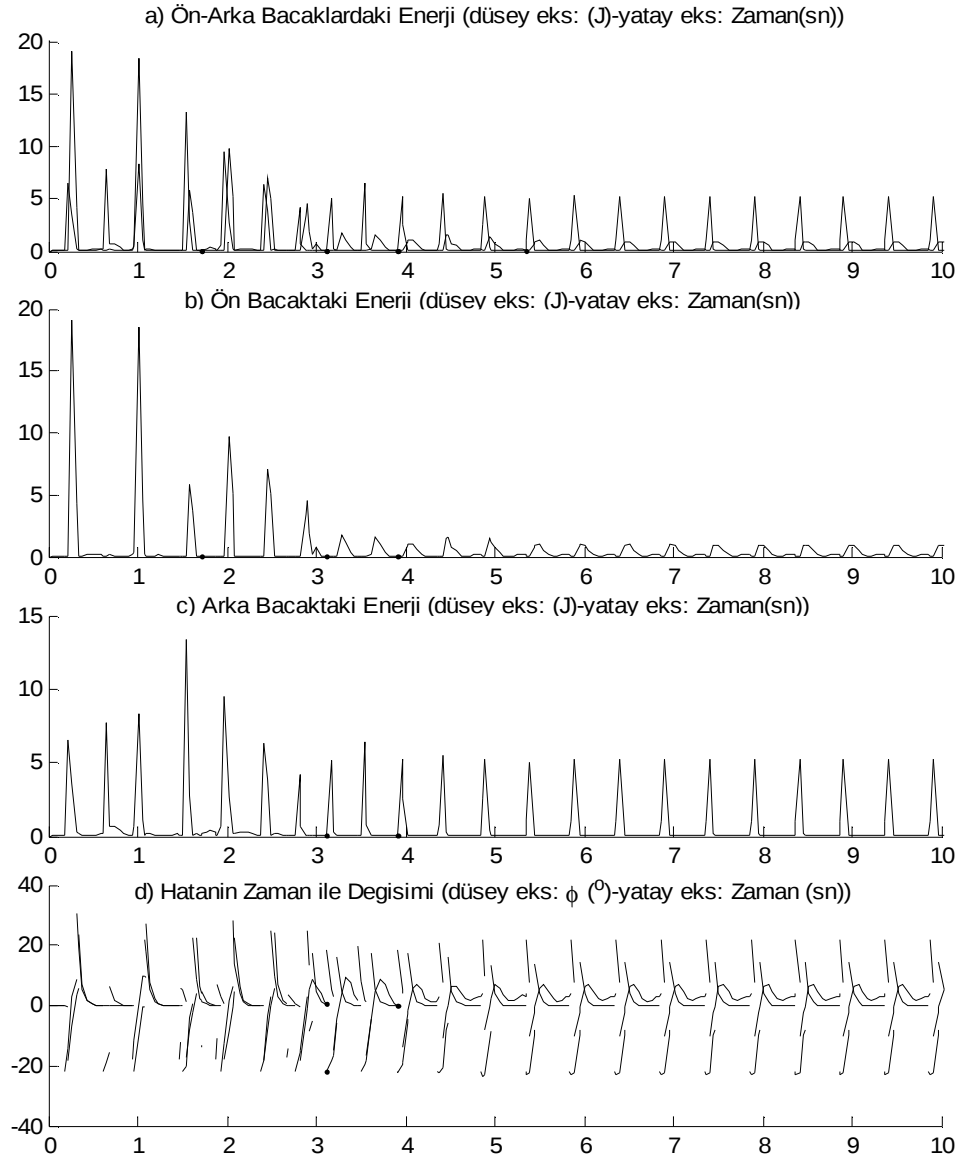
Şekil 7.34 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



Şekil 7.35 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun arka bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- c) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$).
- d) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).



Şekil 7.36 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji

miktarları E_{top} (J).

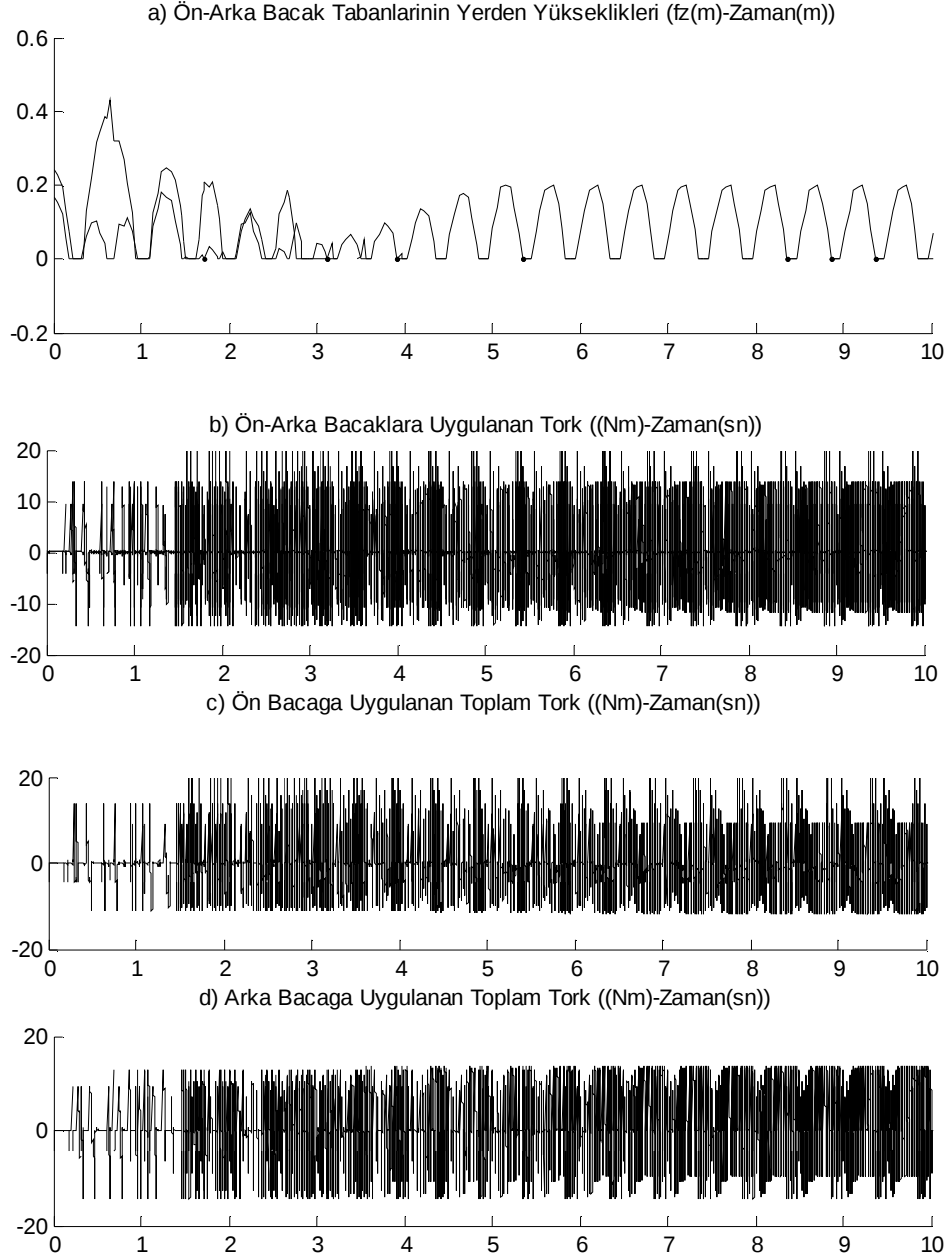
b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji

miktarı $E_{ön}$ (J).

c) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji

miktarı E_{arka} (J).

d) Hatanın zaman ile değişimi (e).

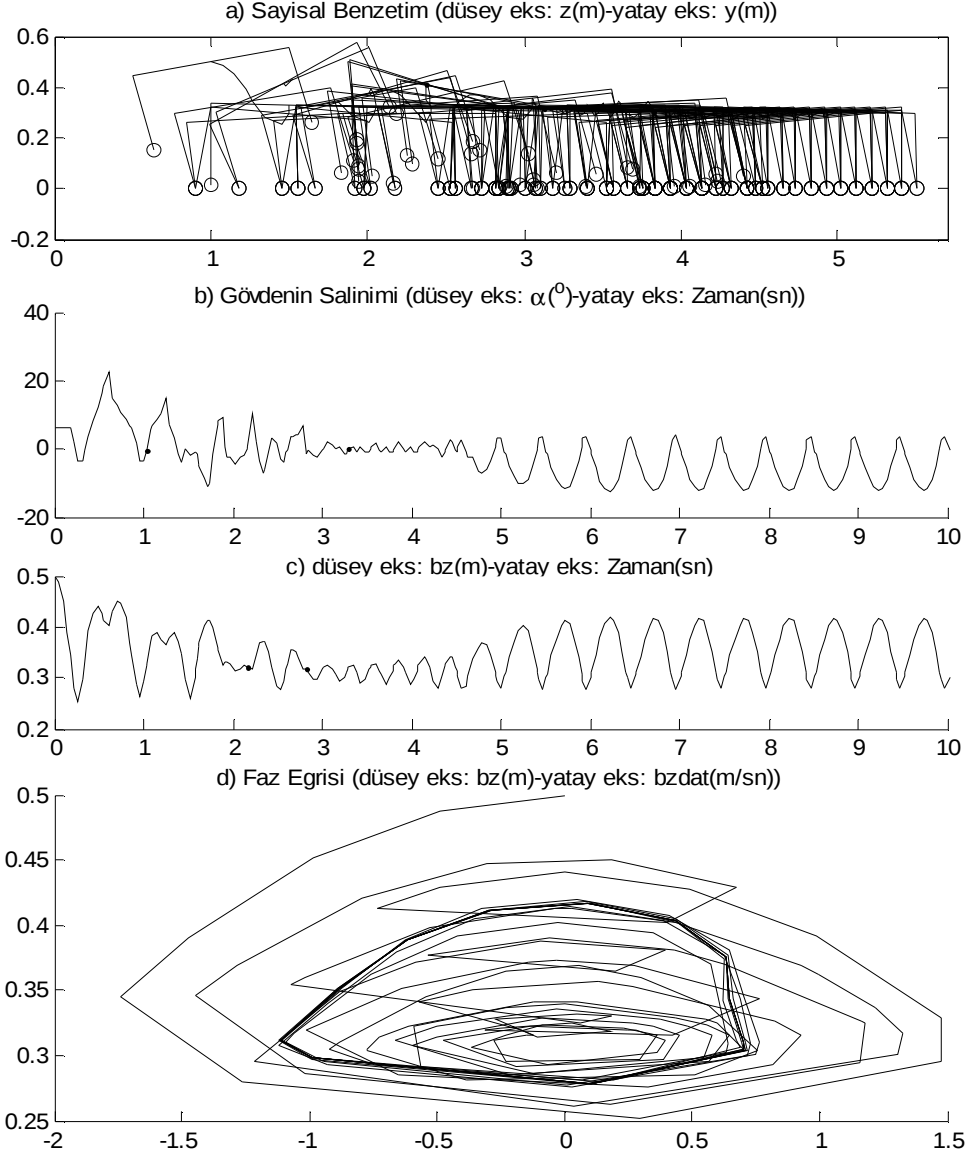


Şekil 7.37 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- c) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- d) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

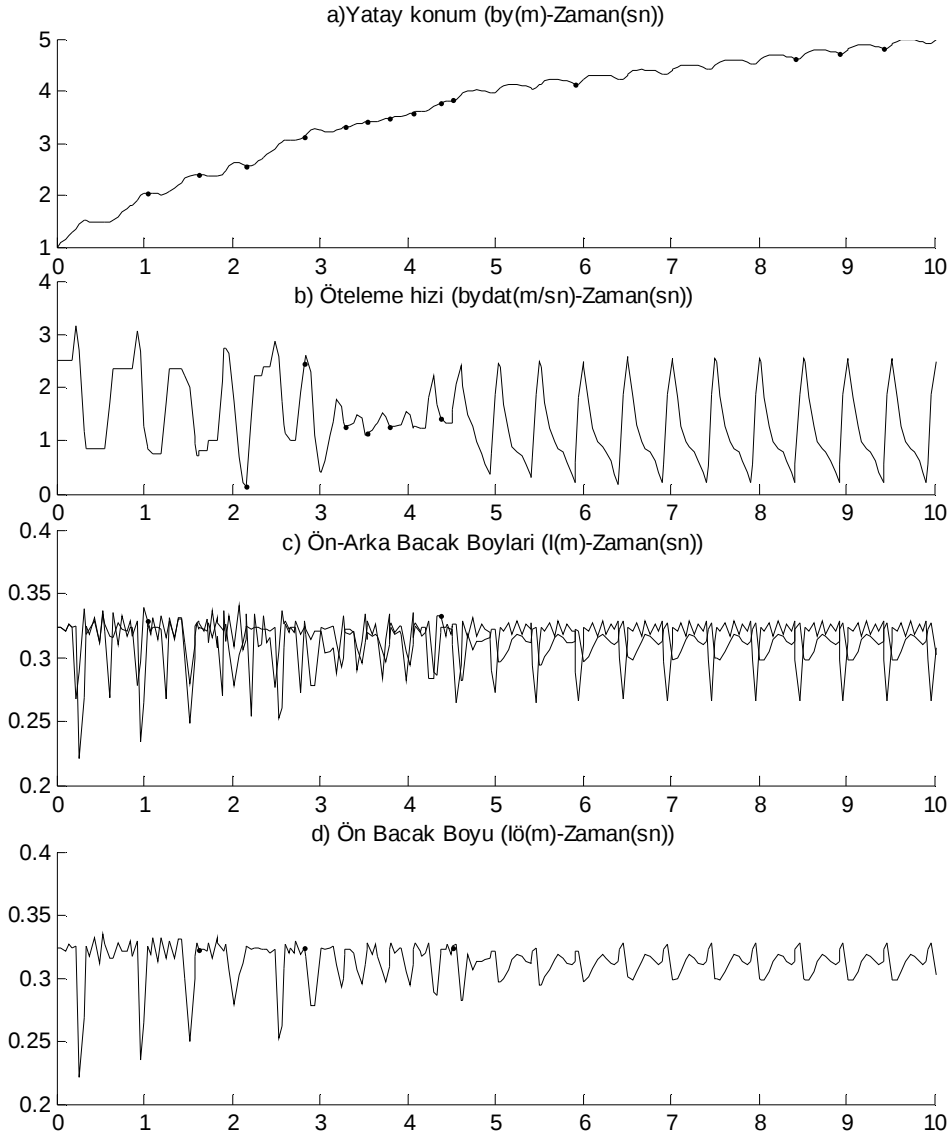
Tablo 7.10 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.

QUADRUPEDAL ROBOT				
4 bacaklı				
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ				
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)
50		4		2.5
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ				
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın harcadığı güç	Arka Bacağın harcadığı güç	Toplam harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)
3	0.85	514	435	949
5	1.8	770	744	1514
6	2.39	888	881	1769
8	3.3	1120	1145	2266
10	4.2	1352	1409	2762



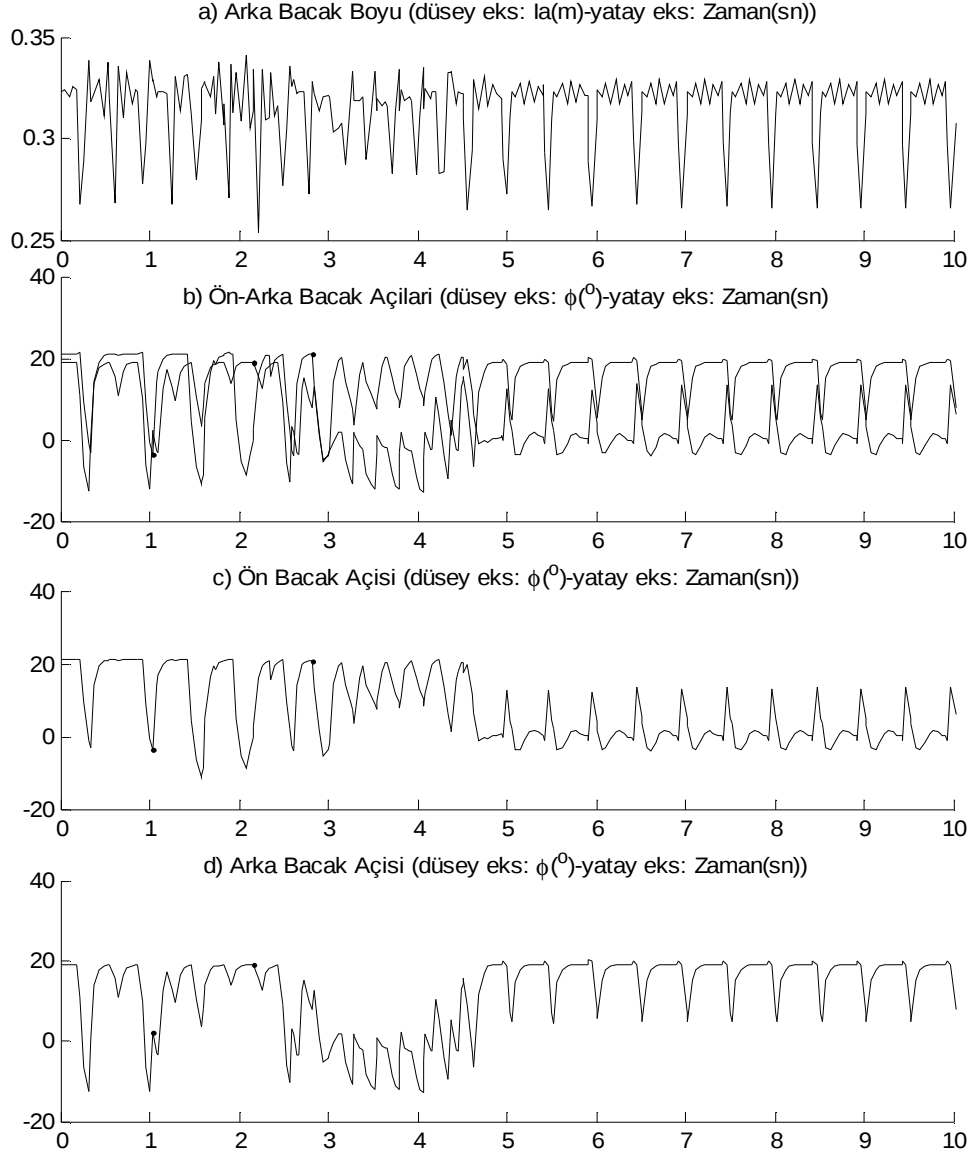
Şekil 7.38 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α (alfa) salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



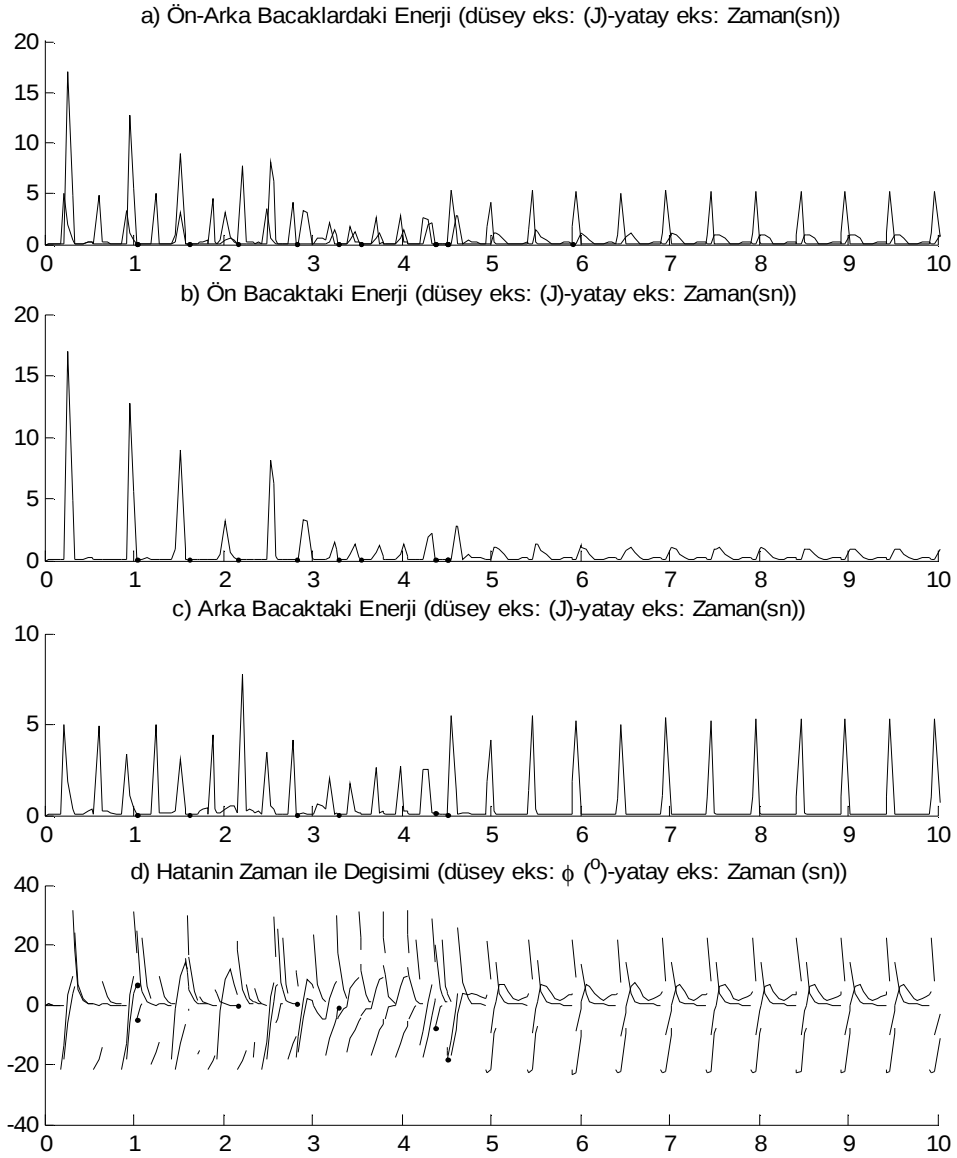
Şekil 7.39 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



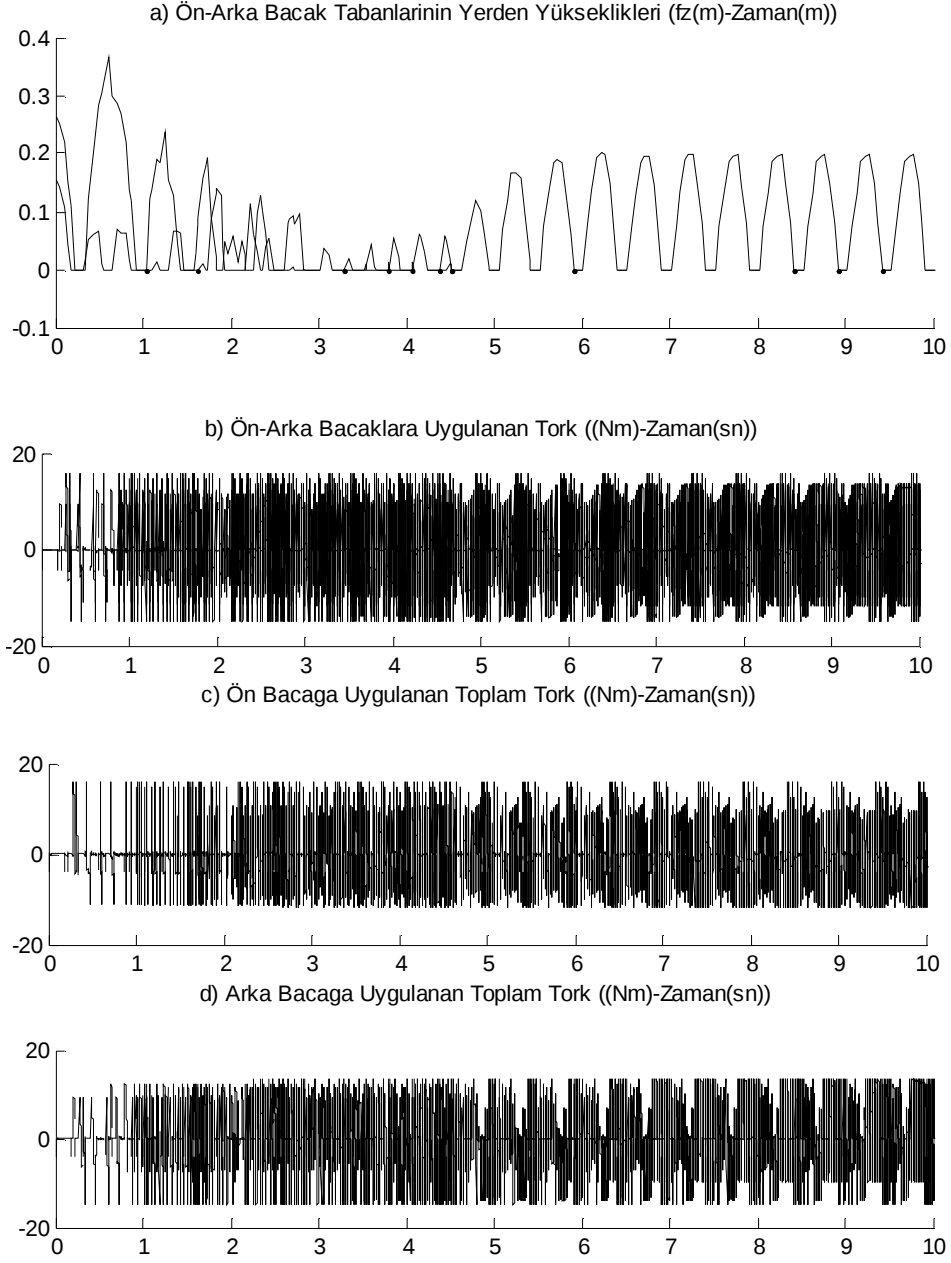
Şekil 7.40 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- c) Robotun sanal ön bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$).
- d) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).



Şekil 7.41 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).
- b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).
- c) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).
- d) Kontrolörün zamana bağlı olarak hata grafiği (e).

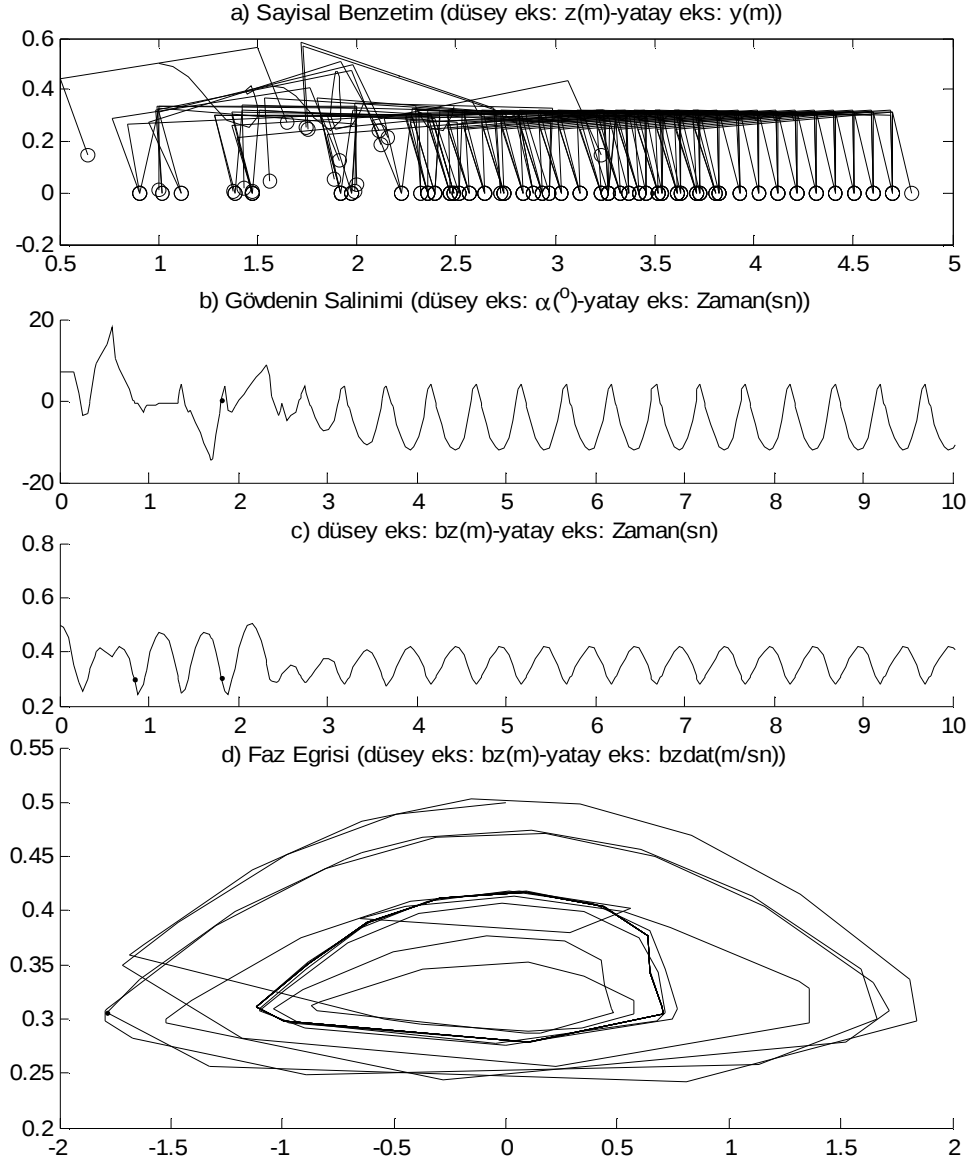


Şekil 7.42 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- c) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- d) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

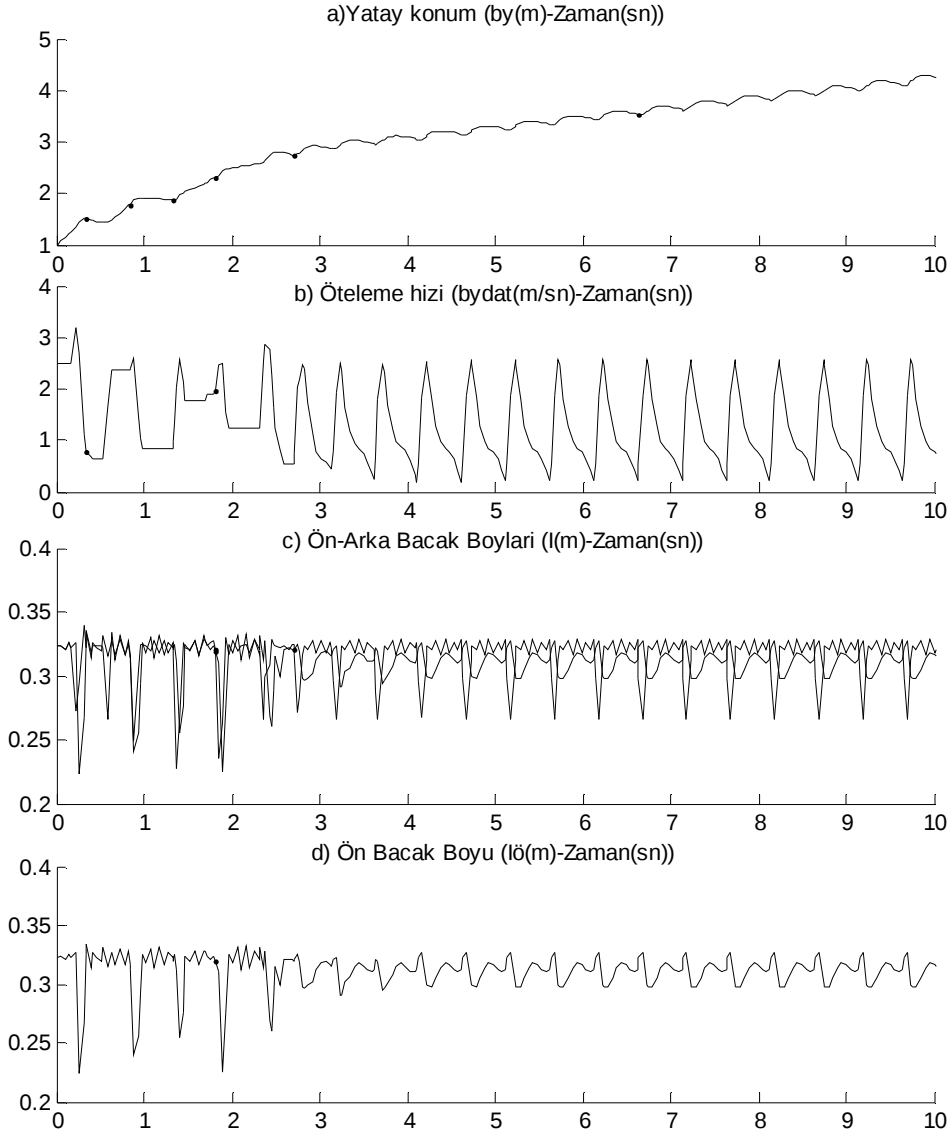
Tablo 7.11 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.

QUADRUPEDAL ROBOT				
4 bacaklı				
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ				
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)
50		6		2.5
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ				
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın harcadığı güç	Arka Bacağın harcadığı güç	Toplam harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)
3	0.81	464	530	995
5	1.79	759	846	1605
6	2.39	870	977	1847
8	3.5	1104	1243	2348
10	4.7	1310	1493	2804



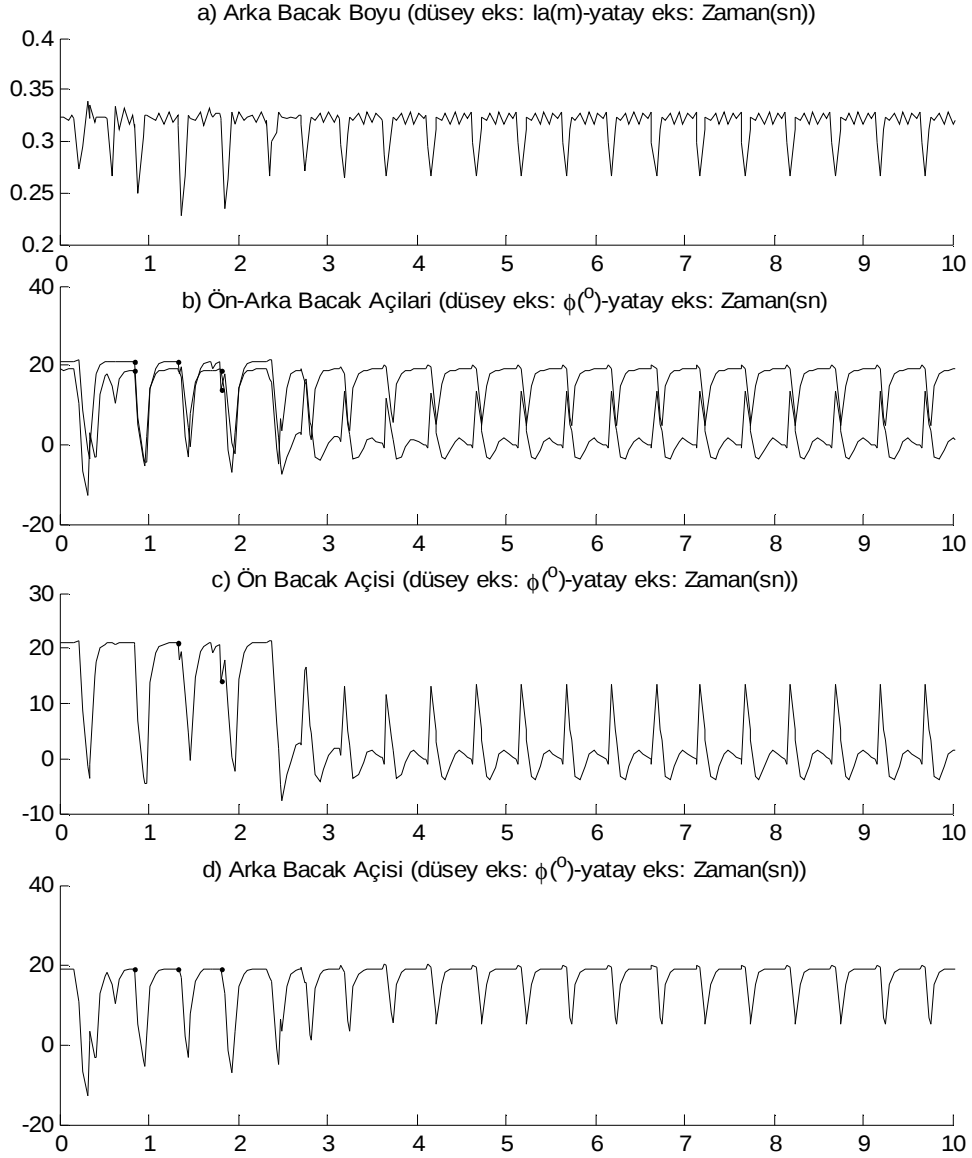
Şekil 7.43 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α (alfa) salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



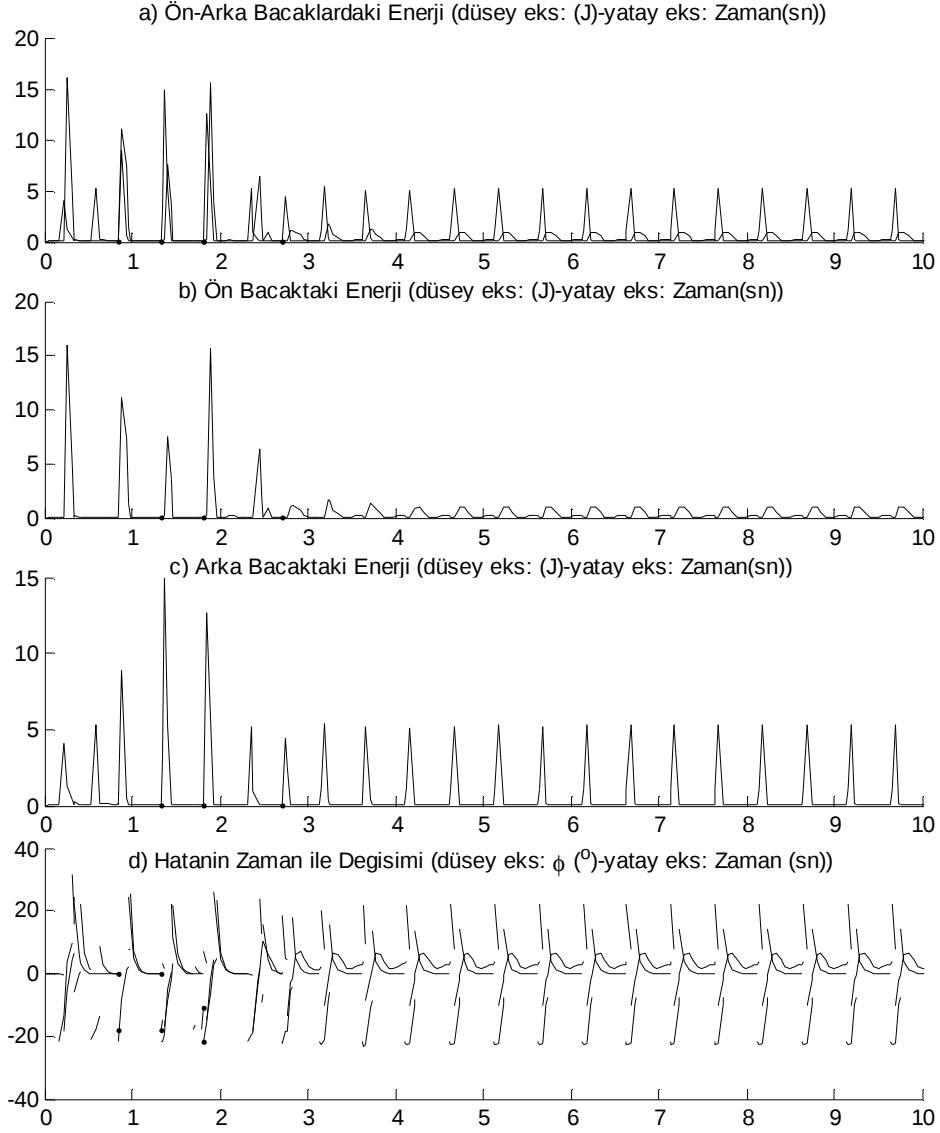
Şekil 7.44 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



Şekil 7.45 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- c) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$).
- d) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).



Şekil 7.46 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji

miktarları E_{top} (J).

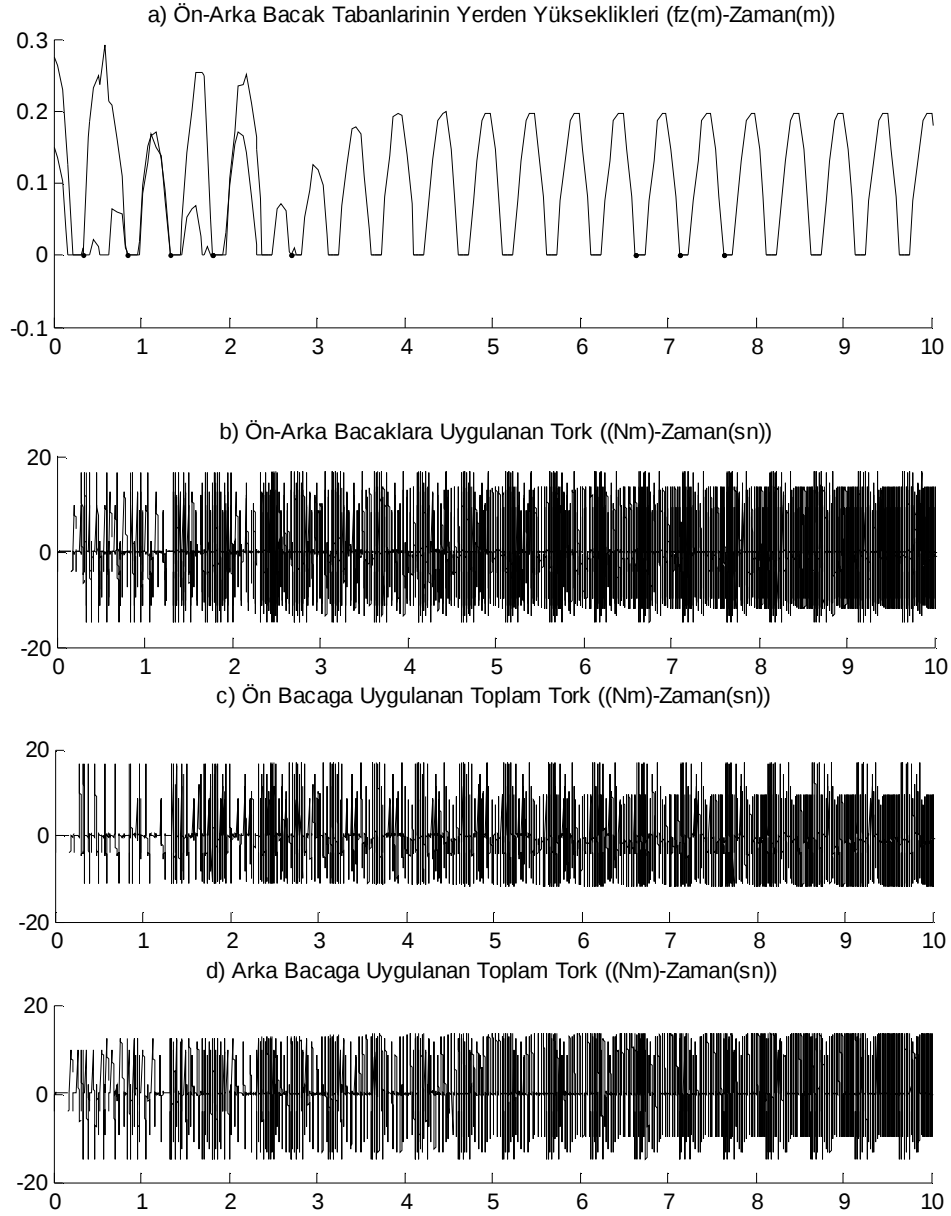
b) Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji

miktarı $E_{ön}$ (J).

c) Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji

miktarı E_{arka} (J).

d) Kontrolörün zamana bağlı olarak hata grafiği (e).

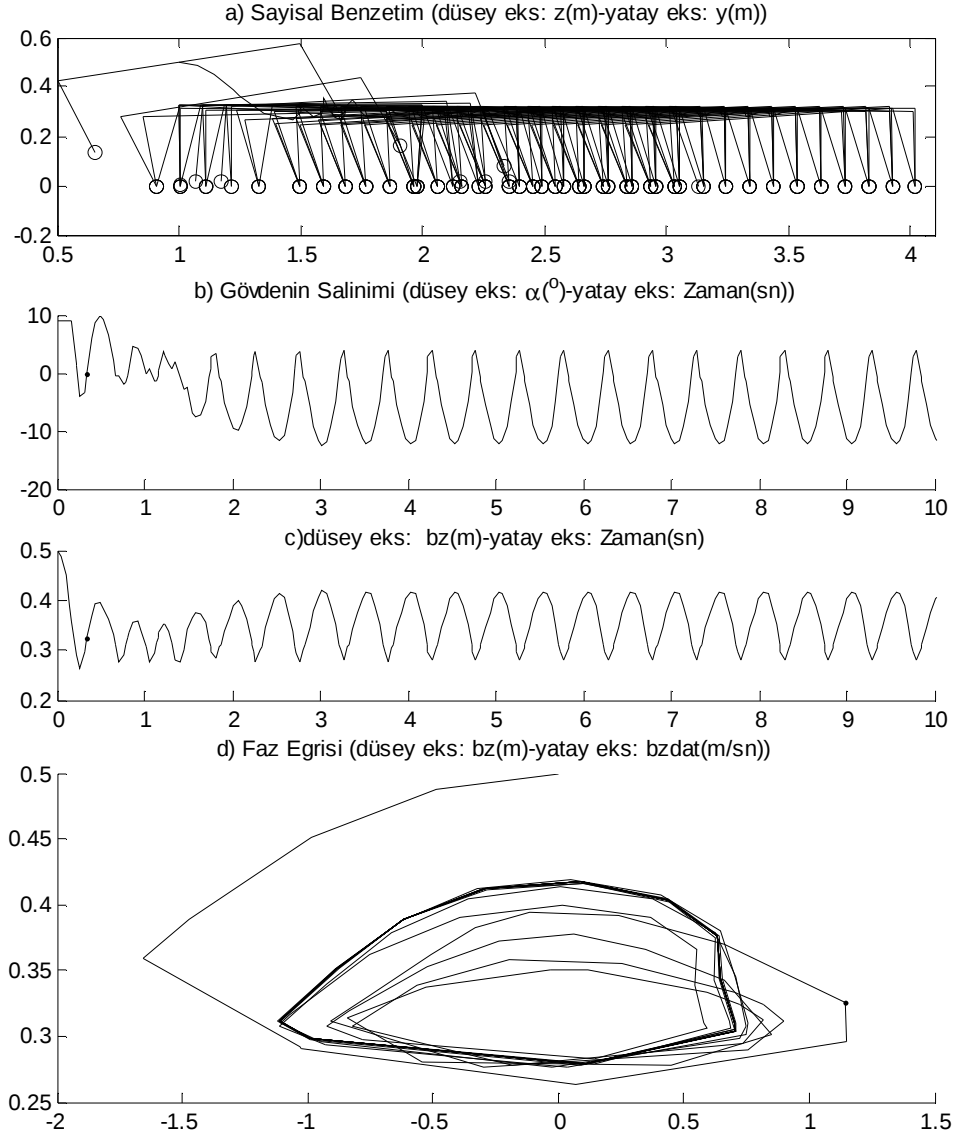


Şekil 7.47 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- c) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- d) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

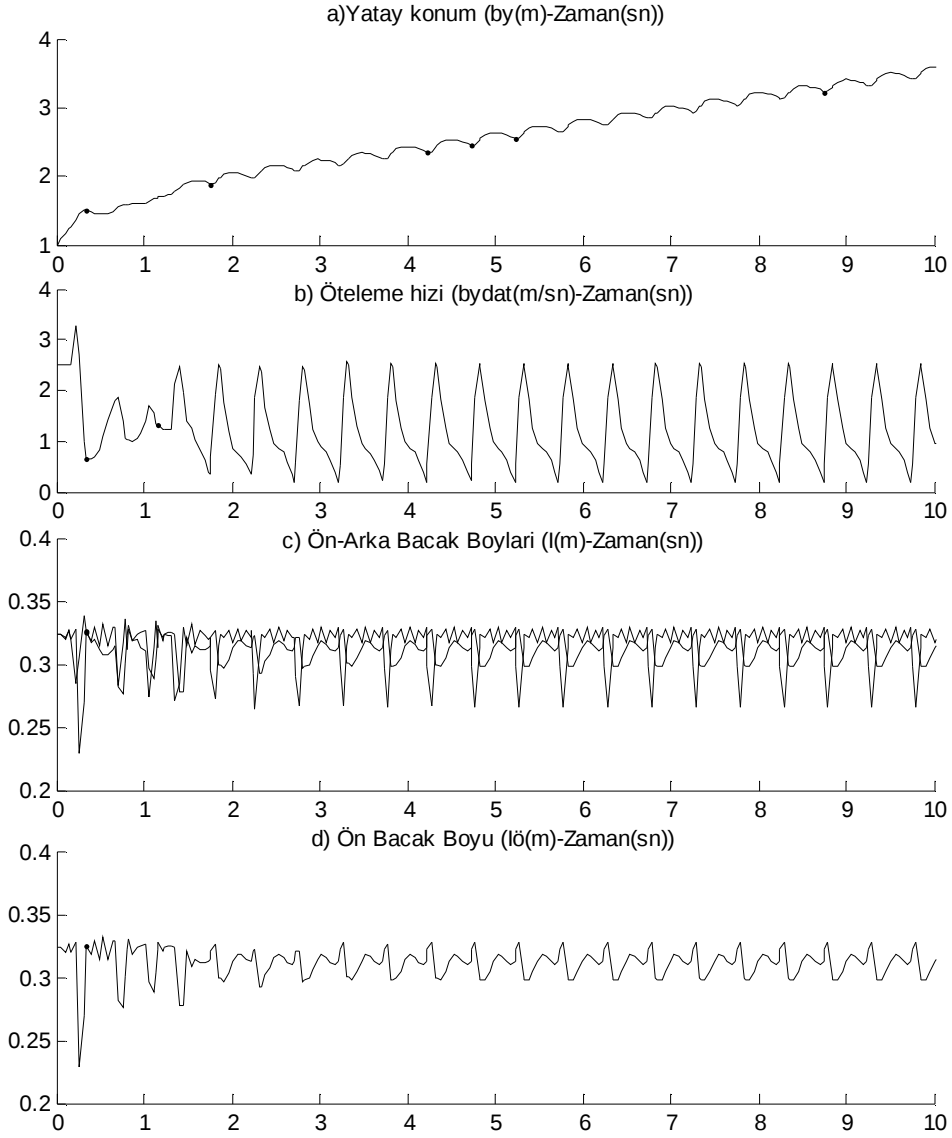
Tablo 7.12 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.

QUADRUPEDAL ROBOT				
4 bacaklı				
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ				
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)
50		7		2.5
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ				
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın harcadığı güç	Arka Bacağın harcadığı güç	Toplam harcanan Güç
t	b_y	$P_{\text{ön}}$	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)
3	0.8	467	478	945
5	1.75	685	737	1423
6	2.22	796	856	1652
8	3.2	1030	1116	2146
10	3.8	1262	1388	2651



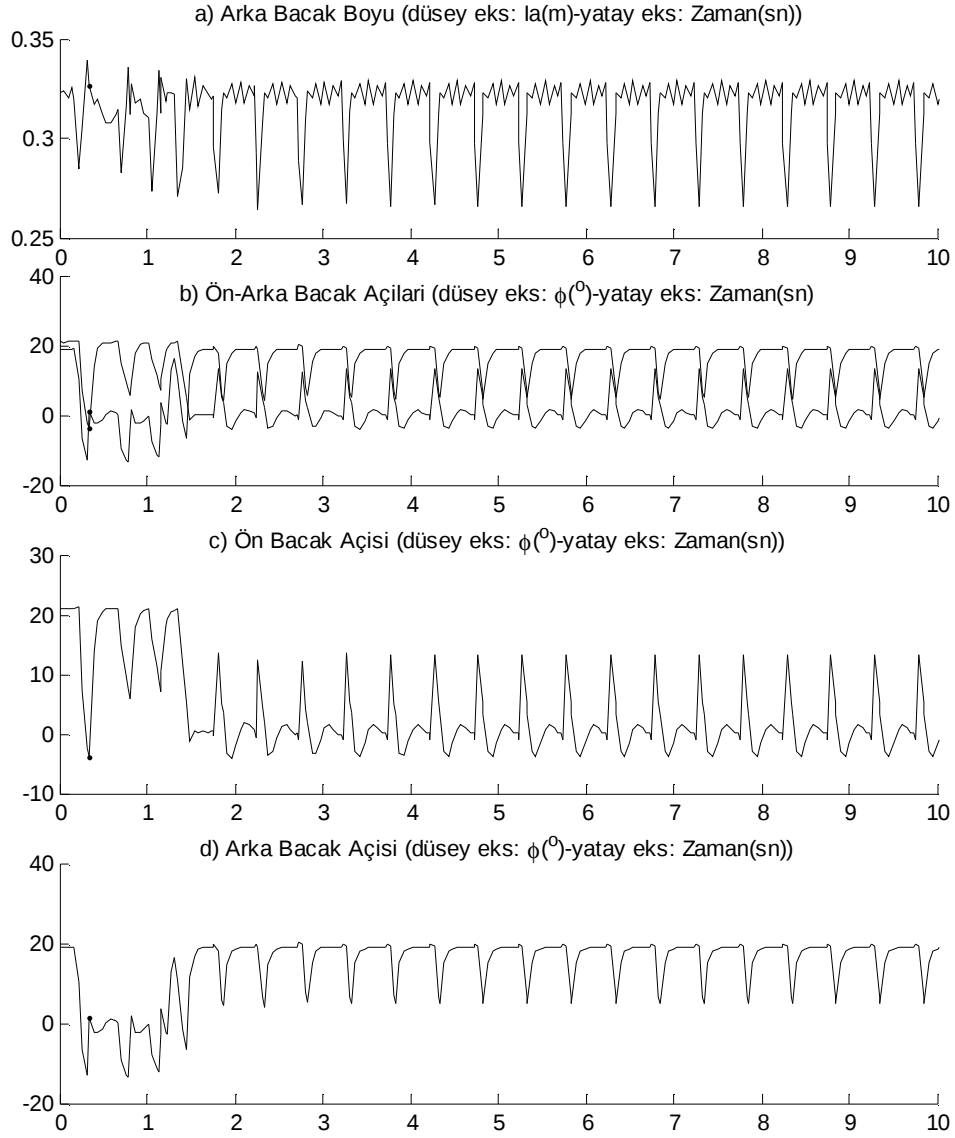
Şekil 7.48 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



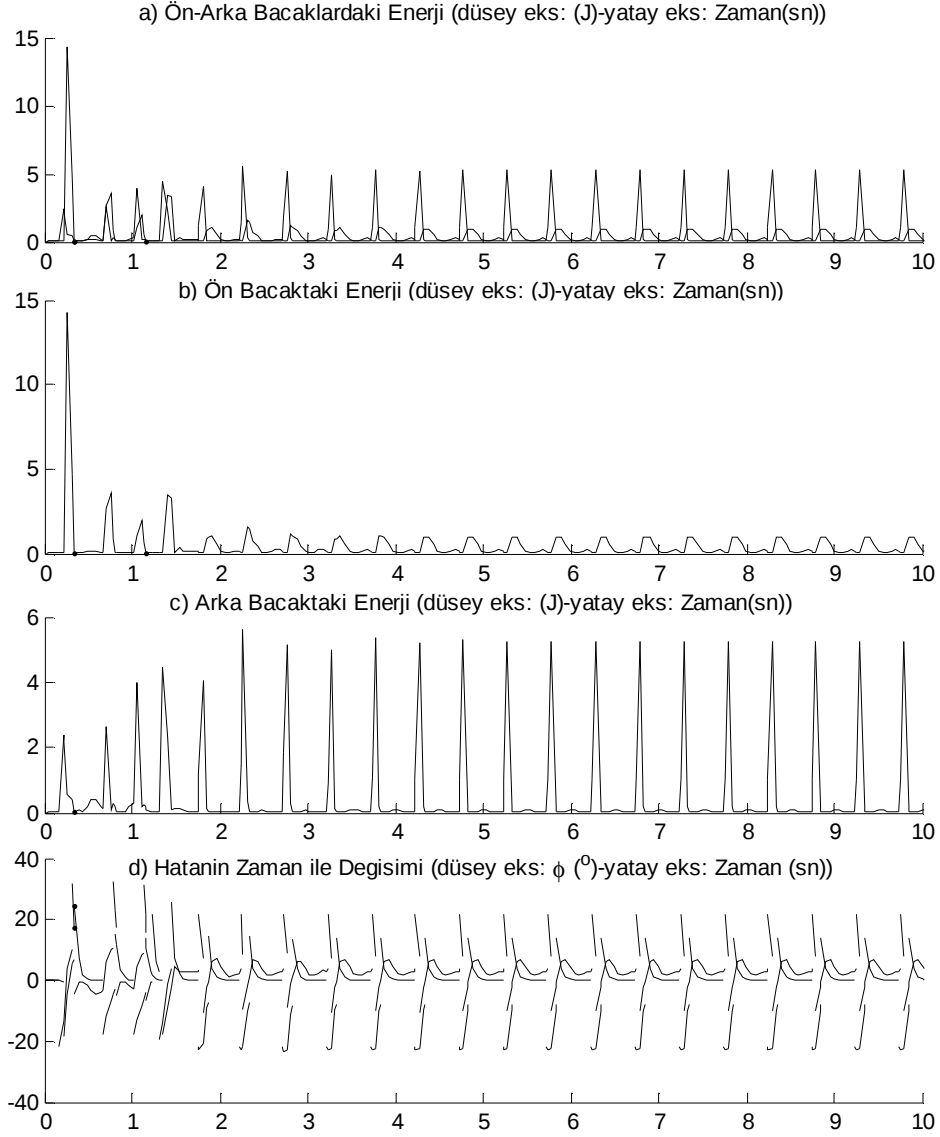
Şekil 7.49 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



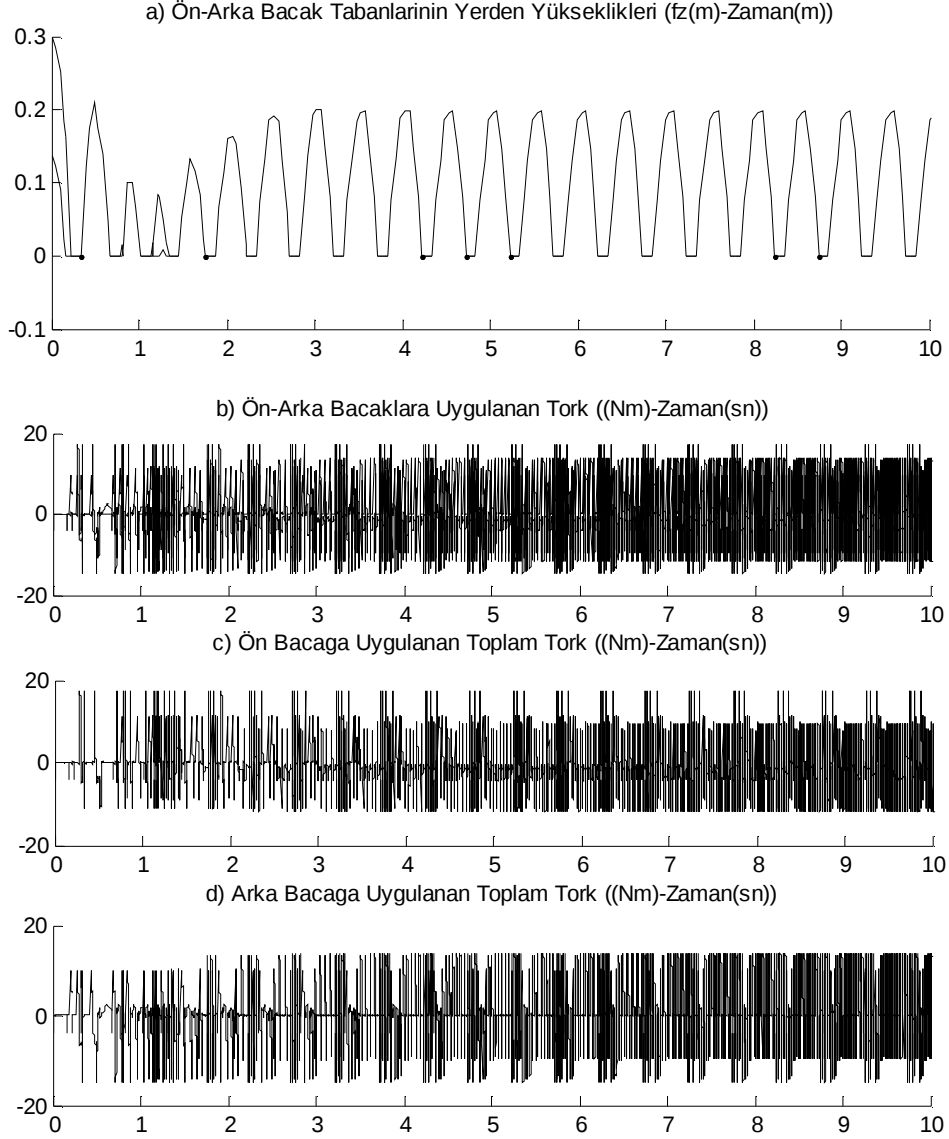
Şekil 7.50 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun arka bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- c) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$).
- d) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).



Şekil 7.51 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadripedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).
- b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).
- c) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).
- d) Hatanın zamana ile değişimi (e).

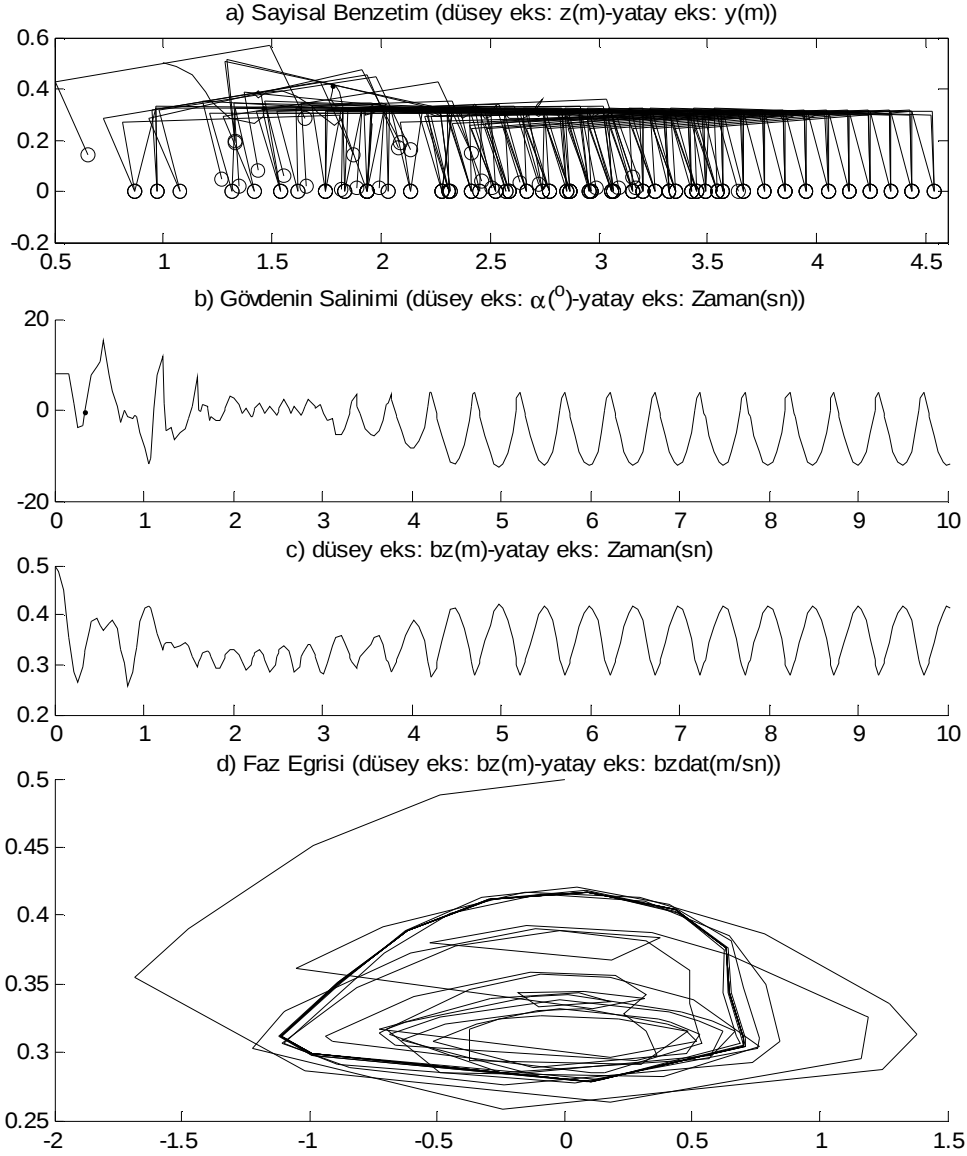


Şekil 7.52 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- c) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- d) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

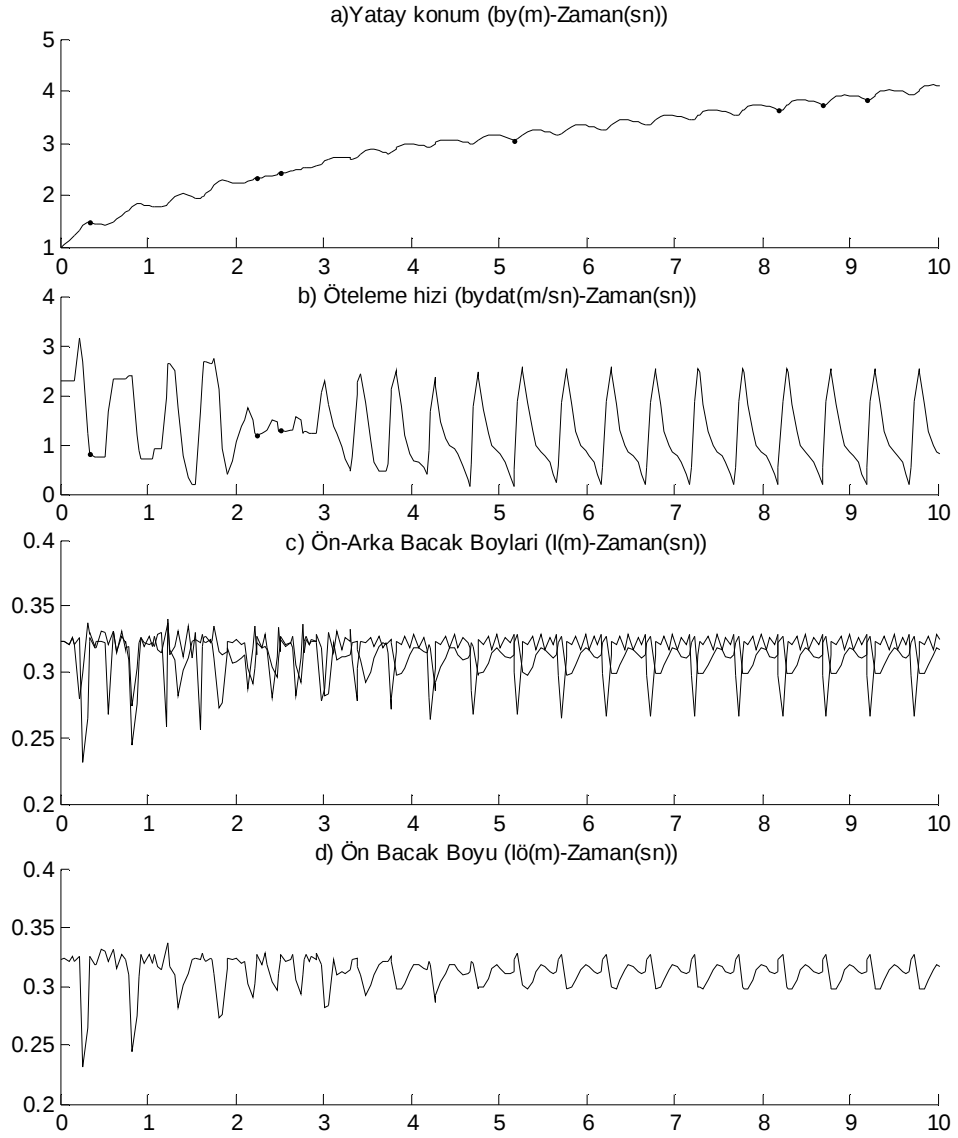
Tablo 7.13 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.

QUADRUPEDAL ROBOT				
4 bacaklı				
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ				
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)
50		9		2.5
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ				
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın harcadığı güç	Arka Bacağın harcadığı güç	Toplam harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)
3	0.65	341	438	780
5	1.4	566	695	1261
6	1.72	684	826	1510
8	2.4	912	1085	1998
10	3.1	1140	1348	2489



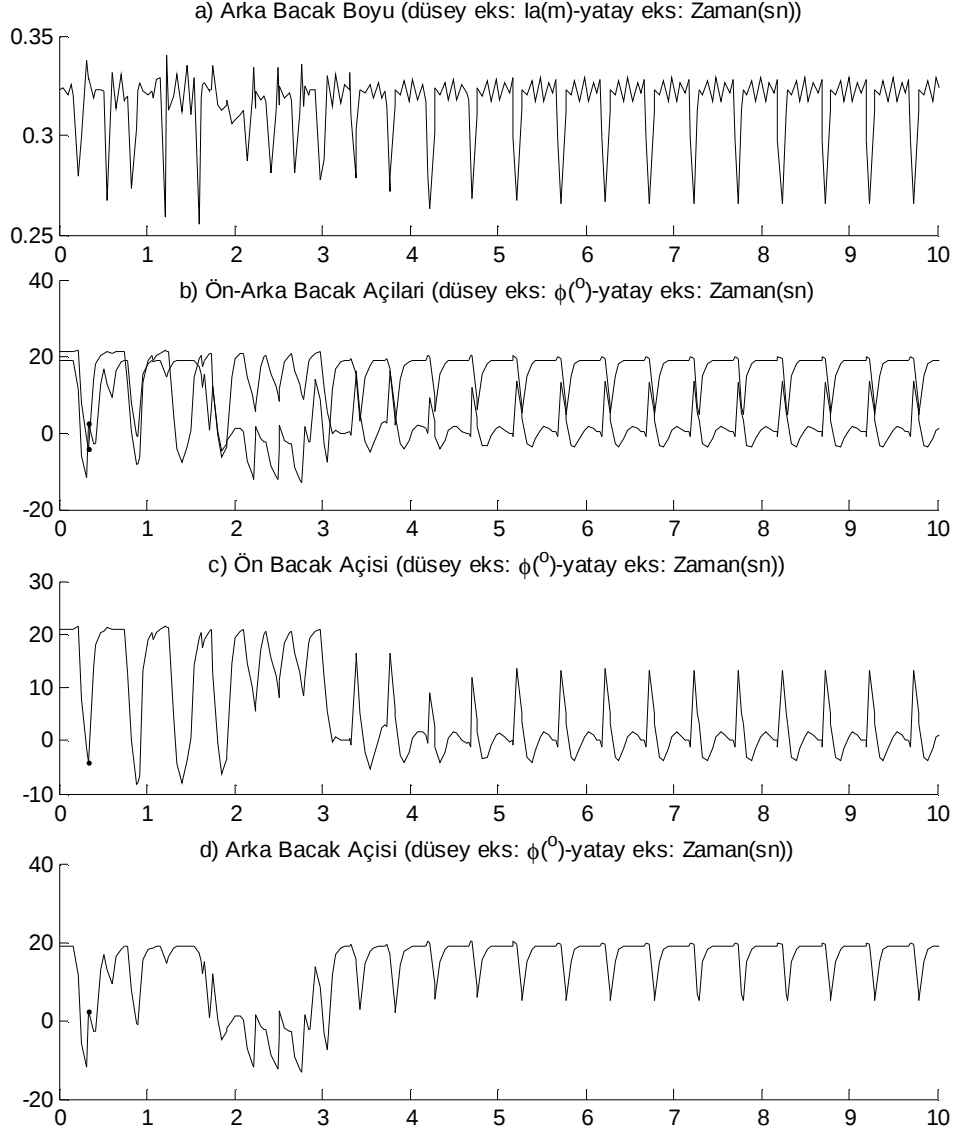
Şekil 7.53 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



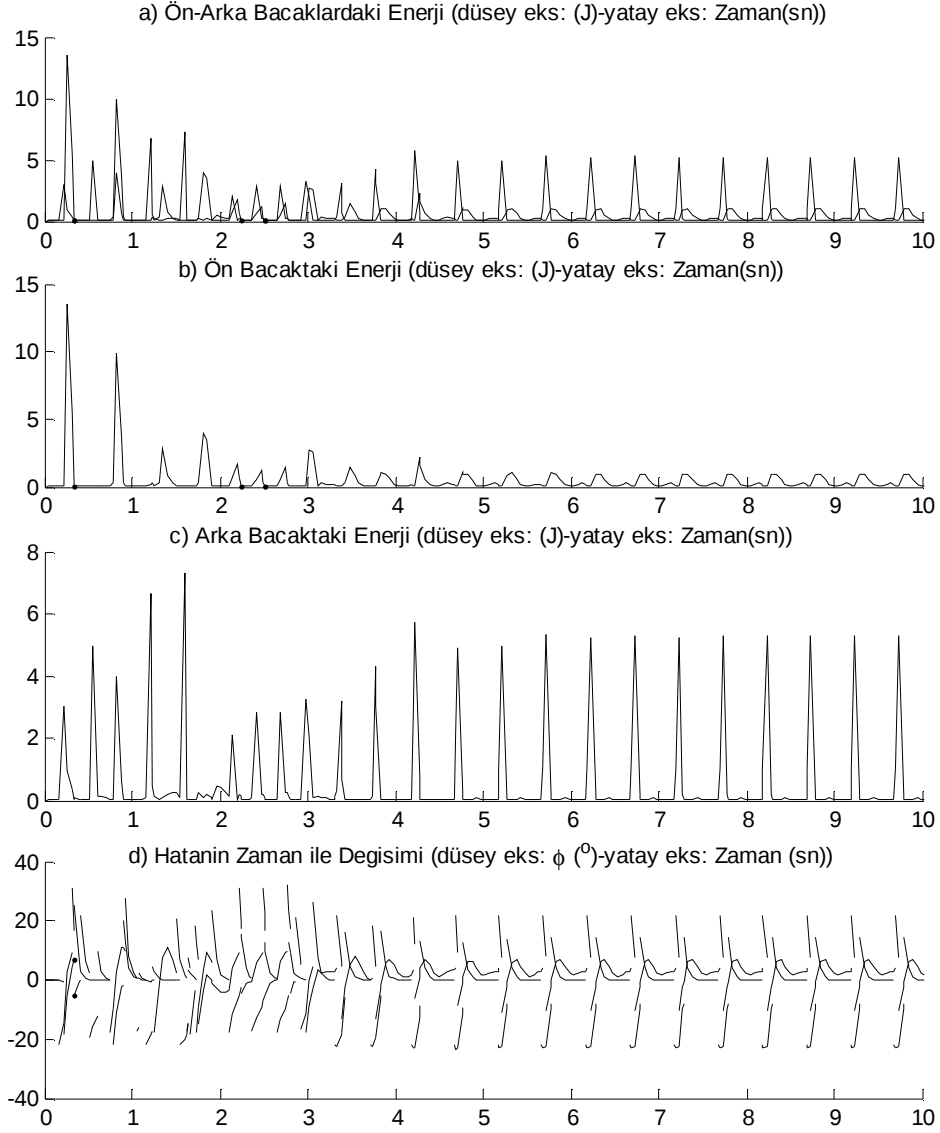
Şekil 7.54 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



Şekil 7.55 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları ϕ ($^{\circ}$).
- c) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $\phi_{ön}$ ($^{\circ}$).
- d) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu ϕ_{arka} ($^{\circ}$).



Şekil 7.56 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji

miktarları E_{top} (J).

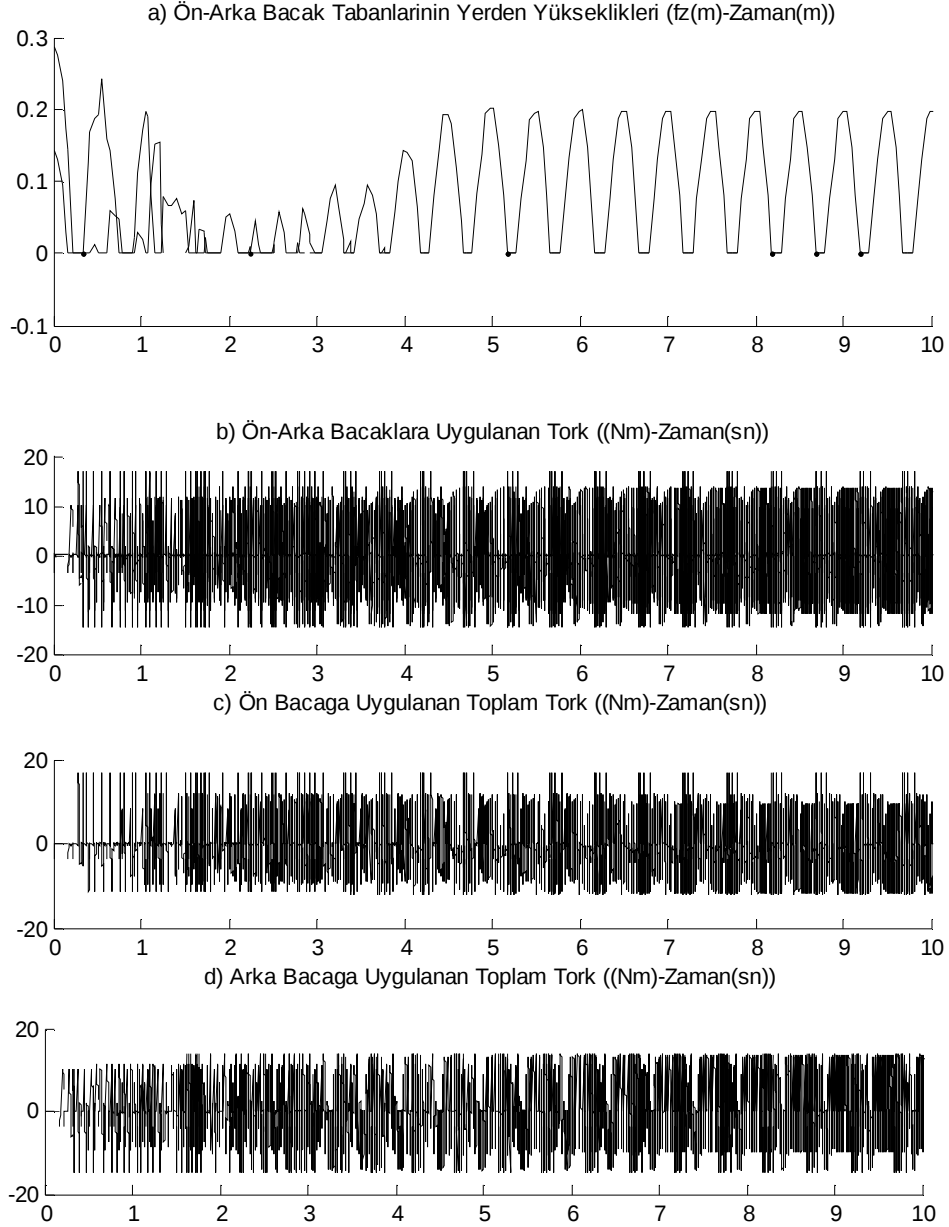
b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji

miktarı $E_{ön}$ (J).

c) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji

miktarı E_{arka} (J).

d) Kontrolörün zamana bağlı olarak hata grafiği (e).

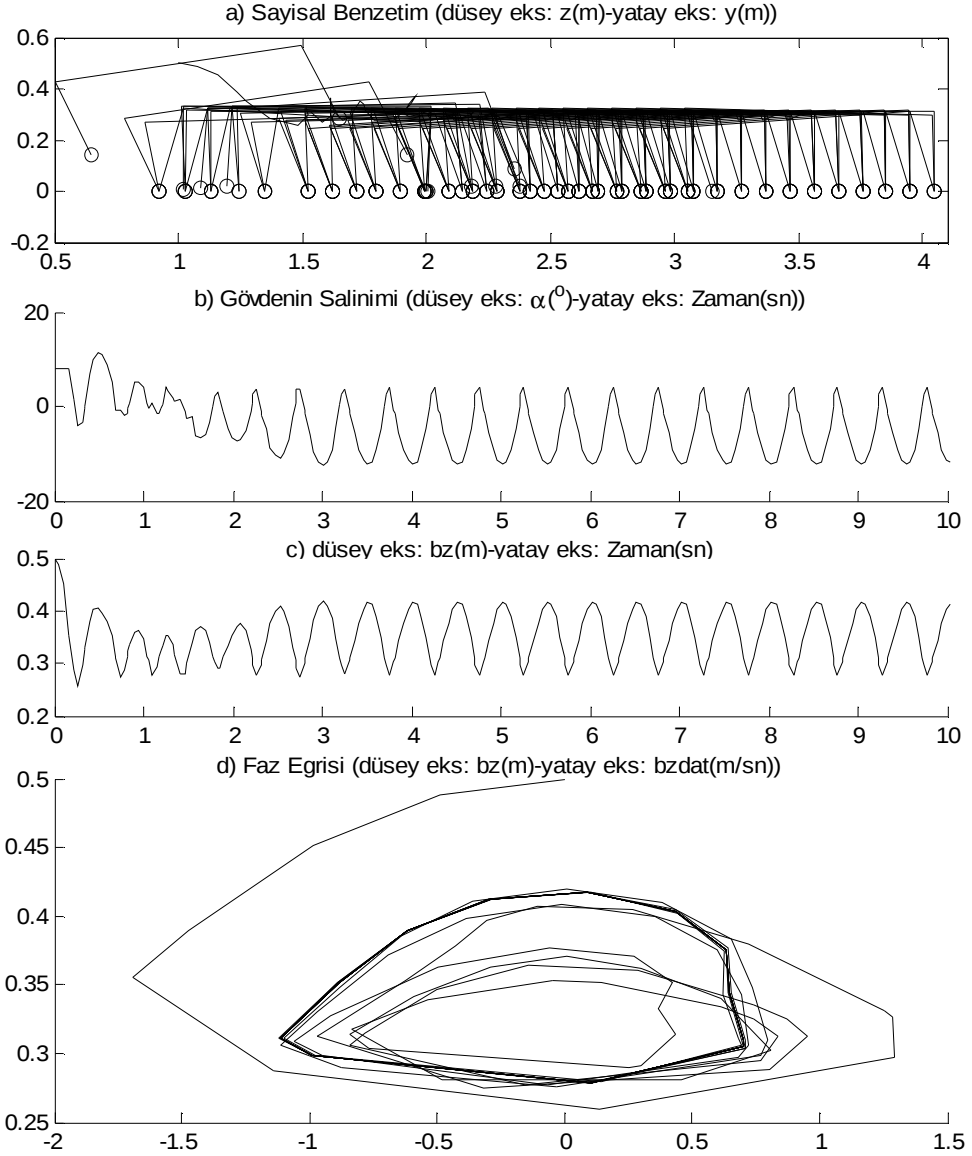


Şekil 7.57 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- c) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- d) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

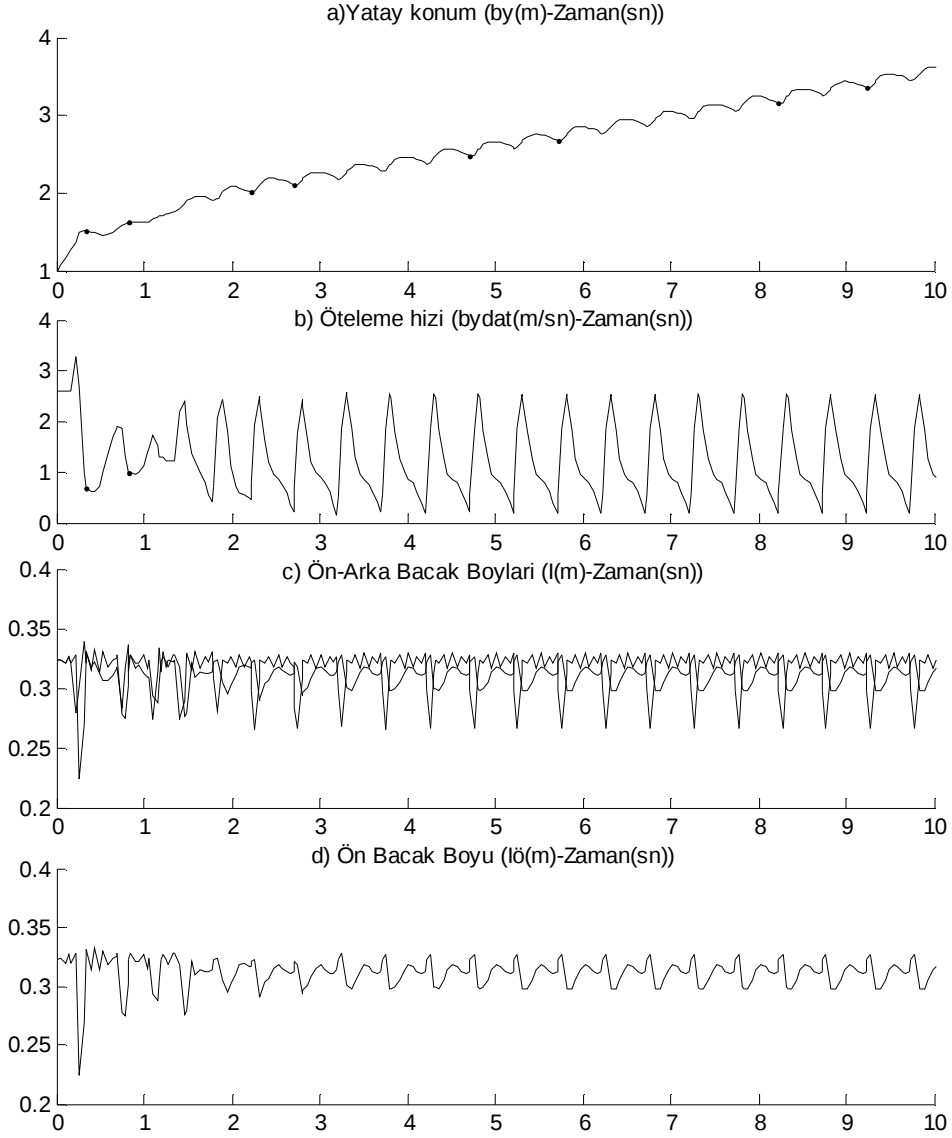
Tablo 7.14 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.

QUADRUPEDAL ROBOT				
4 bacaklı				
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ				
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)
50		8		2.3
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ				
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın harcadığı güç	Arka Bacağın harcadığı güç	Toplam harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)
3	0.76	436	427	864
5	1.54	670	701	1371
6	1.80	783	831	1615
8	2.75	1014	1093	2107
10	3.6	1241	1353	2594



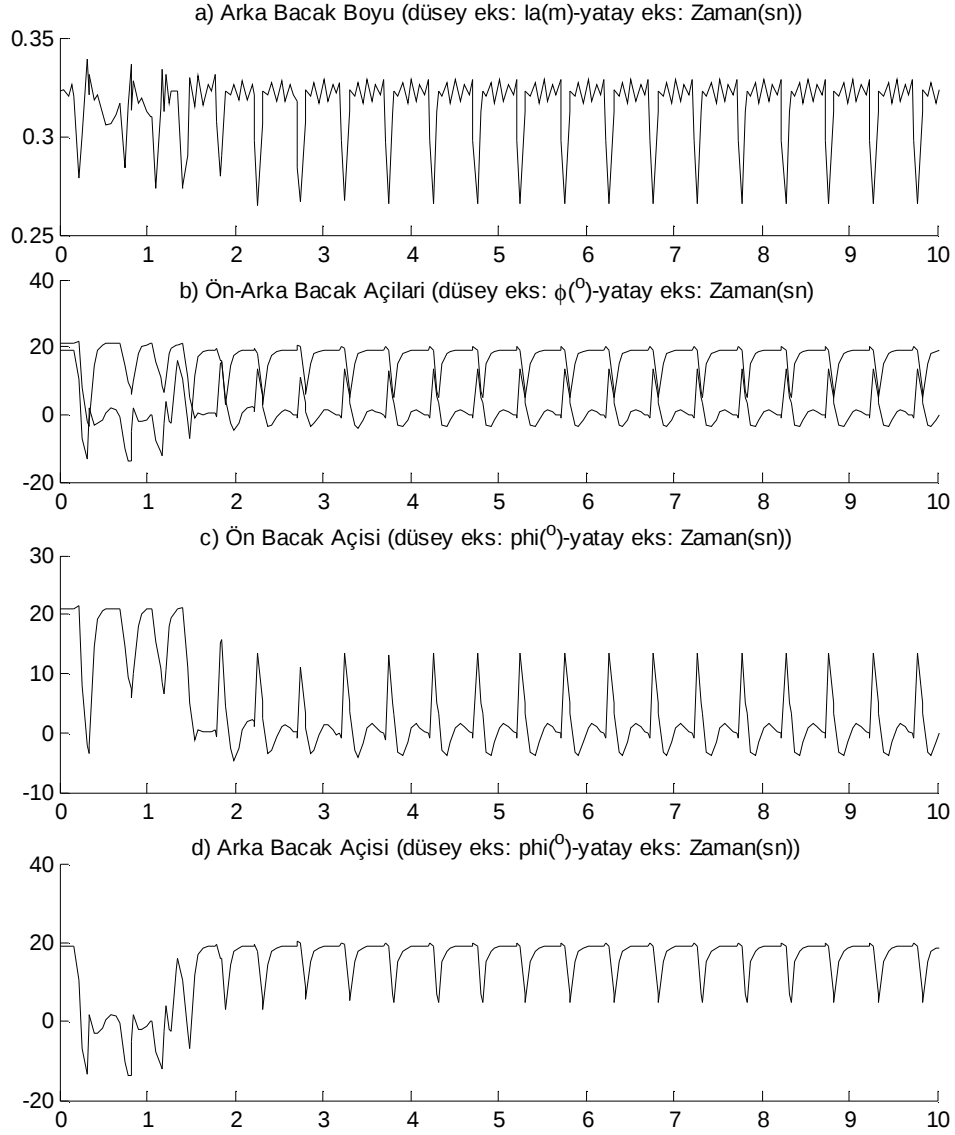
Şekil 7.58 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



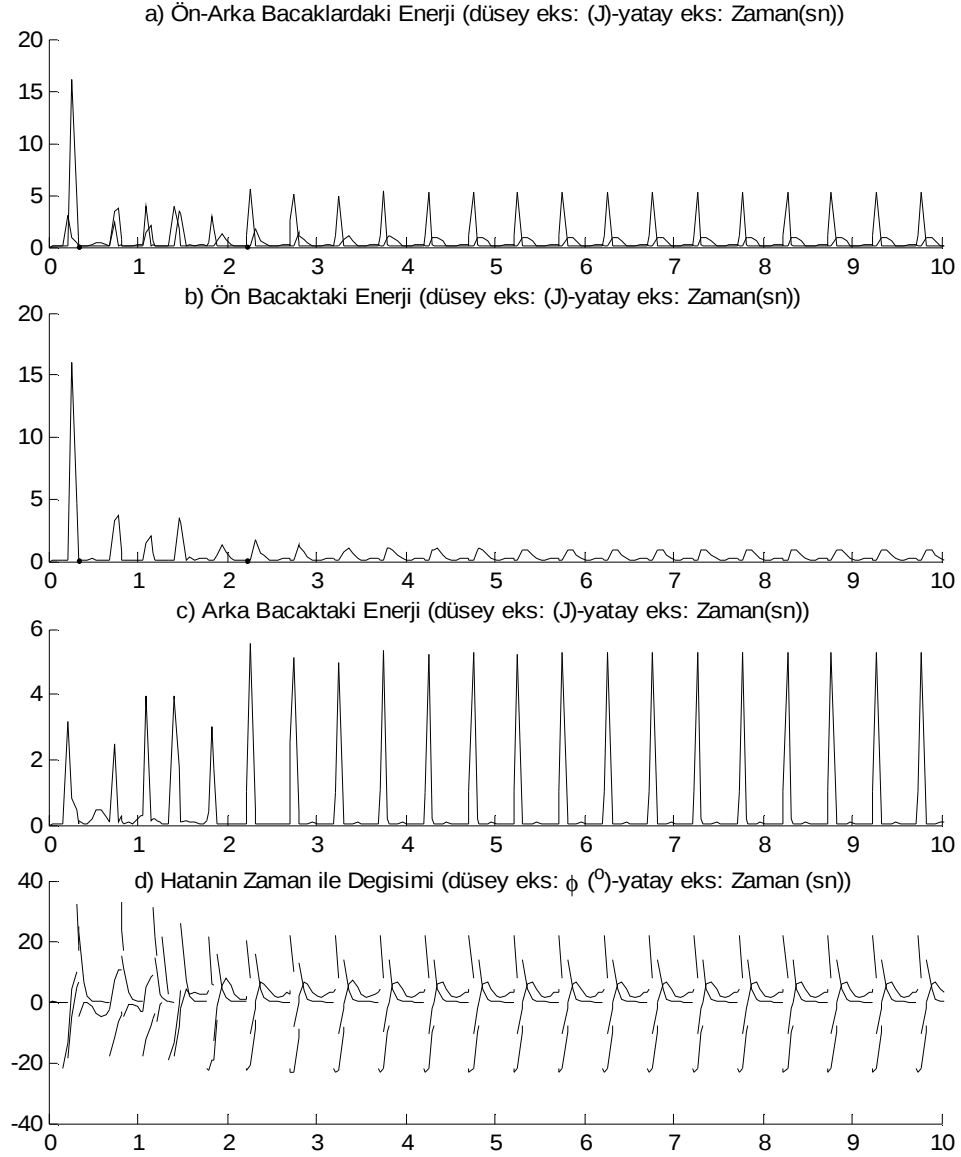
Şekil 7.59 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m).



Şekil 7.60 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- c) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$).
- d) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).



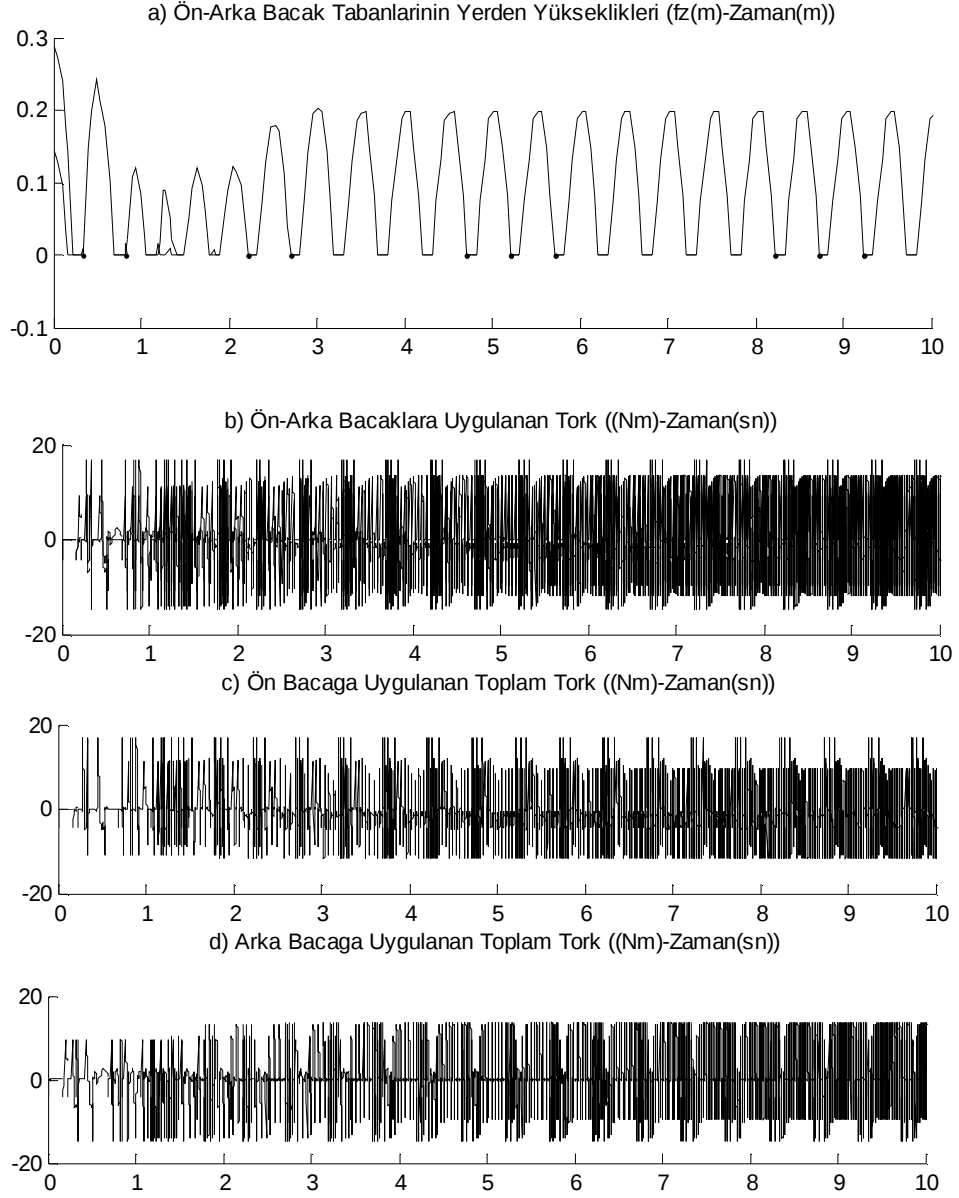
Şekil 7.61 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).

b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).

c) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).

d) Kontrolörün zamana bağlı olarak hata grafiği (e).

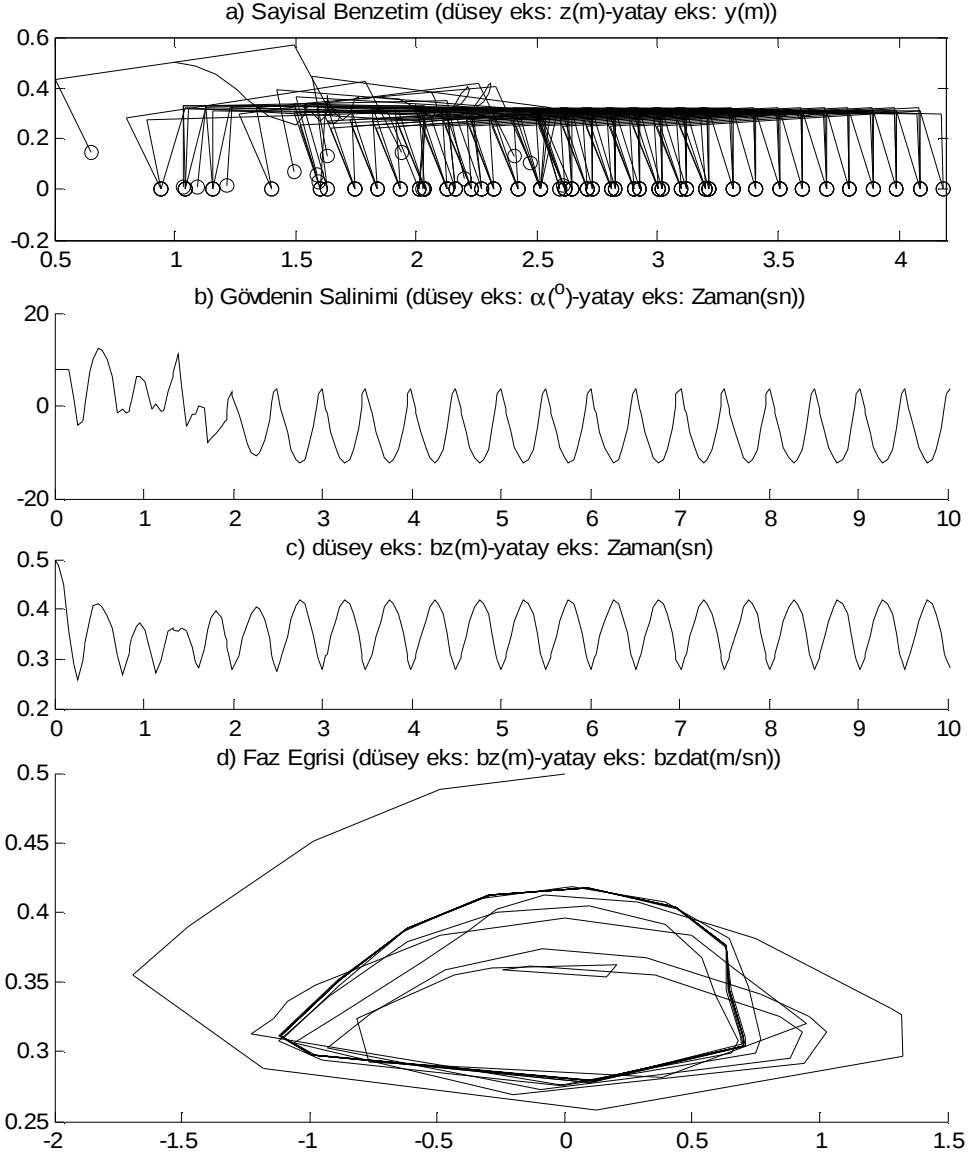


Şekil 7.62 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- c) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- d) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

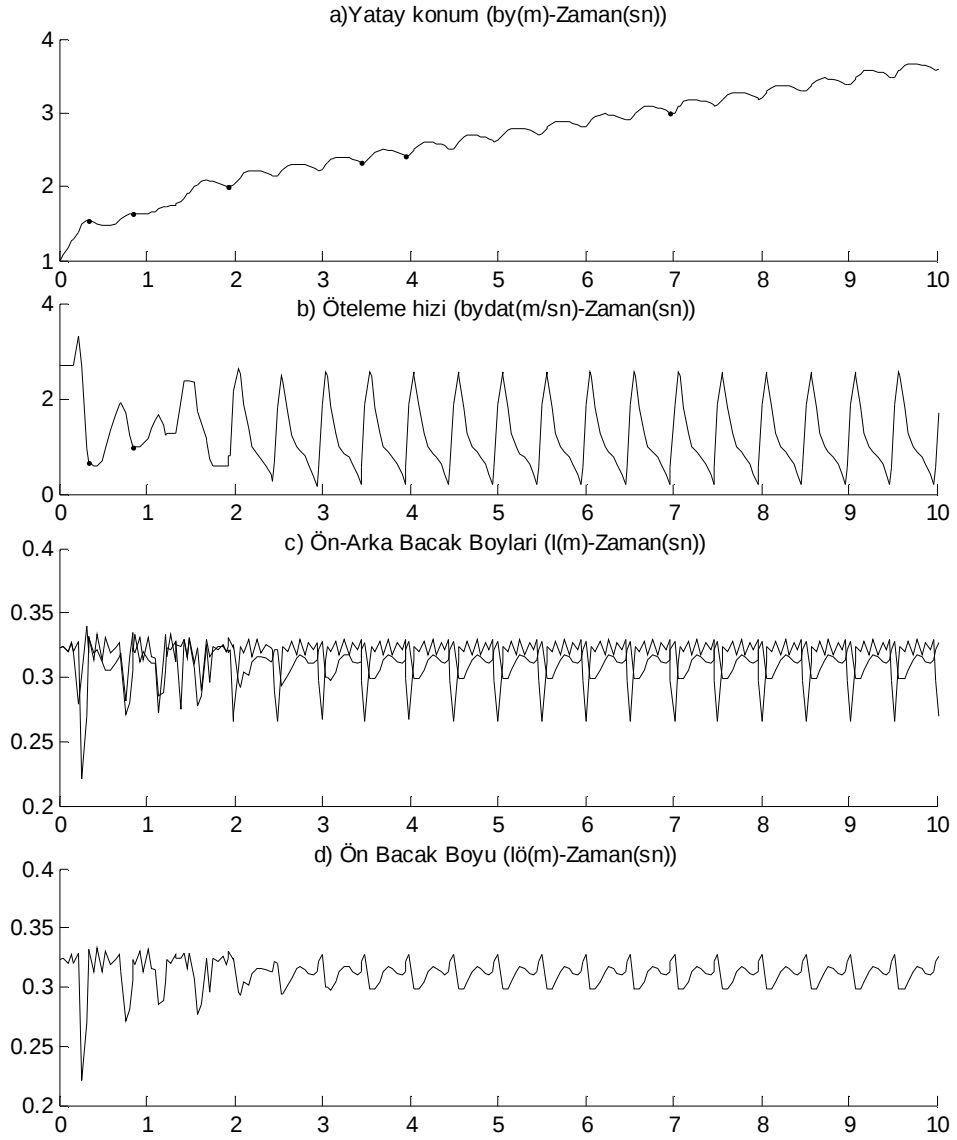
Tablo 7.15 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.

QUADRUPEDAL ROBOT				
4 bacaklı				
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ				
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)
50		8		2.6
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ				
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın harcadığı güç	Arka Bacağın harcadığı güç	Toplam harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)
3	0.69	342	455	797
5	1.38	574	710	1284
6	1.72	693	849	1542
8	2.78	921	1100	2021
10	3.18	1149	1355	2504



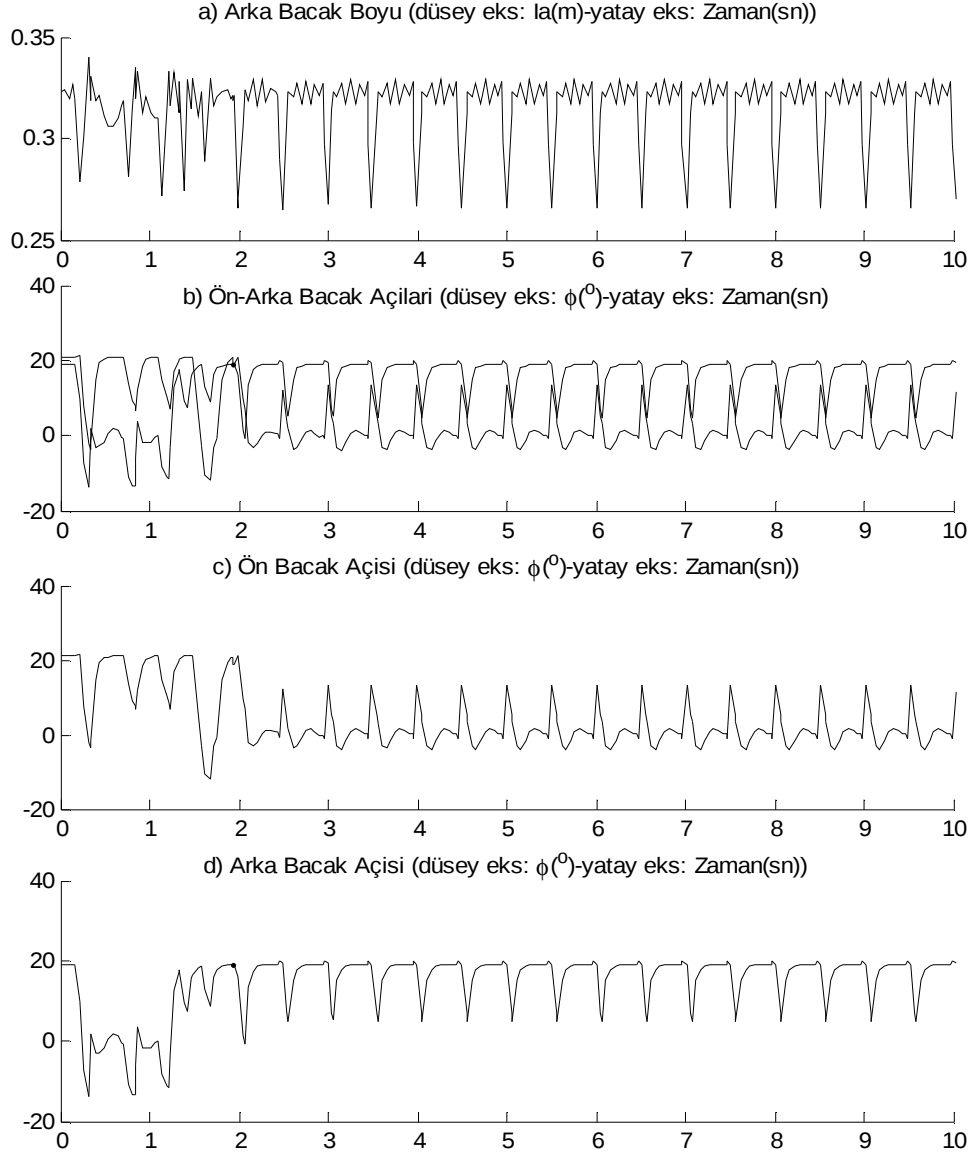
Şekil 7.63 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



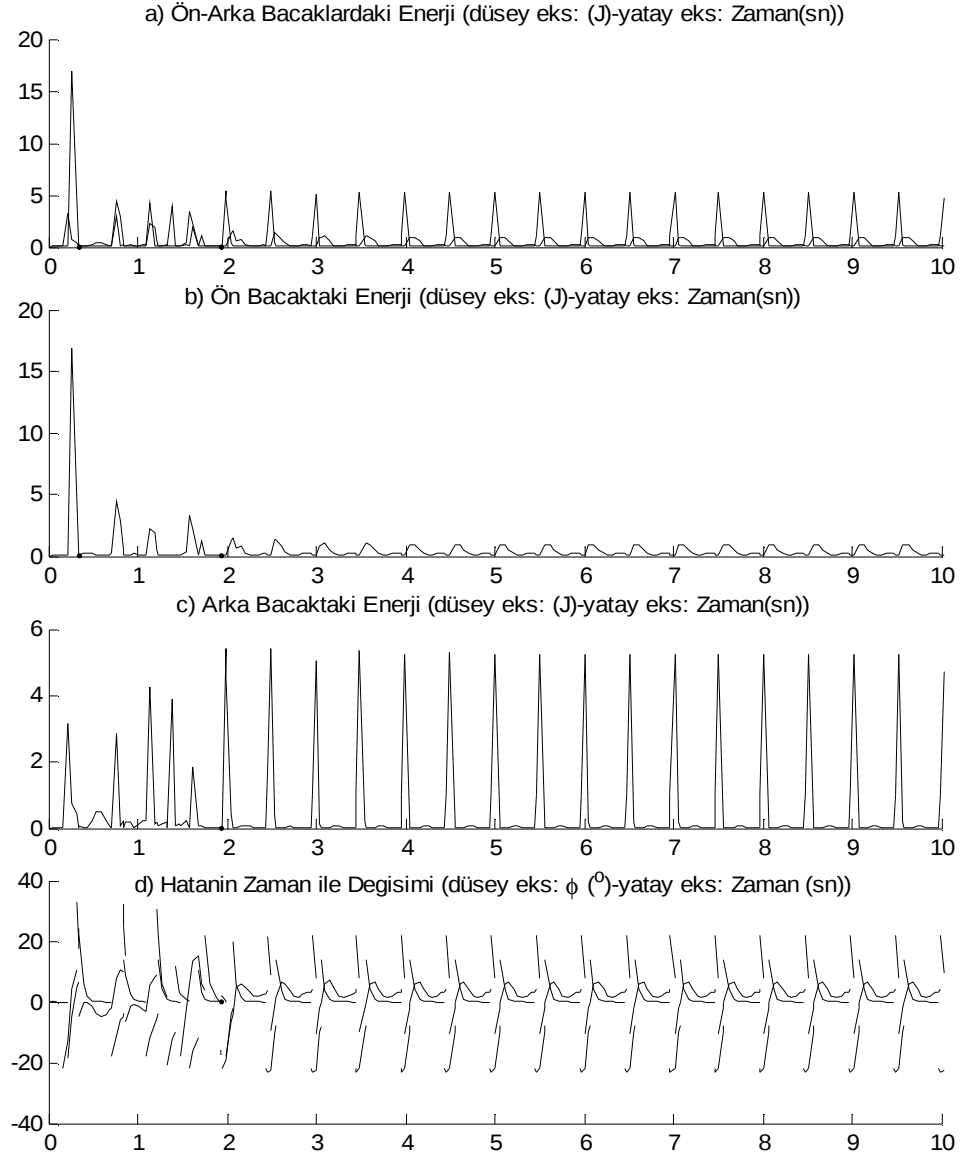
Şekil 7.64 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



Şekil 7.65 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- c) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$).
- d) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).



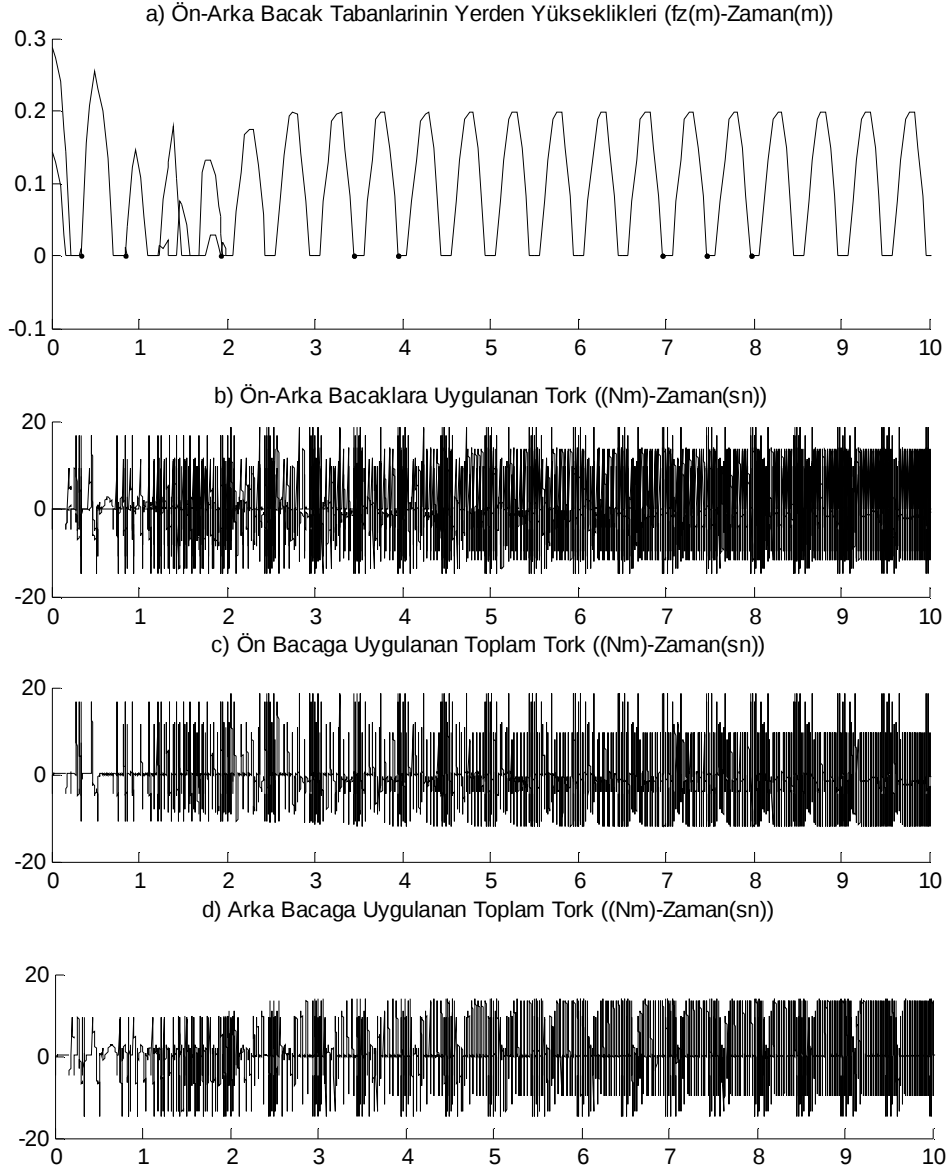
Şekil 7.66 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).

b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).

c) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).

d) Kontrolörün zamana bağlı olarak hata grafiği (e).

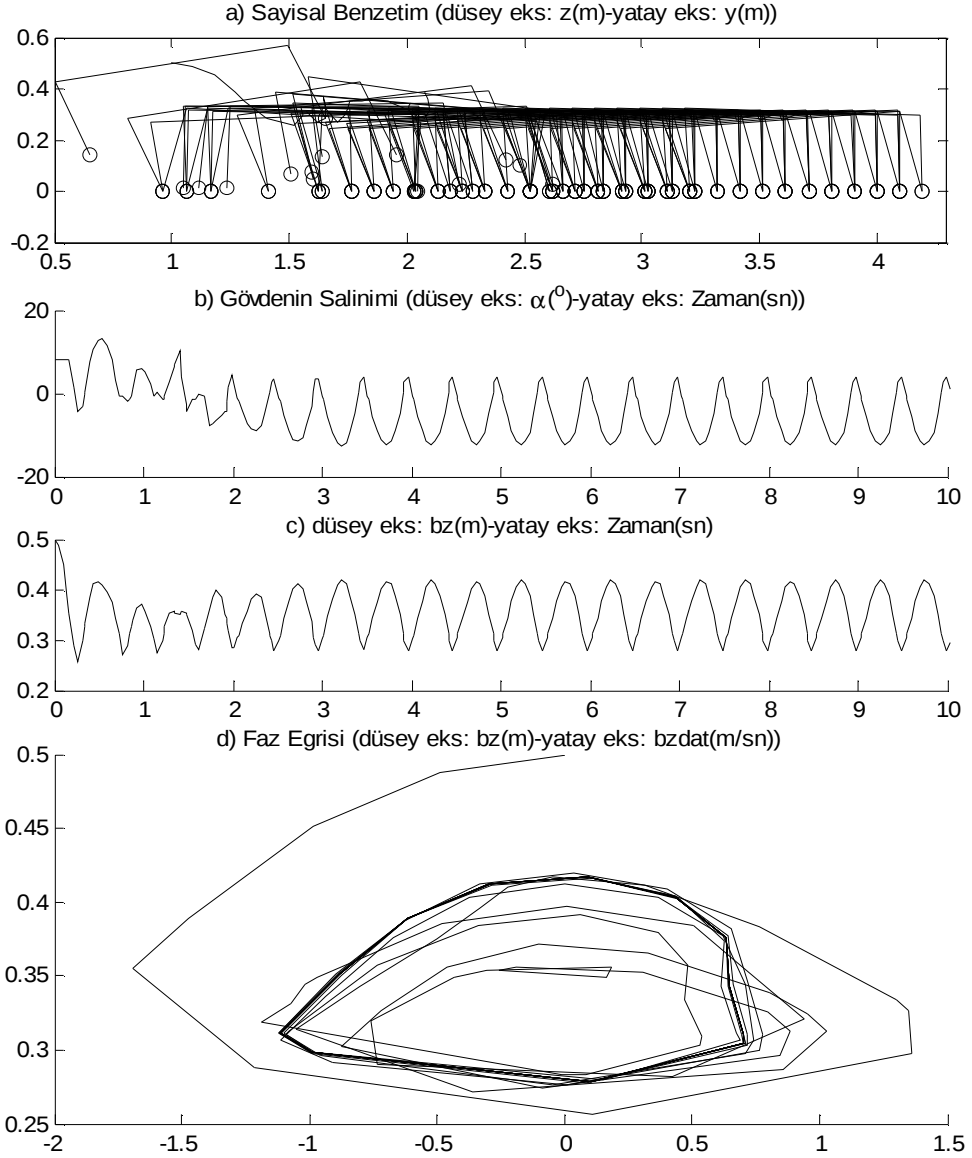


Şekil 7.67 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- c) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- d) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

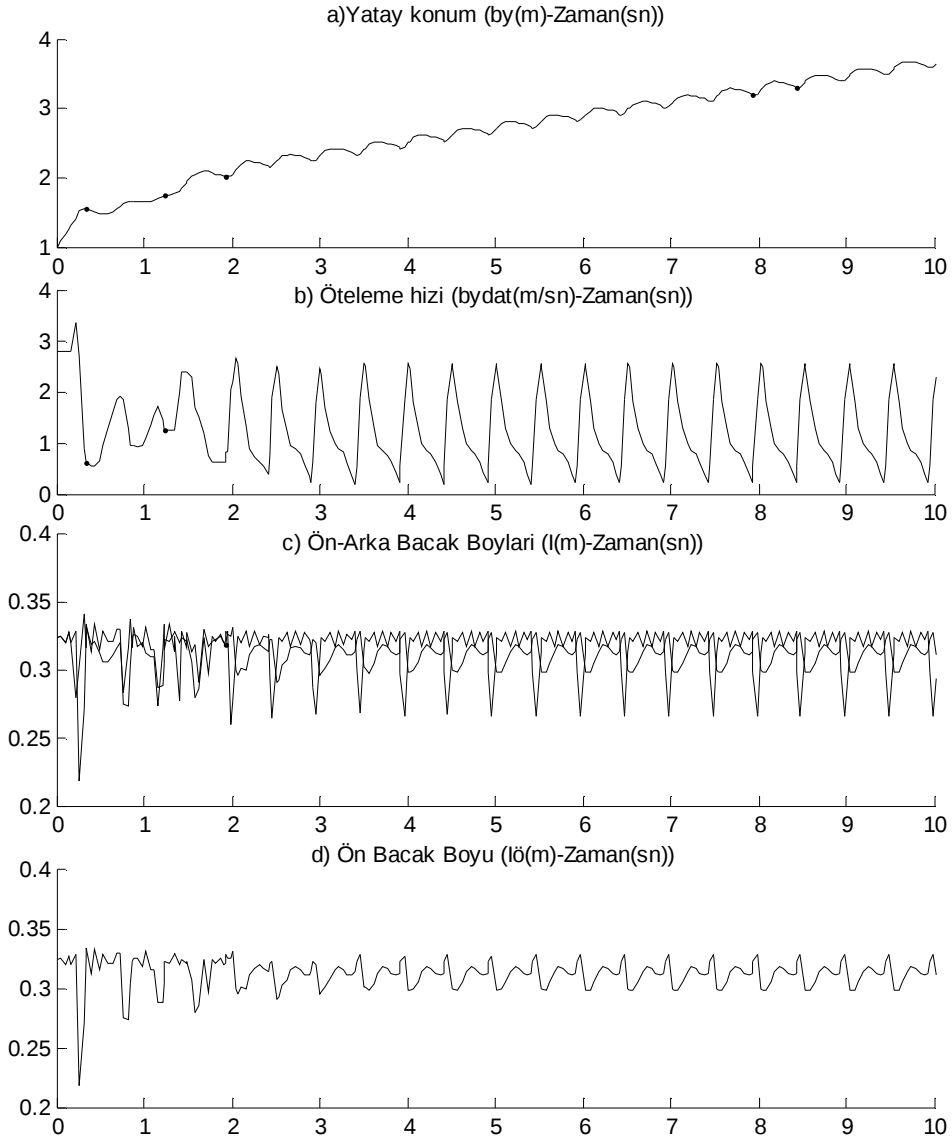
Tablo 7.16 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.

QUADRUPEDAL ROBOT				
4 bacaklı				
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ				
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)
50		8		2.7
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ				
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın harcadığı güç	Arka Bacağın harcadığı güç	Toplam harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)
3	0.73	435	469	904
5	1.43	665	729	1395
6	1.77	778	857	1636
8	2.40	1006	1117	2123
10	3.2	1235	1376	2612



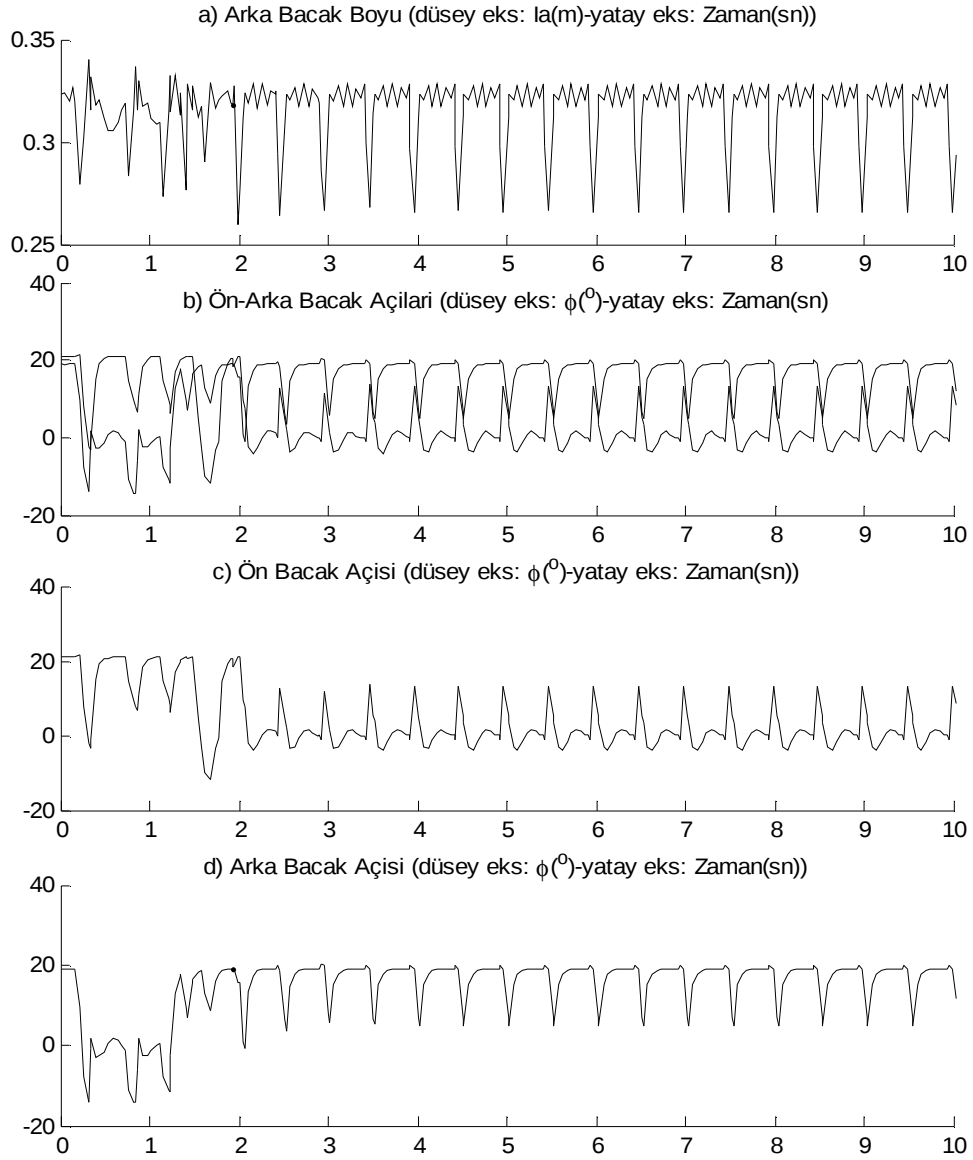
Şekil 7.68 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



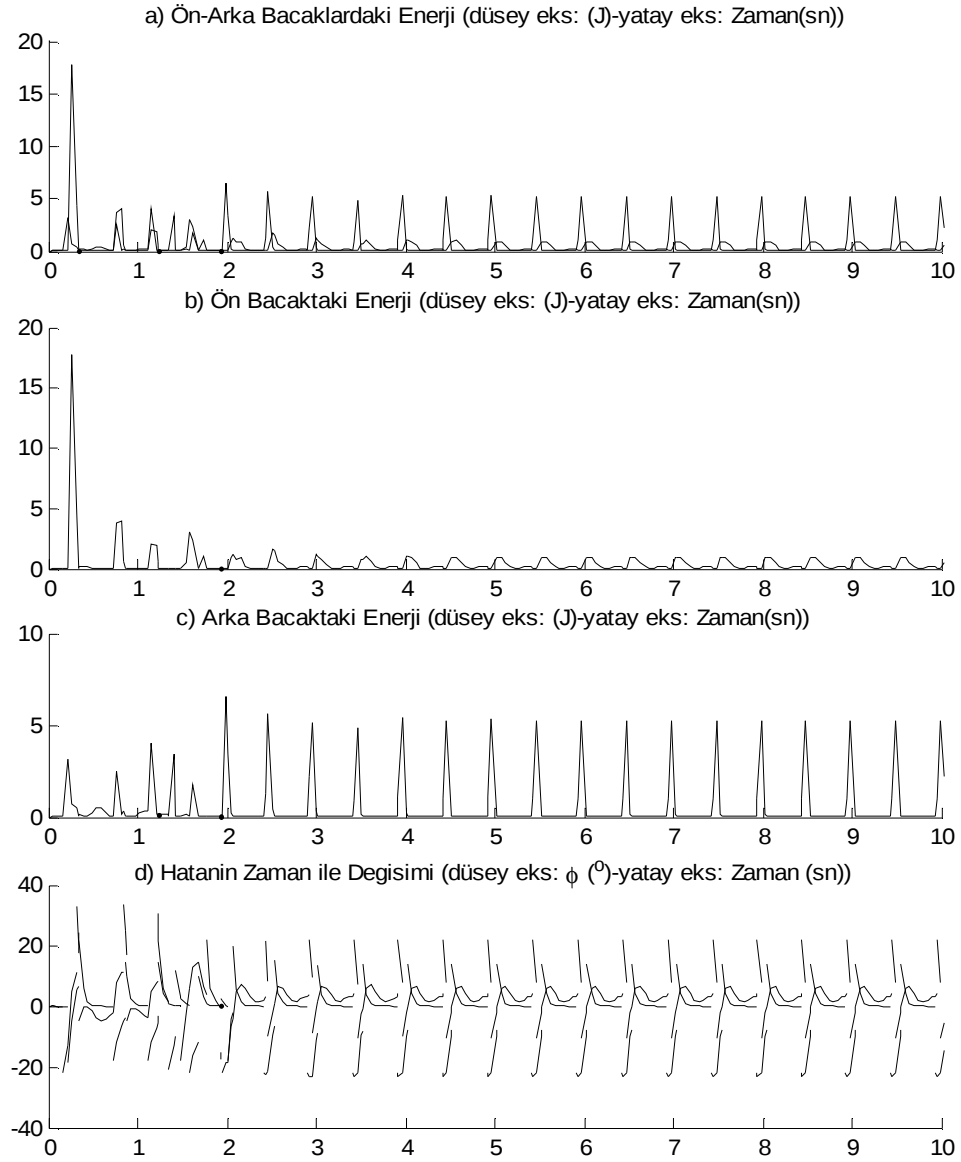
Şekil 7.69 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m).



Şekil 7.70 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- c) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$).
- d) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).



Şekil 7.71 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji

miktarları E_{top} (J).

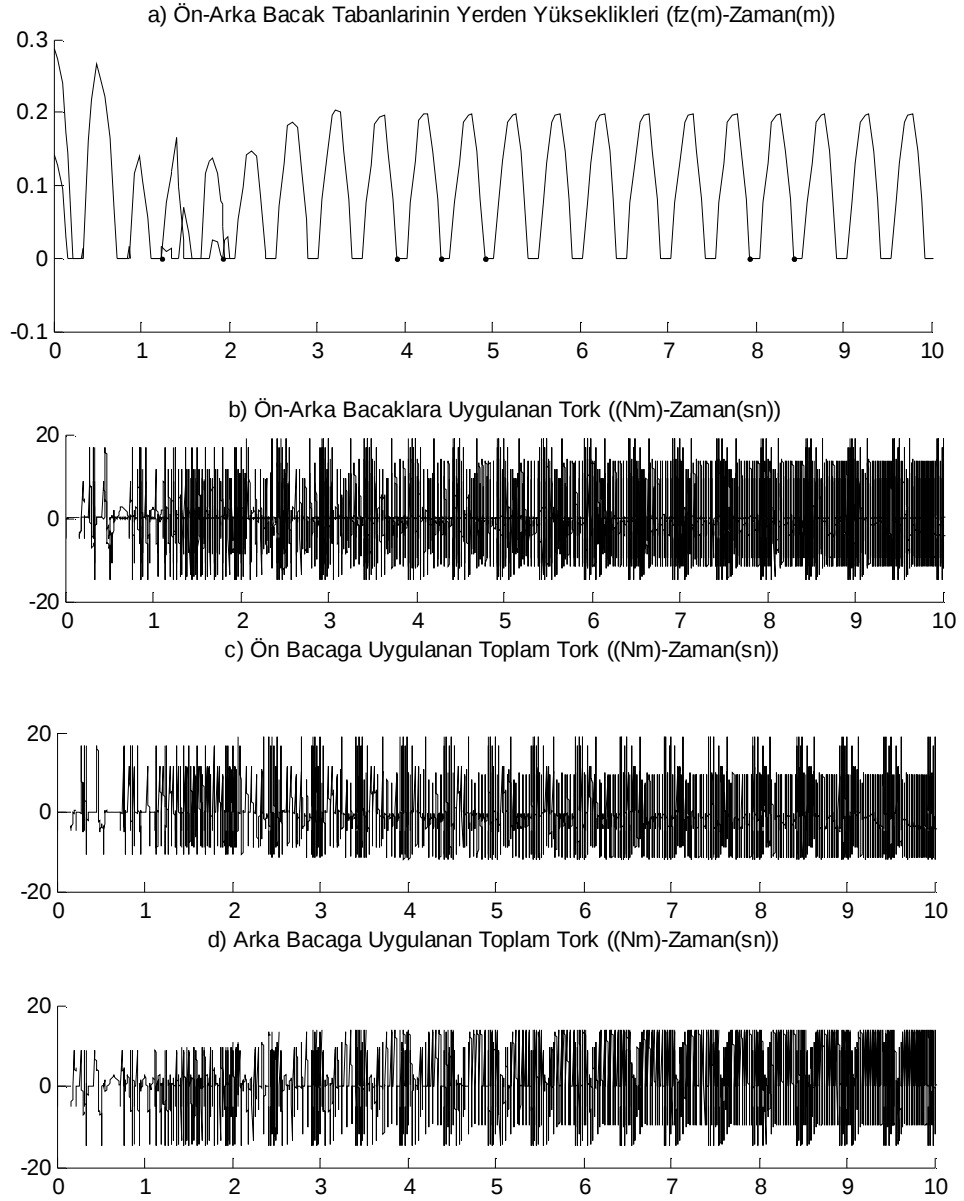
b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji

miktarı $E_{ön}$ (J).

c) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji

miktarı E_{arka} (J).

d) Kontrolörün zamana bağlı olarak hata grafiği (e).



Şekil 7.72 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- c) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- d) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

Tablo 7.17 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.

QUADRUPEDAL ROBOT				
4 bacaklı				
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ				
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)
50		8		2.8
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ				
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın harcadığı güç	Arka Bacağın harcadığı güç	Toplam harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)
3	0.69	412	459	872
5	1.41	639	722	1361
6	1.75	756	855	1618
8	2.51	988	1119	2108
10	3.24	1215	1380	2596

7.3.2 Sonuç

Kütle-Yay Ters Sarkaç (SLIP) ile modellenen sistem, yürüyebilen tüm bacaklı hayvan çeşitlerinin esas yürüme hareket davranışlarını elde etmek için biyomekanik literatürüne yerleşmiş en basit bir yaklaşım şeklidir. Ayrıca SLIP modeli biyomekanikçilere, kara böcekler ve insanlar gibi birçok çeşit yaratıkların hareket prensiplerinin anlaşılmasında büyük kolaylık kazandırmıştır. Bu model yaratıkların yürümeleri, koşmaları, sıçramaları ve zıplamalarının modellenmesinde oldukça başarılı olmuştur. Ayrıca bu bölümde SLIP modeli ile dört bacaklı quadrupedal robotun farklı başlangıç değerlerinde zıplayarak yürüyüşünün denetimi için PD denetim uygulanmış olup ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Dört bacaklı quadrupedal robot denklem 7.1' de belirtilen değişkenlerin farklı değerleri için sayısal benzetim sonuçları elde edilmiştir. Bu değişkenlerden en önemlisi robot gövdesinin ağırlık merkezinin yer seviyesinden belli bir yükseklikte bırakıldığı b_z değeridir. Bu değişken sistemin dinamiğini en fazla etkileyen değerdir. Çünkü robotun sahip olduğu dinamik yapı belirli limit değerleri arasında olmak zorundadır. Modellenen dört bacaklı quadrupedal robotun bu değere bağlı olarak uygun dinamik aralığı deneme-yanılma metodu ile alınan farklı b_z değerleri ile tespit edilmiştir. Elde edilen sayısal benzetim sonuçları ve grafikler modellenen dört bacaklı quadrupedal robot düşey ekseninde b_z ' nin 40cm ve 70cm aralıklarında robotun çok başarılı olarak zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirdiğini göstermektedir. Aksi takdirde b_z ' nin daha yüksek değerlerinde (≥ 70 cm) robotun tepe-takla devrilerek yere düştüğü ve bu sınırlar dışında kararsız bir yapıya dönüştüğü görülmüştür.

Denklem 7.1' de ki değişkenlerden diğer önemli bir değişken robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısıdır($^\circ$). Bu değer başlangıçta belirli limit değerleri arasında olmalıdır. Modellenen dört bacaklı quadrupedal robotun bu değere bağlı olarak uygun dinamik aralığı deneme-yanılma metodu ile alınan farklı α değerleri ile tespit edilmiştir. Sayısal benzetim sonuçları ve grafikler modellenen dört bacaklı quadrupedal robot α ' nin 4° ve 10° aralıklarında robotun çok başarılı olarak zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirdiğini göstermektedir. Fakat bu değer aralığı başlangıç değerleridir. Oysaki zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirdiği süreçlerde bu değer aralığı dışında da değerler alabilir. Bu robotun dinamik yapısını etkilememektedir.

Diğer bir önemli değişken ise robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{B}_y$ ' dir(m/sn). Bu değişkende sistem dinamiğini etkileyen önemli bir parametredir. Genelde modellenen robot yer seviyesinden belli bir yükseklikte belli bir ilk hız ile fırlatılarak zıplayarak yürümesi istenir. Bu ilk hız başlangıçta olması gereken bir olaydır. Eğer belli bir hız ile fırlatılmasa ($\dot{B}_y=0$) robotun aynı düşey ekseninde zıpladığı görülmektedir. Modellenen dört bacaklı quadrupedal robotun bu değere bağlı olarak uygun dinamik aralığı deneme-yanılma metodu ile alınan farklı $\dot{B}_y$ değerleri ile tespit edilmiştir. Sayısal benzetim sonuçları ve grafiklerden modellenen dört bacaklı quadrupedal robot $\dot{B}_y$ ' nin 1m/sn ve 3m/sn aralıklarında robotun çok başarılı olarak zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirdiğini ve bu sınırlar dışında kararsız bir yapı olduğu görülmüştür.

Ayrıca, sistem Şekil 7.4 ve Şekil 7.5' de görüldüğü gibi sadece iki evrede(uçuş ve yer-duruş evreleri) iki adet PD denetim algoritması ile başarılı bir şekilde denetlenmiştir. Oysaki Poulakakis ve arkadaşları aynı sistemin denetimini üç evrede (uçuş, yer-duruş-ileri itme ve yer-duruş evreleri) üç denetim algoritması ile gerçekleştirmişlerdir [1, 96, 139, 196]. Sonuç olarak, bu çalışmada modellenen zıplayarak yürümenin evreleri esnasında yapılan denetim eylem sayısı, yazarın literatür bilgisi dahilinde daha önceden yapılan çalışmalarda denetim eylem sayısından daha azdır. Bu çalışmada yapılan yenilik sistemin hem denetimini oldukça kolaylaştırmış olup hem de az sayıda ki denetim algoritması ile literatürde yapılan [1, 96, 139, 196] çalışmalarla aynı başarı elde edilmiştir.

8. HEXAPOD ROBOTUN DİNAMİK MODELİ

8.1. Giriş

Daha önceki bölümler de belirtildiği gibi, son yıllarda mobil robotlar üzerine yapılan çalışmaların büyük bir oranı bacaklı robotlar üzerine olmuştur. Ayrıca, geleneksel tekerlekli, paletli ve raylı sistemler gibi sınırlı hareket kapasitelerine sahip robotlara nispeten bacaklı robotların hareket performanslarının daha yüksek olması bu alanda çalışmaya eğilimi arttırmıştır. Yüksek hareket kapasitesi ve çok yönlülük günümüz teknolojisinde mobil robotlarda aranan en büyük özelliklerdir.

Son yıllarda artan bir eğilimle altı bacaklı dinamik dengeli tasarım çalışmaları da yapılmıştır. Altı bacaklı robotlarda tripod yürüyüşün mevcut olması denge olayını oldukça kolaylaştırmıştır. Çünkü her bir adımda yer ile üç noktadan düzlemsel bir temas sağlandığı için robotun dengede kalması oldukça kolaylaşmıştır [101]. Farklı bacak mekanizmalarına sahip ve farklı işlevleri gerçekleştirebilen birçok hexapod robot çalışmaları mevcuttur. Altı bacaklı olup fakat iki bacağı üzerinde yürüyebilen Rhex adında bir hexapod robot çalışması Neville ve Buehler tarafından gerçekleştirilmiştir [97]. Burada her iki bacak için ayrı ayrı birer adet eyleyici kullanılmıştır. Ayrıca, hexapod robot Rhex' in merdivenleri ve kayalıkları tırmanarak çıkabildiğini gösteren literatürde bir çalışma mevcuttur. Bu çalışmada robotun bacakları yarım hilal şeklinde olup her bir bacak için bir adet eyleyici kullanılarak toplam 6 serbestlik dereceli bir mekanizmaya sahiptir. Bu çalışma Moore ve meslektaşları tarafından gerçekleştirilmiştir [211]. Yine bu çalışmaya benzer olarak gerçek ortamdaki insanların kullandıkları merdivenleri tırmanarak çıkabilen bir hexapod robot çalışması Campbell ve Buehler tarafından yapılmıştır [98]. Campbell ve Buehler yine farklı bir çalışmalarında hexapod Rhex robotun orta bacaklarını iptal ederek dört bacaklı modunda zıplayarak yürüme hareketi üzerinde çalışmalar yapmışlardır [144]. Buehler ve meslektaşları tarafından bir bacaklı monopod, dört bacaklı quadrupedal Scout-II ve altı bacaklı hexapod Rhex isimli robotların dinamiği üzerinde çalışmaları mevcuttur [204, 211]. Bir başka çalışmada McMordie ve arkadaşları hexapod bir robotta kullanılan eyleyicilerin dinamik modeli ile ilgili çalışmalar yapmıştır [96]. Ayrıca, McMordie ve Buehler aynı robotun zıplayarak yürümesi için denetim algoritması üzerinde çalışma yapmışlardır [206]. Hexapod robot ile ilgili farklı bir teorik çalışma olarak Saranlı ve Koditschek tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu bilim adamları çalışmalarında altı bacaklı hexapod bir robotun takla atma dinamiği üzerinde uğraşmışlardır [207]. Komsuoğlu ve meslektaşları hexapod robot Rhex' in üzerinde iki farklı denetleyici modeli üzerinde çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu denetleyicilerden birisi sabit eğimli bir yokuşu tırmanacak şekilde bir denetim algoritma modeli

oluşturmak diğeri de yüksek hızda zıplayarak yürüme için bir denetim algoritma modeli oluşturmak için tasarlanmıştır [208].

Rhex, Saranlı ve arkadaşları tarafından yapılan altı bacaklı tripod yürüyebilen, zıplayabilen, takla atabilen ve zıplayarak koşabilen altı serbestlik dereceli bir robottur. Rhex' in her bir bacağı kalça kısmına yerleştirilen birer adet eyleyiciden ibarettir. Yani toplam altı adet DC motor kullanılmıştır. Bacaklar düzlemsel olarak serbestçe dönebilmektedirler [95]. Rhex robot bacakları arazi ve bulunduğu ortama göre farklı mekanizmalarda tasarlanmıştır. Bunlar bir yokuşu çıkabilecek şekilde, su da yüzebilecek şekilde, merdiven çıkabilecek şekilde ve zıplayarak koşabilecek şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca, Saranlı ve arkadaşları her kalçasında birer adet eyleyici bulunan bir hexapod robotun tasarımı, modellenmesi ve denetimini içeren çalışmaları mevcuttur [95].

Yukarda ki tüm çalışmaların temelini oluşturan dinamik yapı daha önceki bölümde de ifade edildiği gibi, Kütle-Yay Ters-Sarkaç (SLIP) modelidir. SLIP modeli bacaklı robotları oluştururken bacaklı yaratıklarından esinlenerek kullanılan en basit modeldir. Bu modelin ilk yaratıcıları Altendorfer ve meslektaşları olmuştur [195]. Bunlar çalışmalarında robotun ağırlık merkezinin takip ettiği yörüngenin SLIP dinamik modele uygun olduğunu sayısal benzetimlerle ve analizlerle kanıtladılar. Rhex robotunda SLIP dinamik modelin, hexapod robotların hiyerarşik denetimlerinde başarılı olduğunu gösterdiler.

Bu bölümdeki amacımız; altı bacaklı hexapod bir robotun dinamik olarak dengeli zıplayarak yürümesini gerçekleştirmektir. Bu çalışmada altı bacaklı hexapod bir robotun iki boyutlu ortamda zıplayarak yürüme olayının dinamik modeli oluşturulmuş ve daha sonraki bölüm de ise sistemin denetimi ve sayısal benzetimi gerçekleştirilmiştir. Ardışık bir şekilde zıplayarak yürüme işlemleri ardışık kapalı bir döngü içerisinde farklı dinamik yapıların sayısal benzetimleri kullanılarak sistemin hareketi incelenmeye çalışılmıştır. Bu tür sistemlerin sayısal analizlerini elde etmek ve sayısal olarak çözmek çok zor bir işlemdir. Bu sayısal çözümü mümkün olduğunca basitleştirmek ve anlaşılmasını kolaylaştırmak için, hexapod SLIP modeli oluşturulmuştur. Ayrıca bu çalışmada zıplayarak yürümenin fazları esnasında yapılan denetim eylem sayısı, daha önceden yapılan çalışmalardaki denetim eylem sayısından daha azdır [1]. Bu yeni uygulama sistemin hem denetimini oldukça

oranında bir kütle değeri verilmiştir. Bu kabul bacakları havada uçuş evresinde denetlemek içindir. Ayrıca tüm bacaklar $V_i(r_i)$ potansiyelinde radyal yaylara ve d_i ile temsil edilen radyal viskoz sönüm elemanlarına sahiptirler. Her bir bacak gövdeye kalça kısmından bağımsız motorlar ile bağlanmıştır. Sistemi denetleyen bu motorlar her bir bacağa t_i ile temsil edilen tork uygulamaktadır.

Daha önceki kısımlarda da anlatıldığı gibi robot bacakları farklı iki evreye sahiptir. Bunlar yer-duruş ve uçuş evreleridirler. Sistem farklı evrelerde farklı dinamik yapıya sahiptir. Yer evresinde bacak ucunun yer üzerindeki V kartezyen koordinat merkezine göre konumu f_i ile temsil edilmektedir. Rijit gövde bacaklar yer evresinde iken direk olarak bacaklarda oluşan yay ve sönüm kuvvetlerinden etkilenmektedirler. Diğer taraftan, gövde uçuş evresinde olduğu zaman bacaklarda bu kuvvetler oluşmadığından dolayı etkilenmemektedir. Bacakların bu evredeki hareketleri bacak uçlarındaki ayak kütlelerinin dinamiği ile denetlenmektedir. Ayrıca uçuş evresinde bacak uçlarındaki ayakların konum ve hızları sistemin bulunduğu tüm kartezyen koordinatlarından bağımsızdır.

8.2.2. Yer İle Bacakların Etkileşim Modeli

Bu kısımda bacakların yer ile etkileşimlerinin modellenmesini altı bacaklı robot için elde edilecektir. Bu ise sistemin hareket denklemlerinin çıkarılmasında yardımcı olacaktır. Bu sistem daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi ardışık bir şekilde farklı dinamik yapıların analizi ile elde edilmektedir. Bu ardışık olaylar robotun yer-duruş evresi ve havadaki uçuş evresi olarak iki ana olaydan ibaret olduğu hatırlanacaktır. Bu nedenle bacakların havada mı yoksa yer-duruş evresinde mi gibi tespitler, oluşturulan kontrol algoritması ve durum belirleme metotları ile tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu sistemde altı çift olasılık vardır. Yani her bir bacağın iki evreden birisinde olma olasılığı vardır. Diğer bir deyişle, bir bacak ya yer ile temas halindedir ya da yerden teması kesilmiş halde havada uçuş evresindedir. Bu olaylar döngüsü altı bacak için düşünüldüğünde sistemin hareketi esnasında bacaklara ait oluşabilecek 64 durum olasılığı vardır ($2^6=64$; bacak sayısı=6, bacak evresi=2), [95].

Geliştirilen bir kontrol algoritma modeli ile sistemin hangi dinamik yapıyı çözeceği işlemini $s_i \in \{0,1\}$ kümesinin kodlanması ile gerçekleştirilmiştir. Yani bir bacak yerde ise 0 değeri havada ise 1 değeri şeklinde bacağın hangi konumda olduğunu bize ifade etmektedir.

Bacakların durumlarını ifade eden modeli aşağıda verilen denklem ile ifade edilebilir:

$$M_h := \{\Omega \mid \Omega = (s_1, \dots, s_6)\} \quad (8.1)$$

Bacakların yer-duruş evresinde üzerlerinde oluşan yay ve sönüm kuvvetlerinin matris formatında gösterimi yararlı olacaktır:

$$S := \text{diag}(s_1, \dots, s_6) \quad (8.2)$$

Rijit gövdenin ve bacakların birlikte uzaydaki konfigürasyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$C_h := \{c_h \mid c_h = [b, a, f_1, \dots, f_6]^T\} \quad (8.3)$$

Ayrıca, burada bacaklar aşağıdaki gibi bir dizin ile tanımlanabilir:

$$I := \{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \quad (8.4)$$

Benzer şekilde tripod bacaklar da yukarıdaki gibi bir dizin ile benzer şekilde ifade edilebilir:

$$I_{sol_tripod} \cup I_{sağ_tripod} = I \quad (8.5)$$

$$I_{sol_tripod} \cap I_{sağ_tripod} = \emptyset \quad (8.6)$$

$$|I_{sol_tripod}| \cup |I_{sağ_tripod}| = 3 \quad (\text{hexapod bacaklar} = 3) \quad (8.7)$$

8.2.3. Bacaklara ait kutupsal koordinatlar ve Kuvvetler

8.2.3.1. Kinematik Denklemler

Bacakların yer-duruş evrelerinde yer ile etkileşimleri rijit gövde üzerine etki eden bacak kuvvetlerinin oluşmasından dolayı meydana gelmektedir. Burada önemli olan bacakların ana gövdeye göre oryantasyonunun ve konumunun bilinmesidir. Altıncı bölümde dört bacaklı robot için elde edilen denklemler bu kısımda altı bacaklı hexapod robot için elde edilecektir.

Sistemin konfigürasyonu temsil eden $c_h \in C_h$, ana gövde kartezyen koordinatları içindeki bacak vektörü kolaylıkla hesaplanabilir:

Bacak ucundaki ayağın ana gövde ağırlık merkezine olan değişken uzunluk vektörü($\dot{\bar{c}}$), V eksen takımına göre tanımlanmıştır:

$$\dot{\bar{f}}_i = \dot{\bar{b}}_i + \dot{\bar{c}} \quad (8.8)$$

$$\dot{\bar{c}} = \dot{\bar{f}}_i - \dot{\bar{b}}_i \quad (8.9)$$

Ana gövdeye yerleştirilmiş hareketli eksen takımına göre tanımlanırsa ($\dot{\bar{c}}$):

$$\dot{\bar{c}} = \dot{\bar{a}}_i + \dot{\bar{I}}_i \quad (8.10)$$

$\dot{\bar{c}}$ vektörünü $\dot{\bar{f}}_i$ ve $\dot{\bar{b}}$ vektörü değişkenleri türünden yerine yazabilmek için eksen dönüşüm matrislerini kullanarak oluşturulabilir:

$$\dot{\bar{I}}_i = \dot{\bar{c}} - \dot{\bar{a}}_i \quad (8.11)$$

Dönüşüm matrisi aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$${}^w_B R(a) = \begin{bmatrix} \cos(a) & -\sin(a) \\ \sin(a) & \cos(a) \end{bmatrix} \quad (8.12)$$

$${}^B_w R(a) = [{}^w_B R]^T = R^T(a) \begin{bmatrix} \cos(a) & \sin(a) \\ -\sin(a) & \cos(a) \end{bmatrix} \quad (8.13)$$

B gövde eksen takımına göre I_i vektörünü yeniden düzenlenecek olursa,

$$\dot{\mathbf{I}}_i = R^T(a) (\dot{\mathbf{f}}_i - \dot{\mathbf{b}}) - \dot{\mathbf{a}}_i \quad (8.14)$$

$$\mathbf{r}_{I_i} = \begin{bmatrix} \cos(a) \sin(a) \\ -\sin(a) \cos(a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{iy} - b_y \\ f_{iz} - b_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \partial_{iy} \\ \partial_{iz} \end{bmatrix} \quad (8.15)$$

$$I_{iy} = \cos(a)(f_{iy} - b_y) + \sin(a)(f_{iz} - b_z) - \partial_{iy} \quad (8.16)$$

$$I_{iz} = -\sin(a)(f_{iy} - b_y) + \cos(a)(f_{iz} - b_z) - \partial_{iz} \quad (8.17)$$

elde edilir. 8.14 nolu denklem zamana göre türevi alınıp, aşağıdaki düzenlemeler yapılırsa,

$$\frac{dI_i}{dt} = \dot{\mathbf{I}}_i = \frac{dR^T(a)}{dt} (\mathbf{f}_i - \mathbf{b}) + R^T(a) \left(\frac{d\mathbf{f}_i}{dt} - \frac{d\mathbf{b}}{dt} \right) \quad (8.18)$$

$$\frac{dR^T(a)}{dt} = DR^T(a), \quad \frac{da}{dt} = \dot{a}_i \quad (8.19)$$

$$\dot{\mathbf{I}}_i = DR^T(a) (\dot{\mathbf{f}}_i - \dot{\mathbf{b}}) - \dot{\mathbf{a}}_i + R^T(a) (\dot{\mathbf{f}}_i - \dot{\mathbf{b}}) \quad (8.20)$$

$$\dot{\mathbf{I}}_i = \begin{bmatrix} -\sin(a) & \cos(a) \\ -\cos(a) & -\sin(a) \end{bmatrix} (\dot{\mathbf{f}}_i - \dot{\mathbf{b}}) \dot{a}_i + \begin{bmatrix} \cos(a) & \sin(a) \\ -\sin(a) & \cos(a) \end{bmatrix} (\dot{\mathbf{f}}_i - \dot{\mathbf{b}}) \quad (8.21)$$

$$\dot{\mathbf{I}}_i = \begin{bmatrix} -\sin(a) & \cos(a) \\ -\cos(a) & -\sin(a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{iy} - b_y \\ f_{iz} - b_z \end{bmatrix} \dot{a}_i + \begin{bmatrix} \cos(a) & \sin(a) \\ -\sin(a) & \cos(a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{f}_i^y - \dot{b}_y \\ \dot{f}_i^z - \dot{b}_z \end{bmatrix} \quad (8.22)$$

$$\hat{\mathbf{f}}_{iy} = -\sin(a)(f_{iy} - b_y)\hat{\mathbf{a}} + \cos(a)(f_{iz} - b_z)\hat{\mathbf{a}} + \cos(a)(\hat{\mathbf{f}}_{iy} - \hat{\mathbf{b}}_y) + \sin(a)(\hat{\mathbf{f}}_{iz} - \hat{\mathbf{b}}_z) \quad (8.23)$$

$$\hat{\mathbf{f}}_{iz} = -\cos(a)(f_{iy} - b_y)\hat{\mathbf{a}} - \sin(a)(f_{iz} - b_z)\hat{\mathbf{a}} - \sin(a)(\hat{\mathbf{f}}_{iy} - \hat{\mathbf{b}}_y) + \cos(a)(\hat{\mathbf{f}}_{iz} - \hat{\mathbf{b}}_z) \quad (8.24)$$

elde edilir. $\hat{\mathbf{I}}_i$ vektörü polar koordinatlarda yeniden oluşturulup, zamana göre türetilirse,

$$\hat{\mathbf{I}}_i := [r_i, f_i] \quad (8.25)$$

$$r_i = \sqrt{I_{iy}^2 + I_{iz}^2} \quad (8.26)$$

$$r_i^2 = I_{iy}^2 + I_{iz}^2 \quad (8.27)$$

$$2r_i \hat{\mathbf{a}}_i = 2I_{iy}\hat{\mathbf{f}}_{iy} + 2I_{iz}\hat{\mathbf{f}}_{iz} \quad (8.28)$$

$$\hat{\mathbf{a}}_i = \frac{I_{iy}\hat{\mathbf{f}}_{iy} + I_{iz}\hat{\mathbf{f}}_{iz}}{r_i} \quad (8.29)$$

$$f_i = a \tan\left(\frac{I_{iy}}{-I_{iz}}\right) \quad (8.30)$$

$$f_i = a \tan 2(I_{iy}, -I_{iz}) \quad (8.31)$$

$$\hat{\mathbf{f}}_i = \frac{I_{iy}\hat{\mathbf{f}}_{iz} - \hat{\mathbf{f}}_{iy}I_{iz}}{r_i^2} \quad (8.32)$$

olarak elde edilir.

Robot bacaklarının eklendiği kalçalarda eyleyicilerin oluşturduğu torklar olduğu gibi bacaklar üzerinde oluşan radyal yay kuvvetleri ve sönüm kuvvetleri de vardır. Şekil 8.1' de tanımlanan düzlemsel hexapod modeldeki bacaklar üzerinde oluşan radyal kuvvetleri aşağıdaki gibi formüle edilebilir:

$$F_{ri} = -DV_i(l_0 - r_i) - d_i \mathbf{k}_i \quad (8.33)$$

Sonuç olarak yer ile temas eden her bir bacak için oluşan kuvvet denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$F_i = R(a + f_i) \begin{bmatrix} t_i / r_i \\ -F_{ri} \end{bmatrix} \quad (8.34)$$

$R(a + f_i)$ için standart eksen dönüşüm matrisi oluşturulursa:

$$R(a + f_i) = \begin{bmatrix} \cos(a + f_i) & -\sin(a + f_i) \\ \sin(a + f_i) & \cos(a + f_i) \end{bmatrix} \quad (8.35)$$

elde edilir. Her bir bacak üzerinde oluşan radyal kuvvetler tekrar düzenlenerek yazılırsa:

$$t_i = F_i \cdot r_i \quad (8.36)$$

$$F_i = t_i / r_i \quad (8.37)$$

$$F_{iy} = \cos(a + f_i) \cdot (t_i / r_i) + \sin(a + f_i) \cdot F_{ri} \quad (8.38)$$

$$F_{iz} = \sin(a + f_i) \cdot (t_i / r_i) - \cos(a + f_i) \cdot F_{ri} \quad (8.39)$$

denklemleri elde edilir.

Ancak burada, bacak kuvvetlerinin sistem yer üzerinde olduğu zaman oluştuğuna dikkat edilmelidir. Bacak uçlarındaki m_t kütesine sahip ayaklar üzerine etki eden toplam yer kuvvetlerinin değeri sıfır olarak kabul edilmektedir [95, 96]. Bu da bacak uçlarındaki ayakların yer ile temas ederken hiçbir şekilde yerde kaymadığını ve bir toplu iğnenin ucu gibi yere saplanarak yer-duruş evresi boyunca hem z-y düzleminde hem de z-x düzleminde hareketsiz

olduğu anlamına gelmektedir. Ayaklar(m_t) sadece bacak üzerinde oluşan yay ve sönüm kuvvetlerinden etkilenirler. Yer tarafından oluşan tepki kuvvetlerinden etkilenmezler.

Sonuç olarak, bacak üzerinde oluşan bacak kuvvetlerini vektör formunda tanımlanırsa, bu denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$t := [t_1, \dots, t_6] \quad (8.40)$$

$$F_r := [F_{r1}, \dots, F_{r6}] \quad (8.41)$$

Ayrıca yay-kütle ters sarkaç ile modellenen her bir sanal bacak üzerinde oluşan potansiyel enerji(J) V_{bacak} ile temsil edilirken sönüm enerjisi(J) de D_{bacak} ile temsil edilmektedir. Ön ve arka sanal bacaklar üzerindeki toplam enerji aşağıdaki gibi ifade edilmiştir;

$$V_{bacak_ön} = \frac{1}{2} k_{bacak_ön} (r)^2 \quad (8.42)$$

$$V_{bacak_orta} = \frac{1}{2} k_{bacak_orta} (r)^2 \quad (8.43)$$

$$V_{bacak_arka} = \frac{1}{2} k_{bacak_arka} (r)^2 \quad (8.44)$$

$$D_{bacak_ön} = \frac{1}{2} d_{bacak_ön} (\dot{r})^2 \quad (8.45)$$

$$D_{bacak_orta} = \frac{1}{2} d_{bacak_orta} (\dot{r})^2 \quad (8.46)$$

$$D_{bacak_arka} = \frac{1}{2} d_{bacak_arka} (\dot{x})^2 \quad (8.47)$$

$$E_{\ddot{o}n} = V_{bacak_on} + D_{bacak_on} \quad (8.48)$$

$$E_{\ddot{o}n} = \frac{1}{2} k_{bacak_on} (r)^2 + \frac{1}{2} d_{bacak_on} (\dot{x})^2 \quad (8.49)$$

$$E_{orta} = V_{bacak_orta} + D_{bacak_orta} \quad (8.50)$$

$$E_{orta} = \frac{1}{2} k_{bacak_orta} (r)^2 + \frac{1}{2} d_{bacak_orta} (\dot{x})^2 \quad (8.51)$$

$$E_{arka} = V_{bacak_arka} + D_{bacak_arka} \quad (8.52)$$

$$E_{arka} = \frac{1}{2} k_{bacak_arka} (r)^2 + \frac{1}{2} d_{bacak_arka} (\dot{x})^2 \quad (8.53)$$

Aynı zamanda yay-kütle ters sarkaç ile modellenen her bir sanal bacağı tahrik eden eyleycilerin zıplayarak yürüme işlevi sürecinde harcadıkları güç(watt) aşağıdaki denklemler ile hesaplanmıştır;

$$P_{bacak_on} = \dot{W}_{bacak_on} \cdot t_{bacak_on} \quad (8.54)$$

$$P_{bacak_orta} = \dot{W}_{bacak_orta} \cdot t_{bacak_orta} \quad (8.55)$$

$$P_{bacak_arka} = \dot{W}_{bacak_arka} \cdot t_{bacak_arka} \quad (8.56)$$

$$P_{hexapod_top} = P_{bacak_ön} + P_{bacak_orta} + P_{bacak_arka} \quad (8.57)$$

$$P_{hexapod_top} = f_{bacak_ön} \cdot t_{bacak_ön} + f_{bacak_orta} \cdot t_{bacak_orta} + f_{bacak_arka} \cdot t_{bacak_arka} \quad (8.58)$$

10.2.3.2. Sistemin Hareket Denklemleri

Sistem basit olarak düzlemsel hexapod model olarak modellenmiştir. Rijit gövde bacaklar tarafından oluşturulan yay ve sönüm kuvvetleri etkisi altındadır. Sonuç olarak sisteme ait hareket denklemleri aşağıdaki formda oluşturulabilir [95]:

$$m \ddot{b} = \sum_{i=1}^6 s_i F_i \quad (8.59)$$

Bu denklemi bileşenler cinsinden yazacak olursak,

$$m \ddot{b}_y = \sum_{i=1}^6 s_i F_{iy} \quad (8.60)$$

$$m \ddot{b}_y = s_{-1} F_{1y} + s_{-2} F_{2y} + s_{-3} F_{3y} \quad (8.61)$$

$$m \ddot{b}_z = \sum_{i=1}^6 s_i F_{iz} \quad (8.62)$$

$$m \ddot{b}_z = s_{-1} F_{1z} + s_{-2} F_{2z} + s_{-3} F_{3z} \quad (8.63)$$

elde edilir. Dönmeden dolayı oluşan denklem aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$I \ddot{\alpha} = \sum_{i=1}^6 s_i (f_i - b) \times F_i \quad (8.64)$$

Burada f_i ve b vektörel formda aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{f}_i = f_{iy} \dot{j} + f_{iz} \dot{k} \quad (8.65)$$

$$\dot{b} = b_y \dot{J} + b_z \dot{k} \quad (8.66)$$

Denklem 8.65 ve 8.66 8.64 denkleminde yerine koyulup, vektörel çarpım gerçekleştirilecek olursa,

$$I_{\mathcal{A}} = s_i [(f_{iy} - b_y) \dot{j} + (f_{iz} - b_z) \dot{k}] \times [F_{iy} \dot{j} + F_{iz} \dot{k}] \quad (8.67)$$

$$I_{\mathcal{A}} = s_i [(f_{iy} - b_y) F_{iz} \dot{i} - (f_{iz} - b_z) F_{iy} \dot{i}] \quad (8.68)$$

$$I_{\mathcal{A}} = s_i [(f_{iy} - b_y) F_{iz} - (f_{iz} - b_z) F_{iy}] \dot{i} \quad (8.69)$$

$$I_{\mathcal{A}} = s_{-1} [(f_{1y} - b_y) F_{1z} - (f_{1z} - b_z) F_{1y}] + s_{-2} [(f_{2y} - b_y) F_{2z} - (f_{2z} - b_z) F_{2y}] + \\ s_{-3} [(f_{3y} - b_y) F_{3z} - (f_{3z} - b_z) F_{3y}] \quad (8.70)$$

denklemini elde edilir. Benzer şekilde bacakların dinamiği için, Newton' un ikinci hareket kanunu uygulanacak olursa,

$$m_t \cdot \ddot{f}_i = (1 - s_i) F_i \quad (8.71)$$

denklemini elde edilir. Burada f_i yerine koyulup, aşağıdaki gerekli işlemler yapılacak olursa,

$$m_t \cdot \ddot{f}_i = (1 - s_i) \cdot R(a + f_i) \cdot \begin{bmatrix} t_i / r_i \\ -F_{ri} \end{bmatrix} \quad (8.72)$$

$$m_t \cdot \ddot{f}_i = (1 - s_i) \begin{bmatrix} \cos(a + f_i) & -\sin(a + f_i) \\ \sin(a + f_i) & \cos(a + f_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_i / r_i \\ -F_{ri} \end{bmatrix} \quad (8.73)$$

$$\ddot{f}_{1y} = (1 - s_{-1}) [\cos(a + f_1) \cdot (t_1 / r_1) / m_t + \sin(a + f_1) \cdot F_{r1} / m_t] \quad (8.74)$$

$$\ddot{f}_{1z} = (1 - s_{-1}) [\sin(a + f_1) \cdot (t_1 / r_1) / m_t - \cos(a + f_1) \cdot F_{r1} / m_t] \quad (8.75)$$

$$\ddot{f}_{2y} = (1 - s_{-2}) [\cos(a + f_2) \cdot (t_2 / r_2) / m_t + \sin(a + f_2) \cdot F_{r2} / m_t] \quad (8.76)$$

$$\ddot{f}_{2z} = (1 - s_{-2}) [\sin(a + f_2) \cdot (t_2 / r_2) / m_t - \cos(a + f_2) \cdot F_{r2} / m_t] \quad (8.77)$$

$$\ddot{f}_{3y} = (1 - s_{-3}) [\cos(a + f_3) \cdot (t_3 / r_3) / m_t + \sin(a + f_3) \cdot F_{r3} / m_t] \quad (8.78)$$

$$\ddot{f}_{3z} = (1 - s_{-3}) [\sin(a + f_3) \cdot (t_3 / r_3) / m_t - \cos(a + f_3) \cdot F_{r3} / m_t] \quad (8.79)$$

elde edilir.

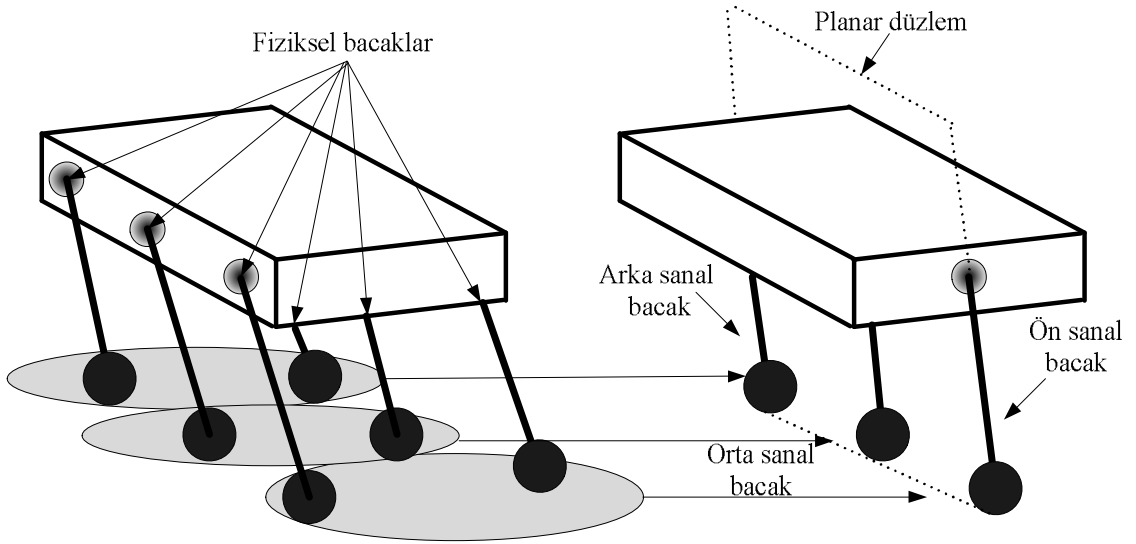
Eğer herhangi bir bacak yer ile temas ediyorsa bu durum her bir bacak için s_i ile temsil edildiği bilinmelidir. Sadece yer ile temas eden bacakların rijit gövdenin hareketi üzerinde etkileri vardır. Ayrıca bacaklar yere çarptıkları zaman, bacak uçlarındaki ayakların hızlarının sıfır olduklarını kabul edilmektedir [95]. Sonuç olarak, bacakların uçlarındaki ayaklar, yerden ayrılma fazı evresi başlangıcına kadar geçen zamanda sabittirler yani yerlerinden hareket etmezler.

8.3. Kapalı Dinamik Döngü Modeli

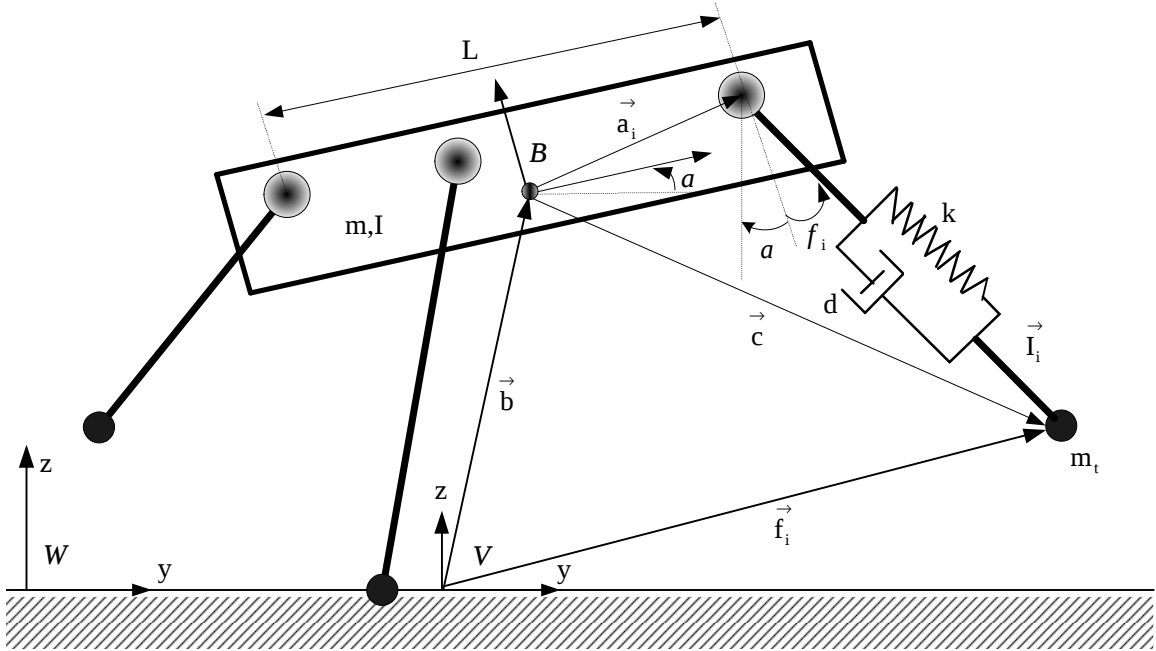
Altıncı bölümde evreler, olaylar, durumlar, evre geçişleri ve evre seçim fonksiyonları detaylı olarak verildiğinden, bu bölümde tekrar edilmeyecektir. Evreler, olaylar, durumlar, evre geçişleri ve evre seçim fonksiyonları aynen altı bacaklı hexapod robot için de uygulanacaktır.

9. HEXAPOD ROBOT ZIPLAMA MODELİNİN PD İLE DENETİMİ VE SAYISAL BENZETİMİ

Bu bölümde altı bacaklı hexapod robot için zıplayarak dengeli dinamik yürüme hareketi incelenmektedir. Zıplayarak yürüme hareketinin esas temeli bir noktadan başlayarak bir doğrultuda zıplayarak yürüme hareketini gerçekleştirmektir. Bunu da düzlemsel bir ortamda gerçekleştiği kabul edilmektedir. Sistemin düzlemsel ortamda hareket ettiğini düşünürsek burada robotun ön bacaklarını birleştirip tek bir bacak gibi, orta bacaklarını birleştirip tek bir bacak gibi ve arka bacakları da birleştirip tek bir bacak gibi düşünülebilir. Bu ikiye bacakların birleştirilerek tek bir bacak halinde modellenmesi ile oluşan yapı sanal bacak olarak adlandırılmaktadır [2]. Bu yüzden sistem ana gövde, ön sanal bacak, orta sanal bacak ve arka sanal bacak şeklinde dört ana kinematik zincir bileşenlerinden oluştuğu düşünülebilir. Modellenen düzlem ve sanal bacak yapısı Şekil 9.1’ de gösterilmiştir. Bacaklar yer-duruş evresinde yay ve sönüm modeli gibi davranmaktadırlar. Şekil 9.2’ de iki-boyutlu düzlem sistem gösterilmiştir ve beş değişken parametre ile tanımlanmıştır (Denklem 9.1). Bütün bu değişkenler ve işaret sembolleri Şekil 9.2’ de gösterilmiştir ve Tablo 9.1’ de değişkenler sembolize edilmiştir. Tablo 9.2’ de ise robota ait parametreler sembolize edilmiştir.



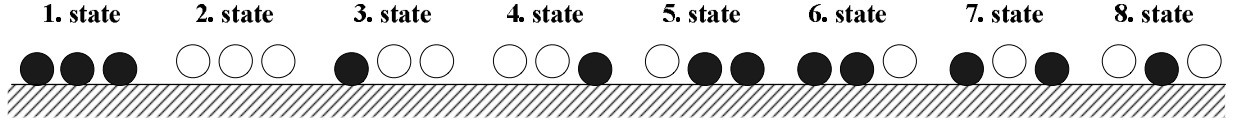
Şekil 9.1 Zıplayarak yürüme için sanal bacaklar



Şekil 9.2 Zıplayarak yürüme için sanal bacaklar ve düzlem içinde robot için iki-boyutlu zıplama modeli.

Her bir sanal bacağın durumuna göre robot sekiz durum içinde yer-duruş ve uçuş evrelerinde olabilirler. Birinci durumda sanal bacakların üçü de aynı anda yer-duruş durumunda olabilirler. İkinci durumda sanal bacakların her üçü de aynı anda havada uçuş durumunda olabilirler. Üçüncü durum ise sadece arka sanal bacak yer-duruş durumunda olabilir. Dördüncü durum da ise sadece ön sanal bacak yer-duruş durumunda olabilir. Beşinci durumda sadece ön ve orta sanal bacaklar yer-duruş durumunda olabilirler. Altıncı durumda sadece orta ve arka sanal bacaklar yer-duruş durumunda olabilirler. Yedinci durumda sadece ön ve arka sanal bacaklar yer-duruş durumunda olabilirler. En son olan sekizinci durumda sadece orta sanal bacak yer-duruş durumunda olabilir. Şekil 9.3' de sanal bacaklara ait yer-duruş ve uçuş durumları gösterilmiştir. Bu evrelerin ya da durumların her birinde sistemin hareket denklemleri farklıdır. Bu sistemin ardışık zamanlarda ardışık yapılarda farklı modellerden oluştuğunu göstermektedir.

$$x = [z \quad y \quad a \quad f \quad r] \quad (9.1)$$



Şekil 9.3 Sanal bacaklara ait yer-duruş ve uçuş durumları

Tablo 9.1 Robot Değişkenler

Sembol	Tanım
z, y	Ağırlık Merkezi Kartezyen Koordinatları(COM)
a	Gövde Salınım açısı(Pitch angle)
f	Gövdeye göre bacak açısı
r	Bacak Boyu

Tablo 9.2 Robot Parametreler [96]

Sembol	Tanım	Birim	Değer
m	Robot gövde ağırlık	kg	10
I	Gövde atalet moment	kgm^2	0.171
k_i	i . bacak rijitlik sabiti	N/m	3520
d_i	i . bacak sönüm sabiti	$N/(m/s)$	55
l_o	Bacak boyu	m	0.323
L	Robot gövde boyu	m	1
m_t	Bacak ağırlık	kg	0.097

9.1. Zıplayarak Yürüme Denetimi

Bu bölümde önerilen denetim daha öncede belirtildiği gibi üç adet parametre ile ifade edilmektedir. Bunlar yere dokunma açısı, bacağın yer-duruş evresinde iken ana gövdeyi ileri ötelerken taradığı süpürme açısı ve bacakları z-y düzleminde dönmesini sağlayan torkdur. Yere dokunma açısı f^{td} ile, süpürme açısı f^{swl} ile ve tork t ile temsil edilmektedirler. Tasarlanan denetleyicide robota ait ön, orta ve arka sanal bacaklar birbirlerinden bağımsız olarak denetlenmektedir. Her bir bacak daha önceki bölümlerde anlatılan evre ve olayları bağımsız olarak gerçekleştirmektedirler. Gerçek doğal şartlarda da zaten istenen bu yapıdaki modeldir. Burada sistemin denetimi sadece bacakların denetimi ile gerçekleştirilmektedir. Bu sistem

modelinde ana gövdeye hiçbir zaman direk olarak denetim sinyalleri uygulanmamaktadır. Fakat amaç denetlenmek istenen robotun ana gövdesidir.

Literatür çalışmalarında da görüldüğü gibi zıplayarak yürümede robotun ana gövdesinin hep düzlemsel ortamda harmonik bir yörüngeyi takip etmesi istenir [1, 2, 91, 92, 96, 99]. Sistemde bu harmonik yörünge gövde salınım açısı ile temsil edilmiştir. Bu yüzden ana gövdenin salınım denetimi, sistemde bacakların denetlenmesi ile sağlanmaktadır.

Sisteme ait her bir sanal bacak için kullanılan denetim parametreleri Tablo 9.3’ de verilmiştir. Ayrıca sayısal benzetim için kullanılan başlangıç değerleri Tablo 9.4’ de gösterilmiştir. Bu denetimde özellikle robot uçuş evresinde iken sanal bacakların yere-dokunma açıları ve sanal bacaklar yerde iken süpürme açıları PD ile denetlemeye çalışılarak robotun iki boyutlu düzlemde zıplayarak yürüme olayı gerçekleştirilmiştir.

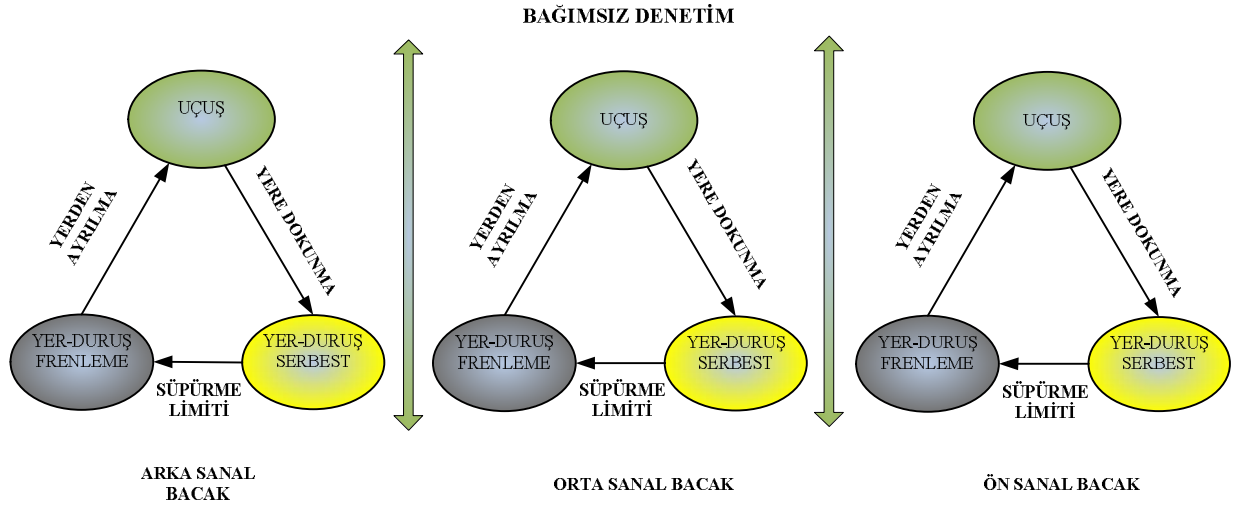
Geliştirilen denetim algoritmasında robota ait ön ve arka sanal bacaklara iki ana denetim evresi olmak üzere toplam iki evrede denetim durumları uygulanmaktadır. Bu evreler uçuş ve yer-durush frenleme durumlarından oluşmaktadır. Bu evreler ve durumlar birbirlerinden üç ana olay ile ayrılmaktadırlar. Bunlar yere dokunma, süpürme limiti ve yerden teması kesme olayları yukarıda açıklanan evreleri birbirinden ayıran olaylardır. Şekil 9.4 bu evreler ve olayları ifade eden durumu göstermektedir.

Tablo 9.3 Denetim Parametreleri [96]

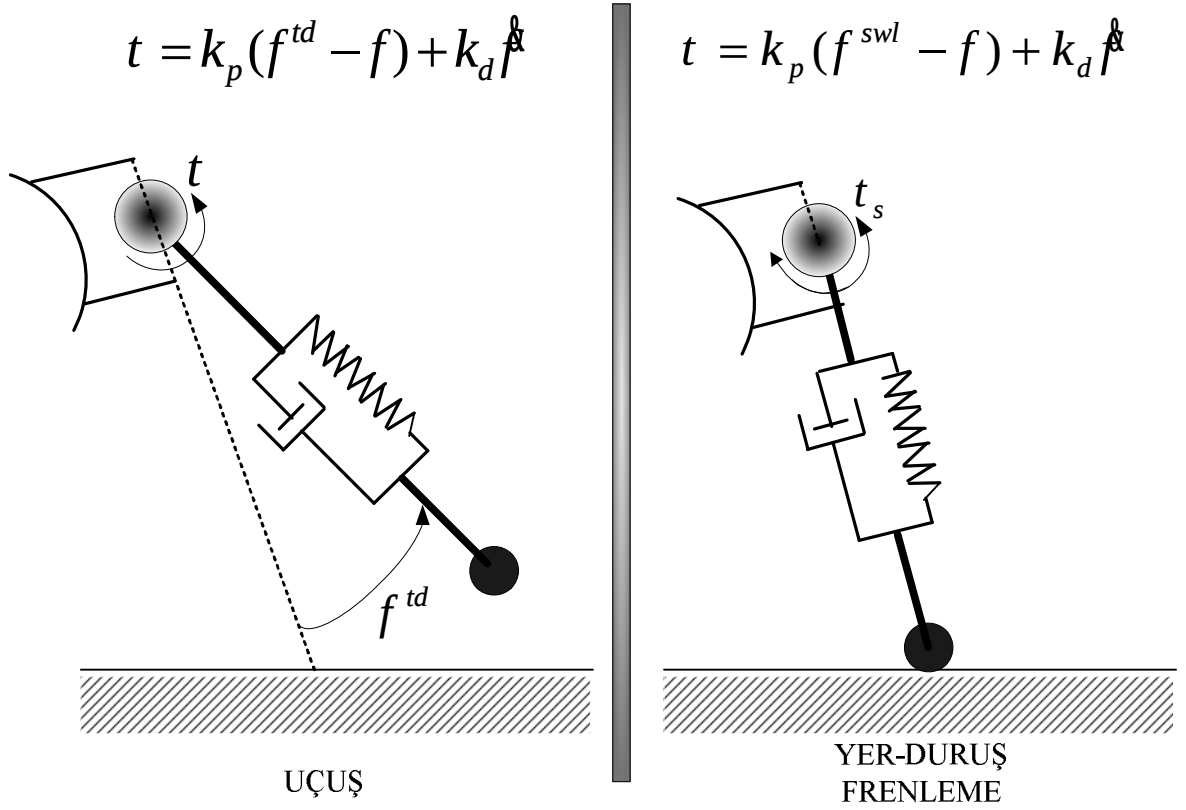
Paremetre	Ön sanal bacak	Orta Sanal Bacak	Arka Sanal Bacak
Yere Dokunma Açısı($^{\circ}$) (Touchdown-angle)	18	18	15
Süpürme Açısı($^{\circ}$) (Sweep limit angle)	0-4	0-4	0-4
Uçuş-Flight(k_p - k_d)	250,5	250,5	250,5
Yer-Stance(k_p - k_d)	300,5	300,5	300,5

Tablo 9.4 Başlangıç Değerleri [96]

Parametre	Değer	Birim
Öteleme hız($\dot{b}_y$)	2.5	m/s
Yatay konum(b_y)	1.0	m
Düşey hız($\dot{b}_z$)	0.0	m/s
Düşey konum(b_z)	0.5	m
Ön sanal bacak	18	(°)
Orta sanal bacak	18	(°)
Arka sanal bacak	15	(°)



Şekil 9.4 Robotun Zıplayarak Yürüme Denetim Durumları



Şekil 9.5 Zıplayarak Yürüme Evreleri Sırasındaki Denetim

9.1.1. Yere Dokunma Açısının Denetimi

9.1.1.1. Uçuş Durumu

Şekil 9.5' de sisteme ait iki evrede gerçekleştirilen denetim metotları gösterilmiştir. Uçuş evresinde robota ait sanal bacaklardan herhangi birisinin yerden teması kesilmiş demektir. Bu şekildeki bir sanal bacağın havadaki uçuş evresinde, bacağın gövdeye göre açısını her zaman denetlemeye çalışıldığı bir durumdur. Uçuş evresinden sonra bacaklar yere temas edeceği zaman istenilen açıda yere temas etmeleri istenmektedir. Genelde bu iş uçuş evresinde bacak havada iken yapılır. Uçuş evresinde sanal bacakların yere dokunma açıları bu bölümde PD denetim ile sağlanmaktadır. Sanal bacakların gövdeye monte edildiği kalça kısmına yerleştirilen eyleyicilerin uyguladığı tork tarafından, istenilen yere dokunma açısı PD denetim ile gerçekleştirilmektedir. Sonuç olarak uçuş evresinin değişkeni olarak sanal bacağın ana gövdeye göre yere dokunma açısı alınmaktadır [200]. Ayrıca Scout II adındaki robotun istenilen periyodik hareketi içinde gövde salınımları yine direk giriş sinyali olarak yere dokunma açısı dikkate alınmıştır [1, 139, 196]. Ayrıca yer-duruş evresinde periyodik hareket için motorların

uyguladığı torklar da önemli giriş parametrelerdir. Fakat bu torklar sınırlıdır. Bu yüzden etkili denetimin büyük bölümü uçuş evresinde uygulanır [1, 152].

9.1.2. Süpürme Açısının Denetimi

9.1.2.1. Yer-Duruş Frenleme Durumu

Şekil 9.5’ de bu evre için sisteme ait denetim metodu görülmektedir. Yer-duruş evresinde her bir sanal bacak yerden temasını kesinceye kadar ana gövdeye göre taradıkları veya süpürdükleri süpürme açısı(f^{swl}) ile ifade edilmektedir. Sanal bacak yere temas ettikten sonra gövdeye göre arkaya doğru giderken ana gövdeyi de öne doğru itmektedir. Robotun başarılı bir şekilde zıplayarak yürümesini sağlamak için bu süpürme açısı denetlenmek zorundadır. Aksi takdirde robotun kendi ataletinden dolayı yere çakılma ve takla atma olayı ile karşılaşmaktadır. Bu nedenle bu evrede süpürme açısı PD denetlenmektedir. Aslında buradaki amaç sanal bacaklarda potansiyel enerji tükenmeden robotu havaya zıplatmaktır ki bu da robotun yürümesi için gerekli bir işlemdir.

PD denetim her bir sanal bacak için verilen süpürme açısını taradıktan sonra bacağı o noktada tutar. Bu hem enerji tüketimi hem de hareket performansı açısından oldukça önemlidir [1].

9.2. Hexapod Robotun PD İle Denetimi

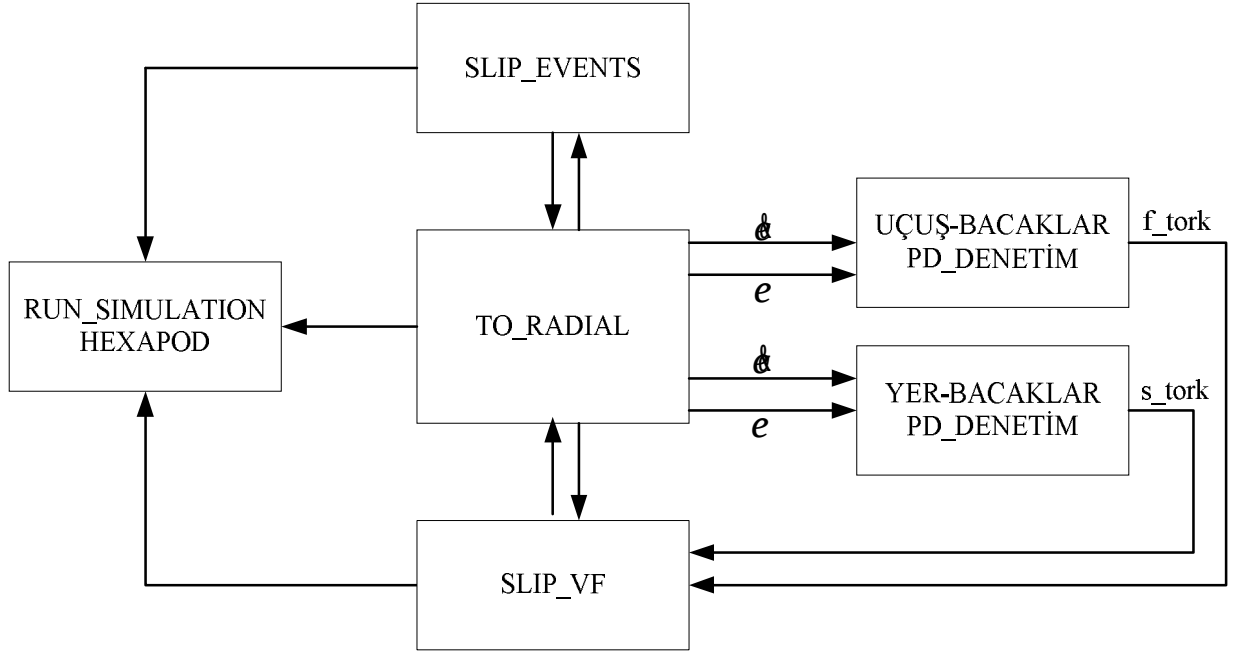
9.2.1. PD Denetim Algoritması

Altı bacaklı hexapod robot sisteminin modellenmesi, denetimi ve sayısal benzetimi MATLAB paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zıplayarak dengeli dinamik yürüme işlemi MATLAB paket programında bir ana programdan ve beş alt program olmak üzere toplam altı adet m-file’ dan oluşmaktadır. Ana programı run_simulation ismi temsil ederken alt programları sırasıyla Slip_Events, To_Radial, Slip_Vf, Flight_Control ve Stance_Control isimleri ile temsil edilmektedir. Bu ana program ve alt programlar Şekil 9.6’ de de görüldüğü gibi sürekli eş zamanlı olarak birbirleri ile veri alış verişinde bulunarak ilişkili çalışmaktadırlar. Ana programda sisteme ait başlangıç değerleri, robot parametreleri ve simülasyona ait grafik komutları mevcuttur. Slip_Events alt programı içerisinde robotun faz ve durumlarını belirleyerek dinamik döngüyü oluşturur. Slip_Vf alt programı içerisinde ise sistemin dinamik denklemleri mevcuttur. To_Radial alt programında sisteme ait kinematik denklemler

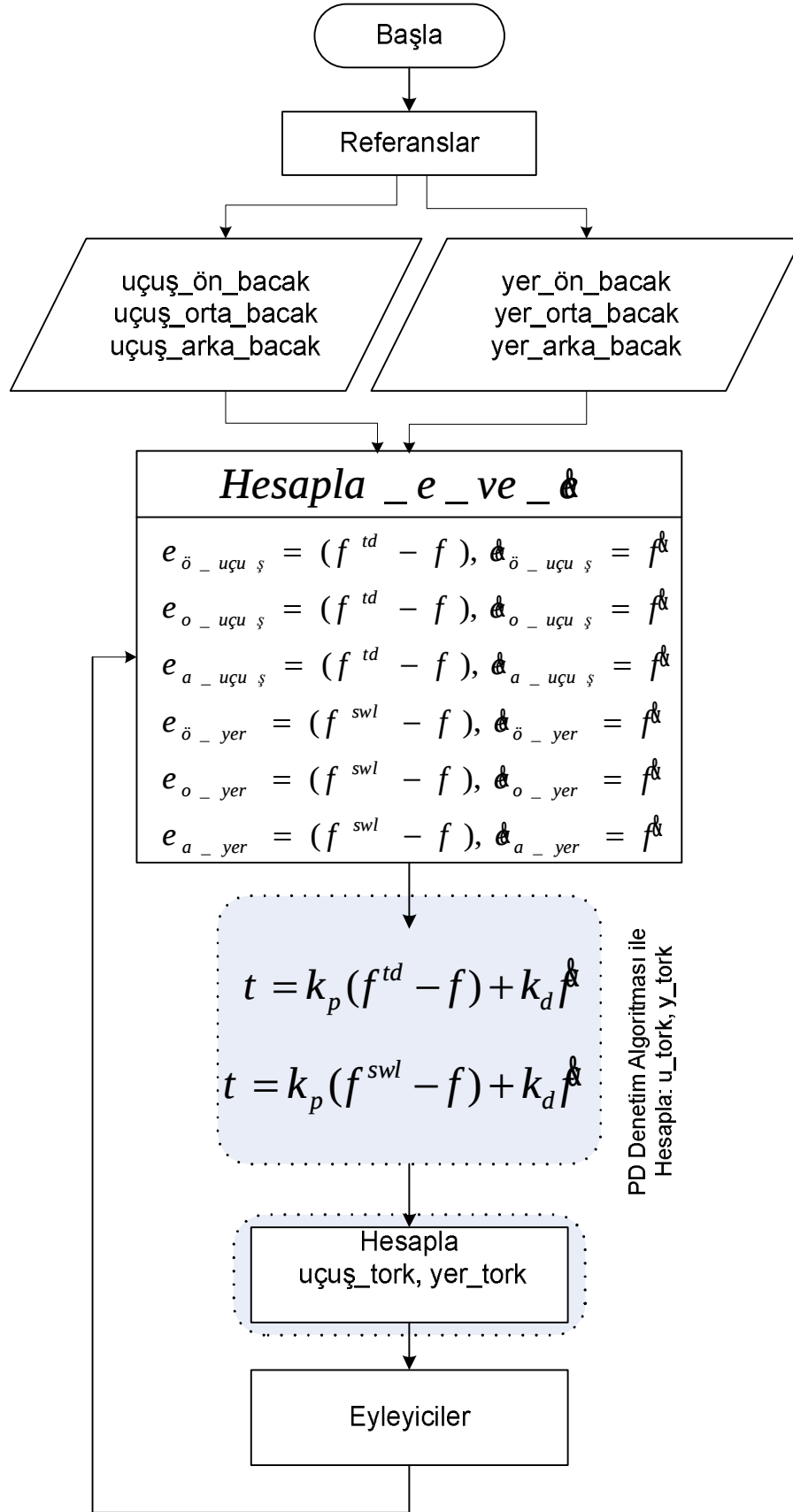
çözölmektedir. Flight_Control ve Stance_Control alt programlarında da denetim algoritmaları oluşturulmuştur.

Denetim algoritmasının çıkış sinyalleri; altı bacaklı hexapod robotun kalça kısmında bulunan motorlara, PD denetim algoritması ile ürettiğı uygun tork değerleridir. Burada sistem bilindiğı gibi iki farklı kapalı dinamik döngüden oluşmaktadır. Zıplayarak yürüme işlemleri ardışık kapalı bir döngü içerisinde farklı dinamik yapılardan oluşur. Hexapod robot iki evrede ayrı ayrı denetlenerek zıplayarak dengeli dinamik yürüme eylemini gerçekleştirmektedir. Birinci evre olan uçuş evresinde ön-orta ve arka sanal bacakların yere dokunma açıları (f^{td}), ikinci evre olan yer-duruş evresinde ise ön-orta ve arka sanal bacakların süpürme açıları (f^{swl}) istenilen değerde olabilmeleri için PD denetim algoritması ile uygun çıkış sinyali olarak tork elde edilerek sistem denetlenmektedir. Denetim algoritmasında sistemin girişlerini e hata ve $\dot{e}$ hatanın değışim değeri oluşturmaktadır. Burada hata, sistemin uçuş ve yer-duruş evrelerinde ön-orta ve arka sanal bacakların gövdeye göre anlık ölçölen açı değeri ile ön-orta ve arka sanal bacaklar için istenilen açı değeri arasındaki farktır. Sistemin çıkışlarını ise hata ve hatanın zamana göre anlık değışim değeri minimize edecek şekilde ön-orta ve arka sanal bacakları tahrik eden motorların uyguladığı uygun tork değeri dir. Sisteme ait giriş ve çıkış değeri Şekil 9.6 ve Şekil 9.7' de gösterilen PD denetim akış diyagramında görölmektedir.

Her bir sanal bacak için, PD denetim iki giriş ve bir çıkıştan oluşan bir sistemdir. Hexapod robotun zıplayarak dengeli dinamik yürüyüş denetimi toplam olarak toplam altı giriş ve üç çıkıştan ibarettir. PD denetim algoritması hata (e) ve hata değışimine ($\dot{e}$) minimize ederek, sanal bacaklar için gerekli olan tork değeri lerini ($t_{ön_bacak}$, t_{orta_bacak} , t_{arka_bacak}) çıkış sinyali olarak üretirler.



Şekil 9.6 Tasarlanan Denetim Algoritmasına Ait Blok Diyagram



Şekil 9.7 Dizayn edilen sistem için PD Denetim Akış Diyagramı

9.3. Hexapod Robotun PD İle Sayısal Benzetimi

9.3.1. Sayısal Benzetim ve Elde Edilen Grafikler

Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki düzlemsel z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi, robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel, z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α (alfa) salınım açısı($^{\circ}$), robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m), robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu faz eğri çizimleri, robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m), robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn), robotun ön-orta-arka bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{orta}} - I_{\text{arka}}$ (m), robotun ön bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m), robotun orta bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m), robotun arka bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m), robotun ön-orta-arka bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$), robotun ön bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$), robotun orta bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{orta} ($^{\circ}$), robotun arka bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$), robotun ön-orta-arka bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J), robotun ön bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{\text{ön}}$ (J), robotun orta bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J), robotun arka bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J), hatanın zaman ile değişimi (e), robotun ön-orta-arka bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m), robotun ön-orta-arka bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm), robotun ön bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{\text{ön}}$ (Nm), robotun orta bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm) ve robotun arka bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm) gibi önemli sayısal benzetim sonuçları farklı başlangıç değerlerine göre her bir grafikte gösterilmiştir.

Sayısal benzetim grafikleri hexapod robotun iki boyutlu ortamda sahip olduğu başlangıç değerlerine ait gövde ve sanal bacakların duruş pozisyonunu gösteren katı modeli görünmektedir. Ayrıca bu kısımda hexapod robotun her bir adımdaki zıplayarak yürüme işleminde, gövdenin ve sanal bacakların z-y eksenlerine göre konumları görülmektedir.

Gövde salınım grafikleri hexapod robotun gövdesinin ağırlık merkezinin z-y eksenlerine göre salınımını(pitch angle) göstermektedir. Bu salınım derece($^{\circ}$) olarak α ile temsil edilmektedir. Bu salınım aslında fiziksel olarak bir harmonik yapıya sahiptir. Buda robotun zıplayarak yürüme işleminde istenen bir durumdur [2, 96, 99].

Robot gövdesinin ağırlık merkezinin z dikey eksene göre zamana bağlı olarak aldığı yükseklik değerleri b_z ile temsil edilmektedir. b_z değerlerinin takip ettiği yörünge fiziksel olarak bir harmonik yapıya sahip olması gerekmektedir [2, 96, 99].

Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulur. Faz çizimleri bize sistemin kararlılığı hakkında bilgi vermektedir. Yani robotun zıplayarak yürüme işlemi esnasında devrilip devrilmediği ya da dengeli bir yürümenin olup olmadığı hakkında bilgi vermektedir.

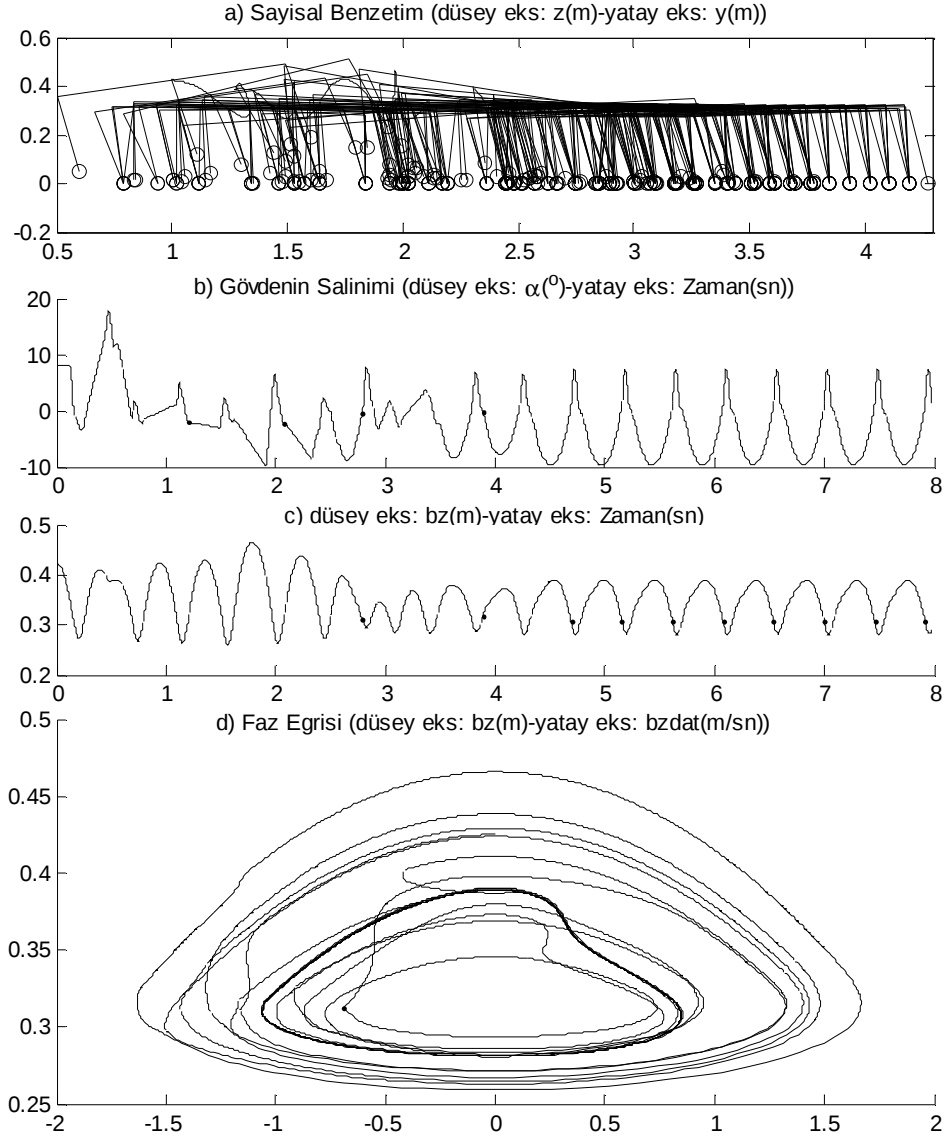
Grafiklerde hexapod robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, sanal bacaklara ait boylarının anlık değişimleri gösterilmektedir. Bacak boylarındaki anlık değişim r ile temsil edilmektedir. Dikkat edilirse sanal bacakların boyları sadece bacaklar yere temas ettikten sonra değişmektedir. Bacaklar yer ile temas halinde iken robotun kütlesinden dolayı, yay özelliğinde olan bacaklar önce kasılarak sıkışırler daha sonra da ilk boyuna gelinceye kadar açılarak zıplama işlemini gerçekleştirirler. Bacaklar yerden temasını kestikten sonra boyları sabittir. Sadece çok küçük oranda m_t ' den dolayı bir titreşim oluşmaktadır. Bu da sisteme rahatsız edici bir etken oluşturmamaktadır [95, 96, 99].

Ayrıca grafiklerde hexapod robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, sanal bacakların uçlarındaki ayakların yerden yükseklikleri gösterilmektedir. Bacakların yerden yükseklikleri f_z ile temsil edilmektedir. Sanal bacaklar yer ile temas halinde iken bu değer sıfırdır.

Aynı zamanda hexapod robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, sanal bacakların gövdeye göre açılma konumlarını($^{\circ}$) gösterilmektedir. Bacakların gövdeye göre açılma konumları, robot hem yerde iken hem de havada iken ardışık gerçekleşen iki kapalı döngü içerisinde denetimleri gerçekleştirilmektedir. Bacakların gövdeye göre açılma konumları f ile temsil edilmektedir. Hexapod robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, ön-orta-arka sanal bacakların istenilen açılma konumları elde etmek için robot hem havada iken uygulanan denetimde hem de yerde iken uygulanan denetim sonucunda açılma konumlarına bağlı olarak oluşan hatayı göstermektedir. Ön-orta-arka sanal bacakların zıplayarak yürüme döngüsü içinde ki istenilen yere dokunma açısı(f^{td}) ve süpürme açısına(f^{swl}) bağlı olarak hata grafiği elde edilmiştir.

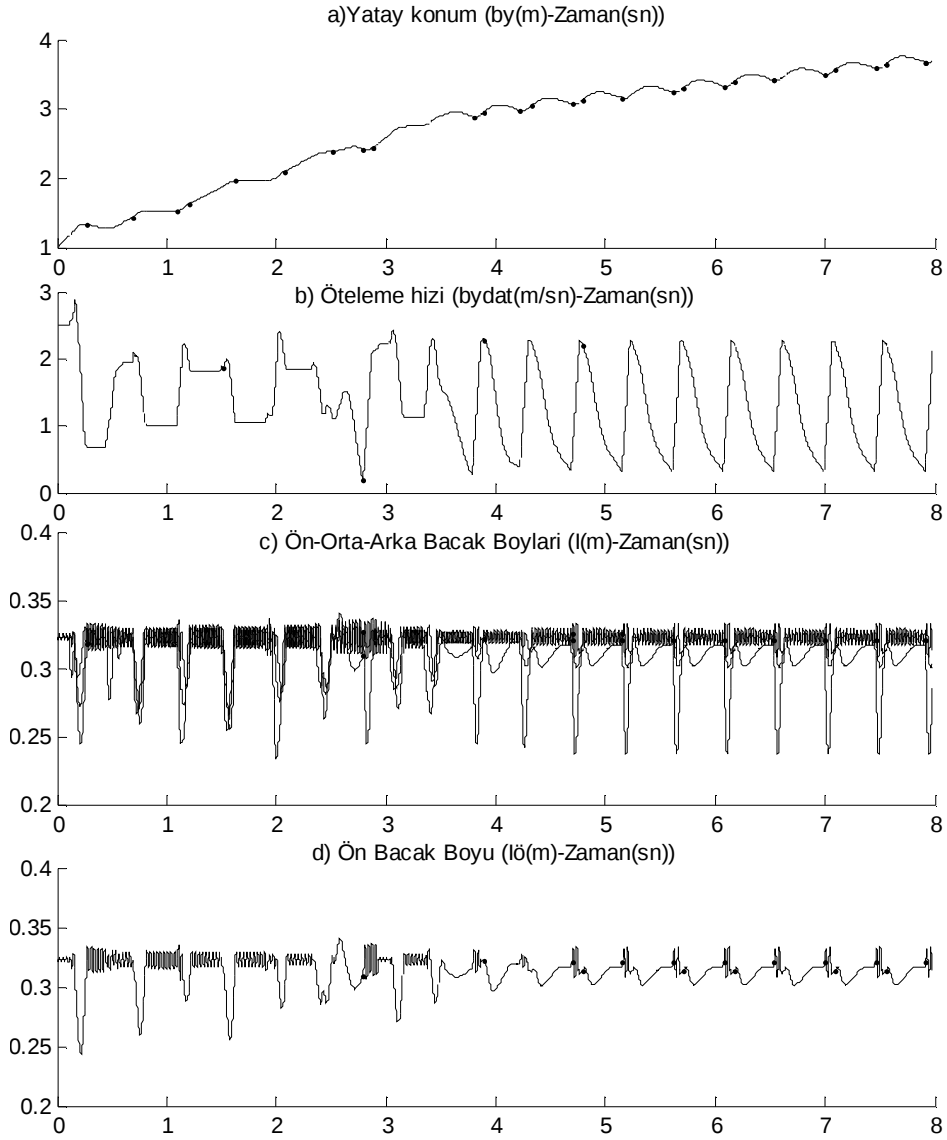
En son işlem olarak hexapod robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, uygulanan denetim algoritmasında istenilen açıları elde etmek için çıkış sinyali olarak ön-orta-arka sanal bacaklara PD denetimi ile uygulanan denetim çıkış sinyali (tork) değerleri grafiksel olarak verilmiştir.

Bu bölümde robotun farklı başlangıç değerlerine bağlı olarak, zıplayarak yürüme işlemi sırasında gerçekleşen tüm fiziksel olayların sayısal benzetim sonuçları grafiklerde gösterilmeye çalışılmıştır. Bu sayısal sonuçlara bağlı olarak robotun belirli zaman dilimleri arasında aldığı yol(m) ve alınan bu yol esnasında robotun her bir bacağını tahrik eden motorların harcadığı güç(watt) hesaplanarak tablo şeklinde verilmiştir. Ayrıca oluşturulan her bir tabloda, zıplamaya ait her bir örneğe ait başlangıç değerleri verilmiştir.



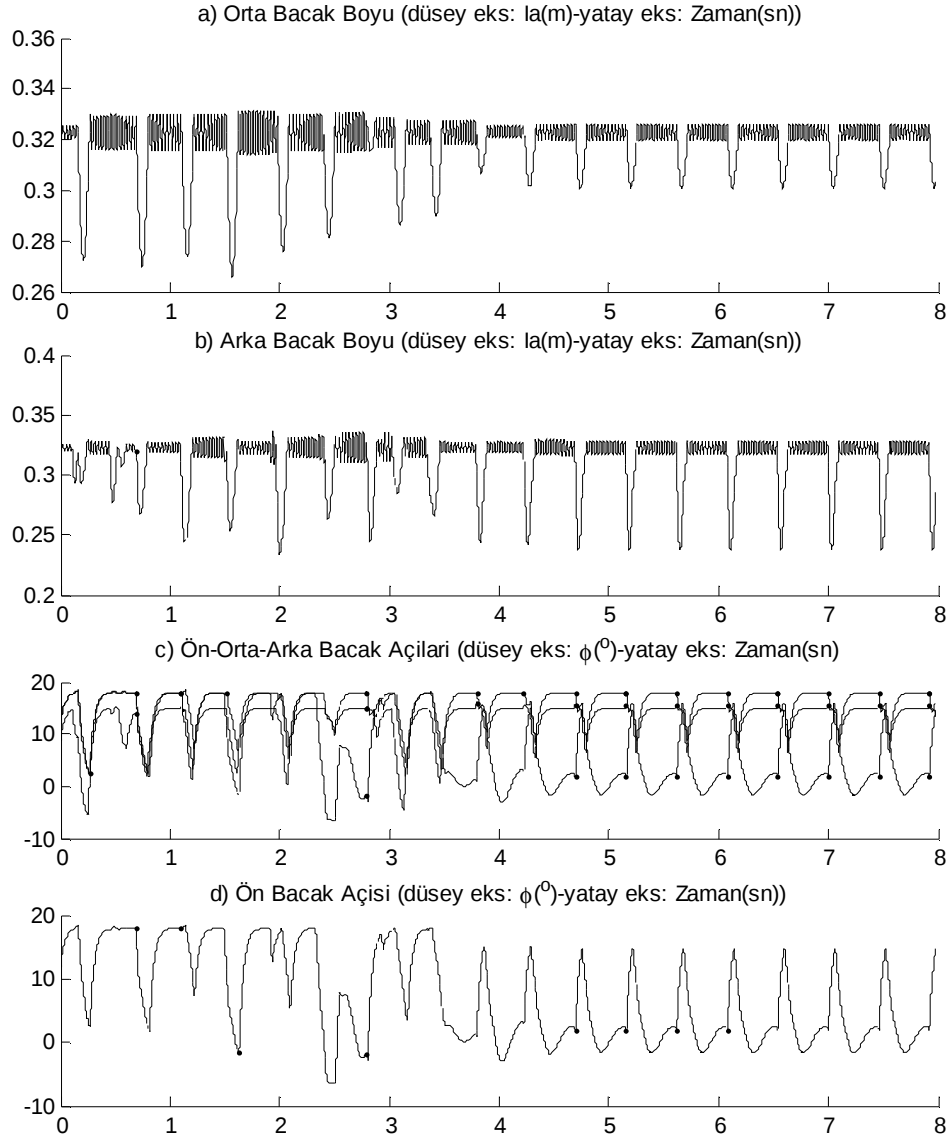
Şekil 9.8 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



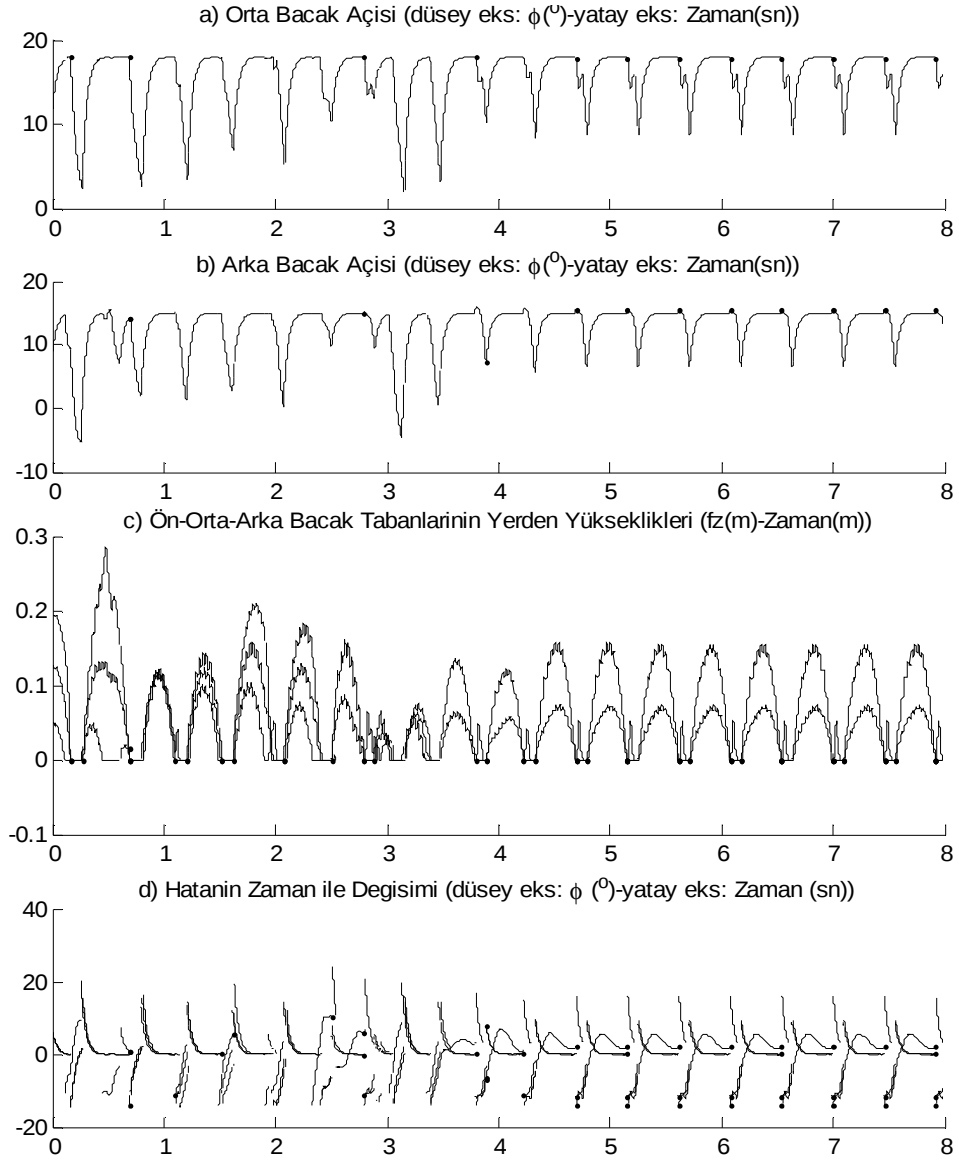
Şekil 9.9 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



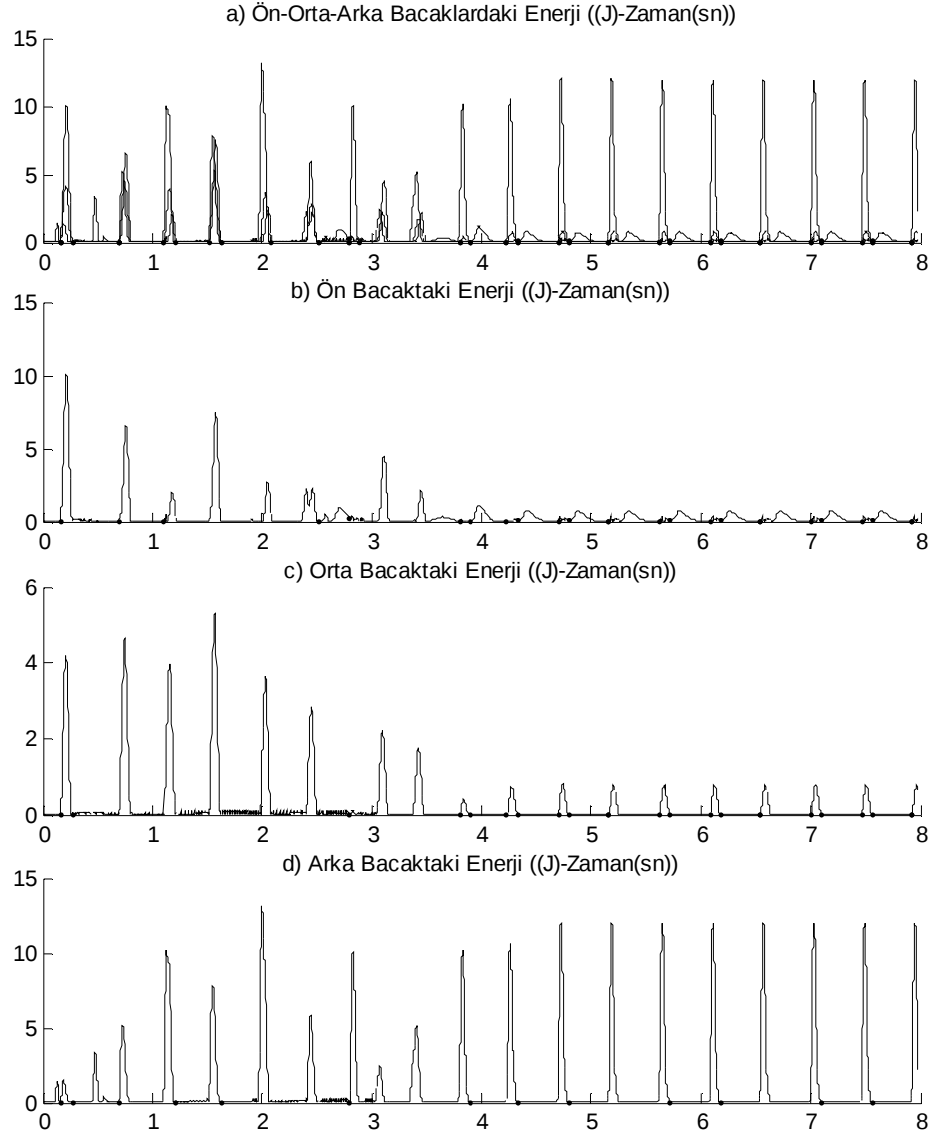
Şekil 9.10 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).
- b) Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f (°).
- d) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ (°).



Şekil 9.11 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{orta} (^{\circ})$.
- b) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{arka} (^{\circ})$.
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri $f_z (m)$.
- d) Hatanın zaman ile değişimi (e).



Şekil 9.12 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm

enerji miktarları E_{top} (J).

b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm

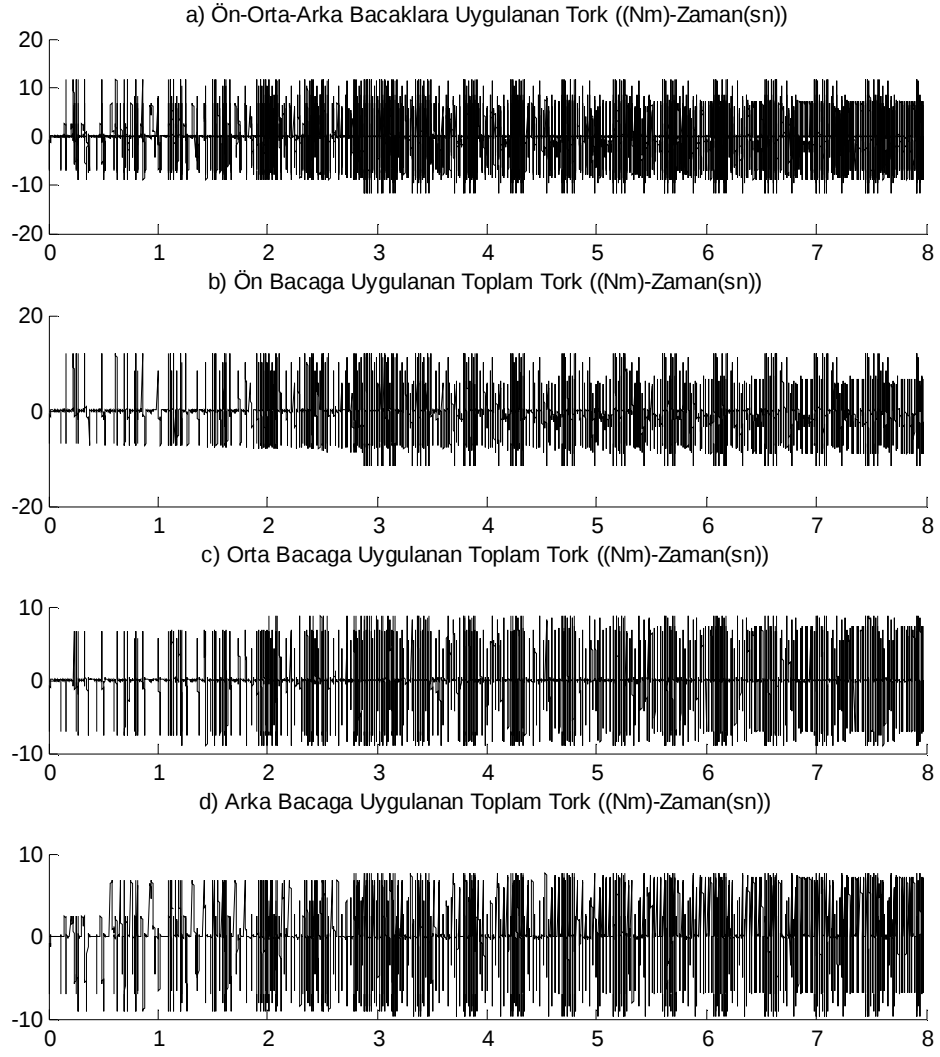
enerji miktarı $E_{ön}$ (J).

c) Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm

enerji miktarı E_{orta} (J).

d) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm

enerji miktarı E_{arka} (J).

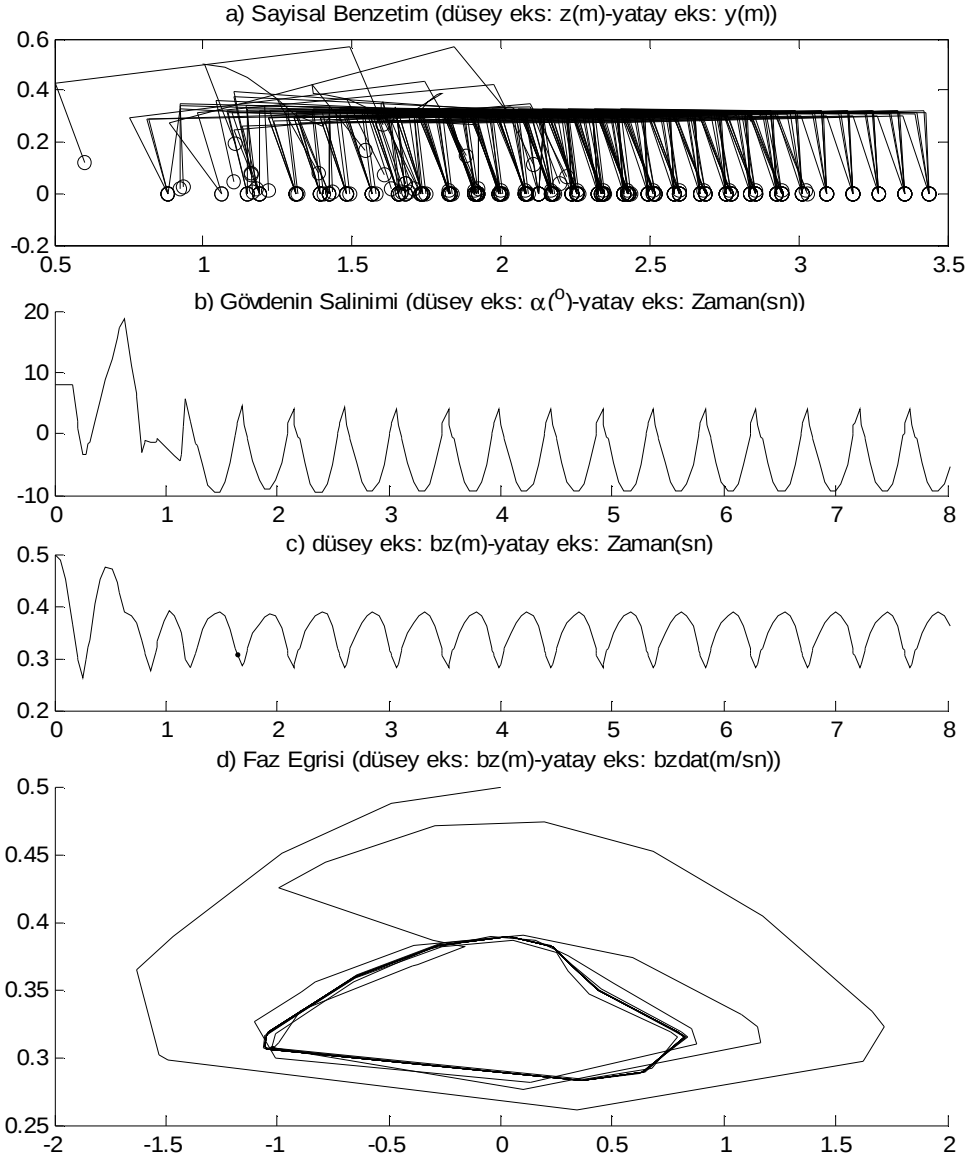


Şekil 9.13 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- c) Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).
- d) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

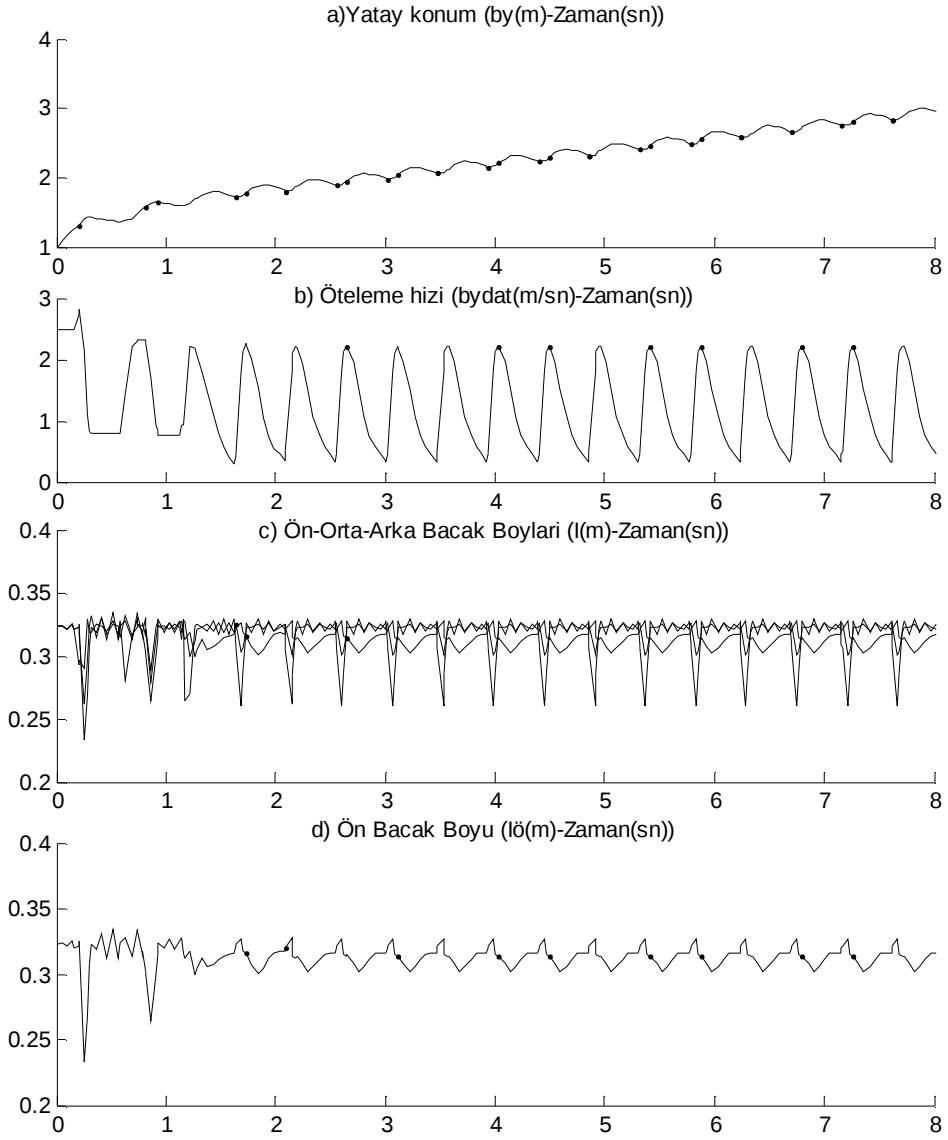
Tablo 9.5 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.

HEXAPOD ROBOT					
6 bacaklı					
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ					
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı	
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)	
40		8		2.5	
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ					
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın Harcadığı Güç	Orta Bacağın Harcadığı Güç	Arka Bacağın Harcadığı Güç	Toplam Harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{orta}	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)	(watt)
3	0.92	231	137	139	508
5	1.8	335	243	250	829
6	2.38	385	297	297	980
8	3.3	496	427	391	1323



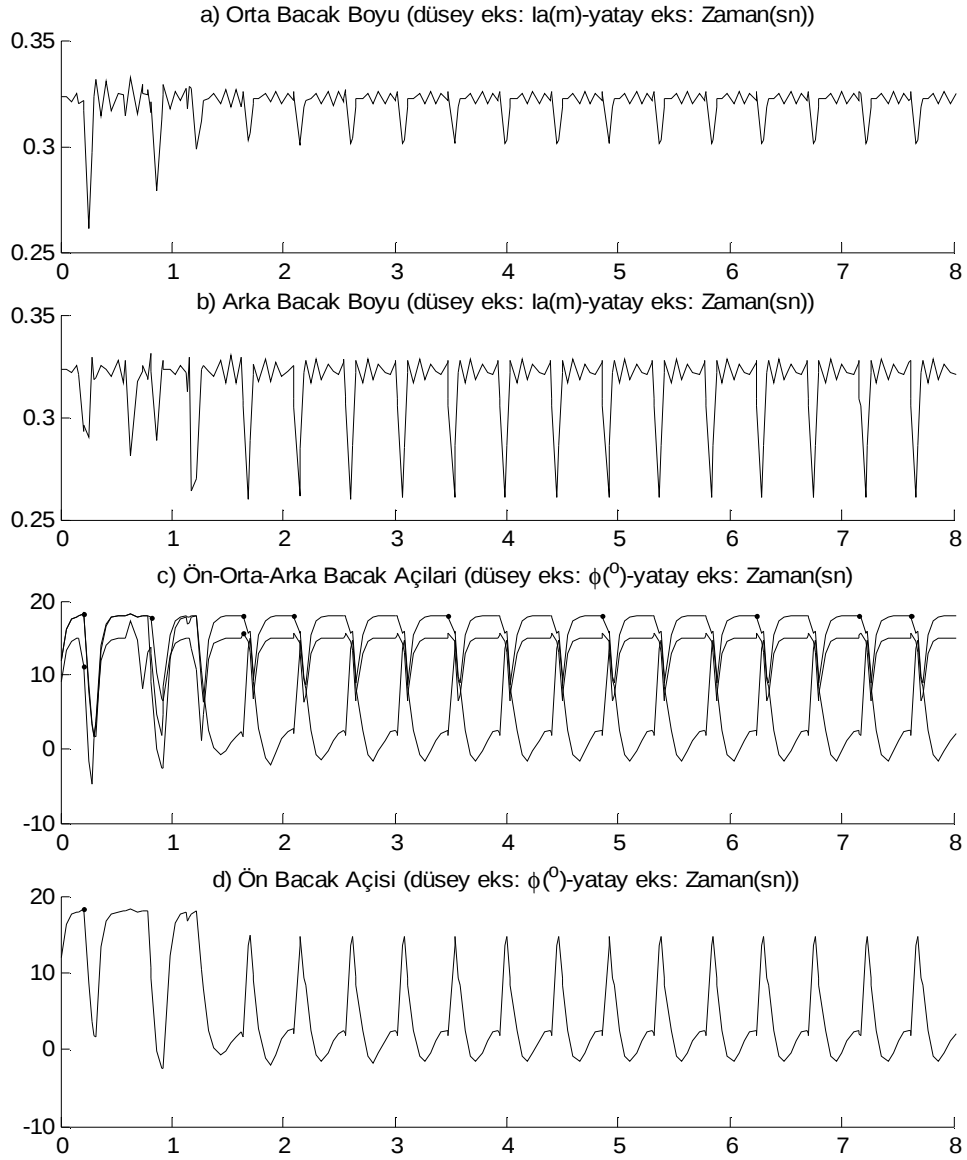
Şekil 9.14 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



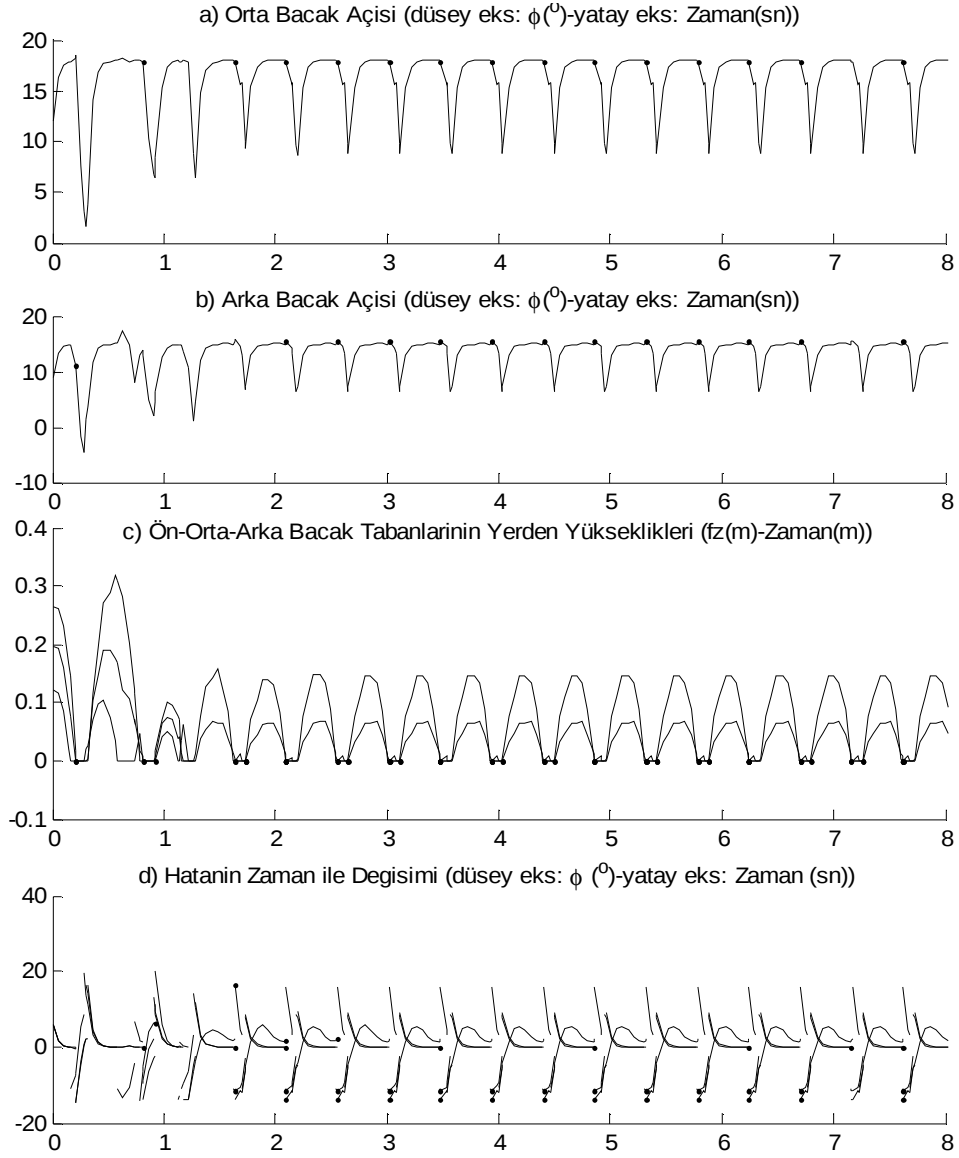
Şekil 9.15 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



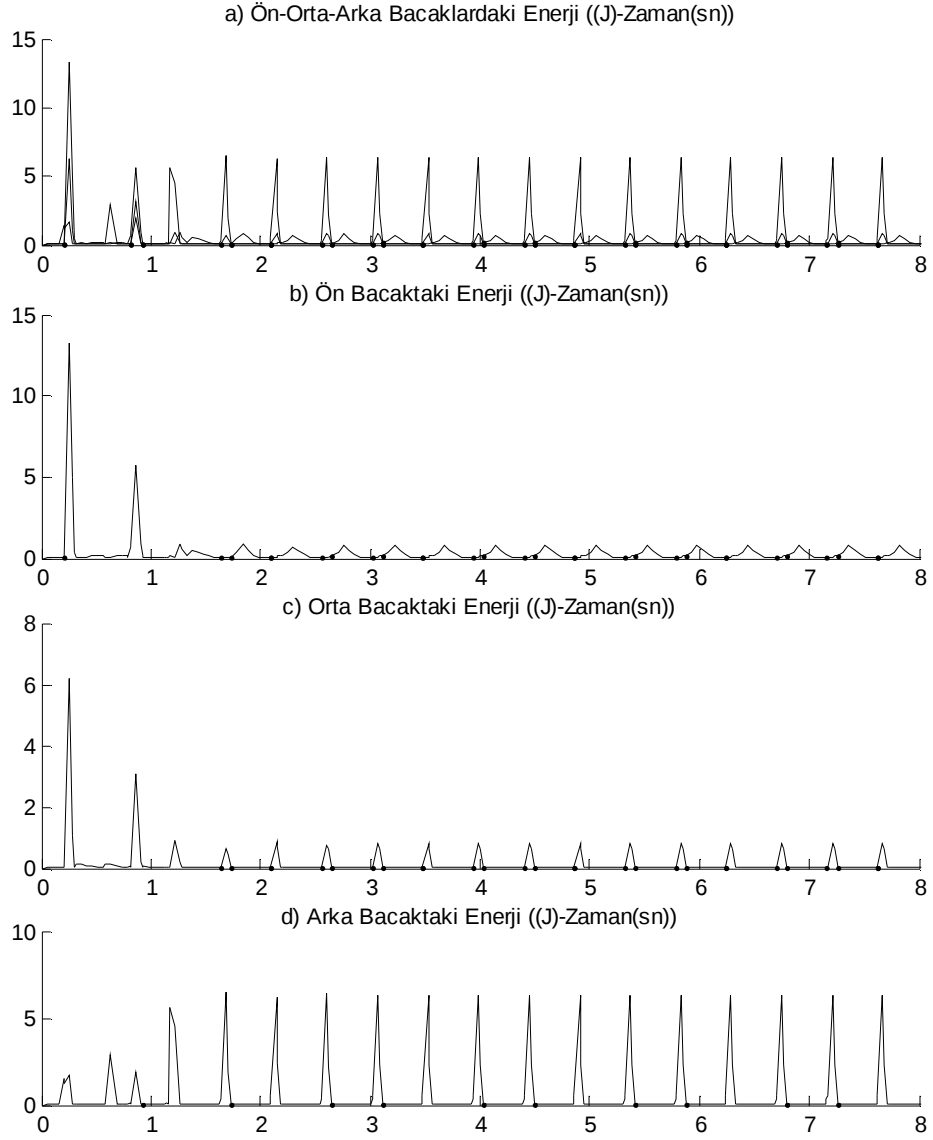
Şekil 9.16 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).
- b) Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- d) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$).



Şekil 9.17 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{orta}^0 (0).
- b) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka}^0 (0).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- d) Hatanın zaman ile değişimi (e).



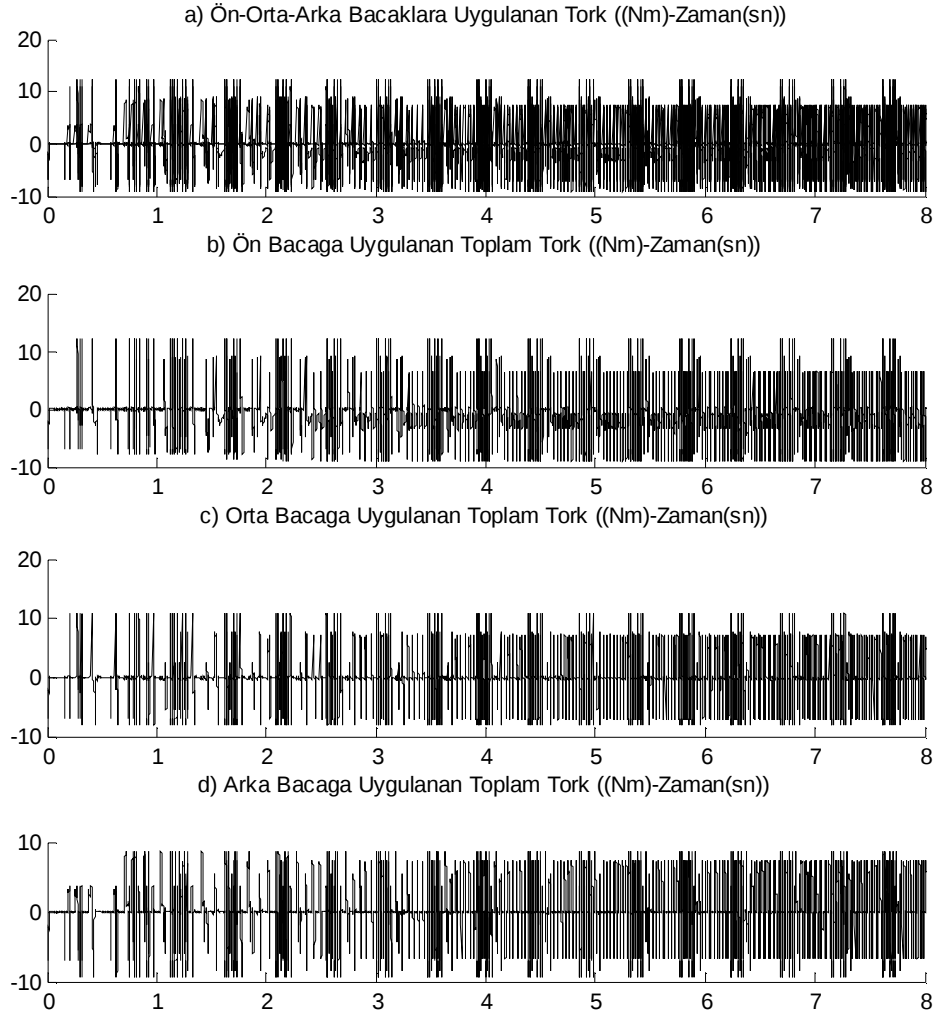
Şekil 9.18 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).

b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).

c) Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J).

d) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).

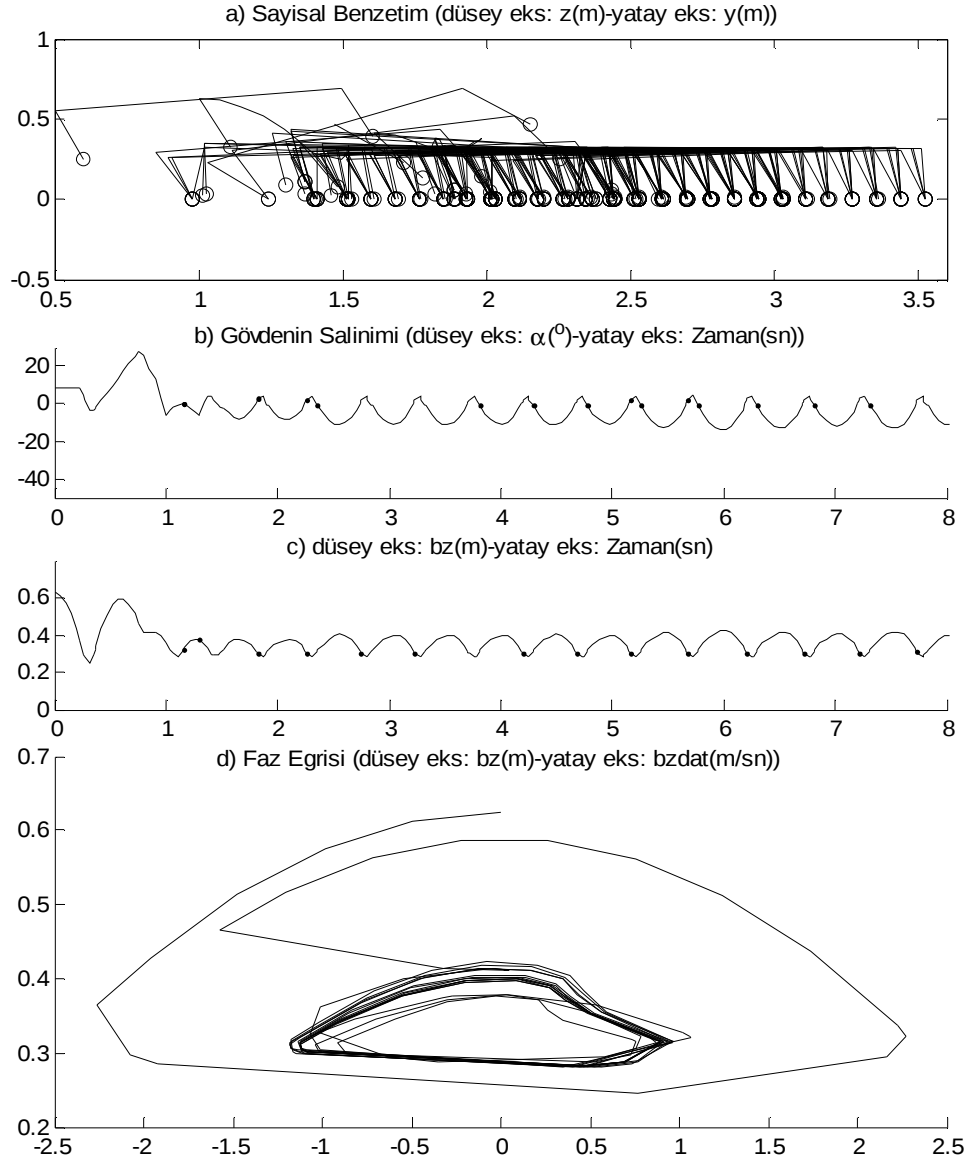


Şekil 9.19 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- c) Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).
- d) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

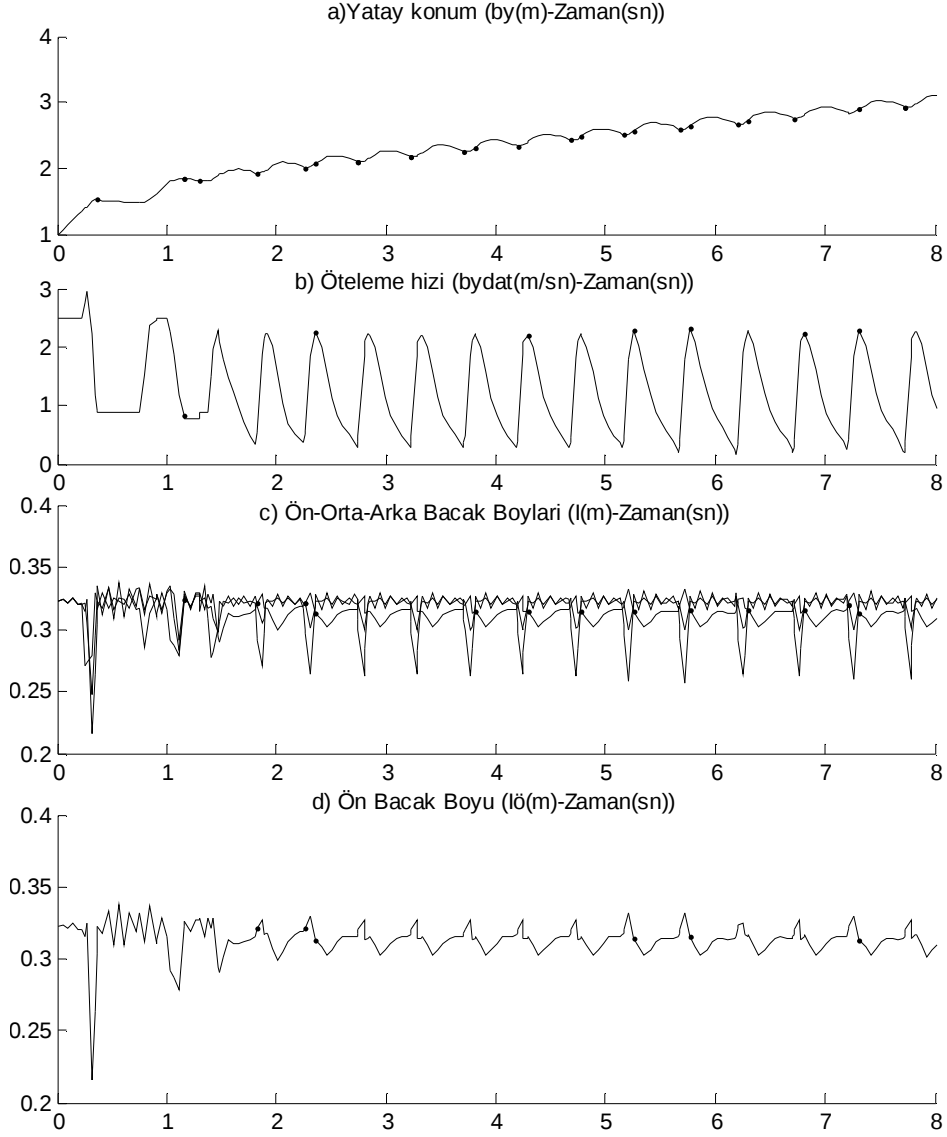
Tablo 9.6 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.

HEXAPOD ROBOT					
6 bacaklı					
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ					
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı	
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)	
50		8		2.5	
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ					
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın Harcadığı Güç	Orta Bacağın Harcadığı Güç	Arka Bacağın Harcadığı Güç	Toplam Harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{orta}	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)	(watt)
3	0.7	175	156	176	509
5	1.4	291	278	271	841
6	1.82	382	374	354	1111
8	2.5	494	495	450	1440



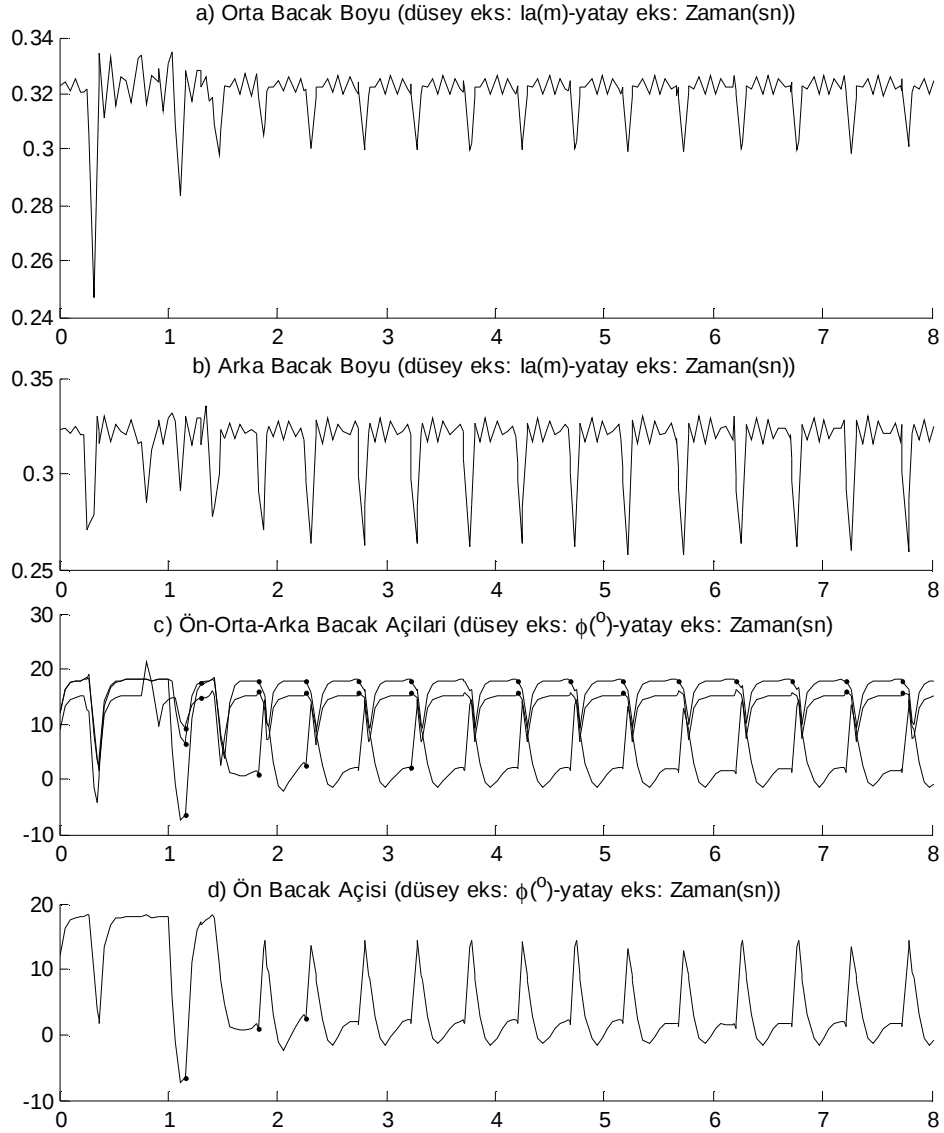
Şekil 9.20 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



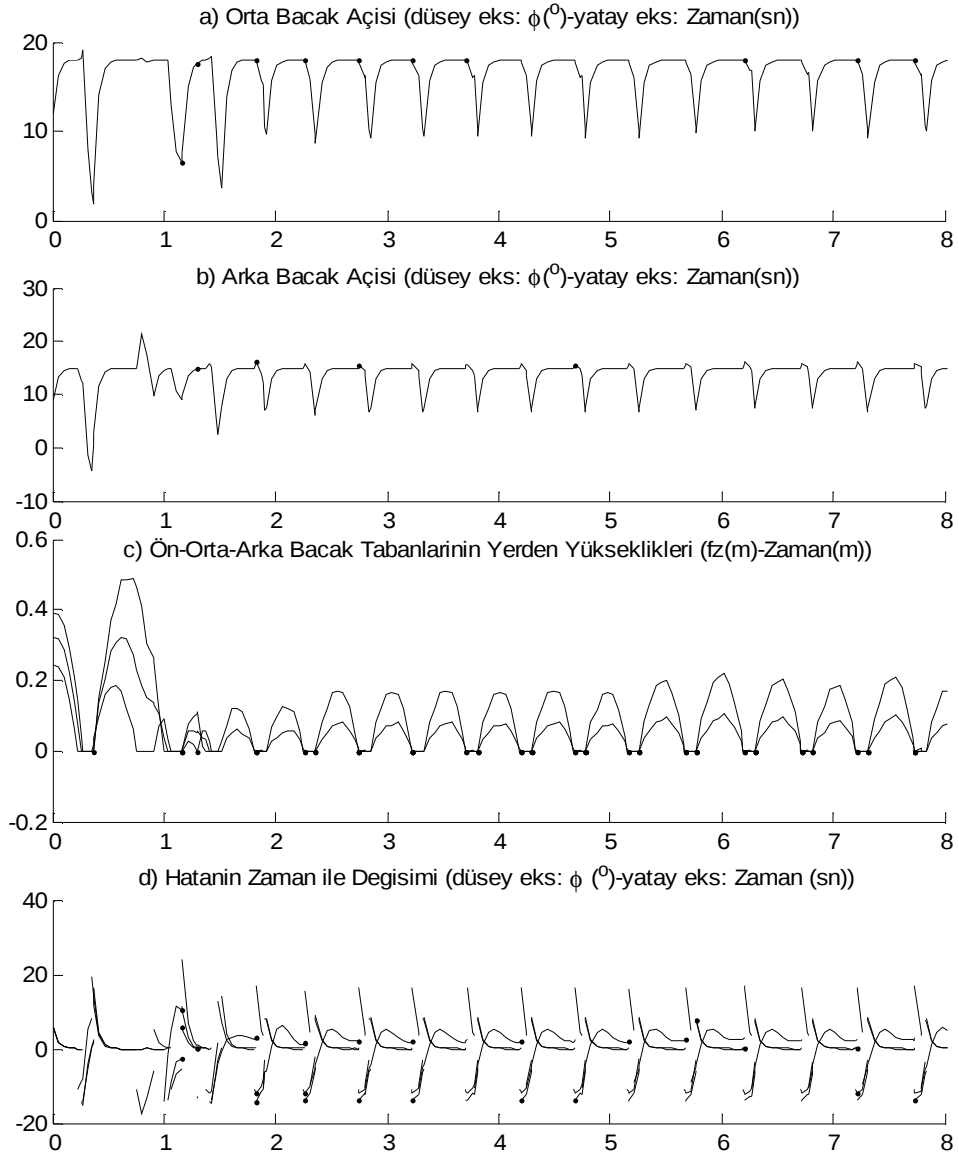
Şekil 9.21 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



Şekil 9.22 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

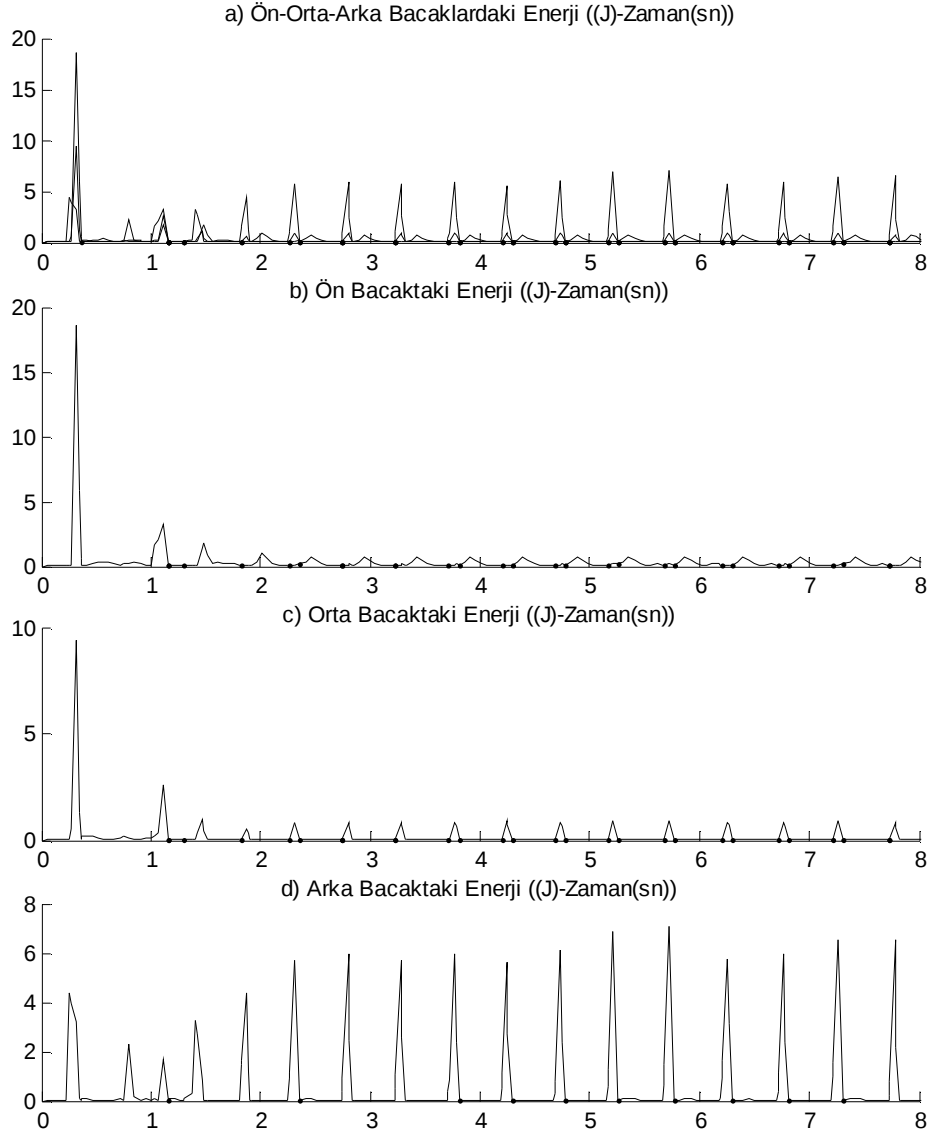
- a) Robotun orta sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).
- b) Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açıl konumları f ($^{\circ}$).
- d) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açıl konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$).



Şekil 9.23 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket

esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{orta} ($^{\circ}$).
- b) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- d) Hatanın zaman ile değişimi (e)..



Şekil 9.24 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji

miktarları E_{top} (J).

b) Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm

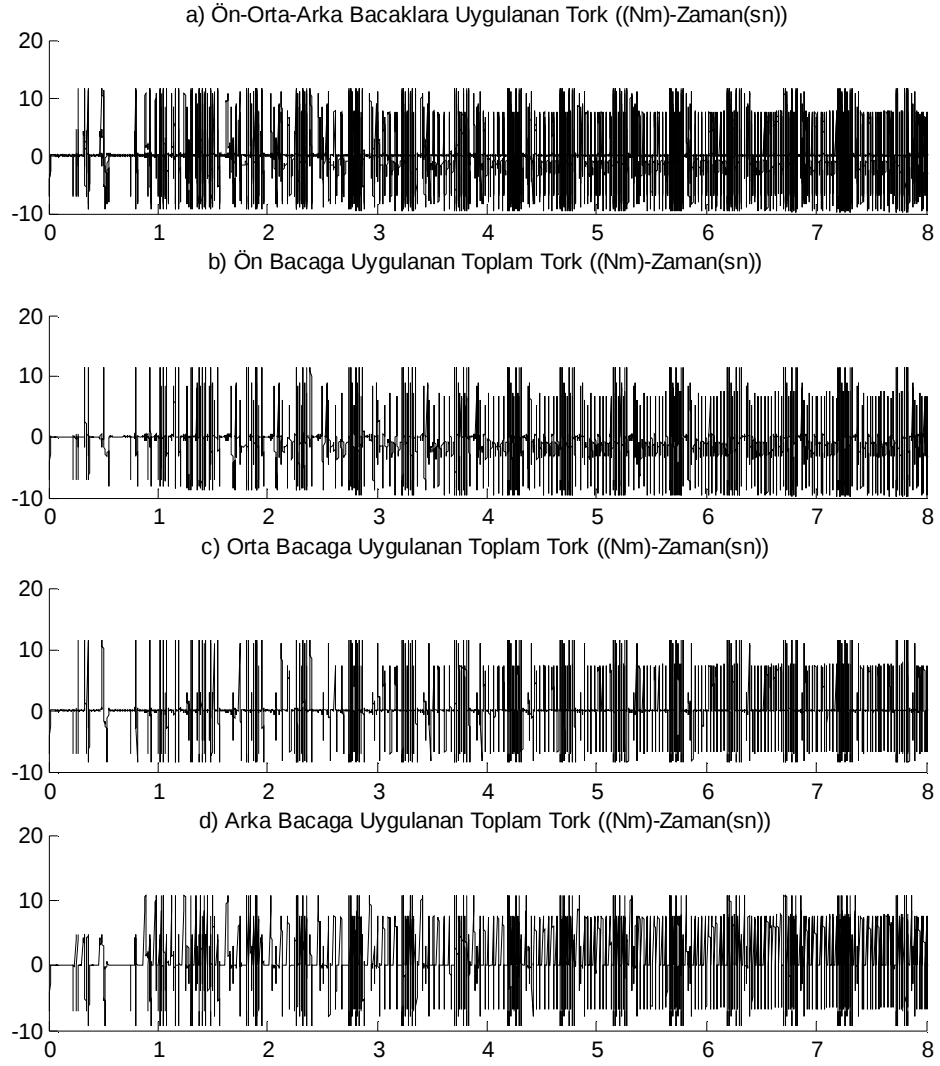
enerji miktarı $E_{ön}$ (J).

c) Robotun orta sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm

enerji miktarı E_{orta} (J).

d) Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji

miktarı E_{arka} (J).

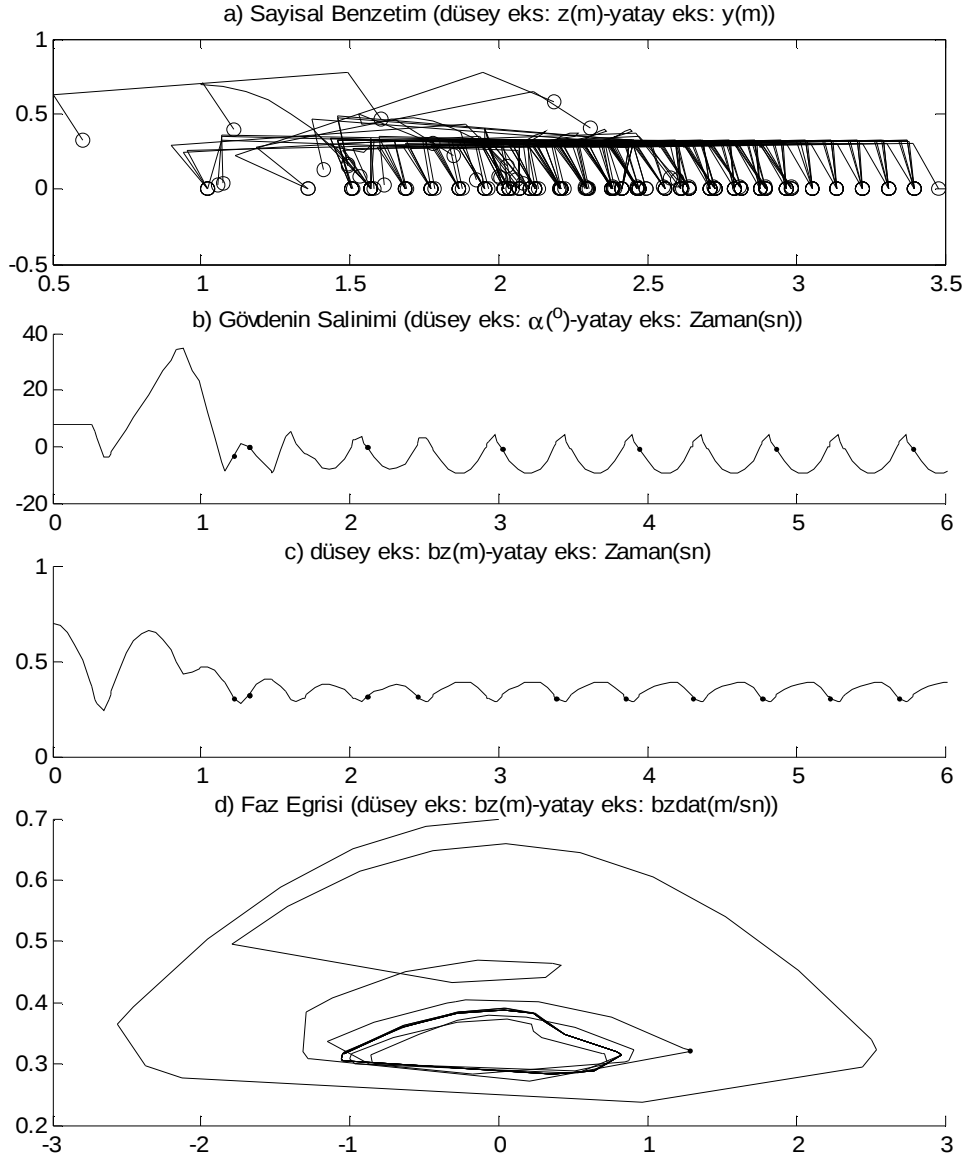


Şekil 9.25 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- c) Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).
- d) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

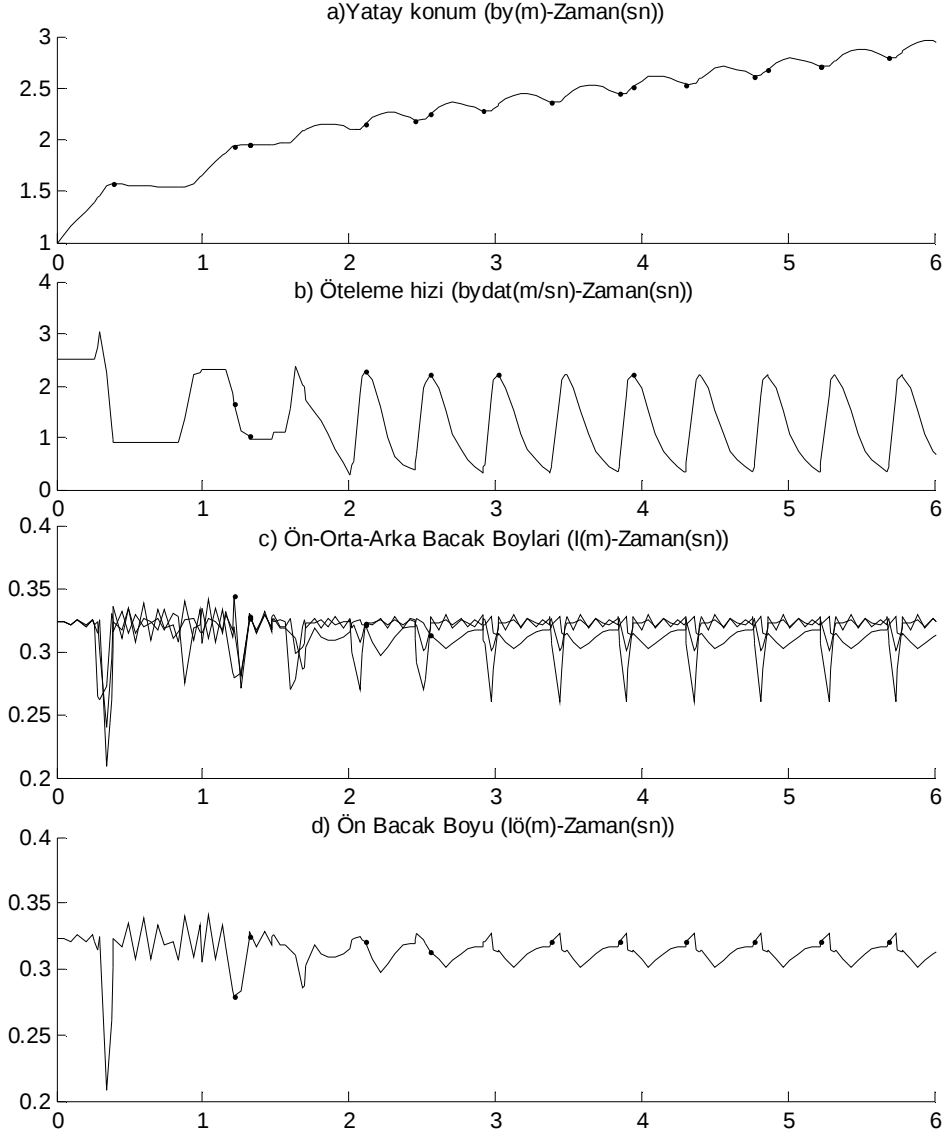
Tablo 9.7 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.

HEXAPOD ROBOT					
6 bacaklı					
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ					
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı	
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)	
60		8		2.5	
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ					
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın Harcadığı Güç	Orta Bacağın Harcadığı Güç	Arka Bacağın Harcadığı Güç	Toplam Harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{orta}	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)	(watt)
3	0.73	200	149	203	553
5	1.46	301	262	291	855
6	1.87	353	314	333	1001
8	2.6	451	414	439	1305



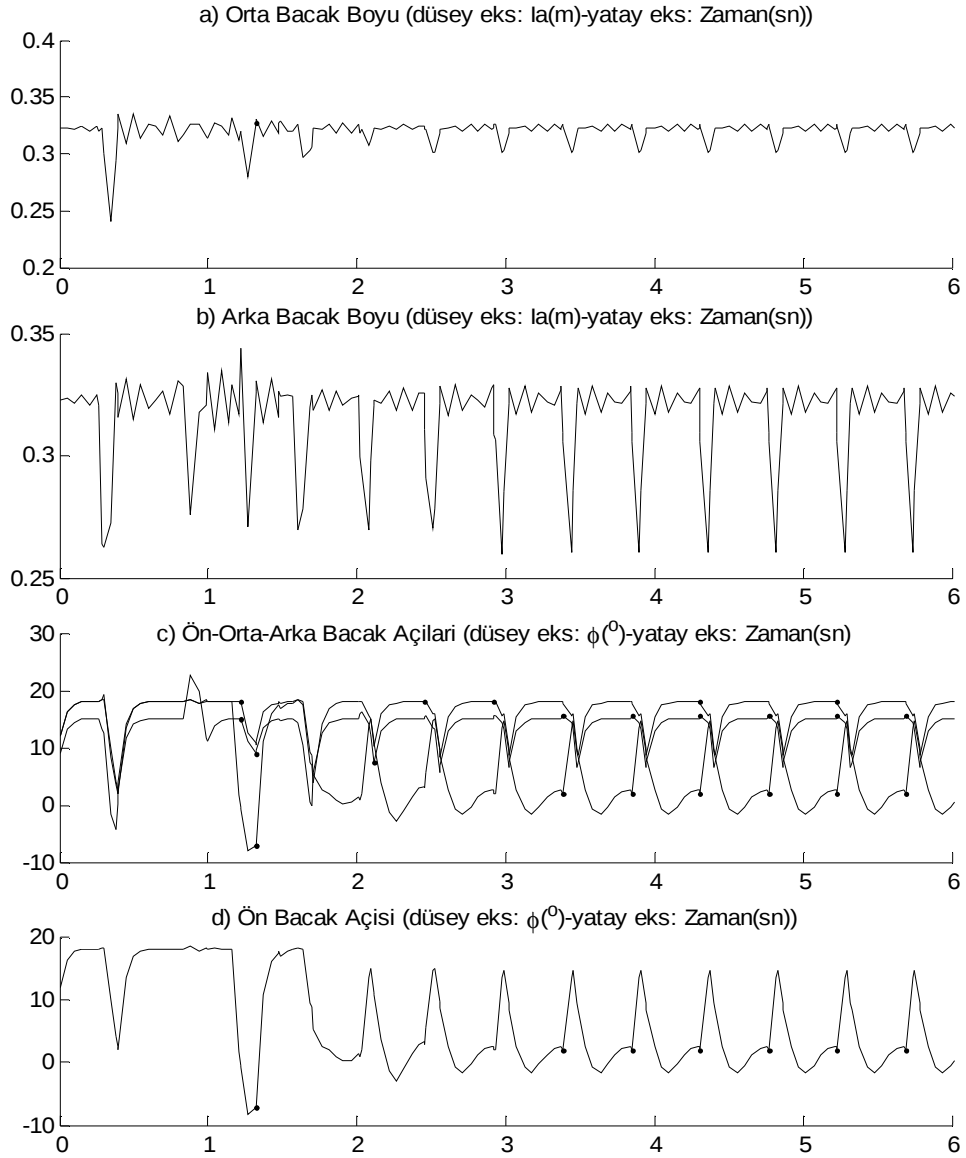
Şekil 9.26 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



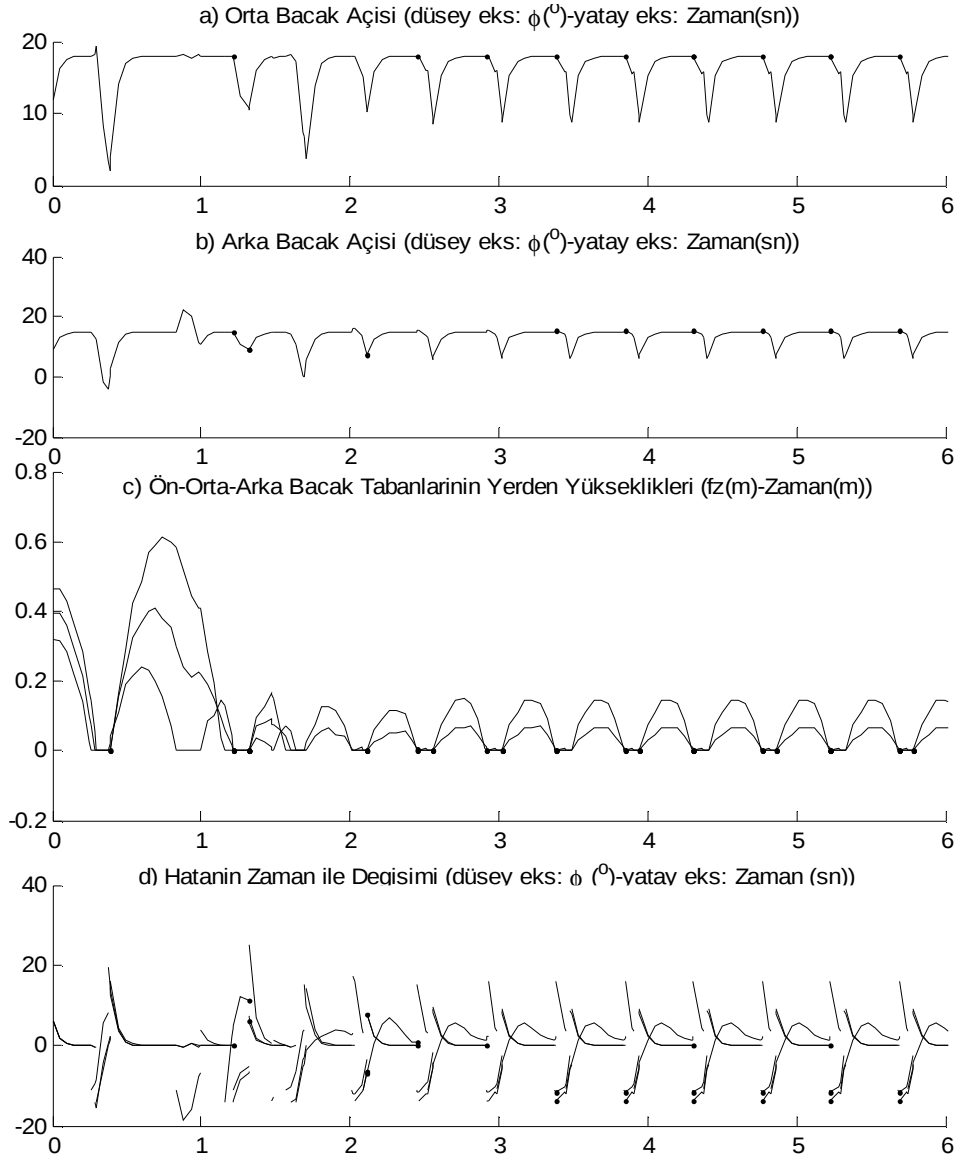
Şekil 9.27 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



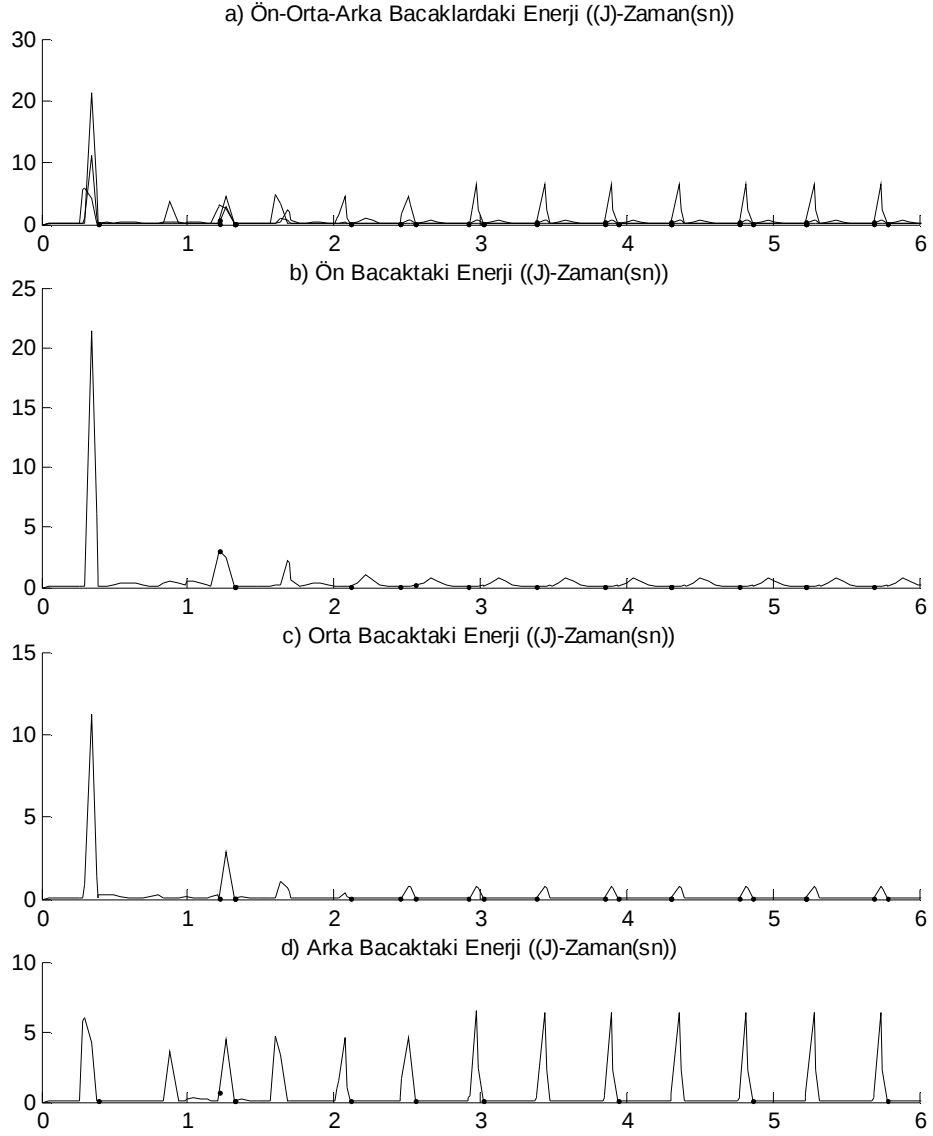
Şekil 9.28 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).
- b) Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- d) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$)



Şekil 9.29 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{orta} (^{\circ})$.
- b) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{arka} (^{\circ})$.
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- d) Kontrolörün zamana bağlı olarak hata grafiği (e).



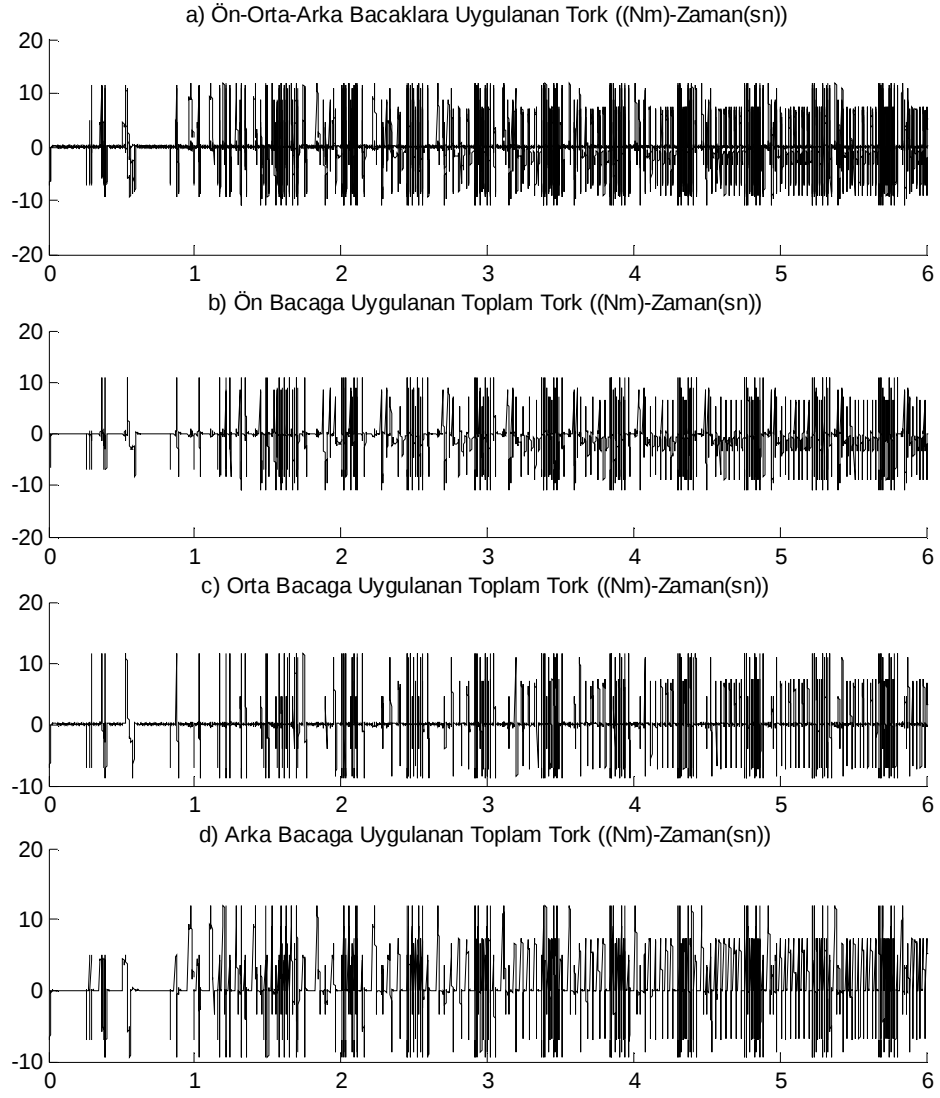
Şekil 9.30 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).

b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).

c) Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J).

d) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).

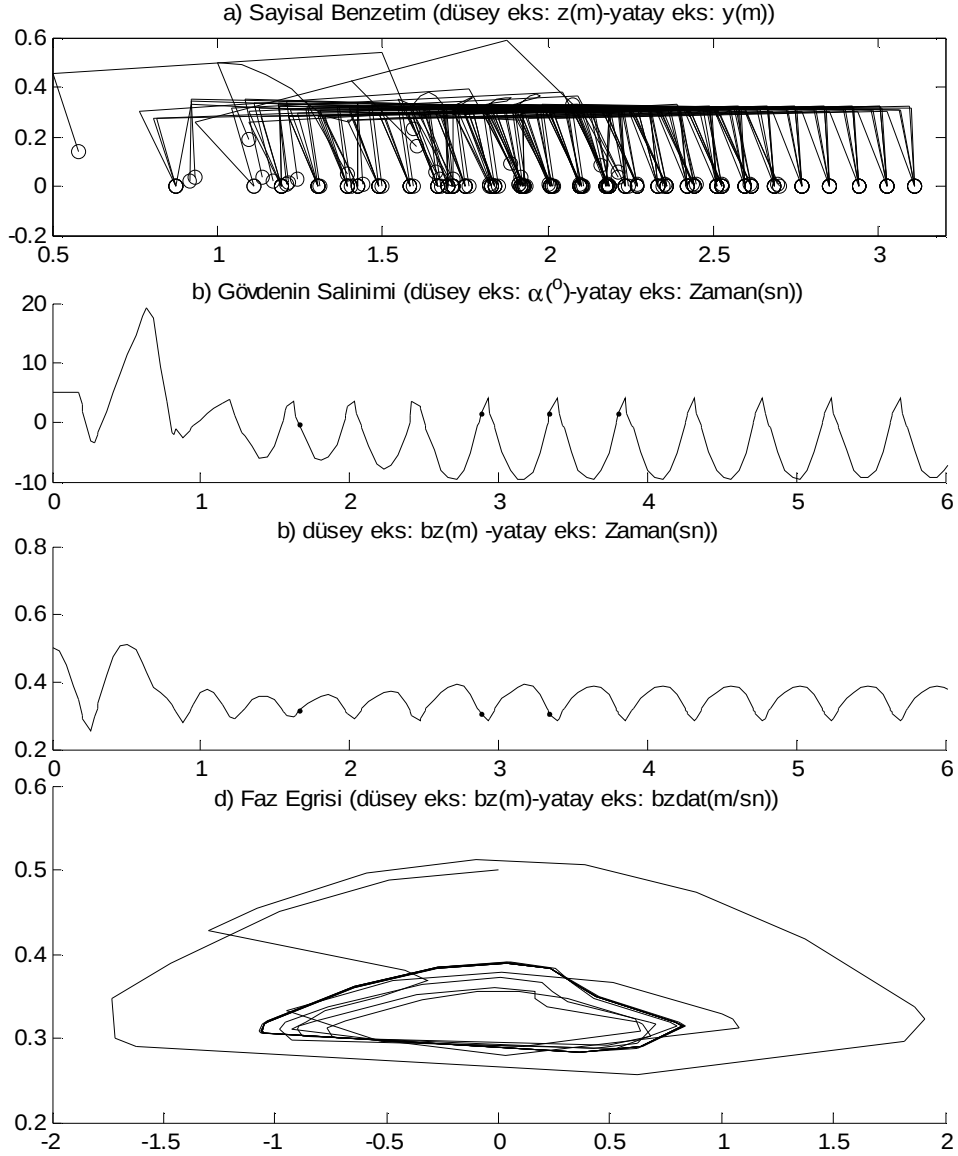


Şekil 9.31 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- c) Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).
- d) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

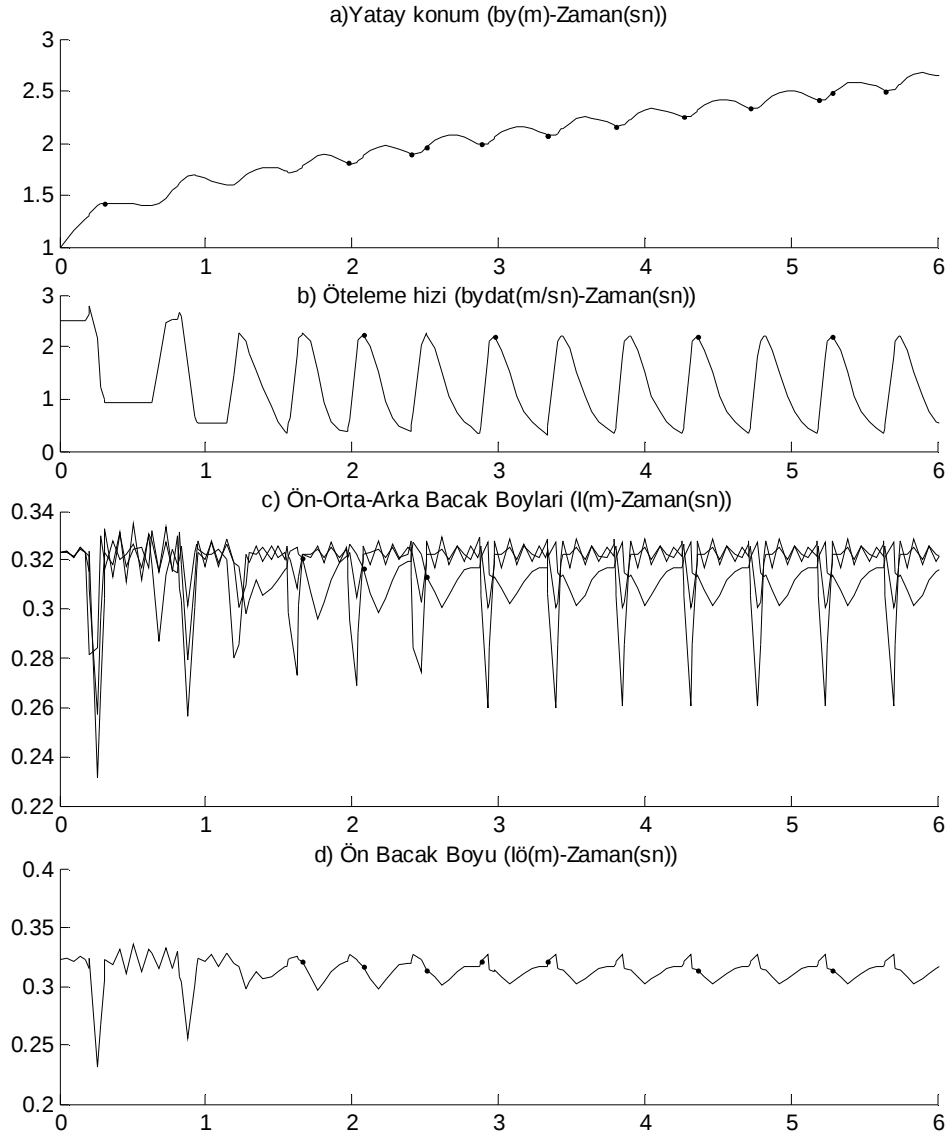
Tablo 9.8 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.

HEXAPOD ROBOT					
6 bacaklı					
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ					
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı	
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)	
70		8		2.5	
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ					
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın Harcadığı Güç	Orta Bacağın Harcadığı Güç	Arka Bacağın Harcadığı Güç	Toplam Harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{orta}	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)	(watt)
3	1.2	186	142	223	552
5	2.0	298	260	316	875
6	2.5	349	316	359	1025



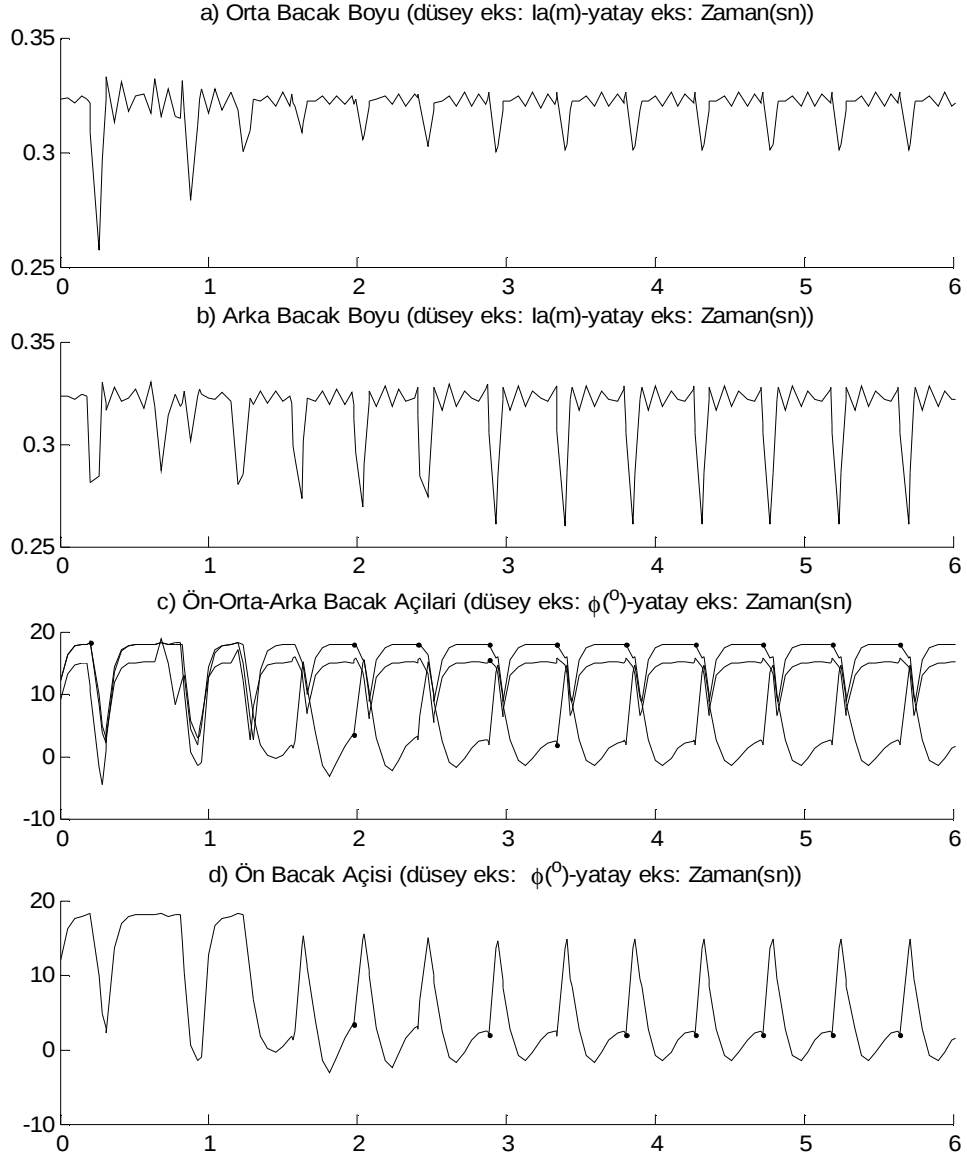
Şekil 9.32 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



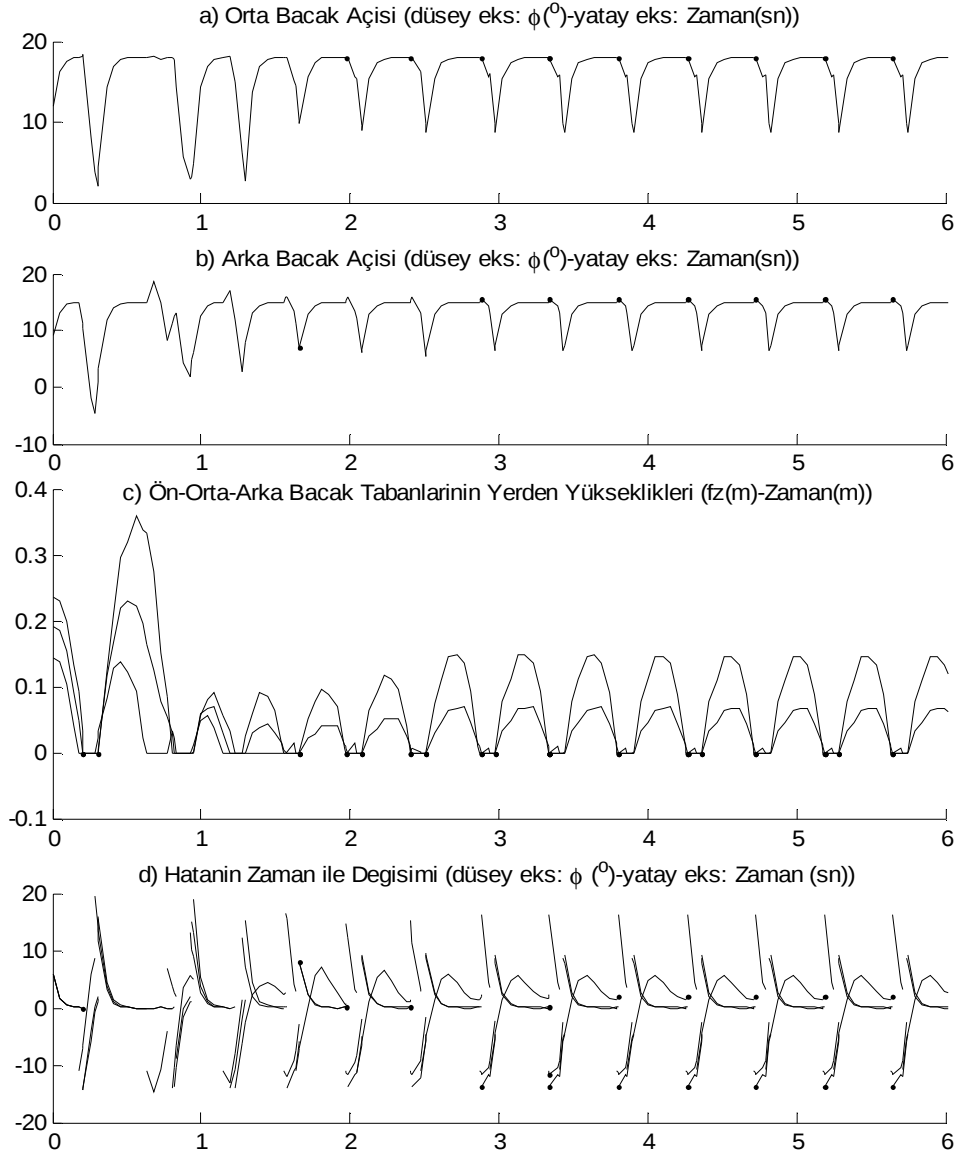
Şekil 9.33 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



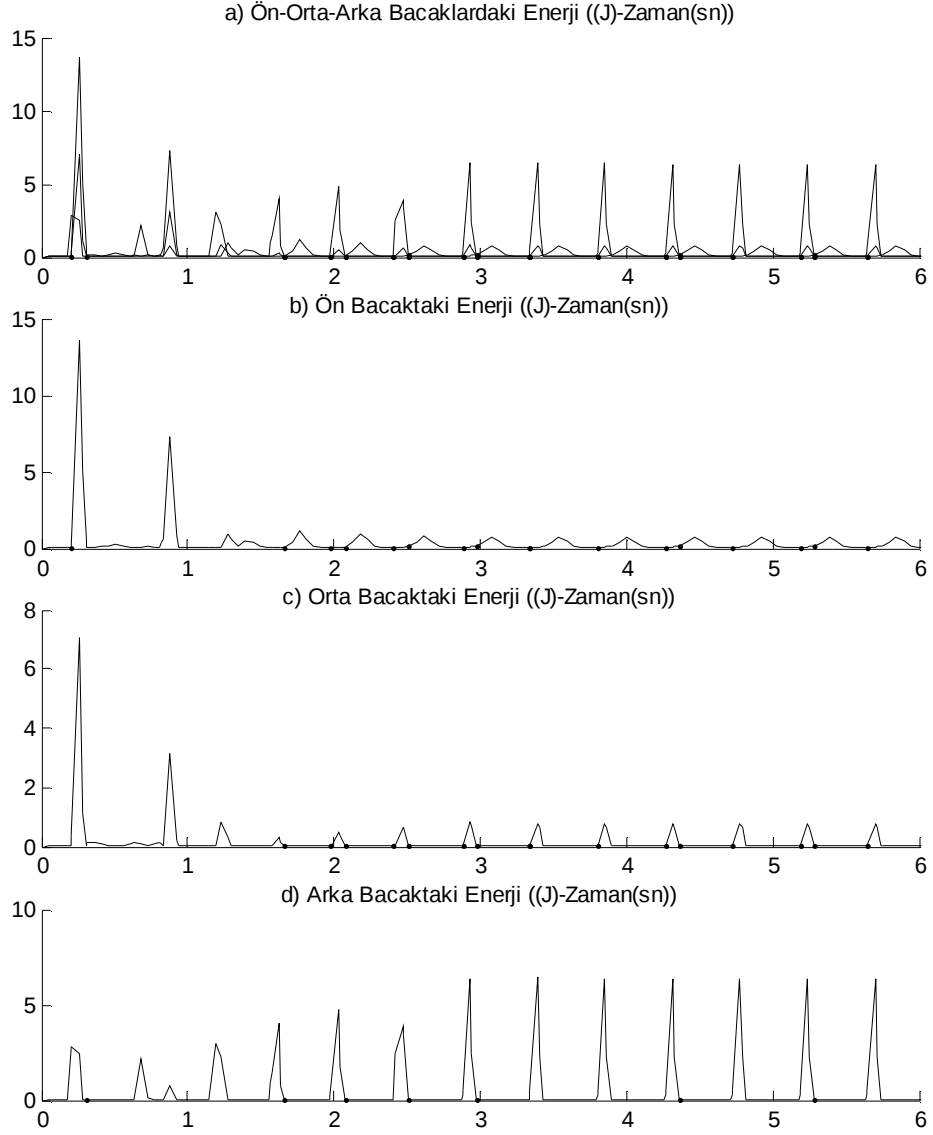
Şekil 9.34 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).
- b) Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- d) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$).



Şekil 9.35 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{orta} (^{\circ})$.
- b) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{arka} (^{\circ})$.
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri $f_z (m)$.
- d) Hatanın zaman ile değişimi (e).



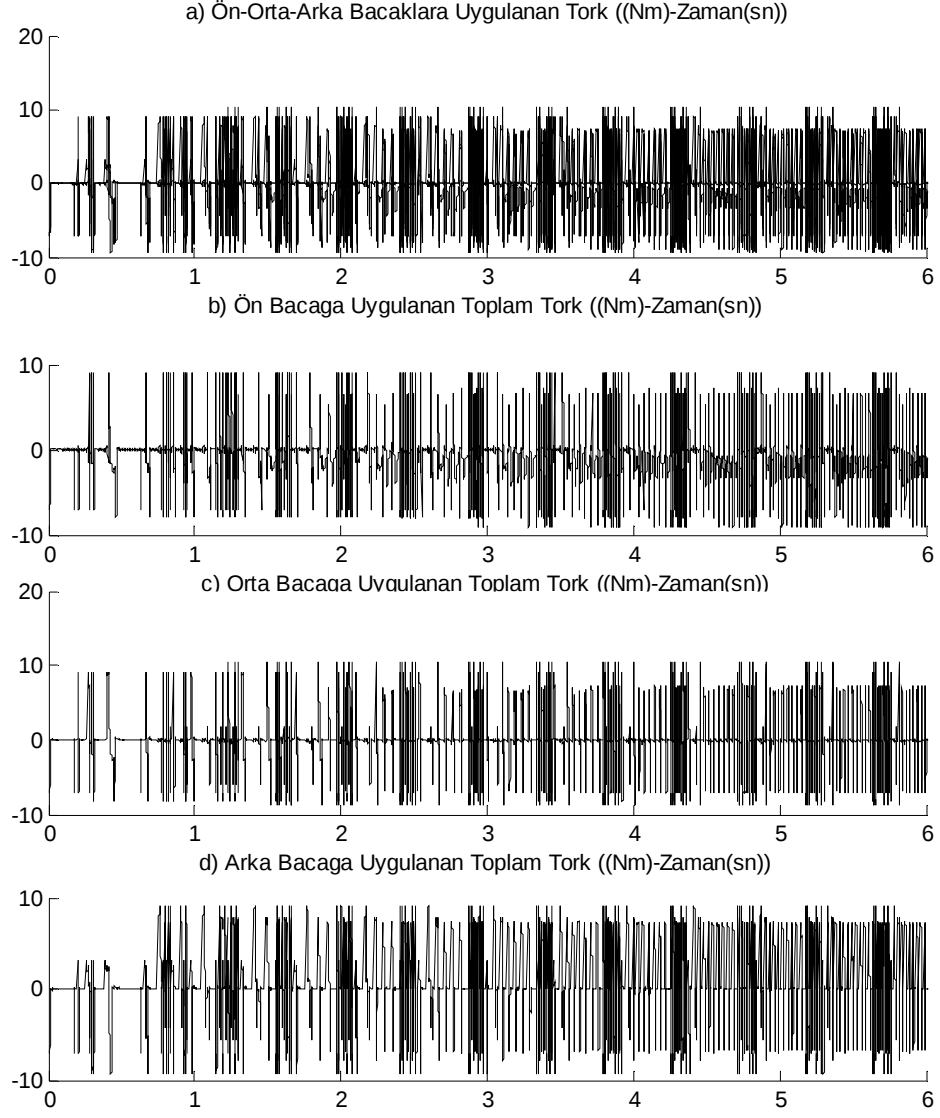
Şekil 9.36 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).

b) Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).

c) Robotun orta sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J).

d) Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).

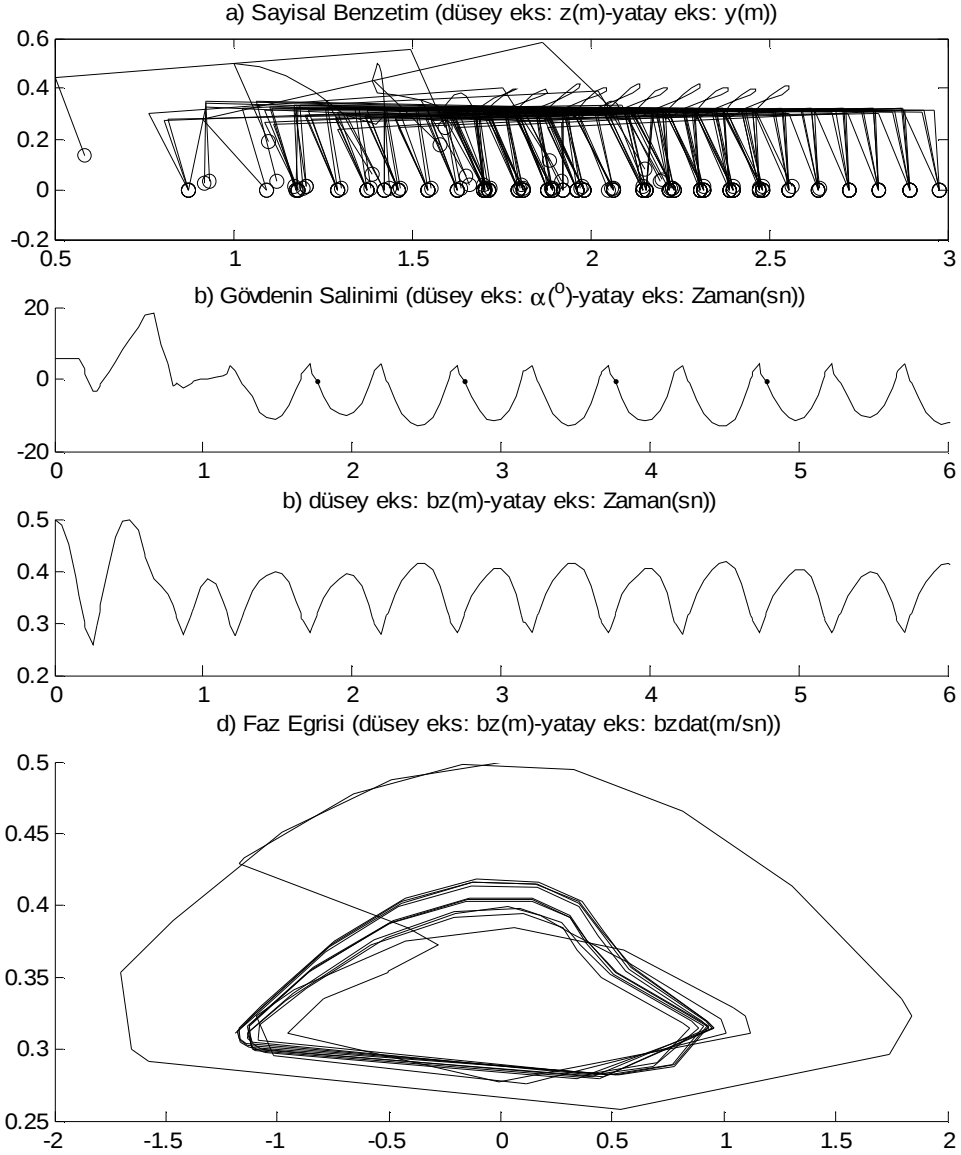


Şekil 9.37 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- c) Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).
- d) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm)

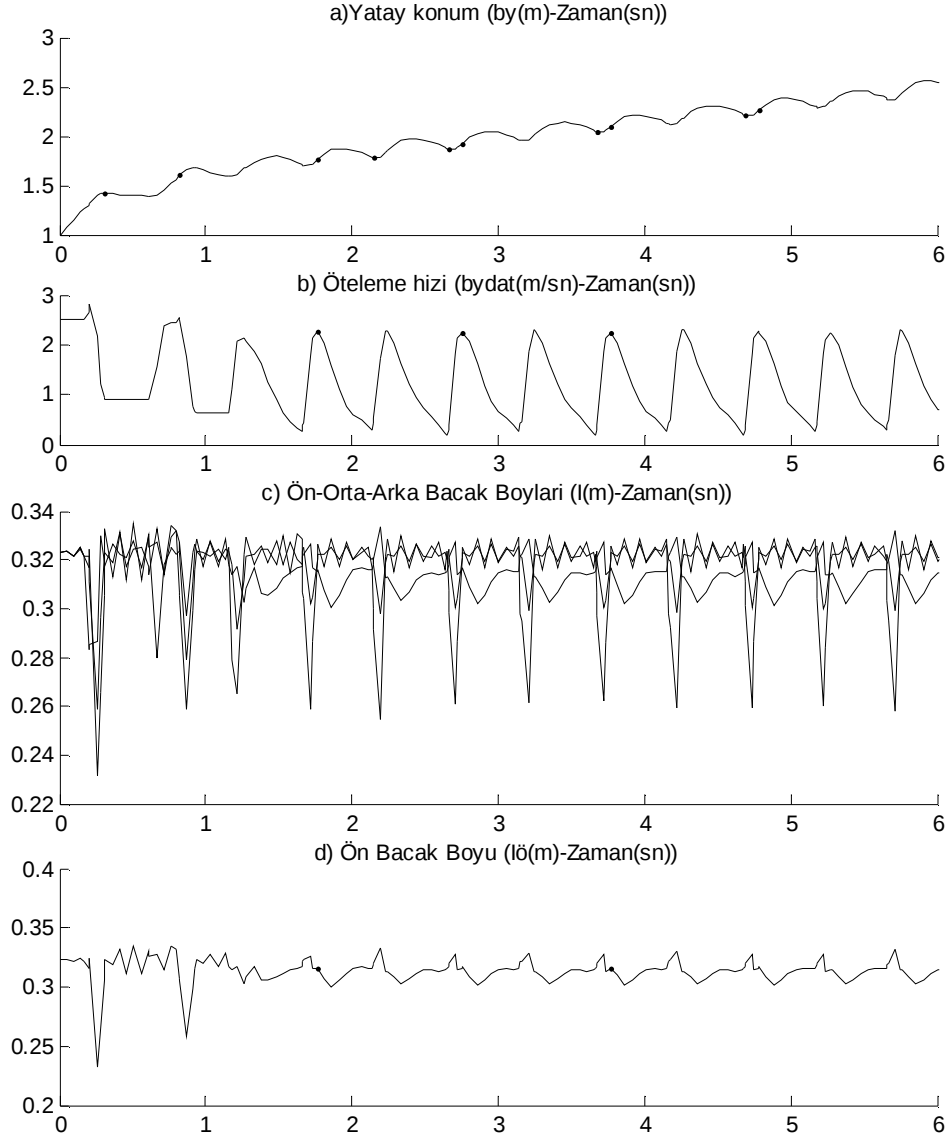
Tablo 9.9 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.

HEXAPOD ROBOT					
6 bacaklı					
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ					
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı	
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)	
50		5		2.5	
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ					
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın Harcadığı Güç	Orta Bacağın Harcadığı Güç	Arka Bacağın Harcadığı Güç	Toplam Harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{orta}	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)	(watt)
3	0.8	162	153	212	528
5	1.74	261	262	298	823
6	2.2	313	318	345	977



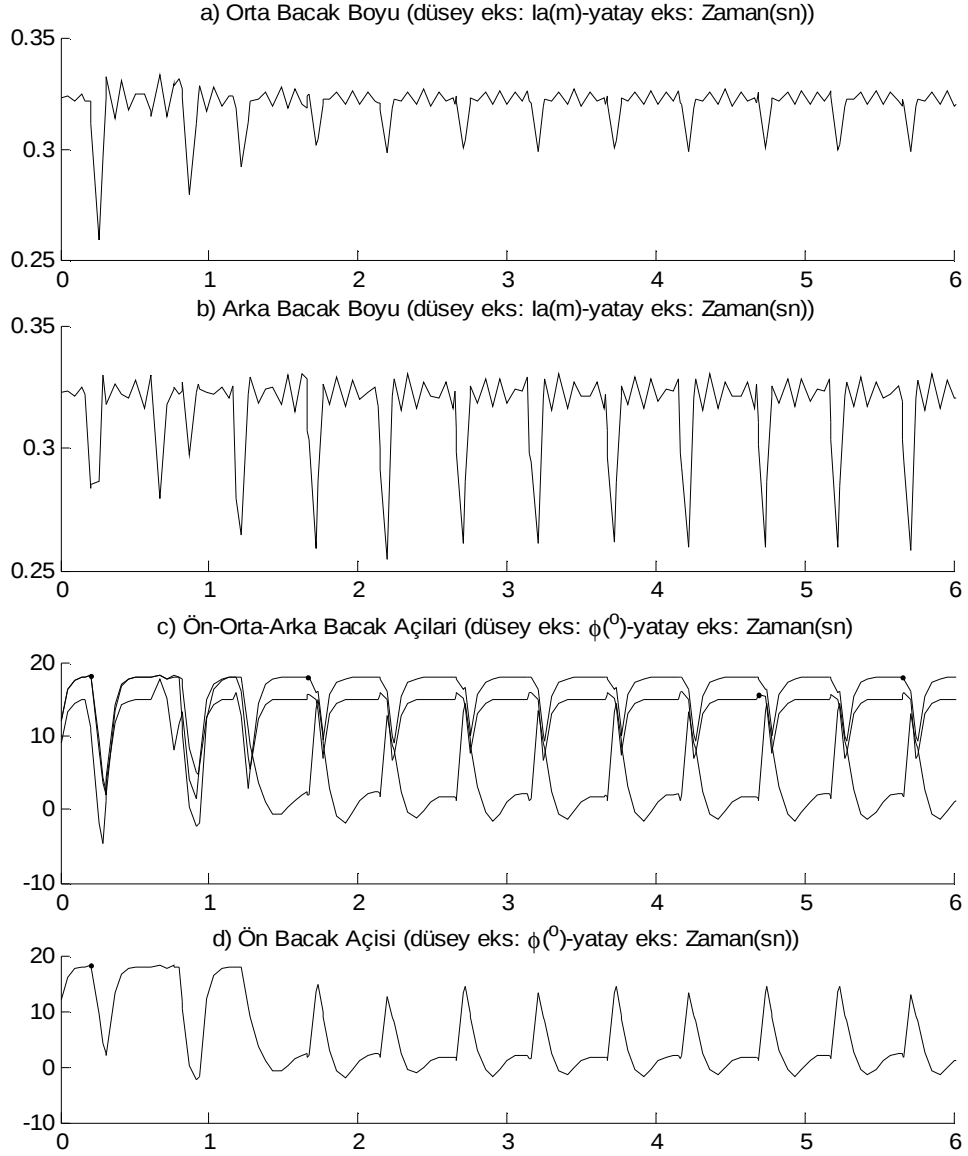
Şekil 9.38 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayisal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



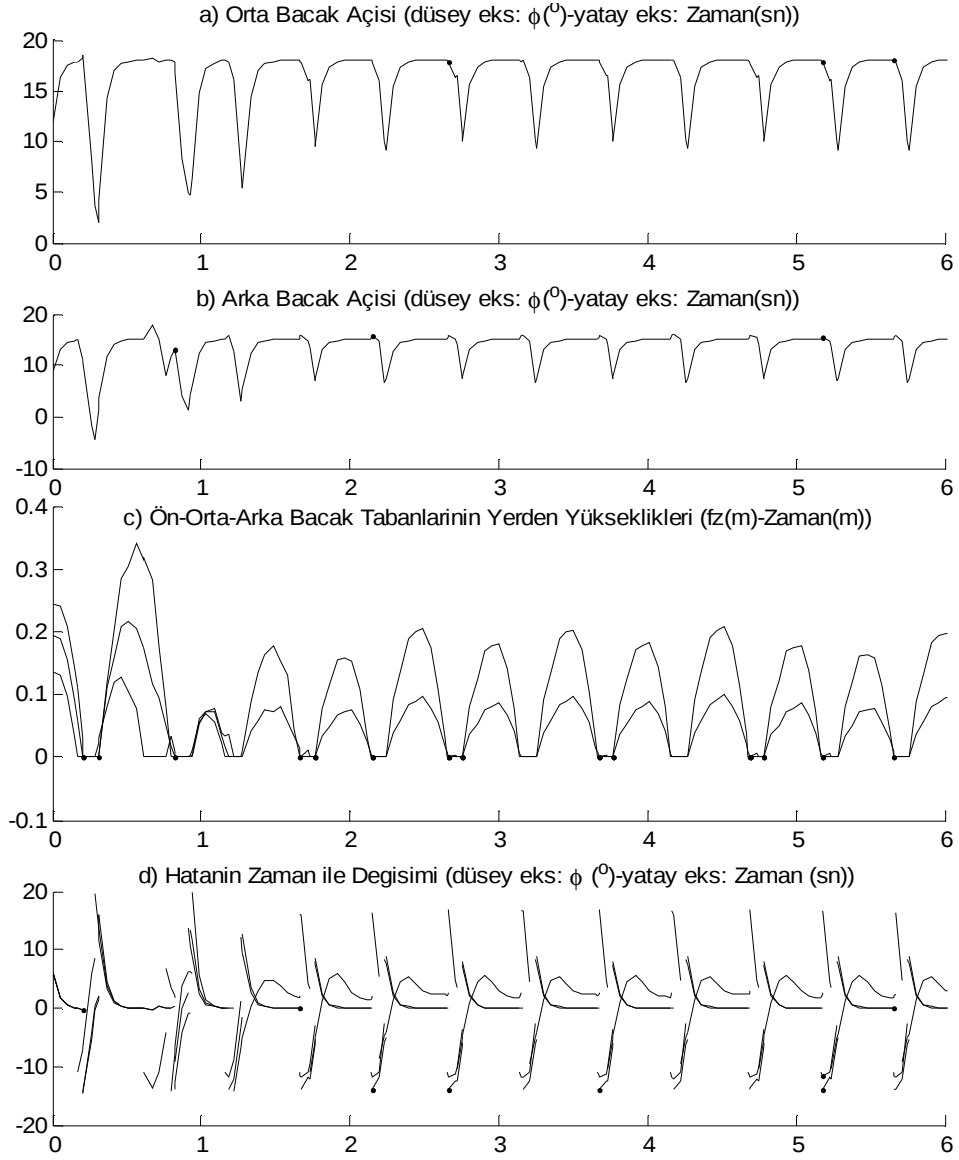
Şekil 9.39 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



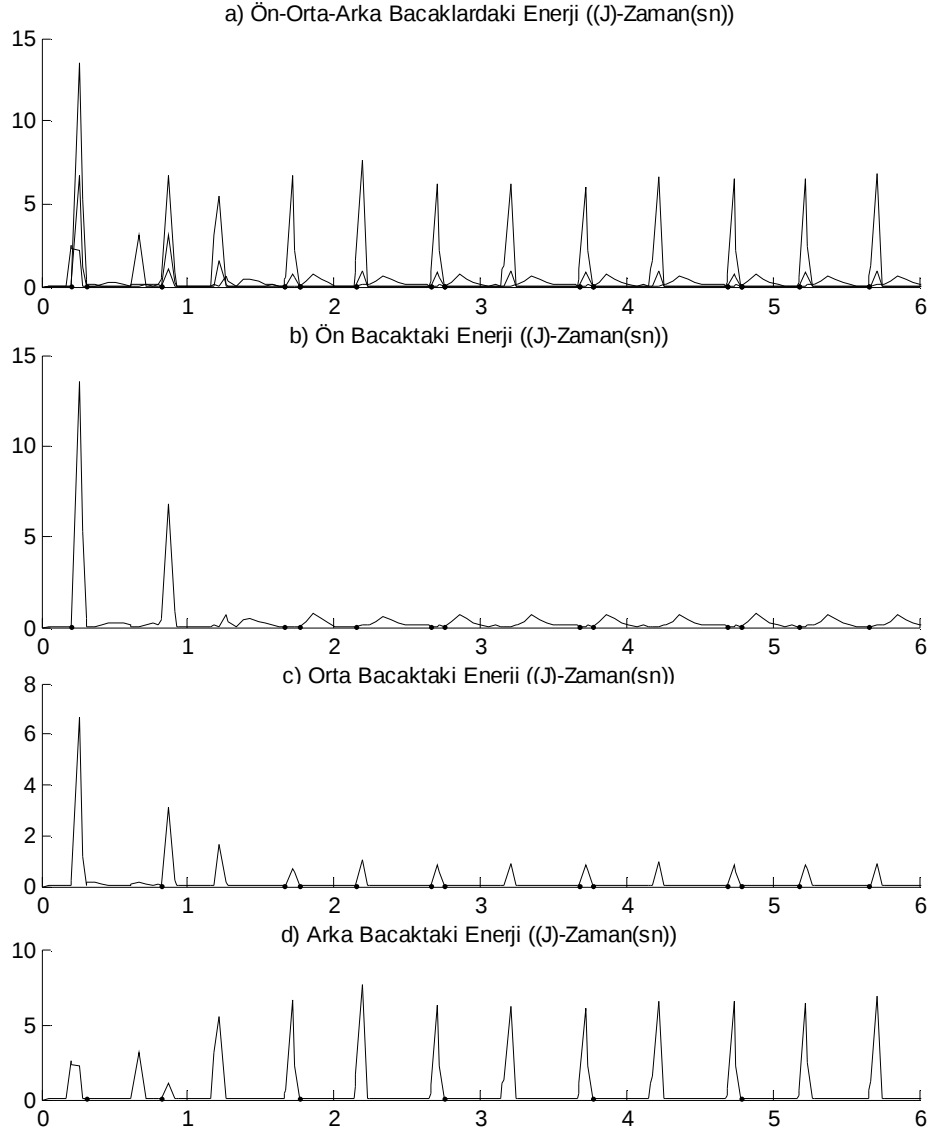
Şekil 9.40 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).
- b) Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- d) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$).



Şekil 9.41 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{orta} (^{\circ})$.
- b) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{arka} (^{\circ})$.
- c) Robotun ön-orta-arka bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri $f_z (m)$.
- d) Hatanın zaman ile değişimi (e).



Şekil 9.42 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm

enerji miktarları E_{top} (J).

b) Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm

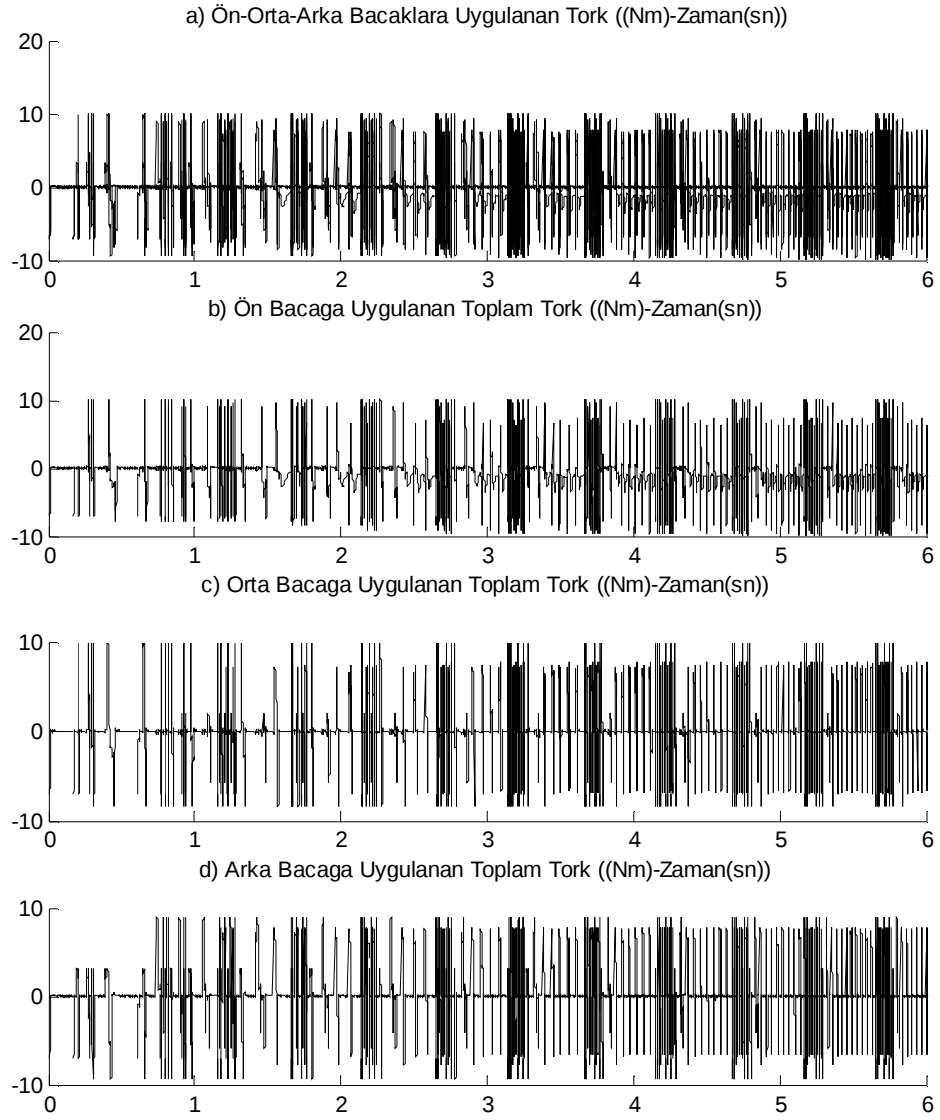
enerji miktarı $E_{ön}$ (J).

c) Robotun orta sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm

enerji miktarı E_{orta} (J).

d) Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm

enerji miktarı E_{arka} (J).

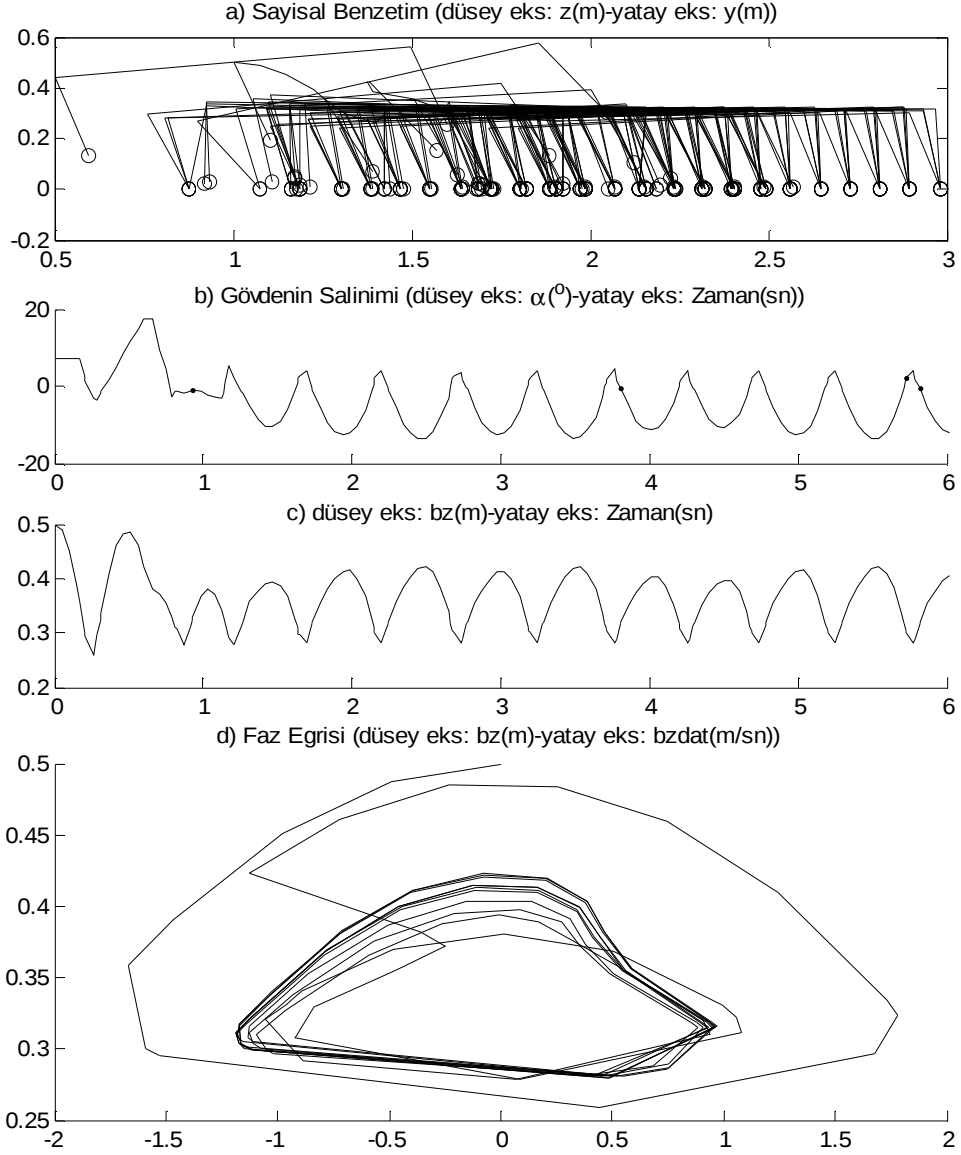


Şekil 9.43 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- c) Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).
- d) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

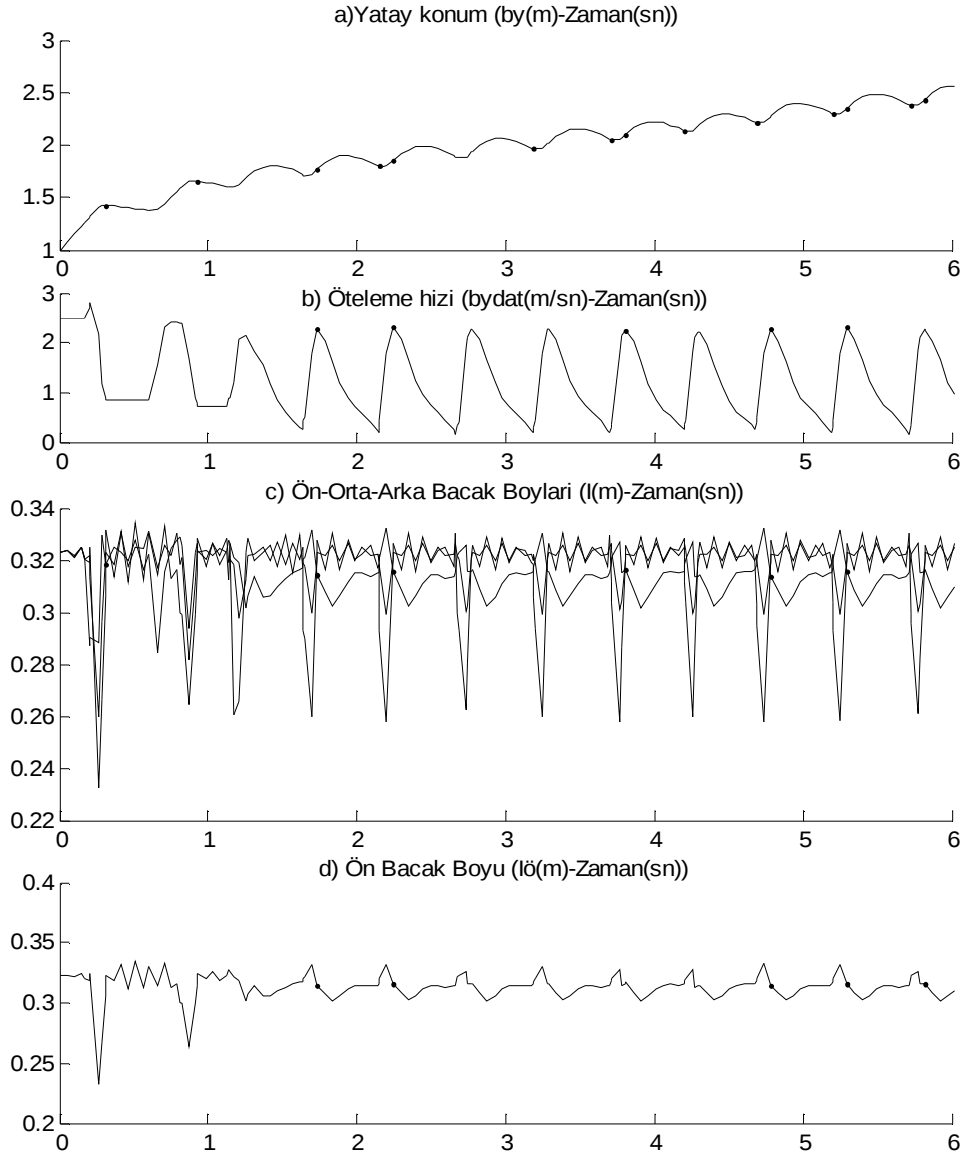
Tablo 9.10 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.

HEXAPOD ROBOT					
6 bacaklı					
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ					
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı	
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)	
50		6		2.5	
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ					
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın Harcadığı Güç	Orta Bacağın Harcadığı Güç	Arka Bacağın Harcadığı Güç	Toplam Harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{orta}	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)	(watt)
3	0.79	150	135	171	458
5	1.66	247	234	271	754
6	2.0	300	290	313	905



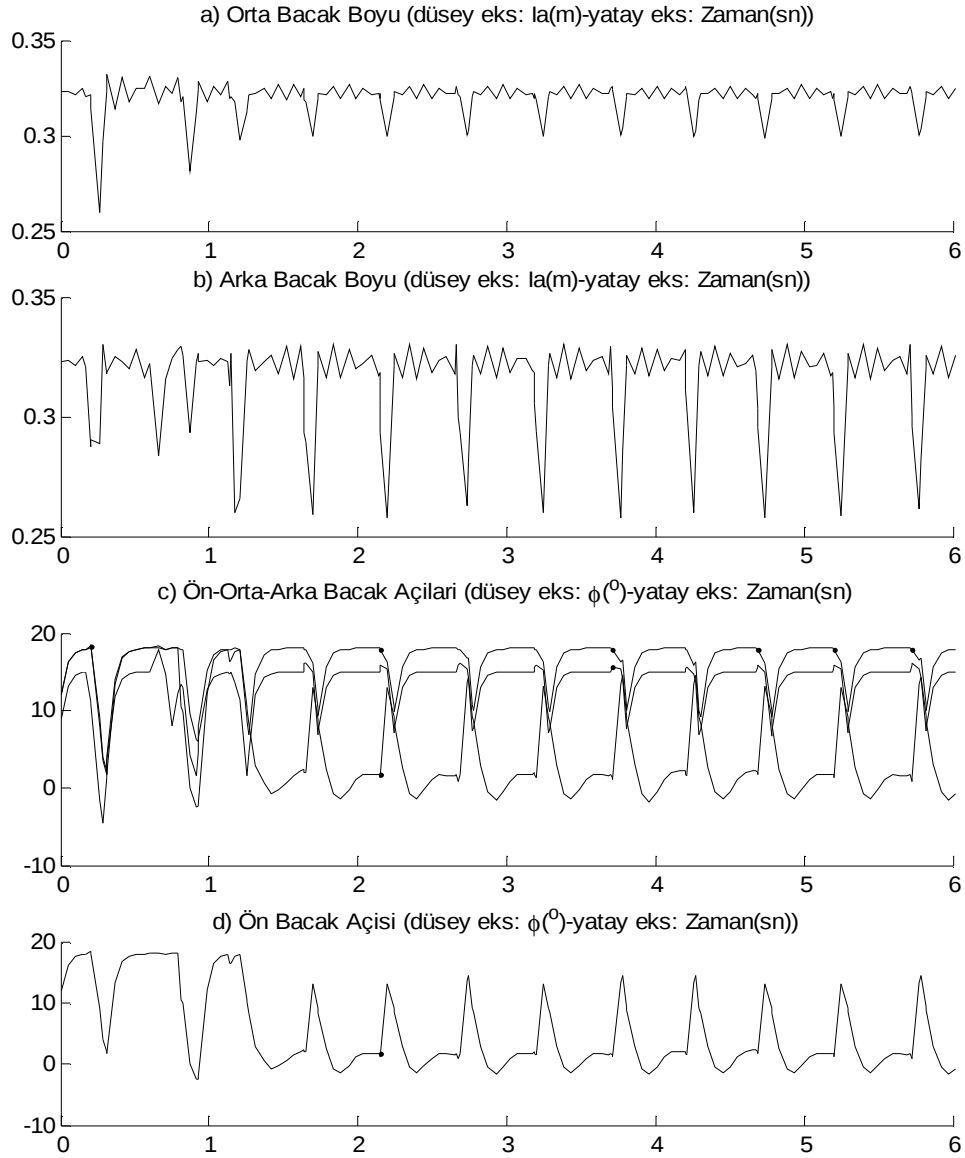
Şekil 9.44 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



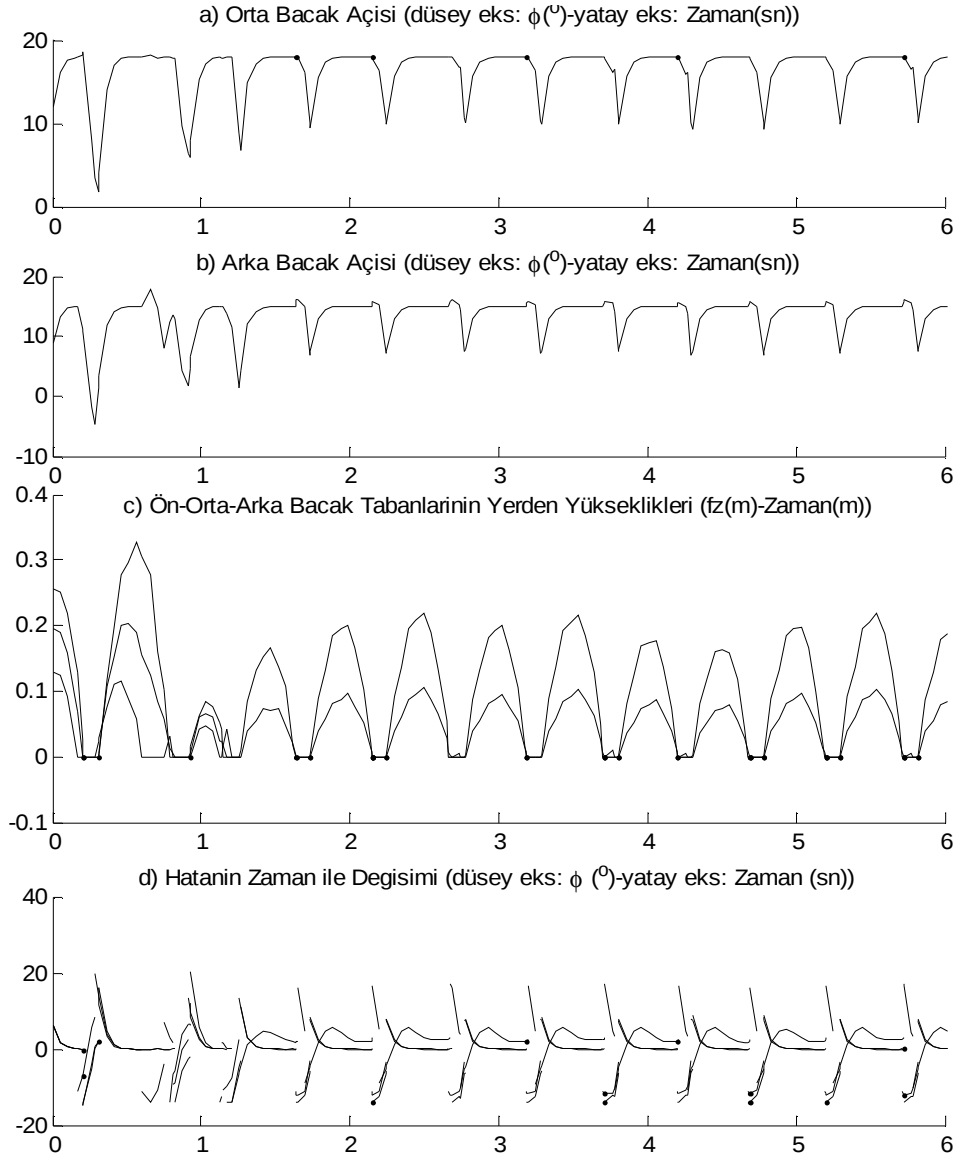
Şekil 9.45 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



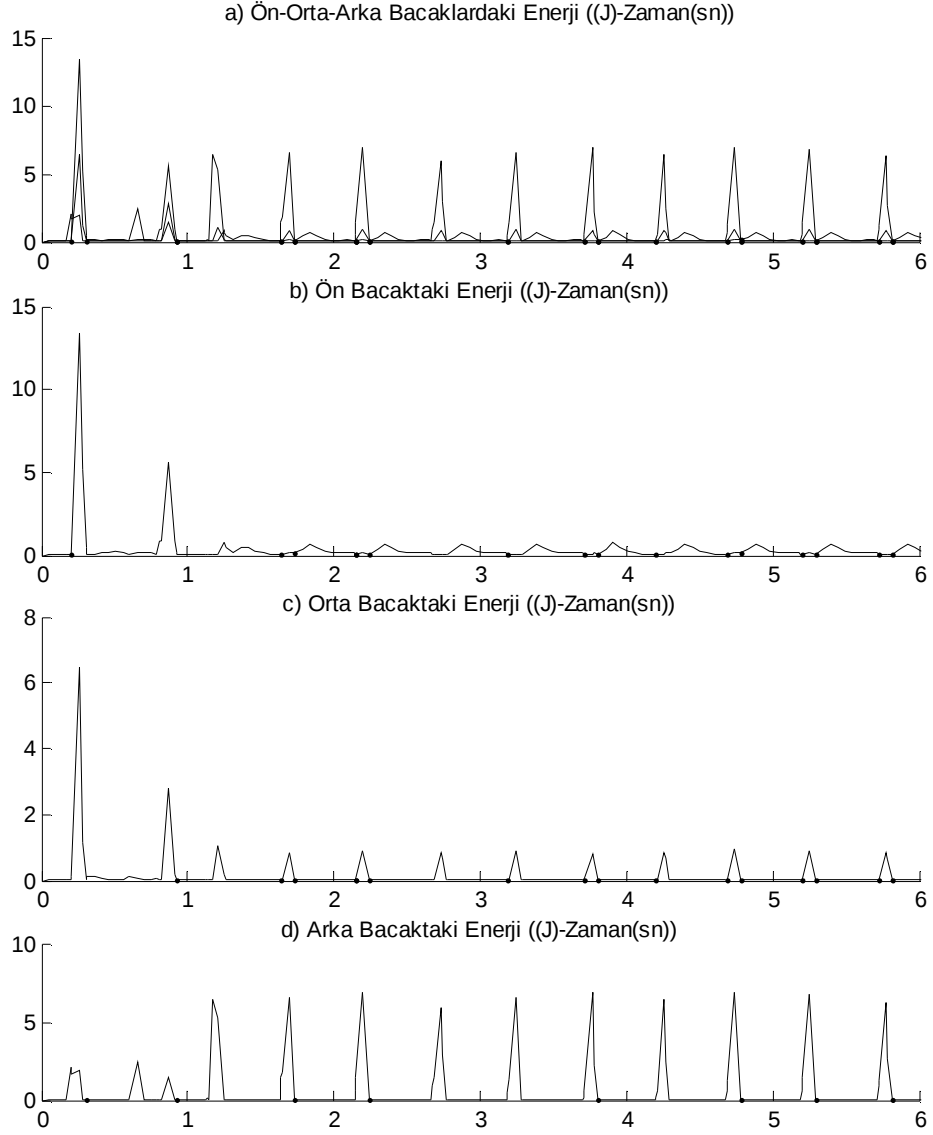
Şekil 9.46 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağıının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).
- b) Robotun arka sanal bacağıının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- d) Robotun ön sanal bacağıının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$).



Şekil 9.47 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{orta}^0 (0).
- b) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka}^0 (0).
- c) Robotun ön-orta-arka bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- d) Hatanın zaman ile değişimi (e).



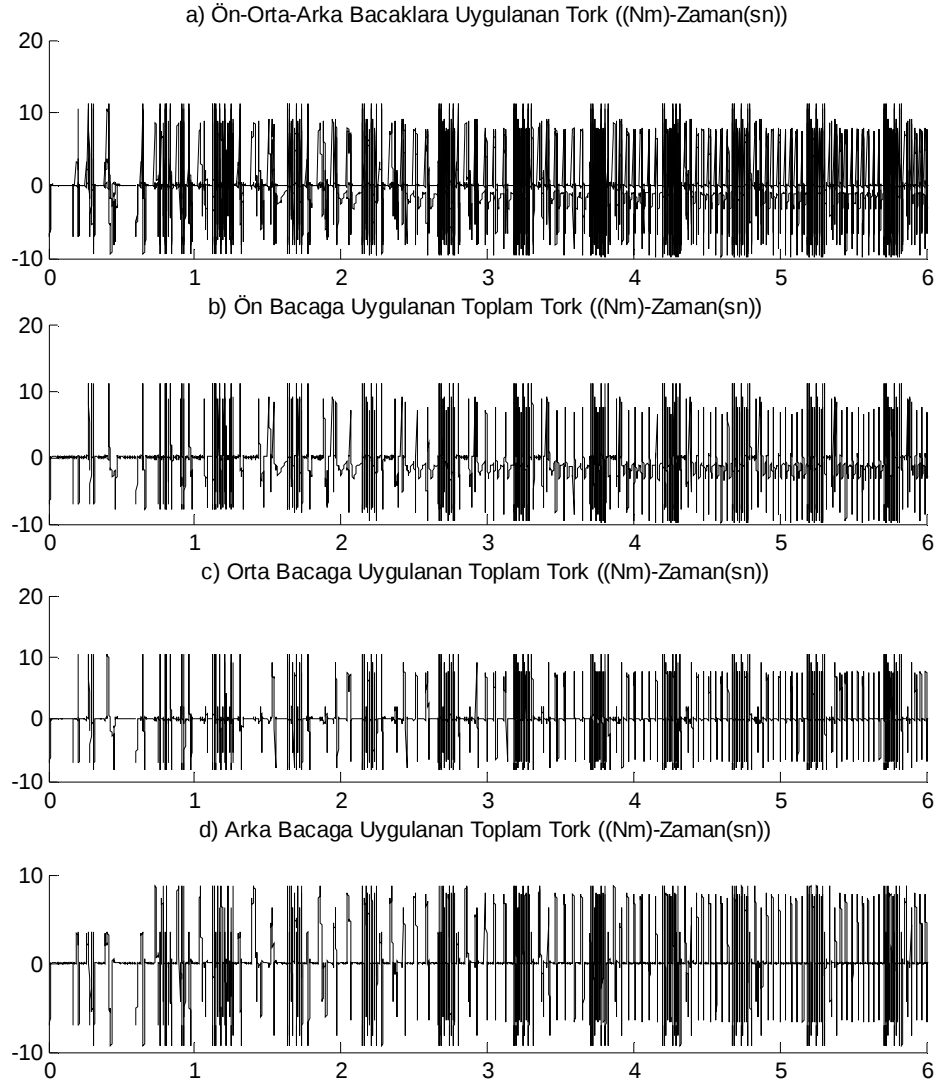
Şekil 9.48 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).

b) Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).

c) Robotun orta sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J).

d) Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).

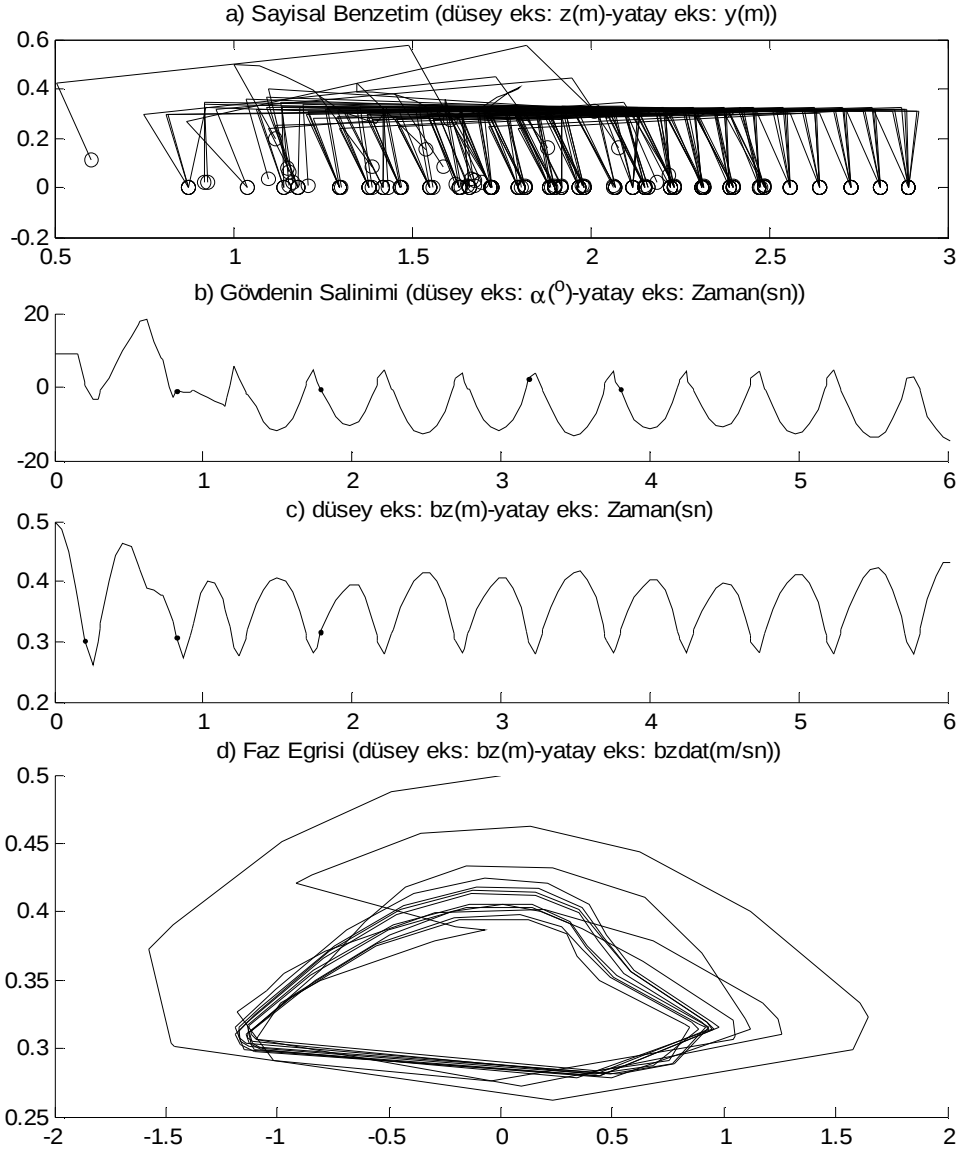


Şekil 9.49 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- c) Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).
- d) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

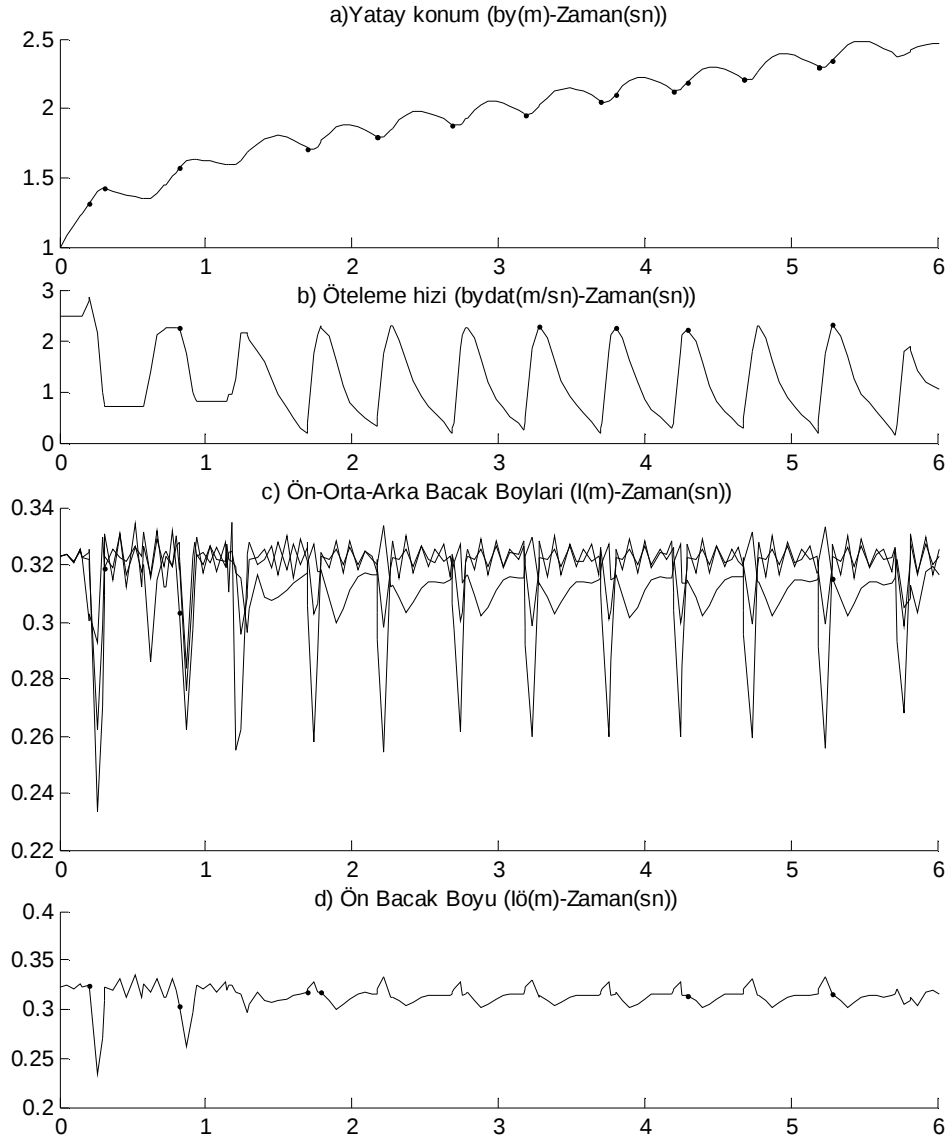
Tablo 9.11 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.

HEXAPOD ROBOT					
6 bacaklı					
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ					
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı	
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)	
50		7		2.5	
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ					
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın Harcadığı Güç	Orta Bacağın Harcadığı Güç	Arka Bacağın Harcadığı Güç	Toplam Harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{orta}	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)	(watt)
3	0.8	162	128	184	475
5	1.71	269	243	266	779
6	2.1	318	292	320	931



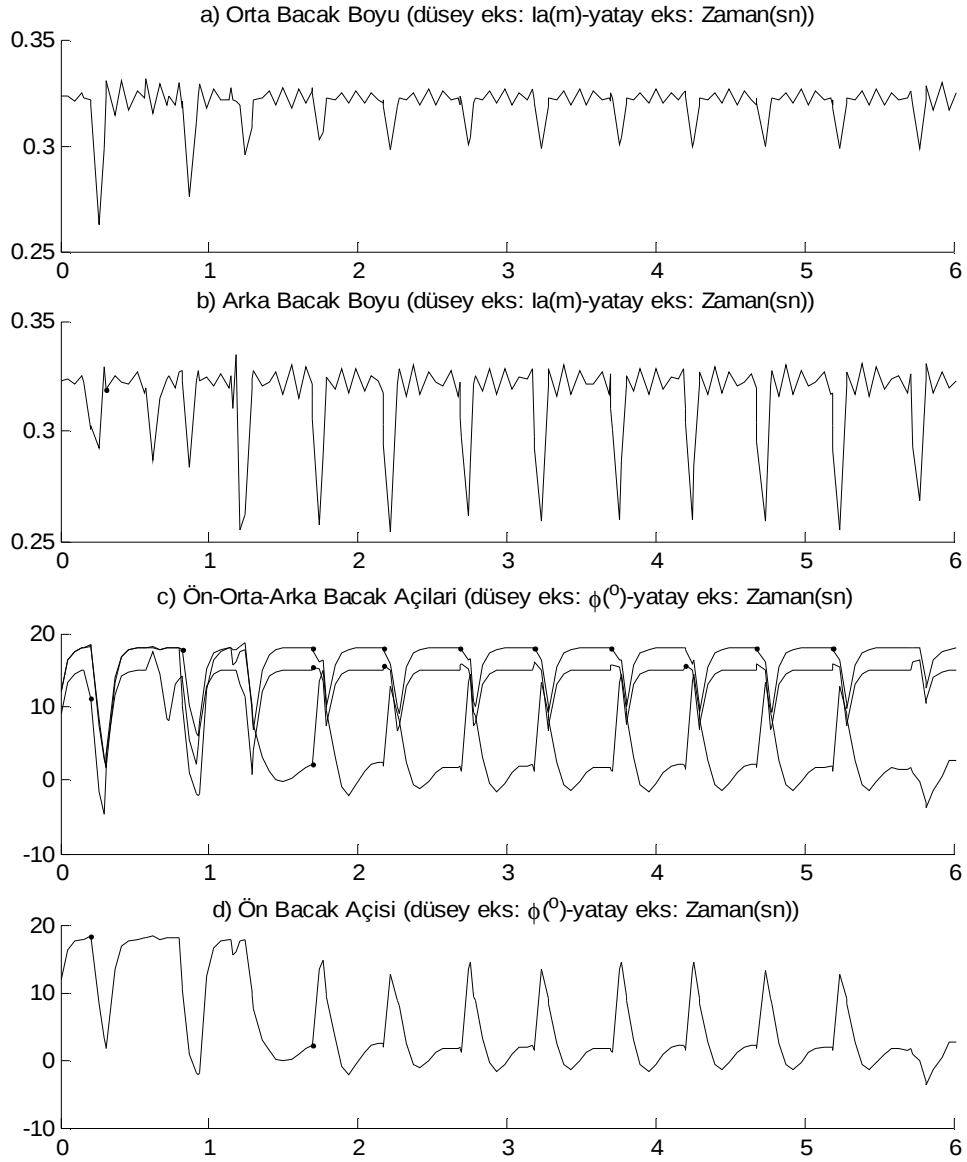
Şekil 9.50 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



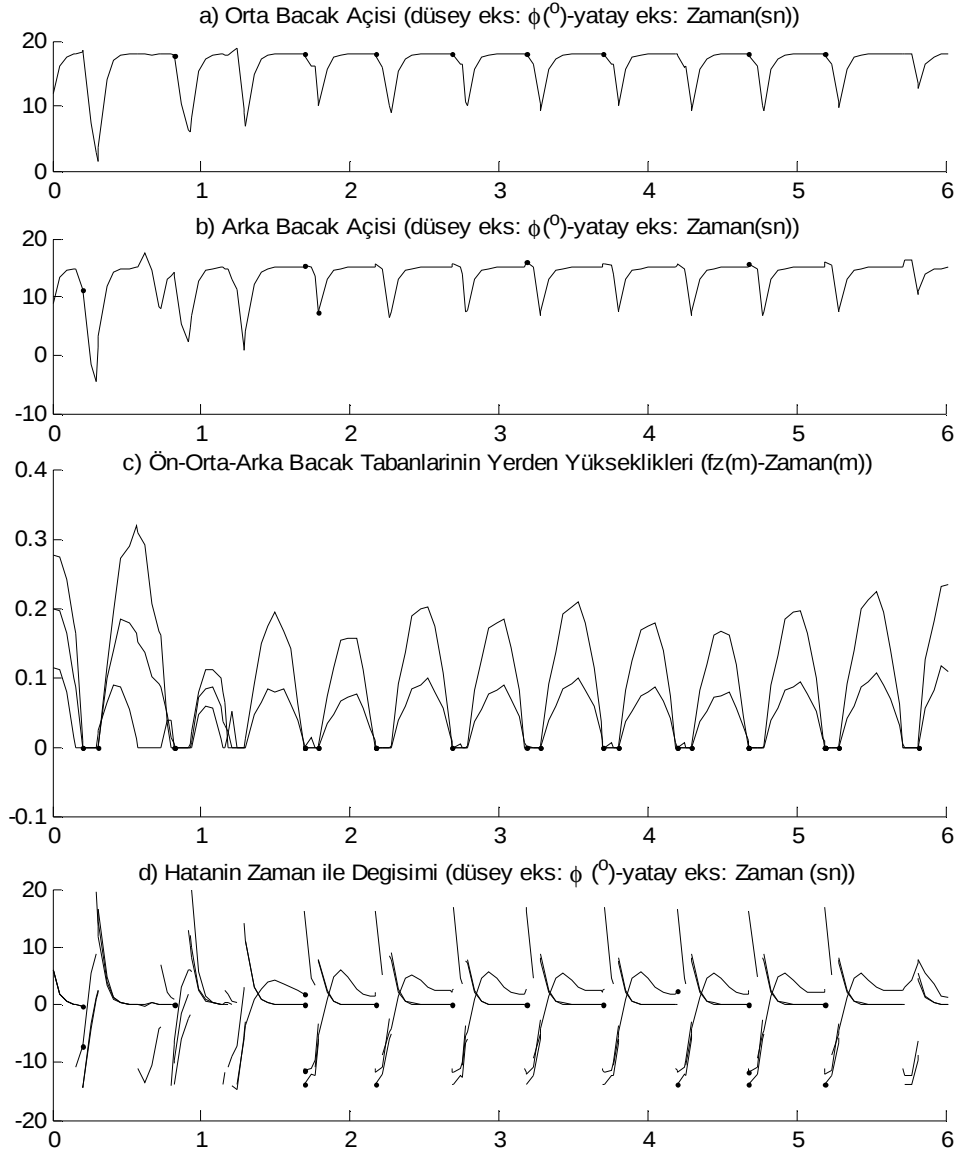
Şekil 9.51 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



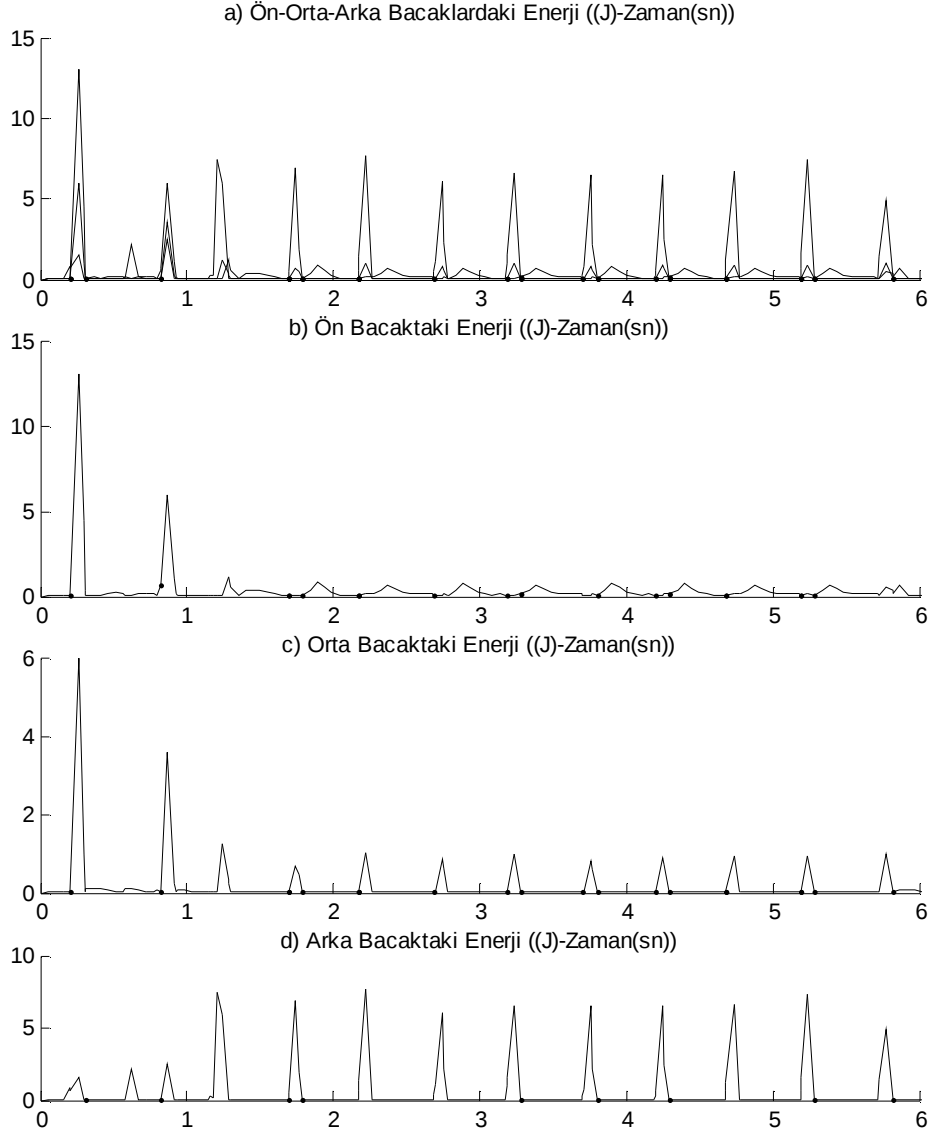
Şekil 9.52 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).
- b) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- d) Robotun ön sanal bacağına gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$).



Şekil 9.53 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{orta} (^{\circ})$.
- b) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{arka} (^{\circ})$.
- c) Robotun ön-orta-arka bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri $f_z (m)$.
- d) Kontrolörün zamana bağlı olarak hata grafiği (e).



Şekil 9.54 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm

enerji miktarları E_{top} (J).

b) Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm

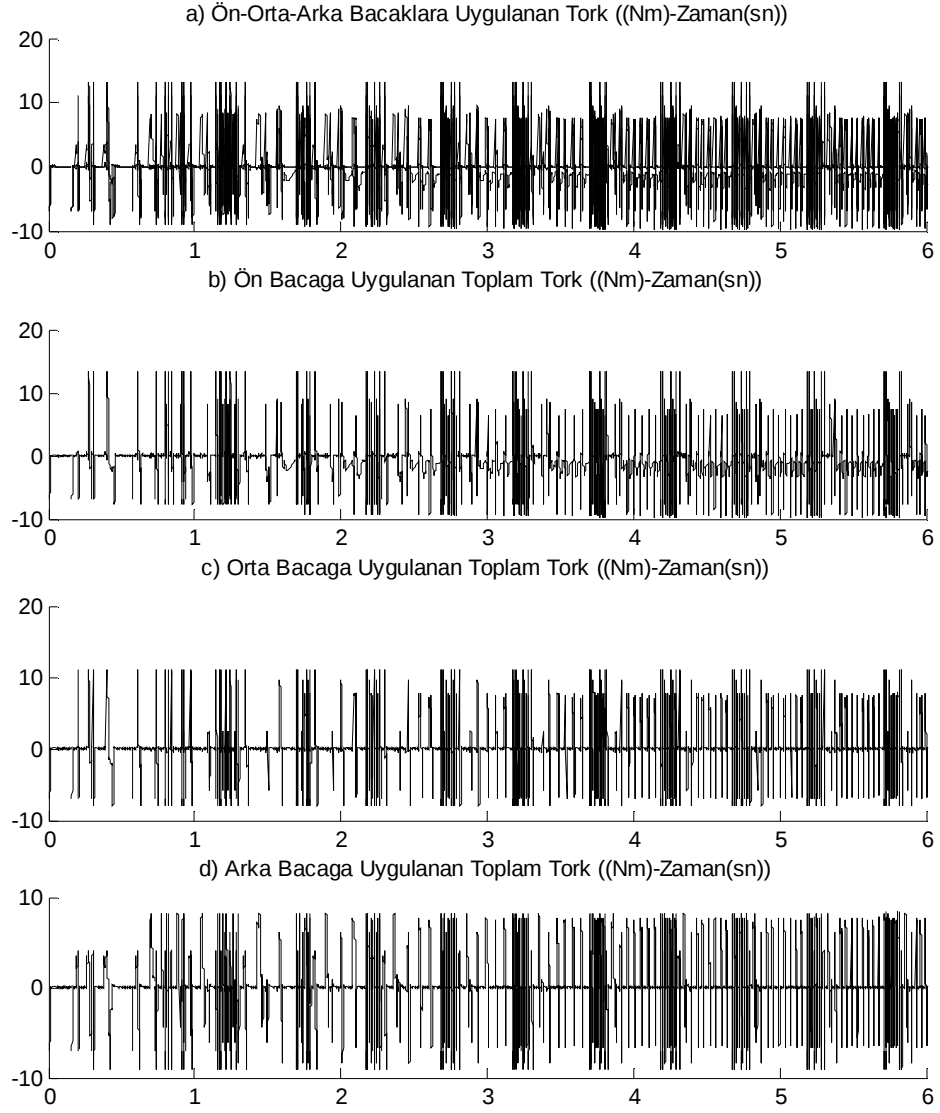
enerji miktarı $E_{ön}$ (J).

c) Robotun orta sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm

enerji miktarı E_{orta} (J).

d) Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm

enerji miktarı E_{arka} (J).

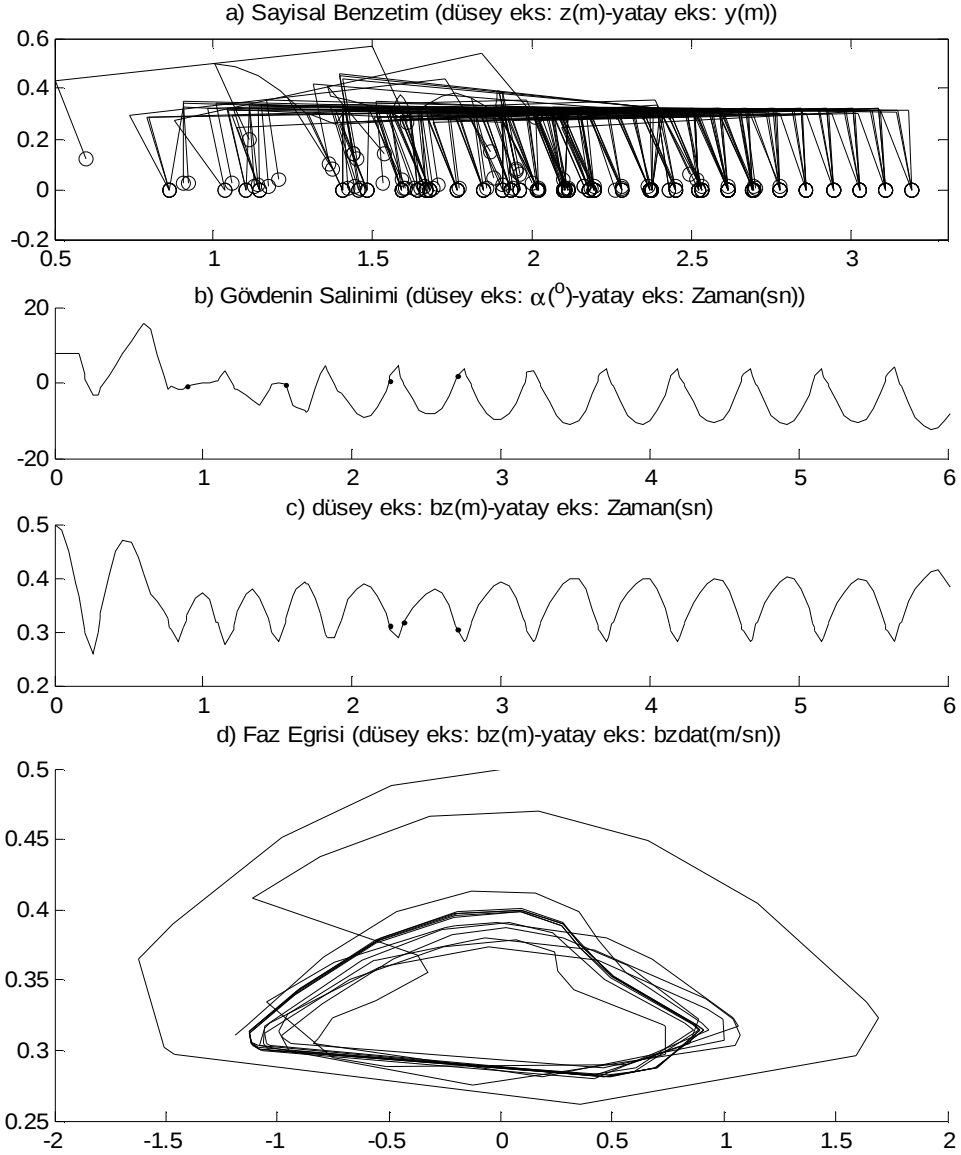


Şekil 9.55 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- c) Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).
- d) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t^{araka} (Nm).

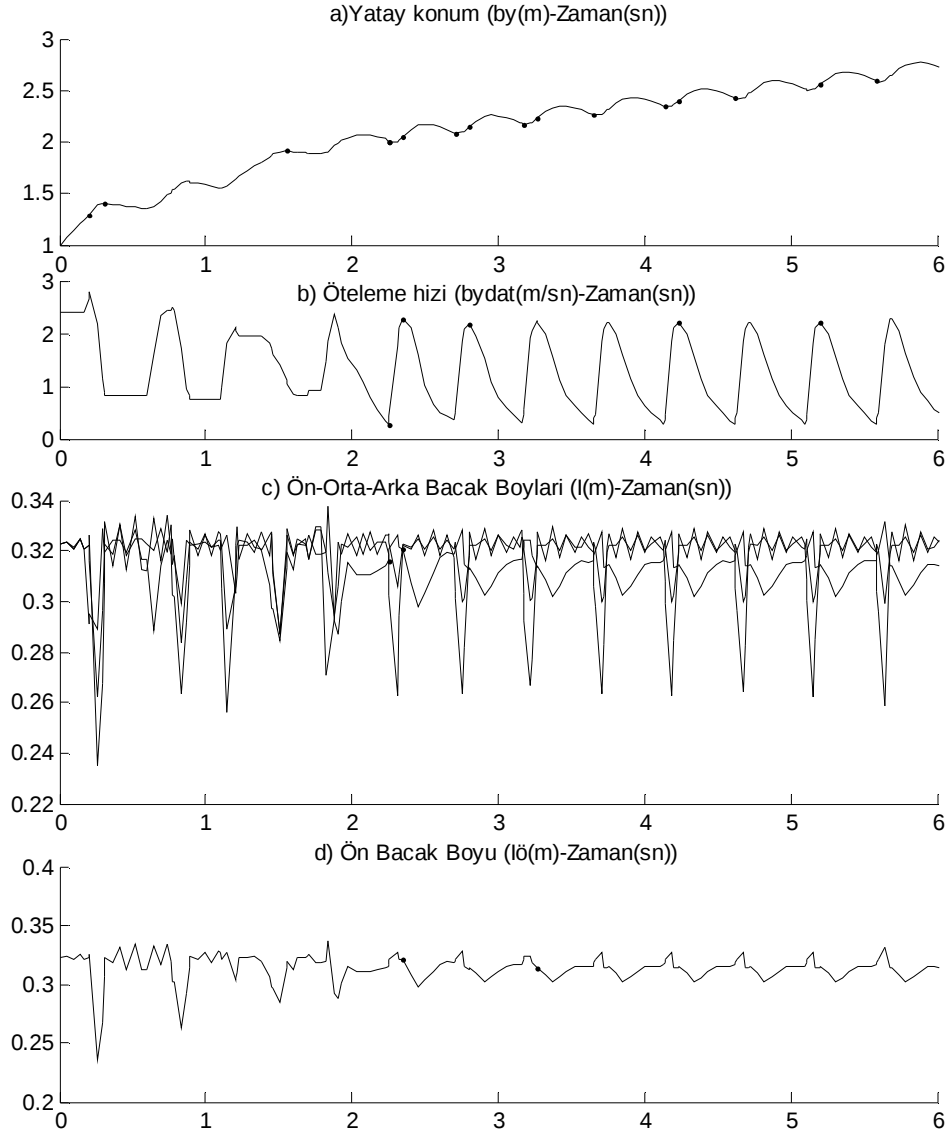
Tablo 9.12 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.

HEXAPOD ROBOT					
6 bacaklı					
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ					
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı	
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)	
50		9		2.5	
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ					
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın Harcadığı Güç	Orta Bacağın Harcadığı Güç	Arka Bacağın Harcadığı Güç	Toplam Harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{orta}	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)	(watt)
3	0.78	170	145	168	485
5	1.69	272	251	262	786
6	1.9	323	287	301	912



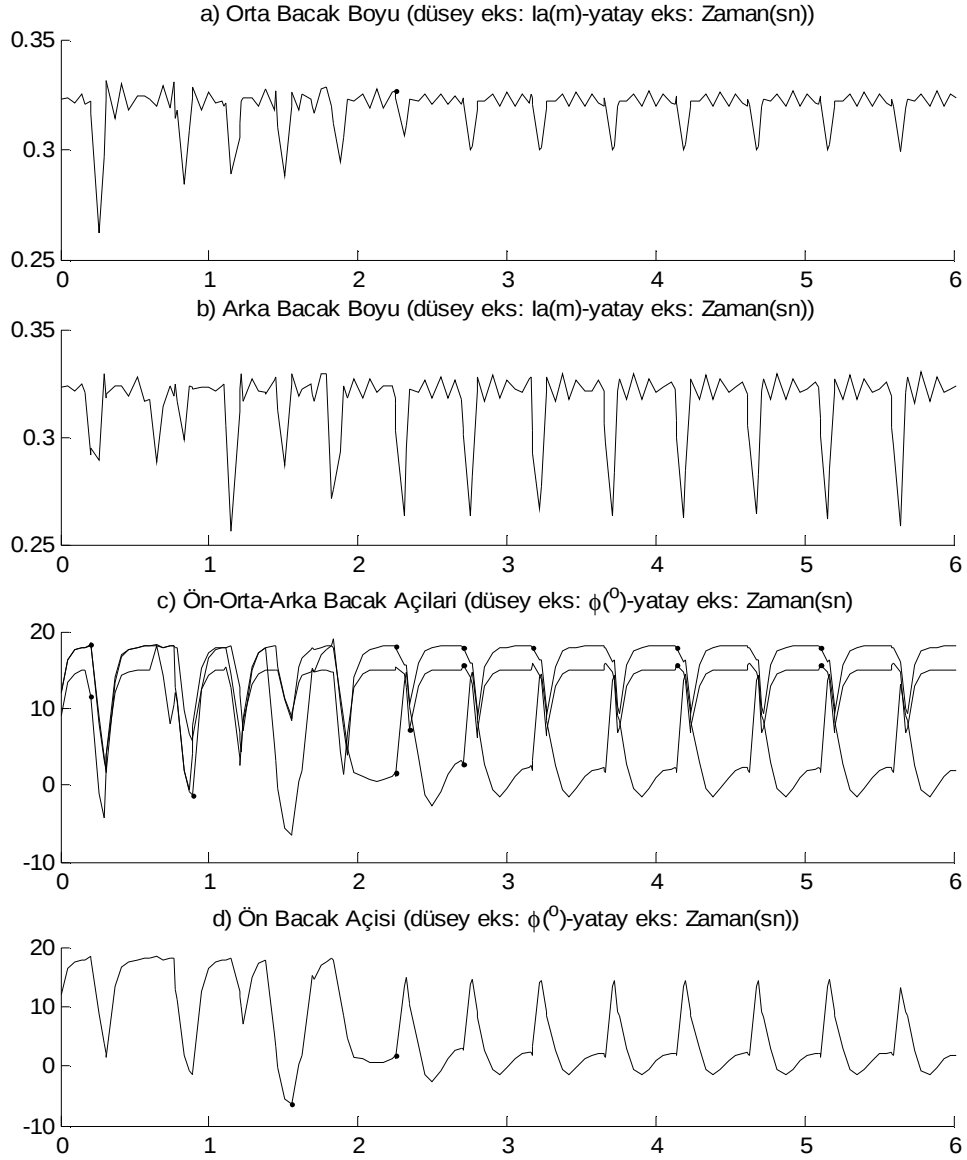
Şekil 9.56 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



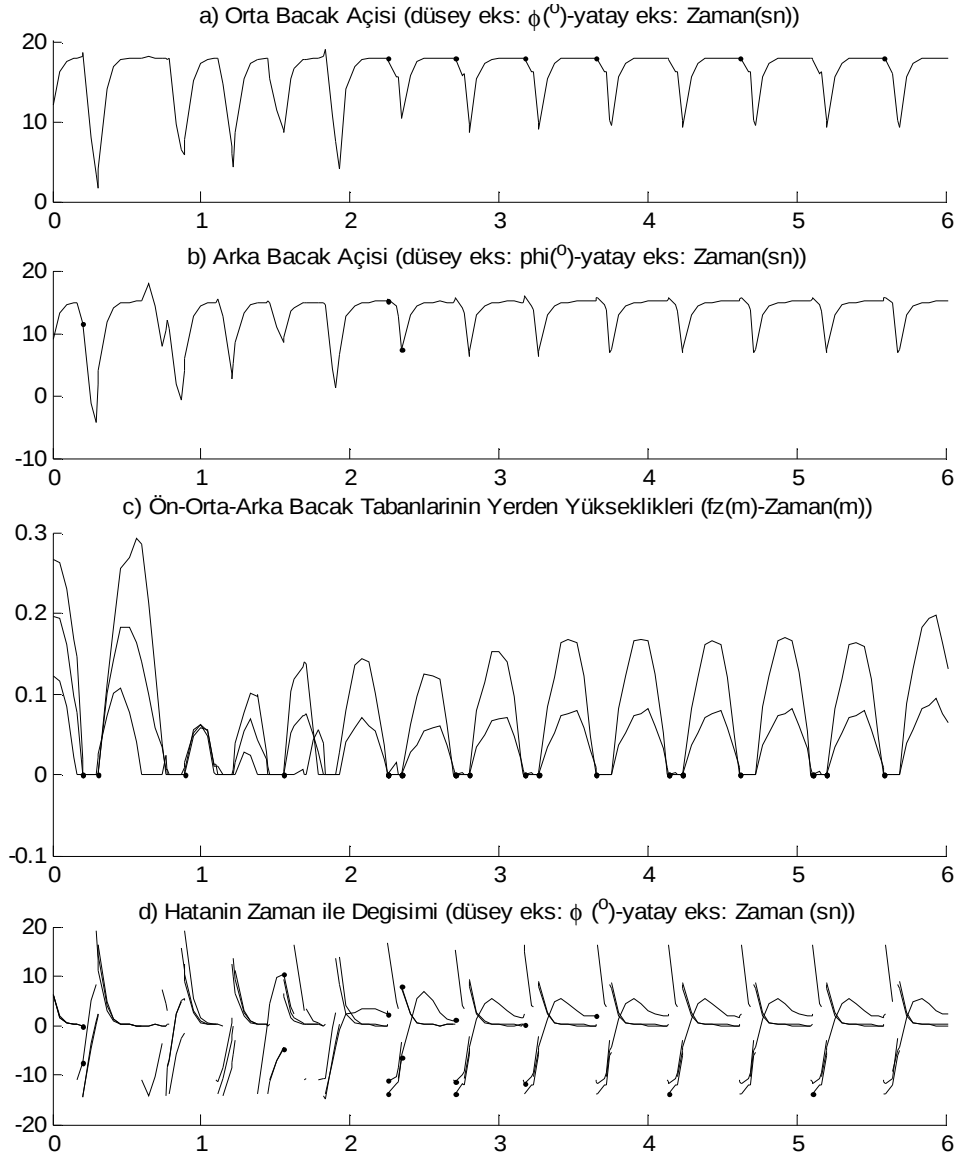
Şekil 9.57 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



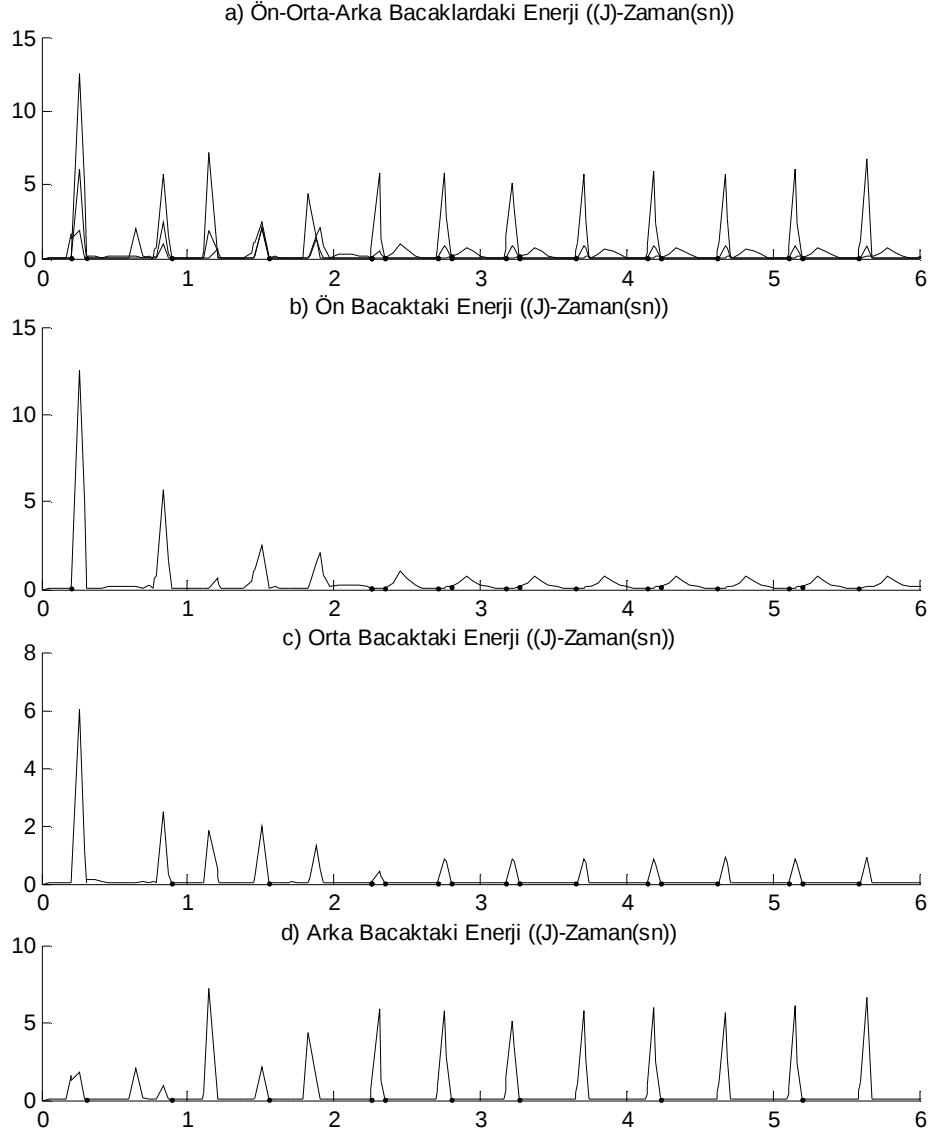
Şekil 9.58 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).
- b) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- d) Robotun ön sanal bacağına gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$).



Şekil 9.59 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{orta} (^{\circ})$.
- b) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{arka} (^{\circ})$.
- c) Robotun ön-orta-arka bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- d) Hatanın zaman ile değişimi (e).



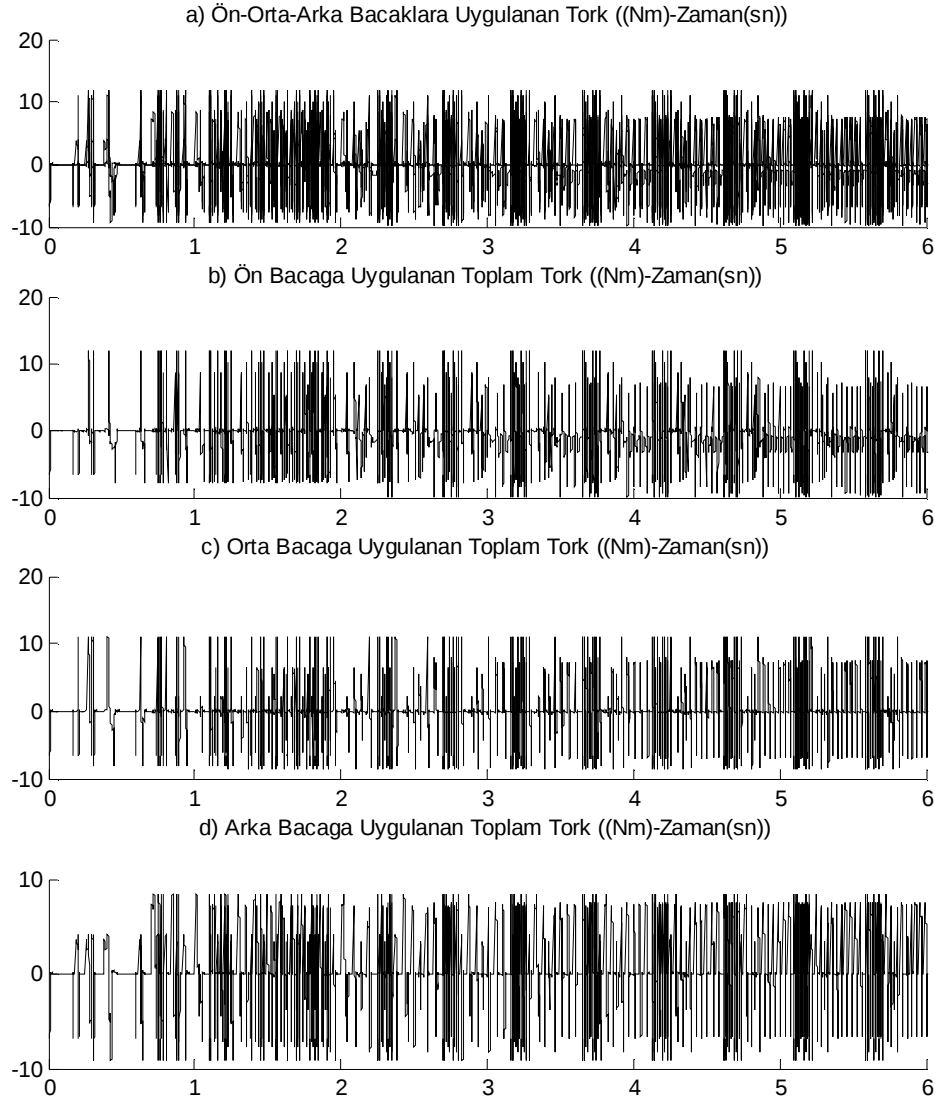
Şekil 9.60 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).

b) Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).

c) Robotun orta sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J).

d) Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).

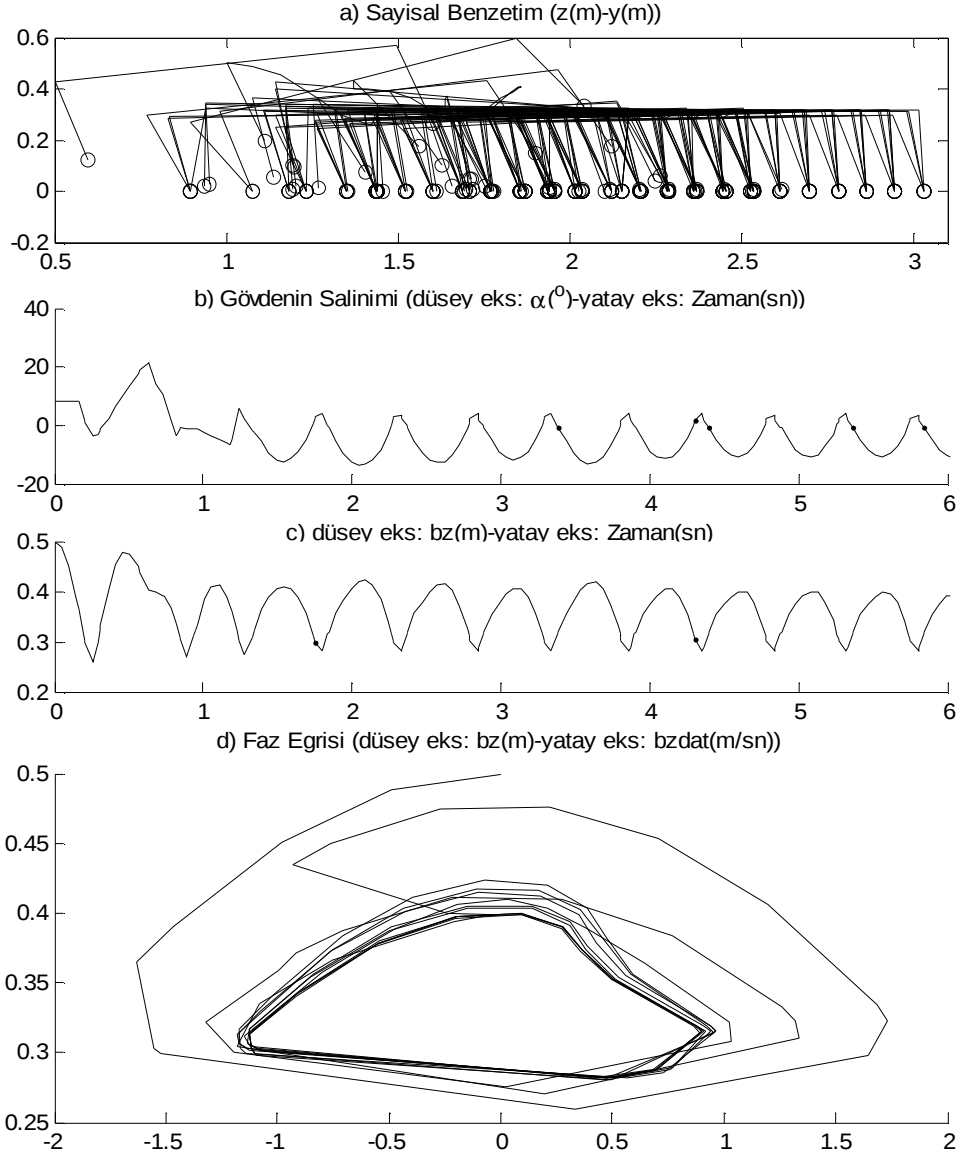


Şekil 9.61 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- c) Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).
- d) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

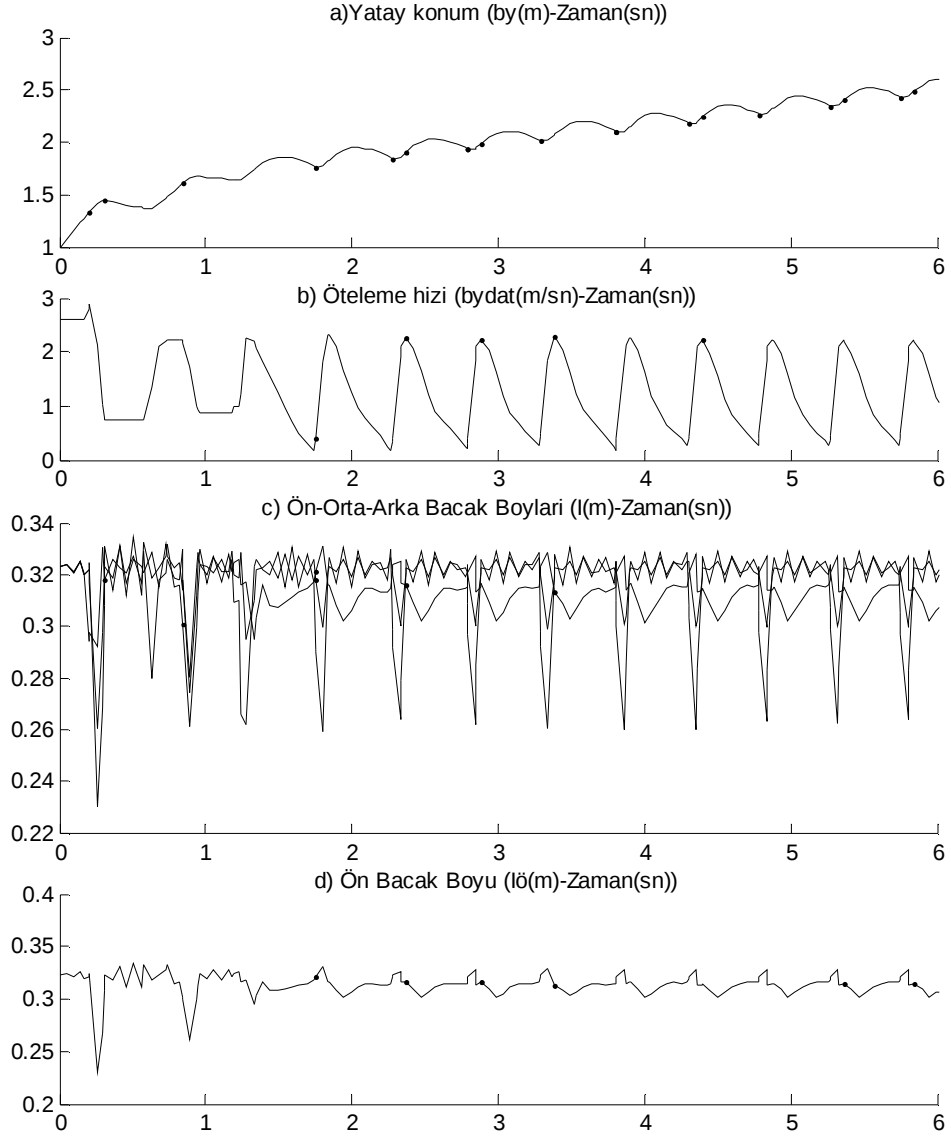
Tablo 9.13 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.

HEXAPOD ROBOT					
6 bacaklı					
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ					
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı	
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)	
50		8		2.4	
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ					
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın Harcadığı Güç	Orta Bacağın Harcadığı Güç	Arka Bacağın Harcadığı Güç	Toplam Harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{orta}	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)	(watt)
3	0.83	190	162	172	525
5	1.82	288	267	270	826
6	2.3	339	322	307	970



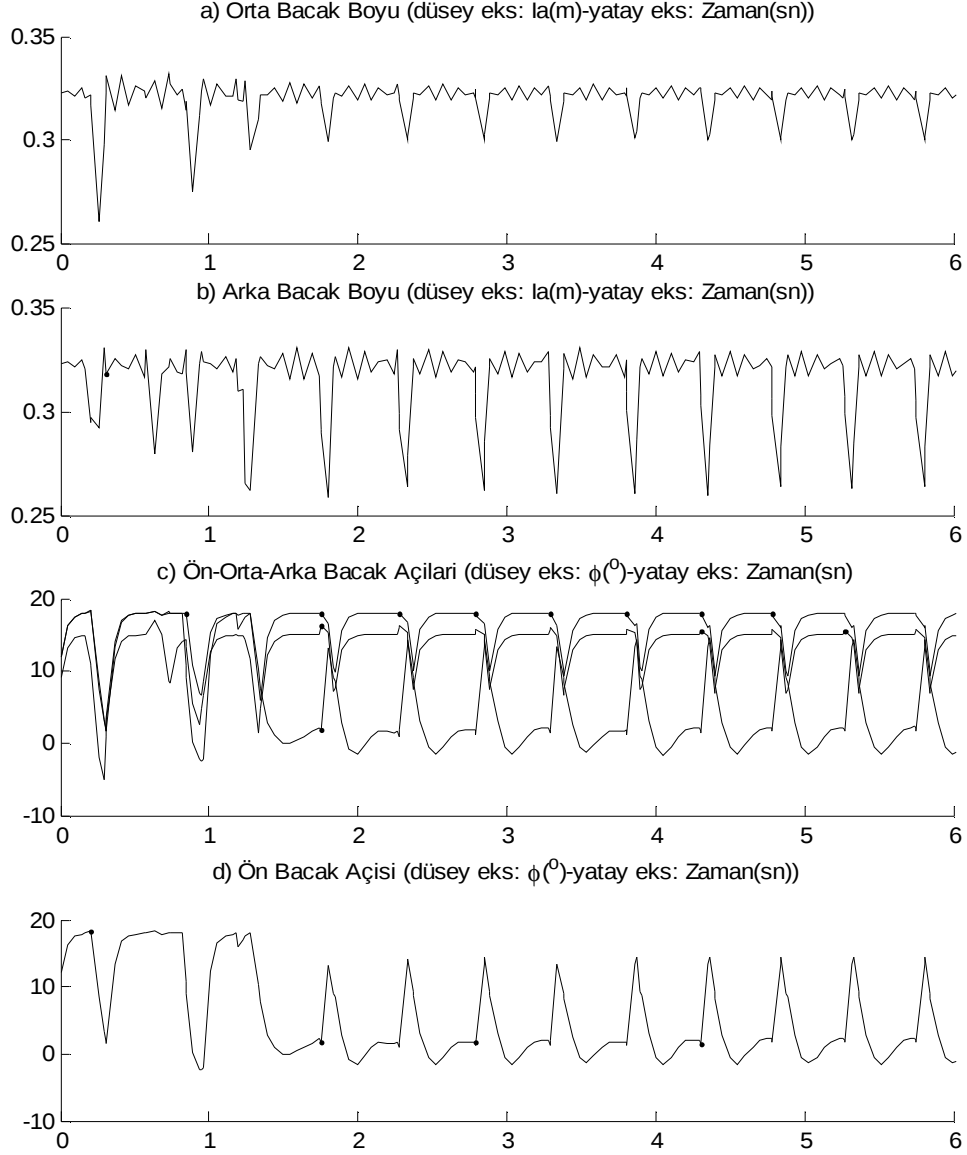
Şekil 9.62 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



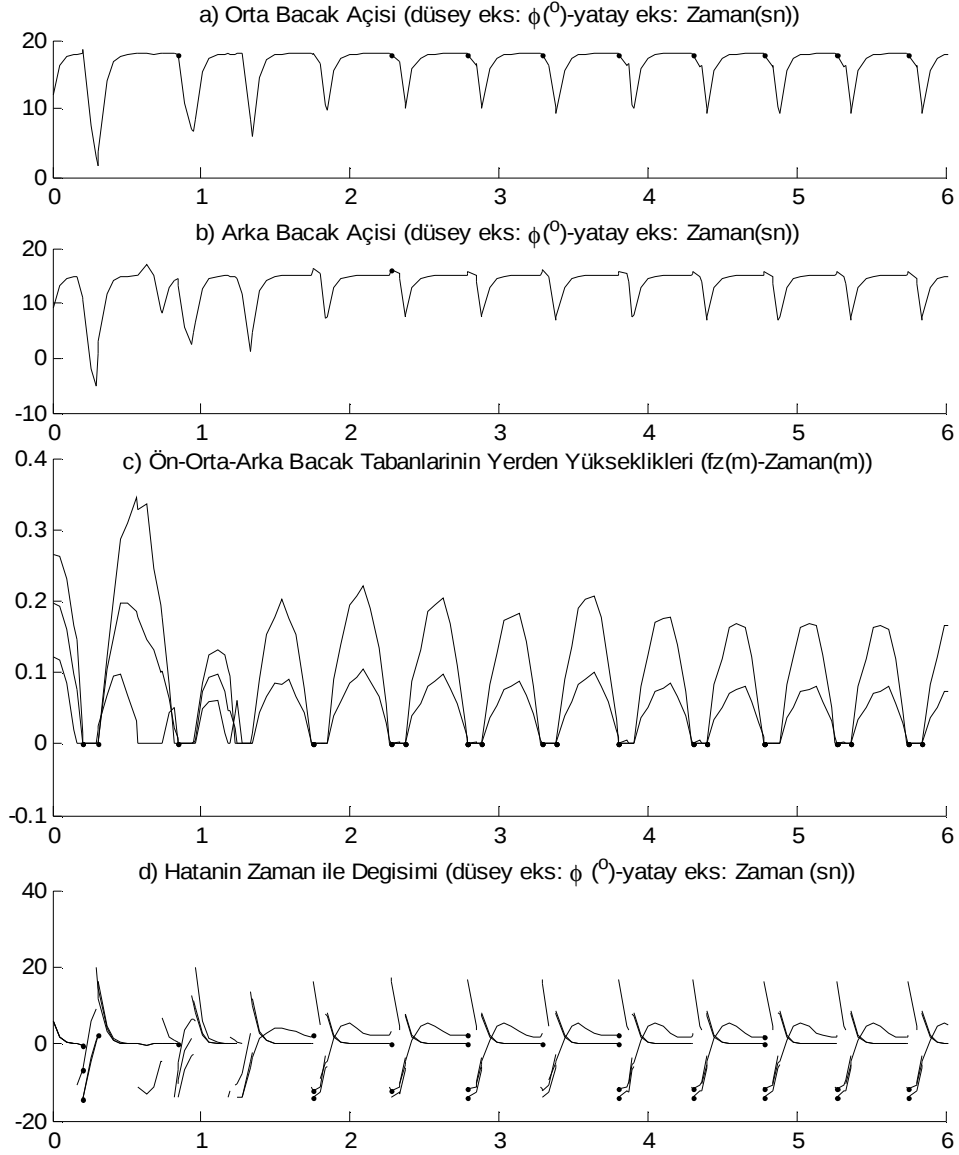
Şekil 9.63 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



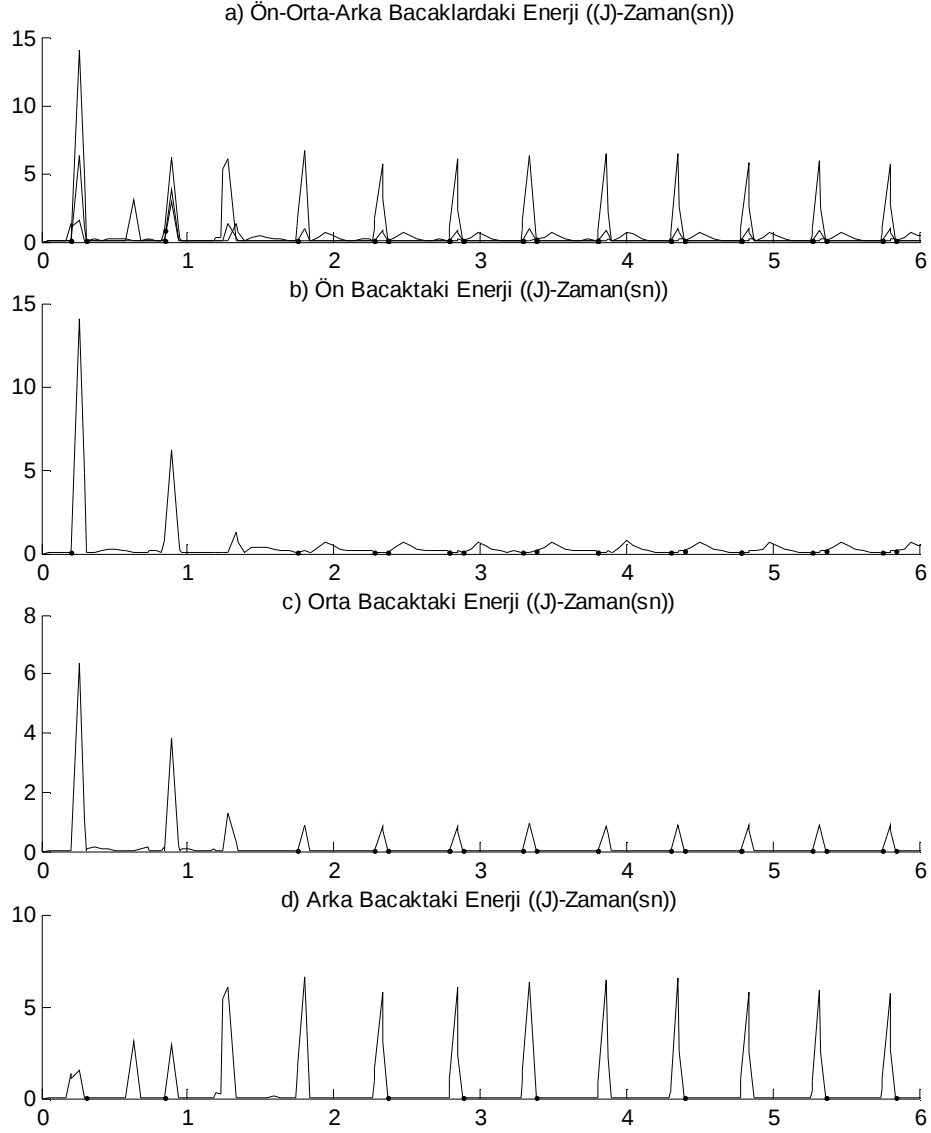
Şekil 9.64 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).
- b) Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- d) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$).



Şekil 9.65 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{orta} ($^{\circ}$).
- b) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).
- c) Robotun ön-orta-arka bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- d) Hatanın zaman ile değişimi (e).



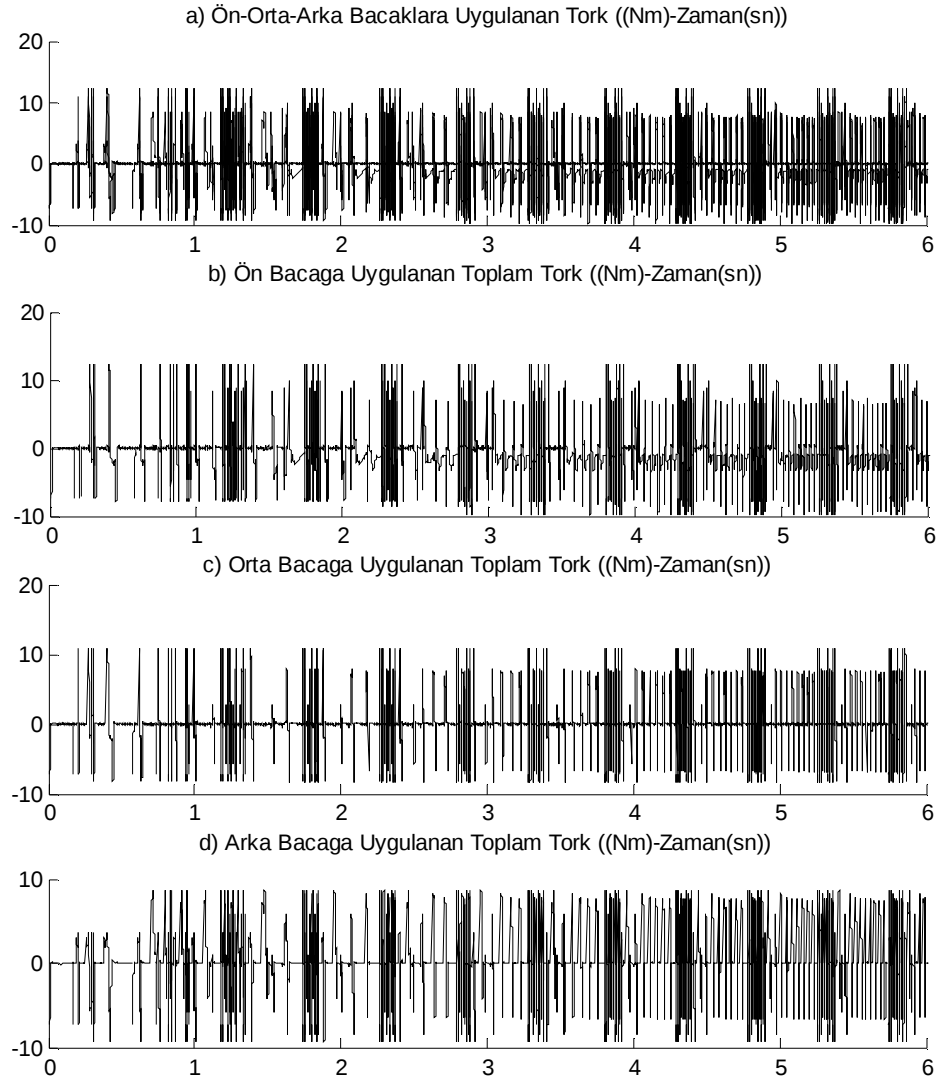
Şekil 9.66 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).

b) Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).

c) Robotun orta sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J).

d) Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).

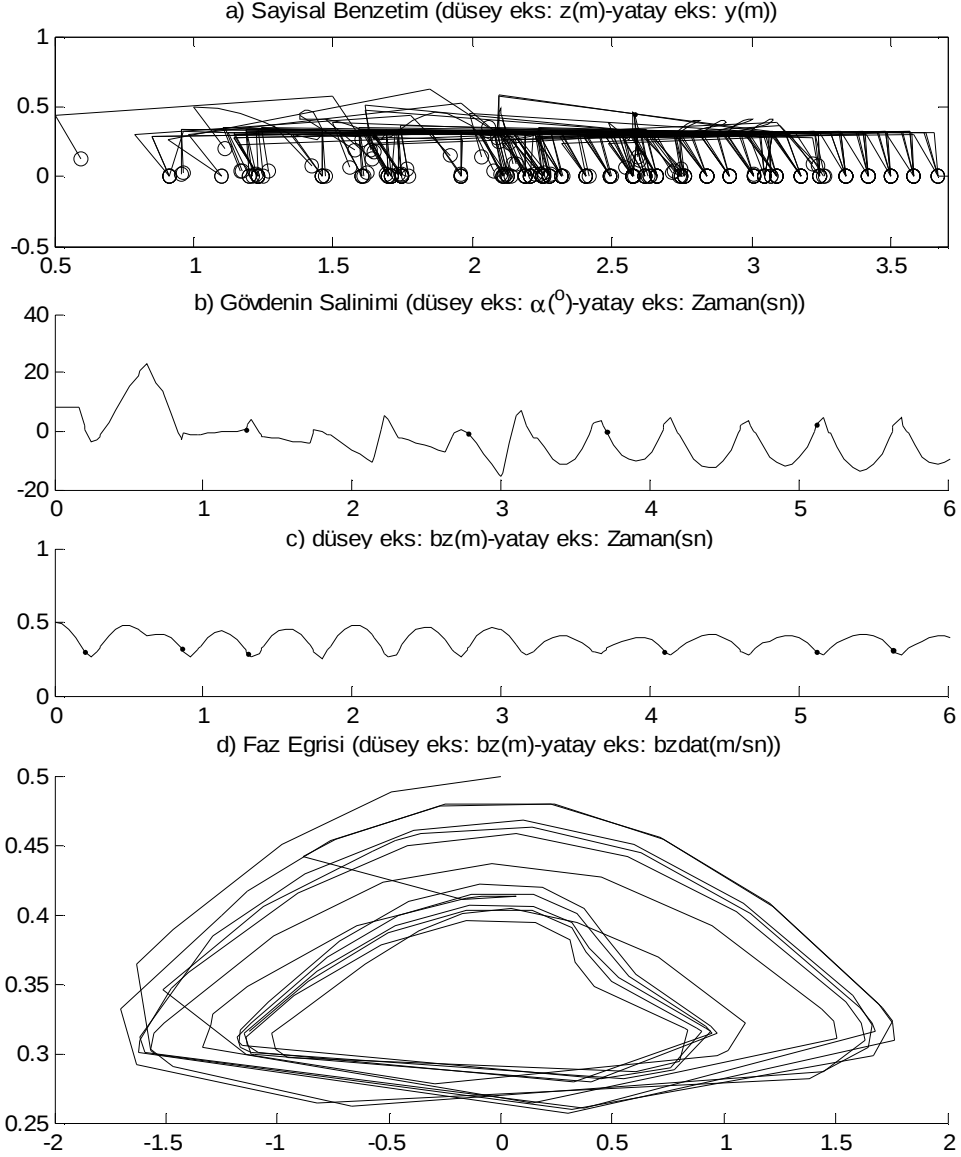


Şekil 9.67 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- c) Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).
- d) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

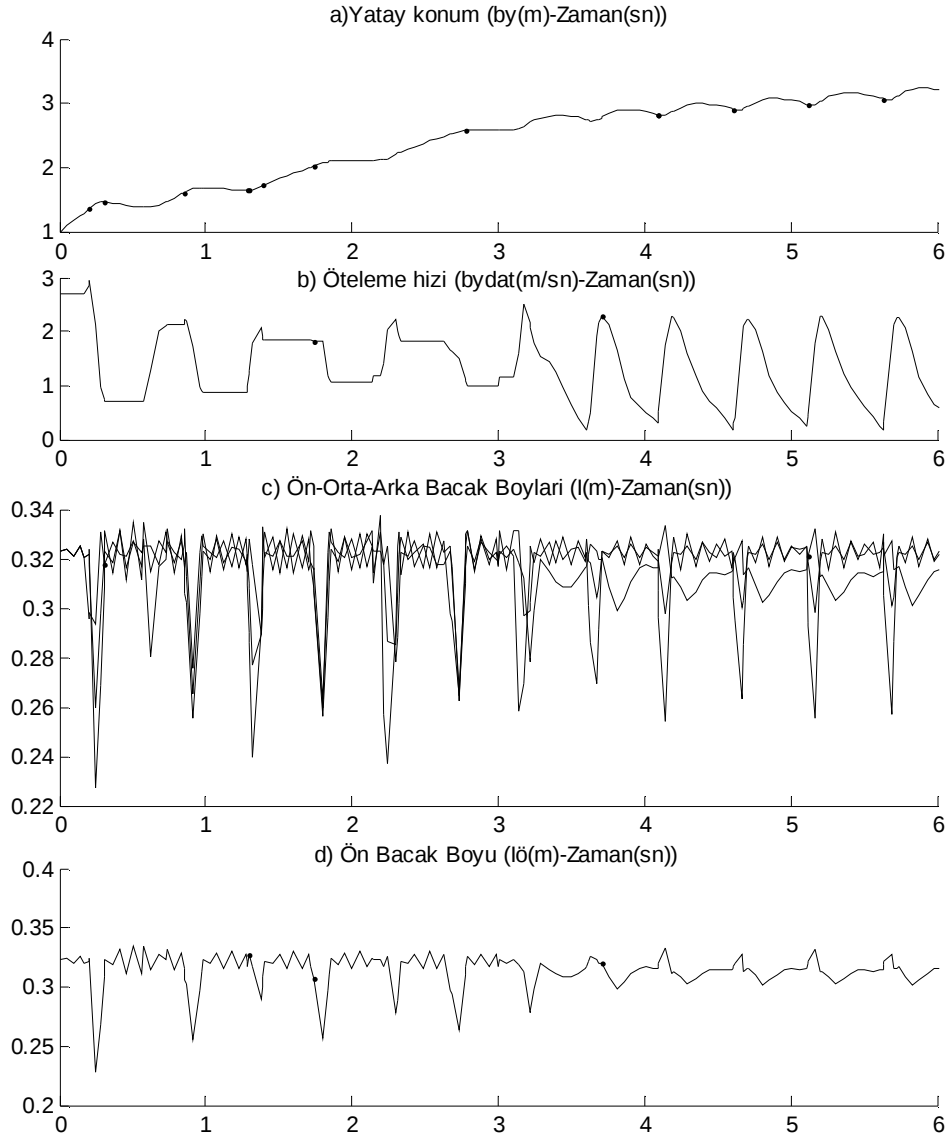
Tablo 9.14 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.

HEXAPOD ROBOT					
6 bacaklı					
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ					
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı	
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)	
50		8		2.6	
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ					
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın Harcadığı Güç	Orta Bacağın Harcadığı Güç	Arka Bacağın Harcadığı Güç	Toplam Harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{orta}	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)	(watt)
3	0.81	169	133	186	489
5	1.76	269	240	282	792
6	2.06	320	296	325	942



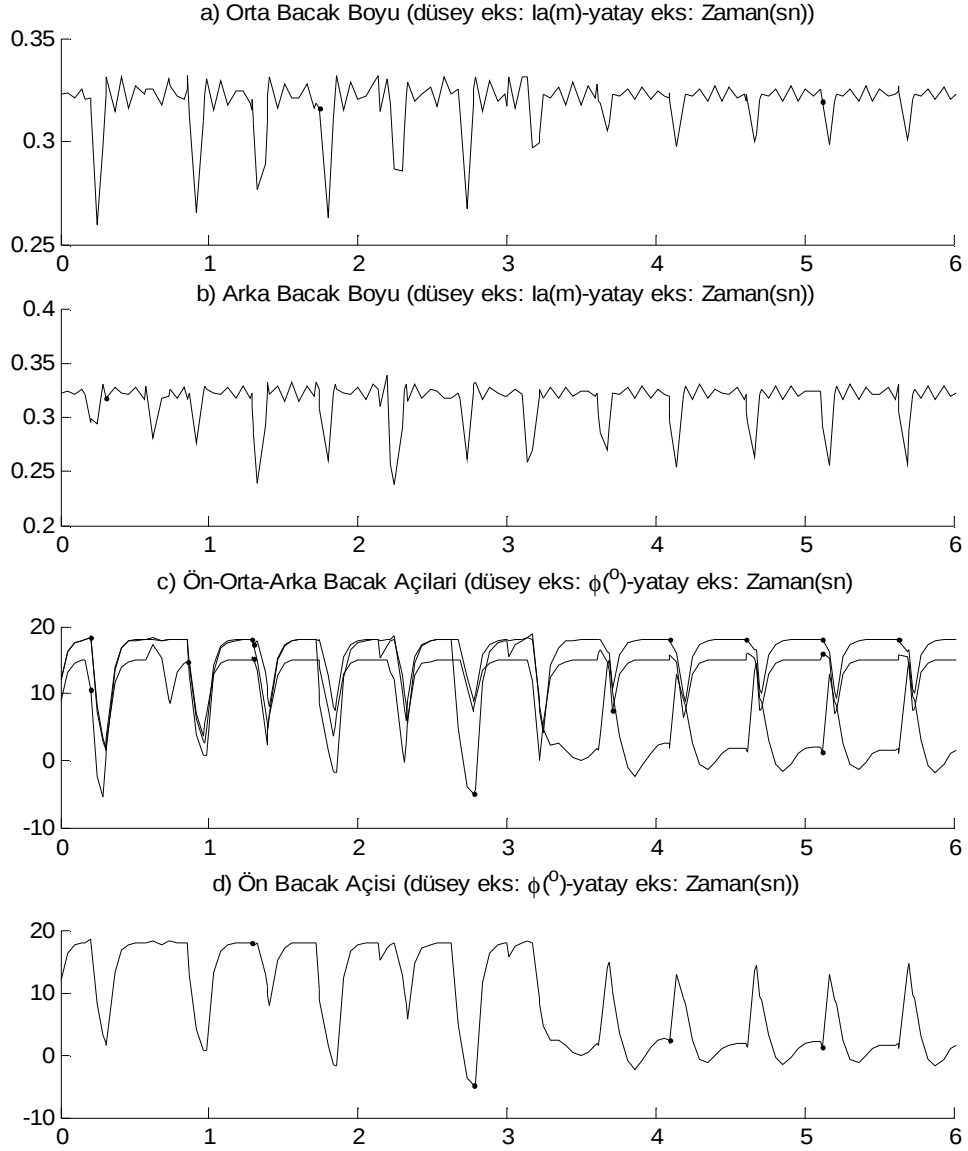
Şekil 9.68 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel(planar) z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



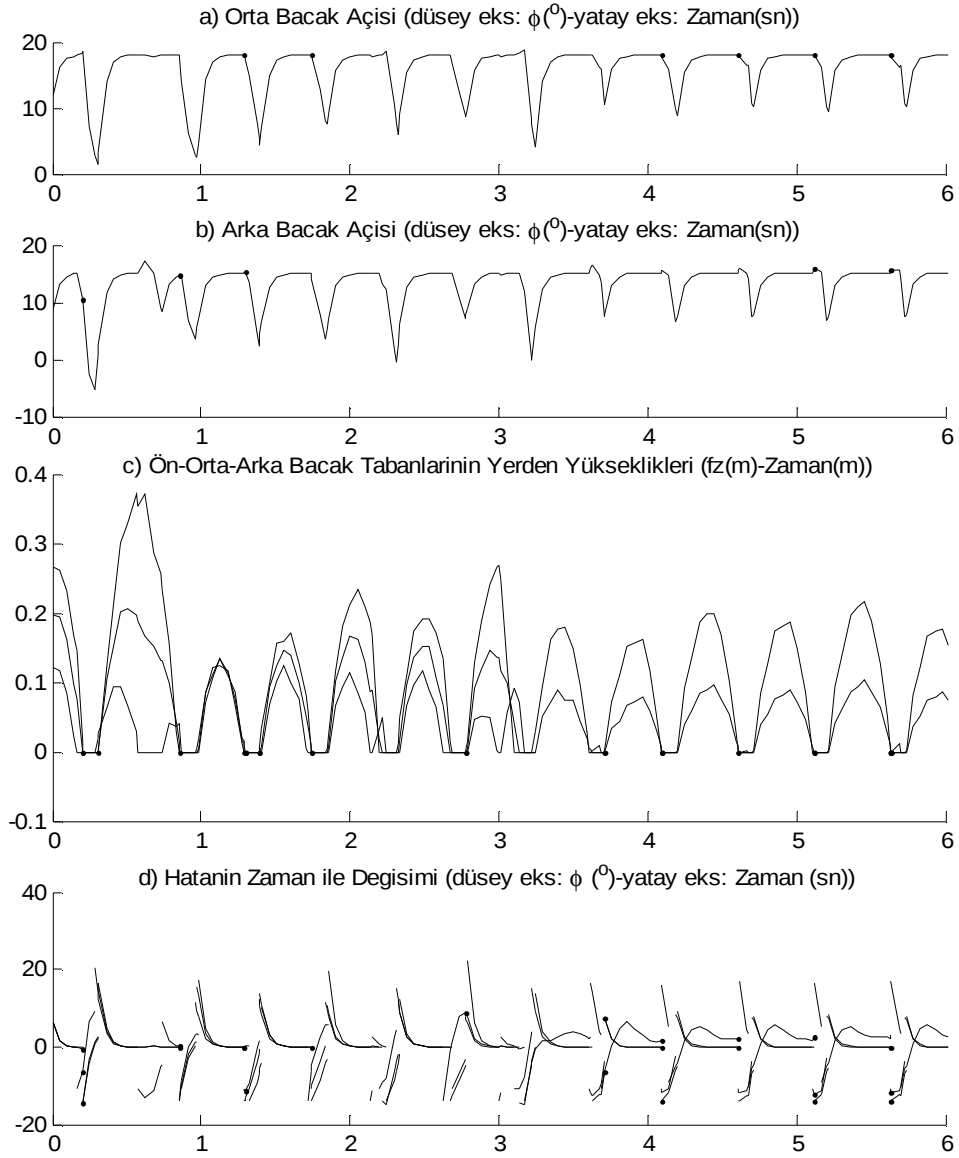
Şekil 9.69 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



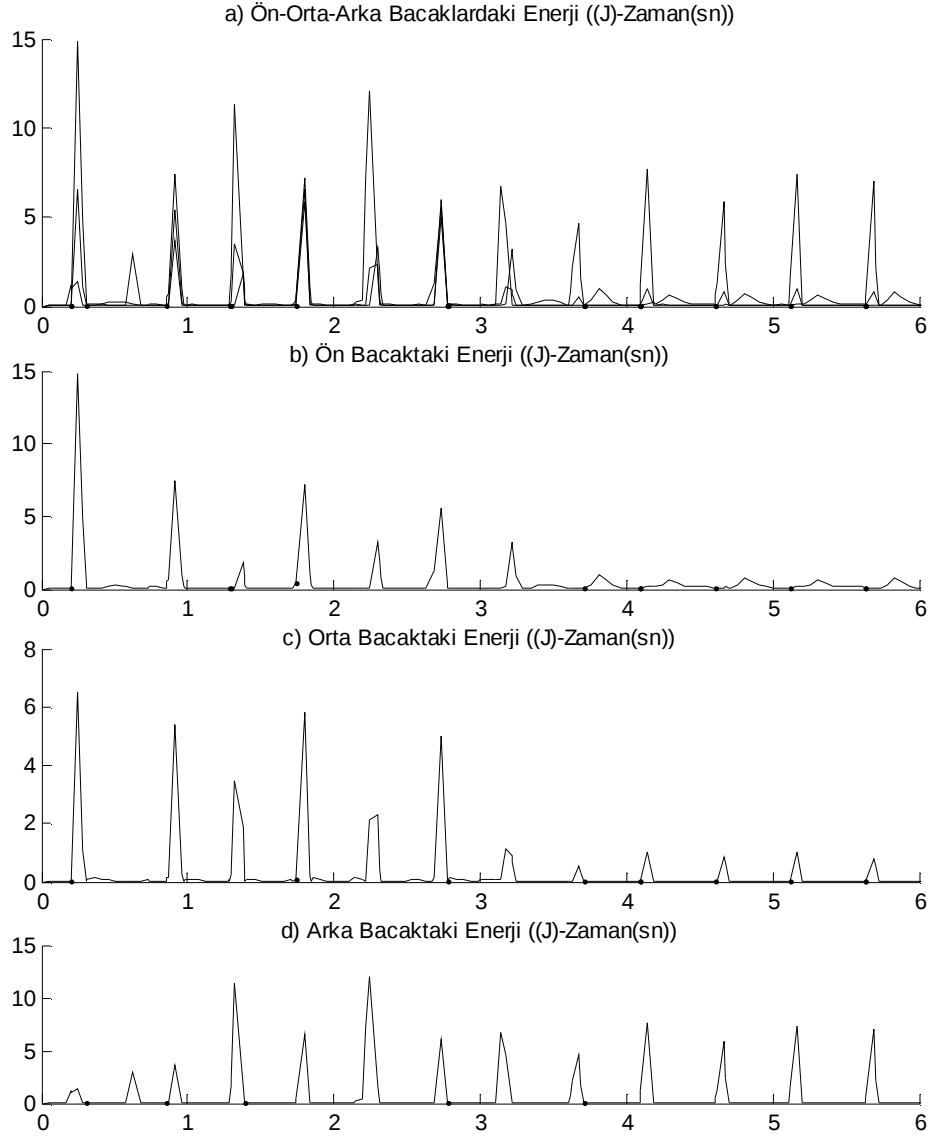
Şekil 9.70 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).
- b) Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- d) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$).



Şekil 9.71 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{orta} (^{\circ})$.
- b) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{arka} (^{\circ})$.
- c) Robotun ön-orta-arka bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri $f_z (m)$.
- d) Hatanın zaman ile değişimi (e).



Şekil 9.72 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm

enerji miktarları E_{top} (J).

b) Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm

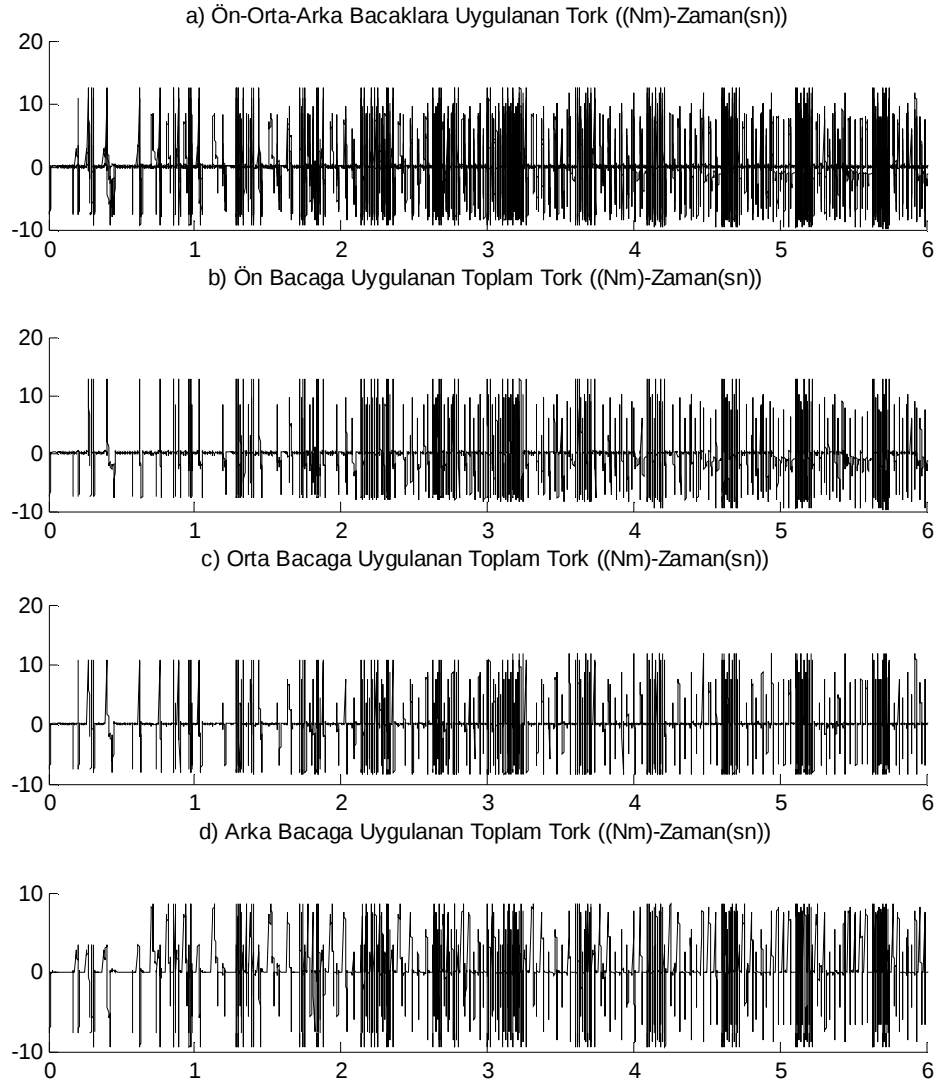
enerji miktarı $E_{ön}$ (J).

c) Robotun orta sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm

enerji miktarı E_{orta} (J).

d) Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm

enerji miktarı E_{arka} (J).



Şekil 9.73 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- c) Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).
- d) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

Tablo 9.15 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.

HEXAPOD ROBOT					
6 bacaklı					
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ					
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı	
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)	
50		8		2.7	
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ					
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın Harcadığı Güç	Orta Bacağın Harcadığı Güç	Arka Bacağın Harcadığı Güç	Toplam Harcanan Güç
t (sn)	b_y (m)	$P_{ön}$ (watt)	P_{orta} (watt)	P_{arka} (watt)	P_{top} (watt)
3	1.19	201	114	138	454
5	2.22	296	227	247	771
6	2.8	345	280	297	923

9.3.2. Sonuç

Bu bölümde SLIP ile modellenen altı bacaklı hexapod robotun farklı başlangıç değerlerinde zıplayarak yürüyüşünün denetimi için PD denetim uygulanmış olup ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Sistem cevaplarına, sayısal benzetim sonuçları ve grafiklerden bakıldığında; tasarlanan zıplayarak yürüme modelinin literatürde [1, 2, 95, 96, 99] yapılan çalışmalar gibi başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu gibi zıplama işlevlerinde bacaklardaki eyleyicilerin uyguladıkları tork değerleri genelde sınırlıdır. Bu yüzden sayısal benzetim modelinde bacaklara ait eyleyicilerin tork değerleri sınırlandırılmıştır. Bu sınır değerler piyasada kolaylıkla bulabileceğimiz 10Nm ve 15Nm aralığında ki mevcut olan eyleyicilerdir. Grafiklerden de görüldüğü gibi sistem +/- 12Nm sınırları aralığında başarılı olarak zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirmiştir.

Altı bacaklı hexapod robotun her bir farklı başlangıç değerleri için sistem cevapları bölüm sonunda bir tablo şeklinde oluşturulmuştur. Bu tabloda, sistem cevabında hangi başlangıç değeri için sayısal benzetim oluşturulduğu, robotun belirli periyodik sürelerde ne kadar yol aldığı ve alınan yola karşılık eyleyicilerin harcadığı enerji miktarı verilmiştir. Sonuçta, oluşturulan bu tablolar aynı sistemin farklı denetim algoritmaları ile elde edilecek sayısal benzetim sonuçlarına göre daha kolay şekilde kıyaslanmasına yardımcı olacaktır.

Altı bacaklı hexapod robot denklem 9.1' de belirtilen değişkenlerin farklı değerleri için sayısal benzetim sonuçları elde edilmiştir. Bu değişkenlerden en önemlisi robot gövdesinin ağırlık merkezinin yer seviyesinden belli bir yükseklikte bırakıldığı b_z değeridir. Bu değişken sistemin dinamiğini en fazla etkileyen değerdir. Çünkü robotun sahip olduğu dinamik yapı belirli limit değerleri arasında olmak zorundadır. Modellenen altı bacaklı hexapod robotun bu değere bağlı olarak uygun dinamik aralığı deneme-yanılma metodu ile alınan farklı b_z değerleri ile tespit edilmiştir. Elde edilen sayısal benzetim sonuçları ve grafiklerden, modellenen altı bacaklı hexapod robot düşey ekseninde b_z ' nin 40cm ve 70cm aralıklarında robotun çok başarılı olarak zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirdiğini görülmektedir. Aksi takdirde b_z ' nin daha yüksek değerlerinde(≥ 70 cm) robotun tepe-takla devrilerek yere düştüğü ve bu sınırlar dışında

kararsız bir yapıya dönüştüğü görülmüştür. Aynı zamanda deneme-yanılma metodu ile bulunan b_z ' nin değer aralığı, literatürde ki çalışmalarda kullanılan uygun aralık değerler ile aynıdır [1, 96, 139, 196].

Denklem 7.1' de ki değişkenlerden diğer önemli bir değişken robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen a salınım açısıdır($^{\circ}$). Bu değer başlangıçta belirli limit değerleri arasında olmalıdır. Modellenen altı bacaklı hexapod robotun bu değere bağlı olarak uygun dinamik aralığı deneme-yanılma metodu ile alınan farklı a değerleri ile tespit edilmiştir. Sayısal benzetim sonuçları ve grafiklerden, modellenen altı bacaklı hexapod robot a ' nin 4° ve 10° aralıklarında robotun çok başarılı olarak zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirdiğini görülmektedir. Fakat bu değer aralığı başlangıç değerleridir. Oysaki zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirdiği süreçlerde bu değer aralığı dışında da değerler alabilir. Bu robotun dinamik yapısını etkilememektedir.

Diğer bir önemli değişken ise robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{B}_y$ ' dir(m/sn). Bu değişkende sistem dinamiğini etkileyen önemli bir parametredir. Genelde modellenen robot yer seviyesinden belli bir yükseklikte belli bir ilk hız ile fırlatılarak zıplayarak yürümesi istenir. Bu ilk hız başlangıçta olması gereken bir olaydır. Eğer belli bir hız ile fırlatılmasa ($\dot{B}_y=0$) robotun aynı düşey ekseninde zıpladığı görülmektedir. Modellenen altı bacaklı hexapod robotun bu değere bağlı olarak uygun dinamik aralığı deneme-yanılma metodu ile alınan farklı $\dot{B}_y$ değerleri ile tespit edilmiştir. Sayısal benzetim sonuçları ve grafikler, modellenen altı bacaklı hexapod robot $\dot{B}_y$ ' nin 1m/sn ve 3m/sn aralıklarında robotun çok başarılı olarak zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirdiğini ve bu sınırlar dışında kararsız bir yapı olduğunu göstermiştir.

Sonuç olarak, altı bacaklı hexapod robot Şekil 9.4 ve Şekil 9.5' de görüldüğü gibi sadece iki evrede(uçuş evresi ve ye-duruş evresi) iki adet PD denetim algoritması ile başarılı bir şekilde denetlenmiştir. Oysaki Poulakakis ve arkadaşları aynı sistemin denetimini üç evrede (uçuş evresi, ileri itme evresi ve yer-duruş evresi) üç denetim algoritması ile gerçekleştirmişlerdir [1, 96, 139, 196]. Bu çalışmada modellenen zıplayarak yürümenin evreleri esnasında yapılan denetim eylem sayısı, yazarın literatür bilgisi dahilinde hexapod robot için daha önceden yapılan çalışmalardaki denetim eylem sayısından daha azdır. Ayrıca, bu çalışmada yapılan yenilik sistemin hem denetimini oldukça kolaylaştırmış olup hem de az

sayıda ki denetim algoritması ile literatürde yapılan çalışmalarla aynı başarı elde edilmiştir [1, 96, 139, 196].

10. BULANIK MANTIK DENETİM ALGORİTMASI

10.1. Giriş

Bu bölümde, sistemin denetimi için alternatif bir çözüm olarak yapay zeka tekniklerinden biri olan bulanık mantık kullanılmıştır. Bulanık mantığın insan bilgi ve tecrübelerini işleyebilme yeteneğini bir araya getirerek oluşturulan bulanık kontrol algoritması ele alınmıştır. Öncelikle bulanık mantığın tarihçesi, işleyişi, prensipleri ve bulanık mantık denetim algoritmasının modellenmesi ile ilgili konular kısaca açıklanmıştır.

Bu bölümde amacımız yay-kütle ters sarkaç (SLIP) ile modellenen bacaklı robot sisteminin zıplayarak yürüme işlevini yapay zeka tekniklerinden biri olan bulanık mantık denetimi ile denetlemektir. Yay-kütle ters sarkaç (SLIP) ile modellenen bacaklı robot sisteminin zıplayarak yürüme işlevinin yapay zeka tekniklerinden biri olan bulanık mantık ile denetlenmesi yazarların bilgisi dahilinde literatürde bir ilktir.

Öncelikle bulanık mantığın tarihçesi, işleyişi ve prensipleri konuları açıklanmış ve daha sonra sistemin denetimi için bulanık mantık denetimi tasarlanarak zıplayarak yürüme işlevi için uygulanmıştır. Bulanık mantığın üyelik fonksiyonlarına ait parametrelerin değerleri ve kural tablosu deneme yanılma tekniği ile oluşturulmuştur. Fakat daha sonra ki bölümlerde üyelik fonksiyonlarına ait parametrelerin optimum değerleri ve kural tablosu ise ANFIS tekniği ile oluşturulmuştur.

10.2. Bulanık Mantık Kavramı

Mühendislik sistemlerinin analizi genelde sayısal tekniklere dayanmaktadır. Fakat bir takım problemler tam ve kesin olarak tanımlanamadığından dolayı benzetim çalışmalarında ve modellemede zorluklara neden olmaktadır. Bu tür sorunlar karşısında, “Bulanık küme teorisi” University of California’dan Prof. Lotfi A. Zadeh’in 1965 yılındaki “Fuzzy Sets” isimli makalesi ile farklı bir çözüm önermiştir [212]. Bazı bilim adamları konuya olumlu yaklaşıp da bazıları da “bulanıklaştırmanın” bilimin temel prensibine aykırı olduğunu savunmuşlardır. Özellikle istatistik ve olasılık ile uğraşan matematikçiler, olasılık teorisinin belirsizlikleri karakterize etmede yeterli olduğunu ve bulanık teorisinin çözebileceği her problemin eşdeğer veya daha iyi bir şekilde olasılık teorisi ile çözülebileceğini iddia etmişlerdir. Başlangıçta hiçbir pratik uygulama olmadığından, bulanık teoriyi savunmak gerçekten güç olmuştur. Bu nedenle

dünyadaki hemen hemen tüm ciddi bilimsel enstitüler bulanık teoriyi pek fazla ciddiye almamışlardır.

Geleneksel kontrol sistemlerinde, sistemin matematiksel modelinin oluşturulması gerekir. Özellikle doğrusal olmayan sistemlerde bu işlem oldukça zor ve zaman alıcıdır. Bu sebeple bilgi tabanlı sistemler günümüz karmaşık sistemlerinin denetlenmesinde de önemlerini arttırmışlardır. Bulanık mantık (BM) ise sayısal değerlerin sözel ifadelerinden yola çıkarak bilgi tabanlı denetleyiciler arasında insan düşünce yapısına yaklaşmayı sağlamışlardır. Bu tür sistemler tek başlarına kullanılabildikleri gibi diğer modern veya klasik sistemlerle de kullanılabilmektedir. BM, modelleme aşamasında değişkenler ve kuralların esnek olarak belirlenmesidir. Bu esneklik asla rasgelelik ya da belirsizlik içermez. Kısaca, bulanık mantık teorisi: Aristo mantığının siyah-beyaz ikilemine karşılık, Zadeh'in grinin çeşitli derecelerinin varlığını bilimsel olarak ifade edilebilmesidir.

BM sistemlerinin avantajları kısaca şöyle sıralanabilir:

- İnsan düşünme tarzına yakındırlar
- Uygulamaları matematiksel modele ihtiyaç duymazlar
- Yazılımın basit olması dolayısıyla ucuza mal olmaktadır
- BM eksik tanımlı problemlerin çözümü için uygundur.

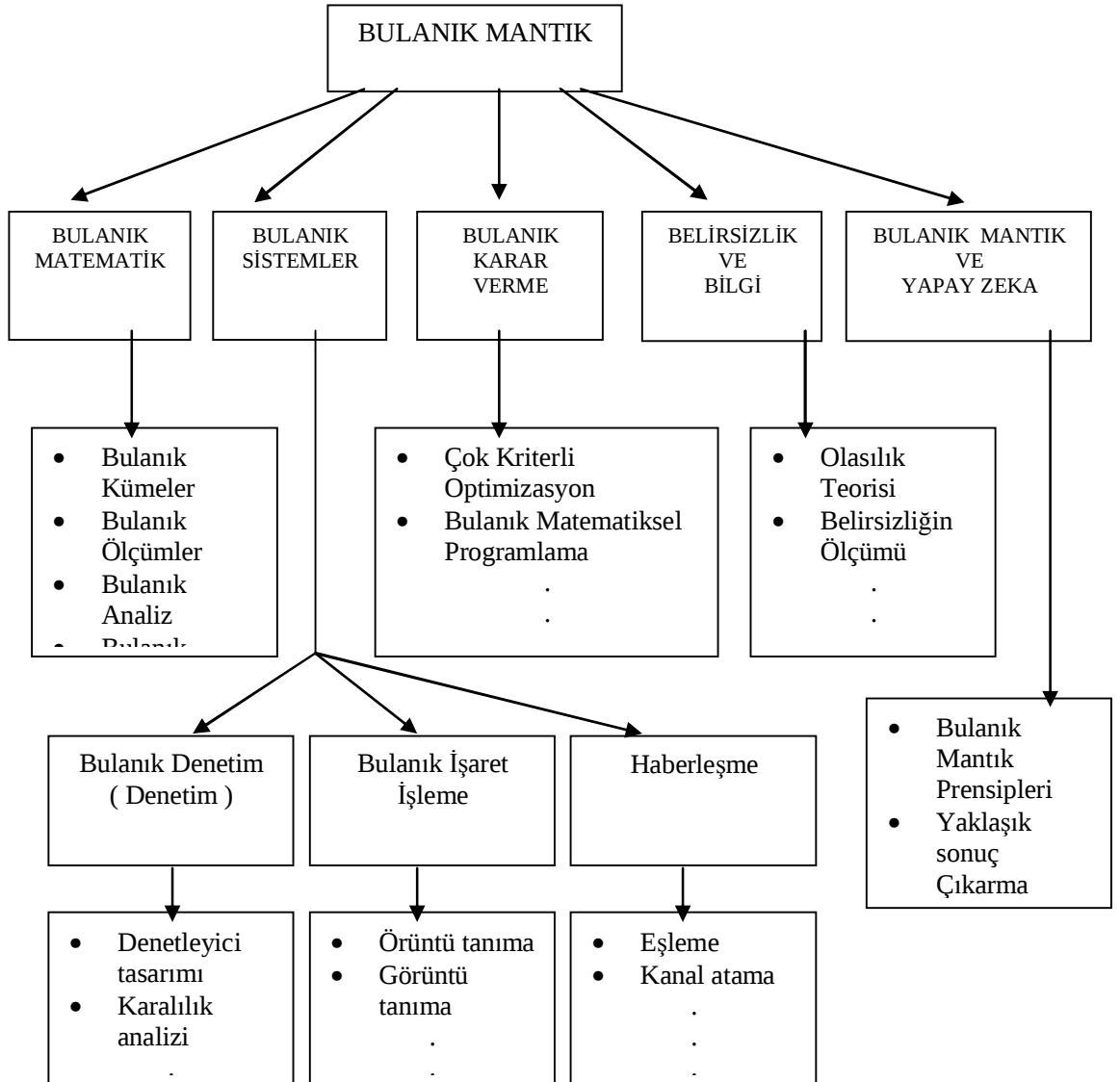
Bu sistemlerin dezavantajları ise aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Uygulamada kullanılan kuralların oluşturulması uzmana bağlıdır.
- Üyelik fonksiyonlarının seçiminde belirli bir yöntem yoktur. Deneme yanılma yolu ile bulma işlemi uzun zaman alabilmektedir.
- Denetlenen sistemin kararlılık analizinin yapılması zordur. Sistemin nasıl cevap vereceği önceden kestirilemez. Fakat, benzeşim yapılabilir.
- BM sistemleri öğrenemez ya da öğretilemez.

Bulanık mantık sistemler yeni olmasına karşılık, üzerinde en çok araştırma yapılan sistemleridir. Fakat yapılan çalışmalarla bile hala tam olarak ortak bir terminolojisi ortaya konulamamıştır. Araştırmacılar yeni yeni bu durum üzerinde durmaktadırlar.

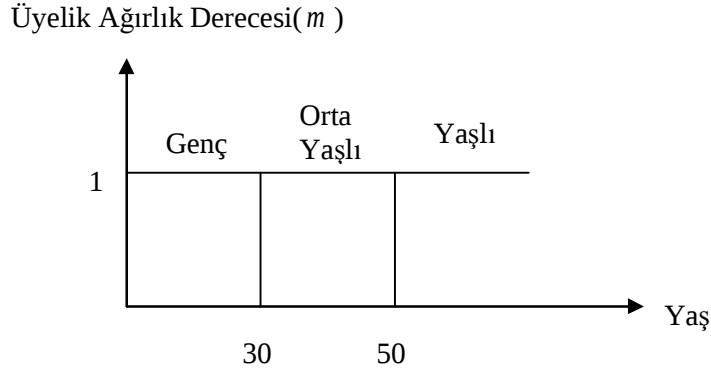
Bulanık mantık ve bulanık küme teorisi, ilk kez 1965 yılında aslen Azerbaycanlı Prof. Dr. Lotfi A. Zadeh (California University, Berkeley) tarafından ortaya atılmış ve hızla gelişerek birçok bilim adamının ilgisini çeken araştırmaya açık yeni bir konu olmuştur. Bulanık mantık, denetim, haberleşme, entegre devre üretimi, işletme, tıp ve psikoloji gibi bir çok farklı alanda uygulanmış fakat en önemli uygulamalar ve çalışmalar bulanık denetim alanında olmuştur.

Bulanık mantık konusunda başlıca araştırma alanları aşağıda Şekil 10.1’de verilmiştir. Şüphesiz bu 5 ana dal birbirinden bağımsız değildir ve aralarında kuvvetli bir ilişki vardır. Örneğin; bulanık denetim, bulanık matematik ve bulanık mantık kavramları üzerine kurulmuş bir denetim yaklaşımıdır. Olaya pratikteki uygulamalar açısından bakıldığında uygulamaların çoğunun bulanık sistemler, özellikle bulanık denetim üzerinde yoğunlaştığı görülür



Şekil 10.1. Bulanık mantığın uygulama alanları

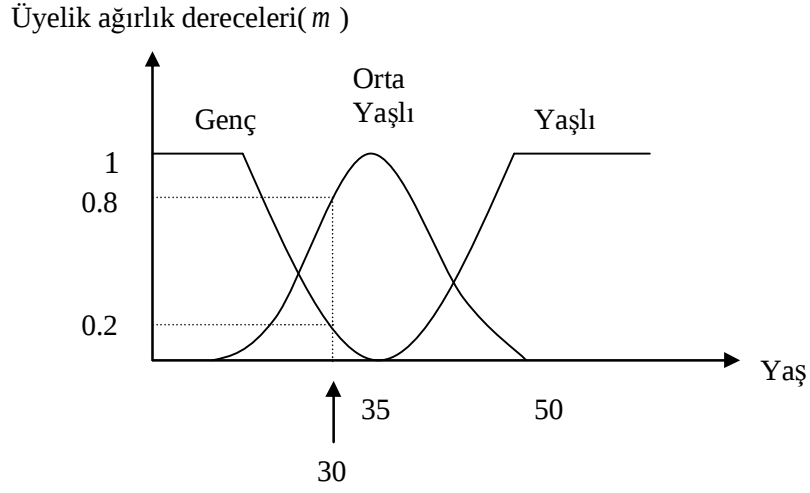
Bulanık mantığın oldukça kapsamlı ve ayrıntılı matematiksel temeli olmasına rağmen, uygulaması oldukça kolaydır. Bilinen geleneksel var-yok mantığında (boolean mantığı) bir eleman bir kümenin ya elemanıdır yada değildir (0 veya 1). Bu tür kümelere keskin küme denir. Örneğin yaş kavramını ele alalım; Şekil 10.2’de görüldüğü gibi 0-30 yaş arası “GENÇ”, 30-50 yaş arası “ORTA YAŞLI”, 50’den yukarısı “YAŞLI” olarak tanımlanmıştır.



Şekil 10.2. Üyelik ağırlık dereceleri

Bu kümeleme işlemine göre 29.5 yaşındaki bir insan genç sayılırken 30.5 yaşındaki bir insan orta yaşlı sayılmaktadır. Denetim sistemlerinde bir denetleyici için bu durumu ele alırsak, fiziksel büyüklüklerin oluşturduğu kümeler birbirinden böyle keskin çizgilerle ayrılmışsa, denetim çıkışında ani değişikliklerin olması kaçınılmazdır. Örneğin sıcaklık denetimi yapan bir ON/OFF denetleyicide, soğuk-sıcak sınırı 30°C 'de ise 29.9°C soğuk olarak algılanırken 30.1°C sıcak olarak algılanacak ve ısıtma-soğutma işlemleri çok ani değişikliklerle gerçekleşecektir ki bu istenmeyen bir durumdur.

Yukarda açıklananlara zıt olarak bulanık mantık, keskin mantığın açık/kapalı, soğuk/sıcak, hızlı/yavaş gibi ikili kavramları yerine az açık, normal açık, çok açık gibi ara kavramlar da tanımlayarak ve her değere bu kümeler içinde bir üyelik derecesi vererek gerçek dünya ile daha iyi bağdaşan uygun bir mantık oluşturur. Örneğin yine yaş konusunu ele alırsak, 30 yaşındaki bir insan pek genç sayılamayacağı gibi pek orta yaşlıda sayılamayabilir. Bu durumlarda bazen genç bazen orta yaşlı terimi uygun düşebilir. İşte bulanık kümeler, aşağıda Şekil 10.3’de görüldüğü gibi yaş ve benzeri kavramları dereceli olarak tanımlamaya imkan verir.



Şekil 10.3. Üyelik fonksiyonları ve giriş değerinin bu üyelik fonksiyonlarına olan üyelik derecelerinin gösterimi

Örneğin 30 yaşında bir insan 0.2 oranında “Genç”, 0.8 oranında “Orta-Yaşlı” olmaktadır ki bu çok daha uygun bir kümelemedir.

10.2.1. Keskin Kümeler

Elemanları x olan bir X evrensel kümenin elemanların $A \subset X$ alt kümesine aitliği, yani bu alt kümelerin elemanı olup olmadığı X 'in $\{0,1\}$ 'de tanımlı olan karakteristik fonksiyonu olarak belirlenir. Kümeye aitlik, “üyelik fonksiyonu” ile belirtilip $m(x)$ ile gösterilir ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$m_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases}$$

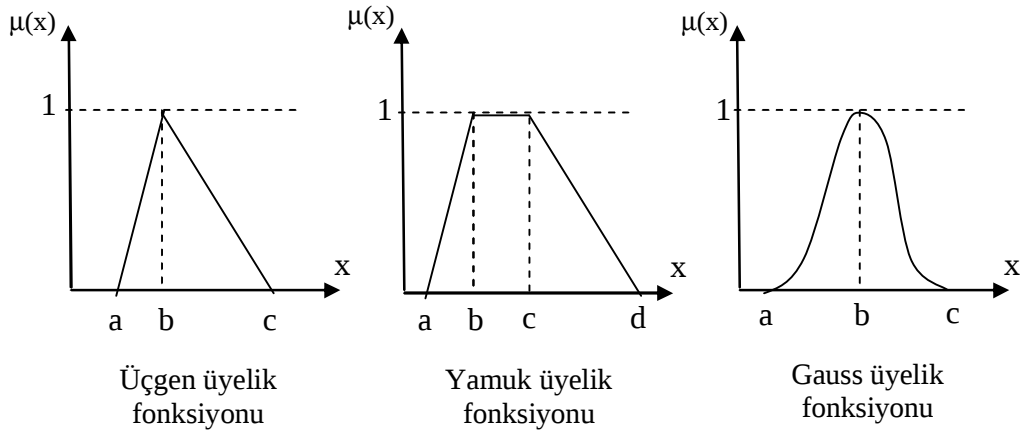
Bu tür kümeler “keskin kümeler” olarak tanımlanırlar ve bu küme teorisine göre bir eleman, bir kümenin ya elemanıdır ya da değildir.

10.2.2. Bulanık Kümeler

Keskin küme teorisinde elemanlar bir kümeye ya aitti ya da değildi. Bulanık küme teorisinde ise elemanlar bir kümeye kısmen ait olabilmektedirler. Bu aitlik “üyelik derecesi” ile belirlenir. Bulanık kümelerde üyelik derecesi karakteristik fonksiyonun genelleştirilmesi ile ölçülür ve “üyelik fonksiyonu” olarak adlandırılır.

10.2.3. Üyelik Fonksiyonları

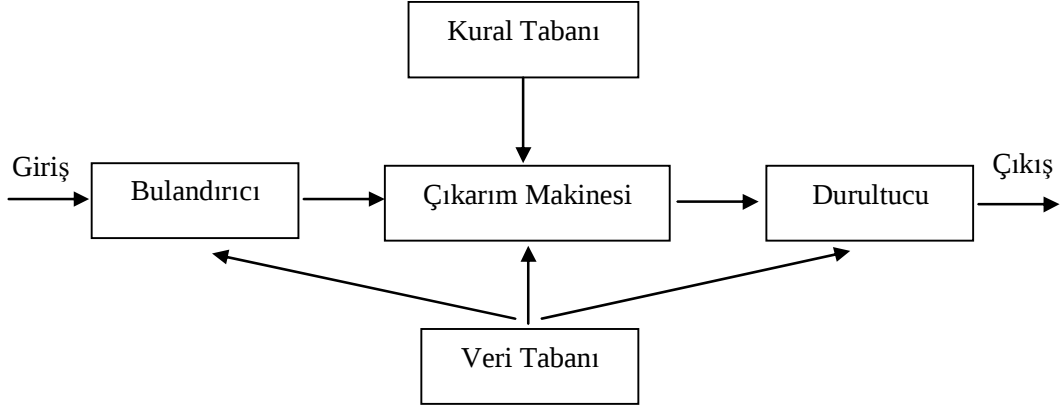
Bulanık kümeler üyelik fonksiyonları ile tanımlanırlar. Bu fonksiyonların değer kümesi $[0,1]$ aralığındadır. Üyelik ağırlıkları, belirli bir değerin, bir bulanık küme içinde yer almasının derecesini gösterir. Başka bir deyişle, bir değer, bir kümenin kısmi üyesi olabilir. Bu özellik sayesinde bulanık mantık, insan düşünce sistemini klasik boolean mantığına (var/yok) göre daha iyi modelleyebilir ve insanın tecrübelerini matematiksel ifadelerle çok daha doğru bir şekilde dönüştürebilir.



Şekil 10.4 En çok kullanılan üyelik fonksiyonları

10.2.4. Bulanık Mantık Denetimi

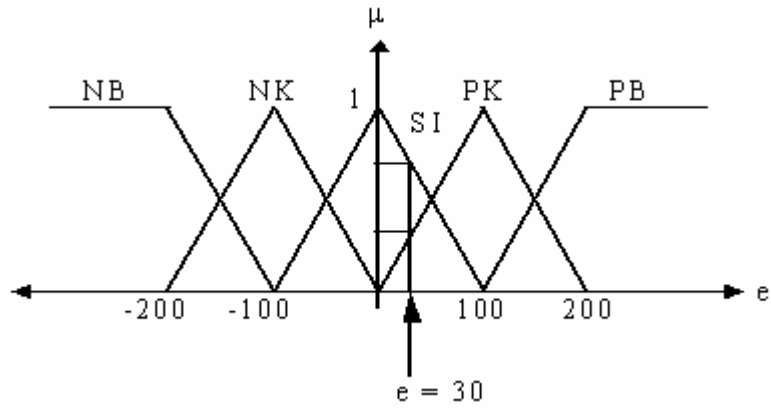
Aşağıdaki blok şemada görüldüğü gibi Bulanık mantık denetleyici(BMD)’ler Bulandırıcı, Veri Tabanı, Kural Tabanı, Çıkarım makinesi ve Durulaştırıcı olmak üzere beş ana bölümden oluşur. Bunlardan Kural Tabanı ve Veri Tabanı olarak adlandırılan bölümler, bazen ikisi birlikte ele alınarak “Bilgi Tabanı” olarak da adlandırılırlar.



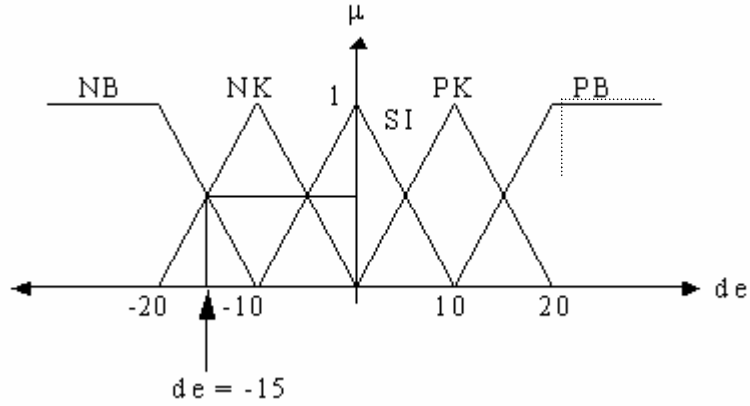
Şekil 10.5 BMD'lerin temel yapısı

10.2.4.1. Giriş Birimi Veya Bulandırıcı

Bir bulanık denetleyicinin giriş birimi olan bulandırıcı, giriş değişkenlerinin değerlerini, çıkarım mekanizmasında kolayca kullanılacak bilgilere dönüştürür. Bulandırıcı temel olarak giriş değişkenlerinin aldığı her değere, ilgili giriş değişkeni için tanımlanan tüm bulanık kümeler için bir üyelik derecesi hesaplar. Örneğin, endüstriyel denetleyicilerin çoğunda olduğu gibi denetleyicilere uygulanan giriş değişkenlerinin hata $e(k)$ ve hatadaki değişim $de(k)$ ($de(k) = e(k) - e(k-1)$) olduğunu kabul edelim. Bu giriş değişkenleri için aşağıda Şekil 10.6.a ve Şekil 10.6.b'de görülen üyelik fonksiyonları ile karakterize edilen bulanık kümelerin tanımlandığını varsayalım.



Şekil 10.6.a. Giriş değişkeni hatanın (e) 30 sayısal değeri için üyelik fonksiyonlarına olan üyelik dereceleri



Şekil 10.6.b. Giriş değişkeni hata değişiminin (de) -15 sayısal değeri için üyelik fonksiyonlarına olan üyelik dereceleri

Yukarıdaki şekillerde “NB”, “NK”, “SI”, “PK” ve “PB” gibi adlandırılan üyelik fonksiyonları “Negatif Büyük”, “Negatif Küçük”, “Sıfır”, “Pozitif Küçük” ve “Pozitif Büyük” anlamlarına işaret edecek şekilde isimlendirilmiştir. Şekil 10.6.a,b’de, örnek olarak, $e(k) = 30$ ve $de(k) = -15$ değerleri için üyelik derecelerinin belirlenmesi de gösterilmiştir. Buna göre, aşağıdaki Tablo 10.1, $e = 30$, $de = -15$ değerleri için bulandırıcının hesapladığı üyelik derecelerini göstermektedir.

Tablo 10.1 Bulanık denetleyici girişleri olan e (hata) ve de (hata değişimi) ‘nin sırası ile $e=30$ ve $de=-15$ sayısal değerleri için üyelik fonksiyonlarında aldıkları üyelik dereceleri

Hata ($e(k)$)= 30		Hatadaki değişim ($de(k)$)=-15	
Üyelik Derecesi	Bulanık Küme	Üyelik Derecesi	Bulanık Küme
0.7	SI	0.5	NB
0.3	PK	0.5	NK
0	NB, NK, PB	0	SI, PK, PB

Bu anlamda bulandırıcı, kendine uygulanan her giriş değeri için bir üyelik derecesi hesaplayarak (ilgili değişken için tanımlanan üyelik fonksiyonlarının hepsi için) çıkarım mekanizmasına iletir.

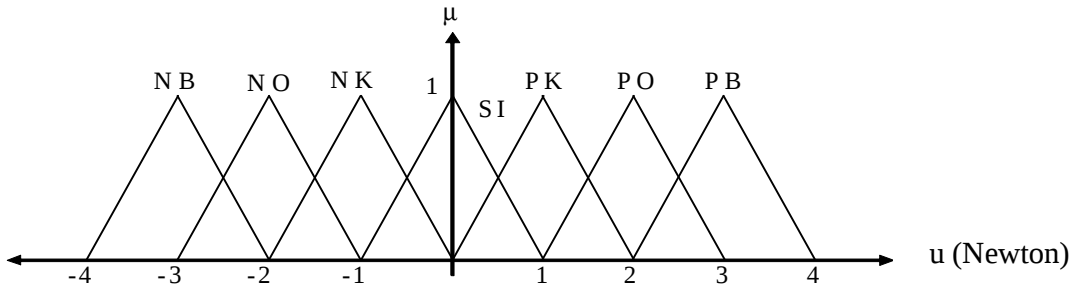
10.2.4.2. Kural Tabanı

Bir bulanık denetleyicinin kural tabanı, genellikle denetimi yapılacak sistem hakkında bilgi sahibi uzman kişilerin dilsel ifadelerinden elde edilen bir grup “IF-THEN” kuralından oluşur. Kurallar, bazen matematiksel ilişkilerden de çıkartılabilir. Kural tabanı, bir bulanık denetleyicinin kalbi olarak nitelendirilebilir. Çünkü diğer bütün birimler ve bileşenler bu kuralların makul ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesi için kullanılır. Aşağıdaki Tablo 10.2 25 kuraldan oluşan bir kural tabanını göstermektedir.

Tablo 10.2. 25 kuraldan oluşan kural tabanı

		<i>de</i>				
<i>u</i>		NB	NK	SI	PK	PB
<i>e</i>	NB	NB	NB	NO	NK	SI
	NK	NB	NO	NK	SI	PK
	SI	NO	NK	SI	PK	PO
	PK	NK	SI	PK	PO	PB
	PB	SI	PK	PO	PB	PB

Giriş değişkenleri hata (*e*) ve hatadaki değişim (*de*) dir ki bunlar için tanımlanan üyelik fonksiyonları daha önce verilmişti. Bulanık denetleyicinin çıkış değişkeni “*u*”dur ve çıkış için tanımlanan üyelik fonksiyonları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 10.7. Çıkış değişkeni *u* için tanımlanan üyelik fonksiyonları

Örneğin kural tabanındaki bir kural aşağıdaki gibi yazılır:

IF (e is SI AND de is NK) THEN (u is NK)

eğer e=SI **ve** de=NK **ise o zaman** u=NK

IF (Varsayım) THEN (Sonuç)

Kuralların “Varsayım” kısmı denetleyicinin giriş değişkenleri ile “Sonuç” kısmı ise çıkış değişkeni ile ilgilidir. Yukarıda verilen örnekte, her varsayım “AND” operatörü ile bağlanmış iki terimden oluşmaktadır. Varsayım kısmı ikiden daha fazla terimden oluşabileceği gibi “OR” ve “NOT” operatörleri ile de bağlanabilir. Eğer sistemin çıkışı birden fazla ise, kuralların sonuç kısmı birden fazla terim içerebilir.

10.2.4.3. Çıkarım Mekanizması

Çıkarım mekanizması, bulandırıcının çıkışlarını (üyelik derecelerini) ve kural tabanını kullanarak bir bulanık küme oluşturur. Bu bulanık küme, durultucu tarafından denetleyicinin çıkışını hesaplamak için kullanılacaktır.

Çıkarım mekanizmalarında genellikle iki ana yaklaşım kullanılır. Bunlardan ilki “birleşim tabanlı çıkarım” ikincisi ise “bireysel kural tabanlı çıkarım”dır. Bileşim tabanlı çıkarım yönteminde, öncelikle bütün kurallar birleştirilerek tek bir bulanık ilişki elde edilir. Çıkarım bu birleştirilerek oluşturulan tek bulanık ilişki ve bulandırıcıdan gelen sonuçlar kullanılarak gerçekleştirilir. Netice olarak denetim çıkışını ifade eden bir bulanık küme elde edilir.

Bireysel kural tabanlı çıkarım yönteminde ise, her kural bireysel bir bulanık çıkış kümesi belirler ve çıkarım mekanizmasının çıkışı bireysel bulanık çıkış kümelerinin toplanarak bir araya getirilmesi neticesinde elde edilir. Hesaplama süresi açısından bireysel tabanlı çıkarım mekanizması daha avantajlı olduğundan denetim sistemlerinde genellikle bu yöntem kullanılır.

Çıkarım mekanizmasında, üç ana işlem türü mevcuttur; bunlardan ilki kuralların varsayım kısmındaki terimler arasındaki işlemlerdir. Terimler genellikle “AND”, “OR” veya “NOT” işlemleriyle bağlanmışlardır. Fakat denetim uygulamalarında genellikle “AND” işlemi kullanılır. Temel olarak, bu operatörler giriş değerleri ile üyelik dereceleri arasındaki işlemi

gerçekleştirir ve sonuç olarak her kural için bir kuralın kesinlik derecesi elde edilir. İkinci işlem ise kuralın kesinlik derecesi ile, ilgili kuralın bulanık çıkış kümesi arasındaki “İMA” işlemidir. “İMA” işleminden sonra kural tabanındaki her kural bir ima edilen bulanık çıkış kümesi oluşturur. Üçüncü tür işlem ise, ima edilen bulanık çıkış kümelerini “TOPARLAMA” işlemidir. “TOPARLAMA” işlemi neticesinde sonuç bulanık çıkış kümesi elde edilir. Bazı durultucu yöntemleri, direk olarak ima edilen bulanık çıkış kümelerini kullanır. Dolayısıyla bu tip durultucular için “TOPARLAMA” işlemi gerekmez . “AND”, “OR”, “İMA” ve “TOPARLAMA” işlemleri için en sık kullanılan operatörler aşağıdaki gibidir:

AND : min veya cebirsel çarpma

OR : max veya olasılık VEYA'sı

İMA : min veya cebirsel çarpma

TOPARLAMA : max veya cebirsel toplam

Yine örnek olarak, ikinci bölümde verilen kural tabanı ve üyelik fonksiyonları göz önüne alınır ve “AND” işlemi için "cebirsel çarpım", “İMA” işlemi için "min" ve “TOPARLAMA” işlemi için ise "max" operatörlerinin kullanıldığını varsayılırsa, formülasyona uygunluk açısından, kural tablosundaki kurallar da aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\text{IF (} e \text{ is } E_i \text{ AND } de \text{ is } dE_i \text{) THEN } u \text{ is } U_{ij} \quad (10.1)$$

Burada "i" kural tablosundaki satıra , "j" 'de sütuna işaret etmektedir ($i=1,...,5$ ve $j=1,...,5$). E_i , dE_j ve U_{ij} ise i ve j' nin belirlediği bulanık kümelere denk gelmektedir. Örneğin $i=2$ ve $j=3$ ise

$$E_i \equiv NK, dE_j \equiv SI \text{ ve } U_{ij} \equiv NK \text{ olmaktadır.} \quad (10.2)$$

Buna göre, ima edilen bulanık çıkış kümelerinin genel gösterimi

$$\mu_{ij}(u) = \min \{ \mu_{ij}^{CR}, \mu_{ij}^U(u) \} \quad (10.3)$$

şeklinde olur. Burada ilgili kuralın kesinlik derecesi

$$\mu_{ij}^{CR} = \mu_i^E(e^*) \cdot \mu_j^{dE}(de^*) \text{ dir.} \quad (10.4)$$

$\mu_i^E(\cdot)$, $\mu_j^{dE}(\cdot)$ ve $\mu_{ij}^U(u)$ fonksiyonları sırasıyla E_i , dE_j ve U_{ij} 'ye karşılık gelen üyelik fonksiyonlarını göstermektedir. e^* ve de^* değerleri girişlere uygulanan sayısal değeri ifade etmektedir. Böylece $\mu_i^E(e^*)$ ve $\mu_j^{dE}(de^*)$ değerleri, e^* 'in ve de^* 'in E_i ve dE_j bulanık kümeleri içindeki üyelik derecelerini göstermektedir. "TOPARLAMA" işlemi için "max" operatörü kullanıldığı için, sonuç bulanık çıkış kümesi:

$$\mu_{out}(u) = \max\{\mu_{11}(u), \mu_{12}(u), \dots, \mu_{54}(u), \mu_{55}(u)\} \quad \text{şeklinde ifade edilir.} \quad (10.5)$$

Çıkarım mekanizmasının nasıl çalıştığını yine $e=30$ ve $de=-15$ sayısal değerlerini ele alarak tekrar incelenirse, $e^*=30$ ve $de^*=-15$ alınabilir. Bu sayısal giriş değerleri için bulandırıcının çıkarım mekanizmasına gönderdiği üyelik dereceleri

$$\mu_3^E(30)=0.7, \mu_4^E(30)=0.3 \text{ ve } \mu_i^E(30)=0 \text{ } i=1,2,5 \text{ için} \quad (10.6)$$

$$\mu_1^{dE}(-15)=0.5, \mu_2^{dE}(-15)=0.5 \text{ ve } \mu_i^{dE}(-15)=0 \text{ } i=3,4,5 \text{ için.} \quad (10.7)$$

şeklindedir.

Kuralların kesinlik dereceleri $\mu_{ij}^{CR} = \mu_i^E(e^*) \cdot \mu_j^{dE}(de^*)$ eşitliği kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\mu_{31}^{CR}=0.35; \mu_{32}^{CR}=0.35; \mu_{41}^{CR}=0.15; \mu_{42}^{CR}=0.15 \quad (10.8)$$

$$\mu_{ij}^{CR}=0 \text{ eğer } (i,j) \neq \{(3,1);(3,2);(4,1);(4,2)\}. \quad (10.9)$$

Böylece ima edilen bulanık çıkış kümeleri:

$$\mu_{31}(u) = \min\{0.35, \mu_{31}^U(u)\}; \mu_{32}(u) = \min\{0.35, \mu_{32}^U(u)\} \quad (10.10)$$

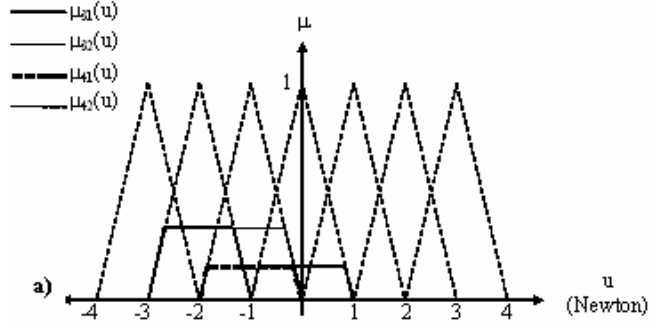
$$\mu_{41}(u) = \min\{0.15, \mu_{41}^U(u)\}; \mu_{42}(u) = \min\{0.15, \mu_{42}^U(u)\} \quad (10.11)$$

$\mu_{ij}(u)=0$ eğer $(i,j) \neq \{(3,1);(3,2);(4,1);(4,2)\}$ şeklinde elde edilir. Buna göre, sonuç bulanık çıkış kümesi:

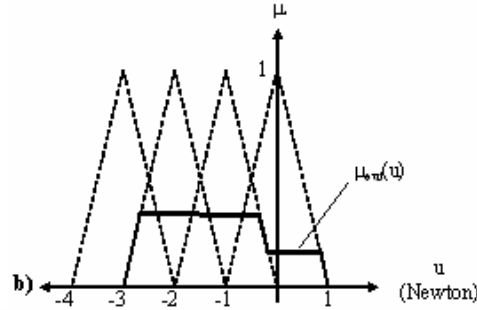
$$\mu_{out}(u) = \max\{\mu_{31}(u), \mu_{32}(u), \mu_{41}(u), \mu_{42}(u)\} \text{ olur.} \quad (10.12)$$

Bunun anlamı, sadece $i=3, 4$ ve $j=1, 2$ 'ye karşılık gelen 4 kural sonuç bulanık çıkış kümesinin oluşmasında etkili olmuştur. Giriş değişkenlerinin bu sayısal değerleri için ($e=30$, $de=-15$), diğer 21 kuralın çıkışa hiçbir etkisi olmamıştır. Şekil 10.8.a ima edilen bulanık çıkış kümelerini ve Şekil 10.8.b'de bunların "Toparlama" işlemlerinden sonra oluşturdukları sonuç

bulanık çıkış kümesini göstermektedir. Çıkarım mekanizması, çıkış olarak Şekil 10.8.b'deki gibi $\mu_{out}(u)$ diye adlandırılan sonuç çıkış bulanık kümesini tespit eder. Bu küme, çıkışın sayısal değerini hesaplamak için durultucu birimine gönderilir.



Şekil 10.8.a. İma edilen bulanık küme



Şekil 10.8.b. Sonuç çıkış bulanık kümesi

10.2.4.4. Çıkış Birimi Veya Durultucu

Durultucu birimi, çıkarım mekanizmasının oluşturduğu sonuç çıkış bulanık kümesini kullanarak denetleyicinin çıkışını sayısal olarak hesaplar. En çok kullanılan durultma metodu "Ağırlık Merkezi" yöntemidir. Bu yöntemde $\mu_{out}(u)$ bulanık kümesinin ağırlık merkezi aşağıda verilen formülle hesaplanır:

$$u^* = \frac{\int u \mu_{out}(u) du}{\int \mu_{out}(u) du} \quad (10.13)$$

Fakat $\mu_{out}(u)$ fonksiyonunun integralini hesaplamak bazen güç ve zaman alıcı olabilmektedir. Sonuç bulanık çıkış kümesi ima edilen bulanık çıkış kümelerinin birleşimi neticesinden elde edildiğinden, ağırlık merkezi hesaplanmasının yaklaşık değeri, ima edilen bulanık çıkış

kümelerinin merkezlerinin ağırlıklı ortalaması hesaplanarak bulunabilir. Örneğin, u_n n'inci ima edilen bulanık kümenin merkezi ve w_n 'de bu kümenin yüksekliği olsun. Buna göre denetleyicinin çıkışının sayısal değeri

$$u^* = \frac{\sum_{n=1}^m w_n u_n}{\sum_{n=1}^m w_n} \quad (10.14)$$

olarak hesaplanır.

Bu yöntem "Merkezlerin Ağırlıklı Ortalaması" metodu denir. Çıkış hesaplaması oldukça kolay olduğundan bulanık denetim uygulamalarında en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde, "TOPARLAMA" işlemine ihtiyaç yoktur. Çünkü çıkışın sayısal değeri direk olarak ima edilen bulanık çıkış kümeleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Dikkat edilecek olursa w_n aslında ilgili kuralın kesinlik derecesidir .

Hesaplamalarda, çıkış bulanık kümelerinin sadece merkezleri kullanıldığı için, çıkış bulanık kümelerinin şekilleri önemli değildir. Yine yukarıda kullanılan $e=30$, $de=-15$ örneğini ele alırsak ve "Merkezlerin Ağırlıklı Ortalaması" yöntemi durultma işlemi için seçilirse o zaman çıkış

$$u^* = \frac{0.35 * (-2) + 0.35 * (-1) + 0.15 * (-1) + 0.15 * 0}{0.35 + 0.35 + 0.15 + 0.15} = -1.2 \quad (10.15)$$

olarak hesaplanır.

10.2.5. Sugeno Tipi Bulanık Denetleyiciler

Şimdiye kadar anlatılan bulanık denetleyici yapısı "Standart Bulanık Denetleyici" veya bazen de "Mamdani" tipi bulanık denetleyici olarak adlandırılmıştır. Bu bölümde ise, çok sık kullanılan başka bir bulanık denetleyici türü olan "*sugeno*" tipi denetleyicilerden söz edilecektir. Sugeno tipi denetleyiciyi Mamdani tipi denetleyiciden ayıran en büyük fark kurallarda gösterilen çıkışların bulanık kümelerle değil de giriş değişkenlerinin fonksiyonları türünden ifade edilmesidir . Sugeno tipi bir denetleyicide kurallar;

$$\text{IF } (x_1 \text{ is A AND } x_2 \text{ is B}) \text{ THEN } y=f(x_1,x_2) \quad (10.16)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $f(\cdot)$ giriş değişkenlerinin doğrusal veya doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. Çıkış doğrudan bir fonksiyonla hesaplandığı için “durultucu” birimi bu tip denetleyicilerde gerekmez. Denetleyicinin çıkışı, genellikle her kuralın oluşturacağı çıkışların ağırlıklı ortalaması bulunarak hesaplanır. Bu tip denetleyiciler özellikle, bilinen veya önceden tasarlanmış birkaç klasik denetleyici arasında enterpolasyon yaparak çıkışı hesaplamak için kullanılır. Konunun daha iyi anlaşılması için aşağıdaki örnek verilmiştir :

1.Kurallar:

$$1\text{-IF } (x_1 \text{ is A AND } x_2 \text{ is B}) \text{ THEN } y=f_1(x_1,x_2) \quad (10.17)$$

$$2\text{- IF } (x_1 \text{ is A AND } x_2 \text{ is B}) \text{ THEN } y=f_2(x_1,x_2)$$

$$3\text{- IF } (x_1 \text{ is A AND } x_2 \text{ is B}) \text{ THEN } y=f_3(x_1,x_2)$$

$$4\text{- IF } (x_1 \text{ is A AND } x_2 \text{ is B}) \text{ THEN } y=f_4(x_1,x_2)$$

2. Çıkış Fonksiyonları:

$$f_1(x_1,x_2)=3x_1-2x_2+1 \quad (10.18)$$

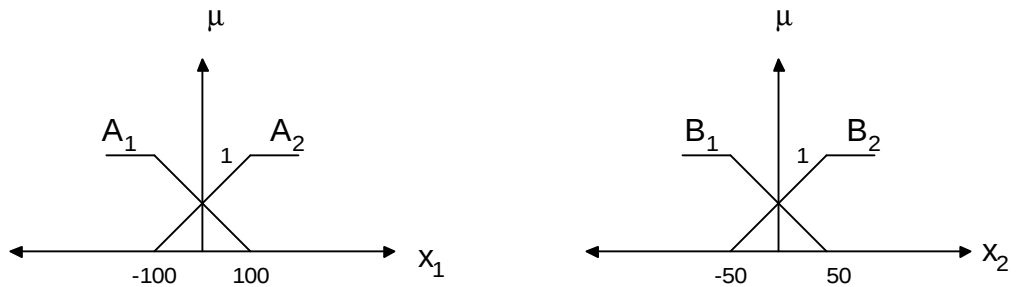
$$f_2(x_1,x_2)=x_1+x_2$$

$$f_3(x_1,x_2)=2x_1+x_2-2$$

$$f_4(x_1,x_2)=x_1-3x_2+5$$

olarak verilmiştir. AND operatörü için cebirsel çarpma seçildiğine göre $x_1=50$, $x_2=0$ değerleri için denetleyicinin çıkışı y' yi şu şekilde hesaplanır:

- Bulandırıcıda Yapılan Hesaplamalar (Üyelik Derecelerinin Hesaplanması)



Şekil 10.9. Giriş değişkenleri (x_1 ve x_2) için tanımlanan üyelik fonksiyonları

Giriş değişkenleri (x_1 ve x_2) için tanımlanan üyelik fonksiyonları Şekil 10.9'daki gibi verilmiş olsun:

$$m_{A_1}(x_1) = \begin{cases} 0 & x_1 > 100 \\ 1 & x_1 < -100 \\ -\frac{1}{200}x_1 + 0.5 & -100 \leq x_1 \leq 100 \end{cases}$$

$x_1=50$ ise,

$$m_{A_1}(50) = -\frac{1}{200}50 + 0.5 = 0.25 \quad (10.19)$$

$$m_{A_2}(x_1) = \begin{cases} 0 & x_1 < 100 \\ 1 & x_1 > -100 \\ \frac{1}{200}x_1 + 0.5 & -100 \leq x_1 \leq 100 \end{cases}$$

$x_1=50$ ise,

$$m_{A_2}(50) = \frac{1}{200}50 + 0.5 = 0.75 \quad (10.20)$$

Not: Giriş üyelik fonksiyonlar birbiriyle simetrik olduğundan $m_{A_1}(x_1) = 1 - m_{A_2}(x_1)$ şeklinde ifade edilebilir. Benzer şekilde x_2 girişi için:

$$m_{B_1}(x_2) = \begin{cases} 0 & x_2 < 50 \\ 1 & x_2 > -50 \\ -\frac{1}{100}x_2 + 0.5 & -50 \leq x_2 \leq 50 \end{cases}$$

$x_2=0$ ise,

$$m_{B_1}(0) = -\frac{1}{100}0 + 0.5 = 0.5 \quad (10.21)$$

$$m_{B_2}(x_2) = \begin{cases} 0 & x_2 < -50 \\ 1 & x_2 > 50 \\ \frac{1}{100}x_2 + 0.5 & -50 \leq x_2 \leq 50 \end{cases}$$

$x_2=0$ ise,

$$m_{B_2}(0) = \frac{1}{100}0 + 0.5 = 0.5$$

(10.22)

Tablo 10.3. x_1 ve x_2 giriş üyelik fonksiyonlarına ait üyelik dereceleri ve üyelik fonksiyonları

$x_1=50$ değeri için		$x_2=0$ değeri için	
Üyelik Derecesi	Üyelik Fonksiyonları	Üyelik Derecesi	Üyelik Fonksiyonları
0.25	A_1	0.5	B_1
0.75	A_2	0.5	B_2

- Çıkarım Mekanizmasındaki Hesaplamalar

1. kuralın kesinlik derecesi: $m_{11}^{CR} = 0.25 * 0.5 = 0.125$

2. kuralın kesinlik derecesi: $m_{12}^{CR} = 0.25 * 0.5 = 0.125$

3. kuralın kesinlik derecesi: $m_{21}^{CR} = 0.75 * 0.5 = 0.375$

4. kuralın kesinlik derecesi: $m_{22}^{CR} = 0.75 * 0.5 = 0.375$

$$f_1(50,0) = 3 * 50 - 2 * 0 + 1 = 151$$

$$f_2(50,0) = 50 + 0 = 50$$

$$f_3(50,0) = 2 * 50 + 0 - 2 = 98$$

$$f_4(50,0) = 50 - 3 * 0 + 5 = 55$$

- Çıkışın Hesaplanması

Çıkışın sayısal değerini bulmak için ağırlıklı ortalama metodu kullanılır. Buna göre:

$$y = \frac{m_{11}^{CR} * f_1(50,0) + m_{12}^{CR} * f_2(50,0) + m_{21}^{CR} * f_3(50,0) + m_{22}^{CR} * f_4(50,0)}{m_{11}^{CR} + m_{12}^{CR} + m_{21}^{CR} + m_{22}^{CR}} \quad (10.23)$$

$$y = \frac{0.125 * 151 + 0.125 * 50 + 0.375 * 98 + 0.375 * 55}{0.125 + 0.125 + 0.375 + 0.375} \quad (10.24)$$

şeklinde çıkışın sayısal değeri hesaplanır.

11. QUADRUPELAL ROBOT ZIPLAMA MODELİNİN BULANIK MANTIK İLE DENETİMİ VE SAYISAL BENZETİMİ

11.1. Sistemin Morfolojisi ve Genel Kavramı

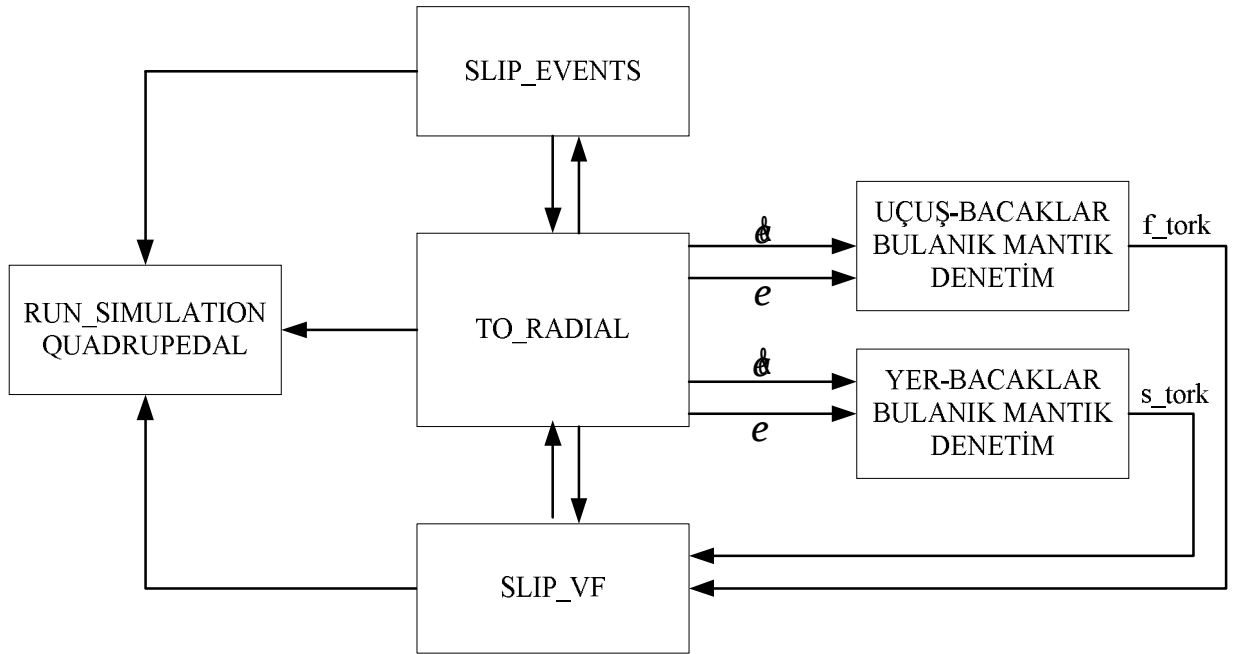
Dört bacaklı quadrupedal robot sisteminin modellenmesi, denetimi ve sayısal benzetimi MATLAB paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zıplayarak dengeli dinamik yürüme işlemi MATLAB paket programında bir ana programdan ve beş alt program olmak üzere toplam altı adet m-file' dan oluşmaktadır. Ana programı run_simulation-quadrupedal ismi temsil ederken alt praogramları sırasıyla Slip_Events, To_Radial, Slip_Vf, Flight_Control ve Stance_Control isimleri ile temsil edilmektedir. Bu ana program ve alt programlar Şekil 11.1' de de görüldüğü gibi sürekli eş zamanlı olarak birbirleri ile veri alış verişinde bulunarak ilişkili çalışmaktadırlar. Ana programda sisteme ait başlangıç değerleri, robot parametreleri ve sayısal benzetime ait grafik komutları mevcuttur. Slip_Events alt programı içerisinde robotun evre ve durumlarını belirleyerek dinamik döngüyü oluşturur. Slip_Vf alt programı içerisinde ise sistemin dinamik denklemleri mevcuttur. To_Radial alt programında sisteme ait kinematik denklemler çözülmektedir. Flight_Control ve Stance_Control alt programlarında da denetim algoritmaları oluşturulmuştur.

11.2. Bulanık Mantık Denetim Algoritma Tasarımı

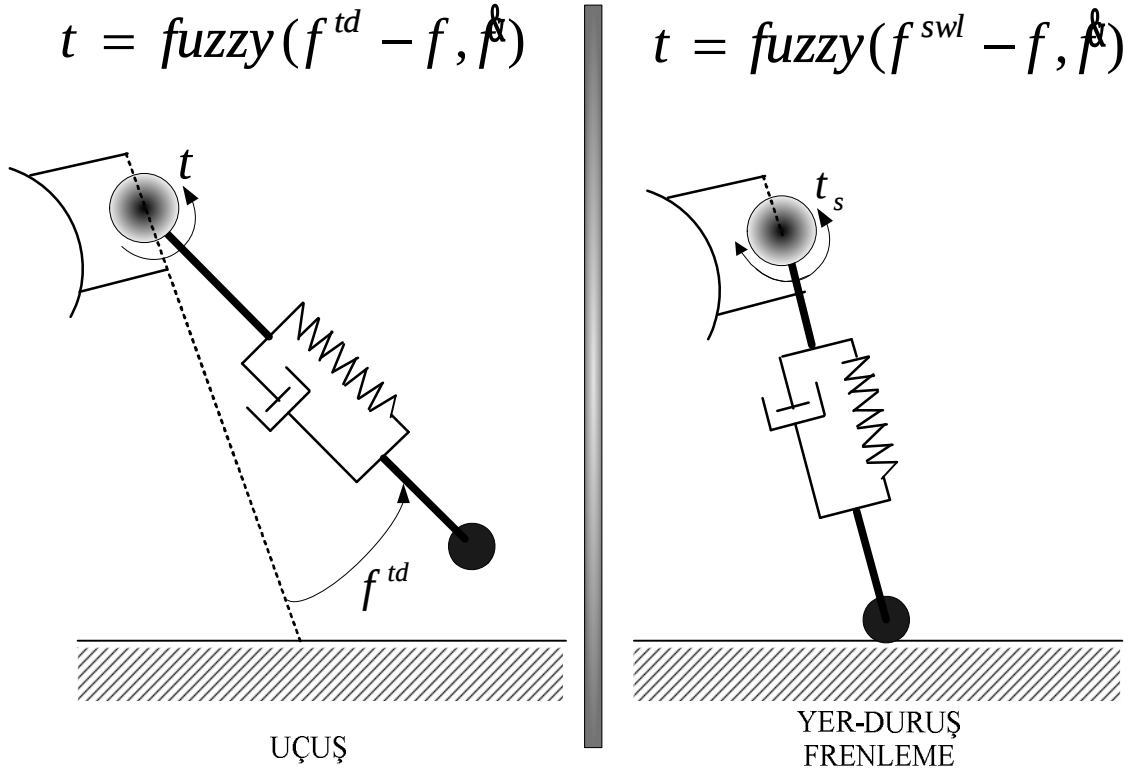
Denetim algoritmasının çıkış sinyalleri; dört bacaklı quadrupedal robotun kalça kısmında bulunan eyleyicilere, Bulanık Mantık Denetim Algoritması ile üretilen uygun tork değerleridir. Burada sistem bilindiği gibi iki farklı kapalı dinamik döngüden oluşmaktadır. Zıplayarak yürüme işlemleri ardışık kapalı bir döngü içerisinde farklı dinamik yapılardan oluşur. Quadrupedal robot iki evrede ayrı ayrı denetlenerek zıplayarak dengeli dinamik yürüme eylemini gerçekleştirmektedir. Bu denetim evreleri Şekil 11.2' de görülmektedir. Birinci evre olan uçuş evresinde ön ve arka sanal bacakların yere dokunma açıları (f^{td}), ikinci evre olan yer-duruş evresinde ise ön ve arka sanal bacakların süpürme açıları (f^{swl}) istenilen değerde olabilmeleri için Bulanık Mantık Denetim Algoritması ile uygun çıkış sinyali olarak tork elde edilerek sistem denetlenmektedir. Denetim algoritmasında sistemin girişlerini e hata ve δ hatanın değişim değerleri oluşturmaktadır. Burada hata, sistemin uçuş ve yer-duruş evrelerinde ön ve arka sanal bacakların gövdeye göre anlık ölçülen açı değerleri ile ön ve arka sanal bacaklar için istenilen açı değerleri arasındaki farktır. Sistemin çıkışlarını ise hata ve hatanın zamana göre anlık değişim değerlerini minimize edecek şekilde ön ve arka sanal bacakları

tahrik eden eğleyicilere uygulanan uygun tork değerleridir. Sisteme ait giriş ve çıkış değerleri Şekil 11.1 ve Şekil 11.6' de görülmektedir.

Burada Bulanık Mantık denetimde Mamdani metodu kullanılmıştır. Her bir sanal bacak için, Bulanık Mantık Denetim iki giriş ve bir çıkıştan oluşan bir sistemdir. Quadrupedal robotun zıplayarak dengeli dinamik yürüyüş denetiminin tamamında toplam dört giriş ve iki çıkıştan ibarettir. Bu çalışmada ön ve arka sanal bacakların tümü için de aynı kural tablosunu kullanıldı. Kural tablosu Tablo 11.1' de tanımlanmıştır. Hata(e), hata değişimi($\dot{e}$) ve tork(t) değerleri için gerekli üyelik fonksiyonları sırası ile Şekil 11.3, 11.4 ve 11.5' de gösterilmiştir. Bulanık Mantık denetim algoritması hata (e) ve hata değişimine($\dot{e}$) minimize ederek, sanal bacaklar için gerekli olan tork değerlerini ($t_{ön_bacak}$, t_{arka_bacak}) çıkış sinyali olarak üretirler.



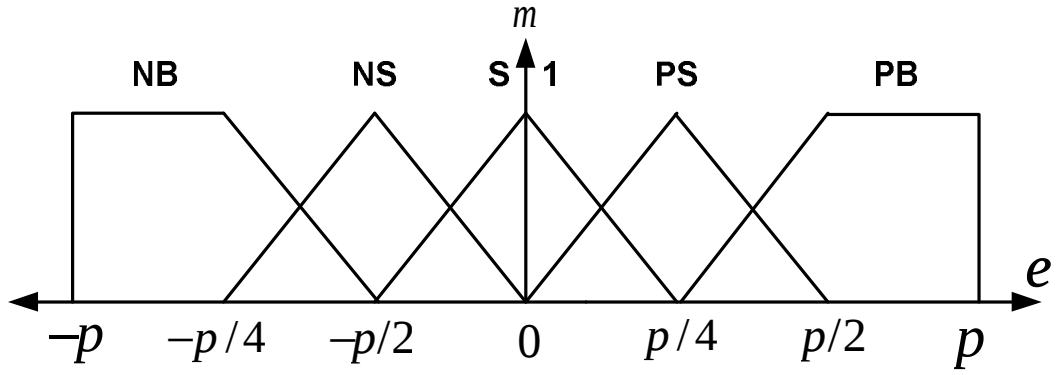
Şekil 11.1 Tasarlanan Sisteme Ait Blok Diyagram



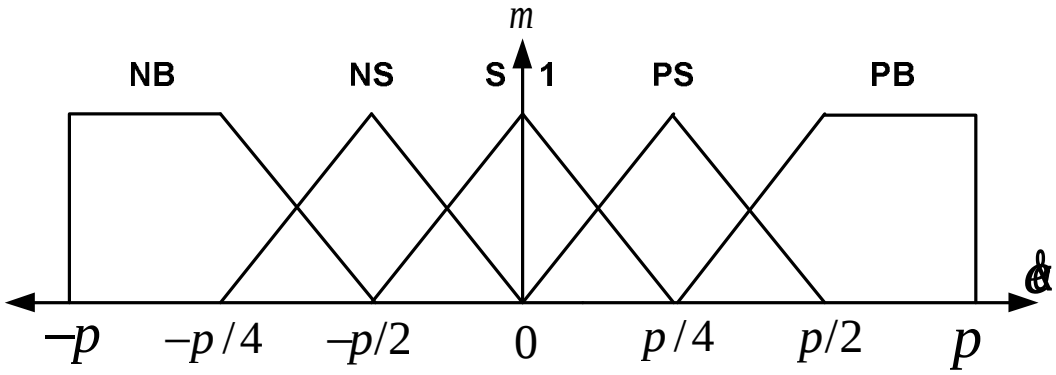
Şekil 11.2 Zıplayarak Yürüme Evreleri Sırasında Kontrol Algoritması (Denetim iki eylemden ibarettir.)

Tablo 11.1 Bulanık Mantık Denetleyicisi için tasarlanan kural tablosu

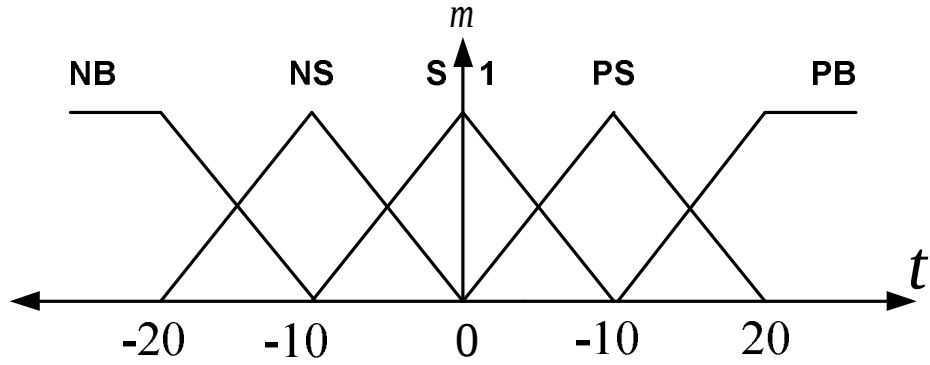
		$\&$					
		t	NB	NS	S	PS	PB
e	NB	NB	NB	NB	NS	S	
	NS	NB	NB	NS	S	PS	
	S	NB	NS	S	PS	PB	
	PS	NS	S	PS	PB	PB	
	PB	S	PS	PB	PB	PB	



Şekil 11.3 Hata (e) giriş değeri için üyelik fonksiyonu



Şekil 11.4 Hata değişim ($\dot{e}$) giriş değeri için üyelik fonksiyonu



Şekil 11.5 Çıkış değeri tork (t) için üyelik fonksiyonu

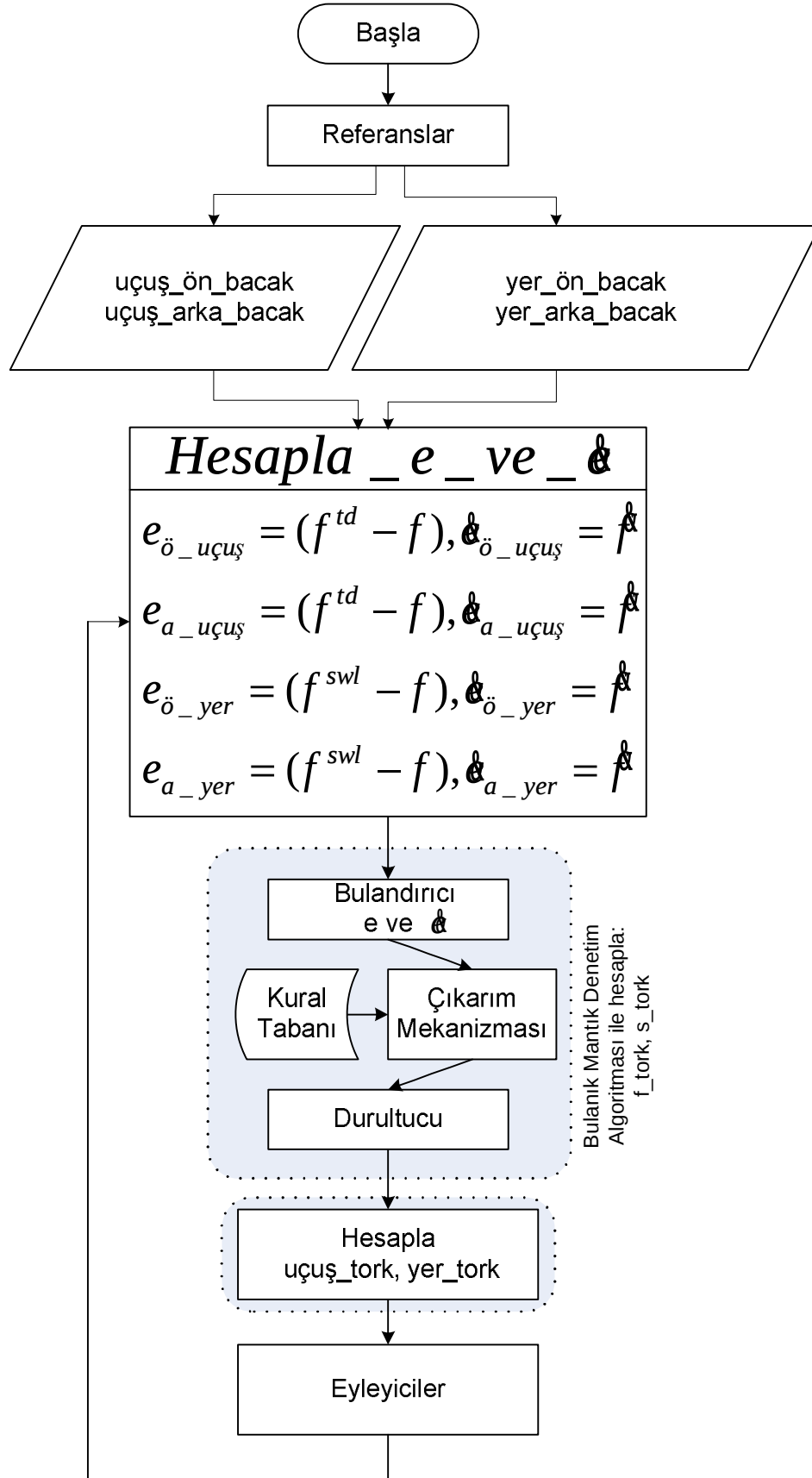
Üyelik fonksiyonları 0 ve 1 arasında bir üyelik derecesine sahip olan, sistemin giriş ve çıkışlarının her bir noktada nasıl tanımlandığını gösteren eğrilerdir. Burada sistem girişini oluşturan hata (e) ve hata değişimi ($\dot{e}$) için trapezoidal ve triangular tip üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. e ve $\dot{e}$ giriş değerleri için kullanılan üyelik fonksiyonlarının fiziksel olarak tanım kümesi $\{-p, -p/2, -p/4, 0, p/4, p/2, p\}$ deneme-yanılma metodu ile

oluşturulmuştur. Sistemin çıkış değeri t için üyelik fonksiyonu olarak triangular tip eğrileri kullanılmıştır. Ayrıca, sistem çıkışı t için kullanılan fiziksel küme deneme-yanılma metodu ile $\{-20, -10, 0, 10, 20\}$ olarak tanımlanmıştır.

Bulanık Mantık Denetleyicisinin giriş (e ve $\dot{e}$) ve çıkış (t) değişkenleri için bir kural tablosu tasarlanmıştır;

$e, (\dot{e}), t = \{\text{hata, hata değişimi, denetim değişkeni} \{ \text{NB (Negatif Büyük), NS (Negatif Küçük), S (Sıfır), PS (Pozitif Küçük), PB (Pozitif Büyük)} \}, [-p, p], \mu\}$

Bulanık Mantık sisteminin temeli, üyelik işlevlerinden ortaya çıkarılan dilsel değişkenlerin oluşturduğu girişleri karar verme sürecinde kullanmaktır. Bulanık Mantık denetleyicisinin kural tabanı, genellikle denetlenecek sistem hakkında bilgi sahibi uzman kişilerin dilsel ifadelerinden elde edilen bir grup EĞER-O HALDE kuralından oluşur. Tablo 11.1’ de Bulanık Mantık denetleyicisi için tasarlanan ve 25 kuraldan oluşan kural tablosu gösterilmektedir.



Şekil 11.6 Dizayn edilen sistem için Bulanık Mantık Denetim Akış Diyagramı

11.3. Quadrupedal Robotun Bulanık Mantık Denetim İle Sayısal Benzetimi

11.3.1. Sayısal Benzetim ve Elde Edilen Grafikler

Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki düzlemsel z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi, robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α (alfa) salınım açısı($^{\circ}$), robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m), robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu faz eğri çizimleri, robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m), robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn), robotun ön-arka bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m), robotun ön bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m), robotun arka bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m), robotun ön-arka bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$), robotun ön bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$), robotun arka bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$), robotun ön-arka bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J), robotun ön bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{\text{ön}}$ (J), robotun arka bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J), hatanın zaman ile değişimi (e), robotun ön-arka bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m), robotun ön-arka bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm), robotun ön bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{\text{ön}}$ (Nm) ve robotun ön bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm) gibi önemli sayısal benzetim sonuçları farklı başlangıç değerlerine göre her bir grafikte gösterilmiştir.

Sayısal benzetim grafikleri quadrupedal robotun iki boyutlu ortamda sahip olduğu başlangıç değerlerine ait gövde ve sanal bacakların duruş pozisyonunu gösteren katı modeli görünmektedir. Ayrıca bu kısımda quadrupedal robotun her bir adımdaki zıplayarak yürüme işleminde, gövdenin ve sanal bacakların z-y eksenlerine göre konumları görülmektedir.

Gövde salınım grafikleri quadrupedal robotun gövdesinin ağırlık merkezinin z-y eksenlerine göre salınımını göstermektedir. Bu salınım derecesi^(°) olarak a ile temsil edilmektedir. Bu salınım aslında fiziksel olarak bir harmonik yapıya sahiptir. Buda robotun zıplayarak yürüme işleminde istenen bir durumdur [2, 96, 99].

Robot gövdesinin ağırlık merkezinin z dikey eksene göre zamana bağlı olarak aldığı yükseklik değerleri b_z ile temsil edilmektedir. b_z değerlerinin takip ettiği yörünge fiziksel olarak bir harmonik yapıya sahip olması gerekmektedir [2, 96, 99].

Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulur. Faz çizimleri bize sistemin kararlılığı hakkında bilgi vermektedir. Yani robotun zıplayarak yürüme işlemi esnasında devrilip devrilmediği ya da dengeli bir yürümenin olup olmadığı hakkında bilgi vermektedir.

Grafiklerde quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, sanal bacaklara ait boylarının anlık değişimleri gösterilmektedir. Bacak boylarındaki anlık değişim r ile temsil edilmektedir. Sanal bacakların boyları sadece bacaklar yere temas ettikten sonra değiştiği gözden kaçırılmamalıdır. Bacaklar yer ile temas halinde iken robotun kütesinden dolayı, yay özelliğinde olan bacaklar önce kasılarak sıkışır daha sonra da ilk boyuna gelinceye kadar açılarak zıplama işlemini gerçekleştirirler. Bacaklar yerden temasını kestikten sonra boyları sabittir. Sadece çok küçük oranda m_t ' den dolayı bir titreşim oluşmaktadır. Bu da sisteme rahatsız edici bir etken oluşturmamaktadır [95, 96, 99].

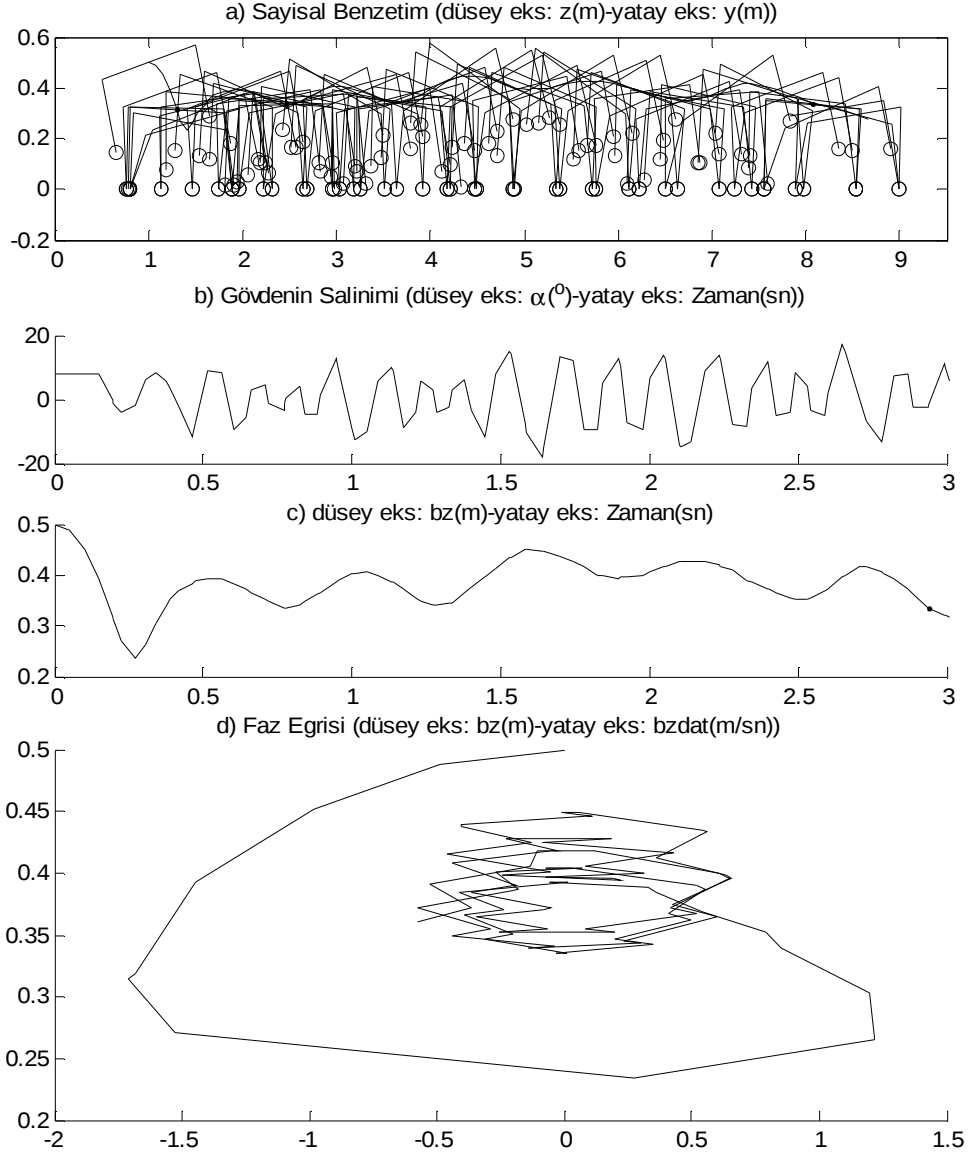
Ayrıca grafiklerde quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, sanal bacakların uçlarındaki ayakların yerden yükseklikleri gösterilmektedir. Bacakların yerden yükseklikleri f_z ile temsil edilmektedir. Sanal bacaklar yer ile temas halinde iken bu değer sıfırdır.

Aynı zamanda quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, sanal bacakların gövdeye göre açılma konumlarını^(°) gösterilmektedir. Bacakların gövdeye göre açılma konumları, robot hem yerde iken hem de havada iken ardışık gerçekleşen iki kapalı döngü içerisinde denetimleri gerçekleştirilmektedir. Bacakların gövdeye göre açılma konumları f ile temsil edilmektedir. Quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, ön ve arka sanal bacakların istenilen açılma konumları elde etmek için robot hem havada iken uygulanan

denetimde hem de yerde iken uygulanan denetim sonucunda açısıl konumlara bağılı olarak oluşan hatayı göstermektedir. Ön ve arka sanal bacakların zıplayarak yürüme döngüsü içinde ki istenilen yere dokunma açısı ve süpürme açısına bağılı olarak hata grafiğı elde edilmiştir.

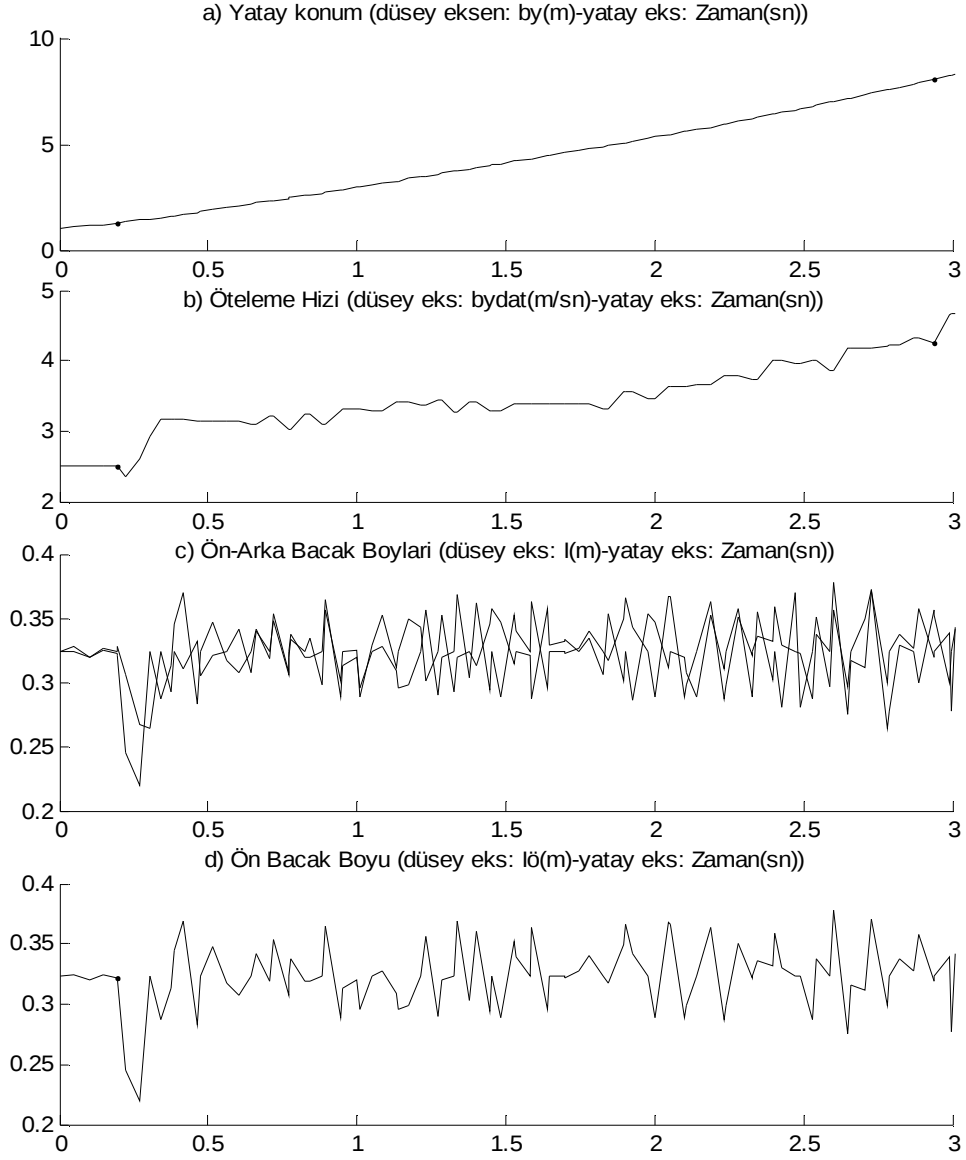
En son işlem olarak quadripedal robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, uygulanan denetim algoritmasında istenilen açılar elde etmek için çıkış sinyali olarak ön ve arka sanal bacaklara Bulanık Mantık Denetimi ile uygulanan denetim çıkış sinyali tork değıerleri grafiksel olarak verilmiştir.

Bu bölümde robotun farklı başlangıç değıerlerine bağılı olarak, zıplayarak yürüme işlemi sırasında gerçekleşen tüm fiziksel olayların sayısal benzetim sonuçları grafiklerde gösterilmeye çalışılmıştır. Bu sayısal sonuçlara bağılı olarak robotun belirli zaman dilimleri arasında aldığı yol(m) ve alınan bu yol esnasında robotun her bir bacağına tahrik eden eyleyicilerin harcadığı güç(watt) hesaplanarak tablo şeklinde verilmiştir. Ayrıca oluşturulan her bir tabloda, zıplamaya ait her bir örneğıe ait başlangıç değıerleri verilmiştir.



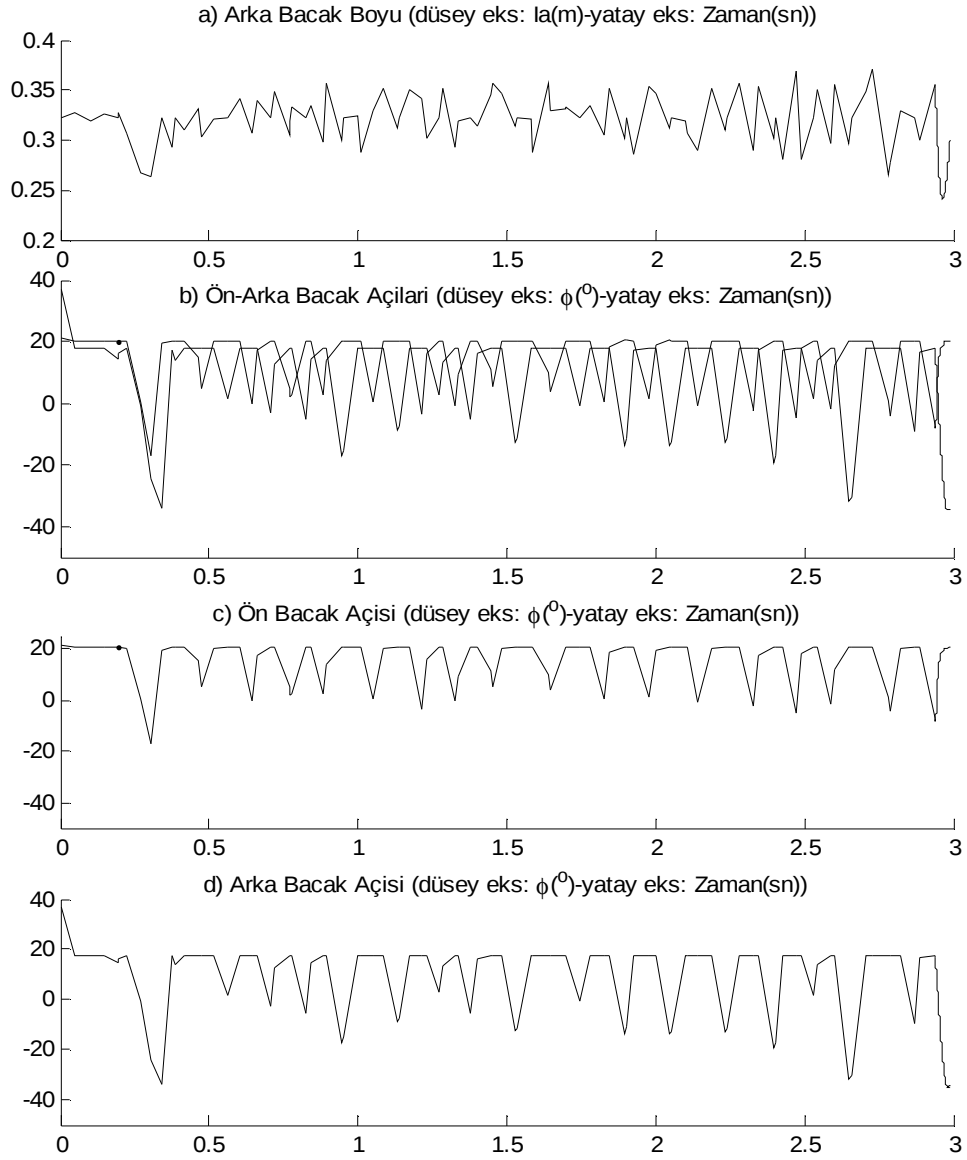
Şekil 11.7 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



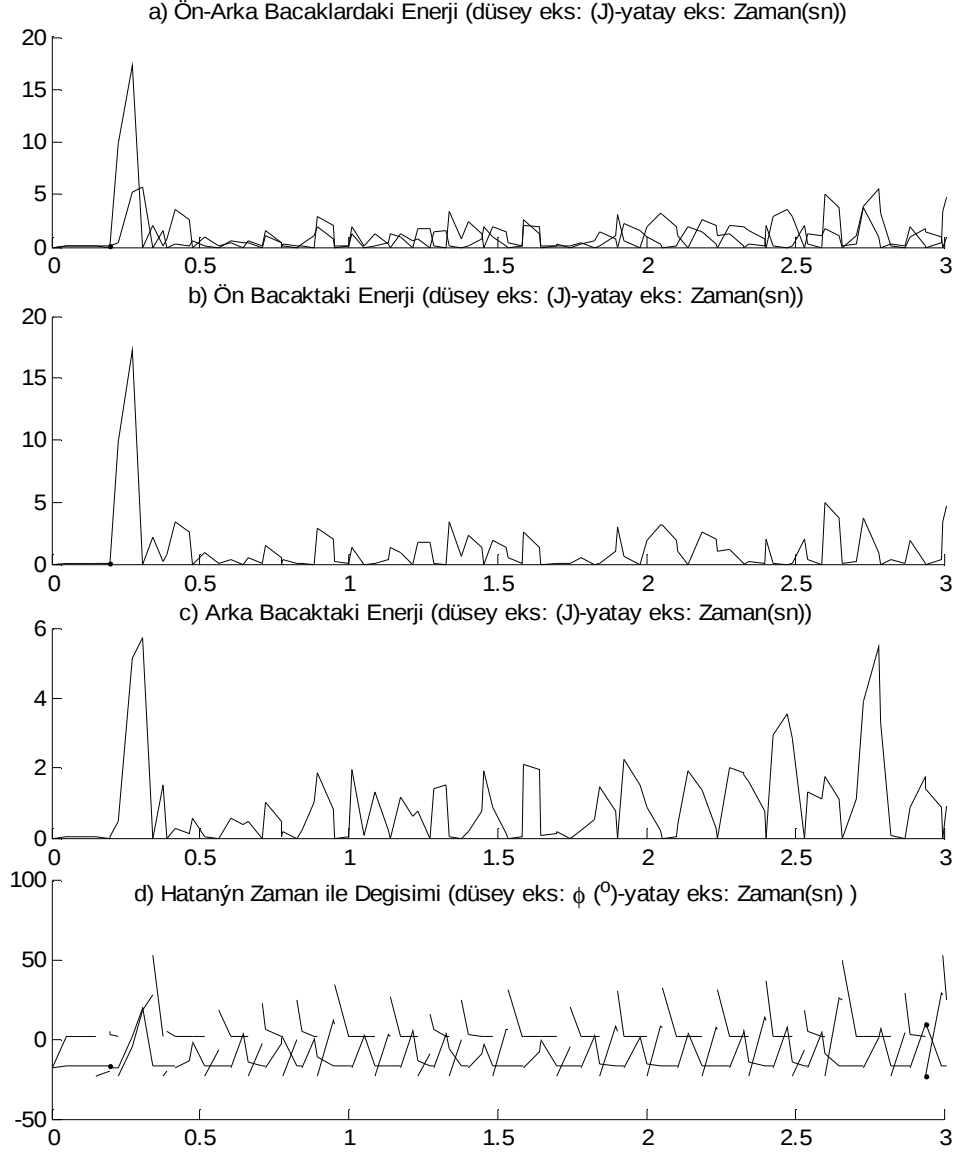
Şekil 11.8 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m).



Şekil 11.9 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- c) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$).
- d) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).



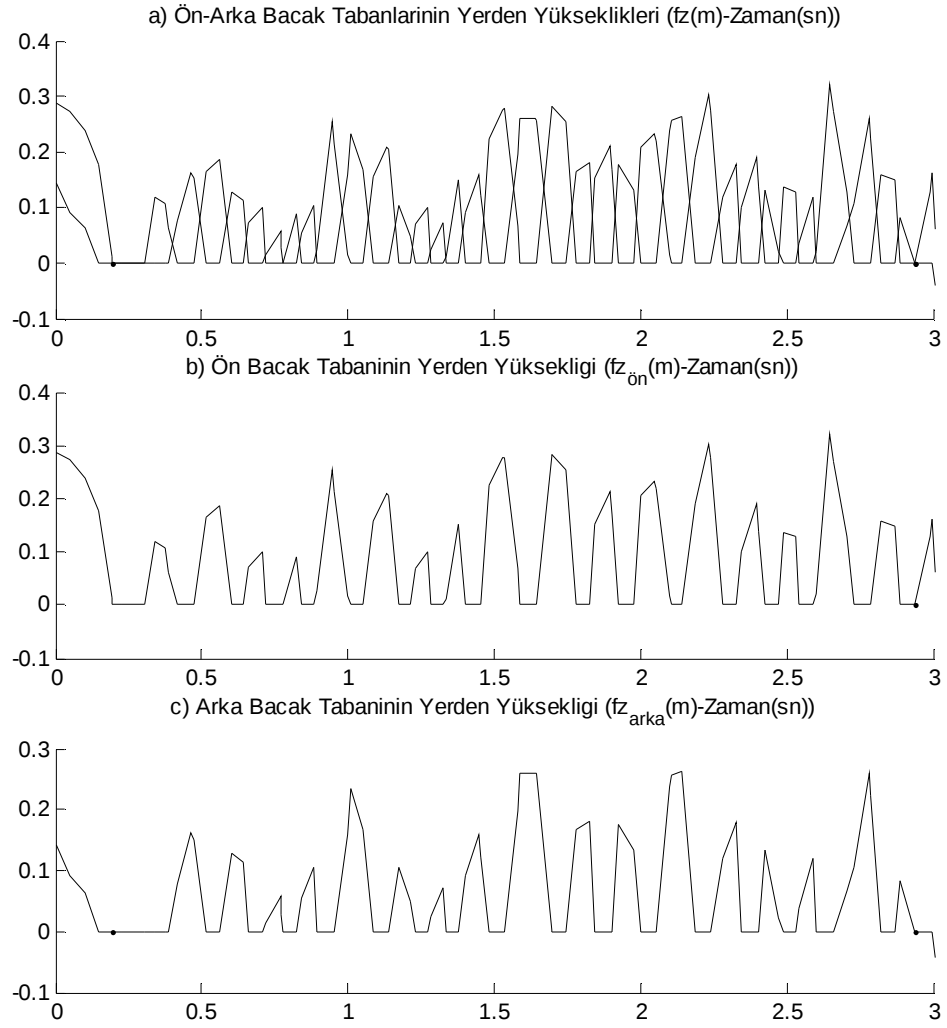
Şekil 11.10 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

a) Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).

b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).

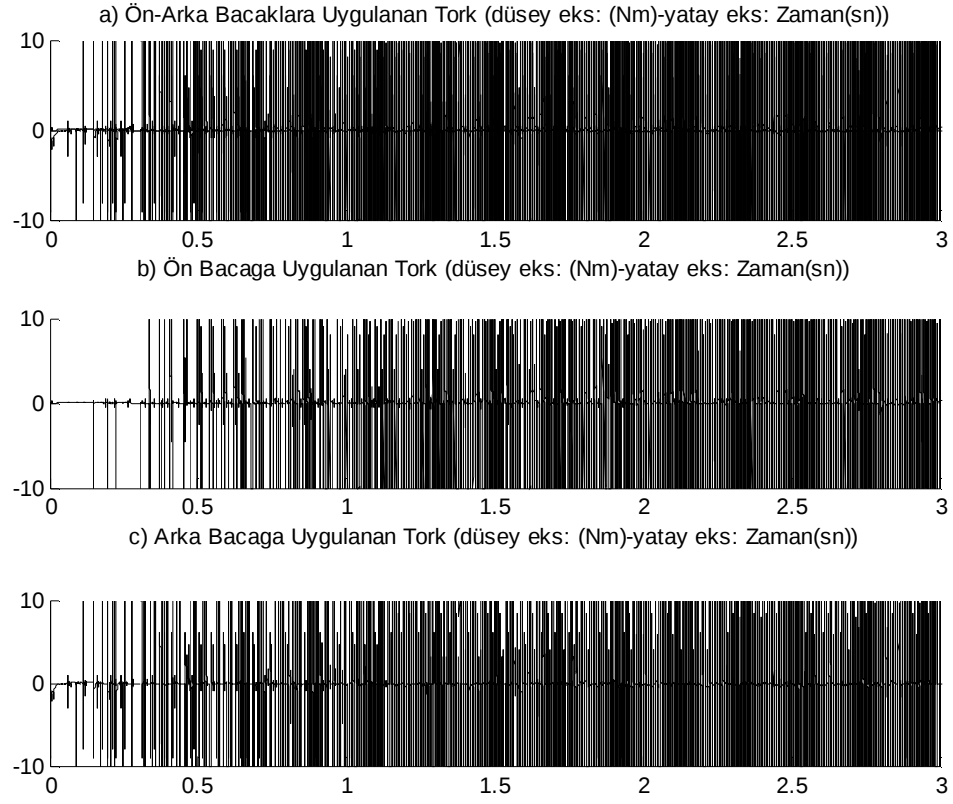
c) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).

d) Hatanın zaman ile değişimi (e).



Şekil 11.11 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- b) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri $f_{z_{ön}}$ (m).
- c) Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri $f_{z_{arka}}$ (m).



Şekil 11.12 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- c) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

Tablo 11.2 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.

QUADRUPEDAL ROBOT				
4 bacaklı				
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ				
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı	Robotun yataydaki hızı	
b_z (cm)		a (°)	db_y (m/sn)	
50		8	2.5	
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ				
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın harcadığı güç	Arka Bacağın harcadığı güç	Toplam harcanan Güç
t (sn)	b_y (m)	$P_{ön}$ (watt)	P_{arka} (watt)	P_{top} (watt)
3	8.0	111	153	264

11.3.2. Sonuç

Bu bölümde SLIP ile modellenen dört bacaklı quadrupedal robotun zıplayarak yürüyüşünün denetimi için Bulanık Mantık Denetimi uygulanmış olup ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Sistem cevaplarına, sayısal benzetim sonuçları ve grafiklerden bakıldığında; tasarlanan zıplayarak yürüme modelinin literatürde [1, 2, 95, 96, 99] yapılan çalışmalar gibi başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu gibi zıplama işlevlerinde bacaklardaki eyleyicilerin uyguladıkları tork değerleri genelde sınırlıdır. Bu yüzden sayısal benzetim modelinde bacaklara ait eyleyicilerin tork değerleri sınırlandırılmıştır. Bu sınır değerler piyasada kolaylıkla bulabileceğimiz 10Nm ve 15Nm aralığında ki mevcut olan eyleyicilerdir. Grafiklerden de görüldüğü gibi sistem +/- 10Nm sınırları aralığında başarılı olarak zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirmiştir. Bulanık Mantık Denetleyici algoritması ile sistemin denetiminde ki çıkış tork değerlerinin PD denetim algoritmasında ki çıkış tork değerlerinden daha küçük sınırlar arasında değerler aldığı görülmektedir. Bu denetim algoritmasında istenilen bir performanstır. Bu aralık PD denetim algoritmasında +/- 12Nm sınırları aralığında olurken, Bulanık Mantık Denetleyici algoritmasında +/- 10Nm' dir.

Dört bacaklı quadrupedal robotun verilen başlangıç değeri için sistem cevapları bölüm sonunda bir tablo şeklinde oluşturulmuştur. Bu tabloda, sistem cevabında hangi başlangıç değeri için sayısal benzetim oluşturulduğu, robotun belirli periyodik sürelerde ne kadar yol aldığı ve alınan yola karşılık eyleyicilerin harcadığı enerji miktarı verilmiştir. Sonuçta, oluşturulan bu tablolar aynı sistemin farklı denetim algoritmaları ile elde edilecek sayısal benzetim sonuçlarına göre daha kolay şekilde kıyaslanmasına yardımcı olacaktır.

Dört bacaklı quadrupedal robot denklem 9.1' de belirtilen değişkenleri için sayısal benzetim sonuçları elde edilmiştir. Bu değişkenlerden en önemlisi robot gövdesinin ağırlık merkezinin yer seviyesinden belli bir yükseklikte bırakıldığı b_z değeridir. Bu değişken sistemin dinamiğini en fazla etkileyen değerdir. Çünkü robotun sahip olduğu dinamik yapı belirli limit değerleri arasında olmak zorundadır. Modellenen dört bacaklı quadrupedal robotun bu değere bağlı olarak uygun dinamik aralığı literatürdeki çalışmalarda kullanılan aralıklarda başarılı sonuçlar vermiştir [1, 96, 139, 196].

Robot değişkenlerinden diğer önemli bir değişken robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısıdır($^{\circ}$). α salınım açısı sistemin kararlılığı hakkında bize bilgi veren en önemli değişkendir. Literatür çalışmalarında da görüldüğü gibi zıplayarak yürümeye robotun ana gövdesinin hep düzlemsel ortamda harmonik bir yörüngeyi takip etmesi istenir [1, 96, 99, 132]. Sistemde bu harmonik yörünge gövde salınım açısı α ile temsil edilmiştir. Bu çalışmada da bu parametre göz önüne alınarak sistem denetlenmeye çalışılmıştır. Bu yüzden ana gövdenin salınım denetimi, sistemde bacakların denetlenmesi ile sağlanmıştır. Literatürde ki çalışmalarda da görüldüğü gibi α salınım açısının zıplayarak yürüme işlevi sürecinde ki değeri $\pm 20^{\circ}$ sınırları arasında olması istenen bir durumdur [1, 96, 99, 132, 139, 196].

Robot değişkenlerinden diğer bir önemli değişken ise robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{B}_y$ ' dir(m/sn). Bu değişkende sistem dinamiğini etkileyen önemli bir parametredir. Genelde modellenen robot yer seviyesinden belli bir yükseklikte belli bir ilk hız ile fırlatılarak zıplayarak yürümesi istenir. Bu ilk hız başlangıçta olması gereken bir olaydır. Eğer belli bir hız ile fırlatılmasa ($\dot{B}_y=0$) robotun aynı düşey ekseninde zıpladığı görülmektedir. Sayısal benzetim sonuçları ve grafikler, modellenen dört bacaklı quadrupedal robot $\dot{B}_y$ ' nin literatürdeki çalışmalarda kullanılan değerde başarılı sonuçlar verdiği sayısal benzetim sonuçlarında görülmüştür [1, 96, 139, 196].

Bu bölümdeki çalışmada en önemli uygulama sistemin yapay zeka metodu olan Bulanık Mantık Denetleyicisi ile oldukça başarılı olarak denetlenmesidir. Bu çalışma yazarın bilgisi dahilinde dört bacaklı quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlevinin gerçekleştirilmesinde, literatür çalışmalarında bir ilktir. Bulanık Mantık Denetleyicisi ile denetlenen sisteme ait sayısal benzetim sonuçları bölüm sonunda bir tablo halinde verilmiştir. Bu sonuçlardan Bulanık Mantık Denetleyicisi ile denetlenen sisteme ait sayısal benzetim sonuçlarının, PD Denetleyicisi ile denetlenen sisteme ait sayısal benzetim sonuçlarına göre performans olarak çok daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bulanık Mantık Denetleyicisi ile denetlenen dört bacaklı quadrupedal robotun, PD Denetleyicisine nazaran daha az bir enerji tüketimi ile daha fazla yol aldığı görülmüştür. Bu performans robotik teknolojisinde bilim adamlarınca üzerinde durulan en önemli bir unsurdur. Bulanık Mantık Denetleyicisi Algoritmasının diğer denetim algoritmalarına göre sistem üzerindeki avantaj ve dezavantajları son bölümde oluşturulan bir tablo ile daha ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Ayrıca bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak yapılan bir yenilik, dört bacaklı quadrupedal robot Şekil 9.4 ve Şekil 9.5’ de görüldüğü gibi sadece iki evrede(uçuş evresi ve ye-duruş evresi) iki adet denetim algoritması ile başarılı bir şekilde denetlenmiş olmasıdır. Oysaki Poulakakis ve arkadaşları aynı sistemin denetimini üç evrede (uçuş evresi, ileri itme evresi ve yer-duruş evresi) üç denetim algoritması ile gerçekleştirmişlerdir [1, 96, 139, 196]. Bu çalışmada modellenen zıplayarak yürümenin evreleri esnasında yapılan denetim eylem sayısı, yazarın literatür bilgisi dahilinde quadrupedal robot için daha önceden yapılan çalışmalardaki denetim eylem sayısından daha azdır. Ayrıca, bu çalışmada yapılan yenilik sistemin hem denetimini oldukça kolaylaştırmış olup hem de az sayıda ki denetim algoritması ile literatürde yapılan çalışmalarla aynı başarı elde edilmiştir [1, 96, 139, 196].

12. HEXAPOD ROBOT ZIPLAMA MODELİNİN BULANIK MANTIK İLE DENETİMİ VE SAYISAL BENZETİMİ

12.1. Sistemin Morfolojisi ve Genel Kavramı

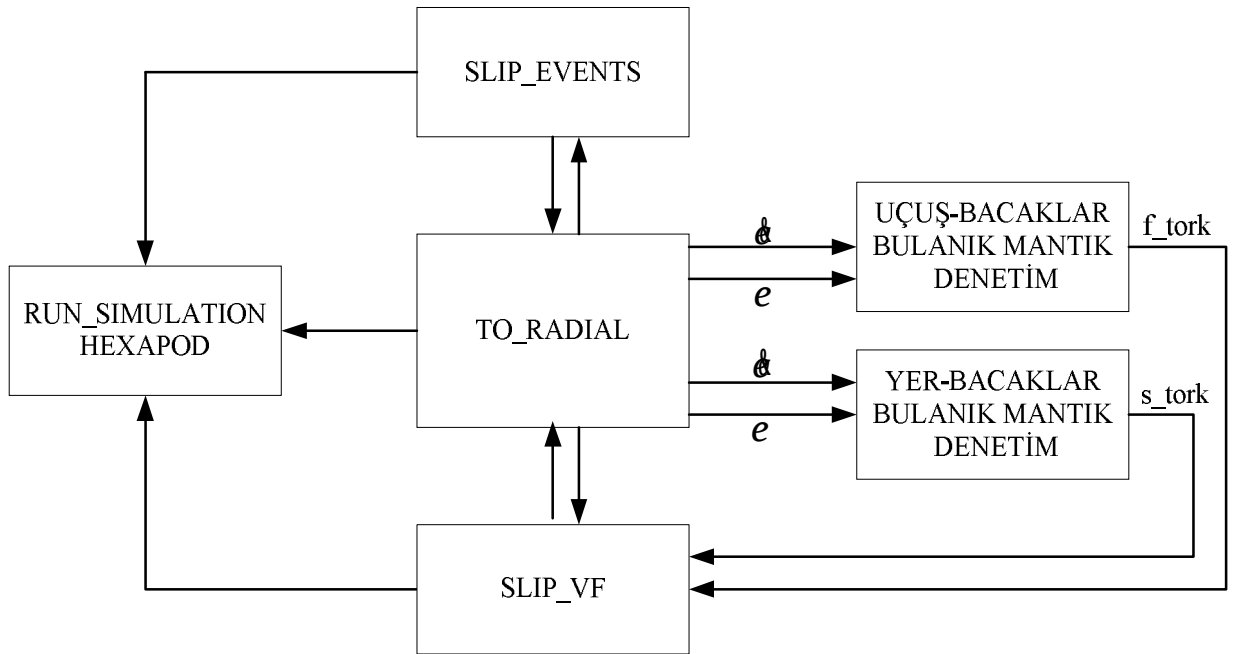
Altı bacaklı hexapod robot sisteminin modellenmesi, denetimi ve sayısal benzetimi MATLAB paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zıplayarak dengeli dinamik yürüme işlemi MATLAB paket programında bir ana programdan ve beş alt program olmak üzere toplam altı adet m-file' dan oluşmaktadır. Ana programı run_simulation-hexapod ismi temsil ederken alt programları sırasıyla Slip_Events, To_Radial, Slip_Vf, Flight_Control ve Stance_Control isimleri ile temsil edilmektedir. Bu ana program ve alt programlar Şekil 12.1' de de görüldüğü gibi sürekli eş zamanlı olarak birbirleri ile veri alış verişinde bulunarak ilişkili çalışmaktadırlar. Ana programda sisteme ait başlangıç değerleri, robot parametreleri ve sayısal benzetime ait grafik komutları mevcuttur. Slip_Events alt programı içerisinde robotun evre ve durumlarını belirleyerek dinamik döngüyü oluşturur. Slip_Vf alt programı içerisinde ise sistemin dinamik denklemleri mevcuttur. To_Radial alt programında sisteme ait kinematik denklemler çözülmektedir. Flight_Control ve Stance_Control alt programlarında da denetim algoritmaları oluşturulmuştur.

12.2. Bulanık Mantık Denetim Algoritma Tasarımı

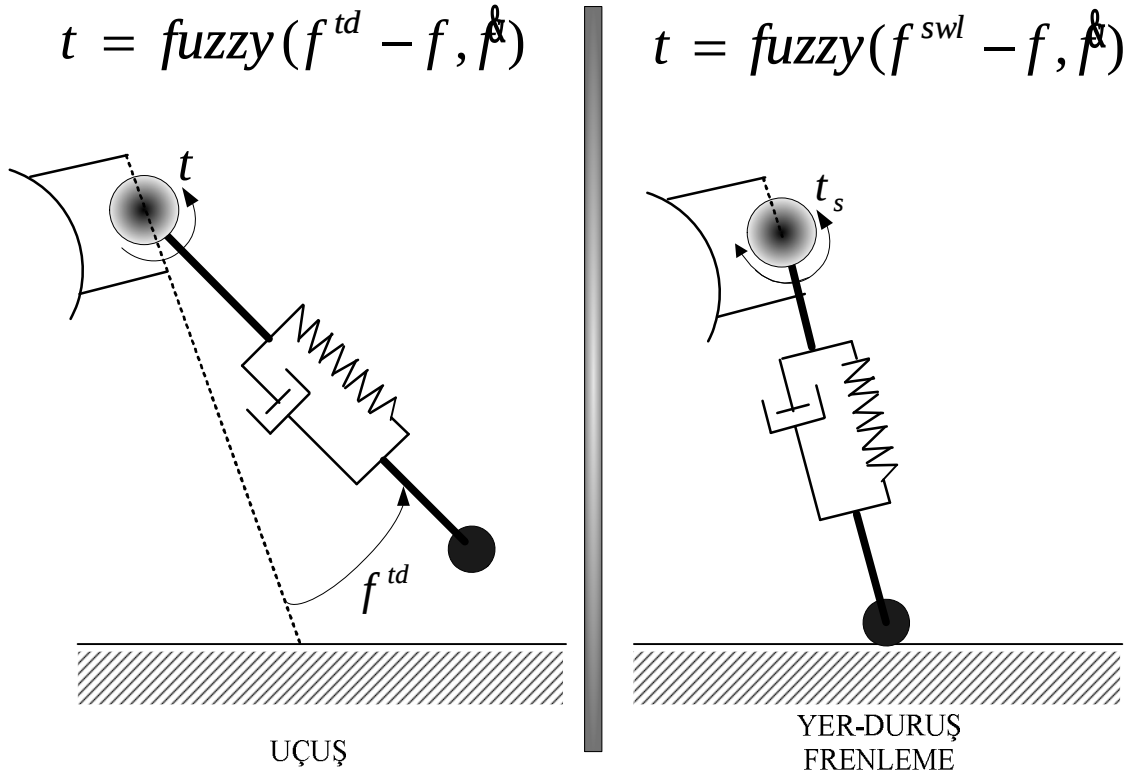
Denetim algoritmasının çıkış sinyalleri; altı bacaklı hexapod robotun kalça kısmında bulunan eyleyicilere, Bulanık Mantık Denetim Algoritması ile üretilen uygun tork değerleridir. Burada sistem bilindiği gibi iki farklı kapalı dinamik döngüden oluşmaktadır. Zıplayarak yürüme işlemleri ardışık kapalı bir döngü içerisinde farklı dinamik yapılardan oluşur. Hexapod robot iki evrede ayrı ayrı denetlenerek zıplayarak dengeli dinamik yürüme eylemini gerçekleştirmektedir. Bu denetim evreleri Şekil 12.2' de görülmektedir. Birinci evre olan uçuş evresinde ön-orta ve arka sanal bacakların yere dokunma açıları (f^{td}), ikinci evre olan yer-duruş evresinde ise ön-orta ve arka sanal bacakların süpürme açıları (f^{swl}) istenilen değerde olabilmeleri için Bulanık Mantık Denetim Algoritması ile uygun çıkış sinyali olarak tork elde edilerek sistem denetlenmektedir. Denetim algoritmasında sistemin girişlerini e (hata) ve $\dot{e}$ (hatanın değişim) değerleri oluşturmaktadır. Burada hata, sistemin uçuş ve yer-duruş evrelerinde ön-orta ve arka sanal bacakların gövdeye göre anlık ölçülen açı değerleri ile ön-orta ve arka sanal bacaklar için istenilen açı değerleri arasındaki farktır. Sistemin çıkışlarını ise hata

ve hatanın zamana göre anlık değişim değerlerini minimize edecek şekilde ön-orta ve arka sanal bacakları tahrik eden eyleyicilere uygulanan uygun tork değerleridir. Sisteme ait giriş ve çıkış değerleri Şekil 12.1 ve Şekil 12.6’ de görölmektedir.

Burada Bulanık Mantık Denetim’ de Mamdani metodu kullanılmıştır. Her bir sanal bacak için, Bulanık Mantık Denetim iki giriş ve bir çıkıştan oluşan bir sistemdir. Hexapod robotun zıplayarak dengeli dinamik yürüyüş denetiminin tamamında toplam altı giriş ve üç çıkıştan ibarettir. Bu bölümde ön-orta ve arka sanal bacakların tümü için de aynı kural tablosunu kullanılmıştır. Kural tablosunu Tablo 12.1’ de tanımladık. Hata(e), hata değişimi($\dot{e}$) ve tork(t) değerleri için gerekli üyelik fonksiyonları sırası ile Şekil 12.3, 12.4 ve 12.5’ de gösterilmiştir. Bulanık Mantık Denetim Algoritması hata (e) ve hata değişimine($\dot{e}$) minimize ederek, sanal bacaklar için gerekli olan tork değerlerini ($t_{\text{ön_bacak}}$, $t_{\text{orta_bacak}}$, $t_{\text{arka_bacak}}$) çıkış sinyali olarak üretirler.



Şekil 12.1 Tasarlanan Denetim Algoritmasına Ait Blok Diyagram

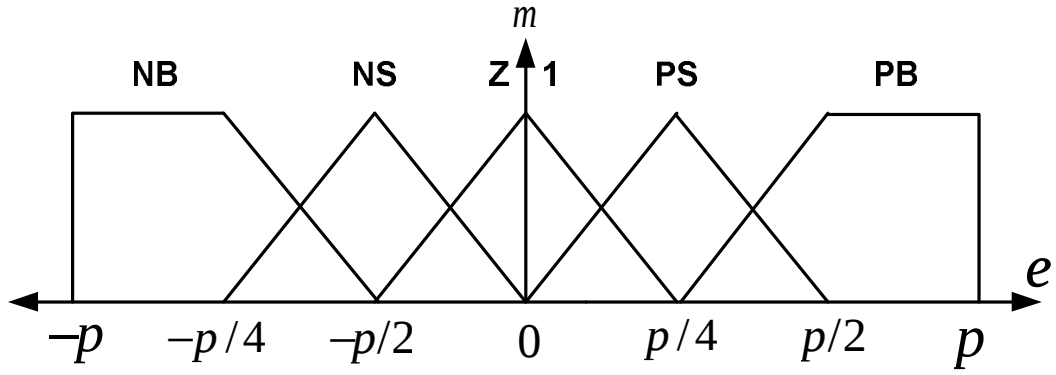


Şekil 12.2 Zıplayarak Yürüme Evreleri Sırasında Kontrol Algoritması (Denetim iki eylemden ibarettir.)

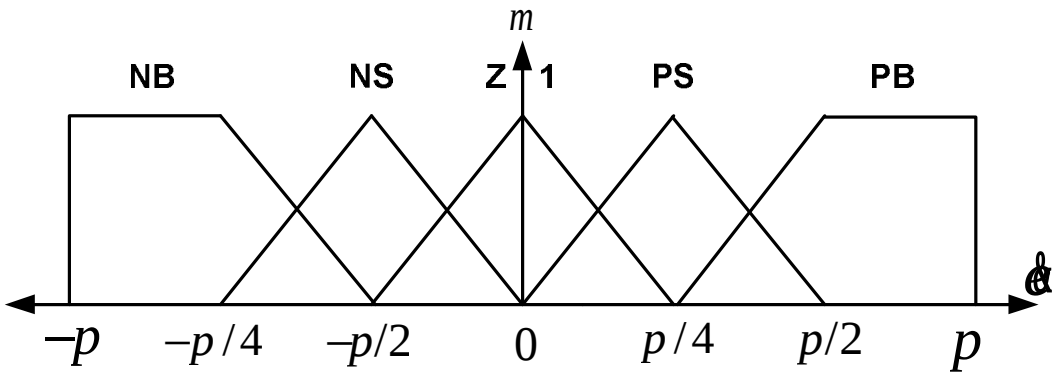
Tablo 12.1 Bulanık Mantık Denetleyicisi için tasarlanan kural tablosu

δ

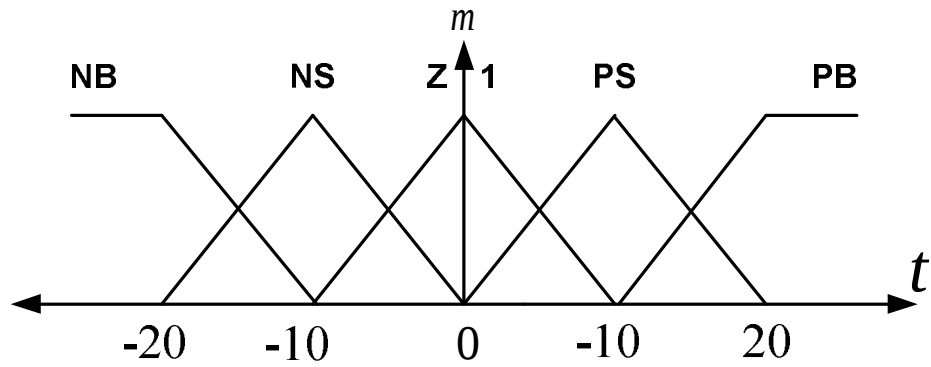
	t	NB	NS	Z	PS	PB
e	NB	NB	NB	NB	NS	Z
	NS	NB	NB	NS	Z	PS
	Z	NB	NS	Z	PS	PB
	PS	NS	Z	PS	PB	PB
	PB	Z	PS	PB	PB	PB



Şekil 12.3 Hata (e) giriş değeri için üyelik fonksiyonu



Şekil 12.4 Hata değişim ($\dot{e}$) giriş değeri için üyelik fonksiyonu



Şekil 12.5 Çıkış değeri tork (t) için üyelik fonksiyonu

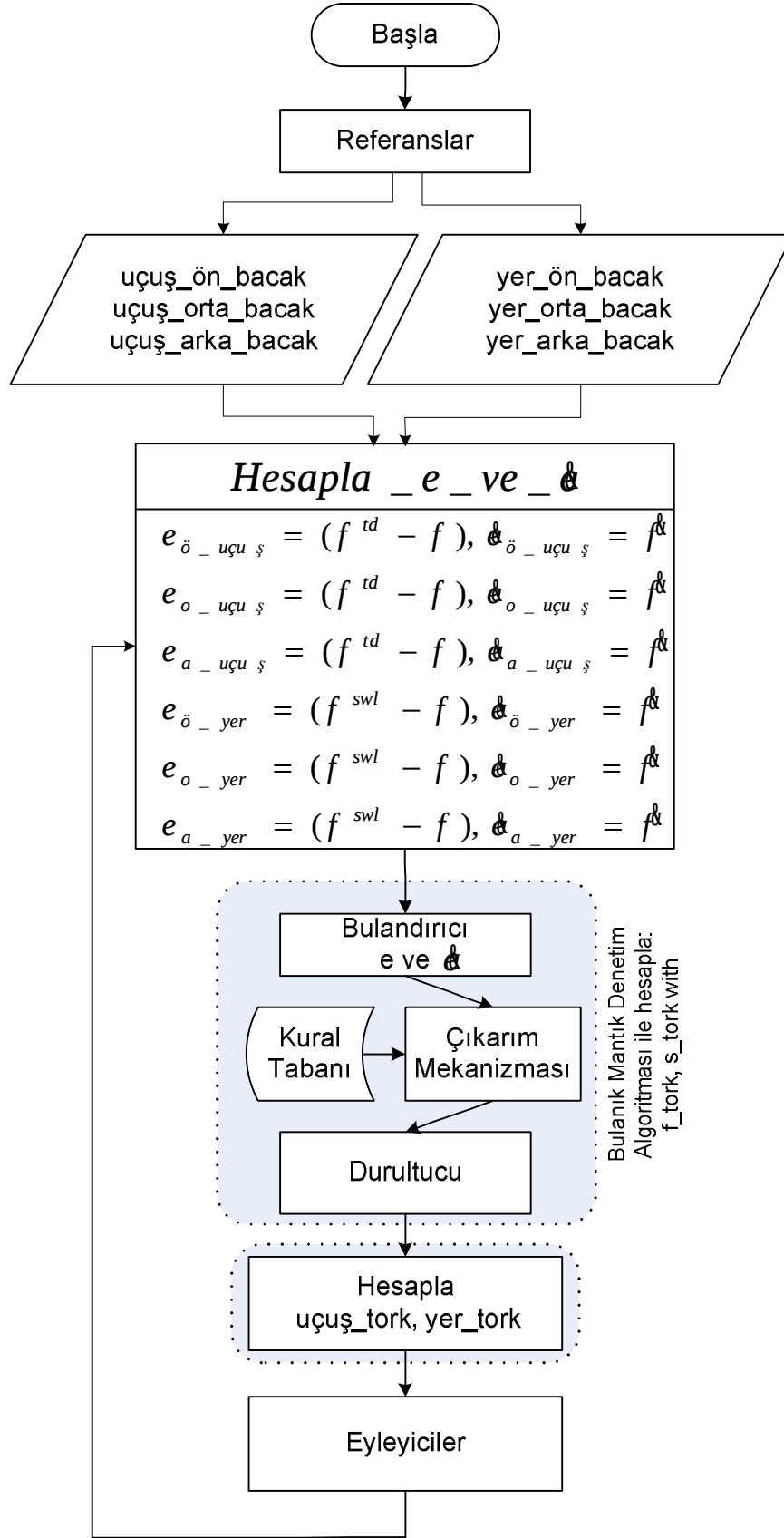
Üyelik fonksiyonları 0 ve 1 arasında bir üyelik derecesine sahip olan, sistemin giriş ve çıkışlarının her bir noktada nasıl tanımlandığını gösteren eğrilerdir. Burada sistem girişini oluşturan hata (e) ve hata değişimi ($\dot{e}$) için trapezoidal ve triangular tip üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. e ve $\dot{e}$ giriş değerleri için kullanılan üyelik fonksiyonlarının fiziksel olarak tanım kümesi $\{-p, -p/2, -p/4, 0, p/4, p/2, p\}$ deneme-yanılma metodu ile oluşturulmuştur. Sistemin çıkış değeri t için üyelik fonksiyonu olarak triangular tip eğrileri

kullanılmıştır. Ayrıca, sistem çıkışı t için kullanılan fiziksel küme deneme-yanılma metodu ile $\{-20, -10, 0, 10, 20\}$ olarak tanımlanmıştır.

Bulanık Mantık Denetleyicisinin giriş (e ve $\dot{e}$) ve çıkış (t) değişkenleri için bir kural tablosu tasarlanmıştır;

$e, (\dot{e}), t = \{\text{hata, hata değişimi, denetim değişkeni} \{ \text{NB (Negatif Büyük), NS (Negatif Küçük), S (Sıfır), PS (Pozitif Küçük), PB (Pozitif Büyük)} \}, [-p, p], \mu\}$

Bulanık Mantık sisteminin temeli, üyelik işlevlerinden ortaya çıkarılan dilsel değişkenlerin oluşturduğu girişleri karar verme sürecinde kullanmaktır. Bulanık Mantık denetleyicisinin kural tabanı, genellikle denetim edilecek sistem hakkında bilgi sahibi uzman kişilerin dilsel ifadelerinden elde edilen bir grup EĞER-O HALDE kuralından oluşur. Tablo 11.1’ de Bulanık Mantık denetleyicisi için tasarlanan ve 25 kuraldan oluşan kural tablosu gösterilmektedir.



Şekil 12.6 Dizayn edilen sistem için Bulanık Mantık Denetim Akış Diyagramı

12.3. Hexapod Robotun Bulanık Mantık Denetim İle Sayısal Benzetimi

12.3.1. Sayısal Benzetim ve Elde Edilen Grafikler

Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki düzlemsel z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi, robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$), robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m), robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu faz eğri çizimleri, robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m), robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn), robotun ön-orta-arka bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{orta}} - I_{\text{arka}}$ (m), robotun ön bacağına zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m), robotun orta bacağına zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m), robotun arka bacağına zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m), robotun ön-orta-arka bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$), robotun ön bacağına gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$), robotun orta bacağına gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{orta} ($^{\circ}$), robotun arka bacağına gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$), robotun ön-orta-arka bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J), robotun ön bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{\text{ön}}$ (J), robotun orta bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J), robotun arka bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J), hatanın zaman ile değişimi (e), robotun ön-orta-arka bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m), robotun ön-orta-arka bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm), robotun ön bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{\text{ön}}$ (Nm), robotun orta bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm) ve robotun arka bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm) gibi önemli sayısal benzetim sonuçları farklı başlangıç değerlerine göre her bir grafikte gösterilmiştir.

Sayısal benzetim grafikleri hexapod robotun iki boyutlu ortamda sahip olduğu başlangıç değerlerine ait gövde ve sanal bacakların duruş pozisyonunu gösteren katı modeli görünmektedir. Ayrıca bu kısımda hexapod robotun her bir adımdaki zıplayarak yürüme işleminde, gövdenin ve sanal bacakların z-y eksenlerine göre konumları görülmektedir.

Gövde salınım grafikleri hexapod robotun gövdesinin ağırlık merkezinin z-y eksenlerine göre salınımını göstermektedir. Bu salınım derece($^{\circ}$) olarak α ile temsil edilmektedir. Bu salınım aslında fiziksel olarak bir harmonik yapıya sahiptir. Buda robotun zıplayarak yürüme işleminde istenen bir durumdur [2, 96, 99].

Robot gövdesinin ağırlık merkezinin z dikey eksene göre zamana bağlı olarak aldığı yükseklik değerleri b_z ile temsil edilmektedir. b_z değerlerinin takip ettiği yörünge fiziksel olarak bir harmonik yapıya sahip olması gerekmektedir [2, 96, 99].

Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulur. Faz çizimleri bize sistemin kararlılığı hakkında bilgi vermektedir. Yani robotun zıplayarak yürüme işlemi esnasında devrilip devrilmediği ya da dengeli bir yürümenin olup olmadığı hakkında bilgi vermektedir.

Grafiklerde hexapod robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, sanal bacaklara ait boylarının anlık değişimleri gösterilmektedir. Bacak boylarındaki anlık değişim r ile temsil edilmektedir. Sanal bacakların boyları sadece bacaklar yere temas ettikten sonra değişmektedir. Bacaklar yer ile temas halinde iken robotun kütesinden dolayı, yay özelliğinde olan bacaklar önce kasılarak sıkışır, daha sonra da ilk boyuna gelinceye kadar açılarak zıplama işlemini gerçekleştirirler. Bacaklar yerden temasını kestiklerinde boyları sabittir. Sadece çok küçük oranda m_t ' den dolayı bir titreşim oluşmaktadır. Bu da sisteme rahatsız edici bir etken oluşturmamaktadır [95, 96, 99].

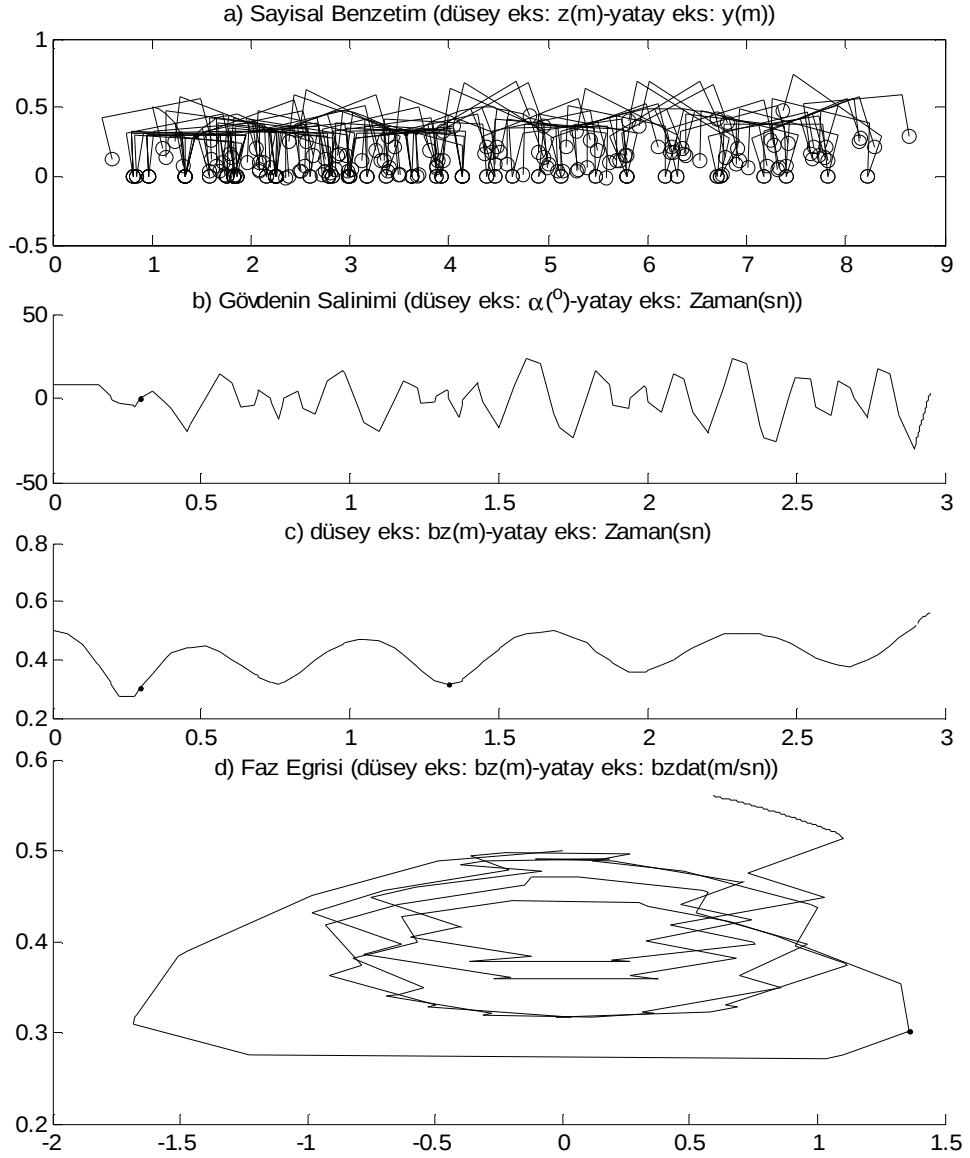
Ayrıca grafiklerde hexapod robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, sanal bacakların uçlarındaki ayakların yerden yükseklikleri gösterilmektedir. Bacakların yerden yükseklikleri f_z ile temsil edilmektedir. Sanal bacaklar yer ile temas halinde iken bu değer sıfırdır.

Aynı zamanda hexapod robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, sanal bacakların gövdeye göre açısal konumlarını($^{\circ}$) gösterilmektedir. Bacakların gövdeye göre açısal konumları,

robot hem yerde iken hem de havada iken ardışık gerçekleşen iki kapalı döngü içerisinde denetimleri gerçekleştirilmektedir. Bacakların gövdeye göre açısal konumları f ile temsil edilmektedir. Hexapod robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, ön-orta-arka sanal bacakların istenilen açısal konumları elde etmek için robot hem havada iken uygulanan denetimde hem de yerde iken uygulanan denetim sonucunda açısal konumlara bağlı olarak oluşan hatayı göstermektedir. Ön-orta-arka sanal bacakların zıplayarak yürüme döngüsü içinde ki istenilen yere dokunma açısı(f^{td}) ve süpürme açısına(f^{swl}) bağlı olarak hata grafiği elde edilmiştir.

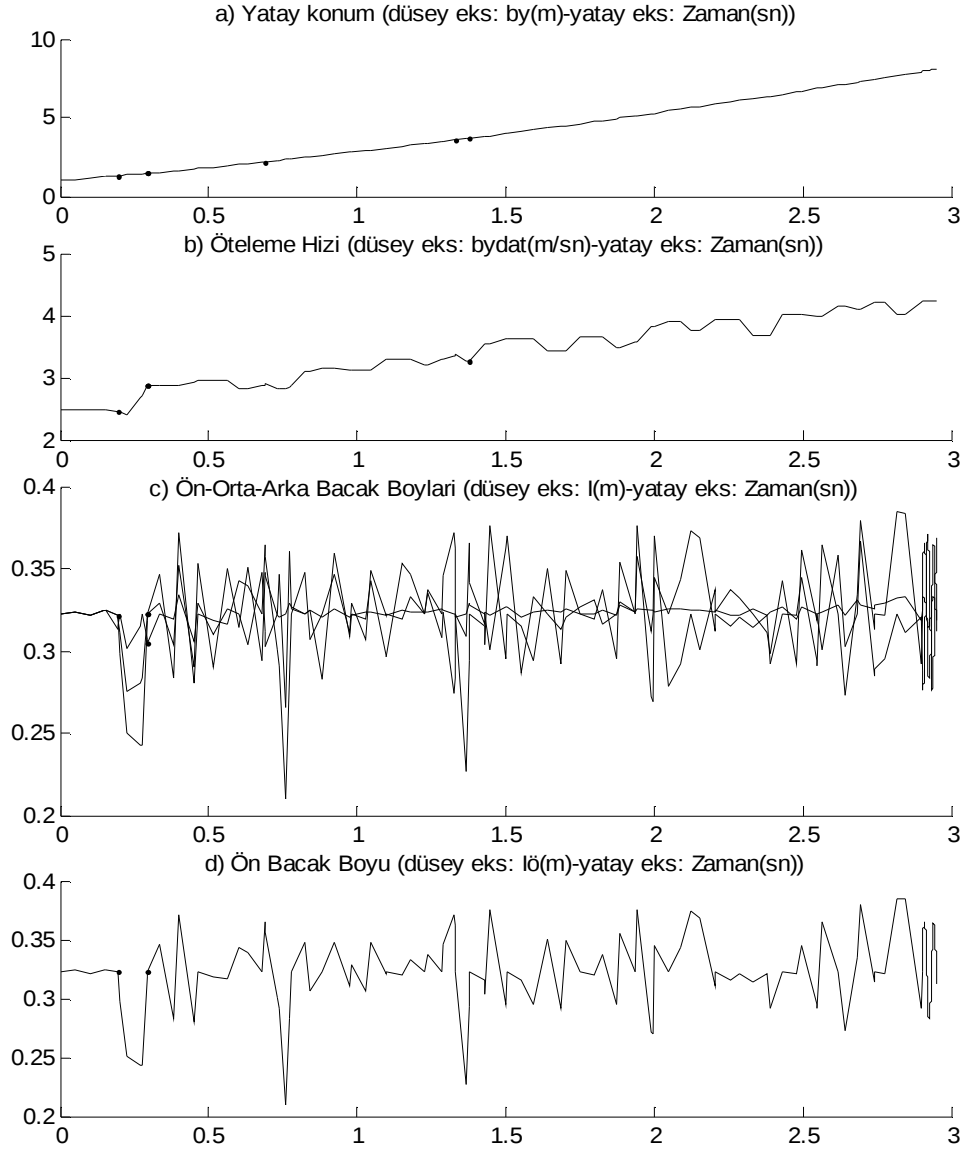
En son işlem olarak hexapod robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, uygulanan denetim algoritmasında istenilen açıları elde etmek için çıkış sinyali olarak ön-orta-arka sanal bacaklara Bulanık Mantık Denetimi ile uygulanan denetim çıkış sinyali moment değerleri grafiksel olarak verilmiştir.

Bu bölümde robotun farklı başlangıç değerlerine bağlı olarak, zıplayarak yürüme işlemi sırasında gerçekleşen tüm fiziksel olayların sayısal benzetim sonuçları grafiklerde gösterilmeye çalışılmıştır. Bu sayısal sonuçlara bağlı olarak robotun belirli zaman dilimleri arasında aldığı yol(m) ve alınan bu yol esnasında robotun her bir bacağını tahrik eden motorların harcadığı güç(watt) hesaplanarak tablo şeklinde verilmiştir. Ayrıca oluşturulan her bir tabloda, zıplamaya ait her bir örneğe ait başlangıç değerleri verilmiştir.



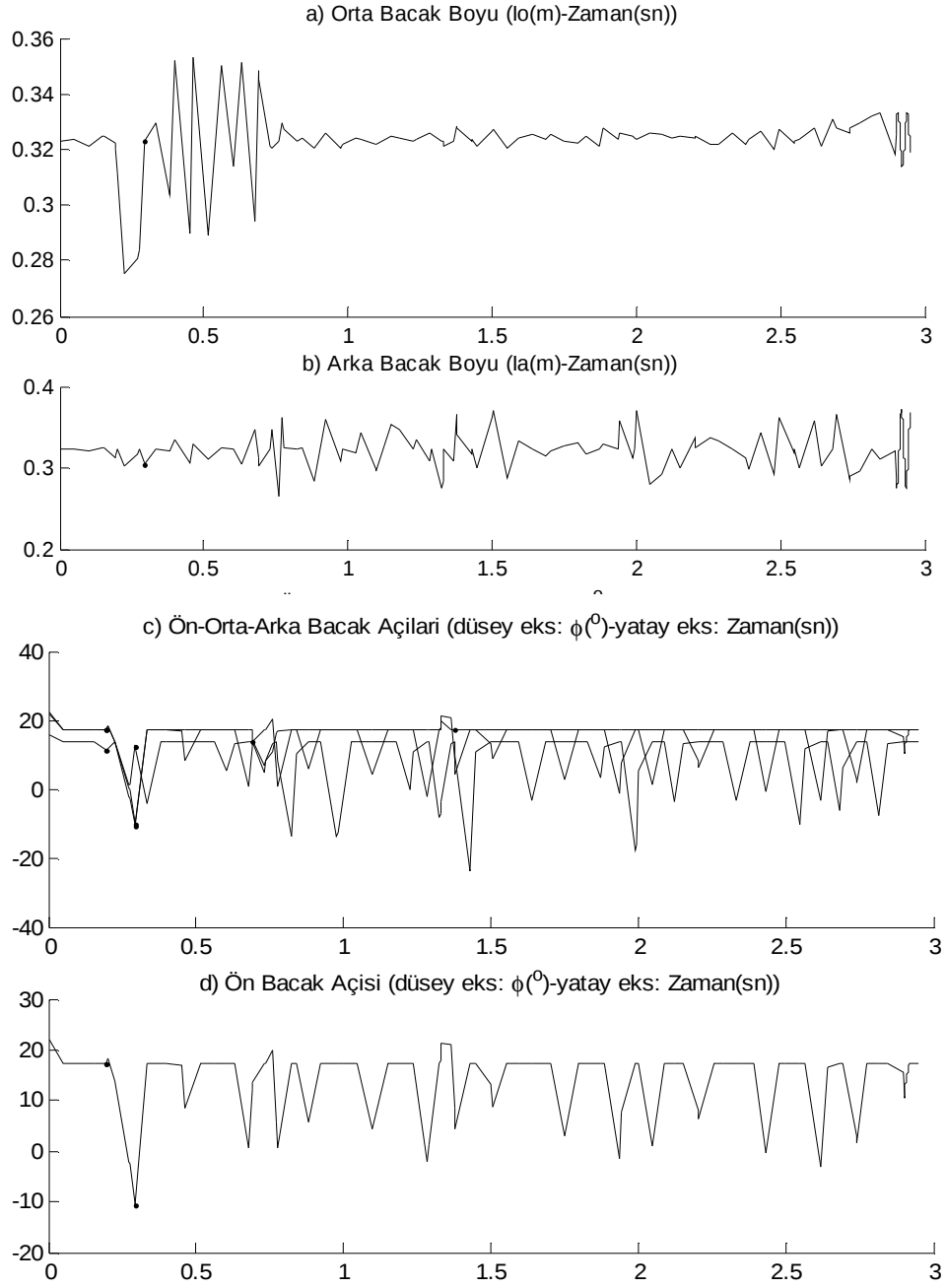
Şekil 12.7 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



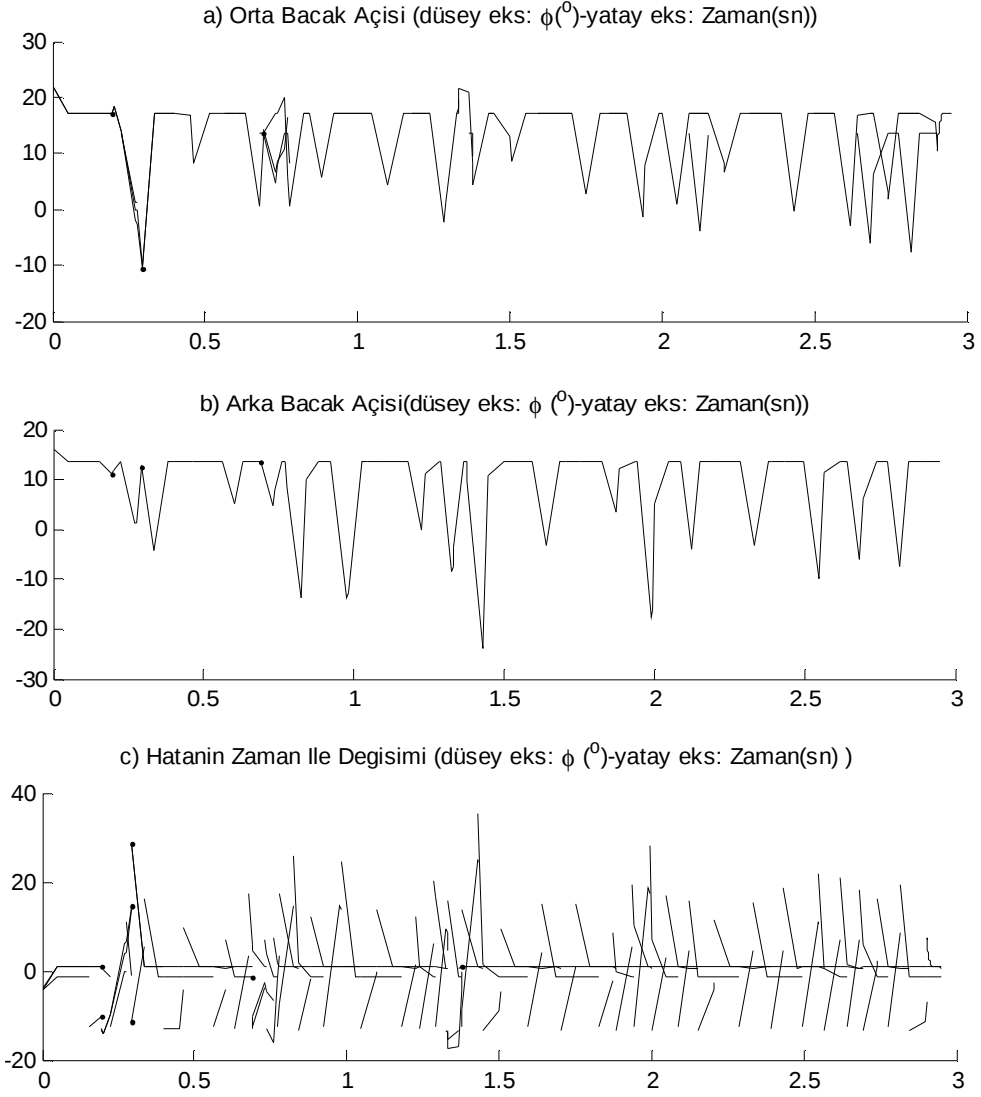
Şekil 12.8 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



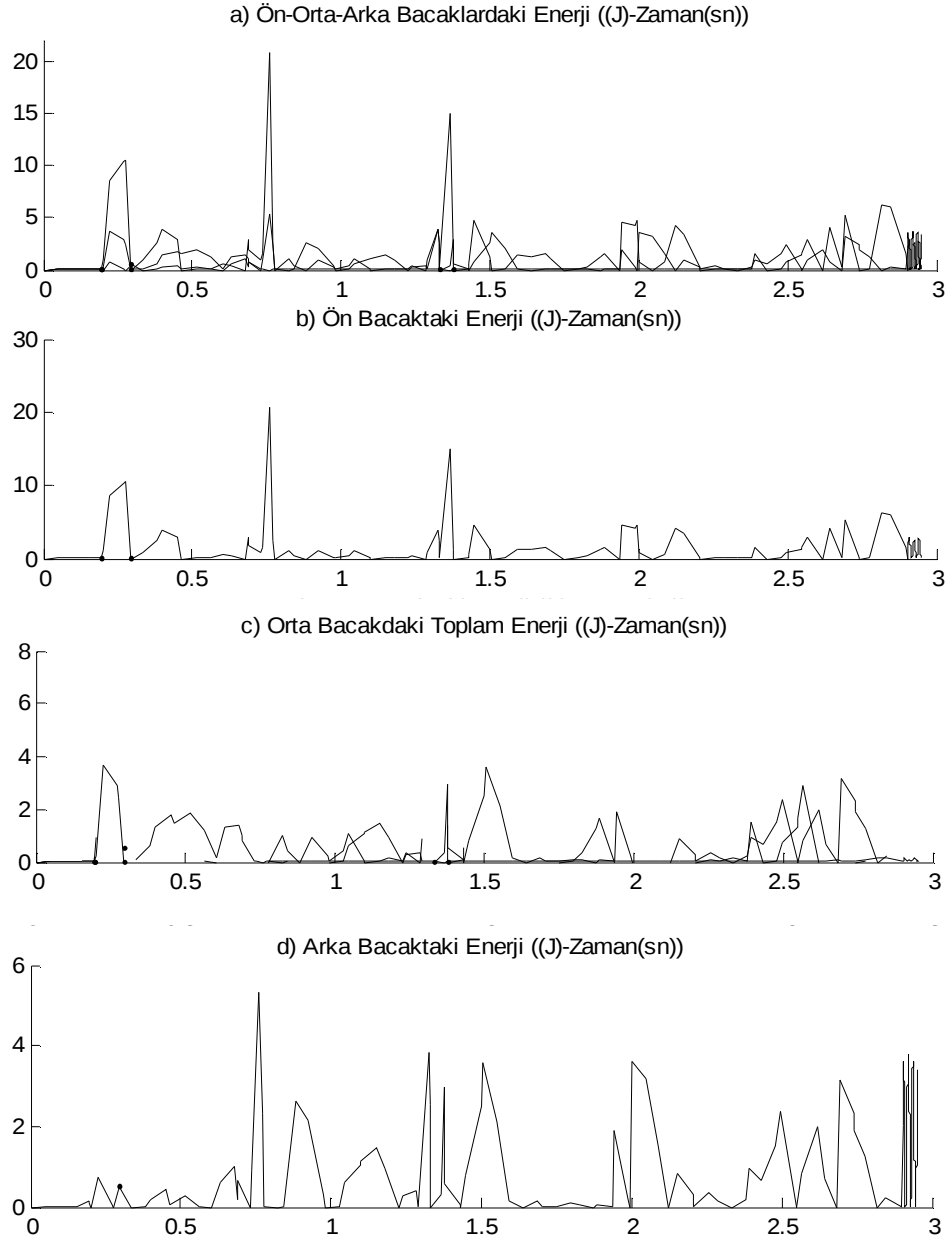
Şekil 12.9 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).
- b) Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- d) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$).



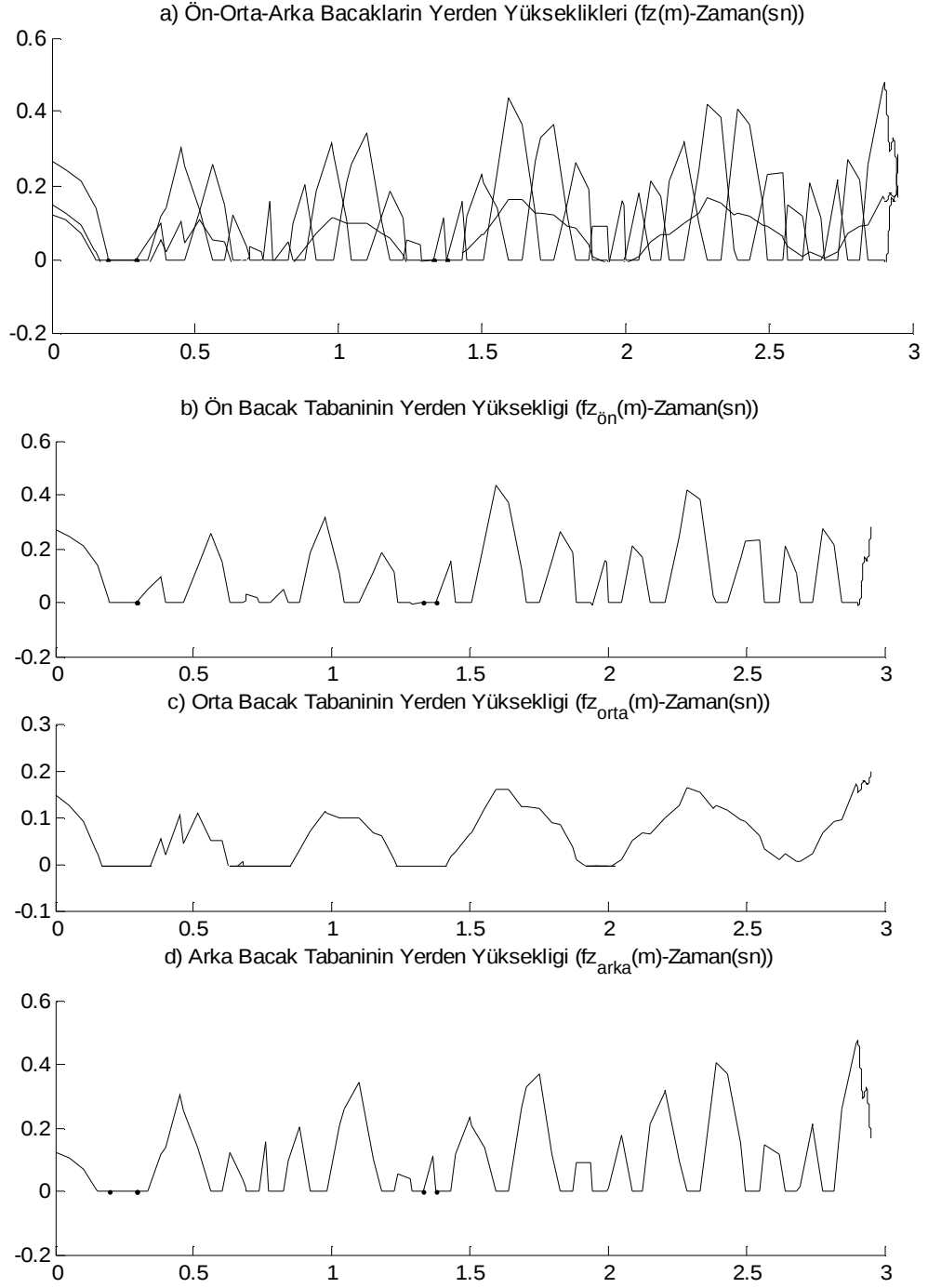
Şekil 12.10 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları $f(^{\circ})$.
- b) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}(^{\circ})$.
- c) Hatanın zaman ile değişimi (e).



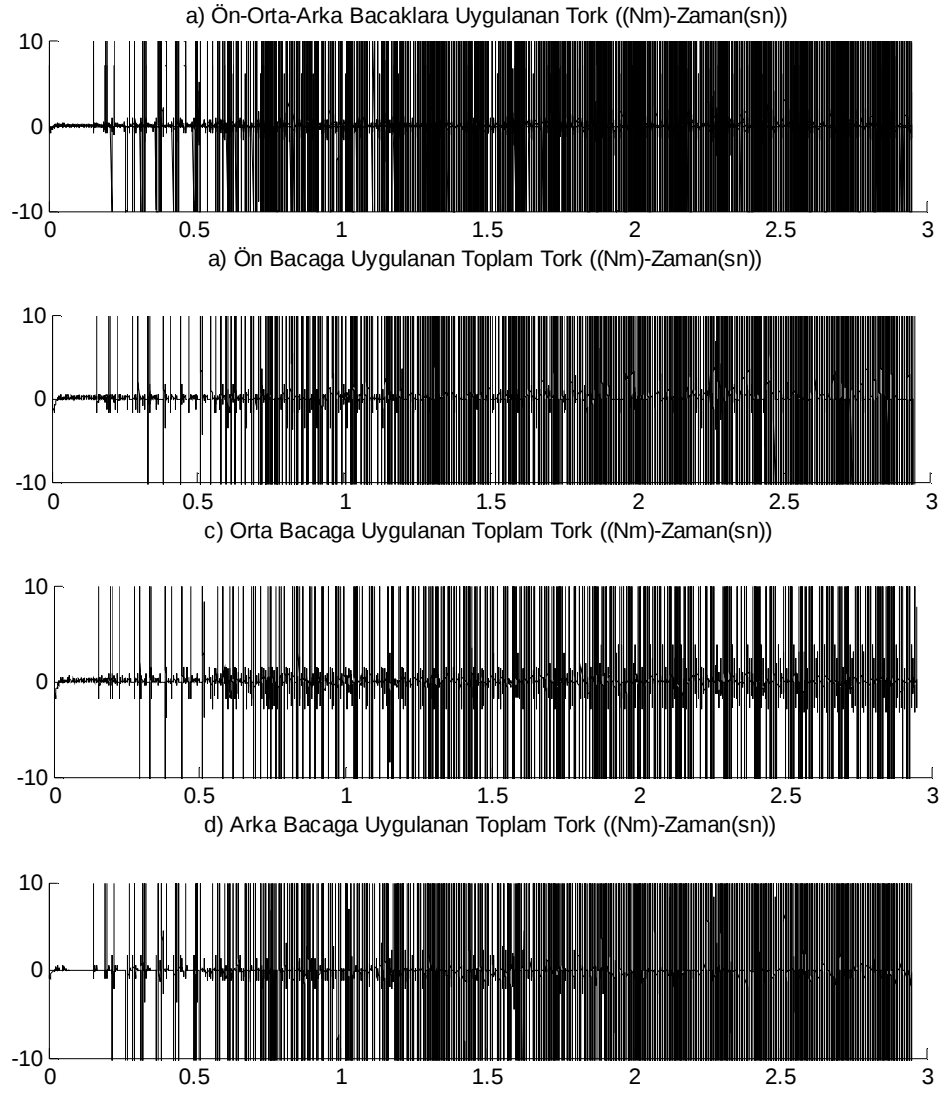
Şekil 12.11 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).
- b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).
- c) Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J).
- d) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).



Şekil 12.12 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- b) Robotun ön sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri $f_{z_{ön}}$ (m).
- c) Robotun orta sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri $f_{z_{orta}}$ (m).
- d) Robotun arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri $f_{z_{arka}}$ (m).



Şekil 12.13 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- c) Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).
- d) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

Tablo 12.2 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.

HEXAPOD ROBOT					
6 bacaklı					
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ					
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı	
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)	
50		8		2.5	
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ					
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın Harcadığı Güç	Orta Bacağın Harcadığı Güç	Arka Bacağın Harcadığı Güç	Toplam Harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{orta}	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)	(watt)
3	7.92	64	58	68	191

12.3.2. Sonuç

Bu bölümde SLIP ile modellenen altı bacaklı hexapod robotun zıplayarak yürüyüşünün denetimi için Bulanık Mantık Denetim uygulanmış olup ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Sistem cevaplarına, sayısal benzetim sonuçları ve grafiklerden bakıldığında; tasarlanan zıplayarak yürüme modelinin literatürde [1, 2, 95, 96, 99] yapılan çalışmalar gibi başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu gibi zıplama işlevlerinde bacaklardaki eyleyicilerin uyguladıkları tork değerleri genelde sınırlıdır. Bu yüzden sayısal benzetim modelinde bacaklara ait eyleyicilerin tork değerleri sınırlandırılmıştır. Bu sınır değerler piyasada kolaylıkla bulabileceğimiz 10Nm ve 15Nm aralığında ki mevcut olan eyleyicilerdir. Grafiklerden de görüldüğü gibi sistem +/- 10Nm sınırları aralığında başarılı olarak zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirmiştir. Bulanık Mantık Denetleyici algoritması ile sistemin denetiminde ki çıkış tork değerlerinin PD denetim algoritmasında ki çıkış tork değerlerinden daha küçük sınırlar arasında değerler aldığı görünmektedir. Bu denetim algoritmasında istenilen bir performanstır. Bu aralık PD denetim algoritmasında +/- 12Nm sınırları aralığında olurken, Bulanık Mantık Denetleyici algoritmasında +/- 10Nm' dir.

Altı bacaklı hexapod robotun verilen başlangıç değeri için sistem cevapları bölüm sonunda bir tablo şeklinde oluşturulmuştur. Bu tabloda, sistem cevabında hangi başlangıç değeri için sayısal benzetim oluşturulduğu, robotun belirli periyodik sürelerde ne kadar yol aldığı ve alınan yola karşılık eyleyicilerin harcadığı enerji miktarı verilmiştir. Sonuçta, oluşturulan bu tablolar aynı sistemin farklı denetim algoritmaları ile elde edilecek sayısal benzetim sonuçlarına göre daha kolay şekilde kıyaslanmasına yardımcı olacaktır.

Altı bacaklı hexapod robot denklem 9.1' de belirtilen değişkenleri için sayısal benzetim sonuçları elde edilmiştir. Bu değişkenlerden en önemlisi robot gövdesinin ağırlık merkezinin yer seviyesinden belli bir yükseklikte bırakıldığı b_z değeridir. Bu değişken sistemin dinamiğini en fazla etkileyen değerdir. Çünkü robotun sahip olduğu dinamik yapı belirli limit değerleri arasında olmak zorundadır. Modellenen altı bacaklı hexapod robotun bu değere bağlı olarak uygun dinamik aralığı literatürdeki çalışmalarda kullanılan aralıklarda başarılı sonuçlar vermiştir [1, 96, 139, 196].

Robot değişkenlerinden diğer önemli bir değişken robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen a salınım açısıdır($^{\circ}$). a salınım

açısı sistemin kararlılığı hakkında bize bilgi veren en önemli değişkendir. Literatür çalışmalarında da görüldüğü gibi zıplayarak yürümeye robotun ana gövdesinin hep düzlemsel ortamda harmonik bir yörüngeyi takip etmesi istenir [1, 96, 99, 132]. Sistemde bu harmonik yörünge gövde salınım açısı α ile temsil edilmiştir. Bu çalışmada da bu parametre göz önüne alınarak sistem denetlenmeye çalışılmıştır. Bu yüzden ana gövdenin salınım denetimi, sistemde bacakların denetlenmesi ile sağlanmıştır. Literatürde ki çalışmalarda da görüldüğü gibi α salınım açısının zıplayarak yürüme işlevi sürecinde ki değeri $\pm 20^\circ$ sınırları arasında olması istenen bir durumdur [1, 96, 99, 132, 139, 196].

Robot değişkenlerinden diğer bir önemli değişken ise robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{B}_y$ ' dir(m/sn). Bu değişkende sistem dinamiğini etkileyen önemli bir parametredir. Genelde modellenen robot yer seviyesinden belli bir yükseklikte belli bir ilk hız ile fırlatılarak zıplayarak yürümesi istenir. Bu ilk hız başlangıçta olması gereken bir olaydır. Eğer belli bir hız ile fırlatılmasa ($\dot{B}_y=0$) robotun aynı düşey ekseninde zıpladığı görülmektedir. Sayısal benzetim sonuçları ve grafikler, modellenen altı bacaklı hexapod robot $\dot{B}_y$ ' nin literatürdeki çalışmalarda kullanılan değerde başarılı sonuçlar verdiği sayısal benzetim sonuçlarında görülmüştür [1, 96, 139, 196].

Bu bölümdeki çalışmada en önemli sonuç sistemin yapay zeka metodu olan Bulanık Mantık Denetleyicisi ile oldukça başarılı olarak denetlenmesidir. Bu çalışma yazarın bilgisi dahilinde altı bacaklı hexapod robotun zıplayarak yürüme işlevinin gerçekleştirilmesinde, literatür çalışmalarında bir ilktir. Bulanık Mantık Denetleyicisi ile denetlenen sisteme ait sayısal benzetim sonuçları bölüm sonunda bir tablo halinde verilmiştir. Bu sonuçlardan Bulanık Mantık Denetleyicisi ile denetlenen sisteme ait sayısal benzetim sonuçlarının, PD denetleyicisi ile denetlenen sisteme ait sayısal benzetim sonuçlarına göre performans olarak çok daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bulanık Mantık Denetleyici Algoritması ile denetlenen altı bacaklı hexapod robotun, PD denetleyicisine nazaran daha az bir enerji tüketimi ile daha fazla yol aldığı görülmüştür. Bu performans robotik teknolojisinde bilim adamlarınca üzerinde durulan en önemli bir unsurdur. Bulanık Mantık Denetleyicisi Algoritmasının diğer denetim algoritmalarına göre sistem üzerindeki avantaj ve dezavantajları son bölümde oluşturulan bir tablo ile daha ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Ayrıca bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak yapılan bir yenilik, altı bacaklı hexapod robot Şekil 9.4 ve Şekil 9.5' de görüldüğü gibi sadece iki

evrede(uçuş evresi ve ye-duruş evresi) iki adet denetim algoritması ile başarılı bir şekilde denetlenmiş olmasıdır. Oysaki Poulakakis ve arkadaşları aynı sistemin denetimini üç evrede (uçuş evresi, ileri itme evresi ve yer-duruş evresi) üç denetim algoritması ile gerçekleştirmişlerdir [1, 96, 139, 196]. Bu çalışmada modellenen zıplayarak yürümenin evreleri esnasında yapılan denetim eylem sayısı, yazarın literatür bilgisi dahilinde hexapod robot için daha önceden yapılan çalışmalardaki denetim eylem sayısından daha azdır. Ayrıca, bu çalışmada yapılan yenilik sistemin hem denetimini oldukça kolaylaştırmış olup hem de az sayıda ki denetim algoritması ile literatürde yapılan çalışmalarla aynı başarı elde edilmiştir [1, 96, 139, 196].

13. AĞ TABANLI BULANIK DENETİM ALGORİTMASI

13.1. Giriş

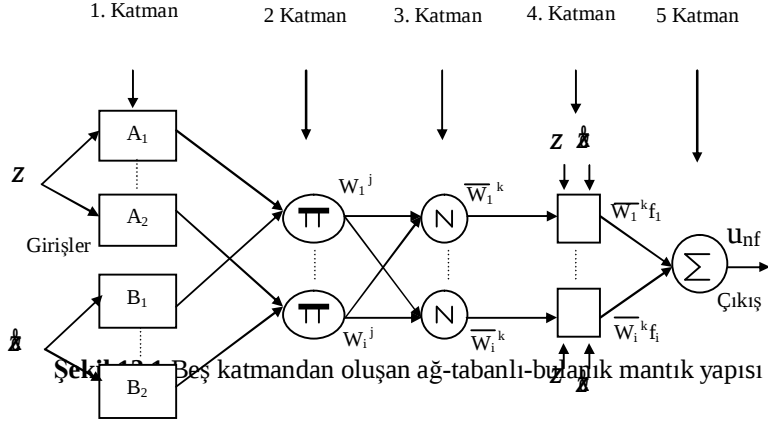
Ağ tabanlı bulanık mantık, bulanık mantık ile desteklenmiş ya da bulanıklaştırılmış ileri beslemeli yapay sinir ağları olarak adlandırılabilir. Bu yolla yapay sinir ağlarının karmaşık sistemleri modelleyebilme yeteneğinin belirsizlikleri de işleyebilecek şekilde geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Bu bölümde ağ tabanlı bulanık mantık denetleyici tasarımı anlatılarak dört bacaklı quadropedal robot ve altı bacaklı hexapod robotun zıplayarak yürüme işlevleri yapan modellere uygulanmıştır. Denetleyiciye ait optimum parametreler ağ tabanlı algoritma tekniği kullanılarak bulunmuştur. Denetleyicinin eğitimi esansında daha önceden gerçekleştirilen PD denetim algoritmasına ait giriş ve çıkış değerleri alınarak eğitilmiştir. Sistemin cevabı geliştirilen diğer algoritmalarda kullanılan başlangıç değerleri alınarak Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Algoritmasının performansı incelenmiştir. Sayısal çözüm için MATLAB paket programında geliştirilen yazılım ve Runge-Kutte metodu kullanılmıştır. Sistem cevapları grafiksel olarak ve tablo halinde elde edilerek irdelenmiştir.

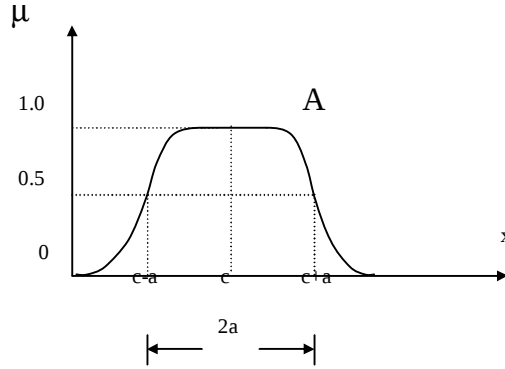
13.2. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyici Tasarımı

Bulanık sistemler belirsizlikleri işleyebilme yeteneğine rağmen yapay sinir ağları gibi öğrenebilen bir sistem değildir. Yapay sinir ağlarının, bulanık sistemlerle bir araya getirilmesi sonucunda elde edilen ağ tabanlı bulanık mantık her iki tekniğin avantajlı yanlarını bir araya getirmeyi amaçlamaktadır. Ağ tabanlı bulanık mantıkta giriş değişkenleri bulanıklaştırılmakta ve yapay sinir hücrelerinin yerine bulanık sinir hücreleri kullanılmaktadır. Bulanıklaştırma işlemi, yapay sinir ağlarından farklı olarak ağ girdilerinin sözel değişkenlerle tanımlanmasına olanak sağlarken; bulanık sinir hücreleri, işlevsel olarak aynı olmasına karşın, hücreye gelen uyarımların doğrusal olmayan bir fonksiyonla işlenmesi yerine bulanık operatörlerle işlenmesi nedeniyle yapay sinir hücrelerinden ayrılmaktadır. Bulanık mantık ilkelerinin bu yolla yapay sinir ağlarına eklenmesi belirsizlikleri işleyebilen ve aynı zamanda yapay sinir ağları gibi genelleyebilen bir sistemin oluşturulmasını sağlamaktadır.

Ağ-tabanlı-bulanık mantık yapısı Şekil 13.1’de görüldüğü gibi 5 ayrı katmandan oluşmaktadır. Bulanıklaştırma katmanı, saklı iki katman, fonksiyon katmanı ve berraklaştırma katmanı.



Bir elemanın herhangi bir bulanık kümeye olan üyeliğini netleştirmek için üyelik fonksiyonları kullanılmaktadır. x giriş elemanının bir A bulanık kümesine olan üyeliği $\mu_A(x)$ formunda gösterilebilmektedir. Bulanık mantıkta üyelik fonksiyonunun seçimi kullanıcının tecrübesine bırakılmıştır ve bu çalışmada gauss üyelik fonksiyonu tercih edilmiştir. Bir gauss üyelik fonksiyonu Şekil 13.2’de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 13.2 A bulanık kümesi için gauss üyelik fonksiyonu

Burada c parametresi, üyelik fonksiyonunun merkezini, a parametresi ise genişliğini ifade eden katsayılarıdır.

Sisteme ait her bir durum değişkeni, bulanıklaştırma katmanında bulanık kümelere dönüştürülmektedir. Bu katmandaki her bir işlem birimi bir bulanık kümeye karşı gelmektedir ve işlem birimi çıkışı üyelik fonksiyonu olmaktadır. Bulanıklaştırma katmanında, bulanık çalışma bölgelerini tanımlamak için sistem girişleri olan e ve $\mathbf{z}$ durum değişkenleri giriş olarak kullanılmış ve her bir giriş için birer üyelik fonksiyonu seçilmiştir. Buna göre bu üyelik fonksiyonları,

$$m_{Ai}(z) = e^{-\left(\frac{z - c_i}{a_i}\right)^2}$$

$$m_{Bi}(\mathbf{z}) = e^{-\left(\frac{\mathbf{z} - c_i}{a_i}\right)^2} \quad i=1,2,3,\dots \text{ için} \quad (13.1)$$

biçiminde gösterilir. Kuralların kesinlik dereceleri ikinci katmanda (13.2) denklemi ile cebirsel çarpım kullanılarak bulunur.

$$w_i^j = m_{Ai}(z) \cdot m_{BAi}(\mathbf{z}) \quad i=1,2,3,\dots \text{ için} \quad (13.2)$$

Normalizasyon işlemi, (13.3) denkleminde görüldüğü gibi bir kuralın kesinlik derecesinin diğer kuralların kesinlik derecelerine oranı olarak tanımlanabilir. Böylelikle bir kuralın toplam kurallar açısından çıkışa olan etkisi ortaya konulmuş olur. Bu işlemler ağıın 3. katmanında gerçekleştirilmektedir.

$$\bar{w}_i^k = \frac{w_i^j}{w_1^j + w_2^j + w_3^j + \dots} \quad i=1,2,3,\dots \text{ için} \quad (13.3)$$

Normalize edilmiş her bir kural (13.4) denklemi ile 4. katmanda kendine ait çıkış fonksiyonu ile çarpılır.

$$\bar{w}_i^k \cdot f_i = w_i^k \cdot (p_i \cdot z^T + q_i \cdot \mathbf{z}^T) \quad (13.4)$$

Buradaki p ve q (Nx1) boyutunda vektörel olup, fonksiyon katmanında kullanılan fonksiyonlara ait doğrusal parametrelerdir.

Berraklaştırma işlem biriminin girişi, çalışma bölgeleri ve bu bölgelere ait üyelik fonksiyonlarıdır. Berraklaştırma katmanı 5. katmandır ve burada denklem (13.5)'deki gibi ağırlık merkezi yöntemi ile berraklaştırma işlemi gerçekleştirilmekte ve ağ çıkışı oluşturulmaktadır.

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i^k f_i = \frac{\sum_i w_i^k f_i}{\sum_i w_i^k} \quad (13.5)$$

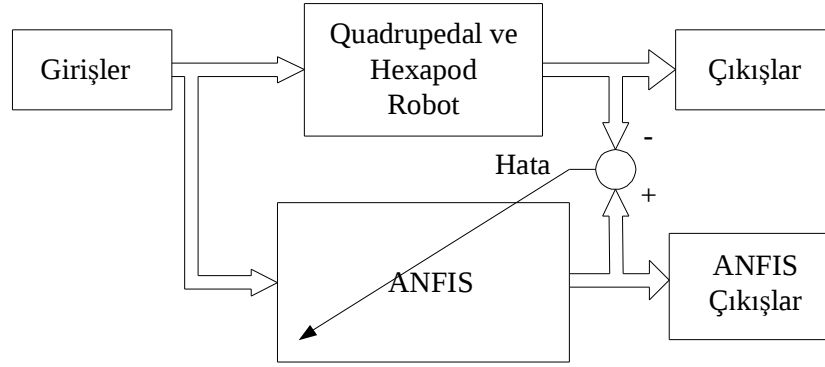
Elde edilen bu sayısal çıkış ağ-tabanlı-bulanık mantık denetimin üretmiş olduğu denetim değişken değeridir ve bu değer doğrudan sisteme uygulanır.

İleri beslemeli yapay sinir ağlarında ağlara ait parametrelerin güncellenmesi için sıkça kullanılan bir yöntem olan geriye yayılma algoritması kullanılır. Bu yöntem verilen eğitim kümesi için hataların giriş olarak uygulandığı ve ortalama karesel hata değerini minimize edecek şekilde ağ parametrelerinin uyarlanmasına dayanır ve bu amaç ölçütünü en küçük yapan parametreler belirlenmiş olur.

Uygunluk fonksiyonu için sistemin performans indeksi olarak tanımlanan ortalama karesel hata kriteri tercih edilmiştir.

$$E(k) = \frac{1}{2} \cdot e^2(k) \quad (13.6)$$

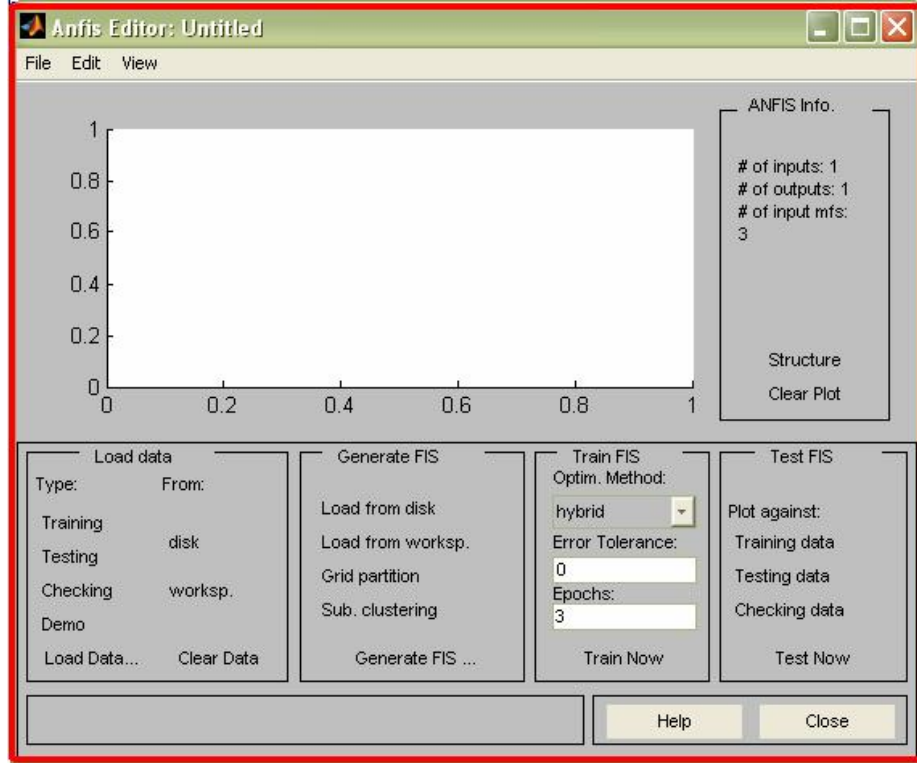
Denetleyicinin eğitimi için PD denetim algoritmasına ait giriş ve çıkış değerleri alınarak eğitilerek sisteme etki ettirilmiş ve sisteme ait performans kriterini minimum yapacak şekilde denetleyiciye ait optimum parametreler bulunmuştur. Şekil 13.3'te ağ tabanlı bulanık mantık denetleyicinin eğitiminde kullanılan algoritmaya ait blok diyagram gösterilmiştir. Nümerik çözüm için MATLAB paket programında ANFIS araç kutusu kullanılmıştır.



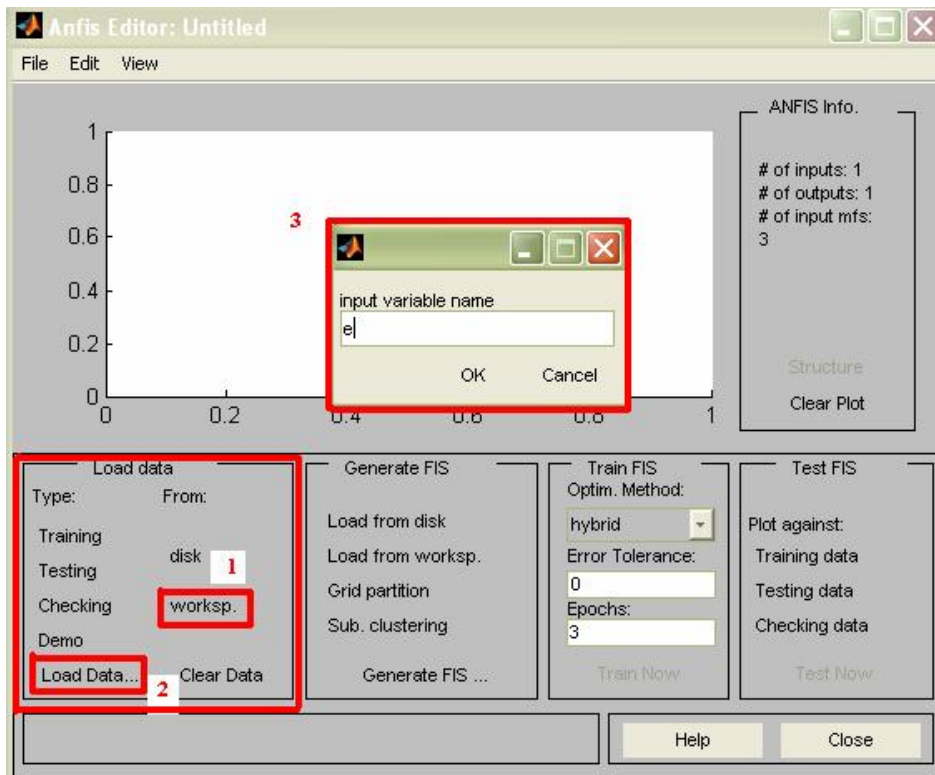
Şekil 13.3. Ağ tabanlı bulanık mantık denetleyicinin eğitim algoritması blok diyagramı

Nümerik çözümün yapıldığı MATLAB paket programında ANFIS araç kutusu sisteminin kullanma yöntemi aşağıda adım adım gösterilerek algoritmanın daha iyi anlaşılması sağlanmıştır.

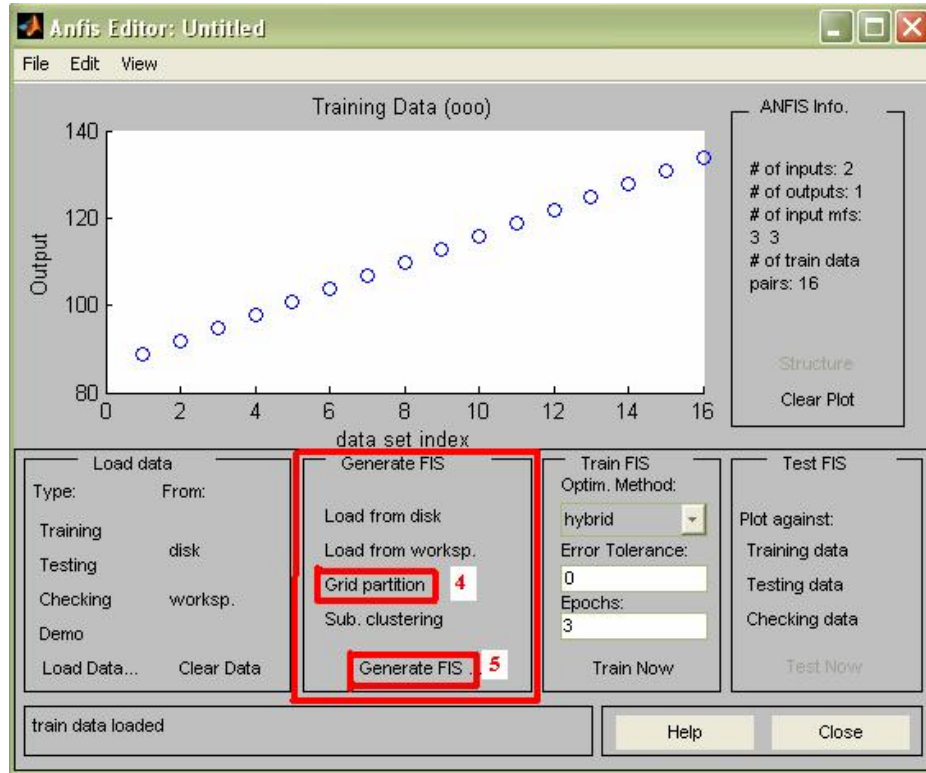
İlk adımda Matlab command window ortamında `>>anfisedit` yazarak ANFIS denetim algoritmasının ana işlem penceresi oluşturulur. Bu ANFIS işlem penceresi Şekil 13.4’ de gösterilmiştir. İkinci adımda ise ilk adımda elde ettiğimiz ANFIS işlem penceresinde Load Data kısmında 1 numara ile gösterilen workspace butonunu seçeriz. Burada workspace kısmında oluşturduğumuz eğitim verileri vardır. Daha sonra 2 numaralı butonu seçerek eğitim verilerini düzenlediğimiz matris şeklindeki formun ismini 3 numaralı alana girerek OK butonunu tıklarız (Şekil 13.5). Daha sonraki 4 numaralı bölümde Grid Partition butonu ve sonrada 5 numaralı Generate FIS butonunu tıklayarak 7-8-9 numaralı alanlardan sırası ile üyelik fonksiyon sayısını, üyelik fonksiyon eğri tipini ve çıkışlar için üyelik fonksiyon eğri tipini seçerek 9 nolu bölümden onaylarız (Şekil 13.6-13.7). Buraya kadar olan kısımda ANFIS’ in genel morfolojisi oluşturulmuştur (Şekil 13.8). Bunu Şekil 13.9’ da ki structure sekmesi ile görebiliriz. Üçüncü bölüm olan Train FIS kısmında algoritma için optimum metot(10), hata tolerans sınırını(11) ve iterasyon sayısını(12) belirleyerek algoritmayı 13 numaralı Train Now sekmesi ile çalıştırılır. En son bölümde Training Data ve Test Now sekmeleri ile işlem bitirilerek 17 numaralı bölümde FIS uzantılı olarak saklandıktan sonra denetim algoritma yazılımında kullanılır (Şekil 13.10-11).



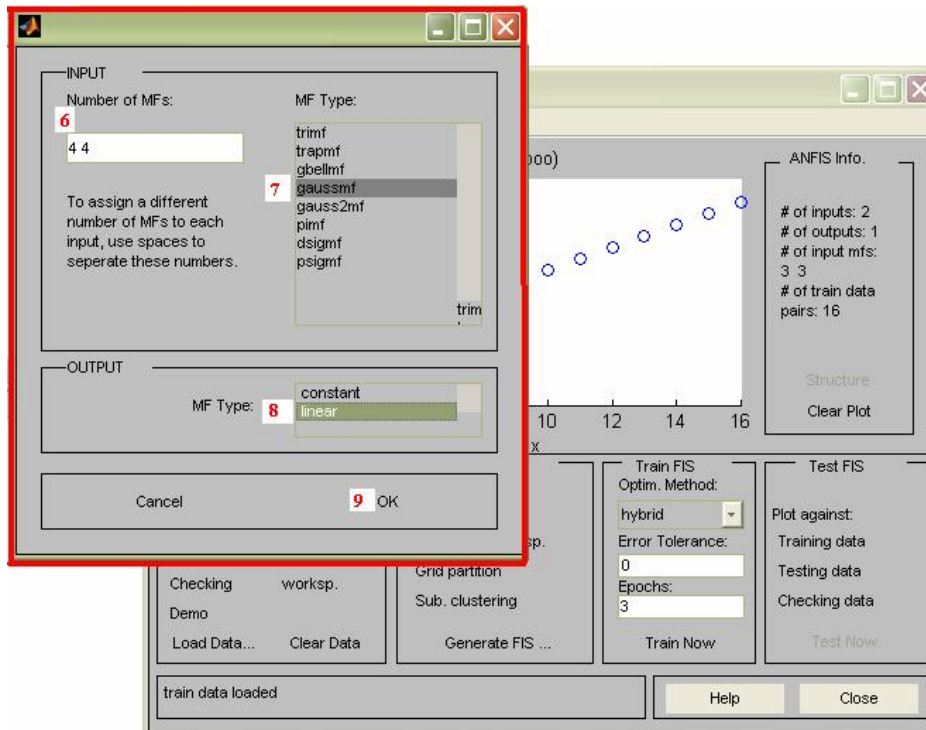
Şekil 13.4. ANFIS denetim algoritmasının ana işlem penceresi



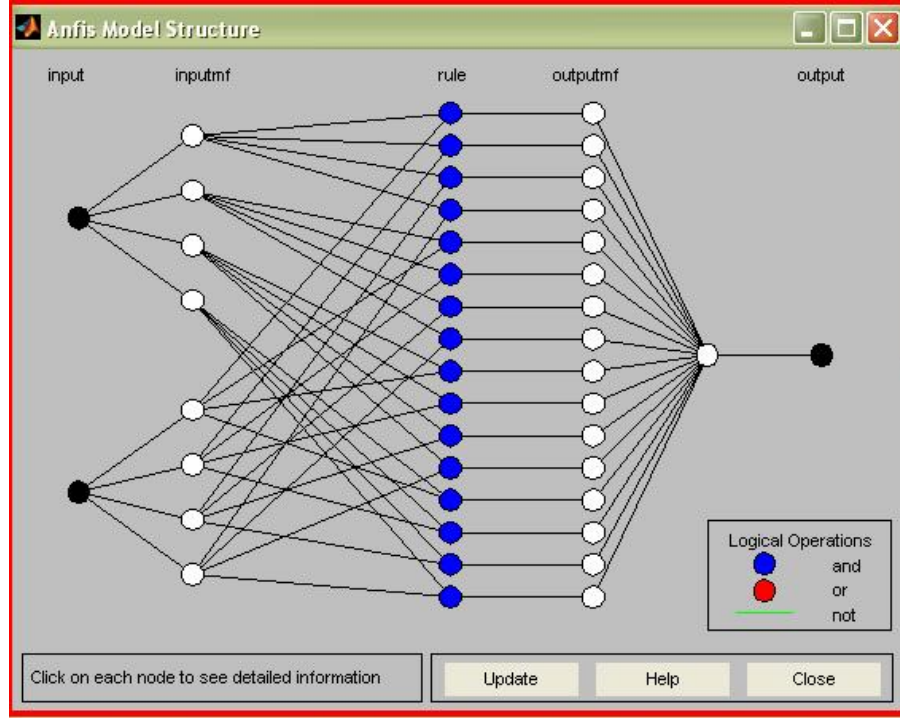
Şekil 13.5. Eğitim verilerinin sisteme yüklenmesi



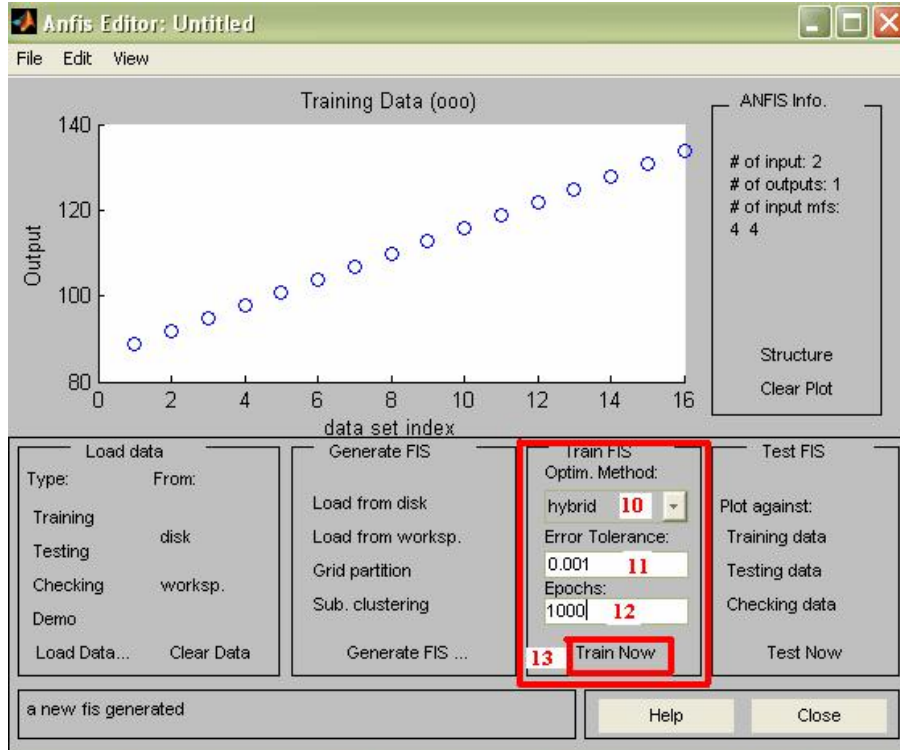
Şekil 13.6. ANFIS algoritmasına ait üyelik fonksiyon sayısı ve tipleri



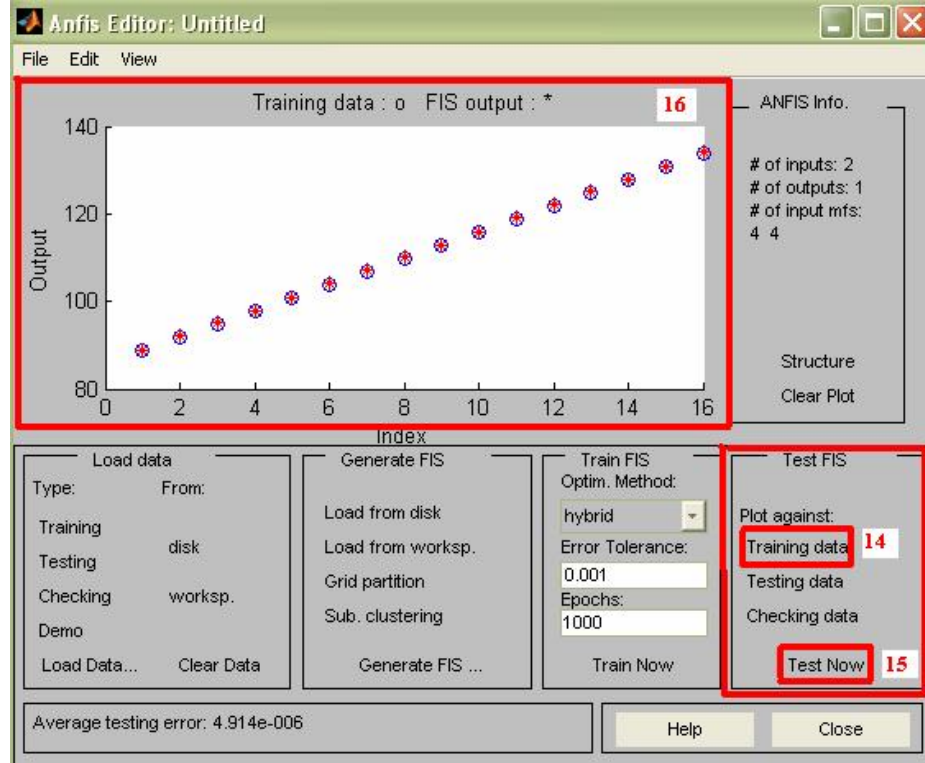
Şekil 13.7. ANFIS algoritmasına ait üyelik fonksiyon sayısı ve tiplerinin belirlenmesi



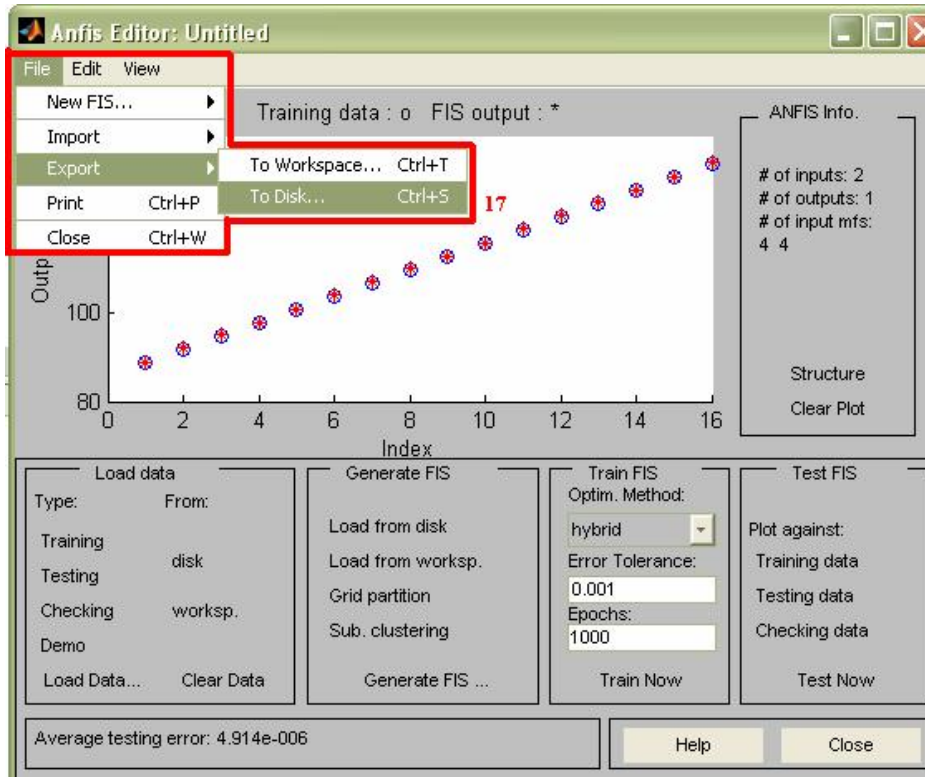
Şekil 13.8. ANFIS denetim algoritmasının morfolojik yapısı



Şekil 13.9. ANFIS denetim algoritmasına ait hata toleransının ve iterasyon sayısının belirlenmesi



Şekil 13.10. ANFIS denetim algoritması ile sistemin çözüm cevap grafiği



Şekil 13.11. ANFIS denetim algoritmasının FIS uzantılı olarak saklanması

14. QUADRUPEDAL ROBOT ZIPLAMA MODELİNİN AĞ TABANLI BULANIK MANTIK DENETİM ALGORİTMASI İLE DENETİMİ VE SAYISAL BENZETİMİ

14.1. Sistemin Morfolojisi ve Genel Kavramı

Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritması ile denetlenen dört bacaklı quadrupedal robot sisteminin modellenmesi, denetimi ve sayısal benzetimi MATLAB paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zıplayarak dengeli yürüme işlemi MATLAB paket programında bir ana programdan ve beş alt program olmak üzere toplam altı adet m-file' dan oluşmaktadır. Ana programı run_simulation-quadrupedal ismi temsil ederken alt programları sırasıyla Slip_Events, To_Radial, Slip_Vf, Flight_Control ve Stance_Control isimleri ile temsil edilmektedir. Bu ana program ve alt programlar Şekil 14.1' de de görüldüğü gibi sürekli eş zamanlı olarak birbirleri ile veri alış verişinde bulunarak ilişkili çalışmaktadırlar. Ana programda sisteme ait başlangıç değerleri, robot parametreleri ve sayısal benzetime ait grafik komutları mevcuttur. Slip_Events alt programı içerisinde robotun evre ve durumlarını belirleyerek dinamik döngüyü oluşturur. Slip_Vf alt programı içerisinde ise sistemin dinamik denklemleri mevcuttur. To_Radial alt programında sisteme ait kinematik denklemler çözülmektedir. Flight_Control ve Stance_Control alt programlarında da denetim algoritmaları oluşturulmuştur.

14.2. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim Algoritma Tasarımı

Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim algoritmasının çıkış sinyalleri; dört bacaklı quadrupedal robotun kalça kısmında bulunan eyleyicilerin, Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritması ile ürettiği uygun tork değerleridir. Burada sistem bilindiği gibi iki farklı kapalı dinamik döngüden oluşmaktadır. Zıplayarak yürüme işlemleri ardışık kapalı bir döngü içerisinde farklı dinamik yapılardan oluşur. Quadrupedal robot iki evrede ayrı ayrı denetlenerek zıplayarak dengeli dinamik yürüme eylemini gerçekleştirmektedir. Bu denetim evreleri Şekil 14.2' de görülmektedir. Birinci evre olan uçuş evresinde ön ve arka sanal bacakların yere dokunma açıları (f^{td}), ikinci evre olan yer-duruş evresinde ise ön ve arka sanal bacakların süpürme açıları (f^{swl}) istenilen değerde olabilmeleri için Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritması ile uygun çıkış sinyali olarak tork elde edilerek sistem denetlenmektedir. Denetim algoritmasında sistemin girişlerini e (hata) ve $\dot{e}$ (hatanın değişimi) değerleri oluşturmaktadır. Burada hata, sistemin uçuş ve yer-duruş evrelerinde ön ve arka sanal bacakların gövdeye göre

anlık ölçülen açı değerleri ile ön ve arka sanal bacaklar için istenilen açı değerleri arasındaki farktır. Sistemin çıkışlarını ise hata ve hatanın zamana göre anlık değişim değerlerini minimize edecek şekilde ön ve arka sanal bacakları tahrik eden eyleyicilere uygulanan uygun tork değerleridir. Sisteme ait giriş ve çıkış değerleri Şekil 14.1 ve Şekil 14.3’ de görülmektedir.

Burada Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim’ de Sugeno metodu kullanılmıştır. Her bir sanal bacak için, Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim iki giriş ve bir çıkıştan oluşan bir sistemdir. Sonuçta ön ve arka sanal bacaklar için ayrı ayrı olmak üzere toplam iki adet Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetleyicisi tasarlanmıştır. Bu yüzden quadrupedal robotun zıplayarak dengeli dinamik yürüyüş denetim algoritmasının tamamında toplam dört adet giriş ve iki adet çıkıştan ibarettir.

Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim Algoritmasının, Bulanık Mantık Denetim Algoritmasından farkı, kuralların ve üyelik fonksiyon taban değerlerinin kullanıcı uzman kişiler tarafından belirlenmemesidir. Bu Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritmasının, Bulanık Mantık denetim algoritmasına göre avantajları aşağıda ki paragraflarda sırasıyla anlatılmıştır.

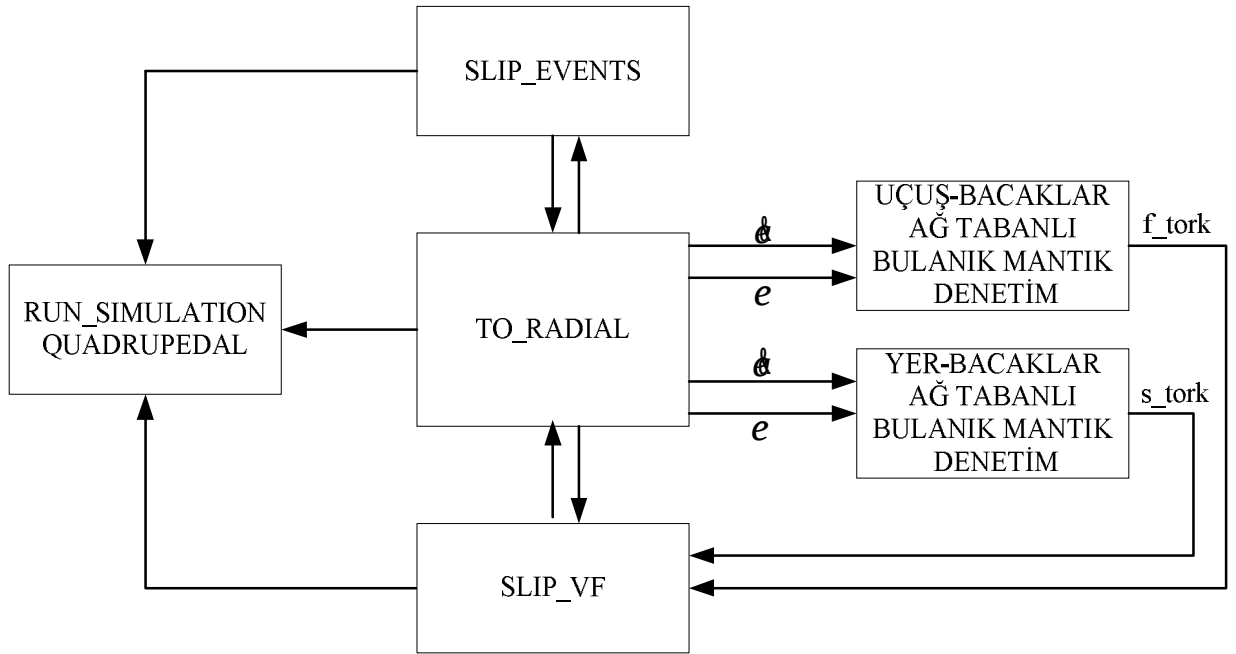
Bu bölümde ön ve arka sanal bacakların tümü için de aynı sayıda 25 kural kullanılmıştır. Bilindiği gibi Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim (ANFIS) algoritmasında kurallar ANFIS araç kutusu alt program yazılımı ile belirlenmektedir. Yani kurallar Bulanık Mantık denetleyicide olduğu gibi uzman kişiler tarafından belirlenmemektedir. Bu da sistemin denetimi için kuralların uzman kişilerce belirlenmesine ihtiyaç kalmadan, denetimi oldukça basitleştirilerek kolaylık sağlamıştır. Kullanıcı tarafından denetleyici için sadece kural sayısının âdetinin belirlenmesi yeterlidir. Kural sayısını Tablo 14.1’ de gösterilmiştir.

Ayrıca ANFIS denetim algoritmasının diğer bir avantajı üyelik fonksiyonlarının taban değer aralıklarının yine kullanıcı kişiler tarafından belirlenmemesidir. ANFIS denetim algoritmasında sadece üyelik fonksiyon tipleri kullanıcı tarafından seçilmektedir. Burada üyelik fonksiyonlarının taban değer aralıkları yine ANFIS araç kutusu alt program yazılımı ile belirlenmektedir. Bu özellik sistemin denetim sürecinde oldukça zaman kazandırmış ve denetimin performansını arttırmıştır.

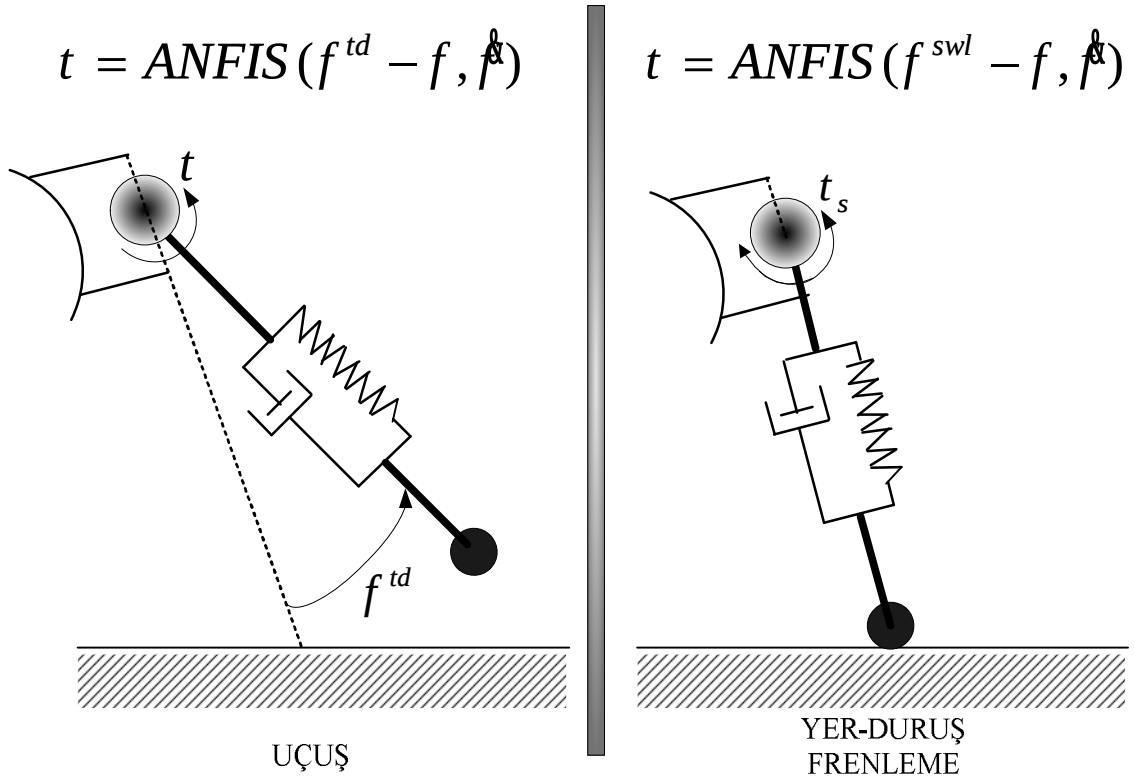
Dört bacaklı quadrupedal robot sisteminin ANFIS ile denetiminde giriş değerleri hata(e) için triangular tip üyelik fonksiyon, hata değişimi($\dot{e}$) için triangular tip üyelik

fonksiyonu ve çıkış değeri $tork(t)$ için değerleri için trapezoidal tip üyelik fonksiyonları kullanılmıştır.

Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritması hata (e) ve hata değişimini ($\dot{e}$) minimize ederek, sanal bacaklar için gerekli olan tork değerlerini ($t_{ön_bacak}$, t_{arka_bacak}) çıkış sinyali olarak üretirler.



Şekil 14.1 Tasarlanan Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim Algoritmasına Ait Blok Diyagram



Şekil 14.2 Zıplayarak Yürüme Evreleri Sırasında Denetim Algoritması (Denetim iki eylemden ibarettir.)

Tablo 14.1. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyicisinde kullanılan (5x5=25) kural sayısı

		δ				
e	t	K1	K2	K3	K4	K5
	K1	K1	K1	K1	K2	K3
	K2	K1	K1	K2	K3	K4
	K3	K1	K2	K3	K4	PB
	K4	K2	K3	K4	K5	K5
	K5	K3	K4	K5	K5	K5

Üyelik fonksiyonları 0 ve 1 arasında bir üyelik derecesine sahip olan, sistemin giriş ve çıkışlarının her bir noktada nasıl tanımlandığını gösteren eğrilerdir. Burada sistem girişini oluşturan hata (e) ve hata değişimi (δ) için triangular tip üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. e ve δ giriş değerleri için kullanılan üyelik fonksiyonlarının tanım kümesi yani üyelik

fonksiyonlarının taban değerleri ANFIS araç kutusunda ki ağ tabanlı yazılım ile belirlenmektedir. Sistemin çıkış değeri t için üyelik fonksiyonu olarak trapezoidal tip eğrileri kullanılmıştır. Ayrıca, sistem çıkışı t için kullanılan kümede yine ANFIS araç kutusunda ki ağ tabanlı yazılım ile belirlenmektedir.

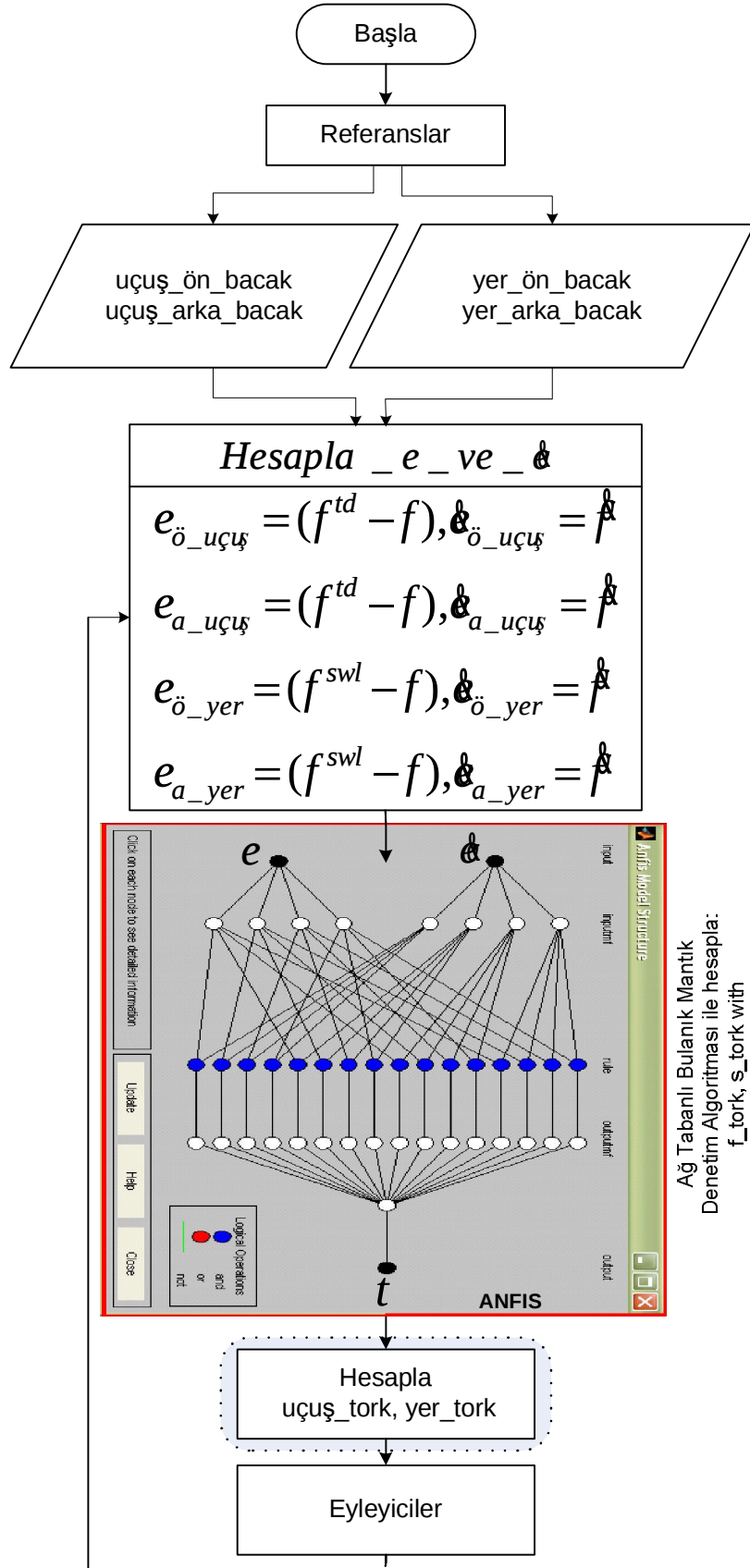
Ağ tabanlı Bulanık Mantık denetleyicisinin giriş (e ve $\dot{e}$) ve çıkış (t) değişkenleri için bir kural tablosu tasarlanmıştır; her bir giriş değeri için 5' er kural sayısı belirlenerek toplam iki girişe ait 25 kural mevcuttur. Kurallar ANFIS denetim modelinde belirlenmektedir.

$e, (\dot{e}), t = \{\text{hata, hata değişimi, denetim değişkeni} \{5 \text{ kural} \times 5 \text{ kural}\} \text{ kümesinden ibarettir.}$

Ağ tabanlı Bulanık Mantık denetleyici tasarımında performansı belirleyen en önemli belirleyici faktörler denetim için seçilen hata tolerans değeri ile denetim iterasyon değerleridir. Bu değerler ANFIS araç kutusunda kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Hata toleransı denetimin minimum hata ile hassasiyetini etkilerken iterasyon sayısı da denetim döngüsünü belirtmektedir. Bu değer seçilirken dikkat edilecek husus sistemin sürekli rejim cevap süreci ile uygun olabilmesidir. Aksi takdirde sistem cevabı ya tam stabil olmadan sonlanacaktır ya da sistem cevabı stabil olmasına rağmen uzun bir süre algoritma çalışır halde olarak sistem performansını etkileyebilecektir.

Ağ tabanlı Bulanık Mantık denetleyici tasarımında eğitim ve test veri dataları olarak PD denetim algoritmasından elde edilen datalar ANFIS modelinde kullanılmıştır. Bu dataların kullanıldığı adım Şekil 13.5 ve Şekil 13.10' da gösterilmiştir.

Dört bacaklı zıplayarak yürüyen quadrupedal robot modeline sahip sistemin belirli başlangıç değerleri ile sayısal benzetim sonuçları ve grafikleri Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritması uygulanarak elde edilmiştir. Bu sayısal benzetim sonuçları ve grafikler irdelenerek diğer denetim algoritmalarına göre oluşan avantaj ve dezavantajları sonuç kısmında belirtilmiştir.



Şekil 14.3 Dizayn edilen sistem için Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim Akış Diyagramı

14.3. Quadrupedal Robotun Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim İle Sayısal Benzetimi

14.3.1. Sayısal Benzetim ve Elde Edilen Grafikler

Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki düzlemsel z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi, robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$), robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m), robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu faz eğri çizimleri, robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m), robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn), robotun ön-arka bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m), robotun ön bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m), robotun arka bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m), robotun ön-arka bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$), robotun ön bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$), robotun arka bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$), robotun ön-arka bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J), robotun ön bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{\text{ön}}$ (J), robotun arka bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J), hatanın zaman ile değişimi (e), robotun ön-arka bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m), robotun ön-arka bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm), robotun ön bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{\text{ön}}$ (Nm) ve robotun arka bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm) gibi önemli sayısal benzetim sonuçları farklı başlangıç değerlerine göre her bir grafikte gösterilmiştir.

Sayısal benzetim grafikleri quadrupedal robotun iki boyutlu ortamda sahip olduğu başlangıç değerlerine ait gövde ve sanal bacakların duruş pozisyonunu gösteren katı modeli görünmektedir. Ayrıca bu kısımda quadrupedal robotun her bir adımdaki zıplayarak yürüme işleminde, gövdenin ve sanal bacakların z-y eksenlerine göre konumları görülmektedir.

Gövde salınım grafikleri quadrupedal robotun gövdesinin ağırlık merkezinin z-y eksenlerine göre salınımını göstermektedir. Bu salınım derecesi^(°) olarak a ile temsil edilmektedir. Bu salınım aslında fiziksel olarak bir harmonik yapıya sahiptir. Buda robotun zıplayarak yürüme işleminde istenen bir durumdur [2, 96, 99].

Robot gövdesinin ağırlık merkezinin z dikey eksene göre zamana bağlı olarak aldığı yükseklik değerleri b_z ile temsil edilmektedir. b_z değerlerinin takip ettiği yörünge fiziksel olarak bir harmonik yapıya sahip olması gerekmektedir [2, 96, 99].

Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulur. Faz çizimleri bize sistemin kararlılığı hakkında bilgi vermektedir. Yani robotun zıplayarak yürüme işlemi esnasında devrilip devrilmediği ya da dengeli bir yürümenin olup olmadığı hakkında bilgi vermektedir.

Grafiklerde quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, sanal bacaklara ait boylarının anlık değişimleri gösterilmektedir. Bacak boylarındaki anlık değişim r ile temsil edilmektedir. Sanal bacakların boyları sadece bacaklar yere temas ettikten sonra değişmektedir. Bacaklar yer ile temas halinde iken robotun kütesinden dolayı, yay özelliğinde olan bacaklar önce kasılarak sıkışır, daha sonra da ilk boyuna gelinceye kadar açılarak zıplama işlemini gerçekleştirirler. Bacaklar yerden temasını kestiklerinde boyları sabittir. Sadece çok küçük oranda m_t ' den dolayı bir titreşim oluşmaktadır. Bu da sisteme rahatsız edici bir etken oluşturmamaktadır [95, 96, 99].

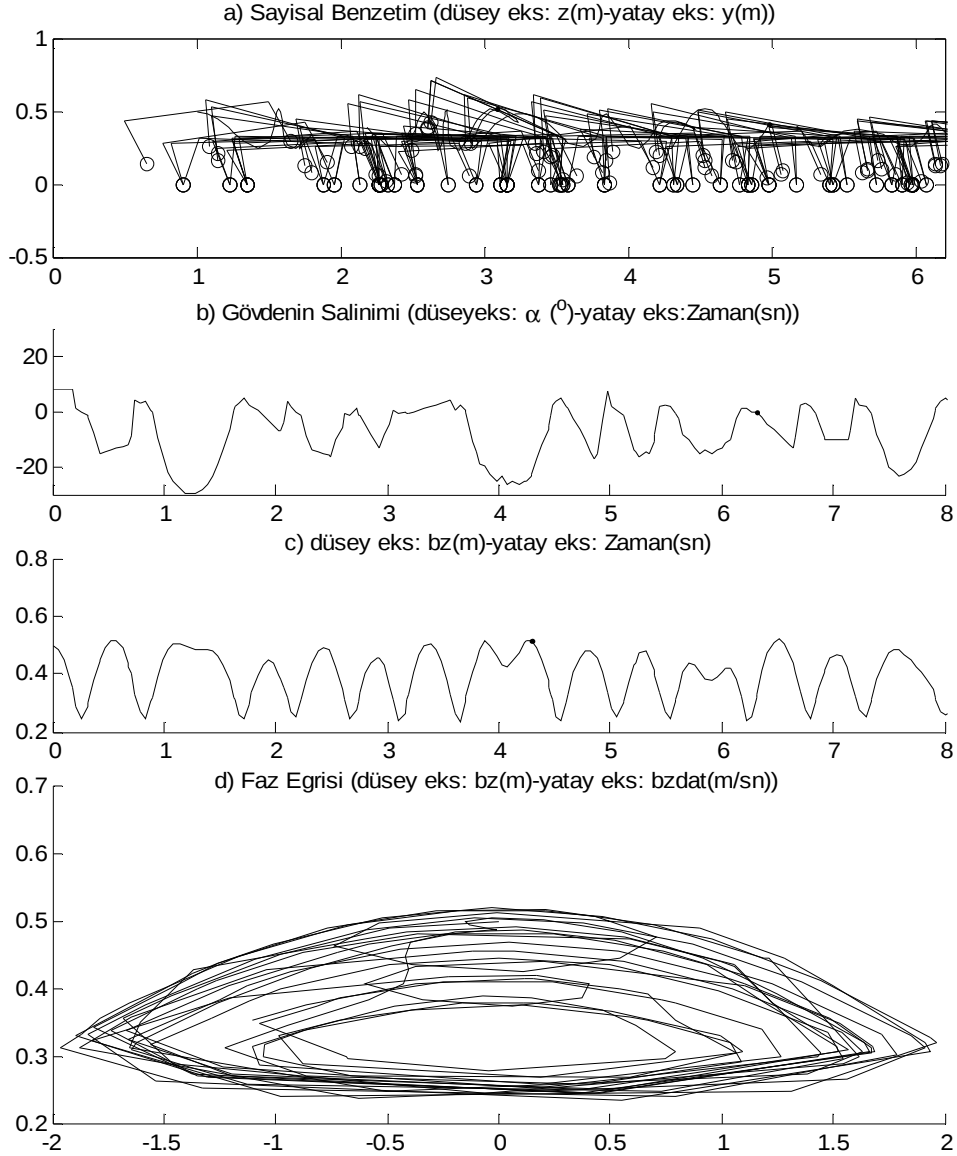
Ayrıca grafiklerde quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, sanal bacakların uçlarındaki ayakların yerden yükseklikleri gösterilmektedir. Bacakların yerden yükseklikleri f_z ile temsil edilmektedir. Sanal bacaklar yer ile temas halinde iken bu değer sıfırdır.

Aynı zamanda quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, sanal bacakların gövdeye göre açılma konumlarını^(°) gösterilmektedir. Bacakların gövdeye göre açılma konumları, robot hem yerde iken hem de havada iken ardışık gerçekleşen iki kapalı döngü içerisinde denetimleri gerçekleştirilmektedir. Bacakların gövdeye göre açılma konumları f ile temsil

edilmektedir. Quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, ön-arka sanal bacakların istenilen açısal konumları elde etmek için robot hem havada iken uygulanan denetimde hem de yerde iken uygulanan denetim sonucunda açısal konumlara bağlı olarak oluşan hatayı göstermektedir. Ön-arka sanal bacakların zıplayarak yürüme döngüsü içinde ki istenilen yere dokunma açısı(f^{td}) ve süpürme açısına(f^{swl}) bağlı olarak hata grafiği elde edilmiştir.

En son işlem olarak quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, uygulanan denetim algoritmasında istenilen açıları elde etmek için çıkış sinyali olarak ön-arka sanal bacaklara Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetimi ile uygulanan denetim çıkış sinyali tork değerleri grafiksel olarak verilmiştir.

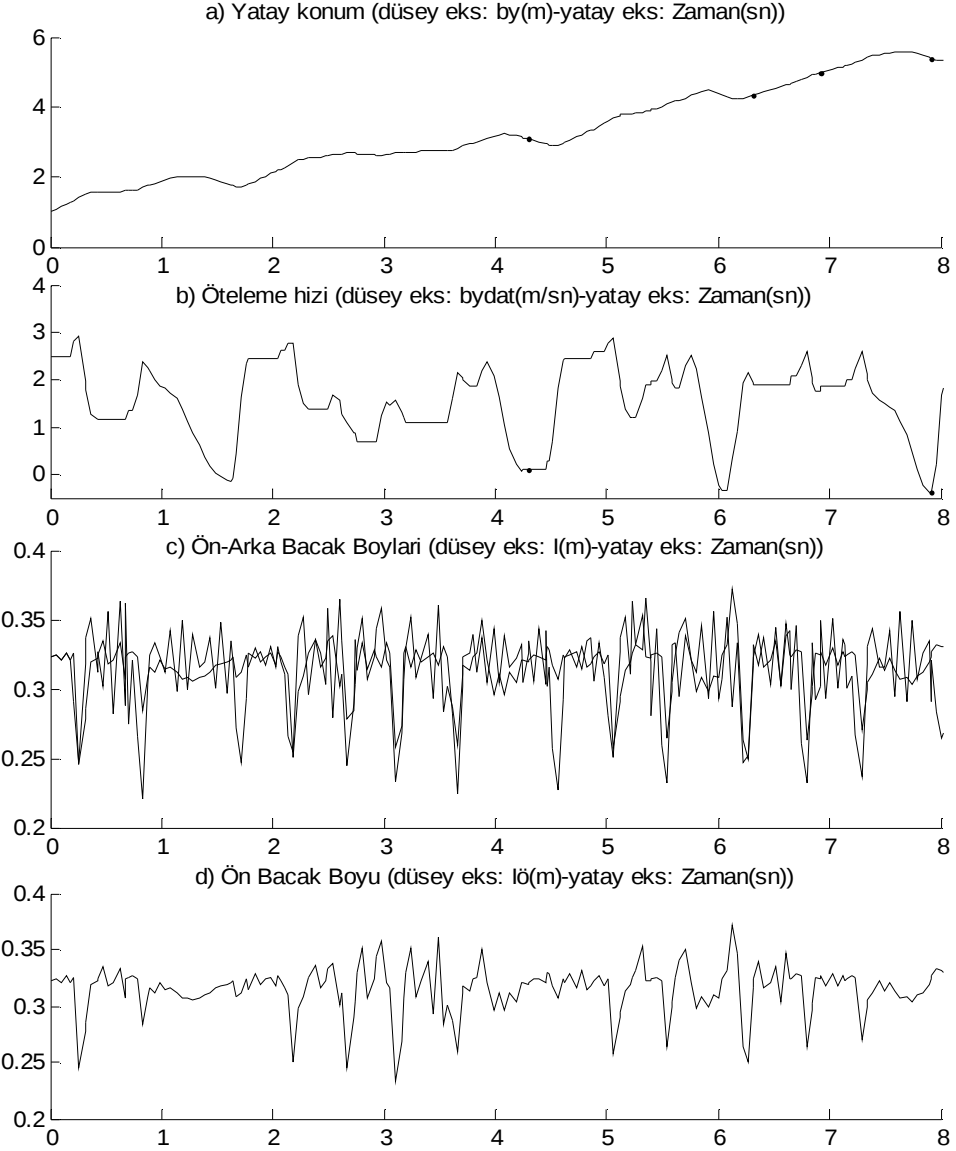
Bu bölümde robotun başlangıç değerlerine bağlı olarak, zıplayarak yürüme işlemi sırasında gerçekleşen tüm fiziksel olayların sayısal benzetim sonuçları grafiklerde gösterilmeye çalışılmıştır. Bu sayısal sonuçlara bağlı olarak robotun belirli zaman dilimleri arasında aldığı yol(m) ve alınan bu yol esnasında robotun her bir bacağına tahrik eden motorların harcadığı güç(watt) hesaplanarak tablo şeklinde verilmiştir. Ayrıca son kısımda oluşturulan tabloda, zıplamaya ait başlangıç değerleri verilmiştir.



Şekil 14.4 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket

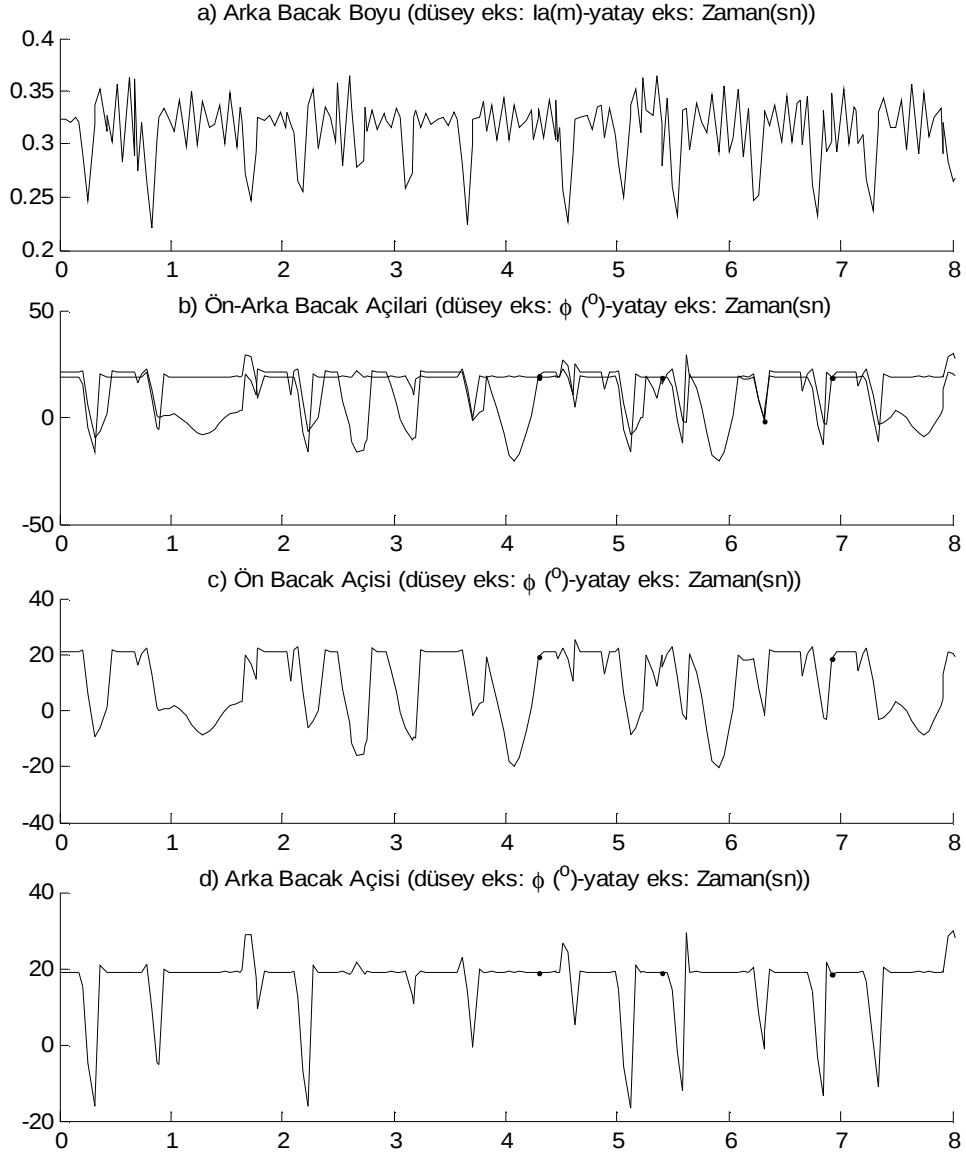
esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



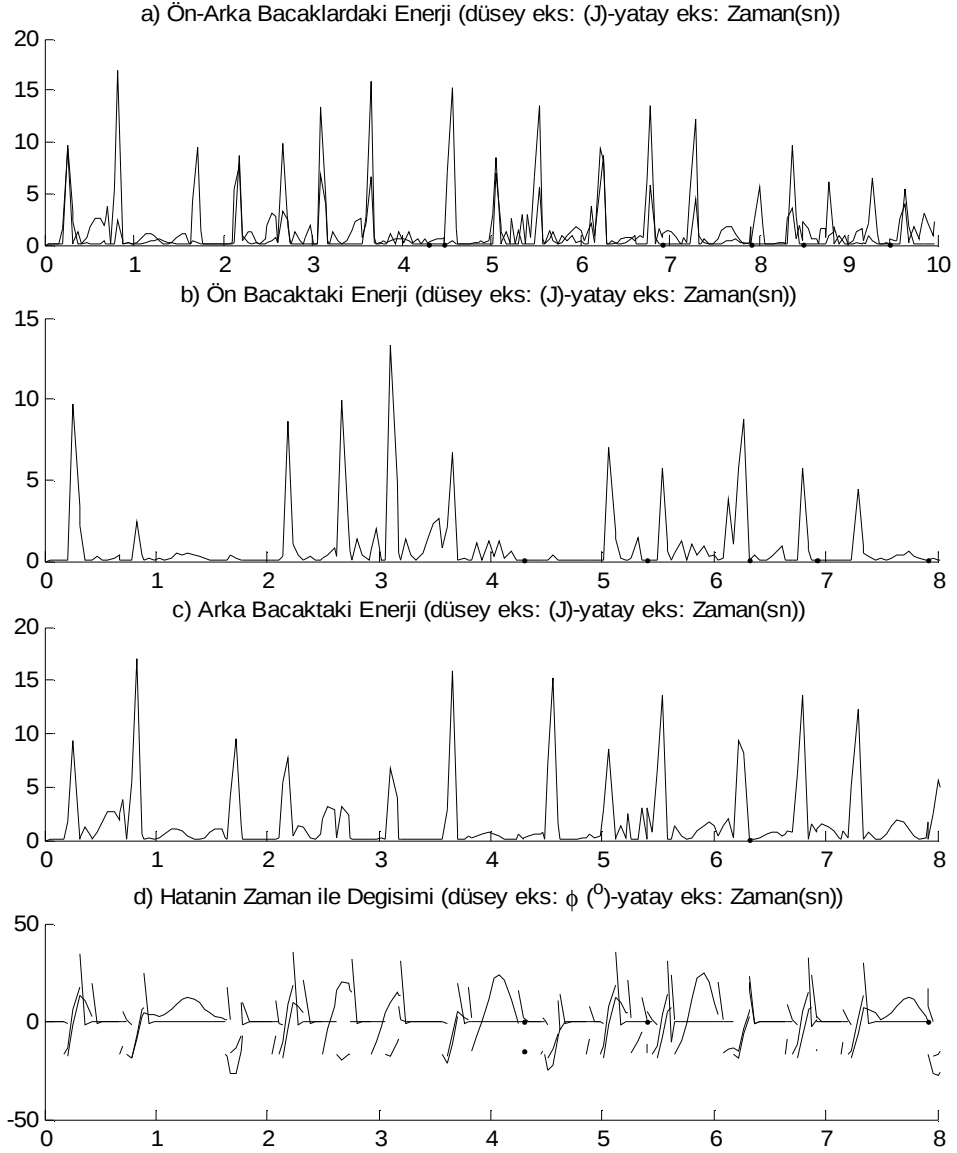
Şekil 14.5 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{arka}}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m).



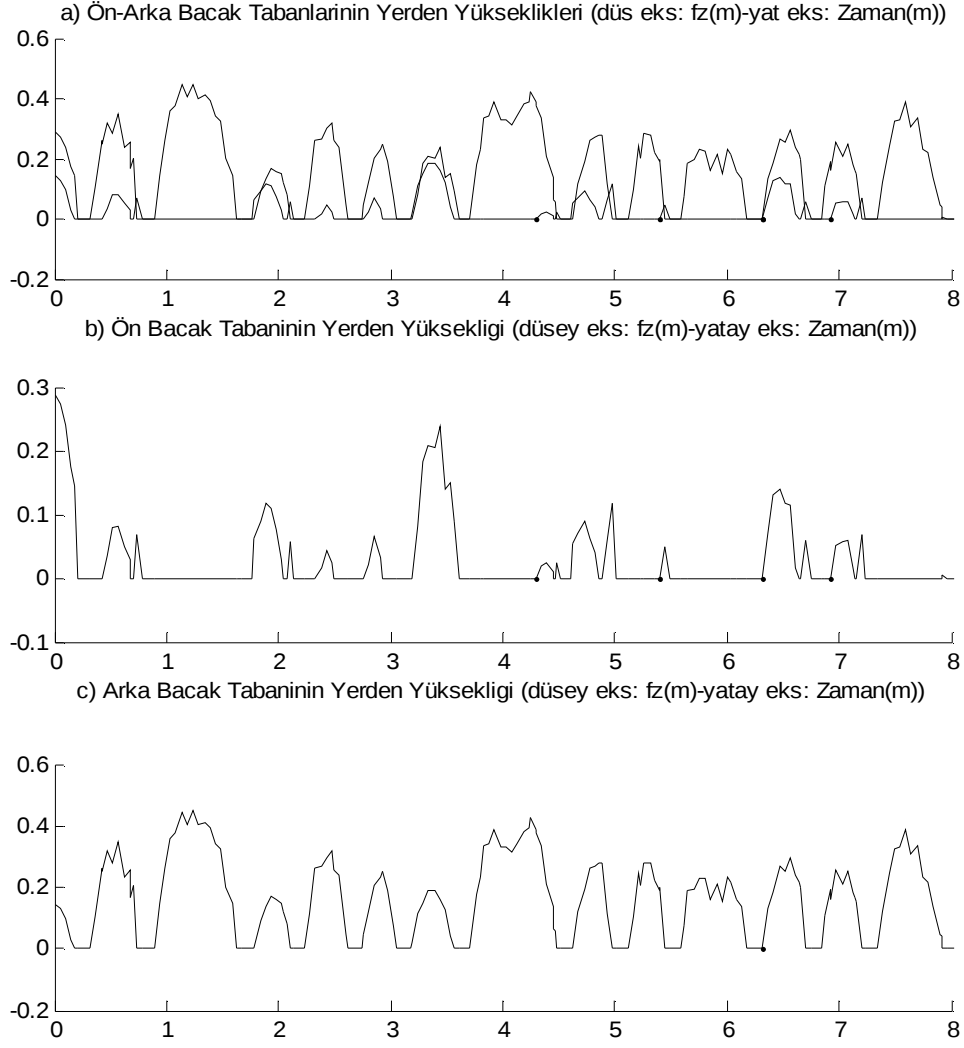
Şekil 14.6 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- b) Robotun ön-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- c) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$).
- d) Robotun arka sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$).



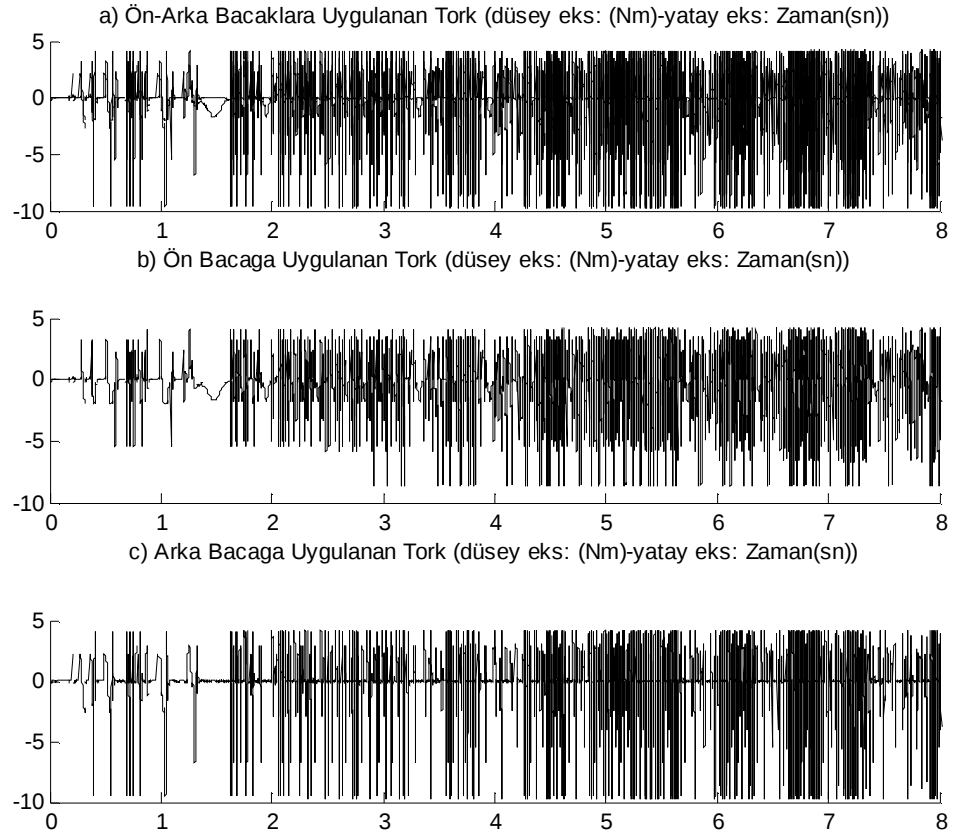
Şekil 14.7 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).
- b) Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).
- c) Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).
- d) Hatanın zaman ile değişimi (e).



Şekil 14.8 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- b) Robotun ön sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri $f_{z_ön}$ (m).
- c) Robotun arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_{z_arka} (m).



Şekil 14.9 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- c) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

Tablo 14.2 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen quadrupedal dört bacaklı robotun hareket performansları.

QUADRUPEDAL ROBOT				
4 bacaklı				
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ				
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)
50		8		2.5
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ				
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın harcadığı güç	Arka Bacağın harcadığı güç	Toplam harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)
3	1.4	55	54	109
5	2.9	99	90	189
6	3.6	133	106	239
8	5.2	170	160	330

14.3.2. Sonuç

Bu bölümde SLIP ile modellenen dört bacaklı quadrupedal robotun zıplayarak yürüyüşünün denetimi için Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim uygulanmış olup ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Sistem cevaplarına, sayısal benzetim sonuçları ve grafiklerden bakıldığında; tasarlanan zıplayarak yürüme modelinin literatürde [1, 2, 95, 96, 99] yapılan çalışmalar gibi başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu gibi zıplama işlevlerinde bacaklardaki eyleyicilerin uyguladıkları tork değerleri genelde sınırlıdır. Bu yüzden sayısal benzetim modelinde bacaklara ait eyleyicilerin tork değerleri sınırlandırılmıştır. Bu sınır değerler piyasada kolaylıkla bulabileceğimiz 10Nm ve 15Nm aralığında ki mevcut olan eyleyicilerdir. Denetim algoritmasında tork değerleri $\pm 10\text{Nm}$ ile sınırlandırılmasına rağmen Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritması ile denetlenen sistem uçuş evresinde $\pm 4\text{Nm}$ tork ile yer-duruş evresinde ise $\pm 9\text{Nm}$ tork değerleri istikrarlı bir denetim sağlanmıştır. Grafiklerden de görüldüğü gibi sistem bu tork değerleri ile başarılı olarak zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirmiştir. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyici algoritması ile sistemin denetiminde ki çıkış tork değerlerinin PD denetim algoritması ve Bulanık Mantık denetim algoritmasında ki çıkış tork değerlerinden daha küçük sınırlar arasında değerler aldığı görülmektedir. Bu denetim algoritmasında istenilen bir performanstır. Bu aralık PD denetim algoritmasında $\pm 12\text{Nm}$ ve Bulanık Mantık denetleyici algoritmasında $\pm 10\text{Nm}$ iken, Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritması ile denetlenen sistemin uçuş evresinde $\pm 4\text{Nm}$ tork ile yer-duruş evresinde ise $\pm 8\text{Nm}$ sınırları aralığındadır. Bu sonuç sistem performansını etkileyen önemli bir faktördür. Bu denetim algoritmasının diğer denetim algoritmalarına göre avantaj ve dezavantajları daha ayrıntılı olarak Bölüm.16'da sonuç kısmında verilmiştir.

Dört bacaklı quadrupedal robotun verilen başlangıç değeri için sistem cevapları bölüm sonunda bir tablo şeklinde oluşturulmuştur. Bu tabloda, sistem cevabında hangi başlangıç değeri için sayısal benzetim oluşturulduğu, robotun belirli periyodik sürelerde ne kadar yol aldığı ve alınan yola karşılık eyleyicilerin harcadığı enerji miktarı verilmiştir. Sonuçta, oluşturulan bu tablolar aynı sistemin farklı denetim algoritmaları ile elde edilecek sayısal benzetim sonuçlarına göre daha kolay şekilde kıyaslanmasına yardımcı olacaktır.

Dört bacaklı quadrupedal robot denklem 9.1' de belirtilen değişkenleri için sayısal benzetim sonuçları elde edilmiştir. Bu değişkenlerden en önemlisi robot gövdesinin ağırlık

merkezinin yer seviyesinden belli bir yükseklikte bırakıldığı b_z değeridir. Bu değişken sistemin dinamiğini en fazla etkileyen değerdir. Çünkü robotun sahip olduğu dinamik yapı belirli limit değerleri arasında olmak zorundadır. Modellenen dört bacaklı quadrupedal robotun bu değere bağlı olarak uygun dinamik aralığı literatürdeki çalışmalarda kullanılan aralıklarda başarılı sonuçlar vermiştir [1, 96, 139, 196].

Ayrıca robot değişkenlerinden diğer önemli bir değişken robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısıdır($^\circ$). α salınım açısı sistemin kararlılığı hakkında bize bilgi veren en önemli değişkendir. Literatür çalışmalarında da görüldüğü gibi zıplayarak yürümeye robotun ana gövdesinin hep düzlemsel ortamda harmonik bir yörüngeyi takip etmesi istenir [1, 96, 99, 132]. Sistemde bu harmonik yörünge gövde salınım açısı α ile temsil edilmiştir. Bu çalışmada da bu parametre göz önüne alınarak sistem denetlenmeye çalışılmıştır. Bu yüzden ana gövdenin salınım denetimi, sistemde bacakların denetlenmesi ile sağlanmıştır. Literatürde ki çalışmalarda da görüldüğü gibi α salınım açısının zıplayarak yürüme işlevi sürecinde ki değeri $\pm 20^\circ$ sınırları arasında olması istenen bir durumdur [1, 96, 99, 132, 139, 196]. Bu çalışmada da grafikte görüldüğü gibi dört bacaklı quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlevi esnasında α salınım açısının $\pm 20^\circ$ sınırları aralığında harmonik bir yörüngeyi takip ettiği görülmüştür.

Robot değişkenlerinden diğer bir önemli değişken ise robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{B}_y$ ' dir(m/sn). Bu değişkende sistem dinamiğini etkileyen önemli bir parametredir. Genelde modellenen robot yer seviyesinden belli bir yükseklikte belli bir ilk hız ile fırlatılarak zıplayarak yürümesi istenir. Bu ilk hız başlangıçta olması gereken bir olaydır. Eğer belli bir hız ile fırlatılmasa ($\dot{B}_y=0$) robotun aynı düşey ekseninde zıpladığı görülmektedir. Sayısal benzetim sonuçları ve grafikler, modellenen dört bacaklı quadrupedal robot $\dot{B}_y$ ' nin literatürdeki çalışmalarda kullanılan değerde başarılı sonuçlar verdiği sayısal benzetim sonuçlarında görülmüştür [1, 96, 139, 196].

Bu bölümdeki çalışmada en önemli sonuç sistemin yapay zeka metodu olan Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetleyicisi ile dört bacaklı robotun oldukça başarılı olarak denetlenmesidir. Bu çalışma yazarın bilgisi dahilinde dört bacaklı quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlevinin gerçekleştirilmesinde, literatür çalışmalarında bir ilktir. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetleyicisi ile denetlenen dört bacaklı quadrupedal robotun sayısal benzetim sonuçlarının, literatürde ki çalışmalara nazaran çok daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Ağ

Tabanlı Bulanık Mantık denetleyicisi ile denetlenen sisteme ait sayısal benzetim sonuçları bölüm sonunda bir tablo halinde verilmiştir. Bu sonuçlardan Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetleyicisi ile denetlenen sisteme ait sayısal benzetim sonuçlarının, PD denetleyici algoritması ve Bulanık Mantık denetleyici algoritması ile denetlenen sisteme ait sayısal benzetim sonuçlarına göre performans olarak avantaj ve dezavantaj bakımından son bölümde irdelenmiştir. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetleyici algoritması ile denetlenen dört bacaklı quadrupedal robotun, PD denetleyicisine nazaran daha az bir enerji tüketimi ile daha fazla yol aldığı görülmüştür. Bu performans robotik teknolojisinde bilim adamlarınca üzerinde durulan en önemli unsurlardan birisidir. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetleyicisi algoritmasının diğer denetim algoritmalarına göre sistem üzerindeki avantaj ve dezavantajları son bölümde oluşturulan bir tablo ile daha ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Ayrıca bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak yapılan bir yenilik, dört bacaklı quadrupedal robot Şekil 9.4 ve Şekil 9.5’ de görüldüğü gibi sadece iki evrede(uçuş evresi ve ye-duruş evresi) iki adet denetim algoritması ile başarılı bir şekilde denetlenmiş olmasıdır. Oysaki Poulakakis ve arkadaşları aynı sistemin denetimini üç evrede (uçuş evresi, ileri itme evresi ve yer-duruş evresi) üç denetim algoritması ile gerçekleştirmişlerdir [1, 96, 139, 196]. Bu çalışmada modellenen zıplayarak yürümenin evreleri esnasında yapılan denetim eylem sayısı, yazarın literatür bilgisi dahilinde quadrupedal robot için daha önceden yapılan çalışmalardaki denetim eylem sayısından daha azdır. Sonuç olarak, bu çalışmada yapılan yenilik sistemin hem denetimini oldukça kolaylaştırmış olup hem de az sayıda ki denetim algoritması ile literatürde yapılan çalışmalardan daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür [1, 96, 139, 196].

15. HEXAPOD ROBOT ZIPLAMA MODELİNİN AĞ TABANLI BULANIK MANTIK DENETİM ALGORİTMASI İLE DENETİMİ VE SAYISAL BENZETİMİ

15.1. Sistemin Morfolojisi ve Genel Kavramı

Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritması ile denetlenen altı bacaklı hexapod robot sisteminin modellenmesi, denetimi ve sayısal benzetimi MATLAB paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zıplayarak dengeli dinamik yürüme işlemi MATLAB paket programında bir ana programdan ve beş alt program olmak üzere toplam altı adet m-file' dan oluşmaktadır. Ana programı run_simulation-hexapod ismi temsil ederken alt programları sırasıyla Slip_Events, To_Radial, Slip_Vf, Flight_Control ve Stance_Control isimleri ile temsil edilmektedir. Bu ana program ve alt programlar Şekil 12.1' de de görüldüğü gibi sürekli eş zamanlı olarak birbirleri ile veri alış verişinde bulunarak ilişkili çalışmaktadırlar. Ana programda sisteme ait başlangıç değerleri, robot parametreleri ve sayısal benzetime ait grafik komutları mevcuttur. Slip_Events alt programı içerisinde robotun evre ve durumlarını belirleyerek dinamik döngüyü oluşturur. Slip_Vf alt programı içerisinde ise sistemin dinamik denklemleri mevcuttur. To_Radial alt programında sisteme ait kinematik denklemler çözülmektedir. Flight_Control ve Stance_Control alt programlarında da denetim algoritmaları oluşturulmuştur.

15.2. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim Algoritma Tasarımı

Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim algoritmasının çıkış sinyalleri; altı bacaklı hexapod robotun kalça kısmında bulunan eyleyicilerin, Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritması ile ürettiği uygun tork değerleridir. Burada sistem bilindiği gibi iki farklı kapalı dinamik döngüden oluşmaktadır. Zıplayarak yürüme işlemleri ardışık kapalı bir döngü içerisinde farklı dinamik yapılardan oluşur. Hexapod robot iki evrede ayrı ayrı denetlenerek zıplayarak dengeli dinamik yürüme eylemini gerçekleştirmektedir. Bu denetim evreleri Şekil 15.2' de görülmektedir. Birinci evre olan uçuş evresinde ön-orta ve arka sanal bacakların yere dokunma açıları (f^{td}), ikinci evre olan yer-duruş evresinde ise ön-orta ve arka sanal bacakların süpürme açıları (f^{swl}) istenilen değerde olabilmeleri için Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritması ile uygun çıkış sinyali olarak tork elde edilerek sistem denetlenmektedir. Denetim algoritmasında sistemin girişlerini e (hata) ve $\dot{e}$ (hatanın değişimi) değerleri oluşturmaktadır. Burada hata, sistemin uçuş ve yer-duruş evrelerinde ön-orta ve arka sanal bacakların gövdeye

göre anlık ölçülen açı değerleri ile ön-orta ve arka sanal bacaklar için istenilen açı değerleri arasındaki farktır. Sistemin çıkışlarını ise hata ve hatanın zamana göre anlık değişim değerlerini minimize edecek şekilde ön-orta ve arka sanal bacakları tahrik eden eyleyicilere uygulanan uygun tork değerleridir. Sisteme ait giriş ve çıkış değerleri Şekil 15.1 ve Şekil 15.3’ de görülmektedir.

Burada Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim’ de Sugeno metodu kullanılmıştır. Her bir sanal bacak için, Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim iki giriş ve bir çıkıştan oluşan bir sistemdir. Sonuçta ön-orta ve arka sanal bacaklar için ayrı ayrı olmak üzere toplam üç adet Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyicisi tasarlanmıştır. Bu yüzden hexapod robotun zıplayarak dengeli dinamik yürüyüş denetim algoritmasının tamamında toplam altı adet giriş ve üç adet çıkıştan ibarettir.

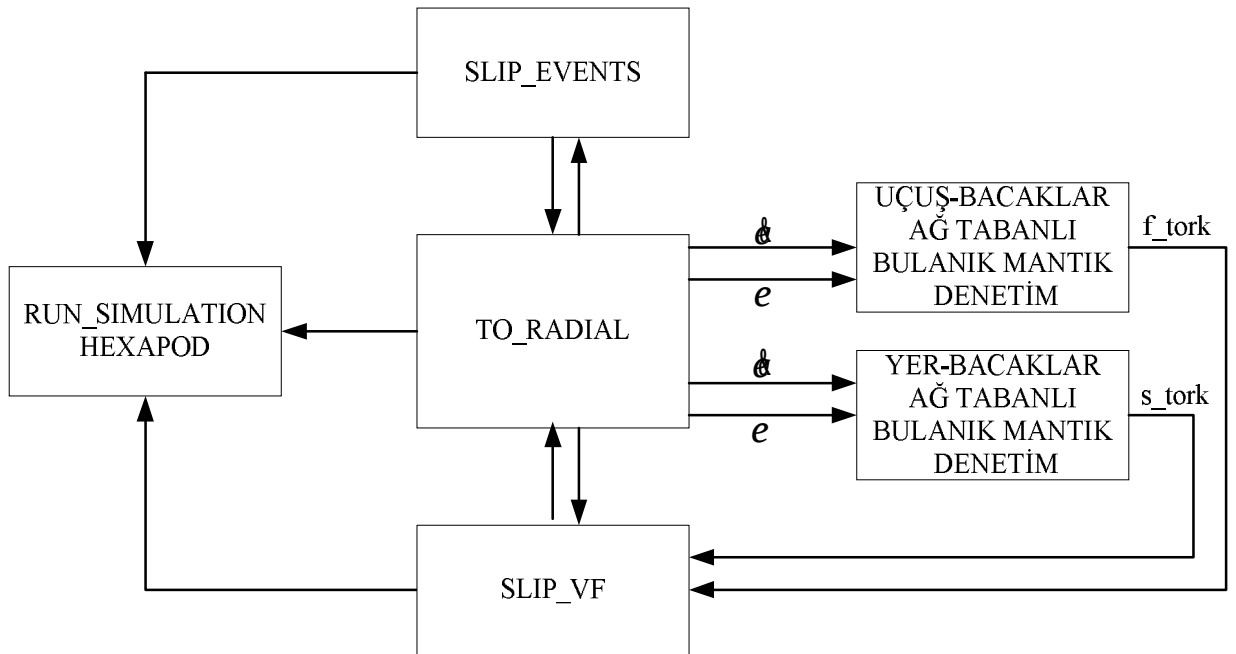
Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim Algoritmasının, Bulanık Mantık Denetim Algoritmasından farkı kuralların ve üyelik fonksiyon taban değerlerinin kullanıcı uzman kişiler tarafından belirlenmemesidir. Bu Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritmasının, Bulanık Mantık denetim algoritmasına göre avantajları aşağıda ki paragraflarda sırasıyla anlatılmıştır.

Bu bölümde ön-orta ve arka sanal bacakların tümü için de aynı sayıda 25 kural kullanılmıştır. Bilindiği gibi Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim (ANFIS) algoritmasında kurallar ANFIS araç kutusu alt program yazılımı ile belirlenmektedir. Yani kurallar Bulanık Mantık denetleyicide olduğu gibi uzman kişiler tarafından belirlenmemektedir. Bu da sistemin denetimi için kuralların uzman kişilerce belirlenmesine ihtiyaç kalmadan, denetimi oldukça basitleştirilerek kolaylık sağlamıştır. Kullanıcı tarafından denetleyici için sadece kural sayısının âdetinin belirlemesi yeterlidir. Kural sayısını Tablo 15.1’ de gösterilmiştir.

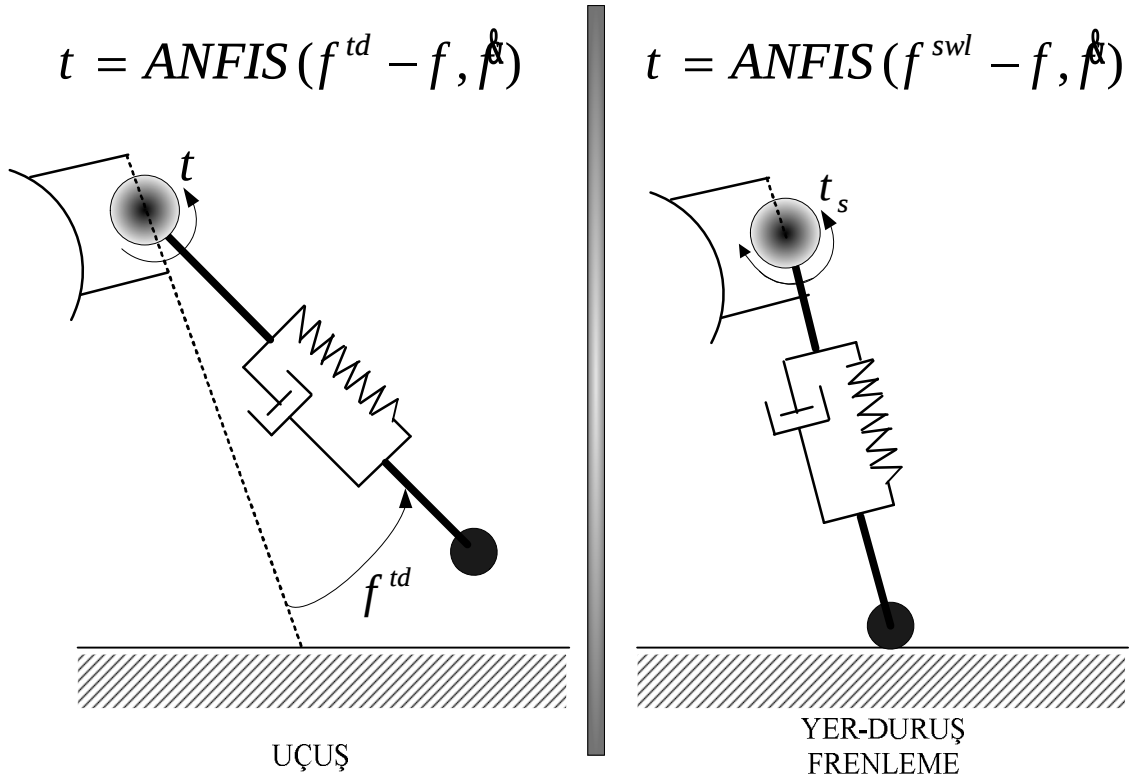
Ayrıca ANFIS denetim algoritmasının diğer bir avantajı üyelik fonksiyonlarının taban değer aralıklarının yine kullanıcı kişiler tarafından belirlenmemesidir. ANFIS denetim algoritmasında sadece üyelik fonksiyon tipleri kullanıcı tarafından seçilmektedir. Burada üyelik fonksiyonlarının taban değer aralıkları yine ANFIS araç kutusu alt program yazılımı ile belirlenmektedir. Bu özellik sistemin denetim sürecinde oldukça zaman kazandırmış ve denetimin performansını arttırmıştır.

Altı bacaklı hexapod robot sisteminin ANFIS ile denetiminde giriş değerleri hata(e) için triangular tip üyelik fonksiyon, hata değişimi($\dot{e}$) için triangular tip üyelik fonksiyonu ve çıkış değeri tork(t) için değerleri için trapezoidal tip üyelik fonksiyonları kullanılmıştır.

Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritması hata (e) ve hata değişimine($\dot{e}$) minimize ederek, sanal bacaklar için gerekli olan tork değerlerini ($t_{ön_bacak}$, t_{orta_bacak} , t_{arka_bacak}) çıkış sinyali olarak üretirler.



Şekil 15.1 Tasarlanan Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim Algoritmasına Ait Blok Diyagram



Şekil 15.2 Zıplayarak Yürüme Evreleri Sırasında Kontrol Algoritması (Denetim iki eylemden ibarettir.)

Tablo 15.1. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyicisinde kullanılan (5x5=25) kural sayısı

		ϕ				
	t	K1	K2	K3	K4	K5
e	K1	K1	K1	K1	K2	K3
	K2	K1	K1	K2	K3	K4
	K3	K1	K2	K3	K4	PB
	K4	K2	K3	K4	K5	K5
	K5	K3	K4	K5	K5	K5

Üyelik fonksiyonları 0 ve 1 arasında bir üyelik derecesine sahip olan, sistemin giriş ve çıkışlarının her bir noktada nasıl tanımlandığını gösteren eğrilerdir. Burada sistem girişini

oluşturan hata (e) ve hata değişimi ($\dot{e}$) için triangular tip üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. e ve $\dot{e}$ giriş değerleri için kullanılan üyelik fonksiyonlarının fiziksel olarak tanım kümesi yani üyelik fonksiyonlarının taban değerleri ANFIS araç kutusunda ki ağ tabanlı yazılım ile belirlenmektedir. Sistemin çıkış değeri t için üyelik fonksiyonu olarak trapezoidal tip eğrileri kullanılmıştır. Ayrıca, sistem çıkışı t için kullanılan fiziksel kümede yine ANFIS araç kutusunda ki ağ tabanlı yazılım ile belirlenmektedir.

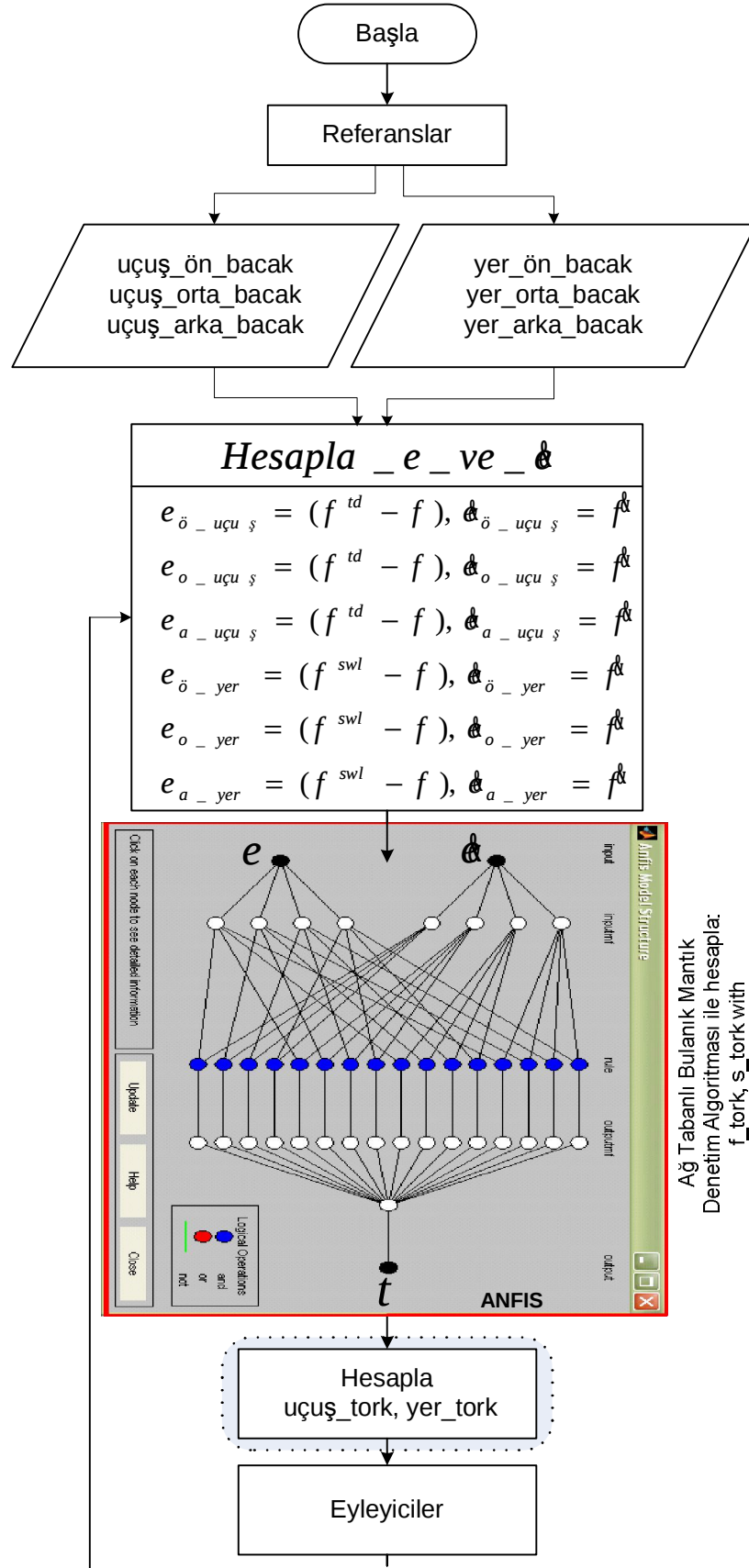
Ağ tabanlı Bulanık Mantık denetleyicisinin giriş (e ve $\dot{e}$) ve çıkış (t) değişkenleri için bir kural tablosu tasarlanmıştır; her bir giriş değeri için 5' er kural sayısı belirlenerek toplam iki girişe ait 25 kural mevcuttur. Kurallar ANFIS denetim modelinde belirlenmektedir.

$e, (\dot{e}), t = \{\text{hata, hata değişimi, denetim değişkeni} \{5 \text{ kural} \times 5 \text{ kural}\} \text{ kümesinden ibarettir.}$

Ağ tabanlı Bulanık Mantık denetleyici tasarımında performansı belirleyen en önemli belirleyici faktörler denetim için seçilen hata tolerans değeri ile denetim iterasyon değerleridir. Bu değerler ANFIS araç kutusunda kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Hata toleransı denetimin minimum hata ile hassasiyetini etkilerken iterasyon sayısı da denetim döngüsünü belirtmektedir. Bu değer seçilirken dikkat edilecek husus sistemin sürekli rejim cevap süreci ile uygun olabilmesidir. Aksi takdirde sistem cevabı ya tam stabil olmadan sonlanacaktır ya da sistem cevabı stabil olmasına rağmen uzun bir süre algoritma çalışır halde olarak sistem performansını etkileyebilecektir.

Ağ tabanlı Bulanık Mantık denetleyici tasarımında eğitim ve test veri dataları olarak PD denetim algoritmasından elde edilen datalar ANFIS modelinde kullanılmıştır. Bu dataların kullanıldığı adım Şekil 13.5 ve Şekil 13.10' da gösterilmiştir.

Altı bacaklı zıplayarak yürüyen hexapod robot modeline sahip sistemin belirli başlangıç değerleri ile sayısal benzetim sonuçları ve grafikleri Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritması uygulanarak elde edilmiştir. Bu sayısal benzetim sonuçları ve grafikler irdelenerek diğer denetim algoritmalarına göre oluşan avantaj ve dezavantajları sonuç kısmında belirtilmiştir.



Şekil 15.3 Dizayn edilen sistem için Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim Akış Diyagramı

15.3. Hexapod Robotun Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetim İle Sayısal Benzetimi

15.3.1. Sayısal Benzetim ve Elde Edilen Grafikler

Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki düzlemsel z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi, robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$), robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m), robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu faz eğri çizimleri, robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m), robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn), robotun ön-orta-arka bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{\text{ön}} - I_{\text{orta}} - I_{\text{arka}}$ (m), robotun ön bacağına zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{\text{ön}}$ (m), robotun orta bacağına zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m), robotun arka bacağına zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m), robotun ön-orta-arka bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$), robotun ön bacağına gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ ($^{\circ}$), robotun orta bacağına gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{orta} ($^{\circ}$), robotun arka bacağına gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu f_{arka} ($^{\circ}$), robotun ön-orta-arka bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J), robotun ön bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{\text{ön}}$ (J), robotun orta bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J), robotun arka bacağına zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J), hatanın zaman ile değişimi (e), robotun ön-orta-arka bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m), robotun ön-orta-arka bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm), robotun ön bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{\text{ön}}$ (Nm), robotun orta bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm) ve robotun arka bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm) gibi önemli sayısal benzetim sonuçları farklı başlangıç değerlerine göre her bir grafikte gösterilmiştir.

Sayısal benzetim grafikleri hexapod robotun iki boyutlu ortamda sahip olduğu başlangıç değerlerine ait gövde ve sanal bacakların duruş pozisyonunu gösteren katı modeli görünmektedir. Ayrıca bu kısımda hexapod robotun her bir adımdaki zıplayarak yürüme işleminde, gövdenin ve sanal bacakların z-y eksenlerine göre konumları görülmektedir.

Gövde salınım grafikleri hexapod robotun gövdesinin ağırlık merkezinin z-y eksenlerine göre salınımını göstermektedir. Bu salınım derecesi($^{\circ}$) olarak α ile temsil edilmektedir. Bu salınım aslında fiziksel olarak bir harmonik yapıya sahiptir. Buda robotun zıplayarak yürüme işleminde istenen bir durumdur [2, 96, 99].

Robot gövdesinin ağırlık merkezinin z dikey eksene göre zamana bağlı olarak aldığı yükseklik değerleri b_z ile temsil edilmektedir. b_z değerlerinin takip ettiği yörünge fiziksel olarak bir harmonik yapıya sahip olması gerekmektedir [2, 96, 99].

Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulur. Faz çizimleri bize sistemin kararlılığı hakkında bilgi vermektedir. Yani robotun zıplayarak yürüme işlemi esnasında devrilip devrilmediği ya da dengeli bir yürümenin olup olmadığı hakkında bilgi vermektedir.

Grafiklerde hexapod robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, sanal bacaklara ait boylarının anlık değişimleri gösterilmektedir. Bacak boylarındaki anlık değişim r ile temsil edilmektedir. Sanal bacakların boyları sadece bacaklar yere temas ettikten sonra değişmektedir. Bacaklar yer ile temas halinde iken robotun kütesinden dolayı, yay özelliğinde olan bacaklar önce kasılarak sıkışır, daha sonra da ilk boyuna gelinceye kadar açılarak zıplama işlemini gerçekleştirirler. Bacaklar yerden temasını kestiklerinde boyları sabittir. Sadece çok küçük oranda m_t ' den dolayı bir titreşim oluşmaktadır. Bu da sisteme rahatsız edici bir etken oluşturmamaktadır [95, 96, 99].

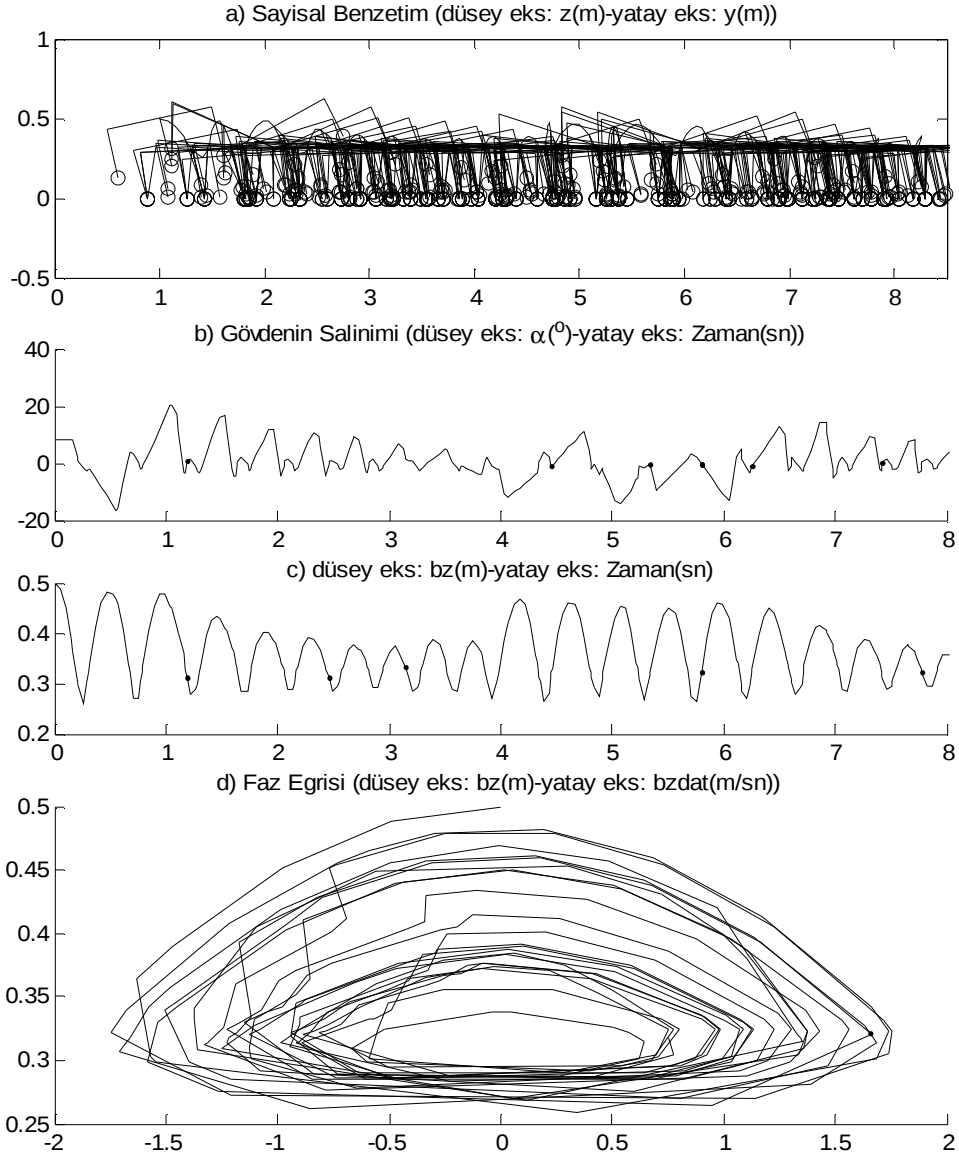
Ayrıca grafiklerde hexapod robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, sanal bacakların uçlarındaki ayakların yerden yükseklikleri gösterilmektedir. Bacakların yerden yükseklikleri f_z ile temsil edilmektedir. Sanal bacaklar yer ile temas halinde iken bu değer sıfırdır.

Aynı zamanda hexapod robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, sanal bacakların gövdeye göre açılma konumlarını($^{\circ}$) gösterilmektedir. Bacakların gövdeye göre açılma konumları,

robot hem yerde iken hem de havada iken ardışık gerçekleşen iki kapalı döngü içerisinde denetimleri gerçekleştirilmektedir. Bacakların gövdeye göre açısal konumları f ile temsil edilmektedir. Hexapod robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, ön-orta-arka sanal bacakların istenilen açısal konumları elde etmek için robot hem havada iken uygulanan denetimde hem de yerde iken uygulanan denetim sonucunda açısal konumlara bağlı olarak oluşan hatayı göstermektedir. Ön-orta-arka sanal bacakların zıplayarak yürüme döngüsü içinde ki istenilen yere dokunma açısı(f^{td}) ve süpürme açısına(f^{swl}) bağlı olarak hata grafiği elde edilmiştir.

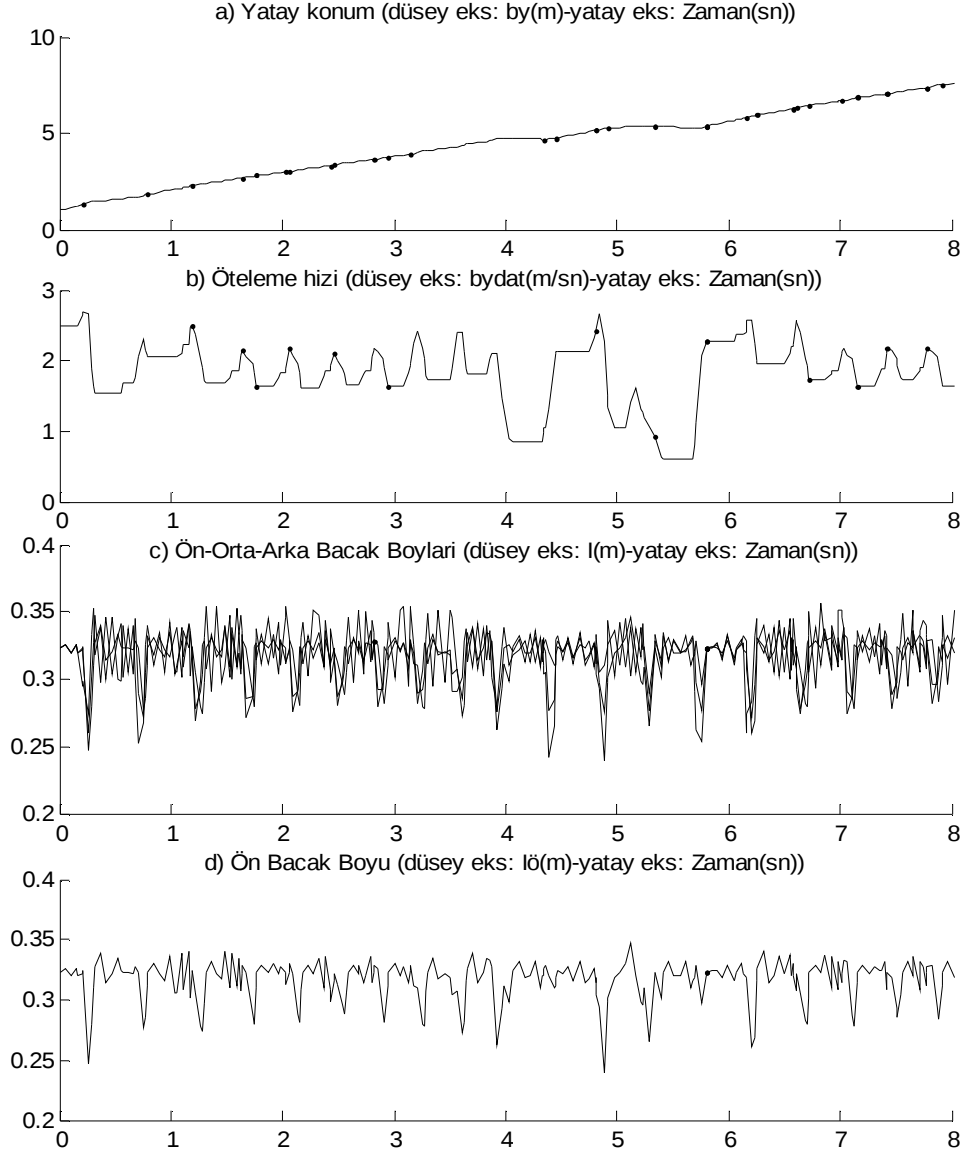
En son işlem olarak hexapod robotun zıplayarak yürüme işlemi sırasında, uygulanan denetim algoritmasında istenilen açıları elde etmek için çıkış sinyali olarak ön-orta-arka sanal bacaklara Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetimi ile uygulanan denetim çıkış sinyali tork değerleri grafiksel olarak verilmiştir.

Bu bölümde robotun başlangıç değerlerine bağlı olarak, zıplayarak yürüme işlemi sırasında gerçekleşen tüm fiziksel olayların sayısal benzetim sonuçları grafiklerde gösterilmeye çalışılmıştır. Bu sayısal sonuçlara bağlı olarak robotun belirli zaman dilimleri arasında aldığı yol(m) ve alınan bu yol esnasında robotun her bir bacağına tahrik eden motorların harcadığı güç(watt) hesaplanarak tablo şeklinde verilmiştir. Ayrıca son kısımda oluşturulan tabloda, zıplamaya ait başlangıç değerleri verilmiştir.



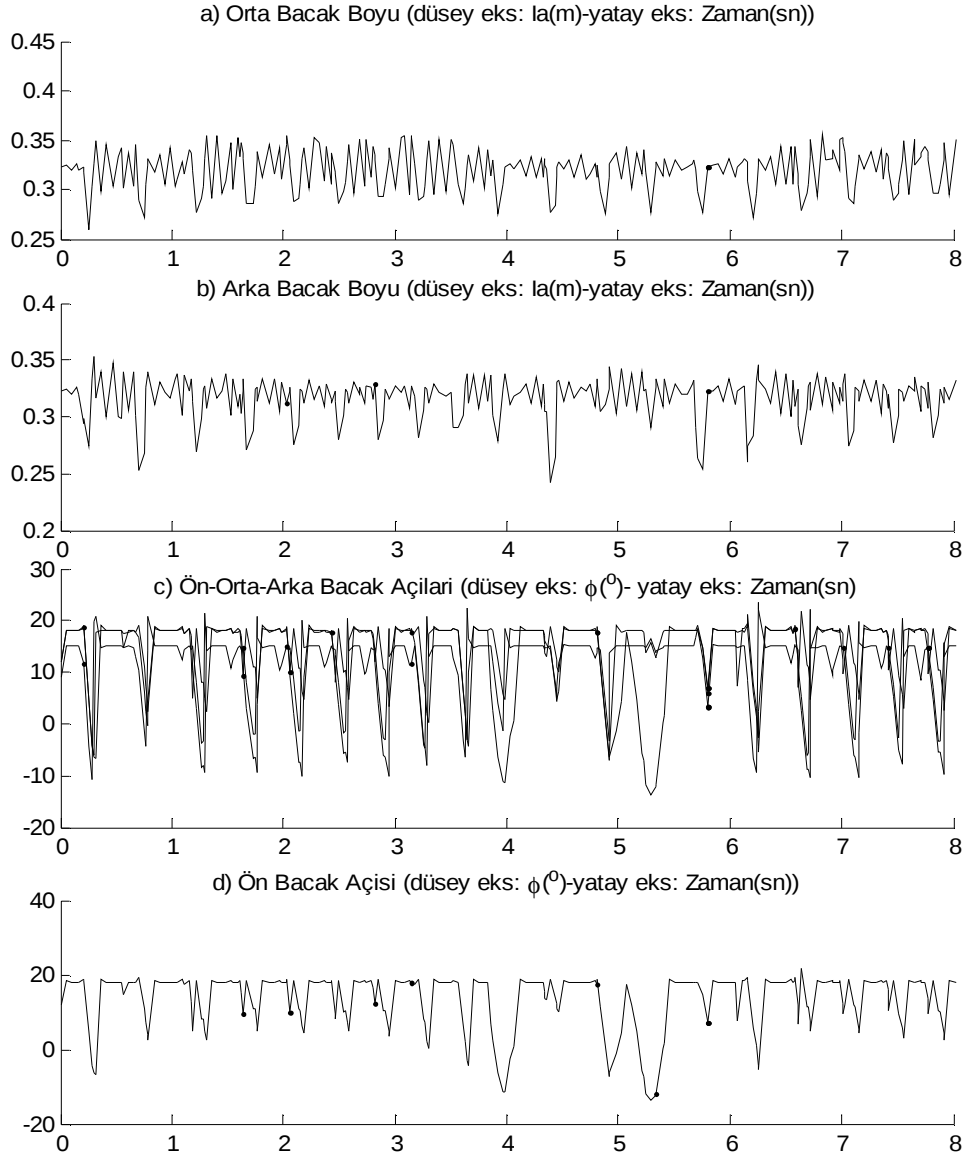
Şekil 15.4 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesi ve bacakların düzlemsel z-y eksenlerine göre sayısal benzetimi.
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısı($^{\circ}$).
- c) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin dikey z eksenine göre zamana bağlı olarak elde edilen b_z yükseklik değeri(m).
- d) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin oluşturduğu Faz Eğri çizimleri; Faz çizimleri gövdenin yer düzlemine göre dikey z ekseninde ki yükseklik b_z (m) ve dikey z ekseninde ki hız $\dot{b}_z$ (m/sn) değerlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.



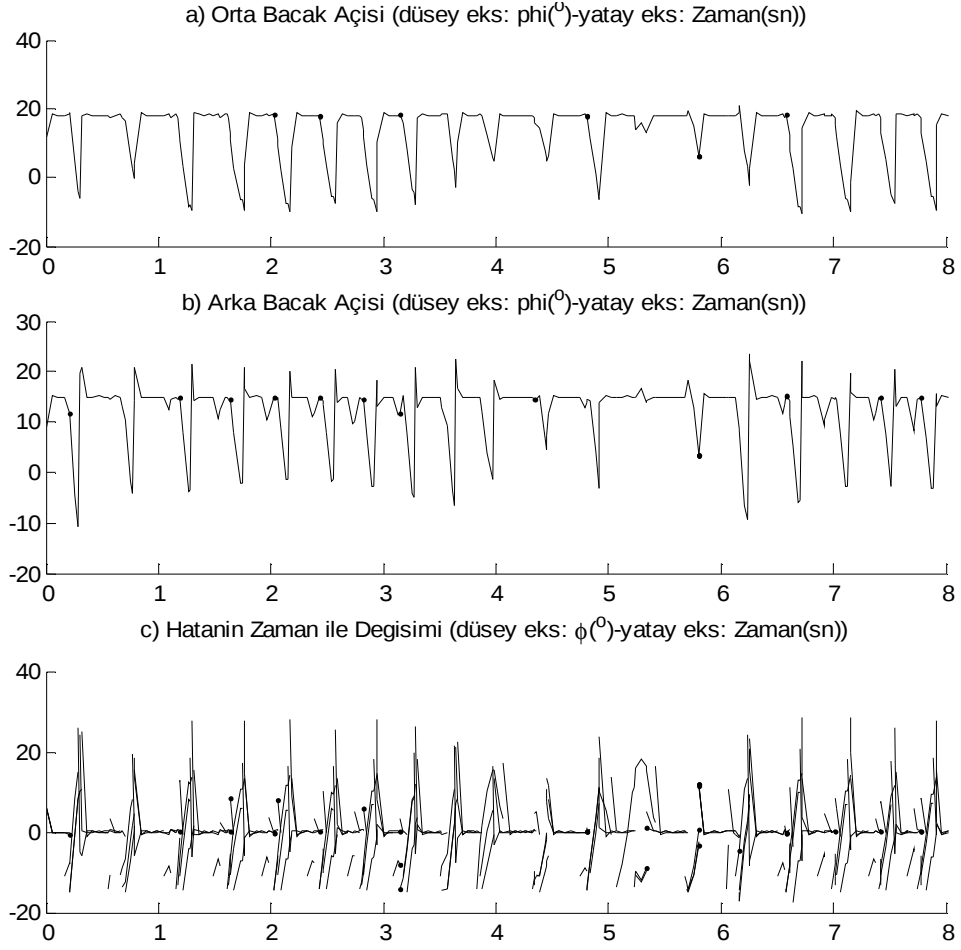
Şekil 15.5 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin yatayda zamana bağlı olarak aldığı deplasman b_y (m) .
- b) Robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{b}_y$ (m/sn).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak anlık boyları $I_{ön} - I_{arka}$ (m).
- d) Robotun ön sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu $I_{ön}$ (m).



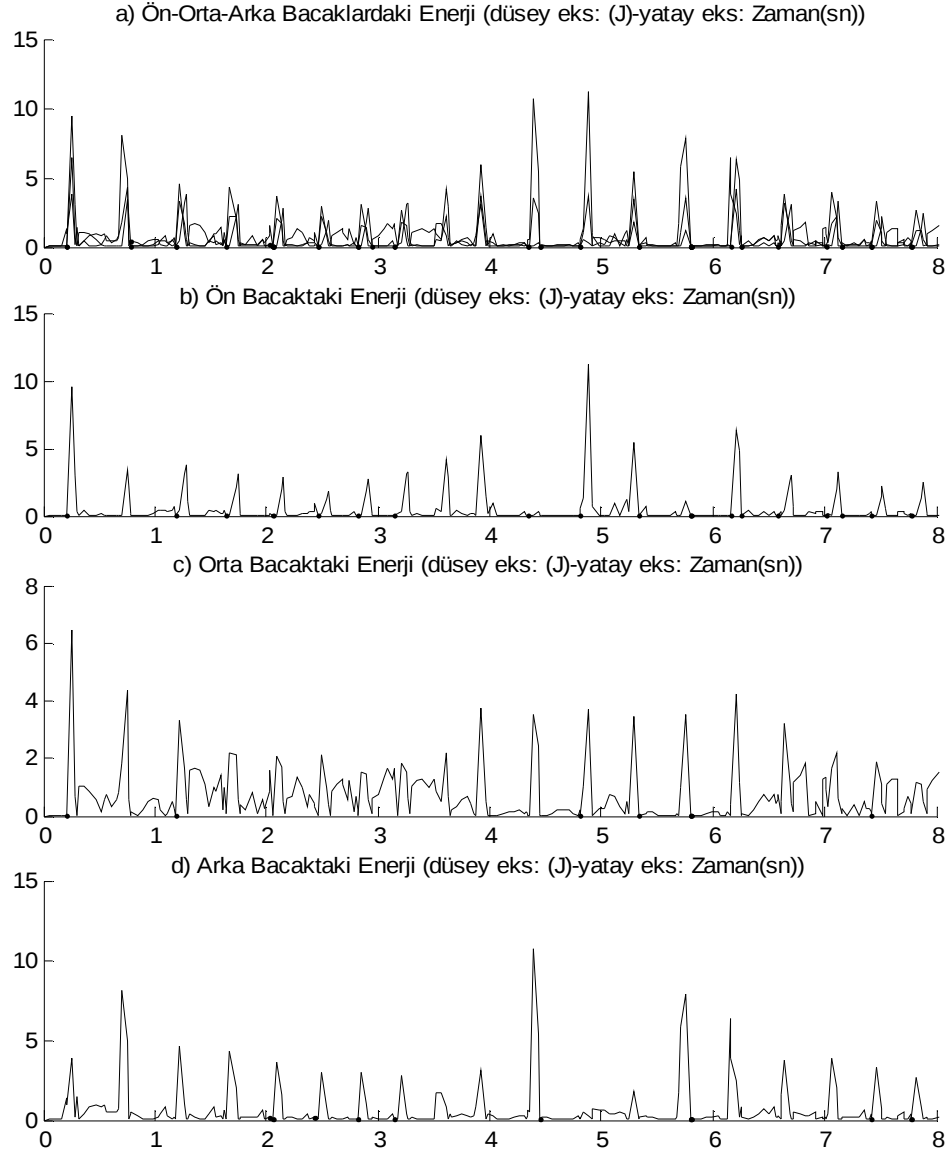
Şekil 15.6 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun orta sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{orta} (m).
- b) Robotun arka sanal bacağının zamana bağlı olarak anlık boyu I_{arka} (m).
- c) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f ($^{\circ}$).
- d) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{ön}$ ($^{\circ}$).



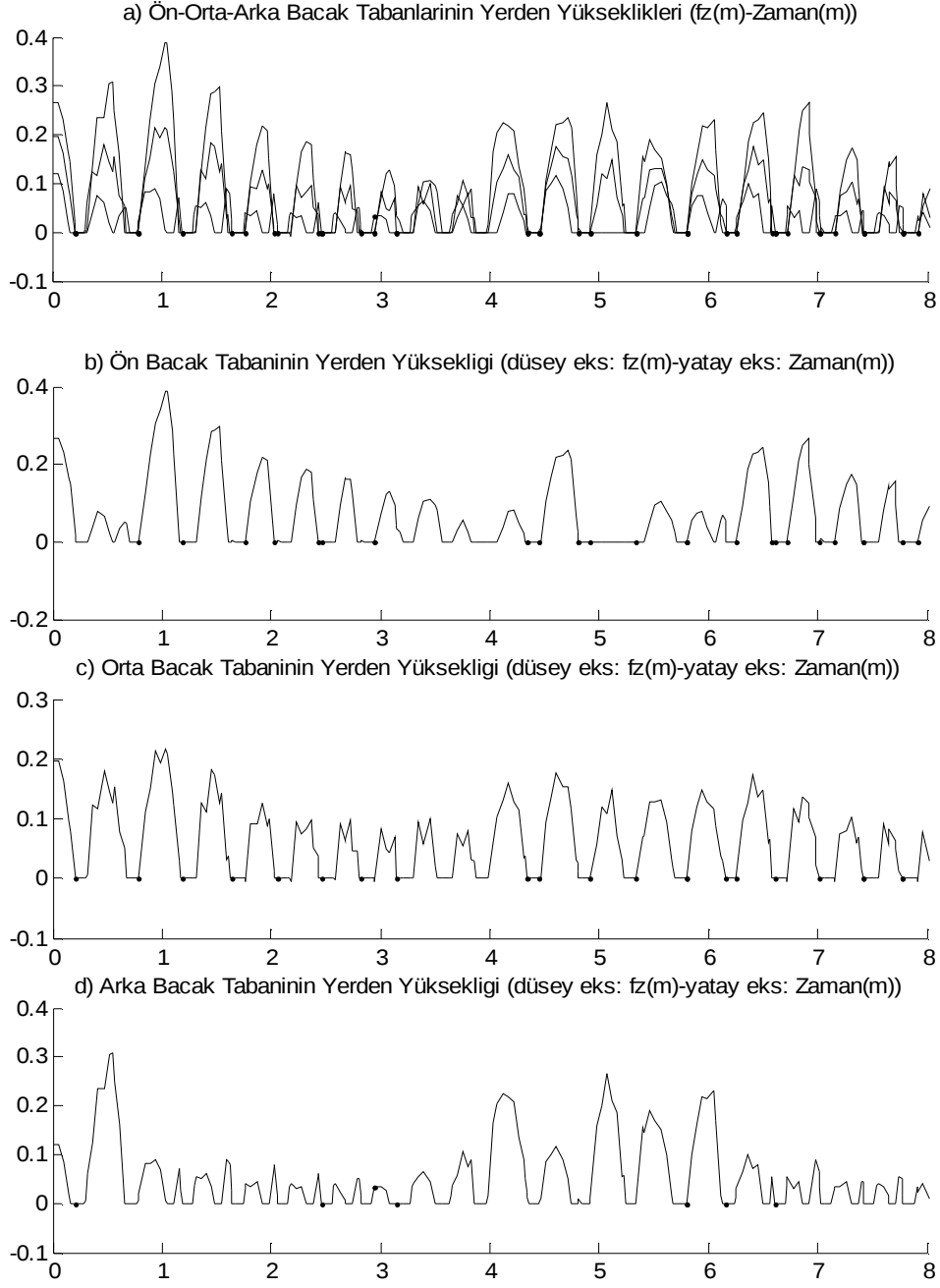
Şekil 15.7 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumları f (0).
- b) Robotun ön sanal bacağının gövdeye göre zamana bağlı olarak elde edilen açısal konumu $f_{\text{ön}}$ (0).
- c) Hatanın zaman ile değişimi (e).



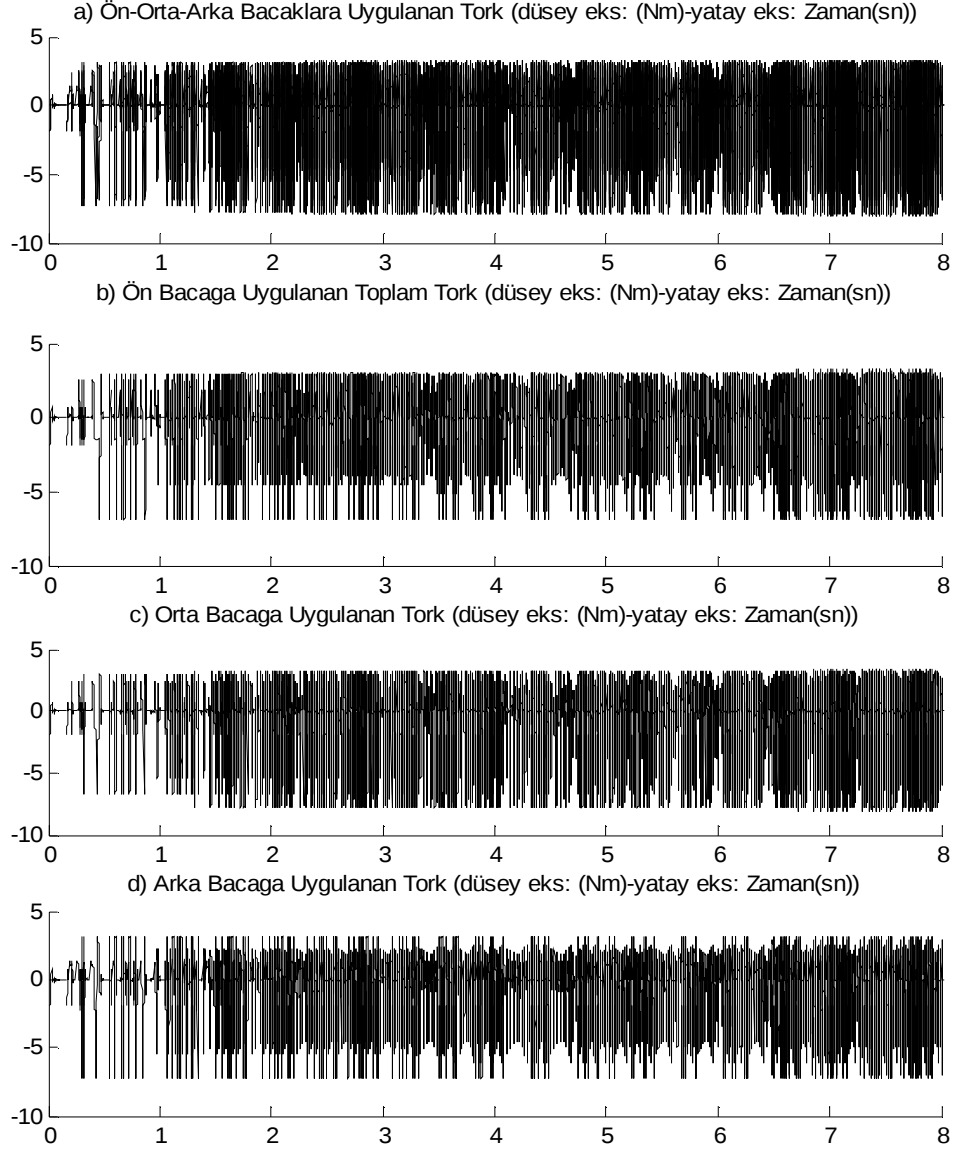
Şekil 15.8 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarları E_{top} (J).
- b) Robotun ön sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı $E_{ön}$ (J).
- c) Robotun orta sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{orta} (J).
- d) Robotun arka sanal bacağında zamana bağlı olarak oluşan toplam kinetik ve sönüm enerji miktarı E_{arka} (J).



Şekil 15.9 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_z (m).
- b) Robotun ön sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri $f_{z_ön}$ (m).
- c) Robotun orta sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_{z_orta} (m).
- d) Robotun arka sanal bacaklarının zamana bağlı olarak yerden yükseklikleri f_{z_arka} (m).



Şekil 15.10 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket esnasında ki;

- a) Robotun ön-orta-arka sanal bacaklarına zamana bağlı olarak uygulanan tork değerleri t_{top} (Nm).
- b) Robotun ön sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri $t_{ön}$ (Nm).
- c) Robotun orta sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{orta} (Nm).
- d) Robotun arka sanal bacağına zamana bağlı olarak uygulanan toplam tork değeri t_{arka} (Nm).

Tablo 15.2 Zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleşen hexapod altı bacaklı robotun hareket performansları.

HEXAPOD ROBOT					
6 bacaklı					
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ					
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı	
b_z (cm)		a (°)		db_y (m/sn)	
50		8		2.5	
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ					
Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın Harcadığı Güç	Orta Bacağın Harcadığı Güç	Arka Bacağın Harcadığı Güç	Toplam Harcanan Güç
t	b_y	$P_{ön}$	P_{orta}	P_{arka}	P_{top}
(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)	(watt)
3	2.2	62	117	63	241
5	4.4	90	165	101	356
6	5.4	100	170	104	374
8	7.7	105	199	107	410

15.3.2. Sonuç

Bu bölümde SLIP ile modellenen altı bacaklı hexapod robotun zıplayarak yürüyüşünün denetimi için Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim uygulanmış olup ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Sistem cevaplarına, sayısal benzetim sonuçları ve grafiklerden bakıldığında; tasarlanan zıplayarak yürüme modelinin literatürde [1, 2, 95, 96, 99] yapılan çalışmalar gibi başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu gibi zıplama işlevlerinde bacaklardaki eyleyicilerin uyguladıkları tork değerleri genelde sınırlıdır. Bu yüzden sayısal benzetim modelinde bacaklara ait eyleyicilerin tork değerleri sınırlandırılmıştır. Bu sınır değerler piyasada kolaylıkla bulabileceğimiz 10Nm ve 15Nm aralığında ki mevcut olan eyleyicilerdir. Denetim algoritmasında tork değerleri $\pm 10\text{Nm}$ ile sınırlandırılmasına rağmen Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritması ile denetlenen sistem uçuş evresinde $\pm 2\text{Nm}$ tork ile yer-duruş evresinde ise $\pm 8\text{Nm}$ tork değerleri istikrarlı bir denetim sağlanmıştır. Grafiklerden de görüldüğü gibi sistem bu tork değerleri ile başarılı olarak zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirmiştir. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyici algoritması ile sistemin denetiminde ki çıkış tork değerlerinin PD denetim algoritması ve Bulanık Mantık denetim algoritmasında ki çıkış tork değerlerinden daha küçük sınırlar arasında değerler aldığı görülmektedir. Bu denetim algoritmasında istenilen bir performanstır. Bu aralık PD denetim algoritmasında $\pm 12\text{Nm}$ ve Bulanık Mantık denetleyici algoritmasında $\pm 10\text{Nm}$ iken, Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritması ile denetlenen sistemin uçuş evresinde $\pm 2\text{Nm}$ tork ile yer-duruş evresinde ise $\pm 8\text{Nm}$ sınırları aralığındadır. Bu sonuç sistem performansını etkileyen önemli bir faktördür. Bu denetim algoritmasının diğer denetim algoritmalarına göre avantaj ve dezavantajları daha ayrıntılı olarak Bölüm.16'da sonuç kısmında verilmiştir.

Altı bacaklı hexapod robotun verilen başlangıç değeri için sistem cevapları bölüm sonunda bir tablo şeklinde oluşturulmuştur. Bu tabloda, sistem cevabında hangi başlangıç değeri için sayısal benzetim oluşturulduğu, robotun belirli periyodik sürelerde ne kadar yol aldığı ve alınan yola karşılık eyleyicilerin harcadığı enerji miktarı verilmiştir. Sonuçta, oluşturulan bu tablolar aynı sistemin farklı denetim algoritmaları ile elde edilecek sayısal benzetim sonuçlarına göre daha kolay şekilde kıyaslanmasına yardımcı olacaktır.

Altı bacaklı hexapod robot denklem 9.1' de belirtilen değişkenleri için sayısal benzetim sonuçları elde edilmiştir. Bu değişkenlerden en önemlisi robot gövdesinin ağırlık merkezinin

yer seviyesinden belli bir yükseklikte bırakıldığı b_z değeridir. Bu değişken sistemin dinamiğini en fazla etkileyen değerdir. Çünkü robotun sahip olduğu dinamik yapı belirli limit değerleri arasında olmak zorundadır. Modellenen altı bacaklı hexapod robotun bu değere bağlı olarak uygun dinamik aralığı literatürdeki çalışmalarda kullanılan aralıklarda başarılı sonuçlar vermiştir [1, 96, 139, 196].

Ayrıca robot değişkenlerinden diğer önemli bir değişken robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısıdır($^\circ$). α salınım açısı sistemin kararlılığı hakkında bize bilgi veren en önemli değişkendir. Literatür çalışmalarında da görüldüğü gibi zıplayarak yürümeye robotun ana gövdesinin hep düzlemsel ortamda harmonik bir yörüngeyi takip etmesi istenir [1, 96, 99, 132]. Sistemde bu harmonik yörünge gövde salınım açısı α ile temsil edilmiştir. Bu çalışmada da bu parametre göz önüne alınarak sistem denetlenmeye çalışılmıştır. Bu yüzden ana gövdenin salınım denetimi, sistemde bacakların denetlenmesi ile sağlanmıştır. Literatürde ki çalışmalarda da görüldüğü gibi α salınım açısının zıplayarak yürüme işlevi sürecinde ki değeri $\pm 20^\circ$ sınırları arasında olması istenen bir durumdur [1, 96, 99, 132, 139, 196].

Robot değişkenlerinden diğer bir önemli değişken ise robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı $\dot{B}_y$ ' dir(m/sn). Bu değişkende sistem dinamiğini etkileyen önemli bir parametredir. Genelde modellenen robot yer seviyesinden belli bir yükseklikte belli bir ilk hız ile fırlatılarak zıplayarak yürümesi istenir. Bu ilk hız başlangıçta olması gereken bir olaydır. Eğer belli bir hız ile fırlatılmasa ($\dot{B}_y=0$) robotun aynı düşey ekseninde zıpladığı görülmektedir. Sayısal benzetim sonuçları ve grafikler, modellenen altı bacaklı hexapod robot $\dot{B}_y$ ' nin literatürdeki çalışmalarda kullanılan değerde başarılı sonuçlar verdiği sayısal benzetim sonuçlarında görülmüştür [1, 96, 139, 196].

Bu bölümdeki çalışmada en önemli sonuç sistemin yapay zeka metodu olan Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetleyicisi ile altı-bacaklı robotun oldukça başarılı olarak denetlenmesidir. Bu çalışma yazarın bilgisi dahilinde altı bacaklı hexapod robotun zıplayarak yürüme işlevinin gerçekleştirilmesinde, literatür çalışmalarında bir ilktir. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetleyicisi ile denetlenen altı bacaklı hexapod robotun sayısal benzetim sonuçlarının, literatürde ki çalışmalara nazaran çok daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetleyicisi ile denetlenen sisteme ait sayısal benzetim sonuçları bölüm sonunda bir tablo halinde verilmiştir. Bu sonuçlardan Ağ Tabanlı Bulanık Mantık

denetleyicisi ile denetlenen sisteme ait sayısal benzetim sonuçlarının, PD denetleyici algoritması ve Bulanık Mantık denetleyici algoritması ile denetlenen sisteme ait sayısal benzetim sonuçlarına göre performans olarak avantaj ve dezavantaj bakımından son bölümde irdelenmiştir. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetleyici algoritması ile denetlenen altı bacaklı hexapod robotun, PD denetleyicisine nazaran daha az bir enerji tüketimi ile daha fazla yol aldığı görülmüştür. Bu performans robotik teknolojisinde bilim adamlarınca üzerinde durulan en önemli unsurlardan birisidir. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetleyicisi algoritmasının diğer denetim algoritmalarına göre sistem üzerindeki avantaj ve dezavantajları son bölümde oluşturulan bir tablo ile daha ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Ayrıca bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak yapılan bir yenilik, altı bacaklı hexapod robot Şekil 9.4 ve Şekil 9.5’ de görüldüğü gibi sadece iki evrede(uçuş evresi ve ye-duruş evresi) iki adet denetim algoritması ile başarılı bir şekilde denetlenmiş olmasıdır. Oysaki Poulakakis ve arkadaşları aynı sistemin denetimini üç evrede (uçuş evresi, ileri itme evresi ve yer-duruş evresi) üç denetim algoritması ile gerçekleştirmişlerdir [1, 96, 139, 196]. Bu çalışmada modellenen zıplayarak yürümenin evreleri esnasında yapılan denetim eylem sayısı, yazarın literatür bilgisi dahilinde hexapod robot için daha önceden yapılan çalışmalardaki denetim eylem sayısından daha azdır. Sonuç olarak, bu çalışmada yapılan yenilik sistemin hem denetimini oldukça kolaylaştırmış olup hem de az sayıda ki denetim algoritması ile literatürde yapılan çalışmalardan daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür [1, 96, 139, 196].

16. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

16.1. Sonuçlar

Bu tezde bacaklı sistemler olan dört bacaklı quadrupedal ve altı bacaklı hexapod robotlar için zıplayarak yürüme işlevi için, yay-kütle ters sarkaç (SLIP) ile modellenen sistemin hareket denklemleri çıkartılmıştır. Zıplayarak yürüme işlevi için hareket denklemleri çıkartılan hem dört bacaklı quadrupedal robotun hem de altı bacaklı hexapod robotun denetimleri PD ve yapay zeka denetim algoritma metotları ile denetlenmiştir. Her bir model ilk olarak PD denetim algoritmaları ile farklı başlangıç şartlarına bağlı olarak denetimleri gerçekleştirilmiştir. Denetimler sonucunda elde edilen sistem cevapları grafiksel olarak sunulmuş sayısal benzetim sonuçları ve grafikler elde edilerek tasarlanan algoritmanın performansı incelenmiştir. Denetim algoritmalarının performansları her bölüm sonunda oluşturulan bir tablo ile görsel hale getirilmiştir. Oluşturulan tablolarda modellenen robotların zıplayarak yürüme işlevleri için gerekli başlangıç değerleri belirtilmiştir. Bu değerler genelde literatür çalışmalarında en fazla önemle üzerinde durulan ve sistemin dinamiğini en fazla etkileyen fiziksel unsurlardır. Bunların en önemlisi robotun zıplayarak yürüme işlevi için bırakılması gereken yer seviyesinden olan yükseklik değeridir. Bu değer robotun ağırlık merkezinin yer seviyesinden yüksekliğini temsil eden b_z (m) değeridir. Tasarlanan algoritmaların performanslarının karşılaştırılmasında başlangıç değeri olarak kullanılan b_z değeri, genelde literatürdeki çalışmalarda kullanılan değer olup robotun yer seviyesinden yüksekliği olarak 50cm alınmıştır. Başlangıç değerlerinde diğer önemli etken robot gövdesini ağırlık merkezinin kendi eksenine etrafındaki salınım açısı olan α ($^\circ$) değeridir. Zaten modellenen sistemin dengeli olarak zıplayarak yürüme işlevi bu değerle denetlenmektedir. Tüm literatür çalışmalarında da olduğu gibi zıplayarak yürüme işlevinin gerçekleşmesi için α açısının takip ettiği yol harmonik bir yörüngeden ibaret olmalıdır. Aynı zamanda α açısının $\pm 20^\circ$ sınırları arasında olması kararlı bir yapı için istenen aralıktır. Bu konudaki literatür çalışmaları tez içerisinde verilmiştir. SLIP ile modellenen dört bacaklı quadrupedal ve altı bacaklı hexapod robotların kararlı bir yapıda zıplayarak yürüme işlevlerinin gerçekleşmesinde α açısı doğrudan denetlenmemektedir. α salınım açısının istenilen harmonik yörüngeyi takip edebilmesi sanal bacakların denetlenmesi ile elde edilmiştir. Diğer bir önemli fiziksel başlangıç değeri ise robotun belirli bir ilk hızla fırlatılmasıdır. Bu ilk hız değeri db_y ile temsil edilmektedir. Bu değer robotun zıplayarak yürüyebilmesi için gerekli bir etkidir. Aksi takdirde bu değer $db_y=0$ olursa robot aynı düşey ekseninde sadece zıplama

hareketi yapacaktır. Bu değerde literatür çalışmalarında en fazla kullanılan 2-2.5m/sn sınırları aralığında alınmıştır.

Tasarlanan algoritmaların her bölümlerinin sonunda oluşturulan tablolar sistemin başlangıç değerlerinden başka modeller için alınan yol(m) ve alınan bu yola karşılık geçen zaman(sn) dilimleri belirtilmiştir. Ayrıca modelin her bir sanal bacağını tahrik eden eyleyicilerin ayrı ayrı harcadıkları güç watt birimi ile hesaplanmıştır. Aynı zamanda tüm sanal bacakların zıplayarak yürüme işlevi sürecinde toplam harcadıkları güç değeri hesaplanmıştır. Güç değerlerinin hesaplanması Bölüm 6 ve 8’ de denklemlerle ifade edilmiştir. Bu bölümün sonunda da tasarlanan denetim algoritmalarının performansları, her bir modelin zıplayarak yürüme işlevi esnasında aldıkları yol, alınan yola karşılık geçen süre ve bu yol-zaman ilişkisi ile birlikte sanal bacakların kalça kısmında bulunan eyleyicilerin harcadıkları güç değerleri ile karşılaştırılarak irdeleme yapılacaktır. Tasarlanan algoritmalar arasında ki avantaj ve dezavantajlar takip eden paragraflarda irdelenmiştir.

Uygulamalarda sayısal çözümler MATLAB paket programında geliştirilen yazılımlar ile gerçekleştirilirken PD denetim ve Bulanık Mantık denetim algoritmaları için MATLAB paket programına ait m-file yazılım programları oluşturularak yararlanılmıştır. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritmasında ise MATLAB paket programına ait ANFIS araç kutusundan yararlanılmıştır. Modellenen sistemlere ait hareket denklemlerini ifade eden diferansiyel denklem takımının sayısal entegrasyonu için Runge-Kutte yöntemi kullanılmıştır.

Kütle-Yay Ters Sarkaç (SLIP) ile modellenen dört bacaklı quadrupedal robot ve altı bacaklı hexapod robot, yürüeyebilen tüm bacaklı hayvan çeşitlerinin esas yürüme hareket davranışlarını elde etmek için biyomekanik literatürüne yerleşmiş en basit bir yaklaşım şeklidir. Ayrıca SLIP modeli biyomekanikçilere, kara böcekler ve insanlar gibi birçok çeşit yaratıkların hareket prensiplerinin anlaşılmasında büyük kolaylık kazandırmıştır. Bu model yaratıkların yürümeleri, koşmaları, sıçramaları ve zıplamalarının modellenmesinde oldukça başarılı olmuştur. Ayrıca, SLIP modeli ile dört bacaklı quadrupedal robotun ve altı bacaklı hexapod robotun farklı başlangıç değerlerinde zıplayarak yürüyüşünün denetimi için ilk önce PD denetim uygulanarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Dört bacaklı quadrupedal robot denklem 7.1’ de belirtilen değişkenlerin farklı değerleri için sayısal benzetim sonuçları elde edilmiştir. Bu değişkenlerden en önemlisi robot gövdesinin ağırlık merkezinin yer seviyesinden belli bir yükseklikte bırakıldığı b_z değeridir. Bu değişken

sistemin dinamiğini en fazla etkileyen değerdir. Çünkü robotun sahip olduğu dinamik yapı belirli limit değerleri arasında olmak zorundadır. Modellenen dört bacaklı quadrupedal robotun bu değere bağlı olarak uygun dinamik aralığı deneme-yanılma metodu ile alınan farklı b_z değerleri ile tespit edilmiştir. Elde edilen sayısal benzetim sonuçları ve grafikler modellenen dört bacaklı quadrupedal robot düşey ekseninde b_z 'nin 40cm ve 70cm aralıklarında robotun çok başarılı olarak zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirdiğini göstermektedir. Aksi takdirde b_z 'nin daha yüksek değerlerinde(≥ 70 cm) robotun tepe-takla devrilerek yere düştüğü ve bu sınırlar dışında kararsız bir yapıya dönüştüğü görülmüştür.

Quadrupedal robot için denklem 7.1' de ki değişkenlerden diğer önemli bir değişken robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen α salınım açısıdır($^\circ$). Bu değer başlangıçta belirli limit değerleri arasında olmalıdır. Modellenen dört bacaklı quadrupedal robotun bu değere bağlı olarak uygun dinamik aralığı deneme-yanılma metodu ile alınan farklı α değerleri ile tespit edilmiştir. PD denetim algoritması ile elde edilen sayısal benzetim sonuçları ve grafikler modellenen dört bacaklı quadrupedal robot α 'nin 4° ve 10° aralıklarında robotun çok başarılı olarak zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirdiğini göstermektedir. Fakat bu değer aralığı başlangıç değerleridir. Oysaki zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirdiği süreçlerde bu değer aralığı dışında da değerler alabilir. Bu robotun kararlılığını etkilememektedir.

Quadrupedal robotun diğer bir önemli değişkeni ise robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı db_y 'dir(m/sn). Bu değişkende sistem dinamiğini etkileyen önemli bir parametredir. Genelde modellenen robot yer seviyesinden belli bir yükseklikte belli bir ilk hız ile fırlatılarak zıplayarak yürümesi istenir. Bu ilk hız başlangıçta olması gereken bir olaydır. Eğer belli bir hız ile fırlatılmasa ($db_y=0$) robotun aynı düşey ekseninde zıpladığı görülmektedir. Modellenen dört bacaklı quadrupedal robotun bu değere bağlı olarak uygun dinamik aralığı deneme-yanılma metodu ile alınan farklı db_y değerleri ile tespit edilmiştir. PD denetim algoritması ile elde edilen sayısal benzetim sonuçları ve grafiklerden modellenen dört bacaklı quadrupedal robot db_y 'nin 1m/sn ve 3m/sn aralıklarında robotun çok başarılı olarak zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirdiğini ve bu sınırlar dışında kararsız bir yapı olduğu görülmüştür.

Ayrıca, quadrupedal robot model Şekil 7.5’ de görüldüğü gibi sadece iki evrede(uçuş ve yer-duruş evreleri) iki adet PD denetim algoritması ile başarılı bir şekilde denetlenmiştir. Oysaki Poulakakis ve arkadaşları aynı sistemin denetimini üç evrede (uçuş, yer-duruş-ileri itme ve yer-duruş evreleri) üç denetim algoritması ile gerçekleştirmişlerdir [1, 96, 139, 196]. Sonuç olarak, bu çalışmada modellenen zıplayarak yürümenin evreleri esnasında yapılan denetim eylem sayısı, yazarın literatür bilgisi dahilinde daha önceden yapılan çalışmalardaki denetim eylem sayısından daha azdır. Bu çalışmada yapılan yenilik sistemin hem denetimini oldukça kolaylaştırmış olup hem de az sayıda ki denetim algoritması ile literatürde yapılan [1, 96, 139, 196] çalışmalarla aynı başarı elde edilmiştir.

Altı bacaklı hexapod robotun sistem cevaplarına, sayısal benzetim sonuçları ve grafiklerden bakıldığında; tasarlanan zıplayarak yürüme modelinin literatürde [1, 2, 95, 96, 99] yapılan çalışmalar gibi başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu gibi zıplama işlevlerinde bacaklardaki eyleyicilerin uyguladıkları tork değerleri genelde sınırlıdır. Bu yüzden sayısal benzetim modelinde bacaklara ait eyleyicilerin tork değerleri sınırlandırılmıştır. Bu sınır değerler piyasada kolaylıkla bulabileceğimiz 10Nm ve 15Nm aralığında ki mevcut olan eyleyicilerdir. Grafiklerden de görüldüğü gibi PD denetim algoritması ile denetlenen sistem +/- 12Nm sınırları aralığında başarılı olarak zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirmiştir.

Altı bacaklı hexapod robot denklem 9.1’ de belirtilen değişkenlerin farklı değerleri için sayısal benzetim sonuçları elde edilmiştir. Bu değişkenlerden en önemlisi robot gövdesinin ağırlık merkezinin yer seviyesinden belli bir yükseklikte bırakıldığı b_z değeridir. Bu değişken sistemin dinamiğini en fazla etkileyen değerdir. Çünkü robotun sahip olduğu dinamik yapı belirli limit değerleri arasında olmak zorundadır. Modellenen altı bacaklı hexapod robotun bu değere bağlı olarak uygun dinamik aralığı deneme-yanılma metodu ile alınan farklı b_z değerleri ile tespit edilmiştir. PD denetim algoritması ile elde edilen sayısal benzetim sonuçları ve grafiklerden, modellenen altı bacaklı hexapod robot düşey ekseninde b_z ’ nin 40cm ve 70cm aralıklarında robotun çok başarılı olarak zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirdiğini görülmektedir. Aksi takdirde b_z ’ nin daha yüksek değerlerinde(≥ 70 cm) robotun tepe-takla devrilerek yere düştüğü ve bu sınırlar dışında kararsız bir yapıya dönüştüğü görülmüştür. Aynı zamanda deneme-yanılma metodu ile bulunan b_z ’ nin değer aralığı, literatürde ki çalışmalarda kullanılan uygun aralık değerler ile aynıdır [1, 96, 139, 196].

Hexapod robot için denklem Denklem 9.1’ de ki değişkenlerden diğer önemli bir değişken robot gövdesinin ağırlık merkezinin düzlemsel z-y eksenlerine göre zamana bağlı olarak elde edilen a salınım açısıdır($^{\circ}$). Bu değer başlangıçta belirli limit değerleri arasında olmalıdır. Modellenen altı bacaklı hexapod robotun bu değere bağlı olarak uygun dinamik aralığı deneme-yanılma metodu ile alınan farklı a değerleri ile tespit edilmiştir. PD denetim algoritması ile elde edilen sayısal benzetim sonuçları ve grafiklerden, modellenen altı bacaklı hexapod robot a ’ nin 4° ve 10° aralıklarında robotun çok başarılı olarak zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirdiğini görülmektedir.

Hexapod robotun diğer bir önemli değişkeni ise robot gövdesinin ağırlık merkezinin zamana bağlı olarak elde edilen öteleme hızı db_y ’ dir(m/sn). Bu değişkende sistem dinamiğini etkileyen önemli bir parametredir. Genelde modellenen robot yer seviyesinden belli bir yükseklikte belli bir ilk hız ile fırlatılarak zıplayarak yürümesi istenir. Bu ilk hız başlangıçta olması gereken bir olaydır. Modellenen altı bacaklı hexapod robotun bu değere bağlı olarak uygun dinamik aralığı deneme-yanılma metodu ile alınan farklı db_y değerleri ile tespit edilmiştir. PD denetim algoritması ile elde edilen sayısal benzetim sonuçları ve grafikler, modellenen altı bacaklı hexapod robot db_y ’ nin 1m/sn ve 3m/sn aralıklarında robotun çok başarılı olarak zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirdiğini ve bu sınırlar dışında kararsız bir yapı olduğunu göstermiştir.

Ayrıca, altı bacaklı hexapod robotun Şekil 9.5’ de görüldüğü gibi sadece iki evrede(uçuş evresi ve ye-duruş evresi) iki adet PD denetim algoritması ile başarılı bir şekilde denetlenmiştir. Oysaki Poulakakis ve arkadaşları aynı sistemin denetimini üç evrede (uçuş evresi, ileri itme evresi ve yer-duruş evresi) üç denetim algoritması ile gerçekleştirmişlerdir [1, 96, 139, 196]. Bu çalışmada modellenen zıplayarak yürümenin evreleri esnasında yapılan denetim eylem sayısı, yazarın literatür bilgisi dahilinde hexapod robot için daha önceden yapılan çalışmalardaki denetim eylem sayısından daha azdır. Ayrıca, bu çalışmada yapılan yenilik sistemin hem denetimini oldukça kolaylaştırmış olup hem de az sayıda ki denetim algoritması ile literatürde yapılan çalışmalarla aynı başarı elde edilmiştir [1, 96, 139, 196].

Bu tezde SLIP ile modellenen dört bacaklı quadrupedal robotun zıplayarak yürüyüşünün denetimi için ayrıca Bulanık Mantık denetim uygulanmış olup ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu denetimde de grafiklerden de görüldüğü gibi sistem +/- 10Nm sınırları aralığında başarılı olarak zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirmiştir. Bulanık Mantık

Denetleyici algoritması ile sistemin denetiminde ki çıkış tork değerlerinin PD denetim algoritmasında ki çıkış tork değerlerinden daha küçük sınırlar arasında değerler aldığı görülmektedir. Bu denetim algoritmasında istenilen bir performanstır. Bu aralık PD denetim algoritmasında $\pm 12\text{Nm}$ sınırları aralığında olurken, Bulanık Mantık Denetleyici algoritmasında $\pm 10\text{Nm}$ ' dir.

Modellenen dört bacaklı quadrupedal robotun başlangıç değeri b_z ' ye bağlı olarak uygun dinamik aralığı literatürdeki çalışmalarda kullanılan aralıklarda başarılı sonuçlar vermiştir [1, 96, 139, 196]. Ayrıca, literatürde ki çalışmalarda da görüldüğü gibi a salınım açısının da zıplayarak yürüme işlevi sürecinde ki değeri $\pm 20^\circ$ sınırları arasında olması istenen bir durumdur [1, 96, 99, 132, 139, 196]. Quadrupedal robotun Bulanık Mantık denetim algoritması ile denetiminde de a salınım açısının istenilen sınırlarlar arsında olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, modellenen dört bacaklı quadrupedal robotun Bulanık Mantık denetim algoritması ile denetiminde db_y ' nin literatürdeki çalışmalarda kullanılan değerde başarılı sonuçlar verdiği sayısal benzetim sonuçlarında görülmüştür [1, 96, 139, 196].

Bu bölümdeki çalışmada en önemli uygulama sistemin yapay zeka metodu olan Bulanık Mantık Denetleyicisi ile oldukça başarılı olarak denetlenmesidir. Bu çalışma yazarın bilgisi dahilinde dört bacaklı quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlevinin gerçekleştirilmesinde, literatür çalışmalarında bir ilktir. Bulanık Mantık Denetleyicisi ile denetlenen sisteme ait sayısal benzetim sonuçları 11. Bölümün sonunda bir tablo halinde verilmiştir. Bu sonuçlardan Bulanık Mantık Denetleyicisi ile denetlenen sisteme ait sayısal benzetim sonuçlarının, PD Denetleyicisi ile denetlenen sisteme ait sayısal benzetim sonuçlarına göre performans olarak çok daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bulanık Mantık Denetleyicisi ile denetlenen dört bacaklı quadrupedal robotun, PD Denetleyicisine nazaran daha az bir enerji tüketimi ile daha fazla yol aldığı görülmüştür. Bu performans robotik teknolojisinde bilim adamlarınca üzerinde durulan en önemli unsurlardan birisidir. Bulanık Mantık Denetleyicisi Algoritmasının diğer denetim algoritmalarına göre sistem üzerindeki avantaj ve dezavantajları Tablo 16.1' de daha ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Ayrıca bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak yapılan bir yenilik, dört bacaklı quadrupedal robotun Bulanık Mantık denetleyicisi ile Şekil 11.2' de görüldüğü gibi sadece iki evrede(uçuş evresi ve ye-duruş evresi) iki adet denetim algoritması ile başarılı bir şekilde denetlenmiş olmasıdır. Oysaki Poulakakis ve arkadaşları aynı sistemin denetimini üç evrede (uçuş evresi, ileri itme evresi ve yer-duruş evresi) üç denetim algoritması ile gerçekleştirmişlerdir [1, 96, 139, 196]. Bu çalışmada modellenen

zıplayarak yürümenin evreleri esnasında yapılan denetim eylem sayısı, yazarın literatür bilgisi dahilinde quadripedal robot için daha önceden yapılan çalışmalardaki denetim eylem sayısından daha azdır. Ayrıca, bu çalışmada yapılan yenilik sistemin hem denetimini oldukça kolaylaştırmış olup hem de az sayıda ki denetim algoritması ile literatürde yapılan çalışmalardan daha başarı sonuçlar elde edilmiştir [1, 96, 139, 196].

Altı bacaklı hexapod robot modelinin denetiminde de en önemli sonuç sistemin yapay zeka metodu olan Bulanık Mantık Denetleyicisi ile oldukça başarılı olarak denetlenmesidir. Bu çalışma yazarın bilgisi dahilinde altı bacaklı hexapod robotun zıplayarak yürüme işlevinin gerçekleştirilmesinde, literatür çalışmalarında bir ilktir. Bulanık Mantık Denetleyicisi ile denetlenen sisteme ait sayısal benzetim sonuçları bölüm sonunda bir tablo halinde verilmiştir. Bu sonuçlardan Bulanık Mantık Denetleyicisi ile denetlenen sisteme ait sayısal benzetim sonuçlarının, PD denetleyicisi ile denetlenen sisteme ait sayısal benzetim sonuçlarına göre performans olarak çok daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bulanık Mantık denetleyici algoritması ile denetlenen altı bacaklı hexapod robotun, PD denetleyicisine nazaran daha az bir enerji tüketimi ile daha fazla yol aldığı görülmüştür. Bu performans robotik teknolojisinde bilim adamlarınca üzerinde durulan en önemli bir unsurdur. Bulanık Mantık denetleyicisi algoritmasının diğer denetim algoritmalarına göre sistem üzerindeki avantaj ve dezavantajları Tablo 16.2' de daha ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Ayrıca bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak yapılan bir yenilik, altı bacaklı hexapod robotun Bulanık Mantık denetleyicisi ile Şekil 12.2' de görüldüğü gibi sadece iki evrede(uçuş evresi ve ye-duruş evresi) iki adet denetim algoritması ile başarılı bir şekilde denetlenmiş olmasıdır. Oysaki Poulakakis ve arkadaşları aynı sistemin denetimini üç evrede (uçuş evresi, ileri itme evresi ve yer-duruş evresi) üç denetim algoritması ile gerçekleştirmişlerdir [1, 96, 139, 196]. Bu çalışmada modellenen zıplayarak yürümenin evreleri esnasında yapılan denetim eylem sayısı, yazarın literatür bilgisi dahilinde hexapod robot için daha önceden yapılan çalışmalardaki denetim eylem sayısından daha azdır. Ayrıca, bu çalışmada yapılan yenilik sistemin hem denetimini oldukça kolaylaştırmış olup hem de az sayıda ki denetim algoritması ile literatürde yapılan çalışmalardan daha başarı sonuçlar elde edilmiştir [1, 96, 139, 196].

Altı bacaklı hexapod robot modelinde de Bulanık Mantık denetleyici algoritması ile sistemin denetiminde ki çıkış tork değerlerinin PD denetim algoritmasında ki çıkış tork değerlerinden daha küçük sınırlar arasında değerler aldığı görülmektedir. Bu denetim

algoritmasında istenilen bir performanstır. Bu aralık PD denetim algoritmasında $\pm 12\text{Nm}$ sınırları aralığında olurken, Bulanık Mantık Denetleyici algoritmasında $\pm 10\text{Nm}$ ' dir. Aynı zamanda modellenen altı bacaklı hexapod robotun Bulanık Mantık denetleyici algoritması ile sistemin denetiminde alınan b_z ve db_y başlangıç değerleri ile de literatürdeki çalışmalarda kullanılan bu değerler için başarılı sonuçlar vermiştir [1, 96, 139, 196]. Ayrıca bu çalışmada da α salınım açısının zıplayarak yürüme işlevi sürecinde ki değeri $\pm 20^\circ$ sınırları arasında olmaları istenen bir durumdur [1, 96, 99, 132, 139, 196].

Ayrıca bu tezde SLIP ile modellenen dört bacaklı quadrupedal robotun zıplayarak yürüyüşünün denetimi için Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim uygulanmış olup ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Quadrupedal robotun Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritmasında tork değerleri $\pm 10\text{Nm}$ ile sınırlandırılmasına rağmen Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritması ile denetlenen sistem uçuş evresinde $\pm 4\text{Nm}$ tork ile yer-duruş evresinde ise $\pm 9\text{Nm}$ tork değerleri stabil bir denetim sağlanmıştır. Grafiklerden de görüldüğü gibi sistem bu tork değerleri ile başarılı olarak zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirmiştir. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyici algoritması ile sistemin denetiminde ki çıkış tork değerlerinin PD denetim algoritması ve Bulanık Mantık denetim algoritmasında ki çıkış tork değerlerinden daha küçük sınırlar arasında değerler aldığı görülmektedir. Bu denetim algoritmasında istenilen bir performanstır. Bu aralık PD denetim algoritmasında $\pm 12\text{Nm}$ ve Bulanık Mantık denetleyici algoritmasında $\pm 10\text{Nm}$ iken, Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritması ile denetlenen sistemin uçuş evresinde $\pm 4\text{Nm}$ tork ile yer-duruş evresinde ise $\pm 8\text{Nm}$ sınırları aralığındadır. Bu sonuç sistem performansını etkileyen önemli bir faktördür. Bu denetim algoritmasının diğer denetim algoritmalarına göre avantaj ve dezavantajları daha ayrıntılı olarak Tablo 16.1' de verilmiştir. Ayrıca bu çalışmada da α salınım açısının zıplayarak yürüme işlevi sürecinde ki değeri $\pm 20^\circ$ sınırları arasında olması, db_y ilk hızının 2.5m/sn değerinde kararlı bir zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirmesi ve robotun yer seviyesinden yüksekliğini temsil eden b_z ' nin 50cm ile başlangıç değerlerde ki sistem cevapları literatürdeki çalışmalarda kullanılan değerlerle aynı olup ve daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Quadrupedal robotun Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritması ile yapılan çalışmada en önemli sonuç sistemin yapay zeka metodu olan Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetleyicisi ile dört bacaklı robotun oldukça başarılı olarak denetlenmesidir. Bu çalışma yazarın bilgisi dahilinde dört bacaklı quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlevinin gerçekleştirilmesinde, literatür çalışmalarında bir ilktir. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık

denetleyicisi ile denetlenen dört bacaklı quadrupedal robotun sayısal benzetim sonuçlarının, literatürde ki çalışmalara nazaran çok daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetleyicisi ile denetlenen sisteme ait sayısal benzetim sonuçları bölüm sonunda bir tablo halinde verilmiştir. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetleyici algoritması ile denetlenen dört bacaklı quadrupedal robotun, PD denetleyicisine nazaran daha az bir enerji tüketimi ile daha fazla yol aldığı görülmüştür. Bu performans robotik teknolojisinde bilim adamlarınca üzerinde durulan en önemli unsurlardan birisidir. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetleyicisi algoritmasının diğer denetim algoritmalarına göre sistem üzerindeki avantaj ve dezavantajları Tablo 16.1’ de daha ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Ayrıca bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak yapılan bir yenilik, dört bacaklı quadrupedal robotun Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyicisi ile Şekil 14.2’ de görüldüğü gibi sadece iki evrede(uçuş evresi ve ye-duruş evresi) iki adet denetim algoritması ile başarılı bir şekilde denetlenmiş olmasıdır. Oysaki Poulakakis ve arkadaşları aynı sistemin denetimini üç evrede (uçuş evresi, ileri itme evresi ve yer-duruş evresi) üç denetim algoritması ile gerçekleştirmişlerdir [1, 96, 139, 196]. Bu çalışmada modellenen zıplayarak yürümenin evreleri esnasında yapılan denetim eylem sayısı, yazarın literatür bilgisi dahilinde quadrupedal robot için daha önceden yapılan çalışmalardaki denetim eylem sayısından daha azdır. Sonuç olarak, bu çalışmada yapılan yenilik sistemin hem denetimini oldukça kolaylaştırmış olup hem de az sayıda ki denetim algoritması ile literatürde yapılan çalışmalardan daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür [1, 96, 139, 196].

Bu tezin en sonunda SLIP ile modellenen altı bacaklı hexapod robotun zıplayarak yürüyüşünün denetimi için Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim uygulanmış olup ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Hexapod robotun Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritmasında tork değerleri +/- 10Nm ile sınırlanmasına rağmen Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritması ile denetlenen sistem uçuş evresinde +/-2Nm tork ile yer-duruş evresinde ise +/-8Nm tork değerleri istikrarlı bir denetim sağlanmıştır. Grafiklerden de görüldüğü gibi sistem bu tork değerleri ile başarılı olarak zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirmiştir. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyici algoritması ile sistemin denetiminde ki çıkış tork değerlerinin PD denetim algoritması ve Bulanık Mantık denetim algoritmasında ki çıkış tork değerlerinden daha küçük sınırlar arasında değerler aldığı görülmektedir. Bu denetim algoritmasında istenilen bir performanstır. Bu aralık PD denetim algoritmasında +/- 12Nm ve Bulanık Mantık denetleyici algoritmasında +/- 10Nm

iken, Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritması ile denetlenen sistemin uçuş evresinde $\pm 2\text{Nm}$ tork ile yer-duruş evresinde ise $\pm 8\text{Nm}$ sınırları aralığındadır. Bu sonuç sistem performansını etkileyen önemli bir faktördür. Bu denetim algoritmasının diğer denetim algoritmalarına göre avantaj ve dezavantajları daha ayrıntılı olarak Tablo 16.2’ de verilmiştir. Ayrıca bu çalışmada da α salınım açısının zıplayarak yürüme işlevi sürecinde ki değeri $\pm 20^\circ$ sınırları arasında olması, db_y ilk hızının 2.5m/sn değerinde kararlı bir zıplayarak yürüme işlevini gerçekleştirmesi ve robotun yer seviyesinden yüksekliğini temsil eden b_z ’ nin 50cm ile başlangıç değerlerde ki sistem cevapları literatürdeki çalışmalarda kullanılan değerlerle aynı olup ve daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Hexapod robotun Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritması ile yapılan çalışmada en önemli sonuç sistemin yapay zeka metodu olan Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetleyicisi ile altı bacaklı robotun oldukça başarılı olarak denetlenmesidir. Bu çalışma yazarın bilgisi dahilinde altı bacaklı hexapod robotun zıplayarak yürüme işlevinin gerçekleştirilmesinde, literatür çalışmalarında bir ilktir. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetleyicisi ile denetlenen altı bacaklı hexapod robotun sayısal benzetim sonuçlarının, literatürde ki çalışmalara nazaran çok daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetleyicisi ile denetlenen sisteme ait sayısal benzetim sonuçları bölüm sonunda bir tablo halinde verilmiştir. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetleyici algoritması ile denetlenen altı bacaklı hexapod robotun, PD denetleyicisine nazaran daha az bir enerji tüketimi ile daha fazla yol aldığı görülmüştür. Bu performans robotik teknolojisinde bilim adamlarınca üzerinde durulan en önemli unsurlardan birisidir. Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetleyicisi algoritmasının diğer denetim algoritmalarına göre sistem üzerindeki avantaj ve dezavantajları Tablo 16.2’ de daha ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Ayrıca bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak yapılan bir yenilik, altı bacaklı hexapod robotun Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyicisi ile Şekil 15.2’ de görüldüğü gibi sadece iki evrede(uçuş evresi ve yer-duruş evresi) iki adet denetim algoritması ile başarılı bir şekilde denetlenmiş olmasıdır. Oysaki Poulakakis ve arkadaşları aynı sistemin denetimini üç evrede (uçuş evresi, ileri itme evresi ve yer-duruş evresi) üç denetim algoritması ile gerçekleştirmişlerdir [1, 96, 139, 196]. Bu çalışmada modellenen zıplayarak yürümenin evreleri esnasında yapılan denetim eylem sayısı, yazarın literatür bilgisi dahilinde hexapod robot için daha önceden yapılan çalışmalardaki denetim eylem sayısından daha azdır. Sonuç olarak, bu çalışmada yapılan yenilik sistemin hem denetimini oldukça

kolaylaştırmış olup hem de az sayıda ki denetim algoritması ile literatürde yapılan çalışmalardan daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür [1, 96, 139, 196].

Sonuç olarak, bu tezde dinamik modeli çıkartılmış olan dört bacaklı quadrupedal ve altı bacaklı hexapod robotun zıplayarak yürüme işlevlerini kararlı bir yapıda gerçekleştirebilmeleri için tasarlanan PD ve yapay zeka denetim algoritmaları sisteme uygulanmıştır. İlk olarak PD denetim algoritması sisteme uygulanarak sayısal benzetim sonuçları ve grafikler elde edilmiştir. Daha sonra Bulanık Mantık denetim algoritması sisteme uygulanmıştır. Burada da yine sayısal benzetim ve grafik sonuçları elde edilmiştir. En son olarak Ağ Tabanlı Bulanık Mantık(ANFIS) denetim algoritması sisteme uygulanarak sayısal benzetim ve grafik sonuçları elde edilmiştir. Tasarlanan yapay zeka denetim algoritmalarının performansları Tablo 16.1 ve Tablo 16.2’ de ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Denetim algoritmalarının performansları modellenen sistemler arasında irdelenmiştir. Bir başka deyişle, dört bacaklı quadrupedal robot modeli için uygulanan denetim algoritmalarının performansları kendi aralarında performansları kıyaslanırken altı bacaklı hexapod robot modeli içinde uygulanan denetim algoritmaları kendi aralarında performans karşılaştırılması yapılmıştır. Oluşturulan tablolarda modellere uygulanan her bir denetim algoritmasına ait belirli zaman periyotlarında robot modelin aldığı yol verilmektedir. Bu zaman periyotları robot modellerinin zıplayarak yürüme işlevi süreçlerinde ki 3, 5 ve 8.sn anlarıdır. Bu zaman dilimlerinde robotların aldıkları yol(m) tabloda verilmiştir. Ayrıca bu zaman dilimlerine bağlı olarak her bir bacağı tahrik eden eyleyicilerin harcadıkları güç(watt) hesaplanmıştır. Buradaki amacımız her bir denetim algoritmasının 1 watt’ lık güç ile model robotlara aldıracağı yol mesafesini bulmaktır ki, buda bize tasarlanan denetim algoritmalarının %’ de olarak performanslarını verecektir.

Tablo 16.1’ de dört bacaklı quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlevi için uygulanan denetim algoritmalarına ait performans bilgileri mevcuttur. Dört bacaklı quadrupedal robota uygulanan PD denetim algoritmasında elde edilen sonuçların literatürdeki çalışmalar kadar başarılı olduğu görülmüştür. Sistem cevapları olan sayısal benzetim ve grafiklerden de görüldüğü gibi zıplayarak yürüme işlevi kararlı bir yapıda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca burada en önemli olay PD denetim algoritmamızın sadece iki evrede uygulanması ile denetimin gerçekleştirilmiş olmasıdır. Bu evreler tez içinde detaylı olarak anlatılmıştır. Denetim evrelerinin daha az olması sistemin denetimini oldukça kolaylaştırmıştır. Bu diğer denetim algoritmaları olan Bulanık Mantık ve Ağ Tabanlı Bulanık Mantık denetim algoritmalarında da uygulanmıştır. Bu yenilik literatürdeki çalışmalara göre daha verimli olduğu Tablo 16.2’ de görülmektedir. Fakat PD denetimde sistem zıplama işlevi süreci içinde bozulan dinamik

yapısında, quadrupedal robotun devrildiği görülmüştür (Şekil 7.28). Bu istenmeyen bir durumdur. Daha sonra dört bacaklı quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlevi için Bulanık Mantık denetim algoritması uygulanmıştır. Bu denetim algoritmasının PD denetim algoritmasına göre çok başarılı sonuçlar verdiği Tablo 16.1’ de görülmektedir. Aynı zaman diliminde ve aynı güç ile Bulanık Mantık denetim algoritması ile denetlenen sistem %68.80’ lik performans ile başarılı olurken PD denetimde %1.90’ lık başarı sağlanmıştır. Bu başarı oranı daha sonraki zaman dilimlerinde de yaklaşık olarak devam etmiştir. En son olarak dört bacaklı quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlevi için Ağ Tabanlı Bulanık Mantık(ANFIS) denetim algoritması uygulanmıştır. ANFIS denetim algoritması ile denetlenen sistem PD denetim algoritmasından daha iyi olduğu ama Bulanık Mantık denetim algoritmasından daha kötü sonuçlar verdiği görülmüştür. Burada ANFIS denetim algoritmasının diğer denetim algoritmalarına göre performansı %29.30’ dur. Fakat ANFIS denetim algoritmasının diğer denetim algoritmalarından avantajı bozulan dinamik yapıya karşılık daha iyi iyileştirme faktörünün olmasıdır. Bunu Şekil 14.4’ de görebiliriz. Dengeli zıplayarak yürüme işlevinin dinamik yapısını gösteren α salınım açısının bazı noktalarda bozulmasına rağmen robot devrilmeden kararlı bir yapıda işlevine devam etmektedir. Oysaki PD denetimde bu harmonik α salınım açısının yapısı bozulduğu anda robotun devrildiği Şekil 7.28’ de görülmektedir.

Tablo 16.2’ de altı bacaklı hexapod robotun zıplayarak yürüme işlevi için uygulanan denetim algoritmalarına ait performans bilgileri mevcuttur. Altı bacaklı hexapod robota ilk olarak PD denetim algoritması uygulanmıştır. Sistem cevapları elde edilen sonuçların literatürdeki çalışmalar kadar başarılı olduğu görülmüştür. Sistem cevapları olan sayısal benzetim ve grafiklerden de görüldüğü gibi zıplayarak yürüme işlevi kararlı bir yapıda gerçekleştirilmiştir. Zıplayarak yürüyen altı bacaklı hexapod robotun denetimi de sadece iki evrede gerçekleştirilerek yapılmıştır. Daha sonra dört bacaklı quadrupedal robotun zıplayarak yürüme işlevi için Bulanık Mantık denetim algoritması uygulanmıştır. Bu denetim algoritmasının PD denetim algoritmasına göre çok başarılı sonuçlar verdiği Tablo 16.2’ de görülmektedir. Ayrıca altı bacaklı hexapod robotun Bulanık Mantık denetim algoritması ile elde edilen sistem cevaplarının literatürdeki Rhex [96] robotundan daha başarılı sonuçlar gösterdiği görülmüştür. Aynı zaman diliminde ve aynı güç ile Bulanık Mantık denetim algoritması ile denetlenen sistem %74.01’ lik performans ile başarılı olurken PD-Rhex denetimde %7.07’ lik başarı ve PD denetim algoritması ile de %2.47’ lik performans sağlanmıştır. Bu başarı oranı daha sonraki zaman dilimlerinde de yaklaşık olarak devam etmiştir. En son olarak altı bacaklı hexapod robotun zıplayarak yürüme işlevi için Ağ Tabanlı Bulanık Mantık(ANFIS) denetim algoritması uygulanmıştır. ANFIS denetim algoritması ile denetlenen sistemin %16.42’ lik

başarı ile PD denetim algoritmasından daha iyi olduğu ama Bulanık Mantık denetim algoritmasından daha kötü sonuçlar verdiği görülmüştür. Fakat ANFIS denetim algoritmasının diğer denetim algoritmalarından avantajı bozulan dinamik yapıya karşılık daha iyi iyileştirme faktörünün olmasıdır. Bu dinamik yapının karalılığı bakımından önemli bir unsurdur. Dengeli zıplayarak yürüme işlevinin dinamik yapısını gösteren a salınım açısının bazı noktalarda bozulmasına rağmen robot devrilmeden kararlı bir yapıda işlevine devam etmektedir. Oysaki PD denetimde bu harmonik a salınım açısının yapısı bozulduğu anda robotun devrildiği görülmektedir.

Tablo 16.1 Quadru pedal dört bacaklı robotun zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleştirilen denetim algoritmalarının hareket performansları

QUADRU PEDAL ROBOT						
4 bacaklı						
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ						
Robotun bırakıldığı yükseklik		Robotun yatay eksenle yaptığı açı		Robotun yataydaki hızı		
b_z (cm)		a ($^{\circ}$)		db_y (m/sn)		
50		8		2.5		
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ						
Uygulanan Denetim Algoritması	Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın Harcadığı Güç	Arka Bacağın Harcadığı Güç	Toplam Harcanan Güç	Denetim Algoritma Performansı
	t	b_y	$P_{ön}$	P_{arka}	P_{top}	$Verim$
	(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)	(%)
PD	3	0.65	349	434	782	1.90
BULANIK	3	8.0	111	153	264	68.80
ANFIS	3	1.4	55	54	109	29.30
PD	5	1.37	592	725	1317	2.08
BULANIK	5	14.1	185	256	441	66.65
ANFIS	5	2.9	99	90	189	31.24
PD	8	2.42	920	1086	2006	2.40
BULANIK	8	23.6	296	409	704	66.13
ANFIS	8	5.2	170	160	330	31.46

Tablo 16.2 Hexapod altı bacaklı robotun zıplayarak yürüme evreleri sırasında gerçekleştirilen denetim algoritmalarının hareket performansları

HEXAPOD ROBOT							
6 bacaklı							
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ							
Robotun bırakıldığı yükseklik			Robotun yatay eksenle yaptığı açı			Robotun yataydaki hızı	
b_z (cm)			a (°)			db_y (m/sn)	
50			8			2.5	
MOTORLARIN HARCADIĞI GÜÇ							
Uygulanan Denetim Algoritması	Alınan Süre	Alınan Yol	Ön Bacağın Harcadığı Güç	Orta Bacağın Harcadığı Güç	Arka Bacağın Harcadığı Güç	Toplam Harcanan Güç	Denetim Algoritma Performansı
	t	b_y	$P_{ön}$	P_{orta}	P_{arka}	P_{top}	Verim
	(sn)	(m)	(watt)	(watt)	(watt)	(watt)	(%)
PD-RHEX	3	2.4	X	X	X	612	7.07
PD	3	0.7	176	157	176	509	2.47
BULANIK	3	7.92	64	59	68	191	74.01
ANFIS	3	2.2	62	117	63	241	16.42
PD-RHEX	5	4.0	X	X	X	1020	6.54
PD	5	1.4	291	278	272	841	2.78
BULANIK	5	13.81	111	100	117	328	70.51
ANFIS	5	4.4	90	165	101	356	20.14
PD-RHEX	8	6.4	X	X	X	1632	5.9
PD	8	2.5	494	496	450	1440	2.57
BULANIK	8	22.66	180	163	192	535	63.63
ANFIS	8	7.7	105	199	107	410	28.33

16.2 Öneriler

Son yıllarda mobil robotlar üzerine yapılan çalışmaların büyük bir oranı bacaklı robotlar üzerine olmuştur. Geleneksel tekerlekli, paletli ve raylı sistemler gibi sınırlı hareket kapasitelerine sahip robotlara nispeten bacaklı robotların hareket performanslarının daha yüksek olması bu alanda çalışmaya eğilimi arttırmıştır. Yüksek hareket kapasitesi ve çok yönlülük günümüz teknolojisinde mobil robotlarda aranan en büyük özelliklerdir. Bu bakımdan bacaklı robotlar, robotik çalışmalarında önemli bir yer teşkil etmektedirler.

Robotik çalışmalarında en önemli olay robotların performanslarıdır. Buda sistemin sahip olduğu mekanizma ve harcadığı güce bağlıdır. Bu bakımdan robotların verimini arttırmak için daha az enerji ile daha çok iş yaptırmak hedef çalışmalardır. Son yıllarda denetim çalışmalarında oldukça yaygın kullanılan yapay zeka teknikleri yardımıyla daha gelişmiş algoritmalar oluşturulabilir. Sistemlerin denetlenmesinde geliştirilen denetim algoritmalarının performansı oldukça etkilediği bu tezde görülmüştür. Dinamik olarak modellenen dört bacaklı quadrupedal robot ve altı bacaklı hexapod robot modellerinin zıplayarak yürüme işlevlerinde tasarlanan yapay zeka denetim algoritmalarının performans sonuçları, bacaklı robot çalışmalarında yapay zeka denetim algoritmalarının kullanılması enerji tüketimi ve yürüme kararlılığı açısından daha iyi olacağını göstermiştir. Sonuç olarak, yapay zeka denetim algoritmalarının geleneksel klasik denetim algoritmalarından çok daha kararlı bir yapıya ve daha iyi bir performansa sahip oldukları görülmektedir.

16.3 Gelecek Çalışmalar

Gerçek bir sistemin denetiminden önce, uygun algoritmanın belirlenip sistem üzerinde başarılı olabileceğini göstermek, bilgisayar ortamında bir dizi sayısal benzetimlerin gerçekleştirilmesi ile mümkündür. Bunun için birebir sistemin tanımlanması mümkün olmadığından bazı kabuller neticesinde en yakın modeli elde edilir ve işlemler gerçekleştirilir. Bunun sonucunda elde edilen sistem cevapları gerçek uygulamada elde edilebilecek cevaplara en yakın sonuçlar olarak değerlendirilirler. Bacaklı robotların zıplayarak yürüme işlevine yönelik çalışmalarda geliştirilen başarılı algoritmalarla gerçek sistemlerde ne gibi cevapların alınabileceği sorusunun yanıtını bulabilmek için gerçek bacaklı robotun prototip imalatı gerçekleştirilmelidir. Gerçek bacaklı bir robotun imalatı ve geliştirilen denetim algoritmalarının robot üzerinde uygulaması hedef çalışmamızdır.

Ayrıca parametrik belirsizlikler ve zaman gecikmesi gibi etkilerin denetim algoritmalarının performansları üzerindeki etkileri araştırılacaktır.

KAYNAKLAR

- 1- Poulakakis, I., Smith, J.A., and Buehler, M., Modeling and Experiments of Untethered Quadrupedal Running with a Bounding Gait: The Scout II Robot The International Journal of Robotics Research, Apr 2005; vol. 24: pp. 239 - 256.
- 2- M.H. Raibert, Legged Robots that Balance, MIT Press, Cambridge MA, 1986.
- 3- Muybridge, E., The Human Figure in Motion, New York: Dover Publications. First edition, 1901 by Chapman and Hall, Ltd., London, 1955.
- 4- Muybridge, E., The Human Figure in Motion, New York: Dover Publications. First edition, 1899 by Chapman and Hall, Ltd., London, 1957.
- 5- Lucas. E., Huitieme recreation-la machine a marcher, Recreations Mathematiques 4:198-204, 1894.
- 6- Rygg, L.A., Mechanical Horse, Patent Number:491- 927, 1893.
- 7- Nilson, F.A., Supporting and Propelling Mechanism for Motor Vehicles, Patent Number: 1-574-679, 1926.
- 8- Ehrilch, A., Vehicle Proelled by Steppers, Patent Number: 1-691-233, 1928.
- 9- Ehrilch, A., Vehicle Proelled by Steppers, Patent Number: 1-691-233, 1928.
- 10- Snell, E., Reciprocating Load Carrier, Patent Number: 2-430-537, 1947.
- 11- Urschel, W.E., Walking Tractor. Patent Number: 2-491-064, 1949.
- 12- Shigley, R., The Mechanics of Walking Vehicles, Land Locomotion Laboratory, Report 7, Detroit, Michigan, 1928.
- 13- Corson, P.E., Walking Tractor, Patent Number: 2-822-878, 1958.
- 14- Bair, I.R., Amphibious Walking Vehicle, Patent Number: 2-918-738, 1959.
- 15- Morrison, R.A., Iron Mule Train, In Proceedings of Off-Road Mobility Research Symposium, International Society for Terrain Vehicle Systems, Washington, 381-400, 1968.
- 16- Liston , R.A., Increasing Vehicle Agility by Legs, The quadruped transporter, 38 th National Meeting of the Operations Research Society of America, 1970
- 17- Liston , R.A., and Mosher, R.S., A versatile walking truck, In Proceedings of The Transportation Engineering Conference, Institution of Civil Engineerings, London, 1968.
- 18- McGhee, R.B., Vehicular legged locomotion, In Advances in Automation and Robotics , JAI Press, 1983.
- 19- McGhee, R.B., Robot Locomotion with active terrain accommodation, In Proceedings of National Science Foundation Robotics Research Workshop, University of Rhode Island, 1980.

- 20- Klein, C.A., and Briggs, R.L., Use of active compliance in the control of legged vehicles, IEEE Trans, Systems, Man, and Cybernetics SMC-10: 393-400, 1980.
- 21- Özgüner, F., Tsai, S.J., and McGhee, R.B., An approach to the use of terrain-preview information in rough-terrain locomotion by a hexapod walking machine, International J. Robotics Research, 3: 134-146, 1984.
- 22- Gurfinkel, V.S., Gurfinkel, E.V., Shneider, A.Yu., Devjanin, E.A., Lensky, A.V., and Shitilman, L.G., Walking robot with supervisory control, Mechanism and Machine Theory, 16: 31-36, 1981.
- 23- Hirose, S., Nose, M., Kikuchi, H., and Umetani, Y., Adaptive gait control of a quadruped walking vehicle, International J. Robotics Research, 1: 253-277, 1984.
- 24- Hirose, S., Masui, T., Kikuchi, H., Fukuda, Y., and Umetani, Y., Titan III: A quadruped walking vehicle, In second International Symposium on Robotics Research, Tokyo Institute of Technology, Japan, 1985.
- 25- Hirose, S., A study of design and control of a quadruped walking vehicle, International J. Robotics Research, 3: 113-133, 1984.
- 26- McGhee, R.B., Finite state control of quadruped locomotion simulation, 5: 135-140, 1967.
- 27- McGhee, R.B., Some finite state aspects of legged locomotion, Mathematical Biosciences, 2: 67-84, 1968.
- 28- McGhee, R.B., A mathematical theory for legged locomotion systems, Midwest Symposium on Circuit, Theory, 1970.
- 29- McGhee, R.B., Control of legged locomotion systems, Proceedings of Joint Automatic Control Conference, San Francisco, 205-215, 1977.
- 30- McGhee, R.B., and Buckett, J.R., Hexapod, Interface Age, 2: 29-54, 1977.
- 31- McGhee, R.B., and Frank, A.A., On the stability properties of quadruped creeping gaits, Mathematical Biosciences, 3: 331-351, 1968.
- 32- McGhee, R.B., Iswandhi, G.I., Adaptive locomotion of a multilegged robot over rough terrain, IEEE Trans, Systems, Man, and Cybernetics SMC-9: 176-182, 1979.
- 33- McGhee, R.B., and Jain, A.K., Some properties of regularly realizable gait matrices, Mathematical Biosciences, 13: 179-193, 1972.
- 34- McGhee, R.B., and Kuhner, M.B., On the dynamic stability of legged locomotion systems, In advances in external Control of Human Extremities, Yugoslav Committee for electronics and automation, Belgrade, 431-442, 1969.
- 35- McGhee, R.B., and Orin, D.E., An interactive computer-control system for a quadruped robot, In symposium on theory and practice of robots and manipulators, 1973.

- 36- McGhee, R.B., and Pai, A.L., An approach to computer control for legged vehicles, *J.Terramechanics*, 11: 9-27, 1972.
- 37- McGhee, R.B., and Sun, S.S., On the problem of selecting a gait for a legged vehicle, In *Proceedings of the sixth IFAC Symposium on Automatic Control in space*, Erevan USSR, 1974.
- 38- Gurfinkel, V.S., Physical foundation of the stabilography, In *symposium international de posturographic smolenile*, 1973.
- 39- Gurfinkel, V.S., and Shink, MiL., *The control of posture and locomotion*, 1973.
- 40- Hirose, S., and Umetani, Y., The basic motion regulation system for a quadruped walking vehicle, *ASME Conference on Mechanism*, 1980.
- 41- Hirose, S., and Umetani, Y., *A Cartesian coordinates manipulator with Articulated Structure*, Tokyo of Institute Technology, 1981.
- 42- Russell, M., *Odex I: The firs functionoid* , *Robotics Age*, 5: 12-18, 1983.
- 43- Sutherland, I.E., and Ullner, M.K., Footprints in the asphalt, *International J. Robotics Research*, 3: 29-36, 1984.
- 44- Ooka, A., Ogi, K., Wada, Y., Kida, Y., Takemoto, A., Okamoto, K., and Yoshida, K., Intelligent robot system II, In *second International Symposium on Robotics Research*, Cambridge, MITPress, 341-347, 1985.
- 45- Shannon, B., *Personal Communication*, 1985.
- 46- Higdon, D.T., and Cannon, R.H., On the control of unstable multiple-output mechanical system, *ASME Winter Annual Meeting* , 1963.
- 47- Higdon, D.T., Automatic contro of inherently unstable systems with bounded control inputs, *Ph.D.Thesis*, Stanford University, Stanford, California, 1963.
- 48- Schaefer, J.F., On the bounded control of some unstable mechanical systems, *Ph.D.Thesis*, Stanford University, Stanford, California, 1965.
- 49- Schaefer, J.F., and Cannon, R.H., On the control of unstable mechanical systems, *International Federation of automatic control*, London, 1966.
- 50- Hemami, H., and Weimer, F.C., Further considerations of the inverted pendulum, In *proceedings of fourth Iranian conference on electrical engineering*, Pahlavi University, Iran, 697-708, 1974.
- 51- Vukobratovic, M., and Stepaneko, Y., On the stability of anthropomorphic systems, *Mathematical Biosciences*, 14: 1-38, 1972.
- 52- Vukobratovic, M., *Dynamics and control of anthropomorphic active mechanism*, Elsevier Scientific Publishing Co., 313-332, 1973.

- 53- Hemami, H., and Golliday, C.L., The inverted pendulum and biped stability, *Mathematical Biosciences*, 34: 95-110, 1977.
- 54- Kato, T., Takanishi, A., Jishikawa, H., and Kato, I., The realization of the quasi-dynamic walking by the biped walking machine, In fourth symposium on theory and practice of robots and manipulators, Polish Scientific Publishers, 341-351, 1983.
- 55- Miura, H., and Shimoyama, I., Dynamic walk of a biped, *International J. Robotics Research*, 3: 60-74, 1984.
- 56- Manter, J., Dynamics of quadrupedal walking, *J. Experimental Biology*, 15: 522-539, 1938.
- 57- Frank, A.A, An approach to the dynamic analysis and synthesis of biped locomotion machines, *Medical and Biological Engineering* , 8: 41-50, 1970.
- 58- Gubina, F., Hemami, H., and McGhee, R.B., On the dynamic stability of biped locomotion, *IEEE Trans, Biomedical Engineering BME-21*: 102-108, 1974.
- 59- Beletskii, V.V., Biped locomotion dynamics I, *AN SSSR, Mechanica Tverdogo*, 10(3): 3-14, 1975.
- 60- Beletskii, V.V., Dynamics of two-legged walking II, *AN SSSR, Mechanica Tverdogo*, 10(4): 3-13, 1975.
- 61- Ogo, K., Ganse, A., and Kato., Dynamic walking of biped walking machine aiming at completion of steady walking, Elsevier Scientific Publishing Co., 1980.
- 62- Tkanishi, A., Naito, G., Ishida, M., and Kato, I., Realization of plane walking by a biped walking robot WL-10R, Cambridge, MIT Press, 383,394, 1985.
- 63- Miura, H., and Shimoyama, I., Computer control of an unstable mechanism, *J. Fac. Eng.*, 17: 12-13, 1980.
- 64- Matsuoka, K., A odel of repetitive hopping movements in man, In *Proceedings of the fifth world Congress on theory of machines and mechanism*, 1979.
- 65- Brooks, R.A., A robot that walks; emergent behaviors from a carefully evolved network, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 14-19 May, vol.2, 1989.
- 66- Wallace, H.W., Jumping tank Vehicle, Patent number: 2-371-368, 1942.
- 67- Gabrielli, G., and Von Karmen, T.H., What price speed? *Mechanical Engineering*, 72:775-781, 1950.
- 68- Hildebrand, M., How animals run, *Scientific American*, 148-157, 1960.
- 69- Bekker, M.G., Introduction to terrain-vehicle systems, Ann Arbor: University of Michigan Press, 1969.
- 70- Sitek, G., Big muskie, *Heavy Duty Equipment Maintenance*, 4: 16-23, 1976.

- 71- Dawson, T.J. and Taylor, C.R., Energetic cost of locomotion in kangaroos, *Nature* 246: 313-314, 1973.
- 72- Grillner, S., Locomotion in vertebrates: Central mechanism and reflex interaction, *Physiology review* 55: 247-304, 1975.
- 73- Margaria, R., *Biomechanics and energetics of Muscular exercise*, Oxford, Oxford University Press, 1976.
- 74- Wetzel, M.C., and Stuart, D.G., Ensemble characteristics of cat locomotion and its neural control, *Progress in Neurobiology* 7: 1-98, 1976.
- 75- Herman, R.N., and Grillner, S., Stein, P.S., and Stuart, D.G., *Neural control of locomotion*, New York: Plenum Press, 1976.
- 76- Pearson, K., The control of walking, *Scientific American*, 72-86, 1976.
- 77- Marr, D., Artificial intelligence-A personal view, *MIT Artificial Intelligence Laboratory Memo* 355, 1976.
- 78- Cavagna, G.A., and Kaneko, M., Mechanical work and efficiency in level walking and running., *J. Physiology*, London, 268: 467-481, 1977.
- 79- Alexander, R. McN., and Goldspink, G., *Mechanics and energetics of animal locomotion*, London, Chapman and Hall, 1977.
- 80- McMahon, T.A., and Greene, P.R., Fast running tracks, *Scientific American*, 239: 148-163, 1978.
- 81- McMahon, T.A., and Greene, P.R., The influence of track compliance on running, *J. Biomechanics* 12: 893-904, 1979.
- 82- Matsuoka, K., A mechanical model of repetitive hopping movements, *Biomechanisms*, 5: 251-258, 1980.
- 83- Hoyt, D.F., and Taylor, C.R., Gait and the energetics of locomotion in horses, *Nature* 292: 239-240, 1981.
- 84- Murphy, K.N. Trotting and Bounding in a simple planar model, MS Thesis, Carnegie-Mellon University, Pennsylvania, 1984.
- 85- Murphy, K.N. and Raibert, M.H., Trotting and Bounding in a planar two-legged model, In fifth symposium on theory and practice of robots and manipulators, MIT Press, 411-420, 1985.
- 86- Sutherland, I.E., and Ullner, M.K., *Walking robot*, Pittsburgh : The marcian chronicles, Inc, 1984.
- 87- McMahon, T.A., *Muscles, Reflexes, and Locomotion*, Princeton University Press, 1984.
- 88- Hodgins, J., Koechling, J., and Raibert, M.H., Running experiments with a planar biped, Third international symposium on robotics research, Cambridge, MIT Press, 1985.

- 89- Hildreth, E.C., and Hollerbach, J.M. The computational approach to vision and motor control, In Handbook of physiology, 1985.
- 90- Song, S., and K.J. Waldron, Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle, MIT Press, Cambridge MA, 1989.
- 91- Pratt, J.E., Exploiting Inherent Robustness and Natural Dynamics in the Control of Bipedal Walking Robots, Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- 92- Guckenheimer, J., and S. Johnson. Planar hybrid systems. In Hybrid Systems II, Lecture Notes in Computer Science, pp. 202-225, Springer-Verlag, 1999.
- 93- Buehler, M., Saranli, U., Papadopoulos, D., and Koditschek, D. E., "Dynamic locomotion with four and six-legged robots," International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, Montreal, Canada, August, 2000.
- 94- Hirose, S "Super Mechano-System: New Perspective for Versatile Robotic System", Experimental Robotics VII, in Lecture Notes in Control and Information Sciences 271, D.Rus and S. Singh (eds), Springer-Verlag, pp. 281-289, 2001.
- 95- Saranli, U., Dynamic locomotion with a Hexapod Robot, Michigan University, Michigan, USA, 2002.
- 96- McMordie, D., Towards pronking with a hexapod robot, McGill University, Montreal, Canada, 2002.
- 97- Neville, N., and M. Buehler, "Towards Bipedal Running of a Six Legged Robot." 12th Yale Workshop on Adaptive and Learning Systems, May 2003.
- 98- Campbell, D., and Buehler, M., "Preliminary Bounding Experiments in a Dynamic Hexapod", In Bruno Siciliano and Paolo Dario, editors, Experimental Robotics VIII, Springer-Verlag, 2003.
- 99- Sato, A., A Planar Hopping Robot with One Actuator: Design, Smulation, and Experimental Results, McGill University, Montreal, Canada, 2004.
- 100- Poulakakis, I., Smith, J.A., and Buehler, M., Modeling and Experiments of Untethered Quadrupedal Running with a Bounding Gait: The Scout II Robot The International Journal of Robotics Research, vol. 24, Apr 2005, pp. 239 - 256.
- 101- Soyguder, S. And Alli, H. " Design and prototype of a six-legged walking insect robot", Industrial Robot –An International Journal, Vol: 34(5), pp: 412-422, 2007.
- 102- Soyguder, S., Ve Alli, H., Robotürk SA-2 Sekiz Bacaklı Robotun Tasarımı Ve Denetimi, Endüstri ve Otomasyon Elektrik - Elektronik - Makina - Bilgisayar - Kontrol Sistemleri Dergisi , ISSN No:1301-3610/137, s.s.16-21 , Ağustos, 2008.
- 103- Soyguder, S., ve Alli, H., Zıplayan Hexapod Robot, Iv. International Convention Competition (4. Uluslararası Buluş Yarışması), Kocaeli-Türkiye, 2009.

- 104- Murthy, S.S., Path control, In dynamically stable legged locomotion, Carnegie Mellon University, CMU –RI-TR-83-20, 1983.
- 105- Wettergreen, D., Thorpe, C., and Whittaker, W.L., “Exploring Mount Erebus by Walking Robot,” International Conference of Intelligent Autonomous Systems, pp. 72-81, 1993.
- 106- Robin R. Murphy, "Rescue Robots at the World Trade Center," Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, special issue on Disaster Response Robotics, vol. 102, no. 1019, pp. 794-802, 2003.
- 107- Kazuo Tani, Kiichi Ikeda, Tomoaki Yano, Shuuji Kajita, Osamu Matsumoto, “The Concept of Model Free Robotics for Robots to act in Uncertain Environments,” Proceedings of the 1993 IEEE/Tsukuba International Workshop on Advanced Robotics, pp. 85-90, Tsukuba, Japan, 1993.
- 108- Kajita, S., and Tani, K., “Adaptive gait control of a biped robot based on realtime sensing of the ground,” Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 570-577, 1996.
- 109- Jessica Hodgins, “Legged Robots on Rough Terrain: Experiments in Adjusting Step Length,” Ph.D Thesis, Dept. of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, 1989.
- 110- S. Kajita and K. Tani, “Study of dynamic biped locomotion on rugged terrain - Derivation and application of the linear inverted pendulum mode -,” Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1405-1411, 1991.
- 111- P. V. Nagy, W. L. Whittaker, S. Desa, “A Walking Prescription for Statically-Stable Walkers Based on Walker/Terrain Interaction,” Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 149-156, 1992.
- 112- R. J. Full, and D. E. Koditschek, “Templates and anchors: Neuromechanical hypotheses of legged locomotion on land,” Journal of Experimental Biology, vol. 202, pp. 3325-3332, 1999.
- 113- R. McN. Alexander and A. Vernon, “Mechanics of hopping by kangaroos (Macropodidae),” Journal of Zoology, London, vol. 177, no. 265-303, 1975.
- 114- R. M. Alexander and A. S. Jayes. “Vertical movement in walking and running,” Journal of Zoology, London, vol. 185, pp. 27-40, 1978.
- 115- R. Blickhan, “The spring-mass model for running and hopping,” Journal of Biomechanics, vol. 22, pp. 1217-1227, 1989.
- 116- R. Blickhan and R. J. Full. “Similarity in multilegged locomotion: Bouncing like a monopode,” Journal of Comparative Physiology, vol. 173, pp. 509-517, 1993.

- 117- C. T. Farley, J. Glasheen, and T. A. McMahon, "Running springs: Speed and animal size," *Journal of Experimental Biology*, vol. 185, pp. 71-86, 1993.
- 118- Akihiro Sato, *A Planar Hopping Robot with One Actuator: Design, Simulation, and Experimental Results*, McGill University, Montreal, Canada, 2004.
- 119- M. H. Raibert, "Legged Robots That Balance," MIT Press, Cambridge, MA, 1986.
- 120- H. B. Brown, G. Z. Zeglin, "The Bow Leg Hopping Robot," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1998.
- 121- U. Saranli, W. J. Schwind, and D. E. Koditschek, "Toward the Control of a Multi-Jointed Monoped Runner," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2676-2682, 1998.
- 122- I. Poulakakis, J. A. Smith and M. Buehler, "Experimentally Validated Bounding Models for the Sout II Quadrupedal Robot," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004.
- 123- S.H. Hyon, T. Mita, "Development of a biologically inspired hopping robot - Kenken," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 4 , pp. 3984 – 3991, May 2002.
- 124- S. Kajita, T. Nagasaki, K. Yokoi, K. Kaneko, K. Tanie, "Running pattern generation for a humanoid robot," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 2755 – 2761, 2002.
- 125- Kale Harbick and Gaurav S. Sukhatme, "Controlling Hopping Height of a Pneumatic Monopod," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3998-4003, 2002.
- 126- H. Geyer, A. Seyfarth and R. Blickhan, "Natural Dynamics of Spring-Like Running: Emergence of Selfstability," *CLAWAR*, 2002.
- 127- Robert P. Ringros, "Self-stabilizing running," Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, February 1997.
- 128- T. M. Kubow and R. J. Full, "The Role of the Mechanical System in Control: A Hypothesis of Self-stabilization in Hexapedal Runners," *Philosophical Transaction of the Royal Society of London Series B – Biological Sciences*, vol. 354, no. 1385, pp. 854-862, 1999.
- 129- T. McGeer, "Passive Bipedal Running", Technical Report, CSS-IS TR 89-02, Centre For Systems Science, Simon Fraser University, Burnaby, BC, Canada, 1989.
- 130- Mojtaba Ahmadi, "Stable Control of a One-Legged Robot Exploiting Passive Dynamics," Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, McGill University, Montreal, QC, Canada, March 1998.

- 131- S. Talebi, I. Poulakakis, E. Papadopoulos, and M. Buehler, "Quadruped Robot Running with a Bounding Gait," International Symposium on Experimental Robotics, Honolulu, HI, December 2000.
- 132- Uluc Saranli, Martin Buehler, and Daniel E. Koditschek, "RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot," International Journal of Robotics Research, vol. 20, no. 7, pp. 616-631, July 2001.
- 133- M. Buehler, U. Saranli, and D. E. Koditschek (McGill University, The Regents of the University of Michigan), Single Actuator Per Leg Robotic Hexapod, US Patent, p. 6,481,513 B2, USA, 2002.
- 134- Charles Steeves, "Design and Behavioural Control of a Dynamic Quadruped with Active Wheels," M.Eng. thesis, Department of Mechanical Engineering, McGill University, Montreal, QC, Canada, April 2003.
- 135- Thomas A. McMahon and George C. Cheng, "The mechanics of running: How does stiffness couple with speed?" Journal of Biomechanics, vol. 23, pp. 65-78, 1990.
- 136- Raibert, M. H., Brown, H. B., Jr., Chepponis, M., Hodgins, J., Koechling, J., Dustman, D., Brennan, W. K., Barrett, D. S., Thompson, C. M., Hebert, J. D., Lee, W., and Borvansky, L., "Dynamically Stable Legged Locomotion (September 1985-September 1989)," AI Technical Report 1179, Massachusetts Institute of Technology, MA, USA, 1989.
- 137- E.T. Whittaker and G.N. Watson, "A Course of Modern Analysis," Cambridge University Press, 1902, reprinted 1973.
- 138- Shuuji Kajita, "Dynamic control of a biped in linear inverted pendulum mode," Mechanical Engineering Laboratory Report No. 171, Mechanical Engineering Laboratory, Tsukuba, Japan, March 1996, In Japanese.
- 139- Ioannis Poulakakis, "On the Passive Dynamics of Quadrupedal Running," M.Eng. Thesis, Department of Mechanical Engineering, McGill University, Montreal, Canada, 2002.
- 140- D. McMordie, Towards pronking with a hexapod robot, McGill University, Montreal, Canada, 2002.
- 141- Joel D. Weingarten, Gabriel A. D. Lopes, Martin Buehler, Richard E. Groff, Daniel E. Koditschek, "Automated Gait Adaptation for Legged Robots," Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, LA, April 2004
- 142- Soyguder, S. And Alli, H.(2007) " Design and prototype of a six-legged walking insect robot", Industrial Robot –An International Journal, Vol: 34(5), pp: 412-422.

- 143- I. Poulakakis, J.A. Smith, M. Buehler, "On the Dynamics of Bounding and Extensions Towards the Half-Bound and the Gallop Gaits", Proc. of the International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM), Kyoto, Japan, March 2003.
- 144- D. Campbell and M. Buehler, "Preliminary Bounding Experiments in a Dynamic Hexapod," In Bruno Siciliano and Paolo Dario, editors, *Experimental Robotics VIII*, p. 612-621, Springer-Verlag, 2003.
- 145- Raibert, M. H., Brown, H. B., Jr., Chepponis, M., Hastings, E., Murthy, S. S., Wimberly, F. C., "Dynamically Stable Legged Locomotion--Second Annual Report," CMU--RI--TR--83--1, Robotics Institute, Carnegie-Mellon University, 1983.
- 146- P. Gregorio, M. Ahmadi, and M. Buehler, "Experiments with an Electrically Actuated Planar Hopping Robot ," In T. Yoshikawa and F. Miyazaki, editors, *Experimental Robotics III*, In "Lecture Notes in Control and Information Sciences 200," p. 269-281, Springer Verlag, 1994.
- 147- M. Ahmadi and M. Buehler, "Stable Control of a Simulated One-Legged Running Robot with Hip and Leg Compliance," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 13, no. 1, pp. 96-104, Feb 1997.
- 148- Brown, H.B., Zeglin, G.Z., "The Bow Leg Hopping Robot," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1998.
- 149- Kale Harbick and Gaurav S. Sukhatme, "Speed Control of a Pneumatic Monopod using a Neural Network," *Technical Report IRIS-02-413*, Institute for Robotics and Intelligent Systems, University of Southern California, 2002
- 150- Koechling and M, H. Raibert, "How fast can a legged robot run?" In *Symposium in Robotics*, DSC-Vol.11, K. Youcef-Toumi, H. Kazerooni (eds.), American Society of Mechanical Engineers, New York, . 1988.
- 151- Matthew D. Berkemeier and Kamal V. Desai, "Control of hopping height in legged robots using a neural-mechanical approach," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1695-1701, 1998.
- 152- Richard Altendorfer, Daniel E. Koditschek, Philip Holmes, "Towards a Factored Analysis of Legged Locomotion Models," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 37-44, 2003.
- 153- Eduardo D. Sontag, "A remark on the converging-input converging-state property," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 48, no. 2, pp. 313-314, 2003.
- 154- R. McN. Alexander. Three uses for springs in legged locomotion. *International Journal of Robotics Research*, 9(2):53{61, 1990.

- 155- R. Blickhan. The spring-mass model for running and hopping. *Journal of Biomechanics*, 22:1217{1227, 1989.
- 156- R. Blickhan and R. J. Full. Similarity in multilegged locomotion: Bouncing like a monopode. *Journal of Comparative Physiology, A*. 173:509{517, 1993.
- 157- C. T. Farley, J. Glasheen, and T. A. McMahon. Running springs: Speed and animal size. *Journal of Biomechanics*, 185:71{86, 1993.
- 158- Saranli, U., Dynamic locomotion with a Hexapod Robot, Michigan University, Michigan, USA, 2002.
- 159- W. J. Schwind and D. E. Koditschek. Control of forward velocity for a simplified planar hopping robot. In *Proceedings of the IEEE International Conference On Robotics and Automation*, Nagoya, Japan, May 1995.
- 160- W. J. Schwind and D. E. Koditschek. Characterization of monoped equilibrium gaits. In *Proceedings of the IEEE International Conference On Robotics and Automation*, Albuquerque, NM, April 1997.
- 161- W. J. Schwind. Spring Loaded Inverted Pendulum Running: A Plant Model. PhD thesis, Electrical Engineering: Systems. The University of Michigan, 1998.
- 162- M. H. Raibert. *Legged robots that balance*. MIT Press, Cambridge MA, 1986.
- 163- Daniel E. Koditschek and Martin BÄuhler. Analysis of a simplified hopping robot. *International Journal of Robotics Research*, 10(6):587{605, December 1991.
- 164- R. T. McLoskey and J. W. Burdick. Periodic motions of a hopping robot with vertical and forward motion. *International Journal of Robotics Research*, 12(3):197{218, 1993.
- 165- A. F. Vakakis, J. W. Burdick, and T. K. Caughey. An 'interesting' strange attractor in the dynamics of a hopping robot. *International Journal of Robotics Research*, 10(6):606{618, December 1991.
- 166- Jessica Kate Hodgins. *Legged Robots on Rough Terrain: Experiments in Adjusting Step Length*. PhD thesis, Carnegie Mellon University, November 1989. CMU-CS-89-151.
- 167- Pratt, J.E., *Exploiting Inherent Robustness and Natural Dynamics in the Control of Bipedal Walking Robots*, Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- 168- R. J. Full. Integration of individual leg dynamics with whole body movement in arthropod locomotion. In R. D. Beer, R. E. Ritzmann, and T. McKenna, editors, *Biological Neural Networks in Invertebrate Neuroethology and Robotics*, pages 3{20. Academic Press, San Diego, CA, 1993.
- 168- MathWorks, Matlab ver. 7.1 and Simulink ver. 4.0, Natick, MA, 2003, <http://www.mathworks.com/>.
- 169- M. H. Raibert. *Legged robots that balance*. MIT Press, Cambridge MA, 1986.

- 170- Saranli, U., Dynamic locomotion with a Hexapod Robot, Michigan University, Michigan, USA, 2002.
- 171- I. Poulakakis, J. A. Smith and M. Buehler, "Experimentally Validated Bounding Models for the Sout II Quadrupedal Robot," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004.
- 172- T. W. B. Kibble and F. H. Berkshire, "Classical Mechanics," 4th ed., Addison Wesley, 1997.
- 173- Pratt, J.E., Exploiting Inherent Robustness and Natural Dynamics in the Control of Bipedal Walking Robots, Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- 174- Akihiro Sato, A Planar Hopping Robot with One Actuator: Design, Simulation, and Experimental Results, McGill University, Montreal, Canada, 2004.
- 175- H. Michalska, M. Ahmadi, and M. Buehler, "Vertical Motion Control of a Hopping Robot," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2712-2717, Minneapolis, MN, April 1996.
- 176- Mojtaba Ahmadi, "Stable Control of a One-Legged Robot Exploiting Passive Dynamics," Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, McGill University, Montreal, QC, Canada, March 1998.
- 177- William J. Schwind and Daniel E. Koditschek, "Control of Forward Velocity for a Simplified Planar Hopping Robot," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 1, pp. 691-696, 1995.
- 178- Richard Altendorfer, Daniel E. Koditschek, Philip Holmes, "Towards a Factored Analysis of Legged Locomotion Models," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 37-44, 2003.
- 179- J. Guckenheimer and P. Holmes, "Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems and Bifurcations of Vector Fields," Springer-Verlag, 1983.
- 180- J. Koechling, "Gait as Mechanical Oscillation", chapter in Dynamically Stable Legged Locomotion, Robotics Institute Technical Report CMU-LL-4-1985, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 1985.
- 181- D. McMordie, Towards pronking with a hexapod robot, McGill University, Montreal, Canada, 2002.
- 182- Z. Li and J. He, "An Energy Perturbation Approach to Limit Cycle Analysis in Legged Locomotion Systems", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1989 - 1994, 1990.

- 183- I. A. Hiskens, "Stability of hybrid system limit cycles: Application to the compass gait biped robot", Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, FL, December 2001.
- 184- T.S Parker and L.O. Chua, "Practical Numerical Algorithms for Chaotic Systems," Springer-Verlag, New York, NY, 1989.
- 185- R. Seydel, "Practical Bifurcation and Stability Analysis," Springer-Verlag, New York, 2nd edition, 1994.
- 186- T. McGeer, "Passive Bipedal Running", Technical Report, CSS-IS TR 89-02, Centre For Systems Science, Simon Fraser University, Burnaby, BC, Canada, 1989.
- 187- H. K. Khalil, "Nonlinear Systems," 2nd ed., Prentice Hall, 1996.
- 188- Kuznetsov Y., "Elements of Applied Bifurcation Theory," 2nd ed., Springer-Verlag, 1998.
- 189- Nicholas B. Tufillaro, Jeremiah Reilly, and Tyler Abbott, "An experimental approach to nonlinear dynamics and chaos," Addison-Wesley, 1992.
- 190- Daniel E. Koditschek and Martin Buehler, "Analysis of a Simplified Hopping Robot", The International Journal of Robotics Research, vol. 10, no. 6, pp.587 – 605, 1991.
- 191- Furusho J., Sano A., Sakaguchi M. and Koizumi E., "Realization of Bounce Gait in a Quadruped Robot with Articular-joint-type Legs", in Proc of the IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, pp. 697-702, Japan 1995.
- 192- Kimura, H., S. Akiyama, and K. Sakurama, "Realization of Dynamic Walking and Running of the Quadruped Using Neural Oscillator", Autonomous Robots, Vol.7, No.3, pp. 247-258, 1999.
- 193- Nichol J. G. and Waldron K. J., "Biomimetic Leg Design for Untethered Quadruped Gallop", Int. Conf. on Climbing and Walking Robots (CLAWAR), pp. 49-54, France, 2002.
- 194- Berkemeier M. D., "Modeling the Dynamics of Quadrupedal Running", in Int. J. Of Robotics Research, Vol. 17, No. 9, pp. 971-985, 1998.
- 195- Ghigliazza R. M., Altendorfer R., Holmes P. and Koditschek D. E., "Passively Stable Conservative Locomotion", in SIAM J. of Applied Dynamical Systems, Vol. 2, No. 2, pp. 187-218, 2003.
- 196- Poulakakis I., Papadopoulos E. and Buehler M., "On the Stable Passive Dynamics of Quadrupedal Running", Proc of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1368-1373, Taiwan, 2003.
- 197- Formalsky A., Chevallereau C. and Perrin B., "On Ballistic Walking Locomotion of a Quadruped", in Int. J. of Robotics Research, Vol. 19, No. 8, pp. 743-761, 2000.

- 198- Schmiedeler J. P. and Waldron K. J., "The Mechanics of Quadrupedal Galloping and the Future of Legged Vehicles", *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 18, No. 12, pp. 1224-1234, 1999.
- 199- Herr H. M. and McMahon T. A., "A Galloping Horse Model", in *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 20, No. 1, pp. 26-37, 2001.
- 200- Talebi S., *Compliant Running and Step Climbing of the Scout II Platform*, M. Eng. Thesis, McGill University, Montreal, QC, Canada, November 2000.
- 201- Yamamoto Y., Fujita M., De Lasa M., Talebi S., Jewell D., Playter R. and Raibert M., "Development of Dynamic Locomotion for the Entertainment Robot – Teaching a New Dog Old Tricks, 4th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots (CLAWAR), pp. 695-702, 2001.
- 202- Soyguder, S., ve Alli, H., Dört Bacaklı Quadrupedal Zıplayan Bir Robotun Dinamik Modeli Ve Sayısal Benzetimi, TOK - Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ), 13-15 Kasım - İstanbul, 2008.
- 203- Soygüder, S., ve Alli, H., Tek Bacaklı Zıplayan Bir Robotun Dinamik Modeli Ve Sayısal Benzetimi, TOK - Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ), 13-15 Kasım - İstanbul, 2008.
- 204- Buehler M., "Dynamic Locomotion with One, Four and Six-Legged Robots", in *J. of the Robotics Society of Japan*, 20 (3), 2002, pp. 15-20.
- 205- McMordie, D., Prahacs, C., and Buehler, M., Towards a dynamic actuator model for a hexapod robot. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Taipei, Taiwan, 2003.
- 206- McMordie, D., and Buehler, M., "Towards Pronking with a Hexapod Robot", 4th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots, Karlsruhe, Germany, September 24 – 26, 2001.
- 207- Saranlı, U., and Koditschek, D.E., "Back Flips with a Hexapedal Robot" *Robotics and Automation*, 2002. *Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on*, Volume: 3, 2002, pp.2209-2215.
- 208- Komsuoglu, H., McMordie, D., Saranlı, D Moore, N., Buehler, M., Koditschek, D.E., "Proprioception Based Behavioral Advances in Hexapod Robot", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Seoul, Korea, May 21-26, 2001, pp 3650 – 3655.
- 209- Cavagna, G.A., Elastic bounce of the body, *J. Applied Physiology* 29: 279-282, 1970.
- 210- Saranlı, U., Buehler, M., and Koditschek, D.E., Design, modeling and control of a compliant hexapod robot. In *Proc. IEEE Int. Conf. Rob. Aut.*, San Francisco, CA, 2000, pp. 2589–2596.

- 211- Moree, E.Z. Campbell, D. Grimmering, F. Buehler, M. Reliable Stair Climbing in the Simple Hexapod 'RHex', Robotics and Automation, Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on, Vol.3, 2002, pp. 2222-2227.
- 212- Zadeh, L.A., "Fuzzy Sets" Information and Control, Vol.8, pp. 338-353, Academic Press, New York, 1965.

ÖZGEÇMİŞ

Servet SOYGÜDER, 1977 yılında Van’ da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Van’ da tamamladı. 1997 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Bölümünde lisans eğitimine başladı. 2001 yılında Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden birincilik ile mezun oldu. Aynı yıl Makine Teorisi ve Dinamiği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisansa başladı. 2004 yılında Yüksek Lisansı başarı ile bitirerek aynı ana bilim dalında Doktora başladı. Şu an Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.