

**14 SERBESTLİK DERECELİ İKİ AYAKLI BİR ROBOTUN
DİNAMİK YÜRÜME HAREKETİNİN KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. K. Oytun YAPICI

Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Programı : SİSTEM DİNAMİĞİ VE KONTROL

HAZİRAN 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**14 SERBESTLİK DERECELİ İKİ AYAKLI BİR ROBOTUN
DİNAMİK YÜRÜME HAREKETİNİN KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. K. Oytun YAPICI

(503051621)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008

Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Haziran 2008

Tez Danışmanı : Y.Doç.Dr. Z. Yağız BAYRAKTAROĞLU

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ahmet KUZUCU (İ.T.Ü.)

Prof. Dr. Hakan TEMELTAŞ (İ.T.Ü.)

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Bu çalışmayı, ülkemizin bilimsel gelişmesine katkı sağlayan bilim insanları ile bilim ve teknoloji aşığı merhum babamın anısına ithaf ediyorum. Bu çalışma boyunca manevi destek sağlayan aileme, danışmanım Y. Doç. Dr. Z. Yağız BAYRAKTAROĞLU'na ve maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a da teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2008

K. Oytun YAPICI

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Mevcut Çalışmalar	1
1.2. Sunuş Planı	5
2. KİNEMATİK	6
2.1. Kinematik Yapı ve Boyutlar	6
2.2. Düz Kinematik	9
2.3. Ters Kinematik	10
3. DİNAMİK	12
3.1. Tekrarlamalı Lagrange Algoritması	13
3.1.1. Tek Destek Fazı	13
3.1.2. Çift Destek Fazı	13
3.2. Tekrarlamalı Newton-Euler Algoritması	14
3.2.1. Tek Destek Fazı	15
3.2.2. Çift Destek Fazı	22
4. İKİ AYAKLI YÜRÜME HAREKETİNİN MODELLENMESİ	24
4.1. Sıfır Moment Noktası	24
4.1.1. Doğrusal Ters Sarkaç Modu	26
4.2. Statik Yürüme	28
4.2.1. Ayak Yörüngeleri	28
4.2.2. Ağırlık Merkezi Yörüngesi	37
4.3. Dinamik Yürüme	38
4.3.1. Ağırlık Merkezi Yörüngesi	38
4.3.1.1. DTSM nin Analitik Çözümü	39
4.3.1.2. DTSM nin Sayısal Çözümü	44
4.3.1.3. DTSM nin Servo Kontrol Yaklaşımı ile Çözümü	46
5. KONTROL	50
5.1. Hesaplanmış Moment Yöntemi ile Kontrol	50
5.2. Dinamik Yürümenin Kontrolü	51
5.2.1. Dinamik Yürümenin Açık Çevrim Kontrolü	52
5.2.2. Dinamik Yürümenin Kapalı Çevrim Kontrolü	52
5.3. Kontrolcünün Genel Yapısı ve Blok Diyagramı	54

6. BENZETİMLER	55
6.1. İleri Yürüme	55
6.2. Merdiven Çıkma	60
6.3. Dönerek Yürüme	61
6.4. Yan Yan Yürüme	63
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	65
KAYNAKLAR	66
EKLER	71
A. 5 KM/SAAT LİK YÜRÜME HIZI İÇİN BENZETİM SONUÇLARI	71
B. 2.4 KM/SAAT LİK YÜRÜME HIZI İÇİN BENZETİM SONUÇLARI	76
C. 1 KM/SAAT LİK YÜRÜME HIZI İÇİN BENZETİM SONUÇLARI	81
D. MERDİVEN ÇIKMA İÇİN BENZETİM SONUÇLARI	86
E. DÖNEREK YÜRÜME İÇİN BENZETİM SONUÇLARI	91
F. YAN YAN YÜRÜME İÇİN BENZETİM SONUÇLARI	96
ÖZGEÇMİŞ	102

KISALTMALAR

SMN	:	Sıfır Moment Noktası
DTSM	:	Doğrusal Ters Sarkaç Modu
AIST	:	Advanced Industrial Science and Technology
METI	:	Ministry of Economy, Trade and Industry
KAIST	:	Korea Advanced Institute of Science and Technology

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1 Model Öngörülü Kontrolcünün Parametreleri	48
Tablo G. 1 Uzunların Kütle ve Atalet Tensörü Değerleri	101
Tablo G. 2 Uzunların Ağırlık Merkezlerinin Yer Vektörleri (Sol Ayak Yerde).....	101

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : WABIAN-2R	2
Şekil 1.2 : HRP-3P	2
Şekil 1.3 : Honda Tarafından Yapılmış Prototipler	3
Şekil 1.4 : SDR-4X	3
Şekil 1.5 : JOHNNIE	4
Şekil 1.6 : LOLA	4
Şekil 1.7 : HUBO	5
Şekil 2.1 : Kinematik Yapı	6
Şekil 2.2 : Boyutlar	7
Şekil 2.3 : ADAMS Modeli	8
Şekil 2.4 : Kinematik Hesaplarda Kullanılan Parametreler	9
Şekil 3.1 : Dinamik Hesaplarda Kullanılan Parametreler(Sol Ayak Yerde)	16
Şekil 3.2 : Dinamik Hesaplarda Kullanılan Parametreler(Sağ Ayak Yerde)	17
Şekil 3.3 : Kinematik Zincirdeki Dallanma	18
Şekil 3.4 : Ayaktan Ölçülen Kuvvetlerin Eksen Takımları	23
Şekil 4.1 : Destek Çokgenleri a) Tek Ayak Yerde b) İki Ayak Yerde	24
Şekil 4.2 : Mekanizmaya Etkiyen Kuvvetler ve Momentler (Yandan Görünüş).....	25
Şekil 4.3 : Mekanizmaya Etkiyen Kuvvetler ve Momentler(Önden Görünüş) .	25
Şekil 4.4 : Ağırlık Merkezindeki İvmeler(Önden ve Yandan Görünüş)	27
Şekil 4.5 : Eliptik Ayak Yörüngesi.....	28
Şekil 4.6 : Eliptik Ayak Yörüngesi X Eksenli Konum, Hız ve İvme Referansları	29
Şekil 4.7 : Eliptik Ayak Yörüngesi Z Eksenli Konum, Hız ve İvme Referansları	30
Şekil 4.8 : Filtrelenmiş Ayak Yörüngesi X Eksenli Konum, Hız ve İvme Referansları	31
Şekil 4.9 : Filtrelenmiş Ayak Yörüngesi Z Eksenli Konum, Hız ve İvme Referansları	32
Şekil 4.10 : Yörünge Planlayıcısı ile Elde Edilmiş Ayak Yörüngesi	33
Şekil 4.11 : $T = 1$ sn'lik Periyod ve Sırasıyla $t_d = 0$, $t_d = 0.1$, $t_d = 0.2$ sn'lik Gecikme Zamanları İçin Ayak Yörüngeleri	34
Şekil 4.12 : $T = 1$ sn'lik Periyod ve $t_d = 0.2$ sn'lik Gecikme Zamanı için Ayak Yörüngesinin Konum, Hız ve İvme Referansları	35
Şekil 4.13 : $h_1 = 0.15m$ ve $h_2 = 0.05m$ Değerleri ile Elde Edilmiş Ayak Yörüngesi	36
Şekil 4.14 : $h_1 = 0.15m$ ve $h_2 = 0.05m$ Değerleri ile Elde Edilmiş Ayak Yörüngesinin Z Eksenli Konum, Hız ve İvme Referansları	37
Şekil 4.15 : Sıfır Moment Noktası Referansı	38
Şekil 4.16 : Sıfır Moment Noktasının Yeri ve Kararlılık Sınırları	39
Şekil 4.17 : Ters Sarkacın Cephe ve Profil Düzemleri için Sınır Koşulları	40

Şekil 4.18	: Sıfır Moment Noktasının ve Analitik Çözümle Elde Edilmiş Ağırlık Merkezi Yörüngesinin X ve Y Eksenini Referansları	41
Şekil 4.19	: Sıfır Moment Noktasının ve Analitik Çözümle Elde Edilmiş Ağırlık Merkezi Yörüngesinin Yer Düzlemindeki Referansı	42
Şekil 4.20	: Kırpılmış Ağırlık Merkezi Yörüngesinin X Eksenini Konum, Hız ve İvme Referansları	43
Şekil 4.21	: Kırpılmış Ağırlık Merkezi Yörüngesinin Y Eksenini Konum, Hız ve İvme Referansları	44
Şekil 4.22	: SMN Referansı, Takip Edilen SMN Referansı ve Sayısal Çözümle Elde Edilmiş Ağırlık Merkezi Yörüngesinin X ve Y Eksenini Referansları	45
Şekil 4.23	: DTSM'nin Servo Kontrol ile Çözümü(Blok Diyagramı)	46
Şekil 4.24	: Ağırlık Merkezi Yörüngesinin SMN Referansından Önce Değişimi	47
Şekil 4.25	: SMN Referansı, Takip Edilen SMN Referansı ve Servo Kontrol Yaklaşımı ile Elde Edilmiş Ağırlık Merkezi Yörüngesinin X ve Y Eksenini Referansları	49
Şekil 5.1	: Hesaplanmış Moment Yöntemi(Ters Dinamik Servo Döngüsünün İçinde).....	50
Şekil 5.2	: Hesaplanmış Moment Yöntemi(Ters Dinamik Servo Döngüsünün Dışında)	51
Şekil 5.3	: Gövdenin ve Gövdeden Çıkan Uzunlukların Ağırlık Merkezleri	52
Şekil 5.4	: Gövdeye Yerleştirilmiş Motorlar	53
Şekil 5.5	: Ayak Ortasındaki Moment ile Gövde Motorundaki Dengeleyici Moment	53
Şekil 5.6	: Kontrolcünün Genel Yapısı ve Blok Diyagramı	54
Şekil 6.1	: 30 cm'lik Adımlarla İleri Yürüme Hareketinin Üstüste Bindirilmiş Görüntüsü.....	56
Şekil 6.2	: 50 cm'lik Adımlarla İleri Yürüme Hareketinin Üstüste Bindirilmiş Görüntüsü	56
Şekil 6.3	: 70 cm'lik Adımlarla İleri Yürüme Hareketinin Üstüste Bindirilmiş Görüntüsü	56
Şekil 6.4	: $T = 0.5$ sn'lik Periyod ve 30 cm'lik, 50 cm'lik ve 70 cm'lik Adım Boyları için SMN Referansı, Takip Edilen SMN Referansı ve Ağırlık Merkezi Yörüngesi	57
Şekil 6.5	: $T = 0.75$ sn'lik Periyod ve 30 cm'lik, 50 cm'lik ve 70 cm'lik Adım Boyları için SMN Referansı, Takip Edilen SMN Referansı ve Ağırlık Merkezi Yörüngesi.....	58
Şekil 6.6	: $T = 1$ sn'lik Periyod ve 30 cm'lik, 50 cm'lik ve 70 cm'lik Adım Boyları için SMN Referansı, Takip Edilen SMN Referansı ve Ağırlık Merkezi Yörüngesi	59
Şekil 6.7	: Sabit Kabul Edilen c_z Parametresindeki Değişimler	60
Şekil 6.8	: Z Eksenindeki Hız Referansı ve Filtreden Geçirilmiş Hali.....	60
Şekil 6.9	: Merdiven Çıkma Hareketinin Üstüste Bindirilmiş Görüntüsü.....	61
Şekil 6.10	: 15 cm'lik Merdiven Çıkma Hareketi için SMN Referansı, Takip Edilen SMN Referansı ve Ağırlık Merkezi Yörüngesi	61
Şekil 6.11	: Dönerek Yürüme Hareketinin Üstüste Bindirilmiş Görüntüsü	62
Şekil 6.12	: Dönerek Yürüme Hareketi için SMN Referansı ve Takip Edilen SMN Referansı	62
Şekil 6.13	: Dönerek Yürüme Hareketindeki Ağırlık Merkezi Yörüngesi.....	63

Şekil 6.14 : Yan Yan Yürüme Hareketinin Üstüste Bindirilmiş Görüntüsü	64
Şekil A. 1 : Sağ Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (5 km/saat)	71
Şekil A. 2 : Sol Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (5 km/saat)	72
Şekil A. 3 : Eklem Torkları (5km/saat)	73
Şekil A. 4 : Eklem Torkları (5km/saat)	74
Şekil A. 5 : Eklem Torkları (5km/saat)	75
Şekil B. 1 : Sağ Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (2.4 km/saat)	76
Şekil B. 2 : Sol Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (2.4 km/saat)	77
Şekil B. 3 : Eklem Torkları (2.4 km/saat)	78
Şekil B. 4 : Eklem Torkları (2.4 km/saat)	79
Şekil B. 5 : Eklem Torkları (2.4 km/saat)	80
Şekil C. 1 : Sağ Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (1 km/saat)	81
Şekil C. 2 : Sol Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (1 km/saat)	82
Şekil C. 3 : Eklem Torkları (1 km/saat)	83
Şekil C. 4 : Eklem Torkları (1 km/saat)	84
Şekil C. 5 : Eklem Torkları (1 km/saat)	85
Şekil D. 1 : Sağ Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (Merdiven Çıkma).....	86
Şekil D. 2 : Sol Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (Merdiven Çıkma)	87
Şekil D. 3 : Eklem Torkları (Merdiven Çıkma)	88
Şekil D. 4 : Eklem Torkları (Merdiven Çıkma)	89
Şekil D. 5 : Eklem Torkları (Merdiven Çıkma)	90
Şekil E. 1 : Sağ Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (Dönerek Yürüme).....	91
Şekil E. 2 : Sol Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (Dönerek Yürüme).....	92
Şekil E. 3 : Eklem Torkları (Dönerek Yürüme).....	93
Şekil E. 4 : Eklem Torkları (Dönerek Yürüme).....	94
Şekil E. 5 : Eklem Torkları (Dönerek Yürüme).....	95
Şekil F. 1 : Sağ Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (Yan Yan Yürüme)	96
Şekil F. 2 : Sol Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (Yan Yan Yürüme)	97
Şekil F. 3 : Eklem Torkları (Yan Yan Yürüme)	98
Şekil F. 4 : Eklem Torkları (Yan Yan Yürüme)	99
Şekil F. 5 : Eklem Torkları (Yan Yan Yürüme)	100

SEMBOL LİSTESİ

$R(\bullet)$	: Dönme matrisi
θ	: Açı
$\dot{\theta}, \omega$	: Açısal hız
$\ddot{\theta}, \dot{\omega}$	: Açısal ivme
τ	: Tork
v	: Çizgisel hız
$\dot{v}, a$	: Çizgisel ivme
g	: Yer çekimi ivmesi
$\hat{e}$	: Birim vektör
J	: Jacobian
F, f	: Kuvvet
I	: Atalet tensörü
M, N, n	: Moment
P	: Konum vektörü
d	: Mesafe
x_{zmp}, y_{zmp}	: Sıfır moment noktasının x ve y koordinatları
c_x, c_y, c_z	: Ağırlık merkezinin x, y ve z koordinatları
$\ddot{c}_x, \ddot{c}_y$	: Ağırlık merkezinin x ve y doğrultusundaki ivmesi
S	: Adım boyu
h	: Adım yüksekliği
w_f	: Adım frekansı
T	: Adım periyodu, örnekleme zamanı
n	: Adım numarası
t_d	: Gecikme zamanı
h_1	: Ayak kaldırma yüksekliği
h_2	: Ayak indirme yüksekliği
B	: Ayaklar arası açıklık
C_1, C_2	: İntegrasyon sabitleri
k_p	: Oransal kazanç
k_d	: Türevsel kazanç

14 SERBESTLİK DERECELİ İKİ AYAKLI BİR ROBOTUN DİNAMİK YÜRÜME HAREKETİNİN KONTROLÜ

ÖZET

Robot biliminin yeni bir boyut kazanmaya başladığı günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte kullanım alanları endüstriyle sınırlı robotların evlerimize girmesi insanlık için bir ütopya olmaktan çıkıp yakın gelecekte gerçeğe dönüşecek gibi görünmektedir. Özellikle son yıllarda insan biçimli iki ayaklı robotların gittikçe hızlanan evrimine tanık olmaktadır. Gelişmiş ülkelerin yeni endüstri alanları yaratıp bu alanlarda lider olma çabalarıyla birlikte ivmelenen iki ayaklı robotlar üzerine yapılan araştırmaların ve araştırmacıların sayısı da gün geçtikçe artmaktadır. İki ayaklı insansı robotlar üzerine yapılan araştırmalarda ise robot biliminde lider konumunda bulunan Japonya başı çekmektedir.

Bu tezde iki ayaklı bir robotun dinamik yürüme hareketinin kontrolü üzerine yapılmış araştırmaların sonucunda elde edilen bilgilerin teorik uygulaması gerçekleştirilmiştir. ADAMS yazılımı kullanılarak 14 serbestlik dereceli robot mekanizmasının fiziksel modeli elde edilmiştir. MATLAB yazılımı kullanılarak kontrolcüler tasarlanmıştır. Bu iki yazılım etkileşimli olarak çalışabilmektedir. Kontrolcülerin tasarlanırken pratikteki uygulama durumu da gözönüne alınarak bilgisayarın hesap yükü mümkün olduğunca düşük tutulmaya çalışılmış ve robotun hareketlerinde esnekliğin sağlanmasına çalışılmıştır. Robot ileri-geri dinamik yürüme, merdiven çıkma-inme, yürürken dinamik dönme, yan yan yürüme hareketlerini yapabilmektedir. Adım boyları ve periyodları istenildiği gibi değiştirilerek esnek yürüme hareketleri sağlanabilmektedir. Tasarlanan kontrolcüler kinematik ve dinamik parametrelerdeki değişimlere göre adapte edilebilmektedir.

Bu çalışmada uygulanan metodların dışında literatürde mevcut diğer metodların bazılarının uygulama sonuçları gösterilmiş bazılarana da referanslar verilmiştir.

DYNAMIC WALKING CONTROL OF A 14 DOF BIPED

SUMMARY

Nowadays, the undergoing transformation of robotics to a new dimension with the developing technology, it looks like robots which are restricted to industry are going to appear at homes in the near future which was an utopia for humankind. Especially in the last years, we witness rapidly increasing evolution of humanoid robots. The number of researches and researchers over the humanoid robots is increasing with the efforts of the developed countries to be the leader of the newly created industrial areas. These researches are extensively done in Japan which is the leader country in robotics.

In this thesis, theoretical application of dynamic walking control of a biped is done with the knowledge gained by literature survey. Physical modelling of a 14 DOF robot mechanism is done with the aid of ADAMS software. Controllers are designed with the aid of MATLAB software. These softwares can be interacted simultaneously. By considering the practical applications the controllers are designed so as to minimize the computational load of the computer and to increase flexibility in the movement. The robot is able to walk dynamically forward and backward, is able to turn dynamically while walking, is able to walk upstairs and downstairs and is able to walk sideways. Designed controllers allow us to change foot steps and periods while walking which increases flexibility in the movement. The controllers can also be adapted to the changes in the kinematic and dynamic parameters.

Results of some of the existing methods in the literature which are not used in this work are given as an information and references are given for the others.

1. GİRİŞ

Günümüzde insanların yaptığı bir takım işleri yapabilecek otonom mobil robotlar üzerine yapılan araştırmaların sayısı giderek artmaktadır. Endüstride robot kolları bir çok işi insanlardan daha hızlı ve daha hassas bir şekilde yapabilmektedir. Fakat bu robotlar sahip oldukları çalışma uzaylarının dışına çıkamamaktadır. Buda yapılacak işin robotun çalışma uzayına götürülmesini gerektirmektedir. Mobil robotlar bu problemin çözümü olarak alternatif oluşturmaktadır. Mobil robotlarda da tekerlekli robotların sahip oldukları dezavantajlar ayaklı robotların kullanımını mecbur kılmaktadır. Ayaklı bir robot engebeli yüzeylerde hareket edebilir, merdiven inip çıkabilir. Ayaklı robotlarda ise iki ayaklı robotlara olan ilgi giderek artmaktadır. İki ayaklı robotlar daha sınırlı bir alanda hareket kabiliyetine sahiptir. Hareket kabiliyeti açısından daha fazla esneklik sunan iki ayaklı robotlar üzerine yapılan çalışmaların temelini ise insan oluşturmaktadır. İki ayaklı robotlarda dengenin kontrolü büyük bir problem teşkil ettiğinden bir çok araştırmacının ilgisini çekmektedir. Günümüzde sensörler, eyleyiciler ile kontrol ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmelerle beraber, çok serbestlik dereceli bu robotların yapılması mümkün görünmektedir [1].

1.1 Mevcut Çalışmalar

Literatürde mevcut iki ayaklı robot prototiplerinin sayısı son 10 yılda artma eğilimi göstermektedir. 1968 yılında Miomir Vukobratovic tarafından iki ayaklı yürüme hareketinin teorik temellerinin sunulmasının ardından [2] 1969 yılında Mihajlo Pupin Enstitüsü'nde ilk aktif antropomorfik dış iskelet yapılmıştır [3]. Bundan sonra Japonya'daki Waseda Üniversitesi'nde 1973 yılında Wabot-1 isimli robotla “statik yürüme” hareketi gerçekleştirilmiştir [4]. Waseda Üniversitesinde iki ayaklı robotlar üzerine yapılan çalışmalar 1967 yılına dayanmaktadır ve bilinen ilk çalışmalardır. Wabot-1 den sonra 1984 yılında ilk “dinamik yürüme” hareketini yapabilen robot WL-10RD yapılmıştır [5]. Bundan sonra yapılmış sayısız prototipin ardından yapılan WABIAN isimli robot halihazırda literatürdeki gelişmiş iki ayaklı robotlardan biridir. WABIAN-2R (Şekil 1.1) isimli en son model 41 serbestlik derecesine sahiptir. 1475 mm boyunda ve 64.5 kg ağırlığındadır. Enerjisini üzerine yerleştirilmiş bir dahili güç kaynağından almaktadır. Hareket kabiliyetini arttırmak amacıyla bacakları 7 serbestlik dereceli olarak tasarlanmıştır ve dizlerini bükmeden yürüyebilmektedir [6].



Şekil 1.1: WABIAN-2R

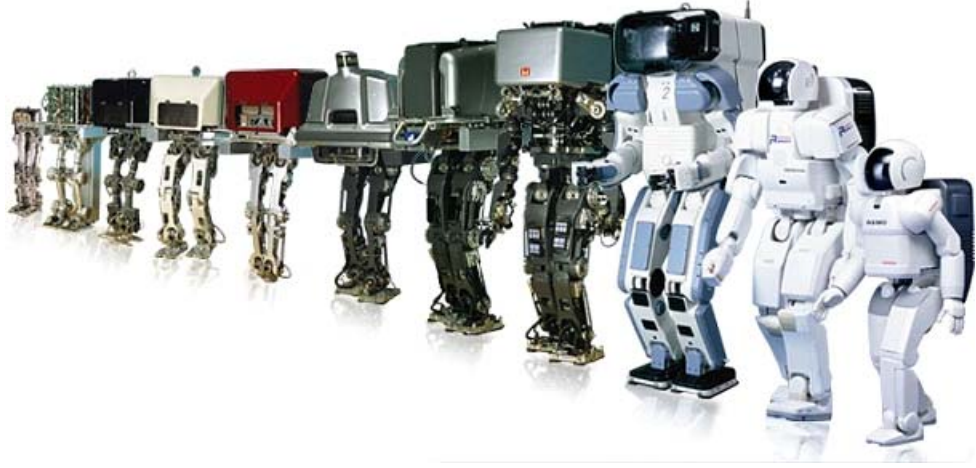
Robot biliminde lider konumda bulunan Japonya'daki diğer kaydadeğer ticari amaçlı çalışma ise AIST, Kawada Industries firması ve METI desteğiyle yürütülmekte olan HRP projesidir. Proje ilk olarak Honda firmasının P3 isimli robotu üzerinde yapılan çalışmalarla başlamıştır. En son prototipler olan olan HRP-3 ve HRP-3P (Şekil 1.2) 42 serbestlik derecesine sahiptir [7]. 1600 mm boyunda ve 68 kg ağırlığındadır. 2.5 km/saat lik maksimum yürüme hızlarına çıkabilmektedir. Düşük sürtünme katsayılı yüzeylerde yürümesini sağlayan kontrol algoritması bu robotun dikkat çekici bir özelliğidir. 2010 yılında satışa sunulması planlanmaktadır.



Şekil 1.2: HRP-3 ve HRP-3P

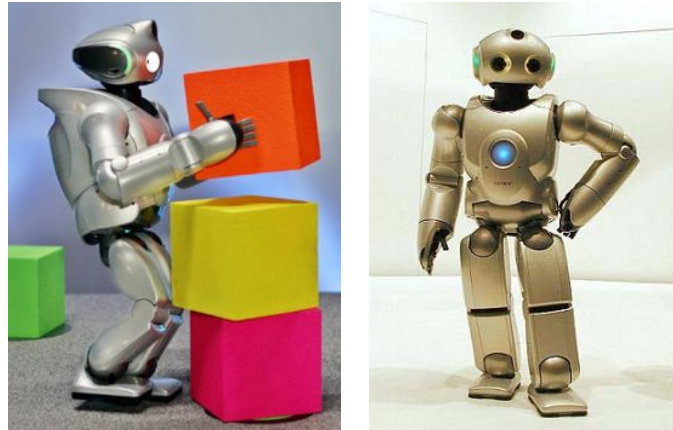
Yine Japonya'da ticari amaçlı yürütülmekte olan ve bilinen en gelişmiş insansı robot, Honda firmasının geliştirdiği ASIMO isimli robottur [8]. 1986 yılında başlayan projede 1997 yılına kadar 10 adet prototip üretilmiştir (Şekil 1.3). Son prototip olan

ASIMO 2000 yılında kamuoyuna duyurulmuştur. 34 serbestlik derecesine sahip olan ASIMO 1300 mm boyunda ve 54 kg ağırlığındadır. 5 km/saat maksimum hızla yürüyebilmektedir. Oldukça esnek hareket kabiliyetine sahiptir ve 6 km/saat hızda koşabilmektedir. 2007 itibariyle 46 adet üretildiği bilinmektedir. Literatürde kullanılan kontrol metodları hakkında bir bilgi yoktur.



Şekil 1.3: Honda Tarafından Yapılmış Prototipler

Japon firması SONY tarafından maliyetleri düşük tutmak için oyuncak boyutlarında üretilmiş QRIO SDR-4X (Şekil 1.4) isimli robotta hareket kabiliyetleri açısından kaydedeğer özellikler taşımaktadır [9]. 600 mm boyunda ve 7 kg ağırlığındadır. Dengesini gerçek zamanlı olarak sağlayabilmektedir. Bitmiş bir ürün olmasına rağmen SONY firması bu robotu piyasaya sürmemiştir. En az 10 adet üretildiği bilinmektedir.



Şekil 1.4: QRIO SDR-4X

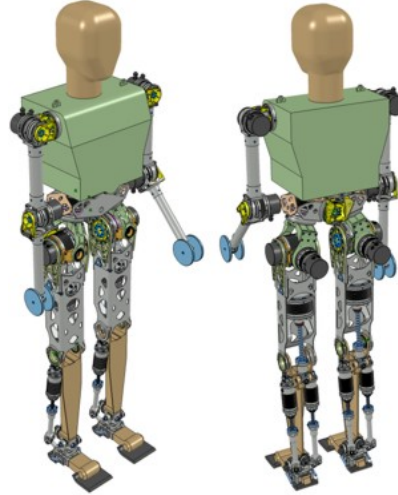
İnsan boyutlarındaki diğer bir prototip ise Münih Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilen JOHNNIE (Şekil 1.5) isimli robottur [10]. 17 serbestlik derecesi

bulunmaktadır. 1800 mm boyunda ve 40 kg ağırlığındadır. 2.4 km/saat lik yürüme hızlarına çıkabilmektedir. Ayak bileklerindeki eklemlerin sürüş mekanizmasının vida mekanizması olması dikkat çeken bir özelliğidir.



Şekil 1.5: JOHNNIE

Yine Münih Teknik Üniversitesi tarafından JOHNNIE den sonra geliştirilmesine başlanan LOLA (Şekil 1.6) isimli robot ise an itibariyle yapım aşamasında olup, bu robotun mekanik tasarımı ve kontrolcüsü maksimum 5 km/saat lik yürüme hızlarına çıkabilecek şekilde gözden geçirilmiştir [12]. Serbestlik derecesi ise 22 ye çıkarılmıştır.



Şekil 1.6: LOLA

Diğer büyük ölçekli insansı robot projesi ise Kore İleri Teknoloji Enstitüsü KAIST ve Hanson Robotics firmasının ortak geliştirdiği KHR isimli robottur. 2000 yılında başlayan projede şimdiye kadar 4 prototip yapılmıştır. Son prototip KHR-3 HUBO (Şekil 1.7) ismiyle anılmaktadır ve 41 serbestlik derecesine sahiptir [11]. 1250 mm

boyunda ve 56 kg ağırlığındadır. Maksimum 1.25 km/saat lik yürüme hızlarına çıkabilmektedir.



Şekil 1.7: KHR-3 HUBO

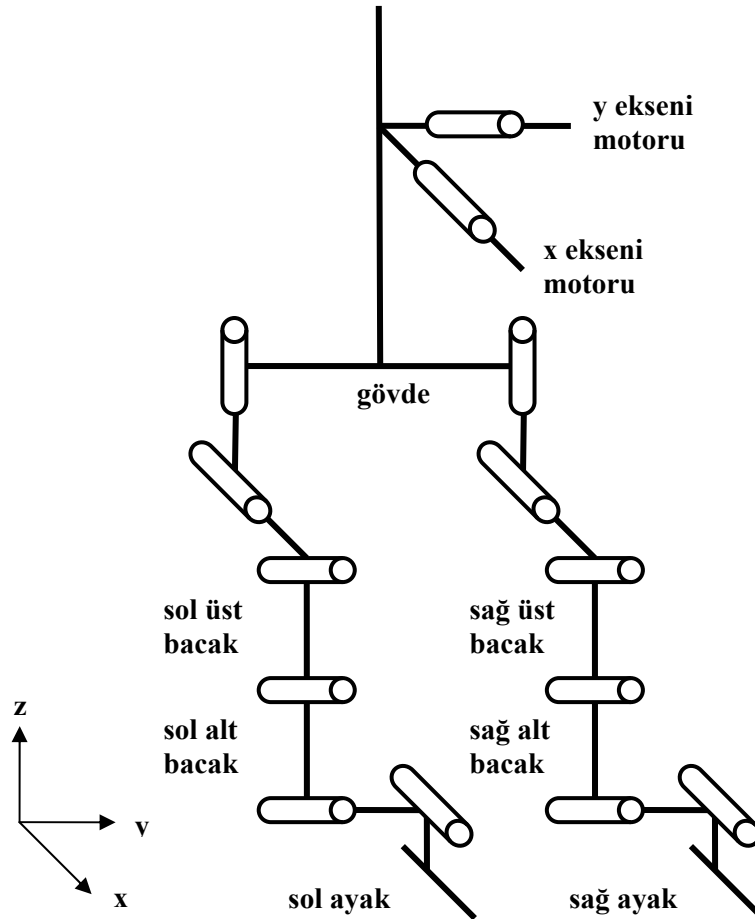
1.2 Sunuş Planı

İlk olarak kinematik, dinamik ve iki ayaklı yürüme hareketinin modellenmesi kısımlarında iki ayaklı bir robotun denge ve hareket kontrolü için gerekli teorik altyapı sunulmuştur. Konuyla ilgili yapılmış araştırma sonuçları, uygulanan teknikler ve bu çalışmada kullanılan uygulamalardan ve metodlardan bahsedilmiştir. Kontrol bölümünde bu bilgiler ışığında geliştirilen kontrolcülerin yapısından bahsedilmiştir. Son kısımda ise kontrolcülerin başarısı benzetim sonuçları ile gösterilmiştir.

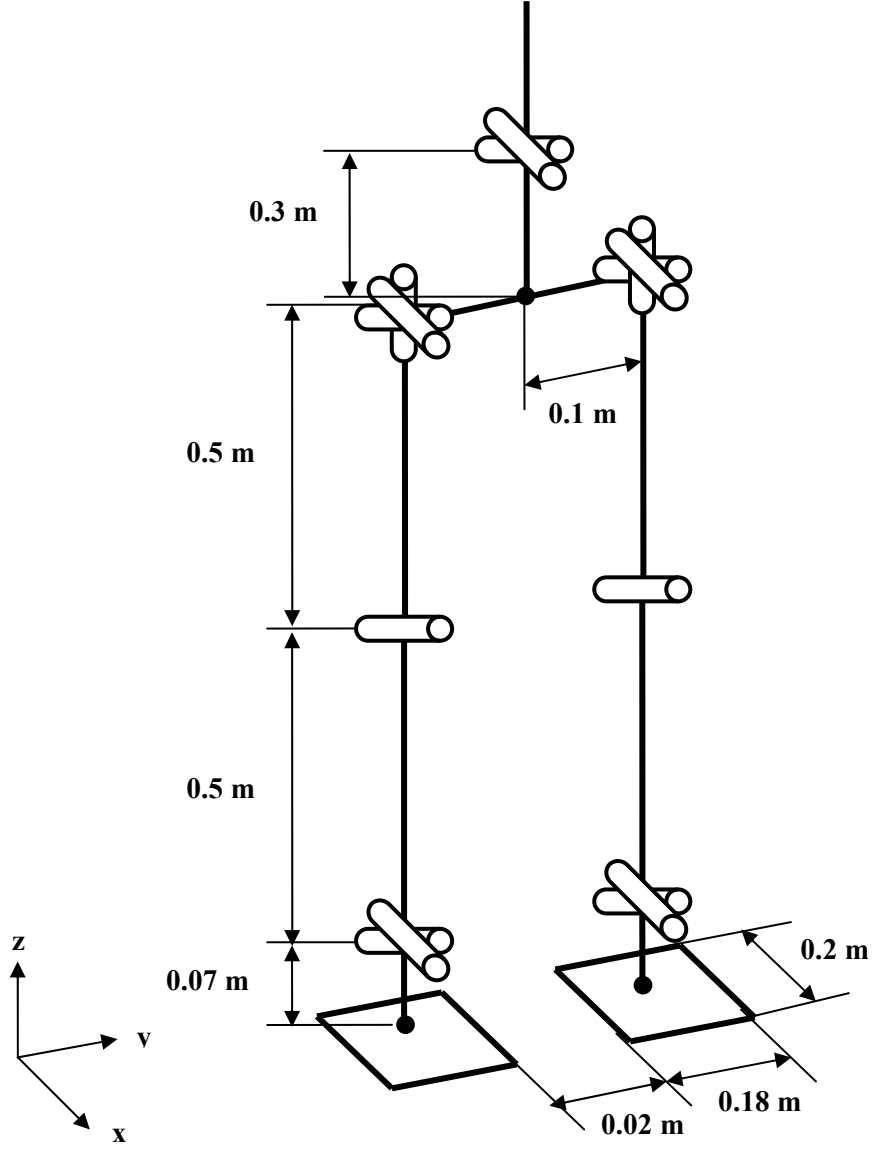
2. KİNEMATİK

2.1 Kinematik Yapı ve Boyutlar

Robotun kinematik yapısı Şekil 2.1’de, boyutları Şekil 2.2’de ve ADAMS’daki modeli ise Şekil 2.3’te görüldüğü gibidir. Boyutlar belirlenirken herhangi bir optimum tasarım kriteri dikkate alınmamıştır fakat kontrolcüler boyutlarda değişiklikler olabileceği göz önüne alınarak esnek bir şekilde tasarlanmıştır. Fiziksel büyükler ve serbestlik derecelerinin belirlenmesinde genellikle antropometrik verilerden yararlanılarak insandakine yakın değerler seçilir [12]. Bu durum robotun tasarımını esnasında detaylıca ele alınmalıdır.

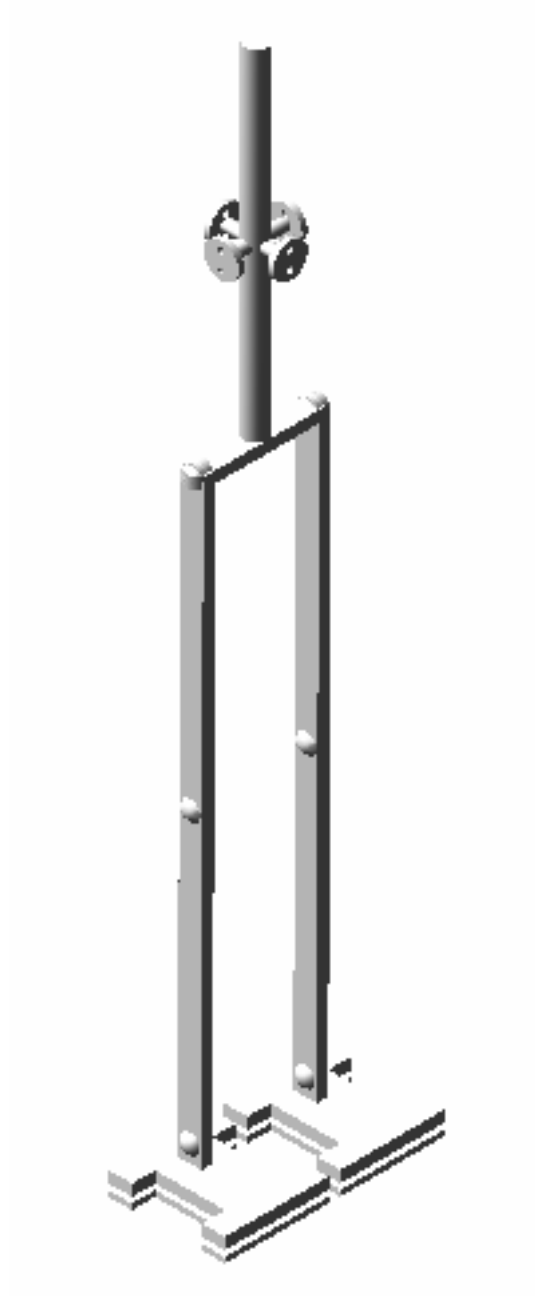


Şekil 2.1: Kinematik Yapı



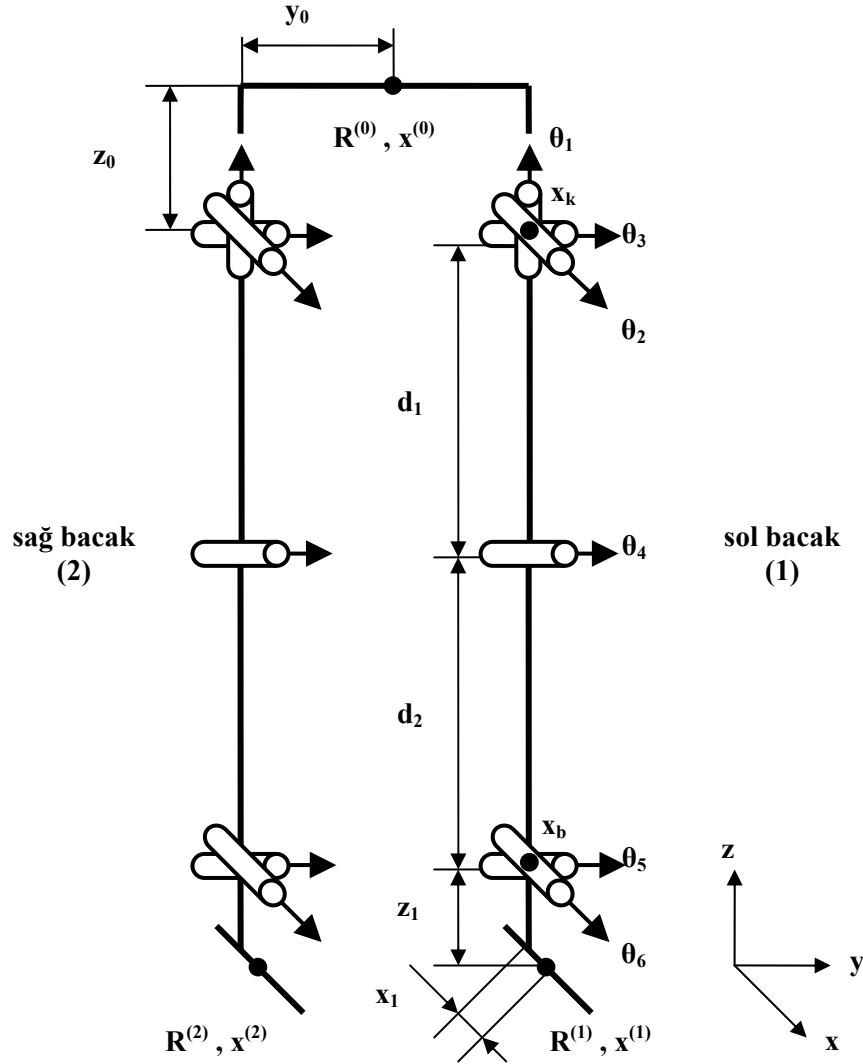
Şekil 2.2: Boyutlar

İki ayaklı yürüme hareketinin 3 boyutta esnek bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için her bir bacakta 3 tanesi konumlandırmayı 3 tanesinde yönlendirmeyi sağlamak üzere 6 serbestlik derecesinin bulunması yeterlidir [13]. Literatürde hareket esnekliğini arttırmak için 7 serbestlik dereceli bacak tasarımları mevcuttur [14]. Bu çalışmada gerekli minimum serbestlik derecesi göz önüne alınmıştır ve her bir bacakta 6'şar serbestlik derecesi bulunmaktadır. Kalçadaki ve ayak bileğinde motorlar en yoğun çalışmanın olduğu eksenlerdeki motorlar en az çalışmanın olduğu eksenlerdeki motorların ağırlığını taşımayacak şekilde yerleştirilmiştir. Gövdeye ise 2 motor dengenin kapalı çevrim kontrolünün sağlanması için yerleştirilmiştir ve hareket açısından bir esneklik sağlamamaktadır. Böylece mekanizmanın toplam serbestlik derecesi 14 tür.



Şekil 2.3: ADAMS Modeli

2.2 Düz Kinematik



Şekil 2.4: Kinematik Hesaplarda Kullanılan Parametreler ve Eksen Takımları

Robot üzerinde herhangi bir noktanın herhangi diğer bir noktaya göre konumunu belirlemekte mafsallara Şekil 2.4'teki gibi yerleştirilmiş eşyönlü eksen takımları kullanılmıştır. Robotikte daha çok tercih edilen Denavit-Hartenberg notasyonu [15] yerine eksen takımlarının bu şekilde yerleştirilmesinin, yapılan işlemlerin daha kolay anlaşılmasını sağlayacağı düşünülmüştür. Fakat bu şekilde yerleştirilmiş eksen takımlarına göre yapılan düz kinematik hesaplamalar bilgisayarın hesap yükünü arttıracaktır.

Kalça eklemlerinde en yoğun çalışmanın olduğu eksenler sırasıyla y-x-z eksenleridir. Motorların yerleştirilmesinde bu duruma dikkat edildiği takdirde en yoğun çalışmanın olduğu y eksenindeki motorun x ve z eksenlerindeki motorların

ağırlıklarını gereksiz yere taşıması gerekmeyecektir. Bilek eklemlerinde ise en yoğun çalışma sırasıyla x ve y eksenlerinde meydana gelmektedir.

Şekil 2.4'te $R^{(0)}$ ve $x^{(0)}$ sırasıyla gövde üzerindeki bir noktanın yönü ve konumu, $R^{(1)}$ ve $x^{(1)}$ sol bacağın yönü ve konumu, $R^{(2)}$ ve $x^{(2)}$ ise sağ bacağın yönü ve konumunu belirtmektedir. Buna göre sol ayağın yönü ve konumu gövdedeki bir noktaya göre eşyönlü eksen takımlarına göre aşağıdaki gibi yazılır.

$$R^{(1)} = R^{(0)}R_z(\theta_1)R_x(\theta_2)R_y(\theta_3)R_y(\theta_4)R_y(\theta_5)R_x(\theta_6) \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} x^{(1)} = x^{(0)} + R^{(0)} \begin{bmatrix} 0 \\ y_0 \\ -z_0 \end{bmatrix} + R^{(0)}R_z(\theta_1)R_x(\theta_2)R_y(\theta_3) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -d_1 \end{bmatrix} \\ + R^{(0)}R_z(\theta_1)R_x(\theta_2)R_y(\theta_3)R_y(\theta_4) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -d_2 \end{bmatrix} \\ + R^{(0)}R_z(\theta_1)R_x(\theta_2)R_y(\theta_3)R_y(\theta_4)R_y(\theta_5)R_x(\theta_6) \begin{bmatrix} x_1 \\ 0 \\ -z_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Sağ ayağın yönü ve konumu ise (2.2) denkleminde y_0 yerine $-y_0$ yazılarak bulunur. Bu denklemlerde x , y ve z eksenleri etrafındaki dönme matrisleri aşağıdaki gibidir. Pozitif dönme yönü ise sağ el kuralı ile bulunur.

$$\begin{aligned} R_x(\theta) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \\ R_y(\theta) &= \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \\ R_z(\theta) &= \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.3)$$

2.3 Ters Kinematik

Robotun ayaklarını yer düzleminde istenilen noktalara konumlandırmak için bu konumlara göre bacaklardaki eklem açılarının ne olduklarının bulunması gereklidir. Bu problemin çözümü robotikte ters kinematik olarak adlandırılır. Ters kinematik

çözüm [16] dan yola çıkılarak motorların optimum sıralamasına göre sol bacak için şu şekilde elde edilir.

Bilekteki ve kalçadaki noktaların yerleri sol bacak için aşağıdaki gibidir:

$$x_k = x^{(0)} + R^{(0)} \begin{bmatrix} 0 \\ y_0 \\ -z_0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$x_b = x^{(1)} + R^{(1)} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ z_1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Sağ bacak içinse (2.4) yerine y_0 yerine $-y_0$ yazılır. Buna göre ayak bileğindeki ve dizdeki açıları veren ifadeler aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = R^{(1)-1} (x_k - x_b) \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \theta_6 &= \tan^{-1} \frac{v}{w} \\ \theta_4 &= \cos^{-1} \frac{u^2 + w^2 + v^2 - d_1^2 - d_2^2}{2d_1d_2} \\ \theta_5 &= \sin^{-1} \frac{-d_1 \sin(\theta_4)}{\sqrt{u^2 + w^2 + v^2}} - \tan^{-1} \frac{u}{\sqrt{w^2 + v^2}} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Kalçadaki motorların sıralaması optimum olacak şekilde değiştirildiğinden buradaki kalça açılarını veren ifadeler [16] daki kalça açılarını veren ifadelerden farklıdır. Kalçadaki açıları veren ifade ise aşağıdaki gibi yön ilişkisinden bulunur.

$$\begin{aligned} R_y(-\theta_3)R_x(-\theta_2)R_z(-\theta_1) &= R_y(\theta_4)R_y(\theta_5)R_x(\theta_6)R^{(1)-1}R^{(0)} \\ \begin{bmatrix} c\theta_1 c\theta_3 - s\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 & c\theta_3 s\theta_1 + c\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 & -c\theta_2 s\theta_3 \\ -c\theta_2 s\theta_1 & c\theta_1 c\theta_2 & s\theta_2 \\ c\theta_3 s\theta_1 s\theta_2 + c\theta_1 s\theta_3 & -c\theta_1 c\theta_3 s\theta_2 + s\theta_1 s\theta_3 & c\theta_2 c\theta_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \theta_3 &= -\text{Atan2}(r_{13}, r_{33}) \\ \theta_2 &= \text{Atan2}(r_{23}, \sqrt{r_{21}^2 + r_{22}^2}) \\ \theta_1 &= -\text{Atan2}(r_{21}, r_{22}) \end{aligned}$$

3. DİNAMİK

Sistemlerin benzetiminin yapılmasında dinamik modeller kullanılır. Bu çalışmada dinamik benzetim ortamı olarak ADAMS yazılımı kullanıldığından sistemin düz dinamiğinin elde edilmesine gerek yoktur. Fakat mekanizmanın denge probleminin olması ve ayakla yer arasında direk olarak kontrol edilemeyen 6 serbestlik derecesinin bulunması kontrolde hassasiyet gerektirmektedir. Bu nedenle sistemin ters dinamik modeli motor torklarının hesaplanmasında kullanılacaktır (Kısım 5.1). Açık kinematik zincire sahip bir robotun ters dinamiği kapalı formda ve genel halde aşağıdaki gibi yazılır [17]:

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + F(\theta, \dot{\theta}) = \tau \quad (3.1)$$

Burada; n serbestlik derecesi olmak üzere, $M(\theta)$, $n \times n$ kütle matrisi; $V(\theta, \dot{\theta})$, $n \times 1$ coriolis ve merkezci ivmeleri içeren ifadelerin vektörü; $G(\theta)$, $n \times 1$ yerçekimi ivmelerini içeren ifadelerin vektörü; $F(\theta, \dot{\theta})$ ise $n \times 1$ sürtünmeleri içeren ifadelerin vektörüdür. Bu çalışmada sürtünme ile ilgili terim ihmal edilmiştir. Benzetim ortamında sürtünme etkileri mutlak olarak bilinebilir fakat pratikte sürtünme modelleri ile gerçekteki durum birbirinden farklılıklar göstereceğinden sürtünmeler prototip yapıldıktan sonra modellenmeli ve dinamiğe dahil edilmelidir.

Sistemin ters dinamiğini elde etmek üzere çok gövdeli sistemlerin dinamiğinin elde edilmesinde kullanılan algoritmalar araştırılmıştır. Bu algoritmalarının özelliği tekrarlamalı formda olmaları ve bilgisayarda hesaplama açısından efektif olacak şekilde geliştirilmeleridir [18]. Ele aldığımız mekanizmanın serbestlik derecesi endüstriyel robot kollarına göre oldukça fazladır ve daha sonra buna kollarında ekleneceği düşünülürse mekanizmanın serbestlik derecesi iki katından fazlasına kadar çıkabilmektedir. Bu nedenle hesaplama açısından efektif bir algoritmanın seçimi üzerinde durulmuştur. ve bunlardan en uygun algoritma olarak kuvvet tabanlı Newton-Euler formülasyonuna dayanan Luh-Walker-Paul algoritması [19,17] seçilmiştir. Burada ayrıca kısaca Lagrange formülasyonundan da bahsedilecektir.

3.1 Tekrarlamalı Lagrange Algoritması

3.1.1 Tek Destek Fazı

Robotun tek bir ayağının yerle temas halinde durum tek destek fazı olarak adlandırılmaktadır. Bu durumda mekanizma açık kinematik zincire sahiptir ve bacaklardaki toplam 12 serbestlik derecesi de birbirinden bağımsızdır. Bu durumda robot yere bağlı 12 serbestlik dereceli bir manipülatör olarak düşünülebilir. Robotun en az bir ayağının yerle temas halinde olması aynı zamanda denge açısından istenilen bir durum olduğundan (Kısım 4.1) bu varsayım yapılabilir.

Tek destek fazı, sağ ayağın yere bastığı “sağ ayak tek destek fazı” ve sol ayağın yere bastığı “sol ayak tek destek fazı” olarak ikiye ayrılmaktadır. Sol ayak tek destek fazı için Şekil 3.1’deki parametreler göz önüne alınırsa enerji tabanlı Lagrange denklemleri kullanılarak robotun ters dinamiği tekrarlamalı formda aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$i : 0 \rightarrow 11$$

$$\begin{aligned} {}^{i+1}v_{i+1} &= {}^iR({}^iv_i + {}^i\omega_i \times {}^iP_{i+1}) \\ {}^{i+1}\omega_{i+1} &= {}^iR^i\omega_i + \dot{\theta}_{i+1}\hat{e}_{i+1} \\ {}^{i+1}v_{C_{i+1}} &= {}^{i+1}v_{i+1} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C_{i+1}} \\ k_{i+1} &= \frac{1}{2}m_{i+1} {}^{i+1}v_{C_{i+1}}^T {}^{i+1}v_{C_{i+1}} + \frac{1}{2} {}^{i+1}\omega_{i+1}^T {}^{C_{i+1}}I_{i+1} {}^{i+1}\omega_{i+1} \\ u_{i+1} &= -m_{i+1} {}^0g^T {}^0P_{C_{i+1}} \\ \tau_i &= \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial k}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial k}{\partial \theta_i} + \frac{\partial u}{\partial \theta_i} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Sağ ayağın yere bastığı durum için ise Şekil 3.2’deki parametreler göz önüne alınarak aynı algoritma kullanılır.

3.1.2 Çift Destek Fazı

Çift destek fazında ise robotun her iki ayağında yerle temas halindedir ve mekanizma kapalı kinematik zincire sahiptir. Bu durumda, geometrik kısıtlarla birlikte 12 serbestlik dereceli manipülatör olarak düşünülen mekanizmanın yerle temasından kaynaklanan yer temas kuvvetlerinin ters dinamiğin eldesinde dikkate alınması gereklidir. Yer temas kuvvetleri dinamiğe aşağıdaki gibi dahil edilir [20].

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau + J^T F \quad (3.3)$$

Burada; J^T , ayakdaki bir noktaya göre elde edilmiş 12×6 jacobian matrisinin transpozesi; F ise 6×1 ayakdaki aynı noktadan ölçülen kuvvet ve moment vektörüdür. Jacobian ise sayısal veya sembolik olarak aşağıdaki tekrarlamalı formdaki denklemlerle elde edilebilir [17]:

$$i: 0 \rightarrow 11$$

$$\begin{aligned} {}^{i+1}\omega_{i+1} &= {}^{i+1}R^i \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} \hat{e}_{i+1} \\ {}^{i+1}v_{i+1} &= {}^{i+1}R \left({}^i v_i + {}^i \omega_i \times {}^i P_{i+1} \right) \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} {}^0V &= \begin{bmatrix} {}^0R^{12} v_{12} \\ {}^0R^{12} \omega_{12} \end{bmatrix} \\ {}^0J_{i,j} &= \frac{\partial {}^0V_i}{\partial \theta_j} \quad i = 1, \dots, 6, \quad j = 1, \dots, 12 \end{aligned}$$

Geometrik kısıtlar ise aşağıdaki gibi yazılabilir [21]:

$$x^{(1)} - x^{(2)} = sbt \quad (3.5a)$$

$${}_{(2)}^{(1)}R = {}_{(1)}^{(2)}R = sbt \quad (3.5b)$$

Burada (3.5a) denklemi ayaklar arasındaki mesafenin sabit kalmasını, (3.5b) denklemi ise ayakların birbirlerine göre yönünün sabit kalmasını gerektirmektedir. Böylece 3 tanesi konumlandırma 3 tanesi yönlendirme olmak üzere mekanizma toplam 6 serbestlik derecesini kaybeder ve bu denklemler kullanılarak bir bacaktaki açılar diğer bacaktaki açılara bağımlı olduğu bir ifade elde edilebilir. Bu kısıtların korunabilmesi için çift destek fazında ayaklara verilen referanslara dikkat edilmelidir.

3.2 Tekrarlamalı Newton-Euler Algoritması

Bu çalışmada mekanizmanın ters dinamiğinin elde edilmesinde kuvvet tabanlı Newton-Euler formülasyonuna dayanan Luh-Walker-Paul algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmanın özelliği bütün hesapların uzuvlara bağlı yerel koordinat eksenlerinde yapılması sebebiyle daha az işlem gerektirmesidir. Serbestlik derecesi arttıkça yapılan hesaplamalar doğrusal olarak artmaktadır. Lagrange formülasyonunda potansiyel enerjinin sabit bir referansa göre yazılması gerektiğinden hesap yükü fazladır.

3.2.1 Tek Destek Fazı

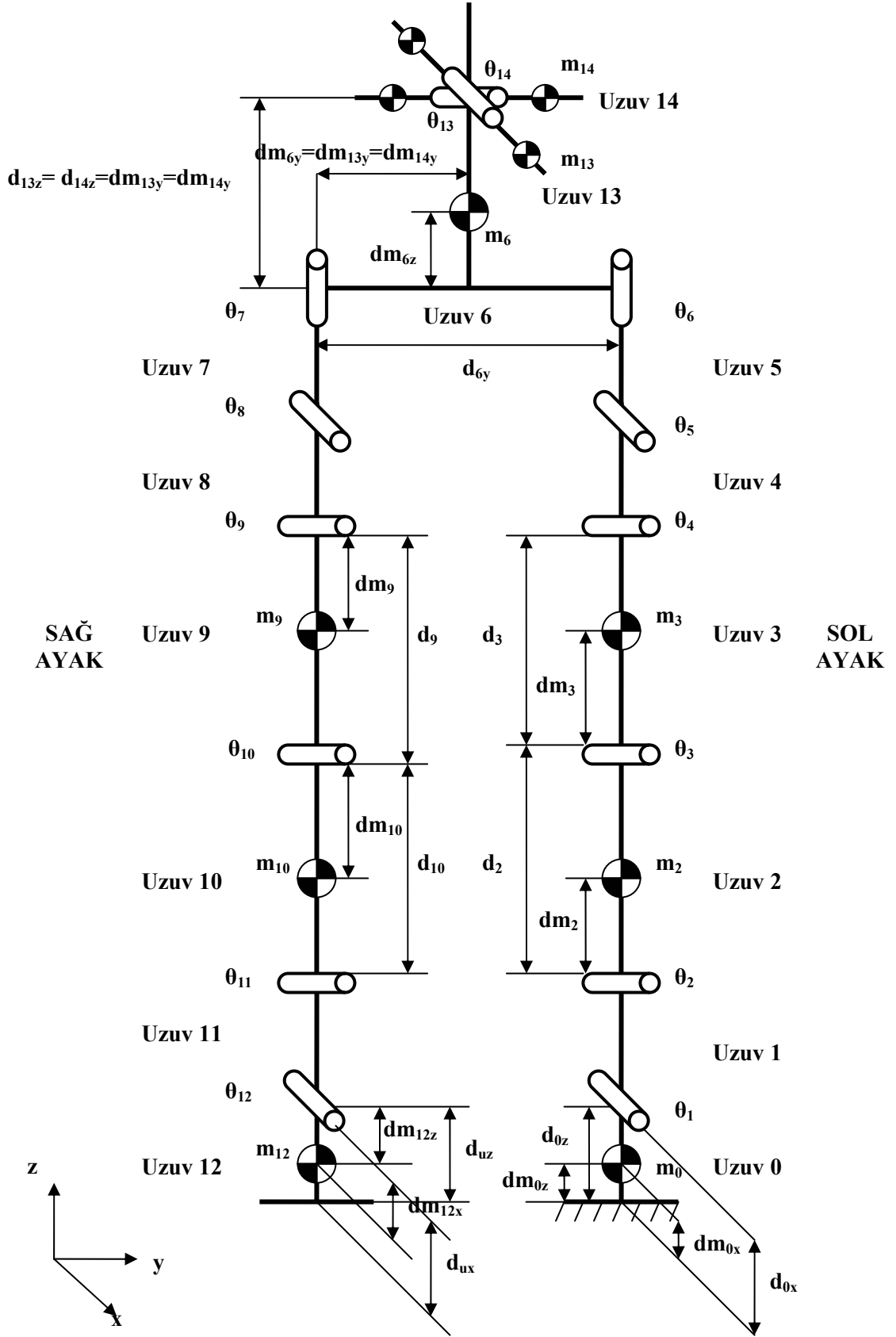
Burada da yine tek destek fazı tek ayağın yerde olduğu durumdur ve sağ ayak için ve sol ayak için iki farklı durum söz konusudur. Şekil 3.1’de sol ayağın yerde olduğu durum için, Şekil 3.2’de ise sağ ayağın yerde olduğu durum için mekanizmanın ters dinamiğinin hesaplanmasında kullanılan parametreler görülmektedir. Kalçadaki ve bilekteki eklemlerin eksenleri aynı noktada kesişmektedir. Ayak ile alt bacak uzvunu birbirine bağlayan bilek eklemiindeki ve gövde ile üst bacağı birbirine bağlayan kalça eklemiindeki uzuvların kütleleri sıfır kabul edilmiştir. Gövdede ise birbirinden bağımsız iki motor basitlik açısından aynı noktada toplanmış gibi kabul edilmiştir. Tek destek fazı için ters dinamik aşağıdaki gibi tekrarlamalı formda elde edilir:

$$i: 0 \rightarrow 11$$

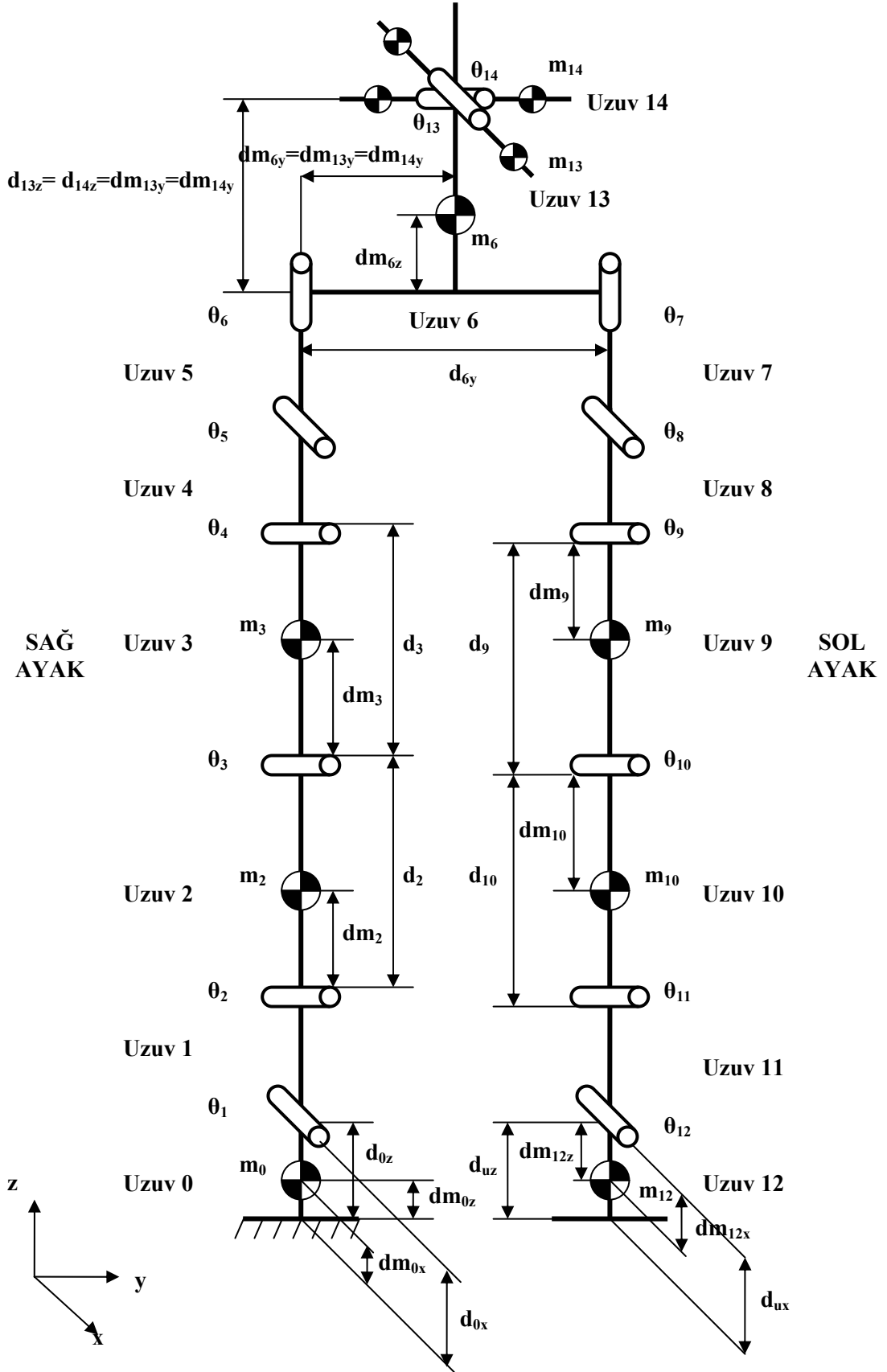
$$\begin{aligned} {}^{i+1}\omega_{i+1} &= {}^{i+1}R^i \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} \hat{e}_{i+1} \\ {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} &= {}^{i+1}R^i \dot{\omega}_i + {}^{i+1}R^i \omega_i \times \dot{\theta}_{i+1} \hat{e}_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} \hat{e}_{i+1} \\ {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} &= {}^{i+1}R^i (\dot{\omega}_i \times {}^iP_{i+1} + \omega_i \times (\omega_i \times {}^iP_{i+1})) + \dot{v}_i \\ {}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}} &= {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C_{i+1}} + \omega_{i+1} \times (\omega_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C_{i+1}}) + \dot{v}_{i+1} \\ {}^{i+1}F_{i+1} &= m_{i+1} {}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}} \\ {}^{i+1}N_{i+1} &= {}^{C_{i+1}}I_{i+1} {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} + \omega_{i+1} \times {}^{C_{i+1}}I_{i+1} \omega_{i+1} \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$i: 12 \rightarrow 1$$

$$\begin{aligned} {}^i f_i &= {}^iR^{i+1} f_{i+1} + {}^iF_i \\ {}^i n_i &= {}^iN_i + {}^iR^{i+1} n_{i+1} + {}^iP_{C_i} \times {}^iF_i + {}^iP_{i+1} \times {}^{i+1}R^{i+1} f_{i+1} \\ \tau_i &= {}^i n_i^T \hat{e}_i \end{aligned}$$



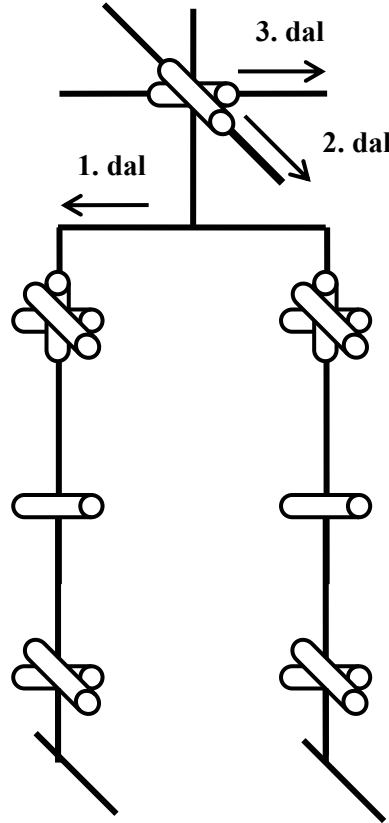
Şekil 3.1: Dinamik Hesaplarda Kullanılan Parametreler(Sol Ayak Yerde)



Şekil 3.2: Dinamik Hesaplarda Kullanılan Parametreler(Sağ Ayak Yerde)

(3.6) denklemlerinde ileri yayılım döngüsü olarak adlandırabileceğimiz ilk döngüde sırasıyla yere basan ayaktan başlayarak havadaki ayağa kadar uzuvlara atanmış koordinat takımlarının açısal hızları, açısal ivmeleri, çizgisel ivmeleri, uzuvların ağırlık merkezlerinin çizgisel ivmesi, ağırlık merkezlerindeki kuvvetler ve momentler hesaplanır. Geri yayılım döngüsü olarak adlandırabileceğimiz ikinci döngüde ise bu uzuvların ağırlık merkezlerine etkiyen kuvvetler ve momentler havadaki ayaktan başlayarak yere basan ayağa kadar bir uzuvdan diğerine etki tepki prensibiyle aktarılır. Motorların bulunduğu eksenlere denk gelen momentler ise motorlar tarafından dengelenmesi gereken momentler olarak elde edilir.

Bu algoritma seri kinematik zincire sahip robot kolları için geliştirilmiş olduğundan bu mekanizmaya uyarlanması gerekmektedir [22,23]. Kinematik zincir Şekil 3.3’de görüldüğü gibi gövdede dallanarak 3 e ayrılmaktadır. Bu dalların ikisi gövdedeki motorlardan diğeride havadaki ayağın olduğu bacadan devam eder. Buna göre gövde uzvunda algoritmanın ilk döngüsü 3 e ayrılır. İkinci döngüde ise her bir daldan gelen kuvvet ve moment etkileri gövdede toplandıktan sonra döngü devam eder.



Şekil 3.3: Kinematik Zincirdeki Dallanma

Uzuvlara ait fiziksel değerler ile ağırlık merkezlerinin yerleri EK G’de verilmiştir. Taban uzvu olarak kabul edilen yere basan ayağın hareket etmediğini varsaydığımızda 0. uzuv için açısal hız ve açısal ivme değerleri sıfır olacaktır:

$$\begin{aligned} {}^0\omega_0 &= [0 \quad 0 \quad 0]^T \\ {}^0\dot{\omega}_0 &= [0 \quad 0 \quad 0]^T \end{aligned} \quad (3.7)$$

Yerçekimi ivmesinin dinamiğe dahil edilmesi için ise taban uzvunun çizgisel ivme vektörüne yerçekimi ivmesi yukarı yönlü olacak şekilde dahil edilir [17].

$${}^0\dot{v}_0 = [0 \quad 0 \quad g]^T \quad (3.8)$$

Ters dinamiğin eldesinde de kinematikte olduğu gibi eşyönlü eksen takımları kullanılmıştır. Bu nedenle denklemlerdeki konum, hız ve ivme vektörleri bu eksen takımlarına göre yazılmıştır. (3.6) nolu denklemlerde $\hat{e}_i$ i. mafsalda dönmenin gerçekleştiği eksenin birim vektörüdür. Buna göre eklemlerin açısal hız ve ivme vektörleri aşağıdaki gibi olacaktır:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_1 \hat{e}_1 &= [\dot{\theta}_1 \quad 0 \quad 0]^T & \ddot{\theta}_1 \hat{e}_1 &= [\ddot{\theta}_1 \quad 0 \quad 0]^T \\ \dot{\theta}_2 \hat{e}_2 &= [0 \quad \dot{\theta}_2 \quad 0]^T & \ddot{\theta}_2 \hat{e}_2 &= [0 \quad \ddot{\theta}_2 \quad 0]^T \\ \dot{\theta}_3 \hat{e}_3 &= [0 \quad \dot{\theta}_3 \quad 0]^T & \ddot{\theta}_3 \hat{e}_3 &= [0 \quad \ddot{\theta}_3 \quad 0]^T \\ \dot{\theta}_4 \hat{e}_4 &= [0 \quad \dot{\theta}_4 \quad 0]^T & \ddot{\theta}_4 \hat{e}_4 &= [0 \quad \ddot{\theta}_4 \quad 0]^T \\ \dot{\theta}_5 \hat{e}_5 &= [\dot{\theta}_5 \quad 0 \quad 0]^T & \ddot{\theta}_5 \hat{e}_5 &= [\ddot{\theta}_5 \quad 0 \quad 0]^T \\ \dot{\theta}_6 \hat{e}_6 &= [0 \quad 0 \quad \dot{\theta}_6]^T & \ddot{\theta}_6 \hat{e}_6 &= [0 \quad 0 \quad \ddot{\theta}_6]^T \\ \dot{\theta}_7 \hat{e}_7 &= [0 \quad 0 \quad \dot{\theta}_7]^T & \ddot{\theta}_7 \hat{e}_7 &= [0 \quad 0 \quad \ddot{\theta}_7]^T \\ \dot{\theta}_8 \hat{e}_8 &= [\dot{\theta}_8 \quad 0 \quad 0]^T & \ddot{\theta}_8 \hat{e}_8 &= [\ddot{\theta}_8 \quad 0 \quad 0]^T \\ \dot{\theta}_9 \hat{e}_9 &= [0 \quad \dot{\theta}_9 \quad 0]^T & \ddot{\theta}_9 \hat{e}_9 &= [0 \quad \ddot{\theta}_9 \quad 0]^T \\ \dot{\theta}_{10} \hat{e}_{10} &= [0 \quad \dot{\theta}_{10} \quad 0]^T & \ddot{\theta}_{10} \hat{e}_{10} &= [0 \quad \ddot{\theta}_{10} \quad 0]^T \\ \dot{\theta}_{11} \hat{e}_{11} &= [0 \quad \dot{\theta}_{11} \quad 0]^T & \ddot{\theta}_{11} \hat{e}_{11} &= [0 \quad \ddot{\theta}_{11} \quad 0]^T \\ \dot{\theta}_{12} \hat{e}_{12} &= [\dot{\theta}_{12} \quad 0 \quad 0]^T & \ddot{\theta}_{12} \hat{e}_{12} &= [\ddot{\theta}_{12} \quad 0 \quad 0]^T \\ \dot{\theta}_{13} \hat{e}_{13} &= [\dot{\theta}_{13} \quad 0 \quad 0]^T & \ddot{\theta}_{13} \hat{e}_{13} &= [\ddot{\theta}_{13} \quad 0 \quad 0]^T \\ \dot{\theta}_{14} \hat{e}_{14} &= [0 \quad \dot{\theta}_{14} \quad 0]^T & \ddot{\theta}_{14} \hat{e}_{14} &= [0 \quad \ddot{\theta}_{14} \quad 0]^T \end{aligned} \quad (3.9)$$

Sol ayağın yerde olduğu durum için uzuvlar arasındaki dönme matrisleri aşağıdaki gibi olacaktır:

$$\begin{aligned}
{}^0_1R &= R_x(\theta_1) & {}^1_0R &= R_x(\theta_1)^T \\
{}^1_2R &= R_y(\theta_2) & {}^2_1R &= R_y(\theta_2)^T \\
{}^2_3R &= R_y(\theta_3) & {}^3_2R &= R_y(\theta_3)^T \\
{}^3_4R &= R_y(\theta_4) & {}^4_3R &= R_y(\theta_4)^T \\
{}^4_5R &= R_x(\theta_5) & {}^5_4R &= R_x(\theta_5)^T \\
{}^5_6R &= R_z(\theta_6) & {}^6_5R &= R_z(\theta_6)^T \\
{}^6_7R &= R_z(\theta_7) & {}^7_6R &= R_z(\theta_7)^T \\
{}^7_8R &= R_x(\theta_8) & {}^8_7R &= R_x(\theta_8)^T \\
{}^8_9R &= R_y(\theta_9) & {}^9_8R &= R_y(\theta_9)^T \\
{}^9_{10}R &= R_y(\theta_{10}) & {}^{10}_9R &= R_y(\theta_{10})^T \\
{}^{10}_{11}R &= R_y(\theta_{11}) & {}^{11}_{10}R &= R_y(\theta_{11})^T \\
{}^{11}_{12}R &= R_x(\theta_{12}) & {}^{12}_{11}R &= R_x(\theta_{12})^T \\
{}^{13}_6R &= R_x(\theta_{13}) & {}^{13}_6R &= R_x(\theta_{13})^T \\
{}^{14}_6R &= R_y(\theta_{14}) & {}^{14}_6R &= R_y(\theta_{14})^T
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Uzuvlara atanmış eksen takımlarının birbirlerine göre konumları ise aşağıdaki gibidir:

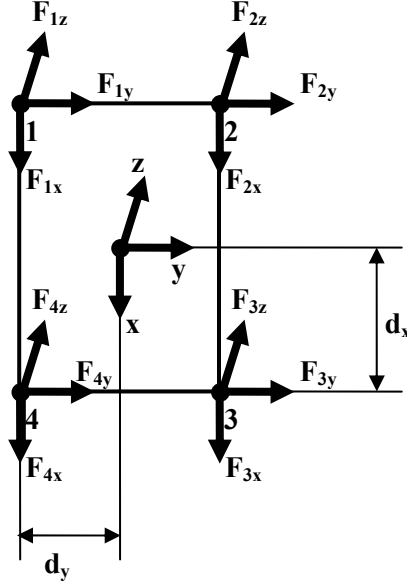
$$\begin{aligned}
{}^0P_1 &= [0 \quad 0 \quad 0]^T \\
{}^1P_2 &= [0 \quad 0 \quad 0]^T \\
{}^2P_3 &= [0 \quad 0 \quad d_2]^T \\
{}^3P_4 &= [0 \quad 0 \quad d_3]^T \\
{}^4P_5 &= [0 \quad 0 \quad 0]^T \\
{}^5P_6 &= [0 \quad 0 \quad 0]^T \\
{}^6P_7 &= [0 \quad -d_{6y} \quad 0]^T \\
{}^7P_8 &= [0 \quad 0 \quad 0]^T \\
{}^8P_9 &= [0 \quad 0 \quad 0]^T \\
{}^9P_{10} &= [0 \quad 0 \quad -d_9]^T \\
{}^{10}P_{11} &= [0 \quad 0 \quad -d_{10}]^T \\
{}^{11}P_{12} &= [0 \quad 0 \quad 0]^T \\
{}^{12}P_g &= [d_{ux} \quad 0 \quad -d_{uz}]^T \\
{}^6P_{13} &= [0 \quad -d_{6y}/2 \quad d_{13z}]^T \\
{}^6P_{14} &= [0 \quad -d_{6y}/2 \quad d_{14z}]^T
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Uzuvlara atanmış eksen takımlarına göre her bir uzvun ağırlık merkezinin konum vektörleride aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
{}^1P_{C1} &= [0 \ 0 \ 0]^T \\
{}^2P_{C2} &= [0 \ 0 \ d_{m_2}]^T \\
{}^3P_{C3} &= [0 \ 0 \ d_{m_3}]^T \\
{}^4P_{C4} &= [0 \ 0 \ 0]^T \\
{}^5P_{C5} &= [0 \ 0 \ 0]^T \\
{}^6P_{C6} &= [0 \ -d_{m_{6y}} \ d_{m_{6z}}]^T \\
{}^7P_{C7} &= [0 \ 0 \ 0]^T \\
{}^8P_{C8} &= [0 \ 0 \ 0]^T \\
{}^9P_{C9} &= [0 \ 0 \ -d_{m_9}]^T \\
{}^{10}P_{C10} &= [0 \ 0 \ -d_{m_{10}}]^T \\
{}^{11}P_{C11} &= [0 \ 0 \ 0]^T \\
{}^{12}P_{C12} &= [d_{m_{12x}} \ 0 \ -d_{m_{12z}}]^T \\
{}^{13}P_{C13} &= [0 \ 0 \ 0]^T \\
{}^{14}P_{C14} &= [0 \ 0 \ 0]^T
\end{aligned} \tag{3.12}$$

3.2.2 Çift Destek Fazı

Çift destek fazında lagrange formülasyonundan farklı olarak kuvvet tabanlı bir algoritma kullanıldığından jacobianın hesaplanması gerekmemektedir. 12 serbestlik dereceli manipülatör olarak kabul edilen mekanizmanın uç noktası olarak kabul edilen ayağa etkiyen yer temasından kaynaklanan kuvvetler ve momentler algoritmaya direk olarak dahil edilir. Bu durumda geri yayılım esnasında bu kuvvetlerin ve momentlerin etkileri her iki bacakta motorlar tarafından dengelenmiş olacaktır. Pratikte her iki ayakta 6 eksenli kuvvetleri ve momentleri ölçen sensörler bulunacaktır. Bu sensörlerden okunan veriler direk olarak kullanılabilir. Benzetim ortamında kuvvetler ayakların 4 köşesinden ölçülmektedir (Şekil 3.4). Bu nedenle bu dört noktadaki kuvvetleri ayak üzerinde uç noktası olarak kabul edilen bir noktaya 3 bileşenli kuvvet ve 3 bileşenli moment olarak indirgemeye gerek vardır.



Şekil 3.4: Ayaktan Ölçülen Kuvvetlerin Eksen Takımları

Ayağın orta noktası uç noktası olarak kabul edilerek bu dört noktadaki 3 bileşenli kuvvetlerden bu noktaya göre aşağıdaki gibi moment alınmıştır.

$$\begin{aligned}
 M_x &= d_y \left[(F_{z3} + F_{z2}) - (F_{z4} + F_{z1}) \right] \\
 M_y &= d_x \left[(F_{z1} + F_{z2}) - (F_{z3} + F_{z4}) \right] \\
 M_z &= d_x \left[(F_{y3} + F_{y4}) - (F_{y1} + F_{y2}) \right] + d_y \left[(F_{x1} + F_{x4}) - (F_{x2} + F_{x3}) \right]
 \end{aligned}
 \tag{3.13a}$$

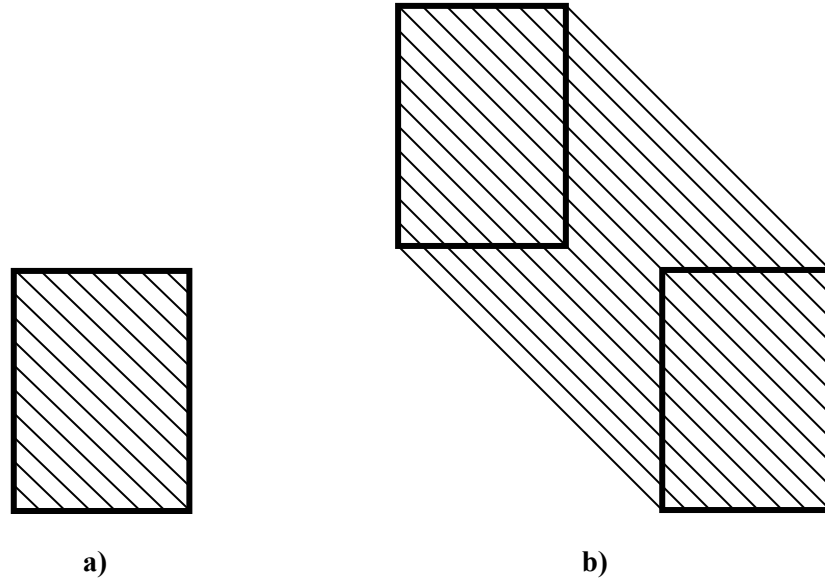
Bu dört noktadaki kuvvet vektörlerinin toplanması ile de kuvvetler ayağın orta noktasında 3 bileşenli tek bir kuvvet vektörüne aşağıdaki gibi indirgenir:

$$\begin{aligned}
 F_x &= F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} + F_{4x} \\
 F_y &= F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} + F_{4y} \\
 F_z &= F_{1z} + F_{2z} + F_{3z} + F_{4z}
 \end{aligned}
 \tag{3.13b}$$

Çift destek fazında yer temas kuvvetlerinin dinamiğe dahil edilmesinin dışında (3.5) nolu denklemlerdeki geometrik kısıtlara da uyulmalıdır. Ayrıca bu fazda her iki ayakta yere bastığından ayaklardan herhangi biri taban uzvu olarak kabul edilebilir.

4. İKİ AYAKLI YÜRÜME HAREKETİNİN MODELLENMESİ

Mekanizma yere şekil bağlı olmadığından ötürü ayaklarla yer arasında direk olarak kontrol edilemeyen 6 serbestlik derecesi mevcuttur. Mekanizmanın dengesini kaybetmemesi için denge ile ilgili bir kavram olan sıfır moment noktasının(SMN) Şekil 4.1’de görüldüğü gibi ayağın veya ayakların kapsadığı destek çokgeni olarak adlandırılan çokgen içinde kalması gereklidir. Ayağın yerle olan kuvvet bağının korunabilmesi sıfır moment noktası tanımından [22,24] yola çıkılarak tasarlanan kontrolcülerle sağlanmaktadır.



Şekil 4.1: Destek Çokgenleri a) Tek Ayak Yerde b) İki Ayak Yerde

Tek ayak yere bastığı durumda destek çokgeni ayağın geometrisinin kapsadığı alan olacaktır. İki ayağın yerde olduğu durumda ise Şekil 4.1’de görüldüğü gibi iki ayağın köşelerini birleştiren çokgen destek çokgeni olacaktır.

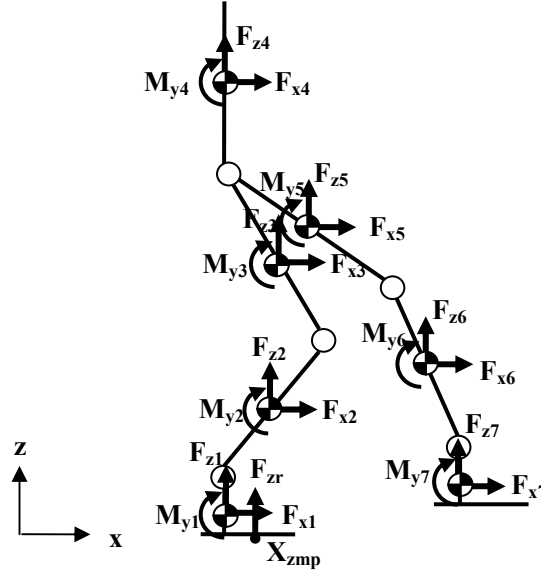
4.1 Sıfır Moment Noktası

Yürüme esnasında mekanizmaya etkiyen kuvvetler yerçekimi ivmesi ile atalet ivmelerinin meydana getirdiği kuvvetler ile yerden gelen tepki kuvvetleri olacaktır. Etki kuvvetleri ile tepki kuvvetlerinin dengesini yer düzleminde momentlerin sıfır olduğu bir noktaya göre yazdığımızda bu nokta sıfır moment noktası olacaktır.

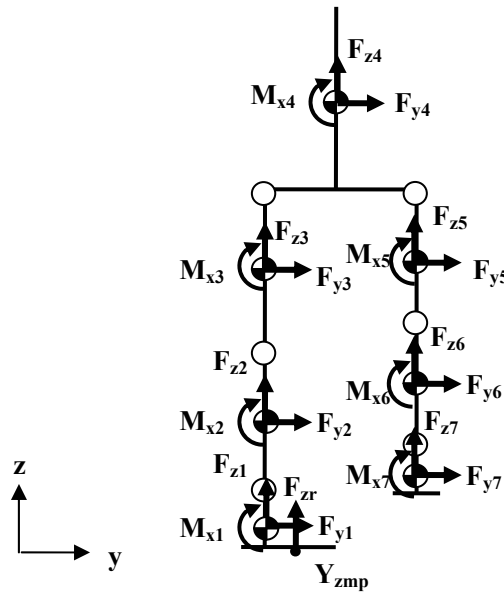
Mekanizmanın dengesini kaybetmeden yürüyebilmesi için ise bu noktanın destek çokgeni içinde kalması gereklidir. Sıfır moment noktasının yer düzlemindeki konumunu Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'ten yola çıkarak aşağıdaki gibi elde edebiliriz [25,26].

$$x_{zmp} = \frac{\sum (F_{ix} z_i - F_{iz} x_i) + \sum M_{iy}}{\sum F_{iz}} \quad (4.1a)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum (F_{iy} z_i - F_{iz} y_i) - \sum M_{ix}}{\sum F_{iz}} \quad (4.1b)$$



Şekil 4.2: Uzuvlara Etkiyen Kuvvetler ve Momentler(Profil Düzlemi)



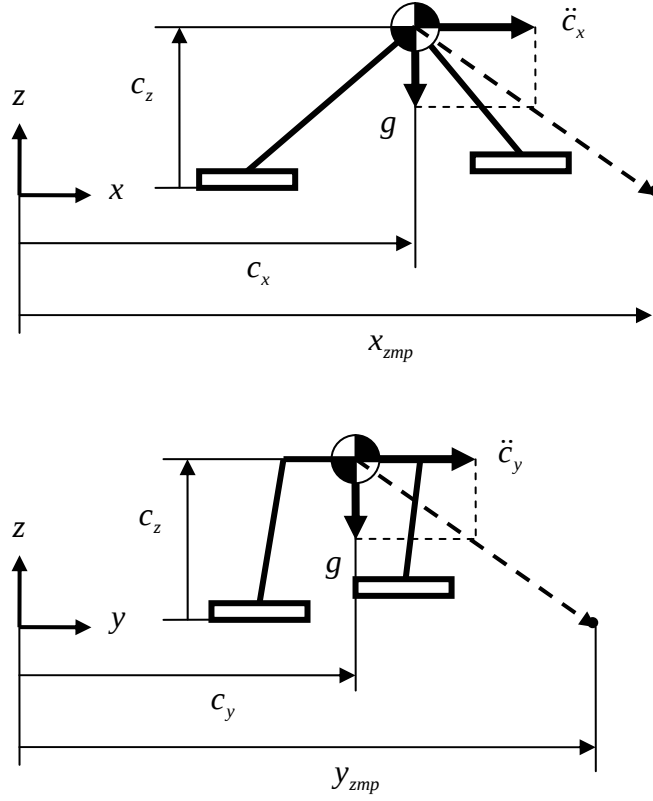
Şekil 4.3: Uzuvlara Etkiyen Kuvvetler ve Momentler(Cephe Düzlemi)

Bu denklemlerde F uzuvların ağırlık merkezlerindeki kuvveti, M ise ağırlık merkezlerindeki momenti ifade etmektedir. Bu kuvvetler ve momentler ters dinamiğin elde edilmesinde kullanılan algorithmada ara işlem olarak hesaplanmaktadır. Fakat hesaplanan bu momentler ve kuvvetler uzuvlara atanmış koordinat eksenlerinde tanımlanmış olduğundan sabit koordinat eksenine eşleştirme yapmak için uzuvların bu koordinat takımına göre yönlendirme matrisleriyle çarpılması gerekmektedir. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te görülen uzuvların eksen takımlarının sabit eksen takımına göre yönleri aşağıdaki gibi olacaktır:

$$\begin{aligned}
{}^0_{C2}R &= {}^0_1R_2^1R \\
{}^0_{C3}R &= {}^0_1R_2^1R_3^2R \\
{}^0_{C6}R &= {}^0_1R_2^1R_3^2R_4^3R_5^4R_6^5R \\
{}^0_{C9}R &= {}^0_1R_2^1R_3^2R_4^3R_5^4R_6^5R_7^6R_8^7R_9^8R \\
{}^0_{C10}R &= {}^0_1R_2^1R_3^2R_4^3R_5^4R_6^5R_7^6R_8^7R_9^8R_{10}^9R \\
{}^0_{C12}R &= {}^0_1R_2^1R_3^2R_4^3R_5^4R_6^5R_7^6R_8^7R_9^8R_{10}^9R_{11}^{10}R_{12}^{11}R \\
{}^0_{C13}R &= {}^0_1R_2^1R_3^2R_4^3R_5^4R_6^5R_{13}^6R \\
{}^0_{C14}R &= {}^0_1R_2^1R_3^2R_4^3R_5^4R_6^5R_{14}^6R
\end{aligned} \tag{4.2}$$

4.1.1 Doğrusal Ters Sarkaç Modu

(4.1) nolu denklemlerde de görüldüğü üzere sıfır moment noktasının konumu oldukça karmaşık ve doğrusal olmayan bir analitik ifadeyle belirlenir. Bu noktanın destek çokgeninin içinde kalacak şekilde kontrol edilebilmesi için bu ifadeler daha basit bir model kullanılarak basitleştirilmiştir [27,28,29,30]. Buna göre mekanizmayı Şekil 4.4'te görüldüğü gibi ağırlık merkezinde toplanmış bir noktasal kütleyle indirgeyerek bir ters sarkaç olarak ele aldığımızda ve ağırlık merkezinin yere göre yüksekliği sabit kalacak şekilde kısıtlandığında mekanizmaya etkiyen kuvvetler(veya ivmeler) ağırlık merkezindeki toplam ağırlık kuvveti ve yataydaki çizgisel atalet ivmesinin meydana getirdiği kuvvet olacaktır.



Şekil 4.4: Ağırlık Merkezindeki İvmeler(Cephe ve Profil Düzlemi)

Mekanizmanın hareketini Şekil 4.4'teki gibi cepheden ve profilden olacak şekilde iki ayrı düzlemde inceleyecek olursak bu düzlemlerdeki kuvvetlerden yer düzlemindeki sıfır moment noktasına göre moment aldığımızda aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$c_x - \frac{c_z}{g} \ddot{c}_x = x_{zmp} \quad (4.3a)$$

$$c_y - \frac{c_z}{g} \ddot{c}_y = y_{zmp} \quad (4.3b)$$

Bu denklemler (4.1) nolu denklemlerin basitleştirilmiş halidir ve ağırlık merkezinin z eksenindeki konumu sabitlendiğinde ters sarkacın dinamiğinin doğrusal olarak elde edildiği ve cephe ile profil düzlemleri için aynı denklemlerin elde edildiği görülmektedir. Bu durum diferansiyel denklemlerin çözümünü basitleştirerek istenilen sıfır moment noktasının konumuna göre ağırlık merkezinin x ve y eksenlerindeki yörüngelerinin hesaplanmasını kolaylaştırmaktadır. Bu basitleştirilmiş model Doğrusal Ters Sarkaç Modu (DTSM) olarak adlandırılmaktadır.

4.2 Statik Yürüme

Mekanizmanın ağırlık merkezinin sabit hızla hareket ettiğini veya ivmelenmesinin ihmal edilebilir kadar küçük olduğunu varsayacak olursak sıfır moment noktasının ağırlık merkezinin konumuna bağlı olduğu statik yürüme olarak adlandırılan [31] aşağıdaki denklemlerle ifade edebileceğimiz özel bir hal elde edebiliriz:

$$\ddot{c}_x \approx 0, \ddot{c}_y \approx 0 \text{ için}$$

$$c_x = x_{zmp} \quad (4.4a)$$

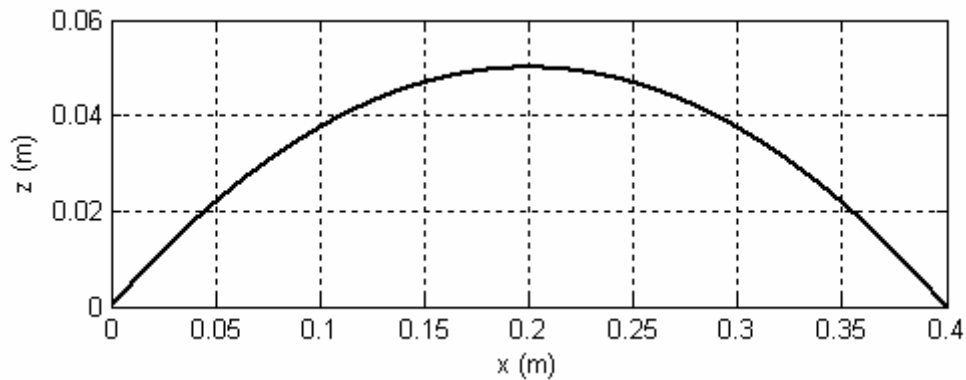
$$c_y = y_{zmp} \quad (4.4b)$$

Ağırlık merkezinin ivmelenmesinin yeteri kadar küçük kalması için statik yürüme esnasındaki hareketlerin yavaş olmasını ve robotun çift destek fazında daha uzun süre kalmasını gerektirmektedir. Bu nedenle statik yürüme hareketi ile yüksek hızlara çıkabilmek mümkün değildir.

4.2.1 Ayak Yörüngeleri

Yürüme hareketinin gerçekleştirilmesi için öncelikle ayakların yerle temasının kesilerek yer düzleminde istenilen noktalara konumlandırılması gerekmektedir. Ayak yere bastığı anda hızının ve ivmesinin sıfır olması yani ayak yörüngelerinin 2. mertebeye kadar sürekli olması gerekmektedir [32]. Aksi halde yer temas kuvvetlerinde anormal sıçramalar meydana gelmektedir. Bunun dışında ayağın belirli bir T zamanı içinde bir noktadan bir noktaya konumlandırılmasına olanak vermesi ve istenilen konumlandırma mesafesinin ayarlanabilir olması aranan diğer özelliklerdir.

Şekil 4.5'teki gibi bir eliptik yörüngeyi x ve z eksenleri için ayrı ayrı kosinüs fonksiyonları cinsinden aşağıdaki gibi ifade edebiliriz [33]:



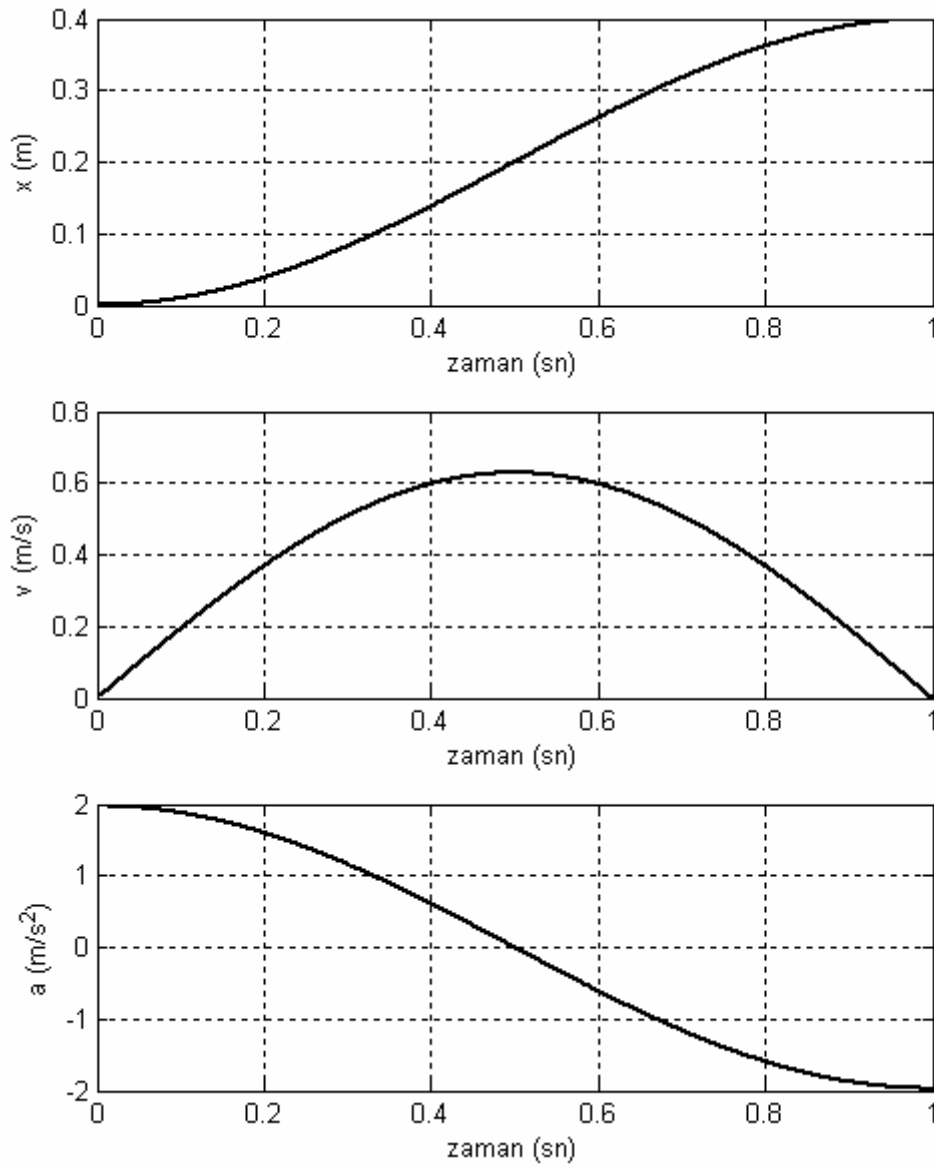
Şekil 4.5: Eliptik Ayak Yörüngesi

$$x(t) = -\frac{S}{2} \cos(w_f t) + \frac{S}{2} \quad (4.5a)$$

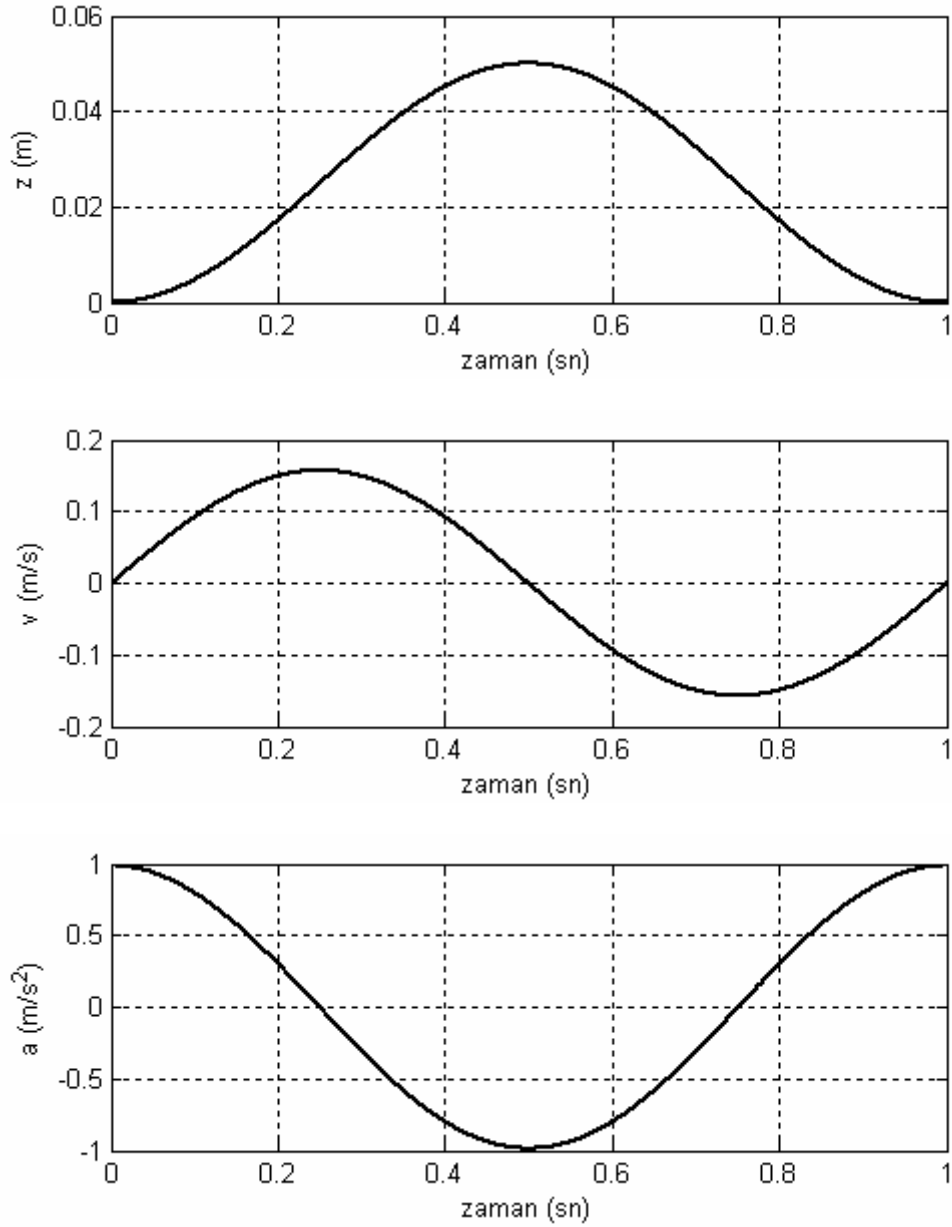
$$z(t) = \frac{h}{2} [1 - \cos(2w_f t)] \quad (4.5b)$$

$$w_f = \frac{\pi}{T} \quad (4.5c)$$

Burada; S adım boyu, h ayağın yerden maksimum yüksekliği ve T adımın periyodu olmak üzere w_f adım frekansdır. Bu eliptik yörüngenin, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de görüldüğü gibi ikinci türevleri süreksiz olduğundan aranan şartlara uymamaktadır.

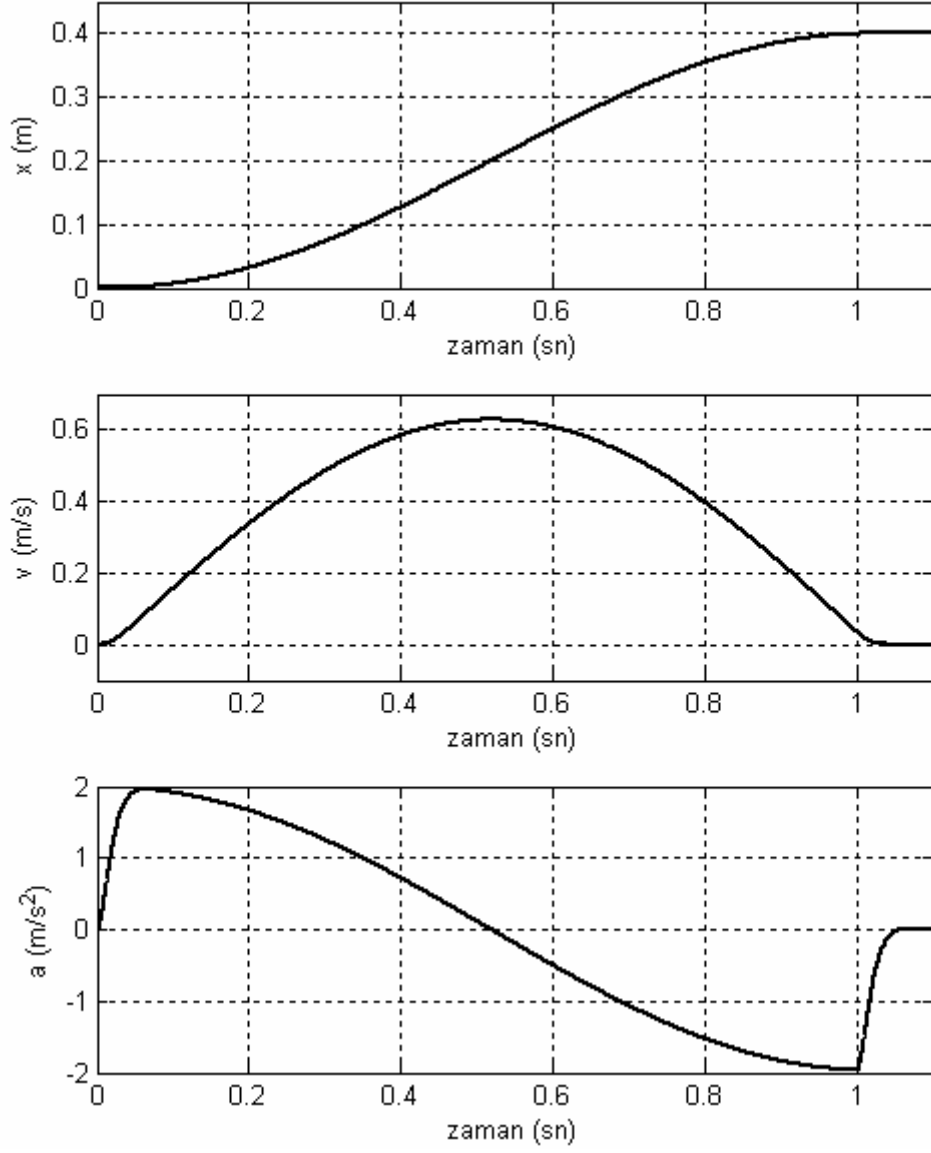


Şekil 4.6: Eliptik Ayak Yörüngesi X Eksenli Konum, Hız ve İvme Referansları

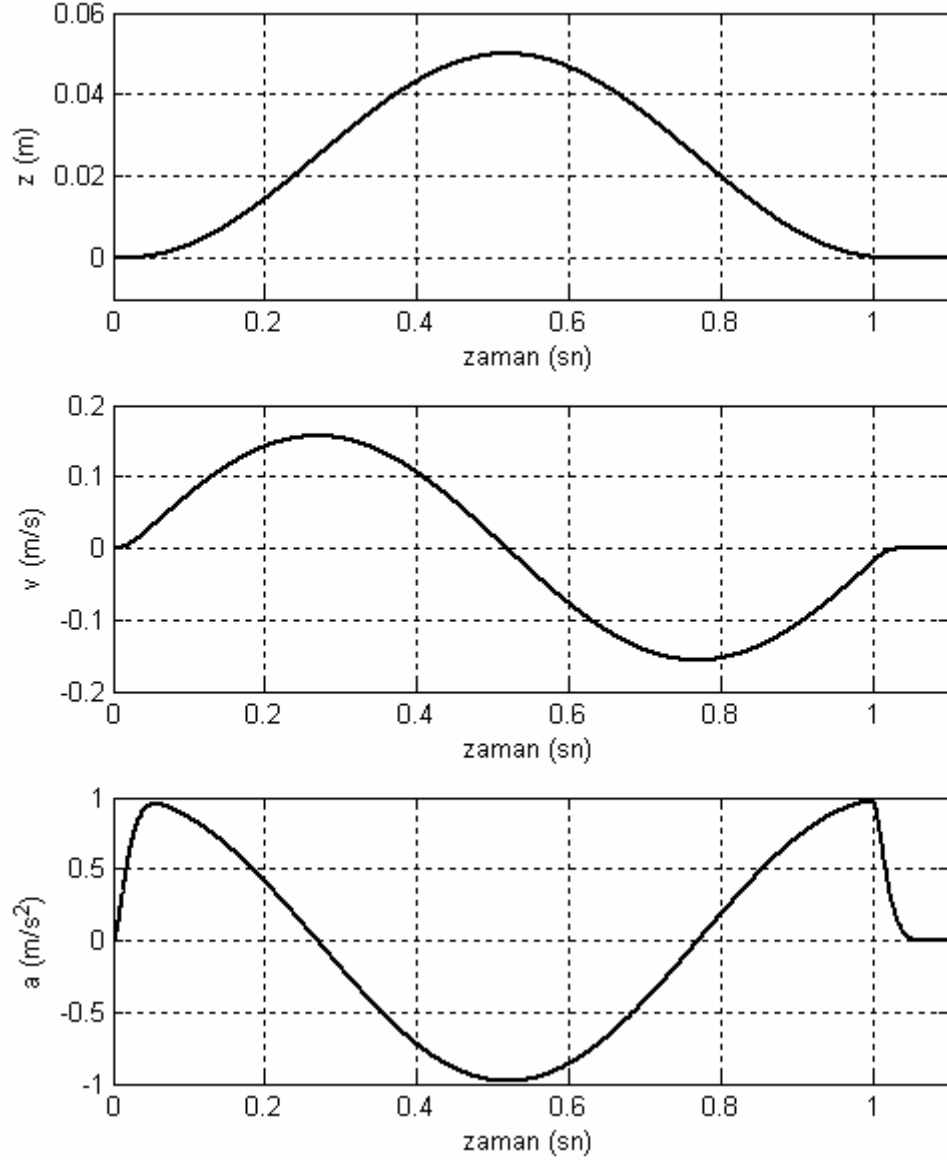


Şekil 4.7: Eliptik Ayak Yörüngesi Z Eksenli Konum, Hız ve İvme Referansları

Bu yörüngeler ikinci mertebe alçak geçirgen bir filtreden geçirilerek Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da görüldüğü gibi ikinci türevleri sürekli hale getirilebilir. Bu ayağın istenilen zamandan bir miktar gecikmeyle yere basmasına neden olmaktadır. Ayrıca merdiven çıkma gibi durumlar için daha esnek bir ayak yörüngesine ihtiyaç olduğu görülmüştür.

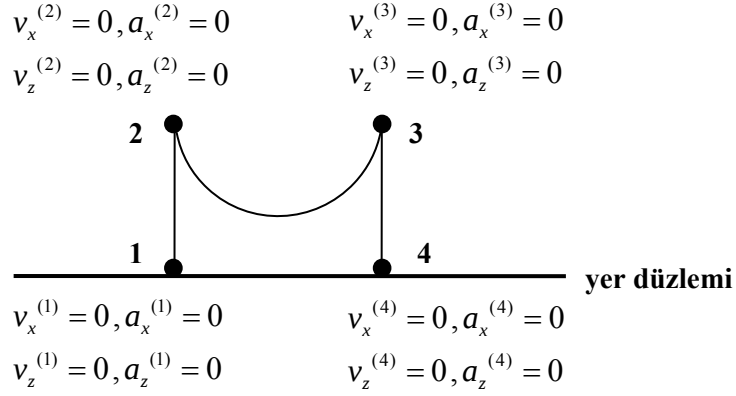


Şekil 4.8: Filtrelenmiş Ayak Yörüngesi X Eksenli Konum, Hız ve İvme Referansları



Şekil 4.9: Filtrelenmiş Ayak Yörüngesi Z Eksen Konum, Hız ve İvme Referansları

Diğer bir yörünge ise eklem açılarına 3. mertebe polinom uydurma yaklaşımıyla elde edilmiştir [17]. Bu yörünge Şekil 4.10'da görüldüğü gibi verilen 4 noktadan geçmektedir ve 3 parçalıdır.



Şekil 4.10: Yörünge Planlayıcısı ile Elde Edilmiş Ayak Yörüngesi

3. mertebe bir polinom uydurulduğundan ötürü ayağın verilen noktalardan geçerken ivmesi sıfır olacaktır. Bu yörünge merdiven çıkmada da kullanılabilmesi ve ayak yere basarken hızların ve ivmelerin sıfır olması avantajlarının yanında bir çok dezavantajı vardır. Ayak yörüngesi 2 ve 3 noktaları arasında aşağıya doğru bir bombe yapmaktadır. Bu nedenle büyük adımlarda ayağın yere sürtünmemesi için ayağın çok fazla yukarı kaldırılması problemi vardır. Ayrıca ayağın 2 ve 3 numaralı noktalarda duraklamasından ötürü hareket kesikli gibi görünmekte ve yörünge'nin 3 parçadan oluşması nedeniyle bu üç parçanın uygun zamanlamayla birleştirilmesi problem olmaktadır. Daha yüksek mertebe polinom uydurularak bu noktalarda ayak hızlarına ve ivmelerine de referanslar verilebilir fakat bu da jacobianın hesaplanmasını gerektirecektir.

Bu olumsuzluklar nedeniyle daha esnek ayak yörüngelerinin eldesi üzerinde durulmuştur. Bu yörüngelerde ayakların hızlarına referans verilmiştir.

Ayağın x eksenini doğrultusundaki yörüngesinin hızı aşağıdaki gibidir.

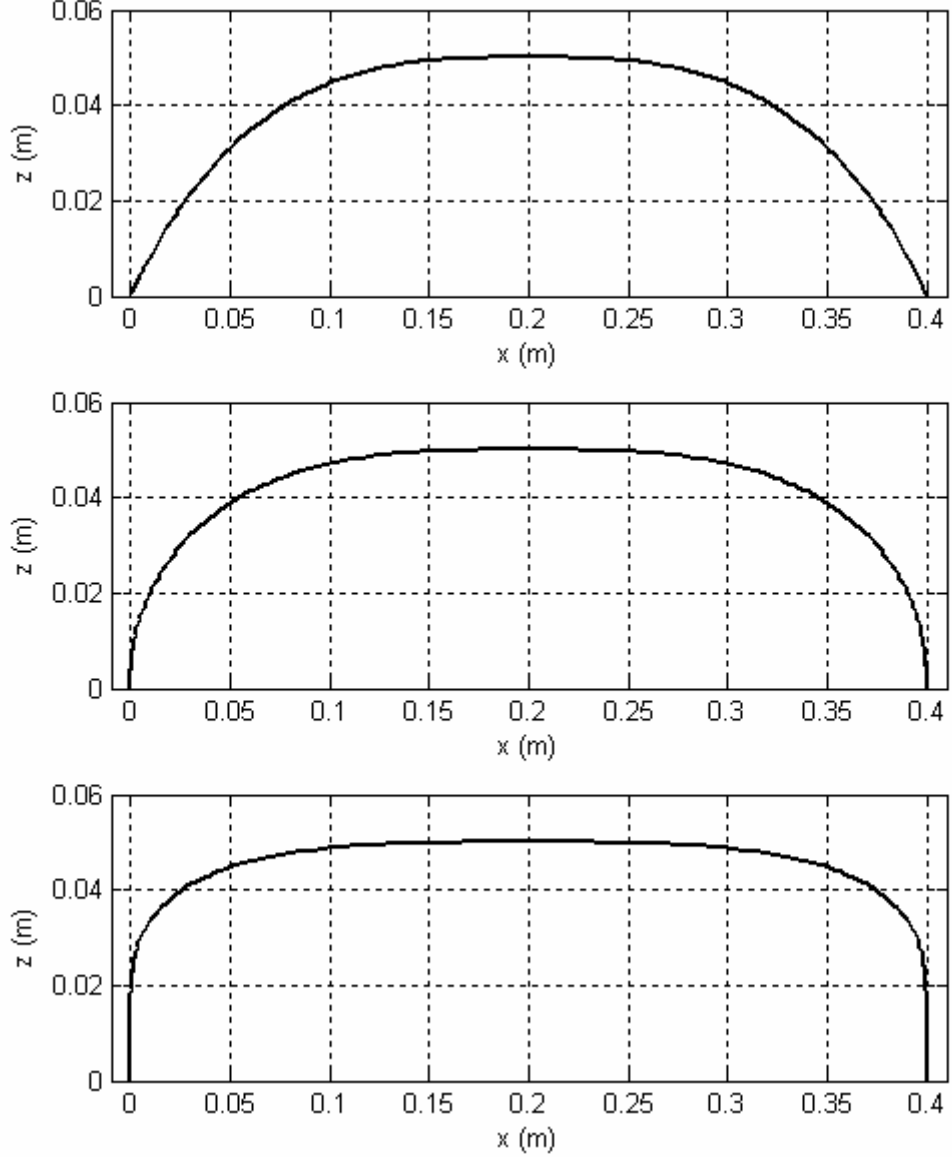
$$nT + t_d \leq t < (n+1)T - t_d \text{ için;}$$

$$\dot{x}(t) = -\frac{S}{(T - (2t_d))} \cos(2w_f(t - (nT + t_d))) + \frac{S}{(T - (2t_d))} \quad (4.6a)$$

$$w_f = \frac{\pi}{T - 2t_d} \quad (4.6b)$$

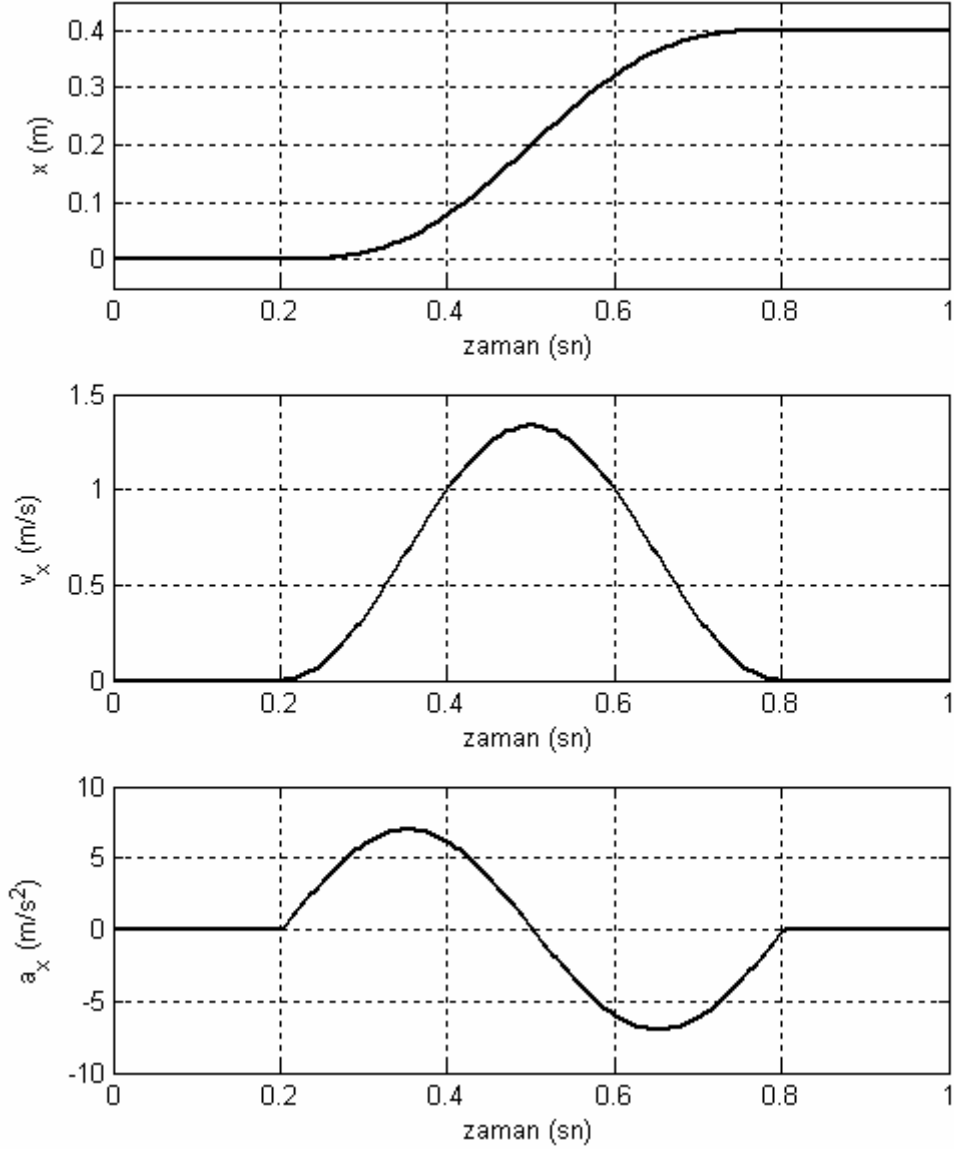
Burada; n adım numarası, S adım boyu, T adımın periyodu ve t_d gecikme zamanı olmak üzere w_f adım frekansıdır. (4.6) denklemindeki t_d gecikme zamanı, ayağın x eksenindeki hareketinin istenilen periyod zamanı içerisinde t_d kadar geç başlayıp, t_d

kadar erken bitmesini sağlamaktadır. Böylece Şekil 4.11’de görüldüğü gibi x eksenindeki hareket z eksenindeki hareketten daha geç başlayıp daha erken bitecektir. Bu gecikme zamanı, ayağın bir engeli aşmasının veya ayağın yere sürtünmeden yukarı kaldırılmasının gerekli olduğu durumlarda kullanılmak üzere ayak yörüngelerinin esnekliğini arttırmak için eklenmiştir. x eksen yörüngeleri, aynı zamanda y eksenindeki ayak hareketine ve ayağın yönlendirme açılarına referans vermede de kullanılmaktadır.



Şekil 4.11: $T = 1$ sn’lik Periyod ve Sırasıyla $t_d = 0$, $t_d = 0.1$, $t_d = 0.2$ sn’lik Gecikme Zamanları İçin Ayak Yörüngeleri

Bu şekilde elde edilmiş x eksenini boyunca ayak yörüngesinin konumu, hızı ve ivmesi ise Şekil 4.12’de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.12: $T = 1$ sn’lik Periyod ve $t_d = 0.2$ sn’lik Gecikme Zamanı için Ayak Yörüngesinin Konum, Hız ve İvme Referansları

Ayağın z eksenindeki hız yörüngesi ise 2 parçalı fonksiyondan meydana gelmektedir. İlk parça periyodun ilk yarısı için ikinci parça ise periyodun son yarısı için geçerlidir:

$$nT + t_d \leq t < (n + (1/2))T \text{ için;}$$

$$\dot{z}(t) = -\frac{h_1}{((T/2) - t_d)} \cos(2w_f(t - (nT + t_d))) + \frac{h_1}{((T/2) - t_d)} \quad (4.7a)$$

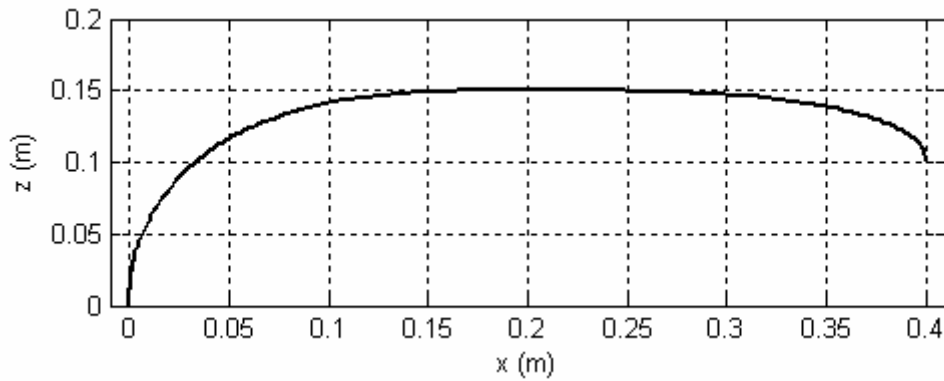
$$w_f = \frac{\pi}{(T/2) - t_d} \quad (4.7b)$$

$(n + (1/2))T \leq t < (n+1)T - t_d$ için;

$$\dot{z}(t) = \frac{h_2}{((T/2) - t_d)} \cos(2w_f(t - (nT + t_d))) - \frac{h_2}{((T/2) - t_d)} \quad (4.8a)$$

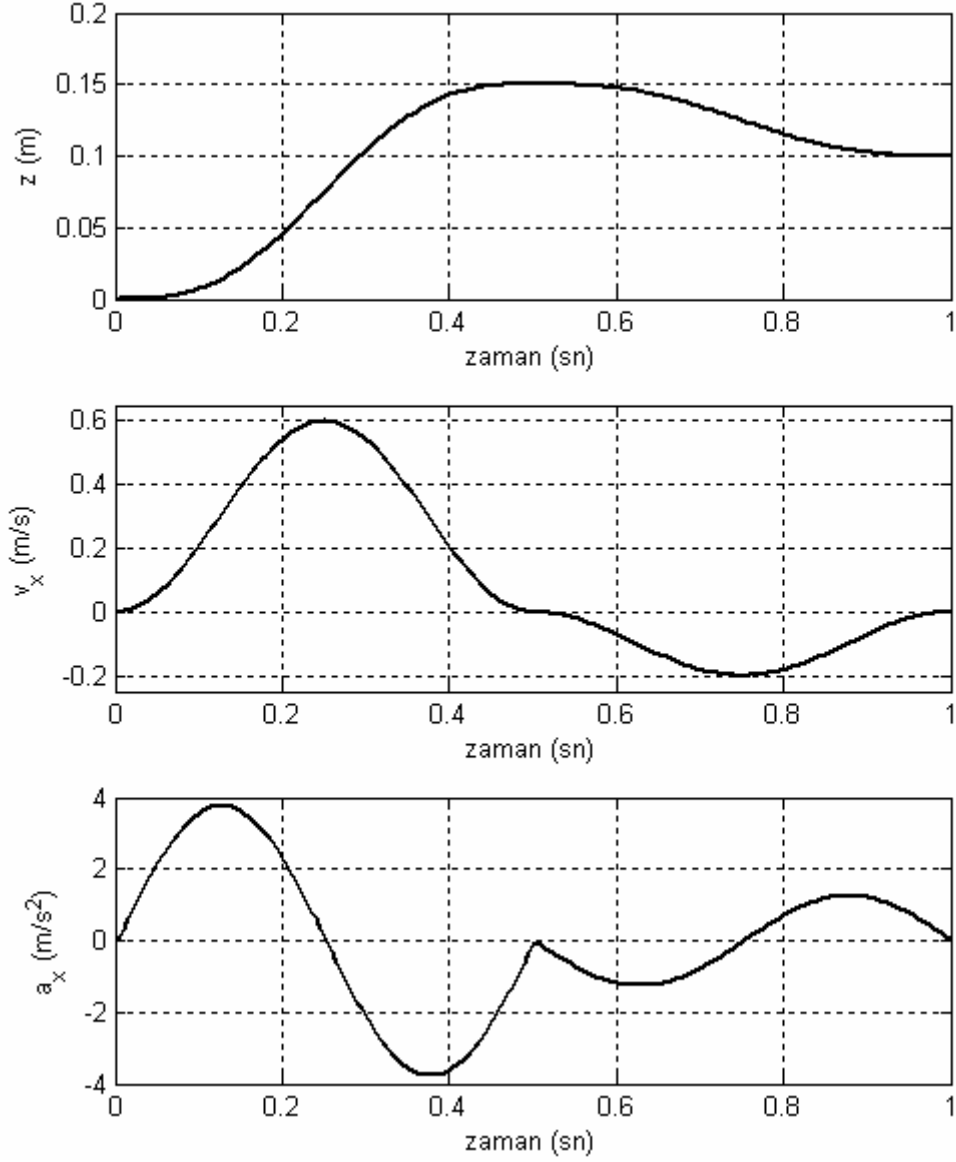
$$w_f = \frac{\pi}{(T/2) - t_d} \quad (4.8b)$$

Burada; n adım numarası, h_1 ayak kaldırma yüksekliği, h_2 ayak indirme yüksekliği, T adımın periyodu ve t_d gecikme zamanı olmak üzere w_f adım frekansdır. Bu denklemdaki t_d gecikme zamanı ise, x eksen yörüngesinde olduğu gibi ayağın z eksenindeki hareketinin istenilen periyod zamanı içerisinde t_d kadar geç başlayıp, t_d kadar erken bitmesini sağlamaktadır ve böylece kısa süreler için çift destek fazlarının meydana getirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca z eksenindeki yörüngenin 2 parçalı olmasından ötürü ayağın kaldırma ve indirme yükseklikleri ayrı ayrı ayarlanabilir. Bu da merdiven çıkmada ve inmede ayak yörüngesine Şekil 4.13’de görüldüğü gibi esneklik sağlamaktadır.



Şekil 4.13: $h_1 = 0.15\text{m}$ ve $h_2 = 0.05\text{m}$ Değerleri ile Elde Edilmiş Ayak Yörüngesi

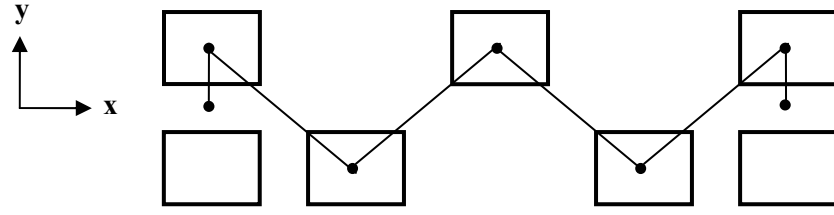
Bu şekilde elde edilmiş z eksenini boyunca ayak yörüngesinin konumu, hızı ve ivmesi ise Şekil 4.14'te görüldüğü gibidir.



Şekil 4.14: $h_1 = 0.15\text{m}$ ve $h_2 = 0.05\text{m}$ Değerleri ile Elde Edilmiş Ayak Yörüngesinin Z Eksenini Konum, Hız ve İvme Referansları

4.2.2 Ağırlık Merkezi Yörüngesi

Statik yürümede sıfır moment noktası referansı yaklaşık olarak ağırlık merkezinin yer düzlemindeki izdüşümünün takip ettiği yörüngedir. Bu nedenle ağırlık merkezine verilen yörünge sıfır moment noktasının takip etmesini istediğimiz referansı olacaktır. Sıfır moment noktası referansı ise Şekil 4.15'teki gibi verilebilir.



Şekil 4.15: Sıfır Moment Noktası Referansı

Şekil 4.15'teki sıfır moment noktası referansı ağırlığı bir ayaktan diğerine transfer eder. Bu işlem yeteri kadar yavaş gerçekleştirildiğinde ağırlık merkezindeki ivmelenmeler küçük kalacaktır ve sıfır moment noktası destek çokgeninin dışına çıkmayacaktır. Ağırlığın bir ayaktan diğerine transferi işlemi sırasında mekanizma çift destek fazındadır. Ağırlık ayağın orta noktasına transfer olduktan sonra ise diğer ayak ileri doğru konumlandırılır. Bu şekilde kararlı bir yürüme hareketi gerçekleştirilebilir fakat bu hareket oldukça yavaş olacağından yüksek hızlara çıkabilmek için dinamik yürüme hareketinin sağlanmasına gerek vardır.

4.3 Dinamik Yürüme

Statik yürümede hareket herhangi bir anda durdurulduğunda mekanizma dengededir. Dinamik yürümede ise mekanizma dinamik etkiler tarafından dengelendiğinden bu durum geçerli değildir. Dinamik yürüme hareketi yürümenin kontrolünü zorlaştırsada yüksek hızlara çıkabilmek açısından gereklidir. . Ayak yörüngesi olarak Kısım 4.2.1.1 de elde edilen ayak yörüngeleri aynen geçerlidir. Havadaki ayağın hareketinde dinamiğe etkisi olacaktır. Literatürde bu durumu da göz önüne alan ayak yörüngelerine bağlı modellerde mevcuttur [33]. Bu çalışmada mekanizmanın dengesi kapalı çevrim kontrol stratejileri ile desteklendiğinden (Kısım 5.2.2) sallanan ayağın dinamiğe etkisi ihmal edilmiştir.

4.3.1 Ağırlık Merkezi Yörüngesi

Dinamik yürümede ağırlık merkezi yörüngeleri (4.3) nolu denklemlerle verilen basitleştirilmiş modelden elde edilen diferansiyel denklemlerin çözülmesi yolu ile elde edilir. Bu çalışmada analitik çözüm, sayısal çözüm ve servo kontrol yaklaşımı ile çözümler incelenmiştir. Yürüme esnasında destek çokgeni ayağın geometrisiyle aynıdır ve yer düzleminde bir bölgedir. Sıfır moment noktasının yürüme hareketi boyunca Şekil 4.16'daki gibi yere basan ayağın orta noktasında kalmasını sağlamak kararlılık açısından daha iyidir. Böylece sıfır moment noktasının ayak kenarlarına olan mesafesi büyük olacaktır ve bu nokta etrafındaki sapmalar kararlılık açısından

büyük problem oluşturmayacaktır. Sıfır moment noktasının ayak kenarlarına yakın bir yerde seçilmesi halinde ise kararlılık sınırları daralmış olacaktır.



Şekil 4.16: Sıfır Moment Noktasının Yeri ve Kararlılık Sınırları

4.3.1.1 DTSM nin Analitik Çözümü

Sıfır moment noktasının tek destek fazında ayağın yani destek çokgeninin orta noktasında kalmasını tercih ettiğimiz takdirde bu noktaya yerleştirilmiş koordinat eksenine göre doğrusal ters sarkaç modeli profil düzlemi için aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\ddot{c}_x - \omega^2 c_x = 0 \quad (4.9a)$$

$$\omega = \sqrt{g/c_z} \quad (4.9b)$$

Bu denklemin analitik çözümü ise aşağıdaki gibi olacaktır:

$$c_x(t) = C_1 e^{\omega t} + C_2 e^{-\omega t} \quad (4.10)$$

C_1 ve C_2 katsayıları başlangıç koşullarına bağlı bir ifade olarak aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\dot{c}_x(t) = C_1 \omega e^{\omega t} - C_2 \omega e^{-\omega t} \quad (4.11)$$

$$c_x(0) = C_1 + C_2 \Rightarrow C_1 = c_x(0) - C_2 \quad (4.12)$$

$$\dot{c}_x(0) = C_1 \omega - C_2 \omega \quad (4.13)$$

$$\dot{c}_x(0) = (c_x(0) - C_2) \omega - C_2 \omega \quad (4.14)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} \left(c_x(0) - \frac{1}{\omega} \dot{c}_x(0) \right) \quad (4.15a)$$

$$C_1 = \frac{1}{2} \left(c_x(0) + \frac{1}{\omega} \dot{c}_x(0) \right) \quad (4.15b)$$

Böylece analitik çözüm aşağıdaki gibi elde edilmiş olur:

$$c_x(t) = \frac{1}{2} \left(c_x(0) + \frac{1}{\omega} \dot{c}_x(0) \right) e^{\omega t} + \frac{1}{2} \left(c_x(0) - \frac{1}{\omega} \dot{c}_x(0) \right) e^{-\omega t} \quad (4.16a)$$

Cephe düzlemi içinde aynı denklem elde edilir:

$$c_y(t) = \frac{1}{2} \left(c_y(0) + \frac{1}{\omega} \dot{c}_y(0) \right) e^{\omega t} + \frac{1}{2} \left(c_y(0) - \frac{1}{\omega} \dot{c}_y(0) \right) e^{-\omega t} \quad (4.16b)$$

Ağırlık merkezinin başlangıç hızının elde edilmesinde ise tekrarlanabilirlik koşullarından yararlanılır [33]. Profil düzlemindeki tekrarlanabilirlik koşulları, ağırlık merkezinin başlangıç konumunun bitiş konumunun eksi işaretlisi ve başlangıç hızının bitiş hızına eşit olacak şekildedir. Buna göre ağırlık merkezinin x eksenini doğrultusundaki başlangıç hızı aşağıdaki gibi elde edilir:

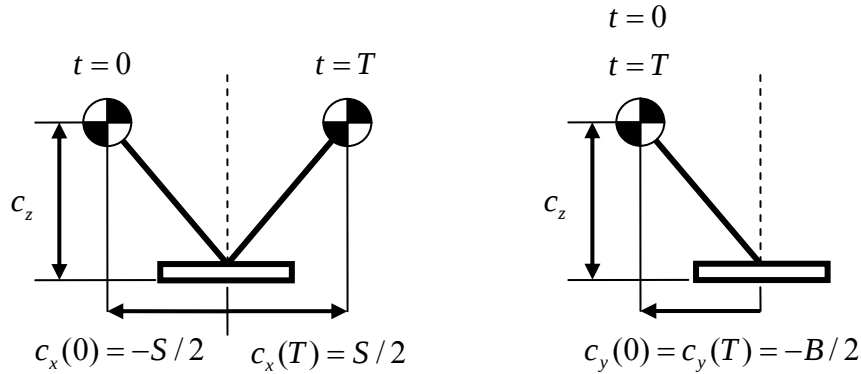
$$\begin{aligned} c_x(0) &= -c_x(T) \\ \dot{c}_x(0) &= \dot{c}_x(T) \end{aligned} \Rightarrow \dot{c}_x(0) = \frac{1+e^{\omega T}}{1-e^{\omega T}} \omega c_x(0) \quad (4.17)$$

Profil düzlemindeki ağırlık merkezinin başlangıç konumu ise adım boyunun yarısı olacak şekilde seçilir (Şekil 4.17).

Cephe düzlemi için tekrarlanabilirlik koşulları ise ağırlık merkezinin başladığı ve bittiği konum ile başlangıç hızı ile bitiş hızı aynı olacak şekilde verilirse (Şekil 4.17) y eksenini doğrultusundaki başlangıç hızı aşağıdaki gibi elde edilir.

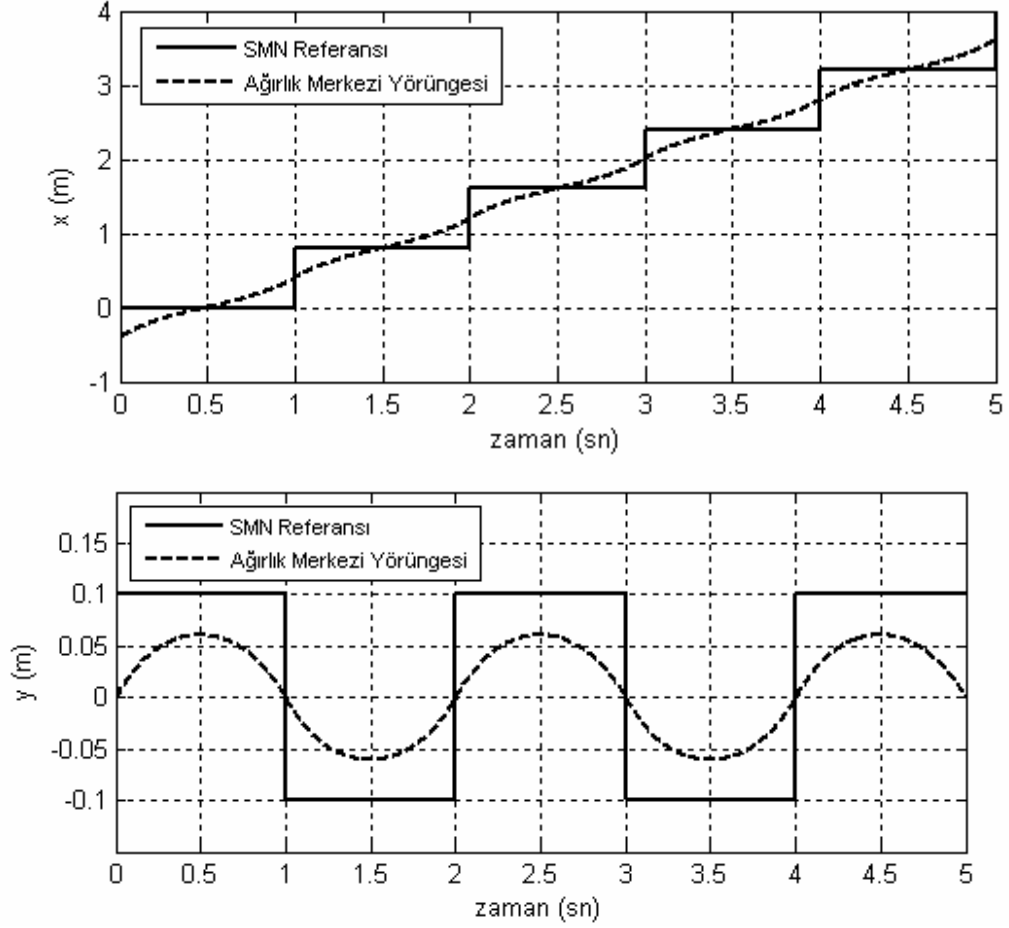
$$\begin{aligned} c_y(0) &= c_y(T) \\ \dot{c}_y(0) &= \dot{c}_y(T) \end{aligned} \Rightarrow \dot{c}_y(0) = \frac{1-e^{\omega T}}{1+e^{\omega T}} \omega c_y(0) \quad (4.18)$$

Cephe düzleminde ise ağırlık merkezinin başlangıç konumu iki ayak arası açıklığın yarısıdır (Şekil 4.17).



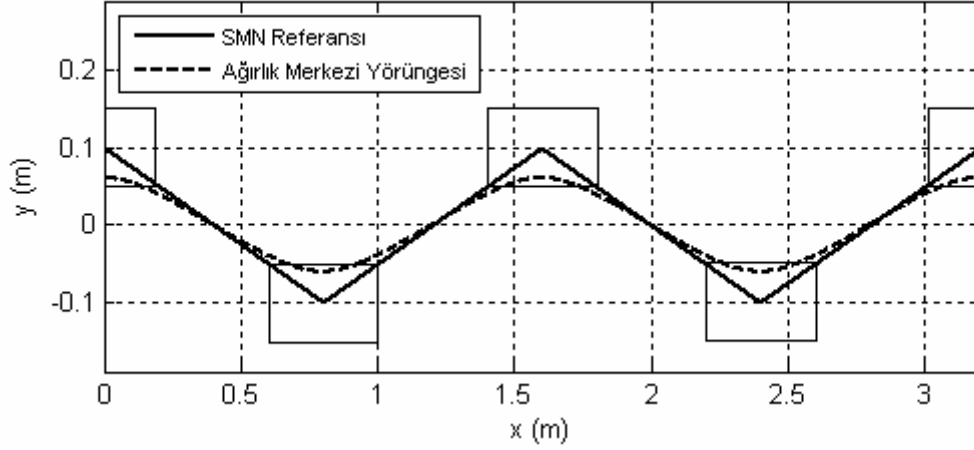
Şekil 4.17: Ters Sarkacın Cephe ve Profil Düzemleri için Sınır Koşulları

Ağırlık merkezi yörüngeleri bu denklemlerle T periyodu olan tek bir adım için elde edilebilir. Birden çok adım için elde edilecek yörüngelerin birbirleriyle uygun bir şekilde birleştirilmesi gereklidir. Bu işlem yapıldığı takdirde ağırlık merkezi yörüngeleri Şekil 4.18'deki gibi elde edilir.



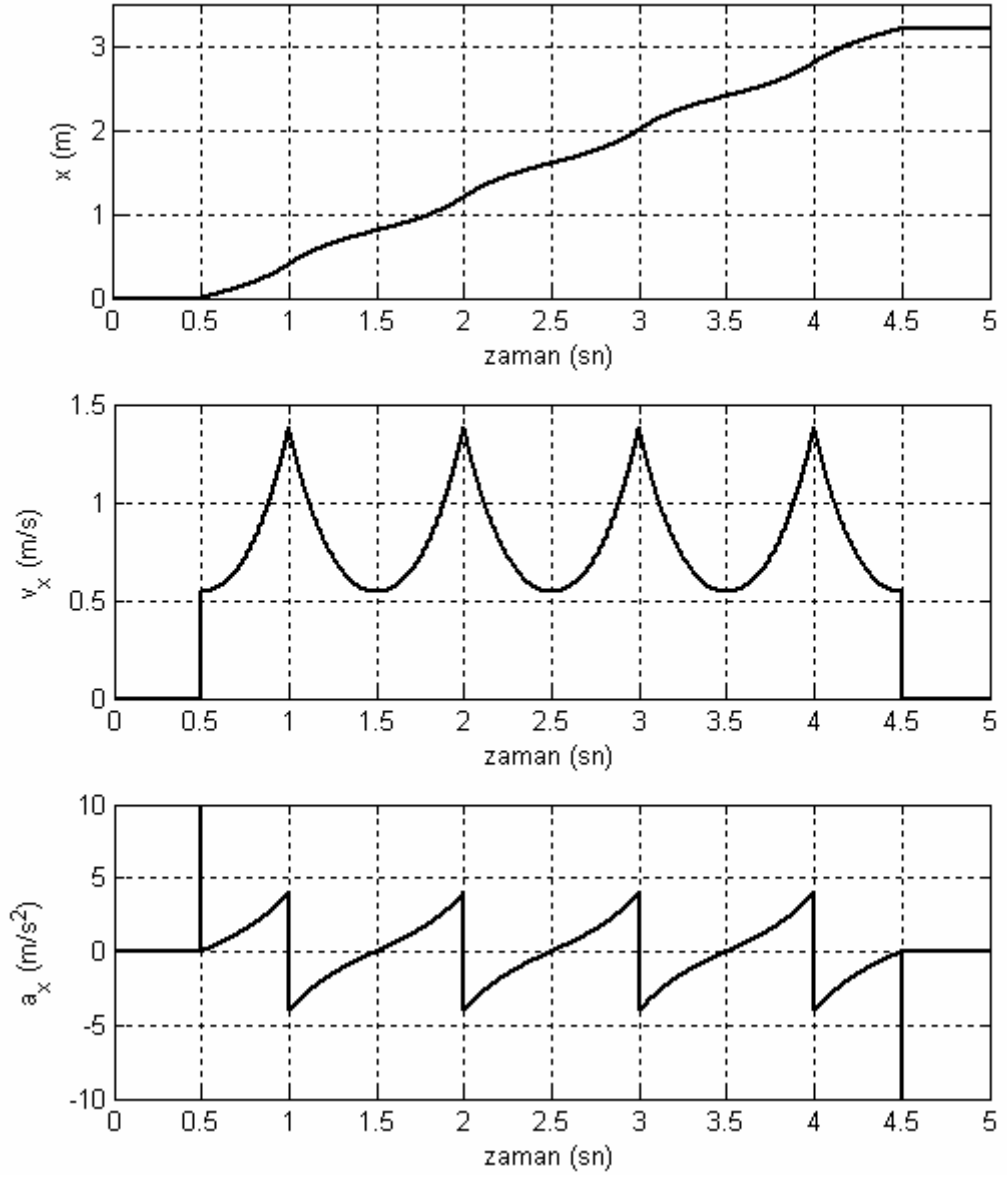
Şekil 4.18: Sıfır Moment Noktasının ve Analitik Çözümle Elde Edilmiş Ağırlık Merkezi Yörüngesinin X ve Y Eksenli Referansları

X-Y düzlemindeki ağırlık merkezi yörüngesi, sıfır moment noktası referansı ve ayakların konumları ise Şekil 4.19'daki gibi olacaktır.

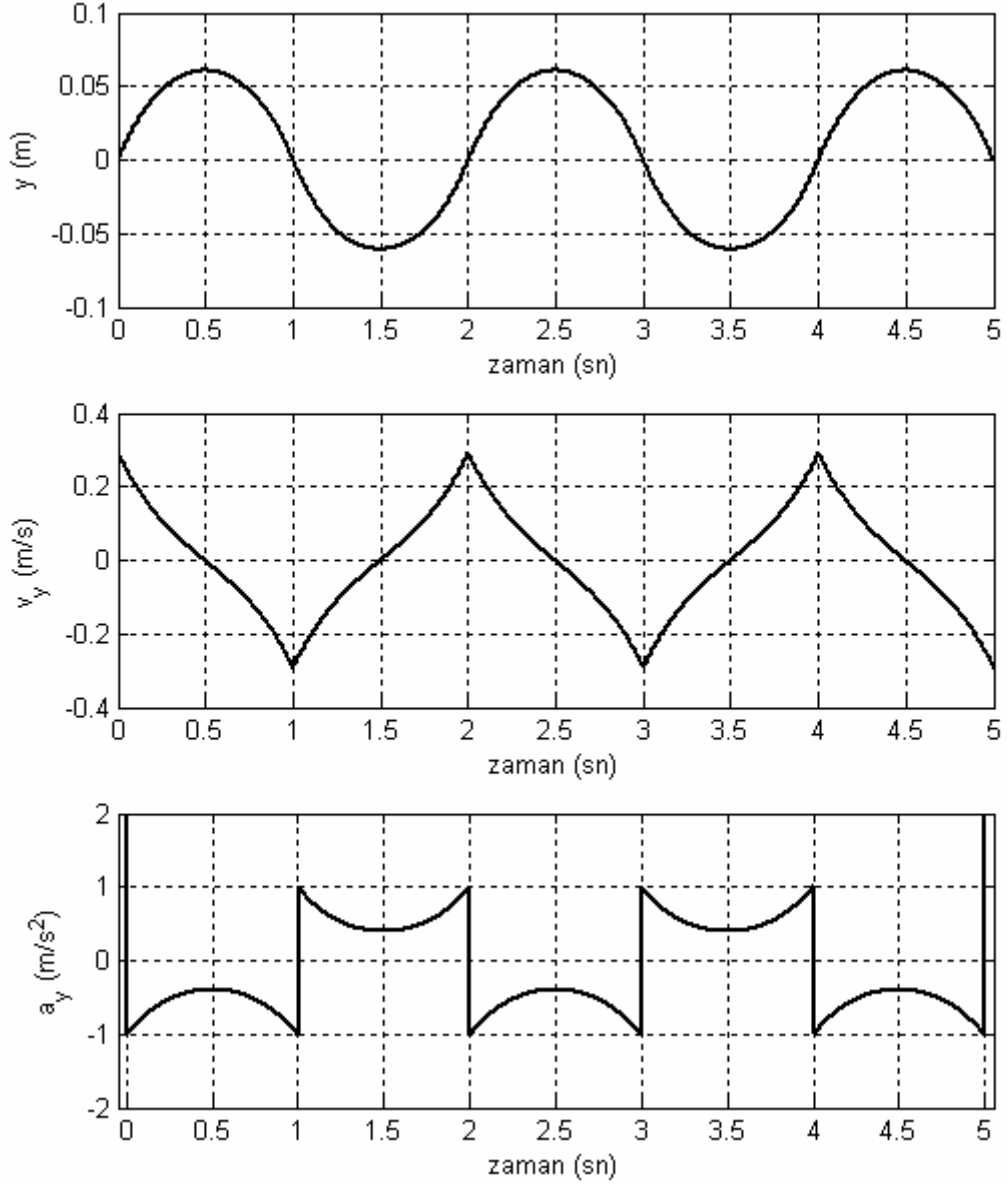


Şekil 4.19: Sıfır Moment Noktasının ve Analitik Çözümle Elde Edilmiş Ağırlık Merkezi Yörüngesinin Yer Düzlemindeki Referansı

Şekil 4.18’de görüldüğü gibi ağırlık merkezinin x eksenindeki başlangıç konumu eksi bir değerden başlamakta ve bitiş konumu ise istenilenden ilerde kalmaktadır. Bu nedenle yörüngenin başlangıç ve bitiş konumlarında kırılması gerekmektedir. Bu durum yörüngede bir süreksizliğe neden olduğundan pratikte uygulanabilir değildir (Şekil 4.20). Y eksenini doğrultusundaki ağırlık merkezi yörüngesinde de başlangıç ve bitişte süreksizlikler söz konusudur (Şekil 4.21). Bunların dışında SMN referansının süreksiz olmasından ötürü elde edilen ağırlık merkezi yörüngelerinde süreksizlikler mevcuttur. Bu yörüngeler bir alçak geçiren filtreden geçirilip yumuşatılarak fiziksel olarak gerçekleştirilebilir hale getirilebilir fakat başlangıç ve bitişte sıfır moment noktasının istenilen konumda kalması sağlanamamaktadır. Ayrıca bu şekilde analitik yolla elde edilmiş yörüngeler adım boylarının başlangıçtakiyle aynı kalmasını gerektirmektedir ve adım boyları küçültülüp büyütülememektedir. Literatürde bu problemi aşmak için daha karmaşık analitik çözüm algoritmaları mevcuttur [34].



Şekil 4.20: Kırpılmış Ağırlık Merkezi Yörüngesinin X Eksenli Konum, Hız ve İvme Referansları



Şekil 4.21: Kırılmış Ağırlık Merkezi Yörüngesinin Y Eksenli Konum, Hız ve İvme Referansları

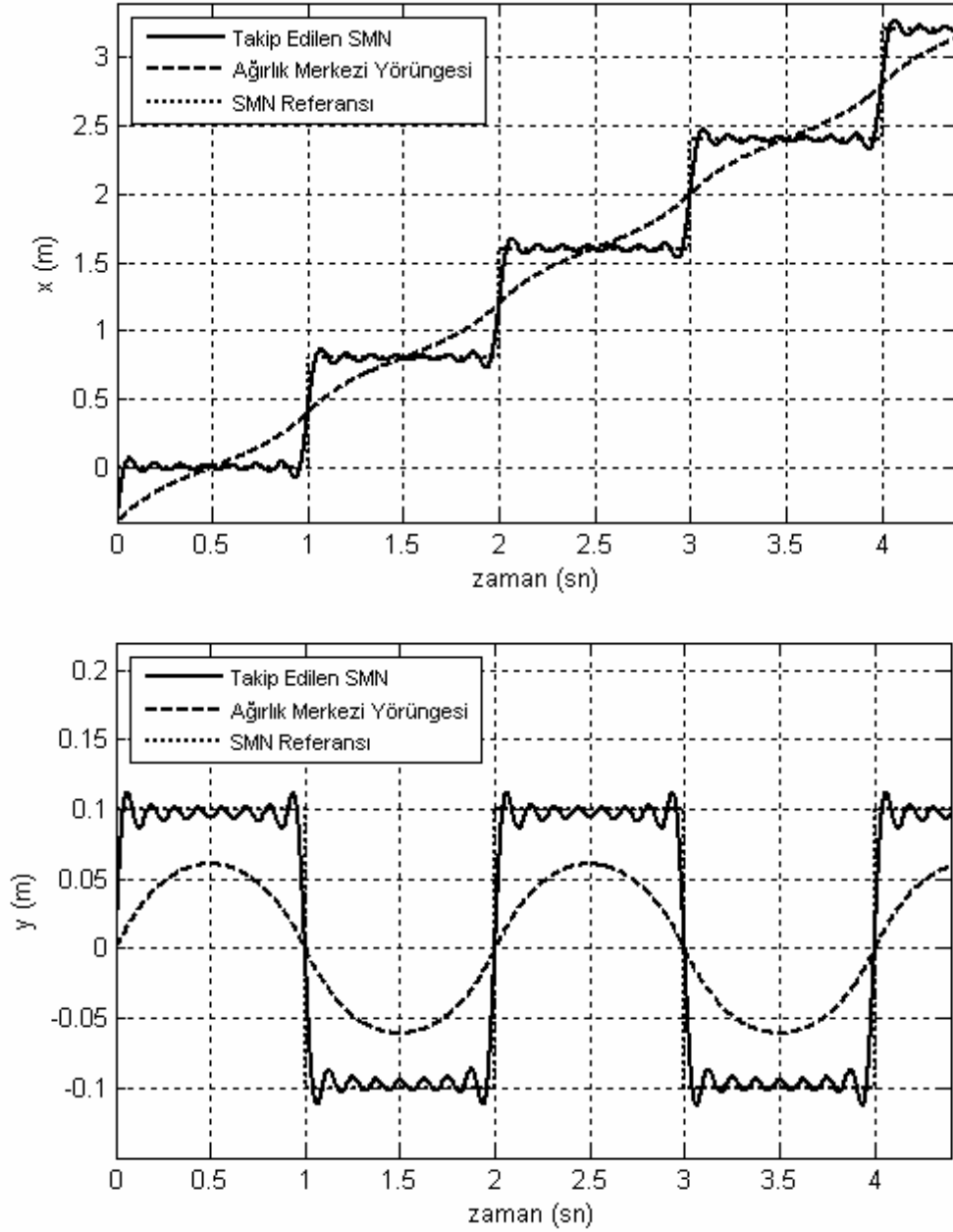
4.3.1.2 DTSM nin Sayısal Çözümü

(4.3) nolu diferansiyel denklemleri seriye açarak çözmekte mümkündür. SMN referansının Şekil 4.15'teki gibi olduğu fourier serilerine açılarak elde edilmiş bir çözüm aşağıdaki gibidir [35].

$$c_x(t) = \frac{B}{T} \left(t - \frac{T}{2} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{BT^2\omega^2(1+\cos(n\pi))}{n\pi(T^2\omega^2+n^2\pi^2)} \sin\left(\frac{n\pi}{T}t\right) \quad (4.19a)$$

$$c_y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2ST^2\omega^2(1-\cos(n\pi))}{n\pi(T^2\omega^2+n^2\pi^2)} \sin\left(\frac{n\pi}{T}t\right) \quad (4.19b)$$

Sayısal çözümle elde edilmiş yörüngeler Şekil 4.22’de görüldüğü gibidir. Analitik çözümle elde edilmiş yörüngelerin dezavantajları sayısal çözümle elde edilmiş yörüngelerde de mevcuttur. Bunun dışında SMN referansının insanda olduğu gibi topuktan parmak ucuna doğru ayak içinde hareket ettiği durum için sayısal çözümle elde edilmiş ağırlık merkezi yörüngeleri de literatürde mevcuttur [36]. Yine literatürde bu diferansiyel denklemlerin Hızlı Fourier Dönüşümleri ile gerçek zamanlı çözdürülmesi şeklinde elde edilmiş yörüngelerin ağırlık merkezine referans olarak verilmesi şeklinde uygulamalar da mevcuttur [37].



Şekil 4.22: SMN Referansı, Takip Edilen SMN Referansı ve Sayısal Çözümle Elde Edilmiş Ağırlık Merkezi Yörüngesinin X ve Y Ekseni Referansları

4.3.1.3 DTSM nin Servo Kontrol Yaklaşımı ile Çözümü

Analitik veya sayısal yollarla elde edilen ağırlık merkezi yörüngelerinin dinamik yürüme hareketinin esnek bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak vermemesinden ötürü esnekliği arttıracak yöntemler araştırılmıştır. Bunun sonucunda esnek yörüngelerin eldesinde diferansiyel denklemlerin çözümünün bir servo kontrol problemi olarak ele alındığı durum uygun bulunmuştur [38,40]. Ağırlık merkezinin ivmesinin zamana göre türevini yeni bir değişken olarak tanımladığımızda;

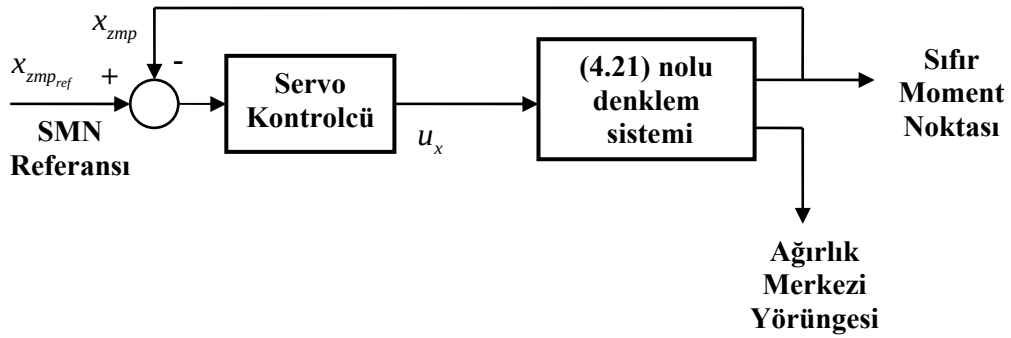
$$\frac{d}{dt}\ddot{c}_x = u_x \quad (4.20)$$

(4.3) nolu denklemler, tanımlanan yeni değişken giriş, sıfır moment noktasının konumu ile ağırlık merkezinin konumu çıkışlar olacak şekilde durum-uzay gösteriminde uygun bir dinamik sisteme aşağıdaki gibi dönüştürülür:

$$\begin{bmatrix} \dot{c}_x \\ \ddot{c}_x \\ \ddot{\ddot{c}}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_x \\ \dot{c}_x \\ \ddot{c}_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_x \quad (4.21)$$

$$\begin{bmatrix} x_{zmp} \\ c_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -c_z/g \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_x \\ \dot{c}_x \\ \ddot{c}_x \end{bmatrix}$$

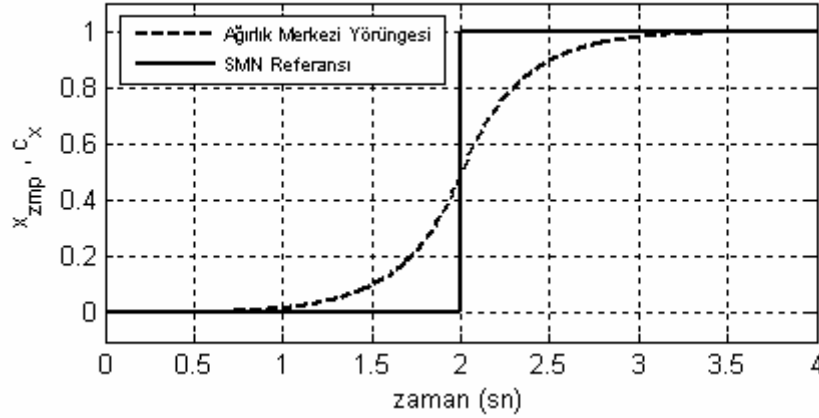
Şekil 4.23'teki blok diyagramında gösterildiği gibi (4.21) nolu durum-uzay denklemlerinden sıfır moment noktası konumu geri besleme olarak alınarak istenilen sıfır moment noktası referansını takip edecek şekilde bir kontrol gerçekleştirilerek diğer çıkış olarak ağırlık merkezi yörüngesi elde edilmiş olur.



Şekil 4.23: DTSM'nin Servo Kontrol ile Çözümü(Blok Diyagramı)

Dinamiğin kararsız olması sebebiyle istenilen SMN referansının takip edilmesinde herhangi bir kontrolcü kullanılamamaktadır. Şekil 4.24'teki yörüngeden de görüldüğü üzere ağırlık merkezi sıfır moment noktası referansında değişim meydana gelmeden önce hareketlenmeye başlamaktadır. Bu durumun kontrolle mümkün olabilmesi için referansın gelecekteki değerlerine bakarak kontrol uygulayan bir kontrolcünün kullanılması gereklidir.

Literatürde referansın gelecekteki değerlerine bakarak kontrol uygulayan önizlemeli kontrol tekniğinin [39] HRP isimli robot üzerinde uygulandığı çalışmalar mevcuttur [38].



Şekil 4.24: Ağırlık Merkezi Yörüngesinin SMN Referansından Önce Değişimi

Yapılan araştırmalarda model öngörülü kontrolün önizlemeli kontrolle benzer olduğu sonucuna varılmıştır [41,42]. Bu nedenle servo kontrolcü olarak MATLAB in model öngörülü araç kutusu kullanılarak bir model öngörülü kontrolcü tasarlanmıştır. Öncelikle (4.21) nolu durum-uzay denklemleri T örnekleme zamanı için aşağıdaki gibi ayrıştırılmıştır.

$$c_x(k+1) = Ac_x(k) + Bu(k) \quad (4.22)$$

$$x_{zmp}(k) = Cc_x(k)$$

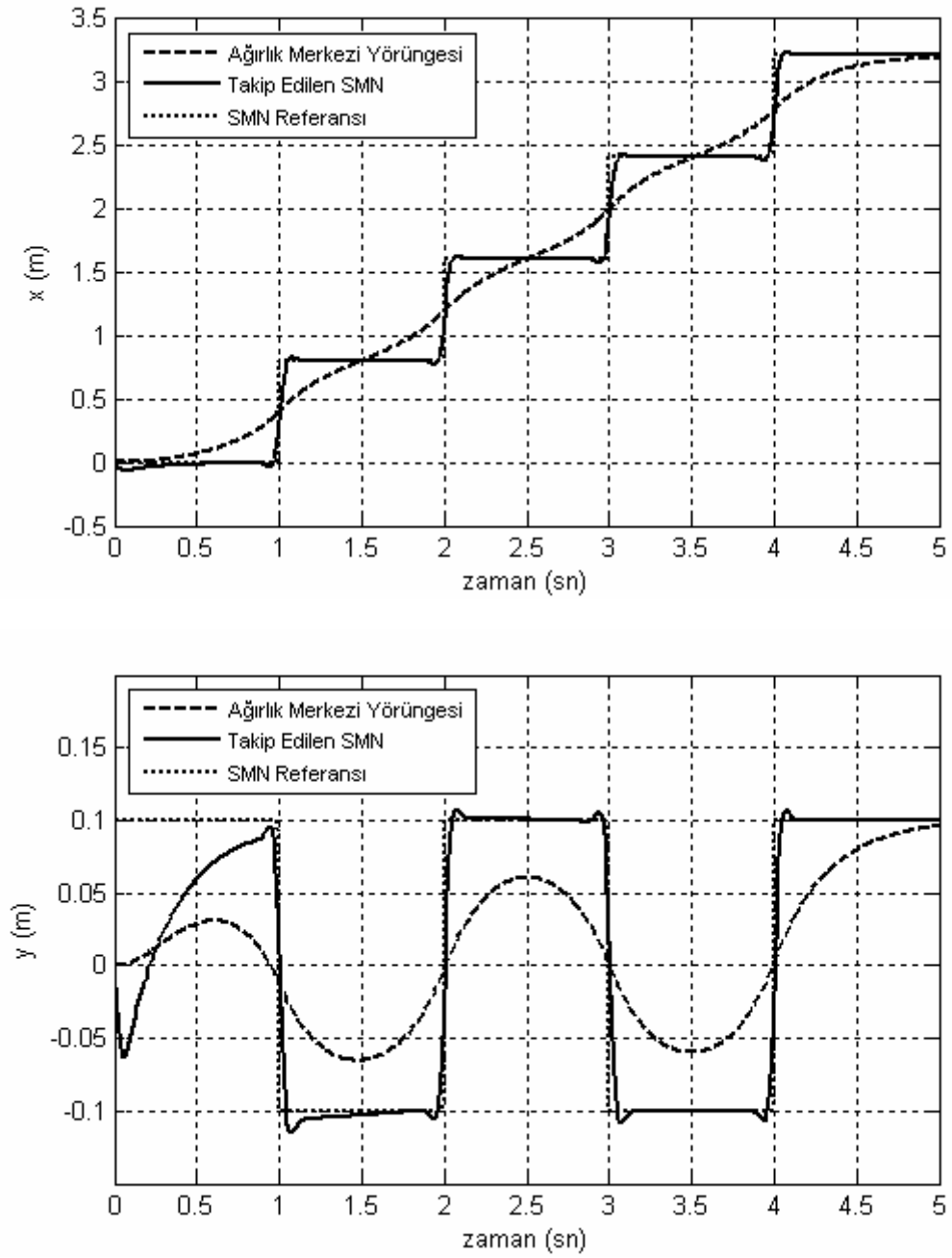
$$A = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; \quad B = \begin{bmatrix} T^3/6 \\ T^2/2 \\ T \end{bmatrix} ; \quad C = [1 \quad 0 \quad -c_z/g] \quad (4.23)$$

Sistemin bu ayrık zamandaki durum-uzay denklemleri model öngörülü araç kutusuna aktararak gerekli parametrelerin ayarlanması ile istenilen cevabı elde edecek şekilde bir kontrolcü tasarlanmıştır. Ayarlanan parametrelerin değerleri ise aşağıdaki tablodaki gibidir.

Tablo 4.1: Model Öngörülü Kontrolcünün Parametreleri

Parametre Adı	Değer
Kontrol Aralığı	0.01
Öngörü Ufku	300
Kontrol Ufku	100
Toplam Ağırlık	0.8

Bu kontrolcü ile elde edilen ağırlık merkezi yörüngeleri Şekil 4.25'teki gibidir. Yörüngelere dikkat edildiğinde analitik ve sayısal çözümlerdeki süreksizliklerin olmadığı ve ağırlık merkezinin hareketine hep sıfır konumundan başladığı görülür. Y eksenindeki SMN referansı başlangıçta süreksiz olmasına rağmen ağırlık merkezi hareketine sıfır konumundan başlamaktadır.



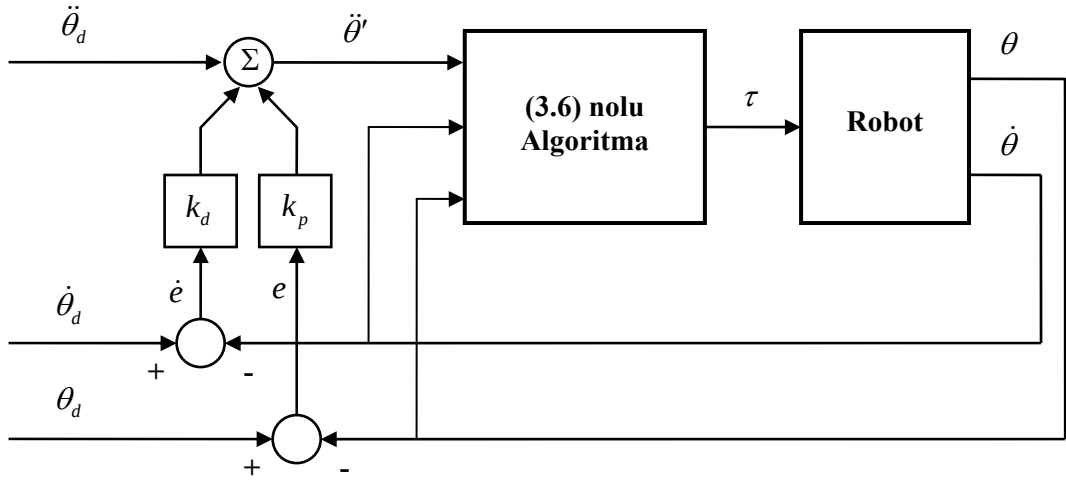
Şekil 4.25: SMN Referansı, Takip Edilen SMN Referansı ve Servo Kontrol Yaklaşımı ile Elde Edilmiş Ağırlık Merkezi Yörüngesinin X ve Y Eksenli Referansları

5. KONTROL

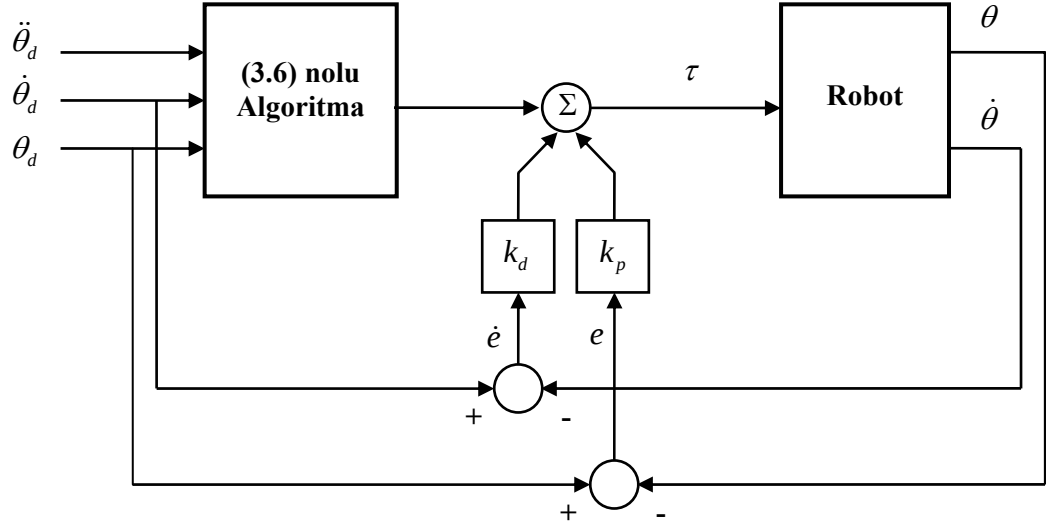
Bu kısımda yürüme hareketinin kontrolüyle ilgili detaylar anlatılacaktır. Önceki kısımlardan elde edilen bilgiler ışığında sistemin kontrolcüsü tasarlanmıştır.

5.1 Hesaplanmış Moment Yöntemi ile Kontrol

Mekanizmanın referans eklem yörüngelerini hassas bir şekilde takip edebilmesi amacıyla motorlara uygulanması gereken torklar Kısım 3.2 deki algoritma kullanılarak elde edilmiştir. Bu yöntem hesaplanmış moment yöntemi olarak bilinmektedir. Pratikte sistem parametrelerinin hassas bir şekilde bilinmemesi, bozucu etkilerin varlığı ve modellenmemiş dinamik etkiler gibi etkiler nedeniyle gözönüne alınan ters dinamik model referansların takibinde tek başına yeterli değildir ve servo kontrolcüler ile desteklenmesi gereklidir. Literatürde hesaplanmış moment yönteminin uygulanmasında Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de görüldüğü gibi iki farklı yöntem göze çarpmaktadır [17].



Şekil 5.1: Hesaplanmış Moment Yöntemi(Algoritma Servo Döngüsünün İçinde)



Şekil 5.2: Hesaplanmış Moment Yöntemi(Algoritma Servo Döngüsünün Dışında)

Şekil 5.1'deki blok diyagramında torkların hesaplanmasında kullanılan ters dinamik model servo döngüsünün içinde yer almaktadır. Bu nedenle her hesaplama adımında (3.6) nolu algoritmanın işletilmesi gerekmektedir. Buda bilgisayarın hesap yükünü arttıracığından efektif olmayabilmektedir. Şekil 5.2'deki blok diyagramında ise ters dinamik hesaplar servo döngüsünün dışına alınmıştır. Böylece torkların hesaplanması servo döngüsünün örnekleme zamanından bağımsız olarak daha büyük örnekleme zamanlarında yapılabilir. Fakat bu durumda eklemeler arasında tam bir bağımsızlık sözkonusu olmayacaktır [17].

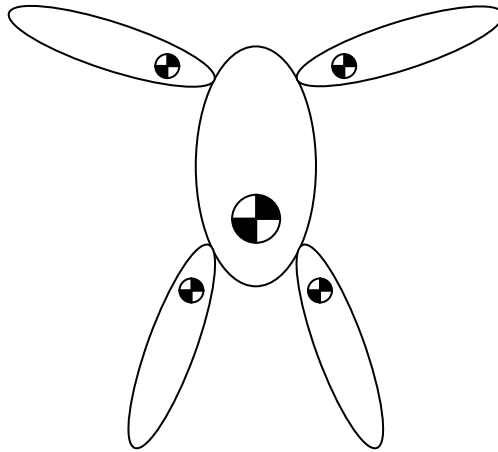
Bu çalışmada hesaplanmış moment yönteminin uygulanmasında Şekil 5.1'deki blok diyagramı kullanılmıştır ve kullanılan bilgisayarın yüksek hızlı olması nedeniyle hesap yükünün problem olmayacağı görülmüştür. Oransal ve türevsel kazançlar olan k_p ve k_d değerleri ise deneme yanılma yoluyla bütün eklemler için sırasıyla 300 ve 35 olarak elde edilmiştir.

5.2 Dinamik Yürümenin Kontrolü

Hesaplanmış moment yöntemiyle elde edilen torklar eklem referanslarından elde edilmektedir. Eklem referanslarının ise çift destek fazında her iki ayağın, tek destek fazında ise yere basan ayağın yerden ayrılmasını sağlayacak şekilde verilmelidir. Bu durum hem dengenin sağlanması hemde ters dinamik modelin geçerliliğinin sağlanması açısından gereklidir. Bu gerekliliklerin sağlanması ile birlikte mekanizmanın hareket edebilmeside istenmektedir. Bu amaçla dinamik yürümenin kontrolü açık çevrim ve kapalı çevrim olmak üzere iki ayrı kontrolcü ile sağlanmaktadır.

5.2.1 Dinamik Yürümenin Açık Çevrim Kontrolü

Bu kontrol yaklaşımında Kısım 4.3.1.3 de bahsedilen model öngörülü kontrolcü ile SMN referansını takip edecek şekilde elde edilmiş ağırlık merkezi yörüngeleri mekanizmanın ağırlık merkezine referans olarak verilmektedir. Mekanizmanın ağırlık merkezini gövde üzerindeki ters kinematiğin eldesinde referans olarak kullanılan noktaya taşıyacak olursak, ağırlık merkezi yörüngelerini bu noktaya referans olarak verebiliriz. Gerçekte ağırlık merkezinin yeri sabit değildir ve hareket esnasında sürekli olarak yer değiştirmektedir. Fakat gövdeden çıkan bacakların ve sonradan eklenebilecek kolların maksimum açıklıktaki ağırlık merkezlerinin yeri gövdeye yakın olduğu takdirde ve bu uzuvların ağırlıkları gövdenin ağırlığına göre oldukça düşük kaldığı takdirde bu uzuvların hareketi sonucunda meydana gelecek ağırlık merkezinin sabit kabul edilen yerindeki sapmalarda küçük olacaktır (Şekil 5.3). Ayrıca bacakların ağırlık merkezlerinin gövdeye yakın olması özellikle yüksek hızlı yürüme hareketi esnasında kalçadaki torkların düşük kalmasını sağlayacaktır.



Şekil 5.3: Gövdenin ve Gövdeden Çıkan Uzunların Ağırlık Merkezleri

Literatürde ağırlık merkezinin konumu ile bacak eklemlerinin ilişkisini ilişkilendiren bir jacobian yardımıyla ağırlık merkezine direk olarak referans verilmesi şeklinde uygulamalarda mevcuttur [43,44]. Fakat bu yöntem bilgisayarın hesap yükünü arttıracak bir gerekçeyle tercih edilmemiştir.

5.2.2 Dinamik Yürümenin Kapalı Çevrim Kontrolü

Sıfır moment noktasının destek çokgeni içinde kalmasını sağlayacak yörüngelerin elde edilmesinde kullanılan modelin basitleştirilmiş bir model olması, ağırlık merkezinin gövdedeki bir noktada sabit kaldığı varsayımı, pratikte meydana gelebilecek gürültü ve bozucu gibi hesaba katılmayan etkenlerin varlığı ve merdiven çıkma ile dönmeler esnasında modelden sapmaların meydana gelmesi nedeniyle

oluşacak hataların giderilmesi için sıfır moment noktasının yerinin kapalı çevrim kontrol edilmesine ihtiyaç vardır. Bu nedenle gövdeye Şekil 5.4'teki gibi iki motor tork üretici olarak eklenmiştir.

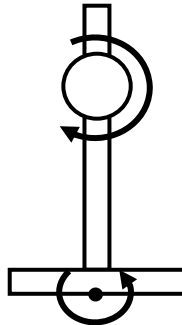


Şekil 5.4: Gövdeye Yerleştirilmiş Motorlar

Bu motorlar ayak ortasından ölçülen momentlerin dengelenmesinde kullanılmaktadır. Her motoru birbirinden bağımsız olarak ele alıp sürtünme etkilerinde hesaba katmadığımız takdirde motorların dinamiği aşağıdaki gibi elde edilir.

$$J\ddot{\theta} = \tau \quad (5.1)$$

Bu denklemdeki tork değeri Şekil 5.5'te görüldüğü gibi ayakların orta noktasından ölçülen momente eşitlendiğinde motorların açılarına verilmesi gereken referanslar elde edilir. Bu referanslar Şekil 5.6'da görüldüğü gibi servolara gitmektedir. Böylece motor ayak ortasından ölçülen momentleri dengeleyecek torklar üretecektir. Ters dinamiğin eldesinde motorların dinamiğinde hesaba katılmış olduğundan motorların tork etkileri bacaktaki eklemler tarafından karşılanacağından bu torklar direk olarak yere aktarılacaktır.

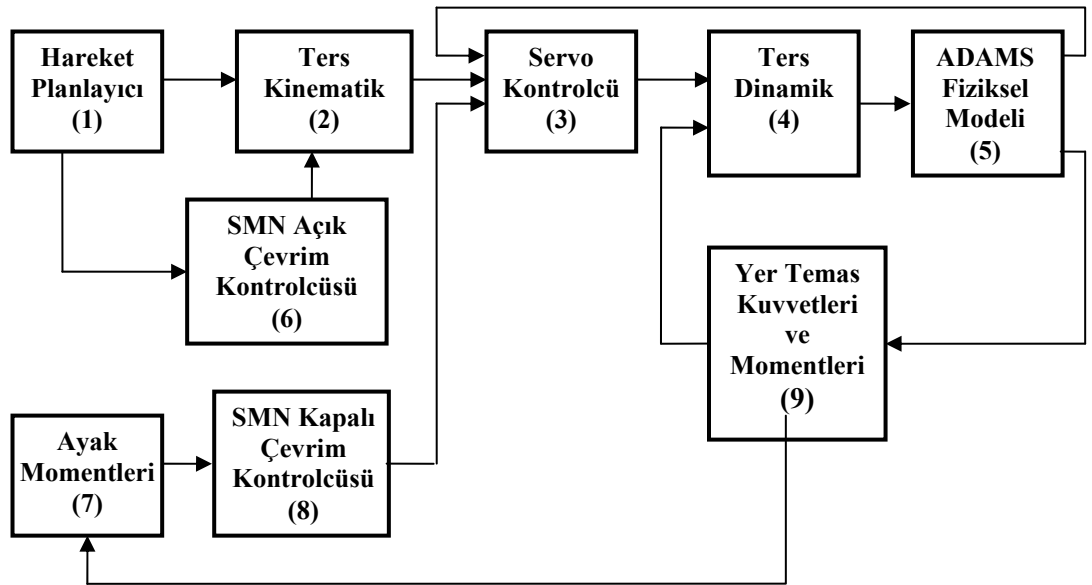


Şekil 5.5: Ayak Ortasındaki Moment ile Gövde Motorundaki Dengeleyici Moment

Burada yapılan esasında gövdenin yön kontrolüdür. Eğer gövdeyi dik tutabilecek şekilde yönünü kontrol edebiliyorsak mekanizma hiçbir şekilde devrilmeyecektir. Gövdenin dik pozisyonundaki yönünde meydana gelen küçük değişimler sıfır moment noktasının yerinin ayağın orta noktasından sapmasına neden olacaktır(veya tersi). Ayak ortasında meydana gelen momenti motorlarla dengelediğimiz takdirde sıfırlanacağından sıfır moment noktası ayağın ortasına çekilmiş olacaktır. Dengenin kapalı çevrim kontrolü sıfır moment noktası ayak içinde hareket ettiği zaman iyi sonuçlar vermektedir. Sıfır moment noktası ayak dışına çıktığında ayağın yerle olan teması kesileceğinden ayağın orta noktasından ölçülen momentler doğru sonuçlar vermeyecektir.

5.3 Kontrolcünün Genel Yapısı ve Blok Diyagramı

Kontrolcünün genel yapısı Şekil 5.6'da görüldüğü gibidir. Kontrol sistemi temel olarak 9 kısımdan oluşmaktadır. (1) nolu blokta robotun hareketleri planlanmaktadır. (2) nolu blokta ayakların ve ağırlık merkezinin yörüngelerinden eklem açıları hesaplanmaktadır, (3) nolu blokta eklem referans hataları kontrol edilmektedir, (4) nolu blokta motor torkları hesaplanmaktadır, (5) nolu blokta sistemin ADAMS taki dinamik modeli bulunmaktadır, (6) nolu blokta sıfır moment noktasının yeri açık çevrim ile kontrol edilmektedir, (7) nolu blokta sıfır moment noktasının yer düzlemindeki yeri hesaplanmaktadır, (8) nolu blokta sıfır moment noktasının yeri kapalı çevrim ile kontrol edilmektedir, (9) nolu blokta ise ADAMS tan ölçülen yer temas kuvvetleri ayağın uç noktası olarak kabul edilen orta noktasına kuvvet ve moment olarak indirgenmektedir.



Şekil 5.6: Kontrol Sisteminin Genel Yapısı ve Blok Diyagramı

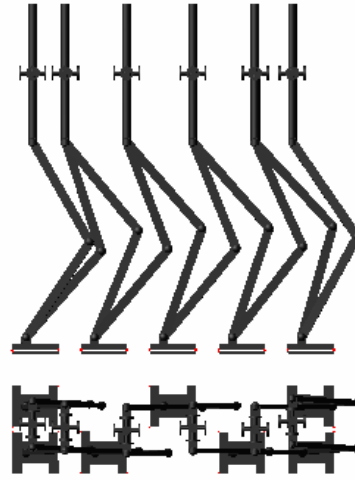
6. BENZETİMLER

Benzetimler için fiziksel ortam olarak ADAMS yazılımı kullanılmıştır. Kontrolcülerin tasarlanması için ise MATLAB yazılımı kullanılmıştır. Bu iki yazılım etkileşimli olarak çalışabilmektedir. İki yazılım arasındaki veri alışverişi sabit örnekleme zamanlarında yapılmaktadır ve bu örnekleme zamanı 0.0005 saniye olarak belirlenmiştir. Örnekleme zamanının belirlenmesinde en büyük etkenin yer temas kuvvetleri olduğu görülmüştür. Yer temas kuvvetlerindeki sert ve ani değişimlerin sistemin dinamiğini etkilediği ve ancak oldukça küçük örnekleme zamanlarında elde edilen sonuçların fiziksel olarak gerçekçi olduğu görülmüştür. MATLAB yazılımında ise çözücü olarak ode5 tercih edilmiştir ve hesap adım zamanı veri alışverişi için seçilen zamanla aynıdır. Benzetimlerde çift çekirdekli 2.13 GHz Core2Duo işlemcili bir bilgisayar kullanılmıştır ve çekirdeklerden birini ADAMS yazılımının tam kapasite ile kullandığı diğer çekirdeği ise MATLAB yazılımının %60 kapasite ile kullandığı görülmüştür. Buda gerçek zamanlı kontrolde problem olmayacağını göstermektedir.

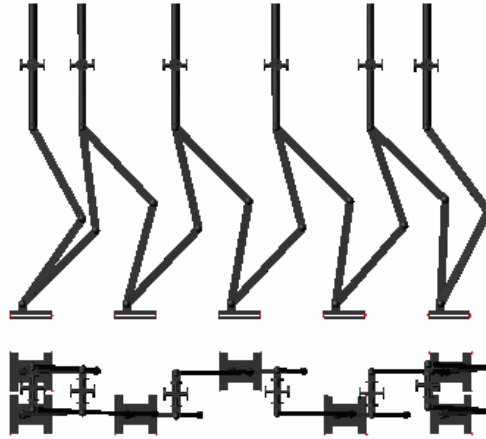
Benzetim sonuçlarında yoğun olarak düz bir yol üzerinde ileri yürüme senaryosu ele alınmıştır. Bunun dışında dönerek yürüme, merdiven inme ile çıkma ve yan yan yürüme senaryolarının sonuçlarından da kısaca bahsedilecektir.

6.1 İleri Yürüme

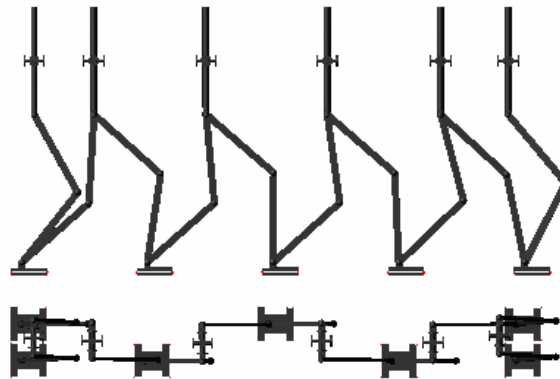
İleri yürüme hareketleri 9 farklı durum için ele alınmıştır. Bu durumlar adım boylarının 30 cm, 50 cm ve 70 cm olduğu; adım periyodlarının ise 0.5 sn, 0.75 sn ve 1 sn olduğu durumların kombinasyonlarıdır. Benzetim sonuçlarının üstüste bindirilmiş görüntüleri Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te görüldüğü gibidir.



Şekil 6.1: 30 cm'lik Adımlarla İleri Yürüme Hareketinin Üstüste Bindirilmiş Görüntüsü

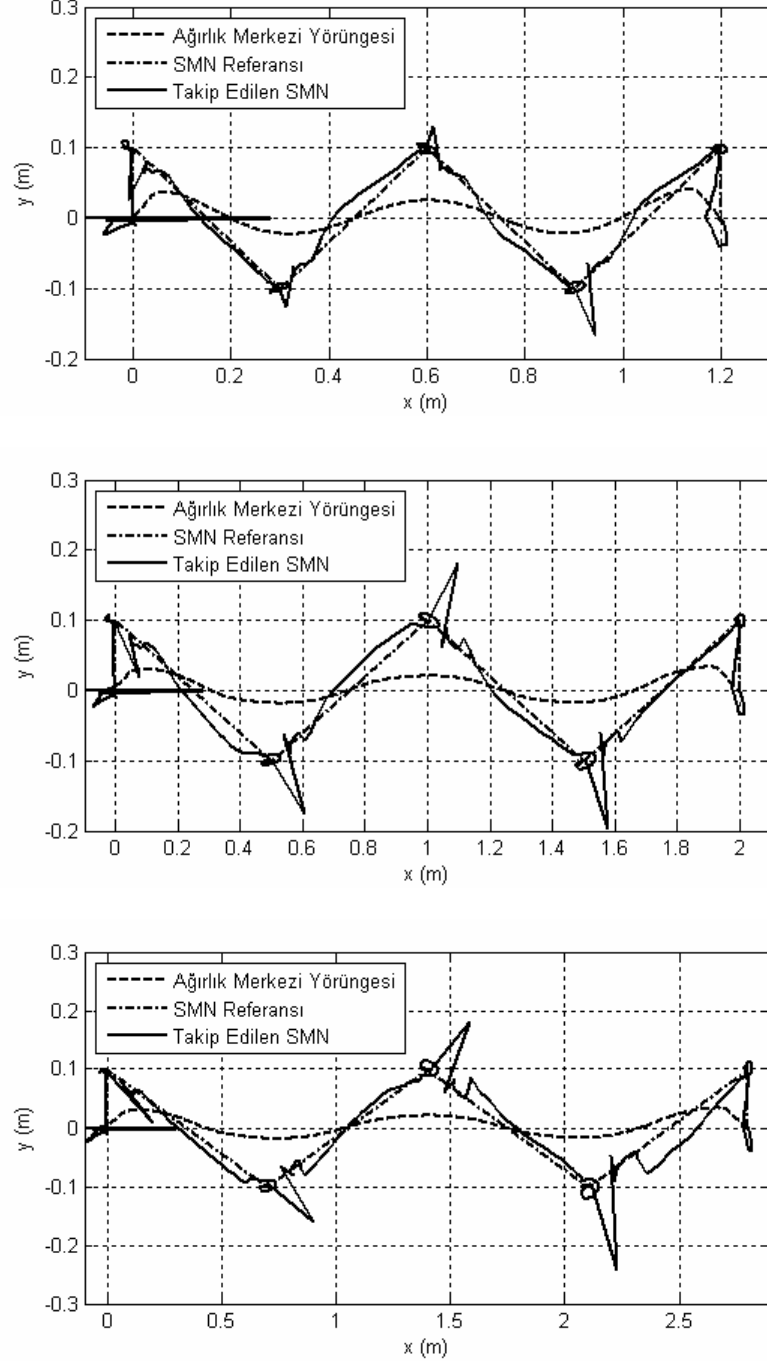


Şekil 6.2: 50 cm'lik Adımlarla İleri Yürüme Hareketinin Üstüste Bindirilmiş Görüntüsü



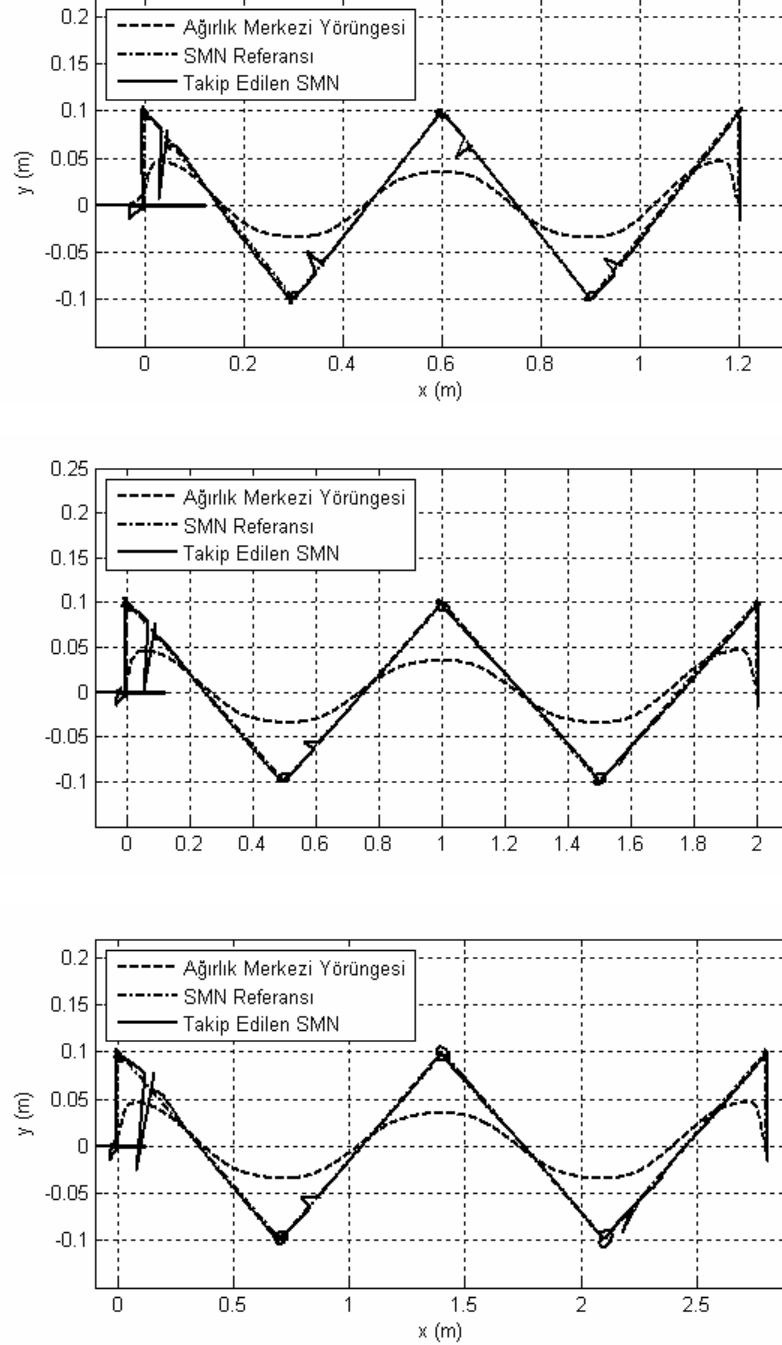
Şekil 6.3: 70 cm'lik Adımlarla İleri Yürüme Hareketinin Üstüste Bindirilmiş Görüntüsü

0.5 sn'lik adım periyodları ve 30 cm, 50 cm, 70 cm'lik adım boyları için elde edilmiş SMN referansı, SMN'nin takip edilen referansı ve ağırlık merkezi yörüngesi Şekil 6.4'te görüldüğü gibidir. Adım boyunun 70 cm olduğu 5 km/saat lik yürüme hızı için elde edilmiş yer temas kuvvetleri ve momentleri ile motor torkları EK A'da verilmiştir.



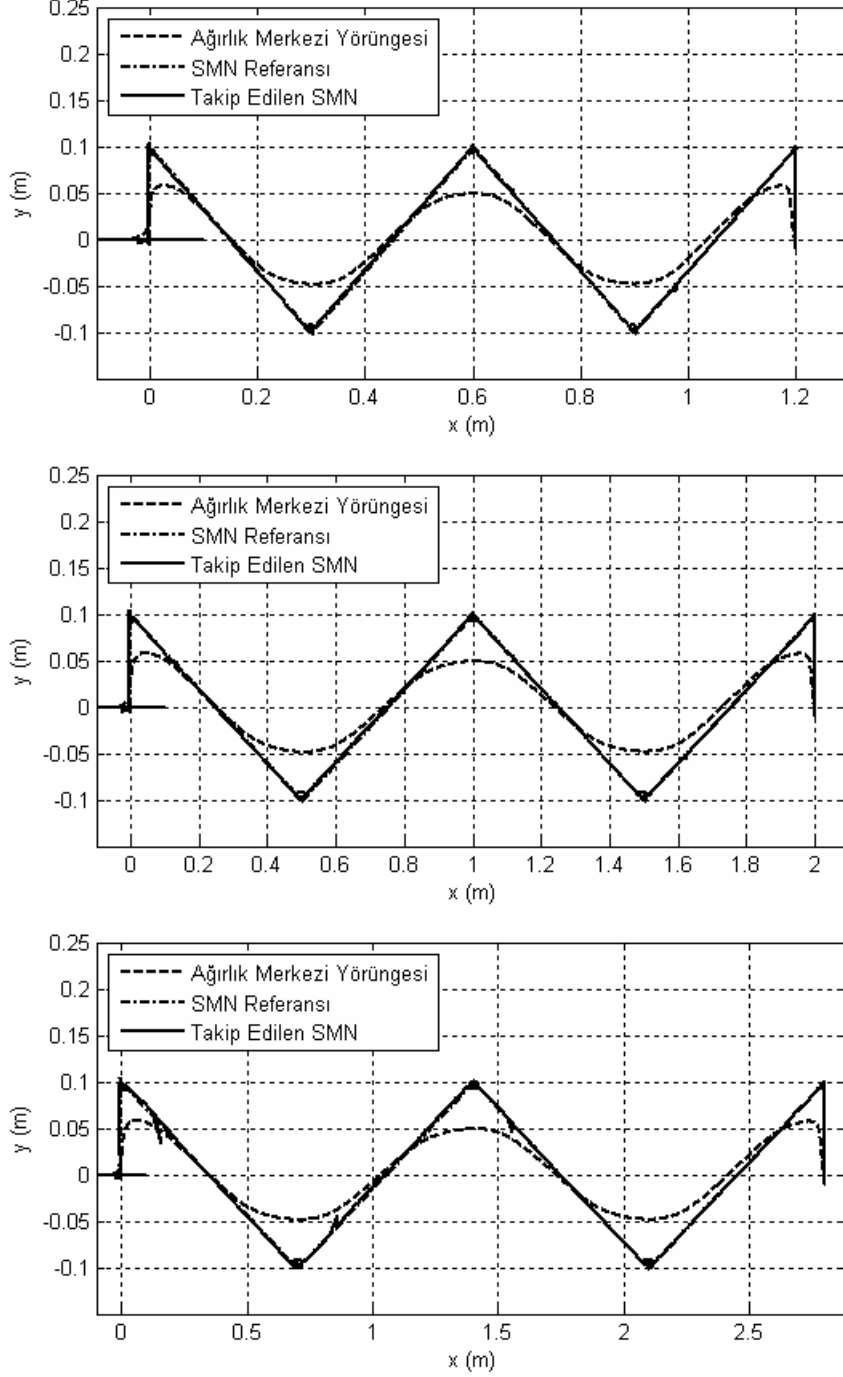
Şekil 6.4: $T = 0.5$ sn'lik Periyod ve 30 cm'lik, 50 cm'lik ve 70 cm'lik Adım Boyları için SMN Referansı, Takip Edilen SMN Referansı ve Ağırlık Merkezi Yörüngesi

0.75 sn'lik adım periyodları ve 30 cm, 50 cm, 70 cm'lik adım boyları için elde edilmiş SMN referansları, SMN'nın takip edilen referansı ve ağırlık merkezi yörüngesi Şekil 6.5'de görüldüğü gibidir. Adım boyunun 50 cm olduğu 2.4 km/saat lik yürüme hızı için elde edilmiş yer temas kuvvetleri ve momentleri ile motor torkları EK B'de verilmiştir.



Şekil 6.5: $T = 0.75$ sn'lik Periyod ve 30 cm'lik, 50 cm'lik ve 70 cm'lik Adım Boyları için SMN Referansı, Takip Edilen SMN Referansı ve Ağırlık Merkezi Yörüngesi

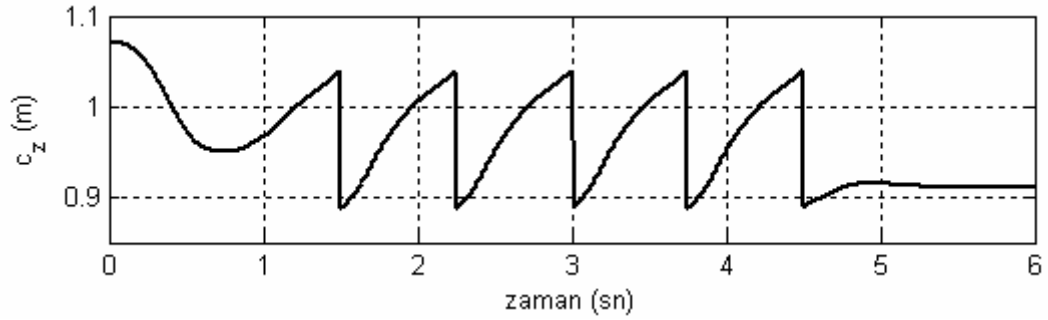
1 sn'lik adım periyodları ve 30 cm, 50 cm, 70 cm'lik adım boyları için elde edilmiş SMN referansları, SMN'nın takip edilen referansları ve ağırlık merkezi yörüngesi Şekil 6.6'da görüldüğü gibidir. Adım boyunun 30 cm olduğu 1 km/saat lik yürüme hızı için elde edilmiş yer temas kuvvetleri ve momentleri ile motor torkları EK C'de verilmiştir.



Şekil 6.6: $T = 1$ sn'lik Periyod ve 30 cm'lik, 50 cm'lik ve 70 cm'lik Adım Boyları için SMN Referansı, Takip Edilen SMN Referansı ve Ağırlık Merkezi Yörüngesi

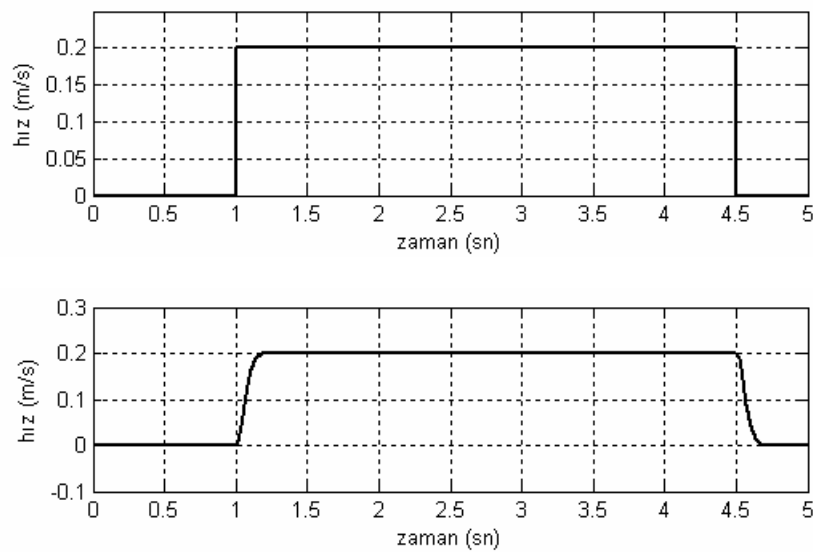
6.2 Merdiven Çıkma

Merdiven çıkma esnasında ağırlık merkezi z ekseninde sabit hızla yükseltilmektedir. Böylece z eksenindeki ivmelenmeler 0 olacaktır ve z ekseninde hareketin sınırlı olduğu duruma göre yazılmış (4.3) nolu denklemler geçerliliğini koruyacaktır. Fakat sabit kabul edilen c_z parametresinden Şekil 6.7’de görüldüğü gibi sapmalar meydana gelmektedir.



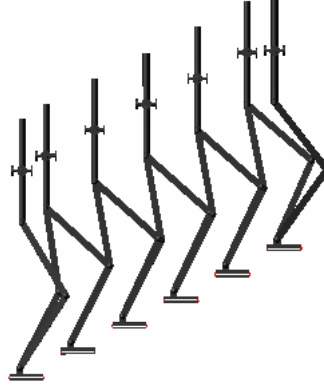
Şekil 6.7: Sabit Kabul Edilen c_z Parametresindeki Değişimler

Bu sabit hız değeri ise merdiven yüksekliği ile toplam merdiven sayısının çarpımının merdiven çıkması için geçen toplam süreye bölünmesi ile elde edilmektedir. Bu benzetimde 15 cm yüksekliğindeki 5 merdiven toplamda 3.7 sn içinde çıkılmaktadır ve buna göre z eksenı boyunca sabit hız 0.2 m/sn olacaktır. Bu sabit hız profili Şekil 6.8’de görüldüğü gibi süreksiz olduğundan yine Şekil 6.8’de görüldüğü gibi 2. mertebe alçak geçirgen bir filtreden geçirilmek suretiyle sürekli hale getirilip ağırlık merkezine referans olarak verilmektedir.



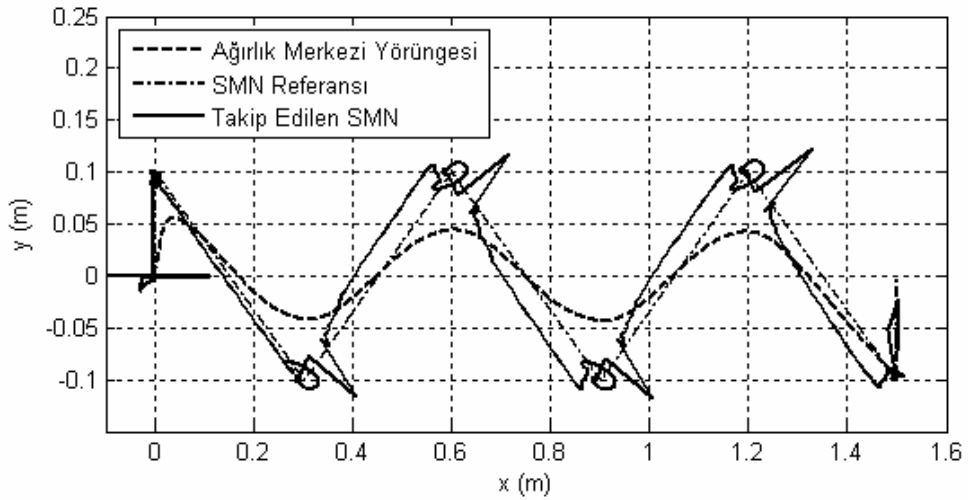
Şekil 6.8: Z Eksenindeki Hız Referansı ve Filtreden Geçirilmiş Hali

Benzetim sonuçlarının üstüste bindirilmiş görüntüsü Şekil 6.9'daki gibidir.



Şekil 6.9: Merdiven Çıkma Hareketinin Üstüste Bindirilmiş Görüntüsü

Bu benzetimden elde edilmiş SMN referansı, takip edilen SMN ile ağırlık merkezi yörüngesi Şekil 6.10'daki gibidir. Bu benzetimden elde edilmiş yer temas kuvvetleri ve momentleri ile motor torkları ise EK D'de verilmiştir.

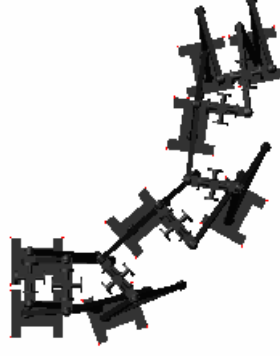


Şekil 6.10: 15 cm'lik Merdiven Çıkma Hareketi için SMN Referansı, Takip Edilen SMN Referansı ve Ağırlık Merkezi Yörüngesi

6.3 Dönerek Yürüme

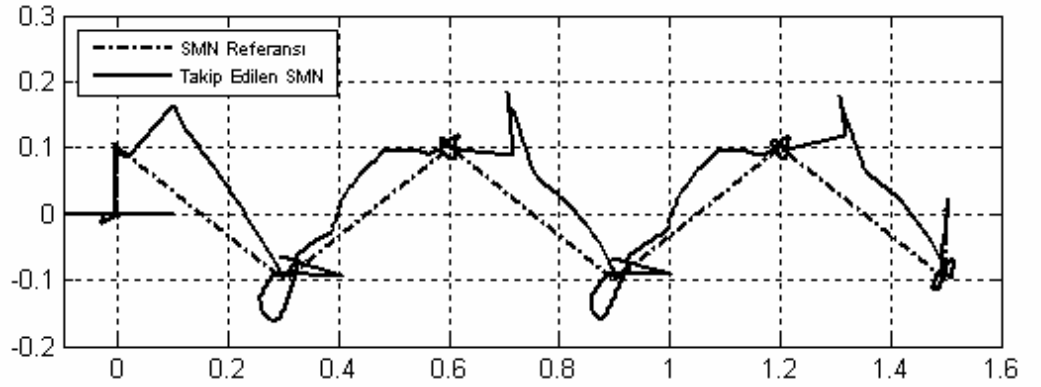
Dönerek yürüme düz yürüme gibi düşünülebilir. İstenilen sıfır moment noktası referansları ayakların orta noktasında olacağından ayaklar bu noktalar etrafında döndürüldüğünde bir problem olmayacaktır. Fakat dönmeler esnasında mekanizmaya bir merkezkaç kuvveti etkimekte ve buda mekanizmayı dışarı doğru savuran bir etki yapmaktadır. Bu etkinin telafisi için ASIMO da, bu etki öngörülmektedir [45]. Burada ise Kısım 5.2.2'de bahsedilen dengenin kapalı çevrim kontrolü için gövdeye

yerleştirilmiş motorlar kullanılmaktadır. Merkezkaç kuvveti çok büyük olduğu takdirde sıfır moment noktası ayağın dışına çıkacağından kontrolde zorlaşmaktadır. Bu durumda motorlara uygulanan torklar bir kazanç ile çarpılarak artırılabilir. Bu benzetimden elde edilmiş hareketin kuşbakışı üstüste bindirilmiş görüntüsü Şekil 6.11'deki gibidir.



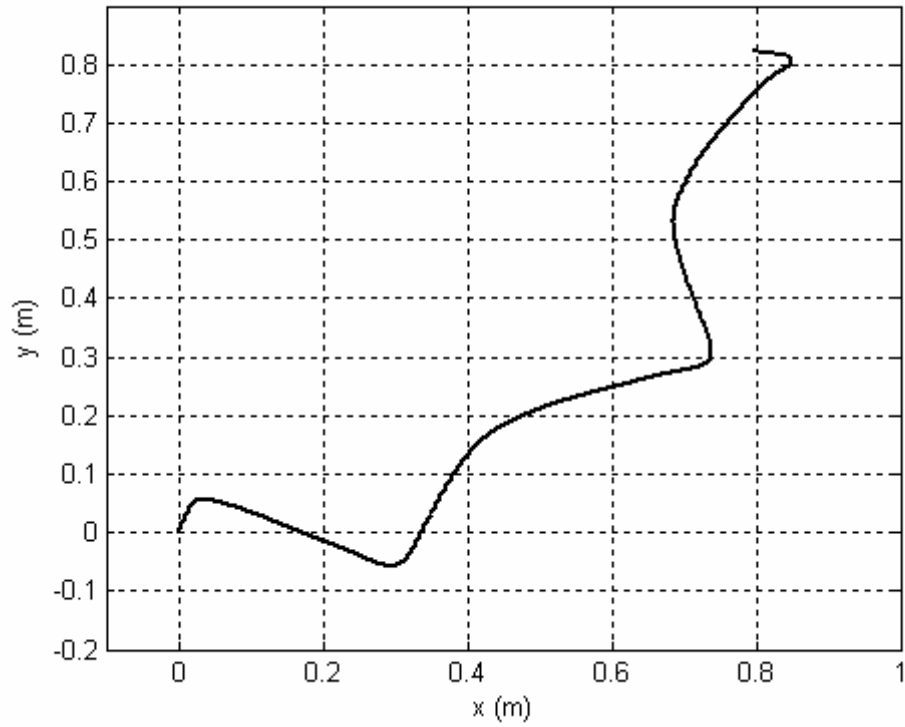
Şekil 6.11: Dönerek Yürüme Hareketinin Üstüste Bindirilmiş Görüntüsü

Bu benzetimden elde edilmiş sıfır moment noktasının istenilen referansı ve takip edilen referansı Şekil 6.12'deki gibidir.



Şekil 6.12: Dönerek Yürüme Hareketi için SMN Referansı ve Takip Edilen SMN Referansı

Ağırlık merkezinin yörüngesi ise Şekil 6.13'deki gibidir. Burada ağırlık merkezinin x-y düzleminde döndüğü görülmektedir.

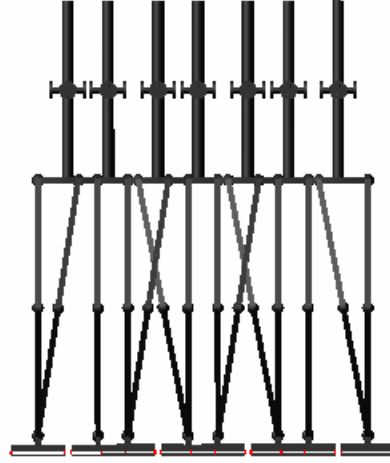


Şekil 6.13: Dönerek Yürüme Hareketindeki Ağırlık Merkezi Yörüngesi

Bu benzetimden elde edilmiş yer temas kuvvetleri ve momentleri ile motor torkları ise EK E’de verilmiştir.

6.4 Yan Yan Yürüme

Yan yan yürümede ağırlık merkezine ve ayaklara sadece y ekseninde referanslar verilmektedir. Bu benzetimden elde edilmiş hareketin üstüste bindirilmiş görüntüsü Şekil 6.14’deki gibidir. SMN referansı düz bir çizgi üzerinde olduğundan elde edilen sonuçlar anlaşılır olmayacağından burada SMN referansı takip edilen SMN referansı ve ağırlık merkezi yörüngesi verilmemiştir.



Şekil 6.14: Yan Yan Yürüme Hareketinin Üstüste Bindirilmiş Görüntüsü

Bu benzetimden elde edilen yer temas kuvvetleri ile motor torkları ise EK F'de verilmiştir.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Tasarlanan kontrolcülerin temel hareketler olarak kabul edilen ileri-geri yürüme, merdiven inme-çıkma, yan-yan yürüme ve dönerek yürüme hareketlerini başarıyla kontrol edebildiği benzetim sonuçlarıyla gösterilmiştir. Özellikle kontrolü zor olan merdiven inme-çıkma ile dönerek yürüme hareketleri kapalı çevrim kontrol sayesinde sağlanabilmektedir. Bunun dışında yine kapalı çevrim kontrolcü bozucu etkilere karşı eyleyici sınırları dahilinde başarılıdır. Pratikte bu motorlara bağlı volanların ataletleri çok düşük kaldığından gerekli torkların sağlanması oldukça yüksek güç gerektirmektedir. Bu nedenle pratikte bu yöntemin uygulanması imkansız olmaktadır.

Elde edilen benzetim sonuçlarına bakıldığında yüksek yürüme hızlarında yerden gelen tepki kuvvetlerinin, bu tepki kuvvetlerini aktif olarak kontrol eden bir kontrolcü bulunmadığından dolayı dinamiği daha fazla etkilediği ve sıfır moment noktası referansının takibini zorlaştırdığı görülmektedir. Literatürde 2.5 km/saat lik yürüme hızının üzerine çıkabilen iki ayaklı tek robotun ASIMO olduğu belirtilmektedir. Benzetim sonuçlarına bakıldığında ise mevcut durumda limit değer olarak kabul edebileceğimiz 2.5 km/saat lik yürüme hızında elde edilen sonuçların tatmin edici olduğu görülmektedir. Pratikte yüksek yürüme hızlarına çıkmayı engelleyen faktörler mekanizmanın ağırlığı, yer tepki kuvvetlerinin dinamiğe etkisi ve doğrusal olmayan dinamiğin baskın karakter göstermesi olmaktadır. Buda kontrolcülerin mümkün olduğu kadar hassas ve mekanizmanın mümkün olduğu kadar hafif tasarlanmasını gerektirmektedir.

Bunun dışında diğer bir olumsuz etki ise sağ ayağın yere bastığı durumdaki dinamik model ile sol ayağın yere bastığı durumdaki dinamik model arasındaki geçişte süreksizliklerin torklarda sıçramalara neden olmasıdır. Modellemenin gövde uzvu temel alınarak yapılmasının bu durumun önüne geçeceği düşünülmektedir.

Literatürde iki ayaklı robotlar konusundaki çalışmalar mekanizmanın dengesini iyileştirecek kapalı çevrim kontrol stratejileri üzerinde yoğunlaşmıştır. İki ayaklı robotların insanlarla ortak yaşam alanlarında kullanılabilmesi için belirsiz yüzeylerde hareket kabiliyetini arttıracak ve bozucu etkilere karşı koyabilecek genelleştirilebilir kontrol stratejilerine gereksinim vardır.

KAYNAKLAR

- [1] **Vukobratovic, M.**, 2007. Humanoid robotics — past, present state, future, *Int. J. Human Robot*.
- [2] **Vukobratovic, M. and Juricic, D.**, 1968. A contribution to the synthesis of biped gait, *IFAC Symp. Technical and Biological Problem of Control*, Yerevan, USSR.
- [3] **Vukobratovic M., Hristic D. and Stojiljkovic Z.**, 1974. Development of active anthropomorphic exoskeletons, *Medical and Biological Engineering*, **12**, 66-80.
- [4] **Kato, I., Ohteru, S., Kobayashi, H., Shirai, K. and Uchiyama, A.**, 1973. Information-power machine with senses and limbs, *Proc. CISM-IFTToMM Symp. Theory and Practice of Robots and Manipulators*, Udine, Italy, 12-24.
- [5] **Takanishi, A., Ishida, M., Yamazaki, Y. and Kato, I.**, 1985. The realization of dynamic walking by the biped walking robot WL-10RD. *Proceedings of 1985 International Conference on Advanced Robotics (ICAR'85)*, 459–466.
- [6] **Ogura, Y., Shimomura, K., Kondo, H., Morishima, A., Okubo, T, Momoki, S., Lim H. and Takanishi, A.**, 2006. Human-like walking with knee stretched, heel-contact and toe-off motion by a humanoid robot, *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Beijing, October 2006, 3976–3981.
- [7] **Akachi, K., Kaneko, K., Kanehira, N., Ota, S., Miyamori, G., Hirata, M., Kajita, S. and Kanehiro, F.**, 2005. Development of humanoid robot hrp-3, *IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots*, 50-55.
- [8] **Hirose M. and Ogawa, K.**, 2007. Honda humanoid robots development, *Phil. Trans. R. Soc. A*, **365**, 11–19.

- [9] **Ishida, T.**, 2004. Development of a small biped entertainment robot qrio, *Micro-Nanomechatronics and Human Science and The Fourth Symposium Micro-Nanomechatronics for Information-Based Society*, 23-28.
- [10] **Pfeiffer, F., Loffler, K., Gienger, M. and Ulbrich, H.**, 2004. Sensor and control aspects of biped robot Johnnie, *International Journal of Humanoid Robotics (IJHR)*, **1-3**, 481–496.
- [11] **Park, J. L. I.W. , Kim, J.Y. and Oh, J.**, 2005. Mechanical design of humanoid robot platform khr-3 (kaist humanoid robot-3: Hubo), *IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots*, December 5, 321-326.
- [12] **Lohmeier, S., Buschmann, T., Ulbrich, H. and Pfeiffer, F.**, 2006. Modular joint design for a performance enhanced humanoid robot, *Proc. IEEE Int. Conf. Rob. Aut.(ICRA)*, Orlando, USA, 88-93.
- [13] **Sias, F.R. and Jr. Zheng, Y.F.**, 1990. How many degrees-of-freedom does a biped need?, *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems '90*, Ibaraki, Japan, July 3-6, 297-302.
- [14] **Ogura, Y., Aikawa, H., Lim, H. O. and Takanishi, A.**, 2004. Development of a human-like walking robot having two 7-DOF legs and a 2-DOF waist, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, **1**, 134-139.
- [15] **Denavit, J. and Hartenberg, R.S.**, 1955. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices, *Journal of Applied Mechanics*. **22**, 215-221.
- [16] **Shih, C-L., Gruver W.A. and Lee, T-T.**, 1993. Inverse kinematics and inverse dynamics for control of a biped walking machine, *Journal of Robotic Systems*, **4**, 531-555.
- [17] **Craig, J.J.**, 1989. Introduction to robotics: mechanics and control - Third edition, Addison-Wesley Longman Publishing Co., USA.
- [18] **Featherstone, R. and Orin, D.**, 2000. Robot dynamics: equations and algorithms, *Proc. IEEE Int. Conf. Rob. Autom.*, **1**, 826-834.

- [19] **Luh, J.Y.S., Walker, M.W. and Paul, R.P.C.**, 1980. On-line computational scheme for mechanical manipulators, *J. Dyn. Sys. Meas. & Contr.*, **102-2**, 69-76.
- [20] **Salisbury, J.K.**, 1980. Active stiffness control of a manipulator in cartesian coordinates, *19th Conference on Decision and Control and Symposium on Adaptive Processes*, Albuquerque, USA, 10-12 December, 95-100.
- [21] **Shih, C-L. and Gruver, W.A.**, 1992. Control of a biped robot in the double-support phase, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **22-4**, 729-735.
- [22] **Vukobratovic, M., Borovac, B., Surla, D. and Stokic, D.**, 1990. Biped locomotion: dynamics, stability, control and application, Springer Verlag.
- [23] **Hurmuzlu, Y. and Nwokah, O.**, 2002. The mechanical systems design handbook: modeling, measurement, and control – Chapter 27 Humanoid Robots, CRC Press.
- [24] **Vukobratovic, M. and Borovac, B.**, 2004. Zero-moment point-thirty five years of its life, *International Journal of Humanoid Robotics*, **1**, 157-173.
- [25] **Shih, C.L., Zhu, Y. and Gruver, W.A.**, 1991. Optimization of the biped robot trajectory, *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Charlottesville, VA, USA, October 13-16, 899-903.
- [26] **Shih, C.L., Li, Y.Z., Churng, S., Lee, T.T. and Gruver, W.A.**, 1990. Trajectory synthesis and physical admissibility for a biped robot during the single-support phase, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Cincinnati, OH, USA, May 13-18, 1646-1652.
- [27] **Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Yokoi, K. and Hirukawa, H.**, 2001. The 3D linear inverted pendulum mode: a simple modeling for a biped walking pattern generation, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Maui, HI, USA, September 29, 239-246.
- [28] **Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Yokoi, K. and Hirukawa, H.**, 2002. A realtime pattern generator for biped walking, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, **1**, 31-37.

- [29] **Kajita, S., Yamaura, T. and Kobayashi, A.**, 1992. Dynamic walking control of a biped robot along a potential energy conserving orbit, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **8-4**, 431-438.
- [30] **Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Yokoi, K. and Hirukawa, H.**, 2003. Biped walking pattern generation by a simple three-dimensional inverted pendulum model, *Advanced Robotics*, **17-2**, 131-147.
- [31] **Cuevas, E.V., Zaldivar, D. and Rojas, R.**, 2005. Bipedal robot description, *Freie Universitat Berlin Institut fur Informatik Technical Report*, **B-04-19**
- [32] **Qiang H., Yokoi, K., Kajita, S., Kaneko, K., Arai, H., Koyachi, N. and Tanie, K.**, 2001. Planning walking patterns for a biped robot, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **17-3**, 280-289.
- [33] **Park, J.H. and Kim, K.D.**, 1998. Biped robot walking using gravity-compensated inverted pendulum mode and computed torque control, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, May 16-20, 3528-3533.
- [34] **Harada, K., Kajita, S., Kaneko, K. and Hirukawa, H.**, 2004. An analytical method on real-time gait planning for a humanoid robot, *4th IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots*, **2**, 640-655.
- [35] **Choi, Y., You, B-J. and Oh S-R.**, 2004. On the stability of indirect ZMP controller for biped robot systems, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, **2**, 1966-1971.
- [36] **Kurt O.**, 2006. Biped robot reference generation with natural ZMP trajectories, *Yüksek Lisans Tezi*, Sabancı Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [37] **Takanishi, A., Lim, H-O., Tsuda, M. and Kato, I.**, 1990. Realization of dynamic biped walking stabilized by trunk motion on a sagittally uneven surface, *Proc. of IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems '90*, **1**, 323-330.

- [38] **Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Harada, K., Yokoi, K. and Hirukawa, H.,** 2003. Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, **2**, 1620-1626.

- [39] **Katayama, T., Ohki, T., Inoue, T. and Kato, T.,** 1985. Design of an optimal controller for a discrete-time system subject to previewable demand, *International Journal of Control*, **41-3**, 677-699.

- [40] **Park, J. and Youm, Y.,** 2007. General ZMP preview control for bipedal walking, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, April 10-14, 2682-2687.

- [41] **Hess, R.A. and Jun, Y.C.,** 1988. Generalized predictive control of dynamic systems, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics*, **2**, 844-849.

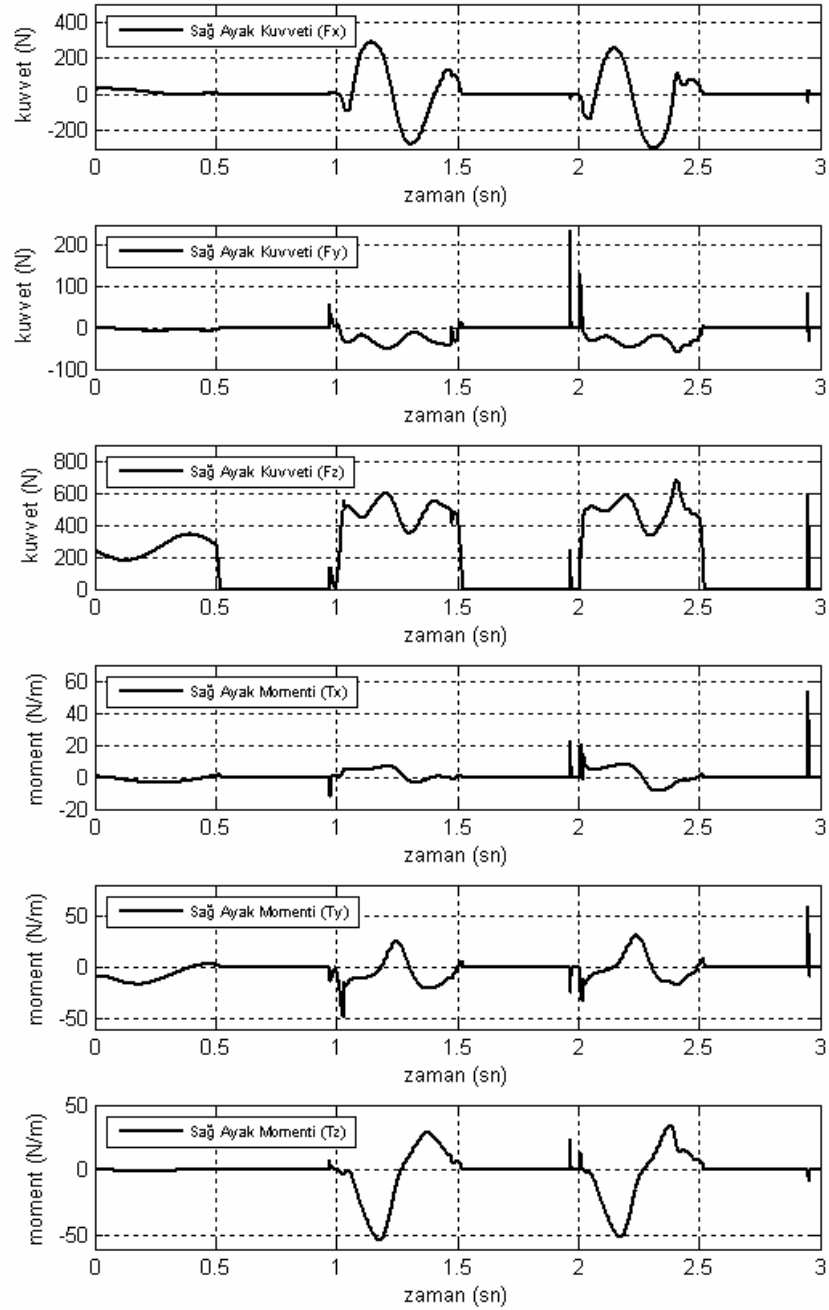
- [42] **Buschmann, T., Lohmeier, S., Bachmayer, M., Ulbrich, H. and Pfeiffer, F.,** A collocation method for real-time walking pattern generation. Retrieved May 5, 2008, from <http://planning.cs.cmu.edu/humanoids07/p/44.pdf>

- [43] **Choi, Y. , Kim, D., Oh, Y. and You, B.-J.,** 2007. Posture/walking control for humanoid robot based on kinematic resolution of CoM jacobian with embedded motion, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **23-6**, 1285-1293.

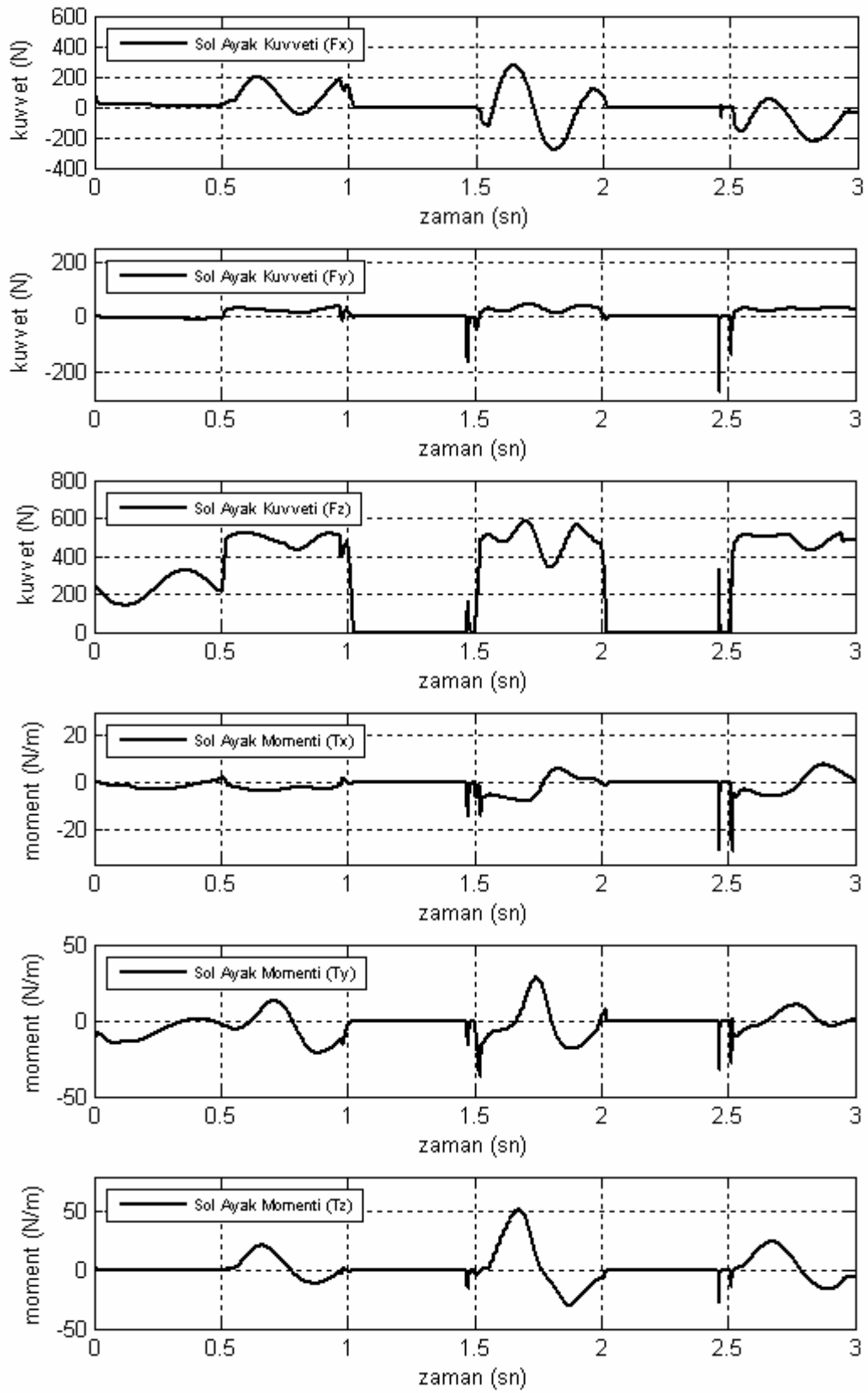
- [44] **Choi, Y. , Kim, D. and You, B.-J.,** 2007. On the walking control for humanoid robot based on the kinematic resolution of CoM jacobian with embedded motion, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, May 15-19, 2655-2660.

- [45] **American Honda Motor Co., Inc.,** 2003. ASIMO Technical Information. Retrieved May 5, 2008, from <http://asimo.honda.com>.

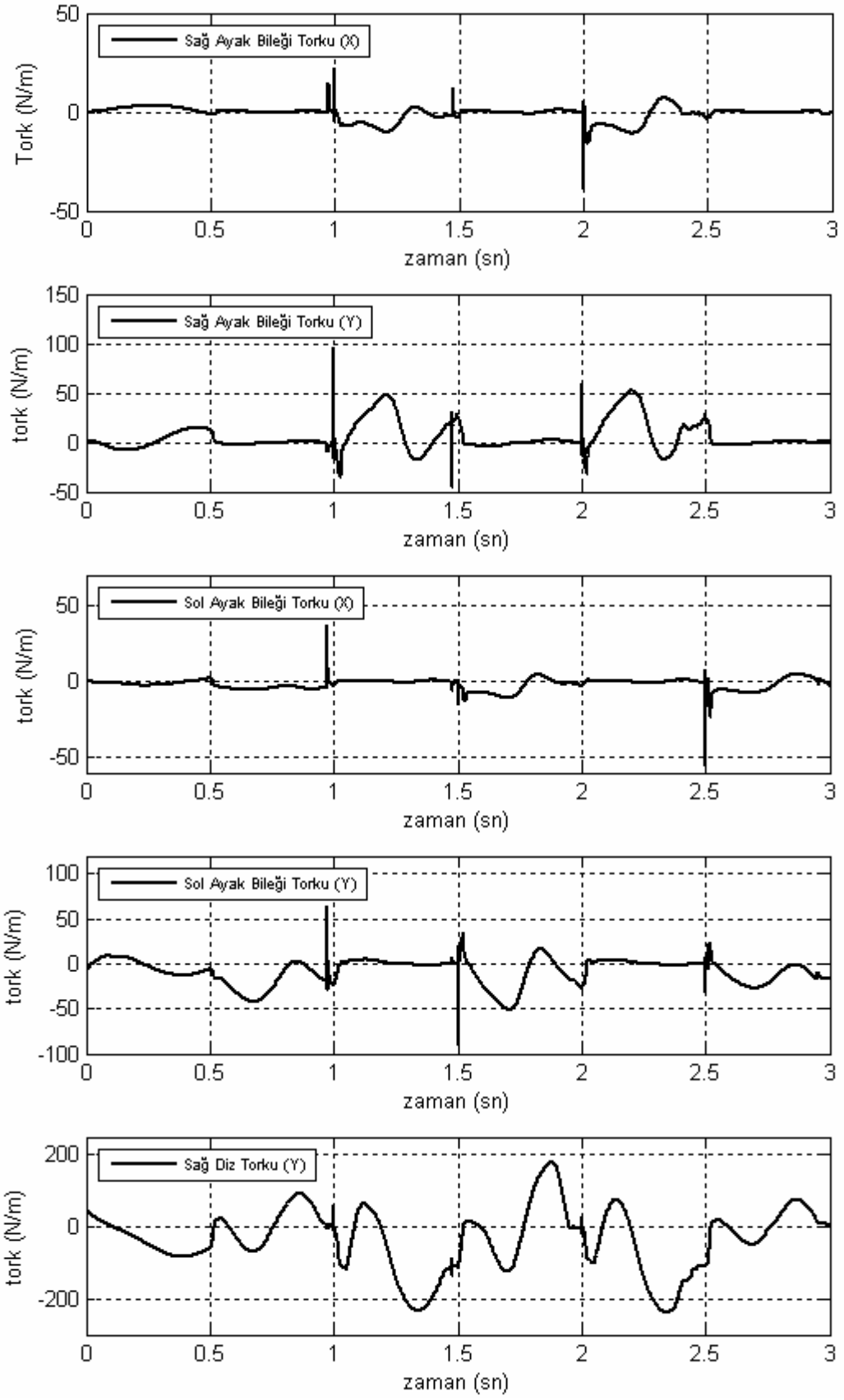
A. 5 KM/SAAT LİK YÜRÜME HIZI İÇİN BENZETİM SONUÇLARI



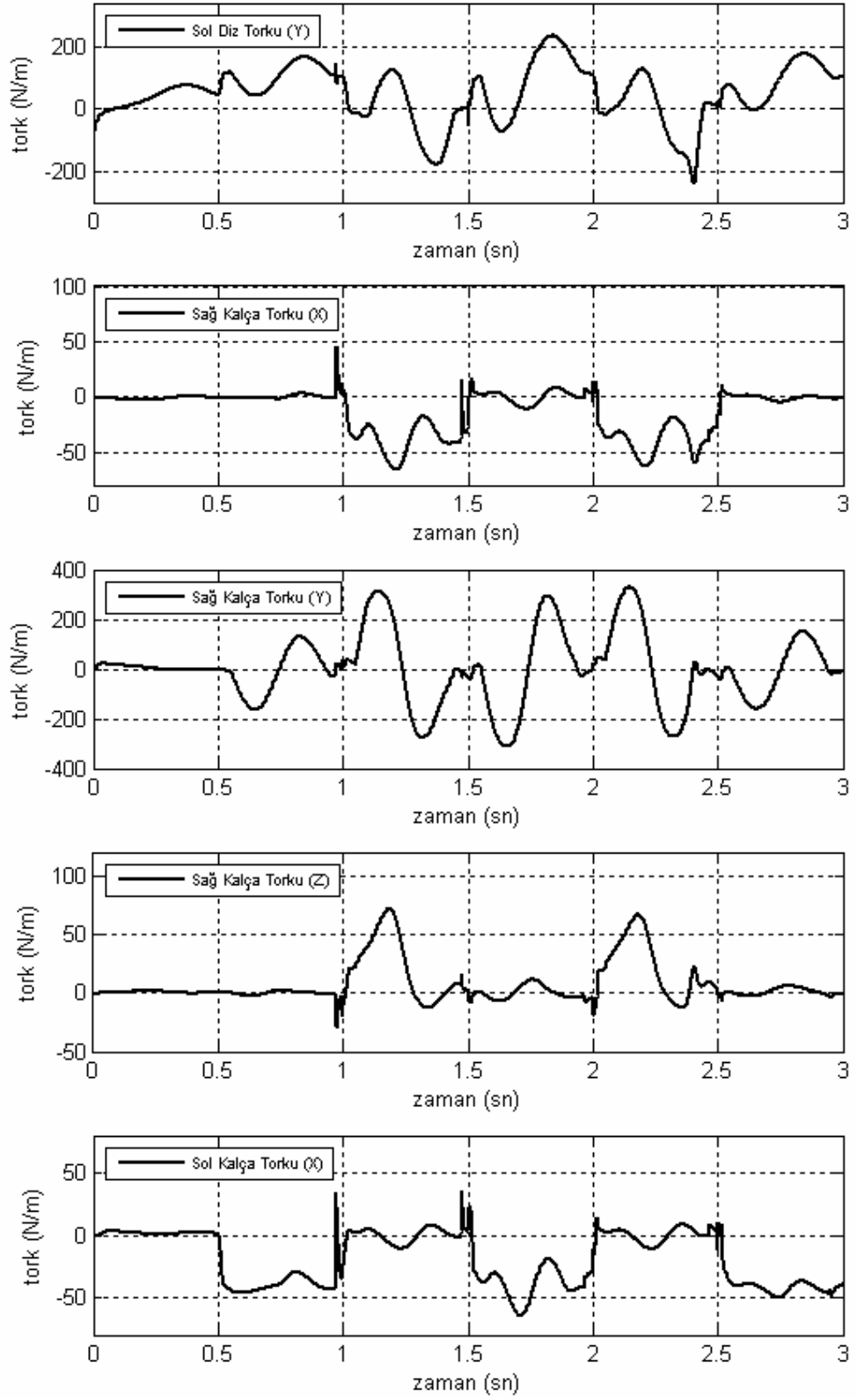
Şekil A. 1: Sağ Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (5 km/saat)



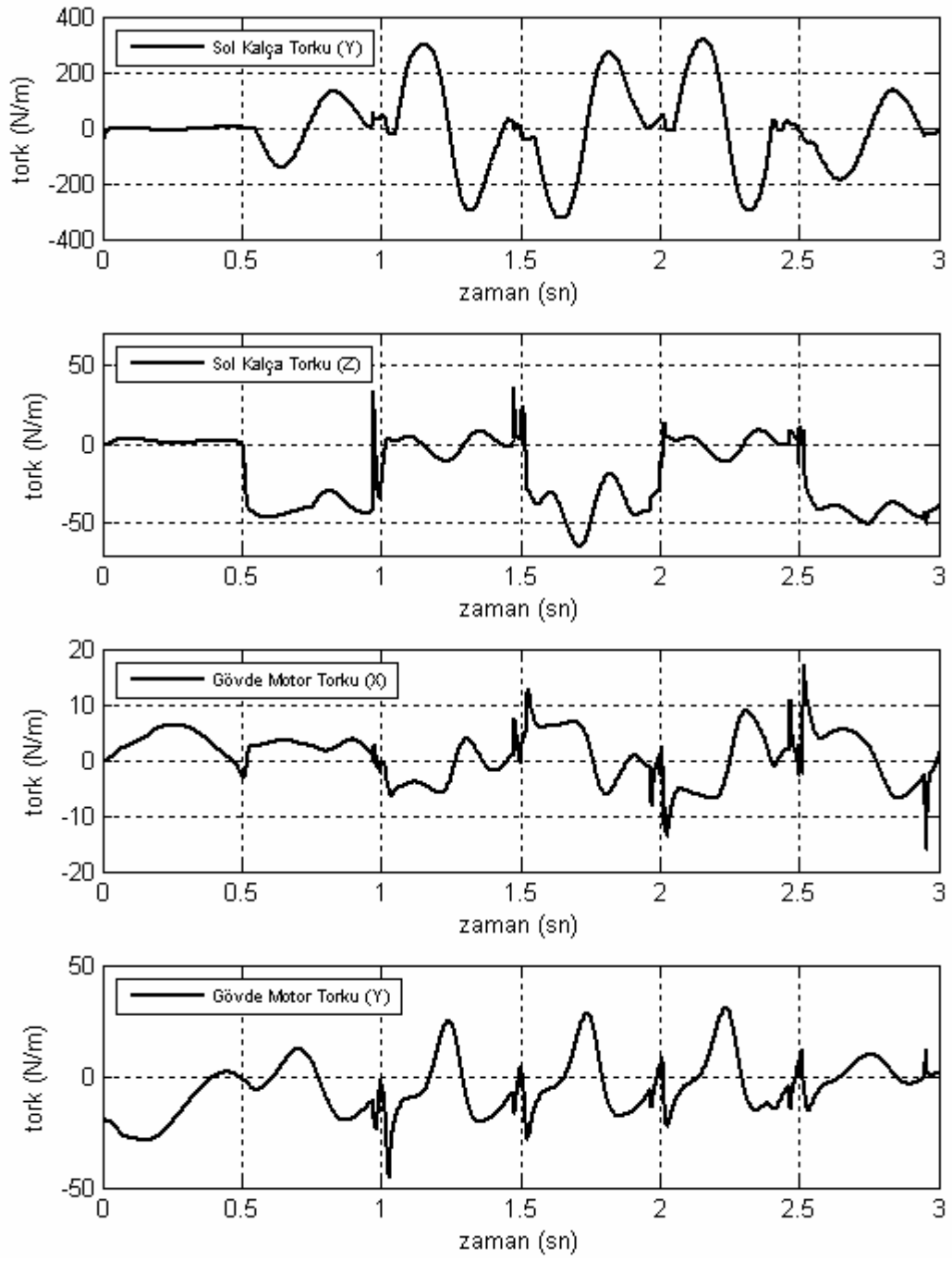
Şekil A. 2: Sol Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (5 km/saat)



Şekil A. 3: Eklem Torkları (5km/saat)

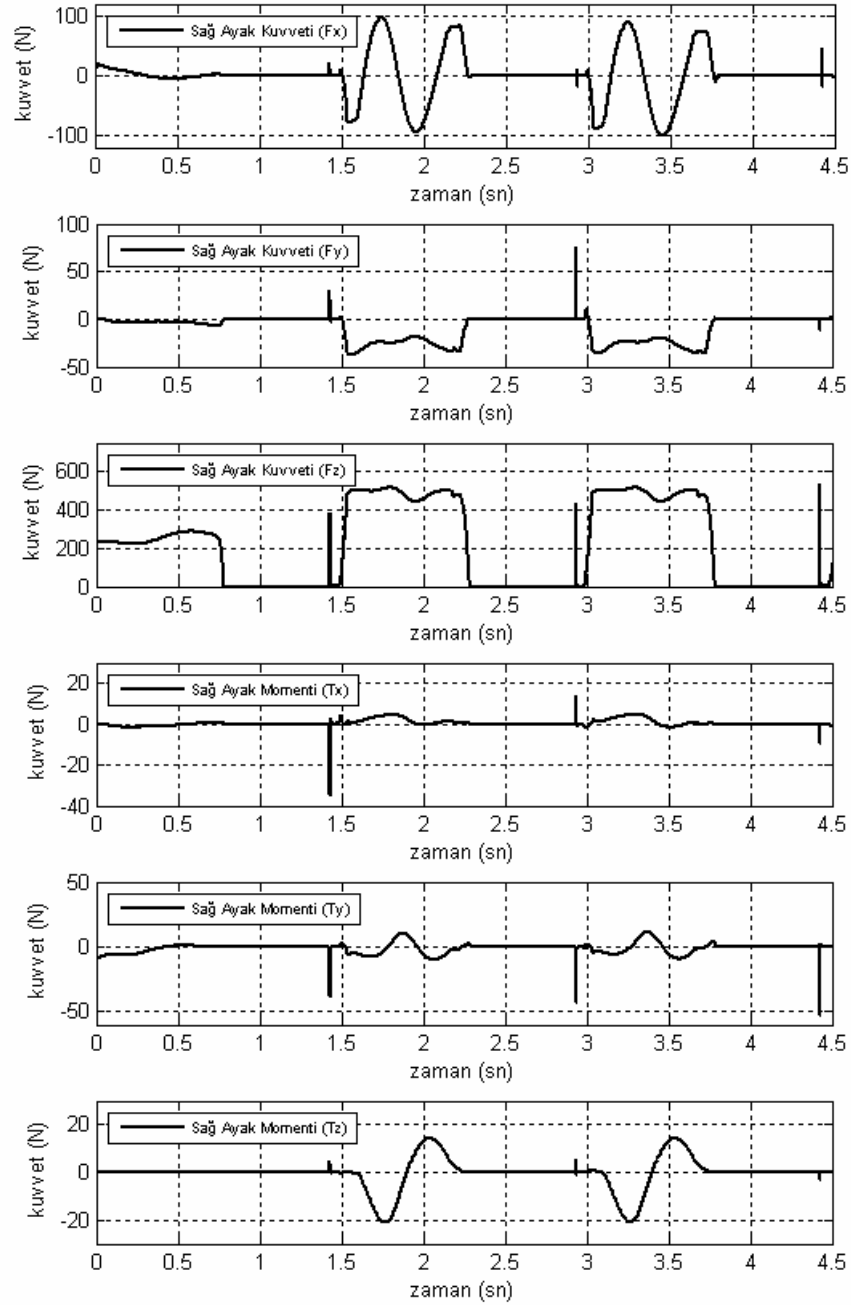


Şekil A. 4: Eklem Torkları (5km/saat)

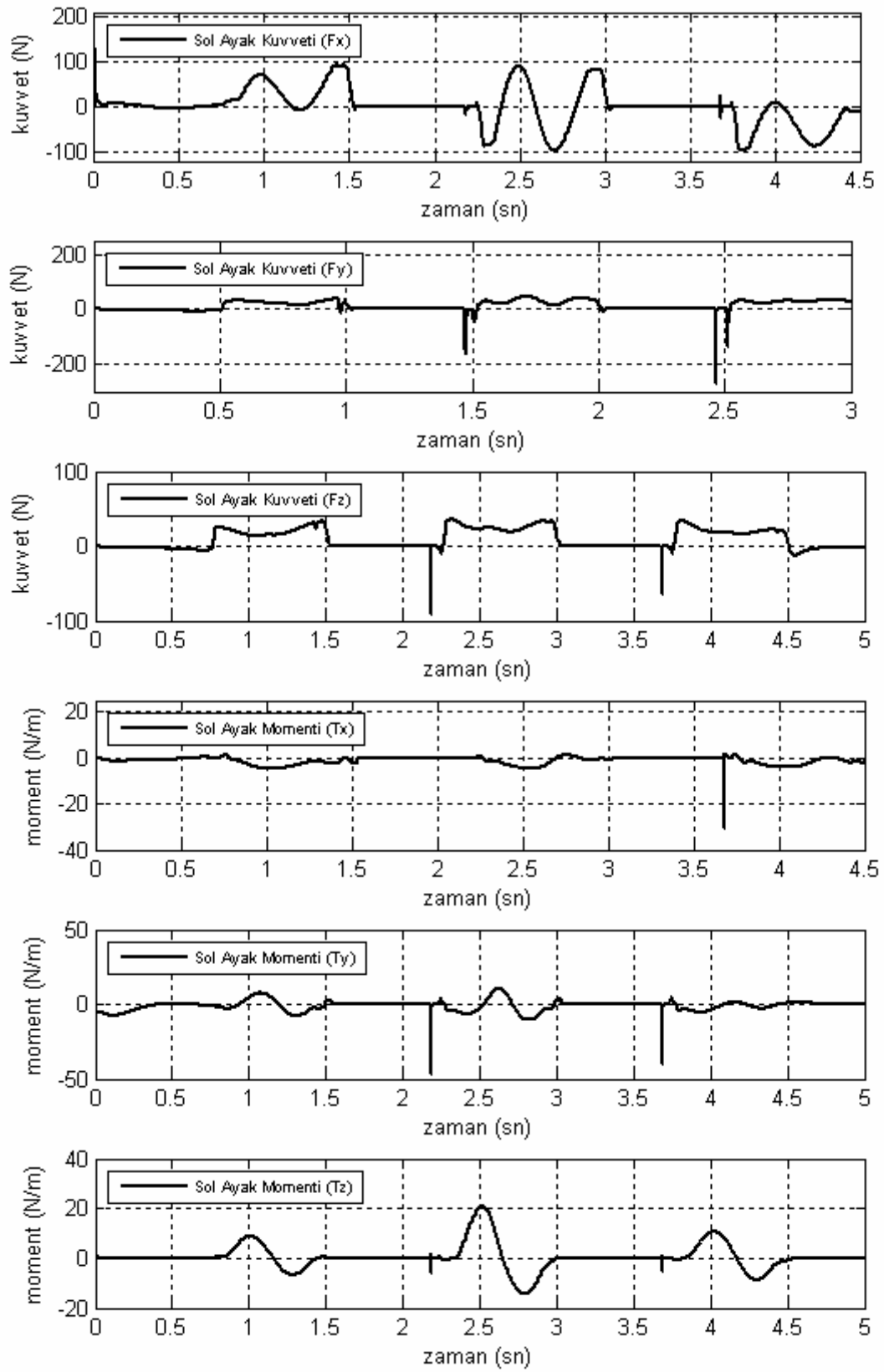


Şekil A. 5: Eklem Torkları (5km/saat)

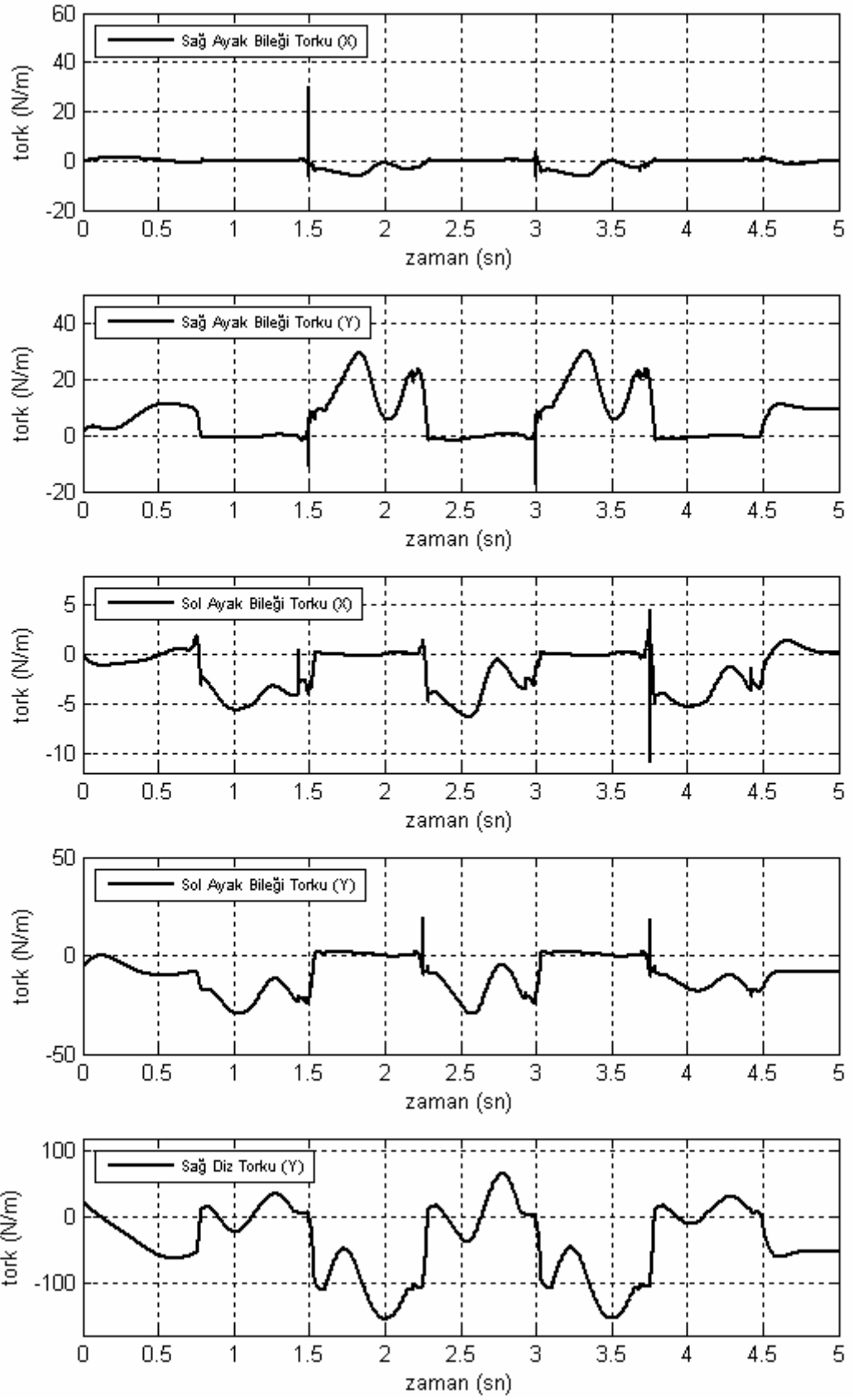
B. 2.4 KM/SAAT LİK YÜRÜME HIZI İÇİN BENZETİM SONUÇLARI



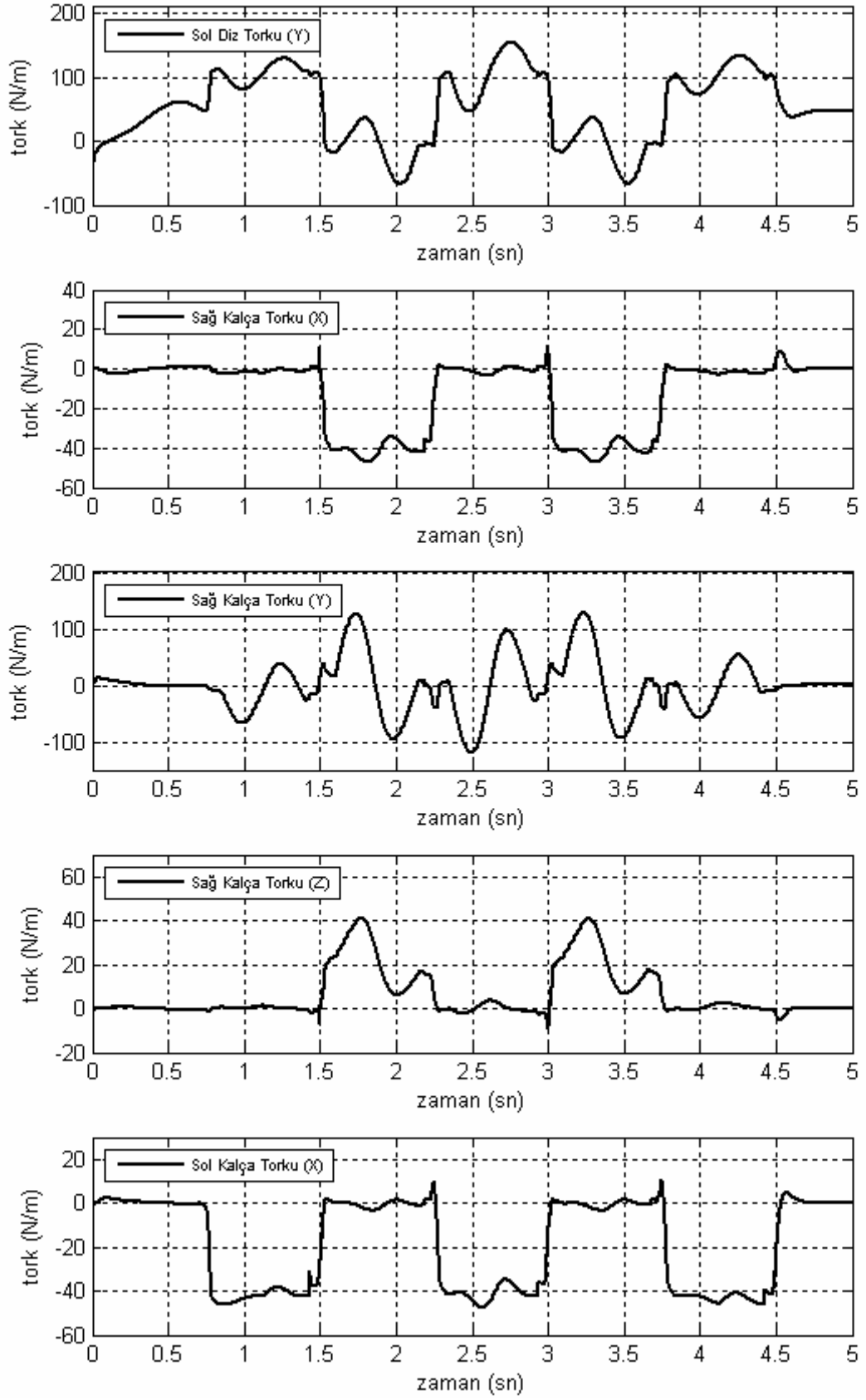
Şekil B. 1: Sağ Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (2.4 km/saat)



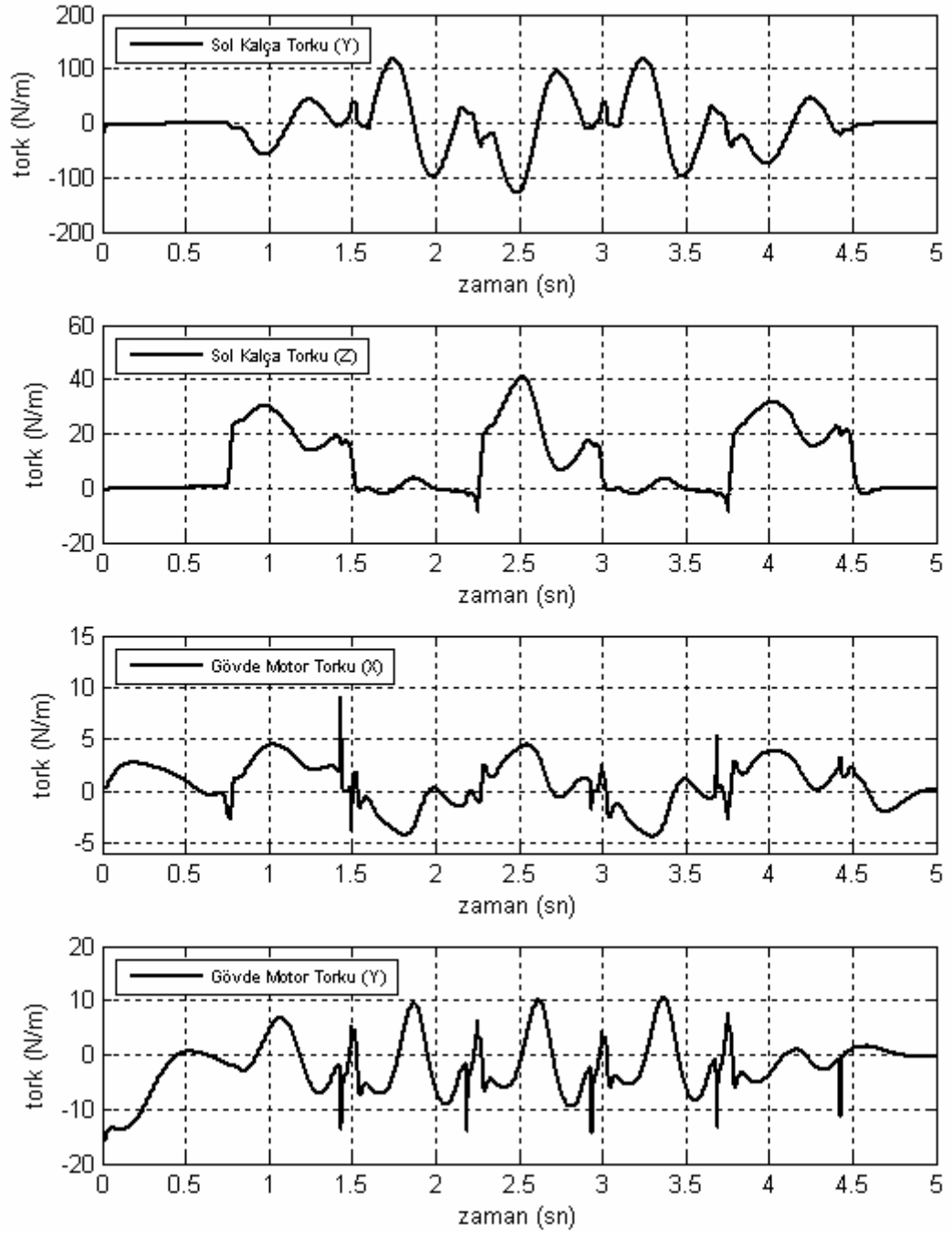
Şekil B. 2: Sol Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (2.4 km/saat)



Şekil B. 3: Eklem Torkları (2.4 km/saat)

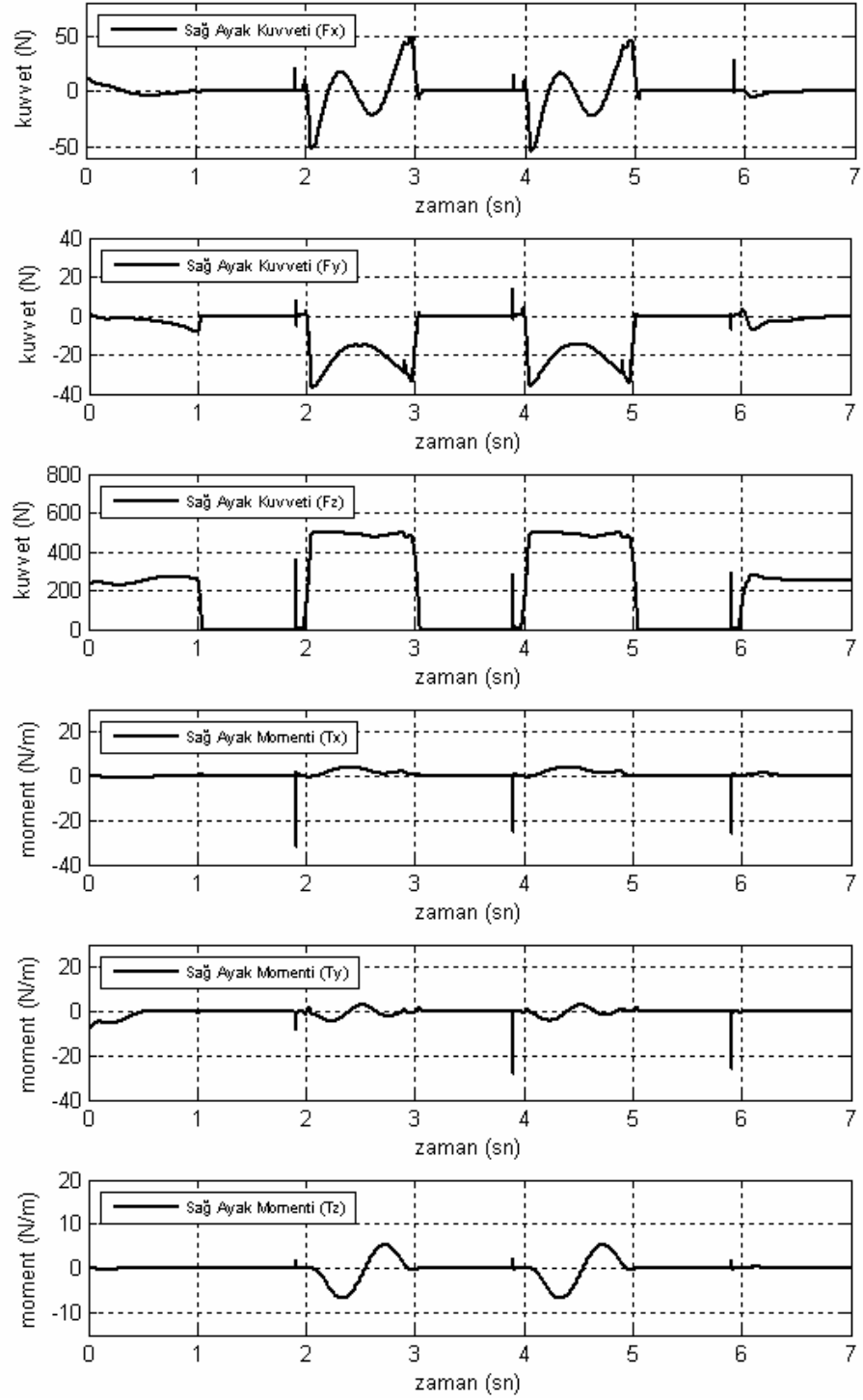


Şekil B. 4: Eklem Torkları (2.4 km/saat)

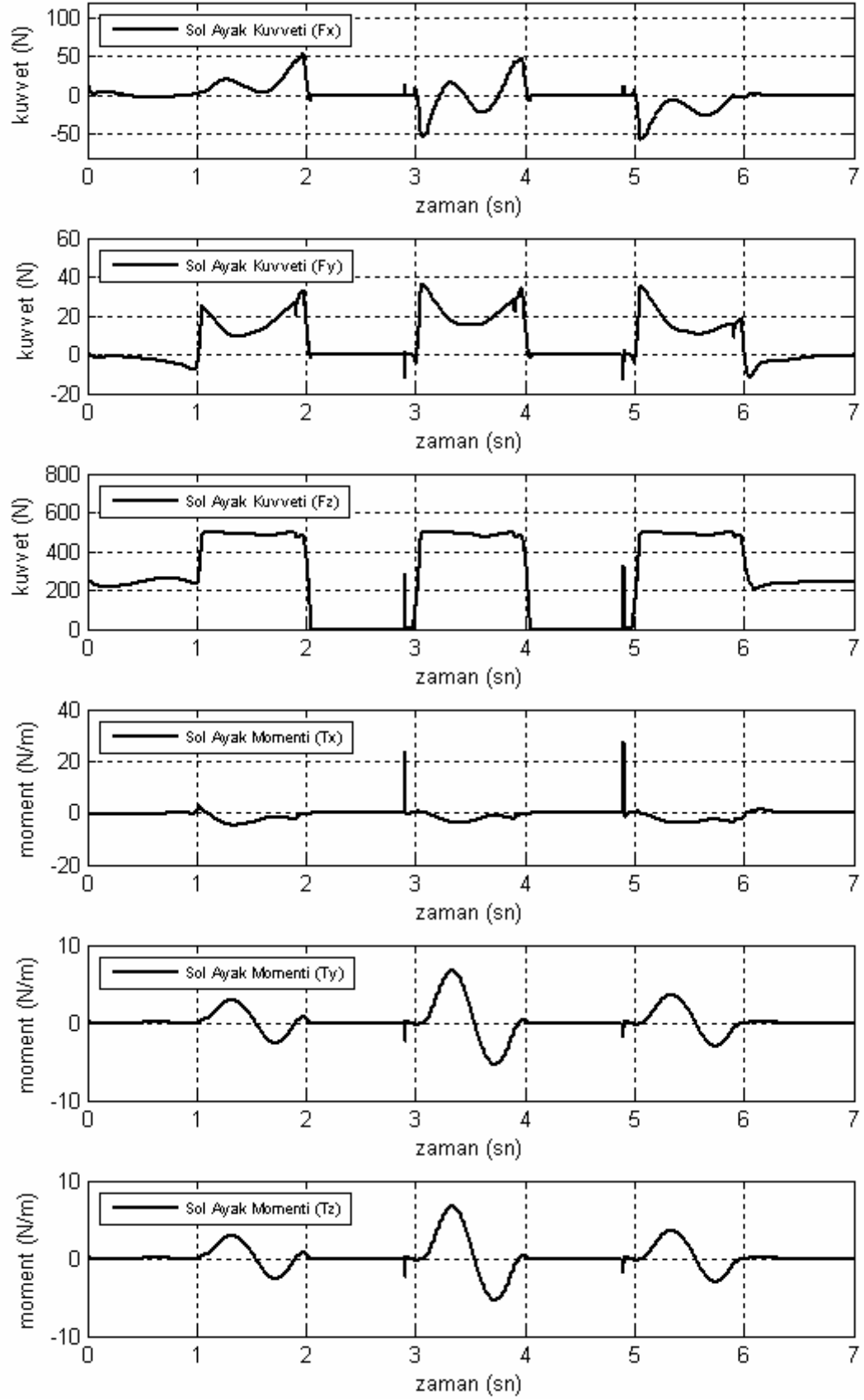


Şekil B. 5: Eklem Torkları (2.4 km/saat)

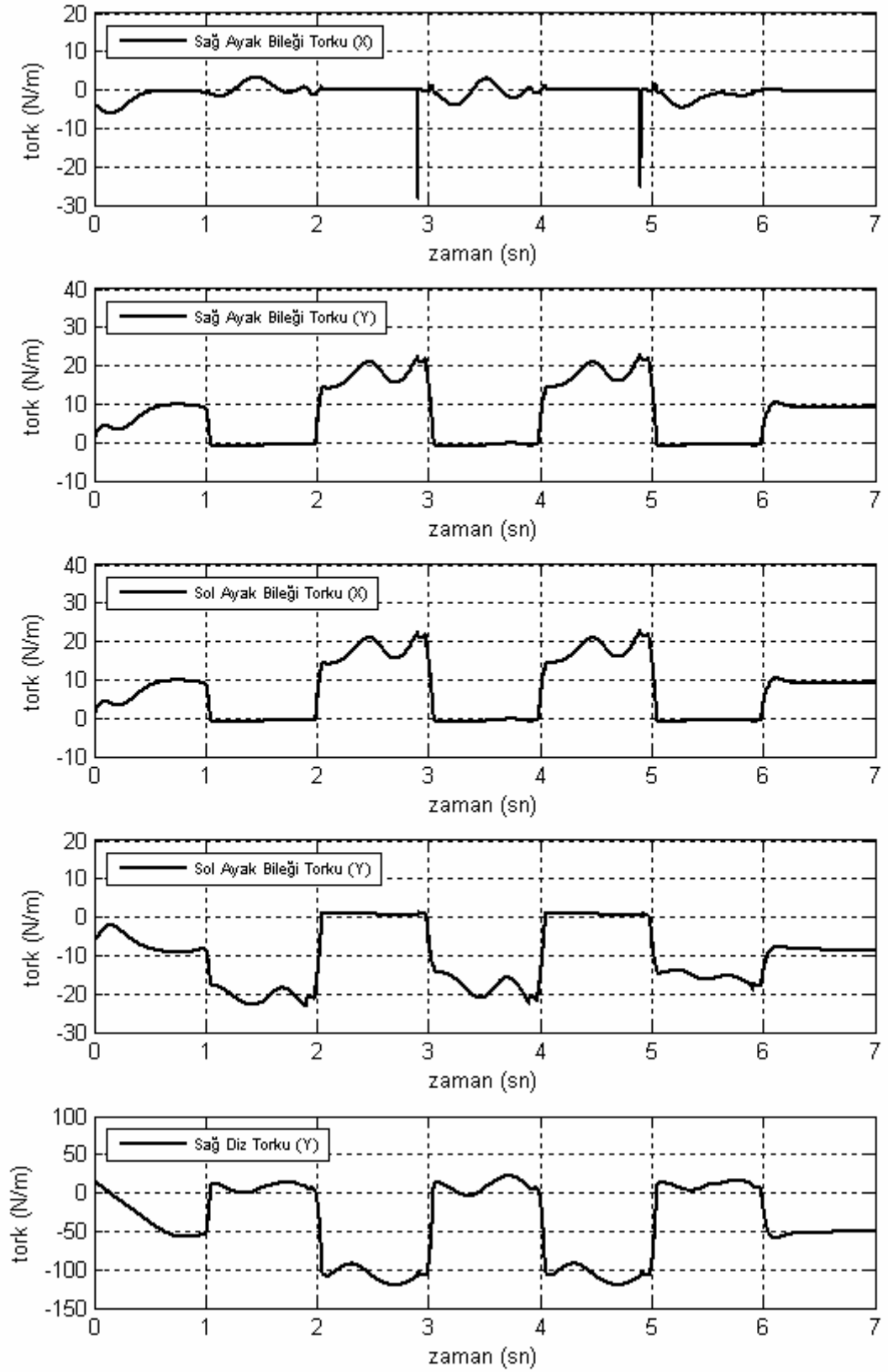
C. 1 KM/SAAT LİK YÜRÜME HIZI İÇİN BENZETİM SONUÇLARI



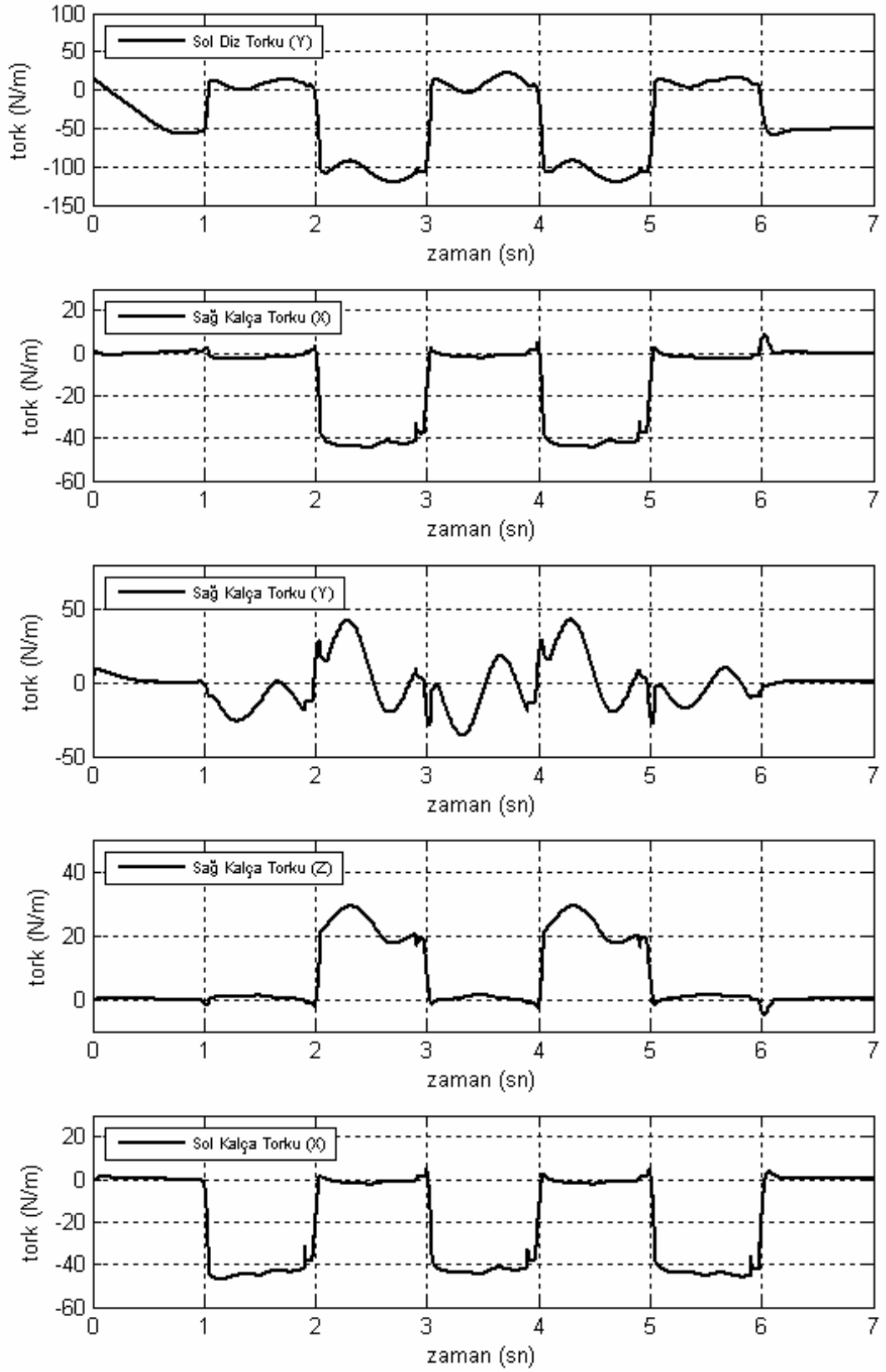
Şekil C. 1: Sağ Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (1 km/saat)



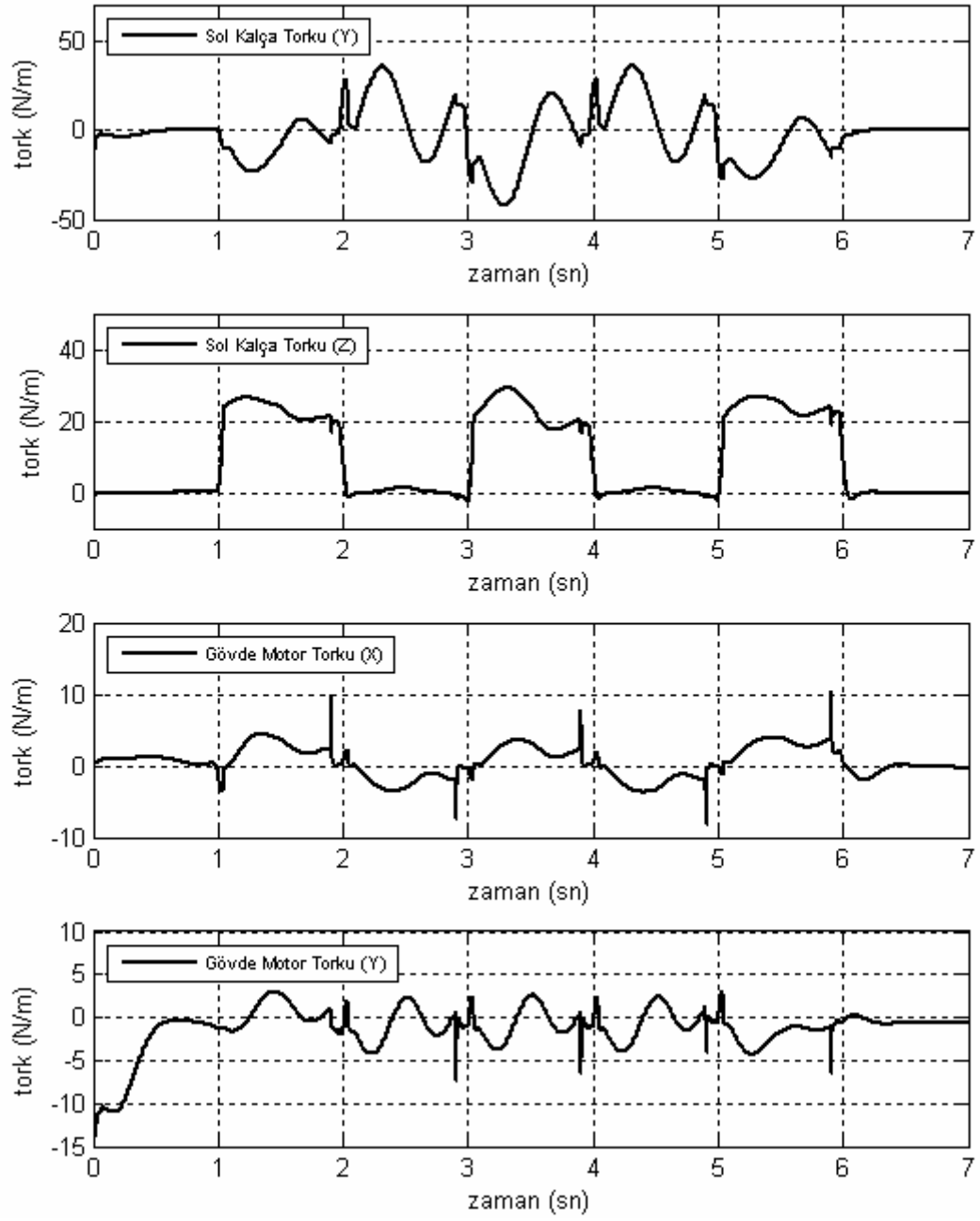
Şekil C. 2: Sol Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (1 km/saat)



Şekil C. 3: Eklem Torkları (1 km/saat)

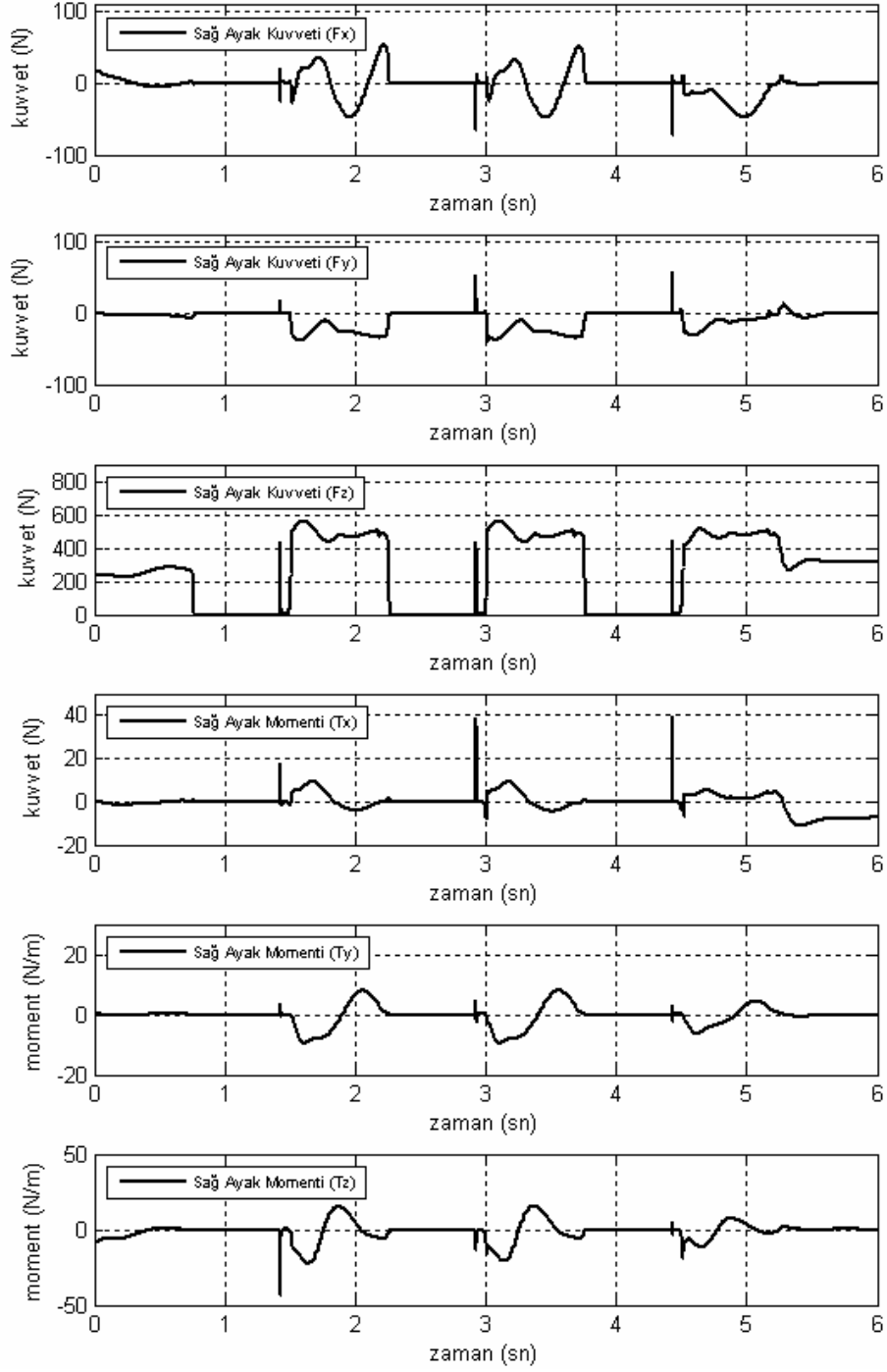


Şekil C. 4: Eklem Torkları (1 km/saat)

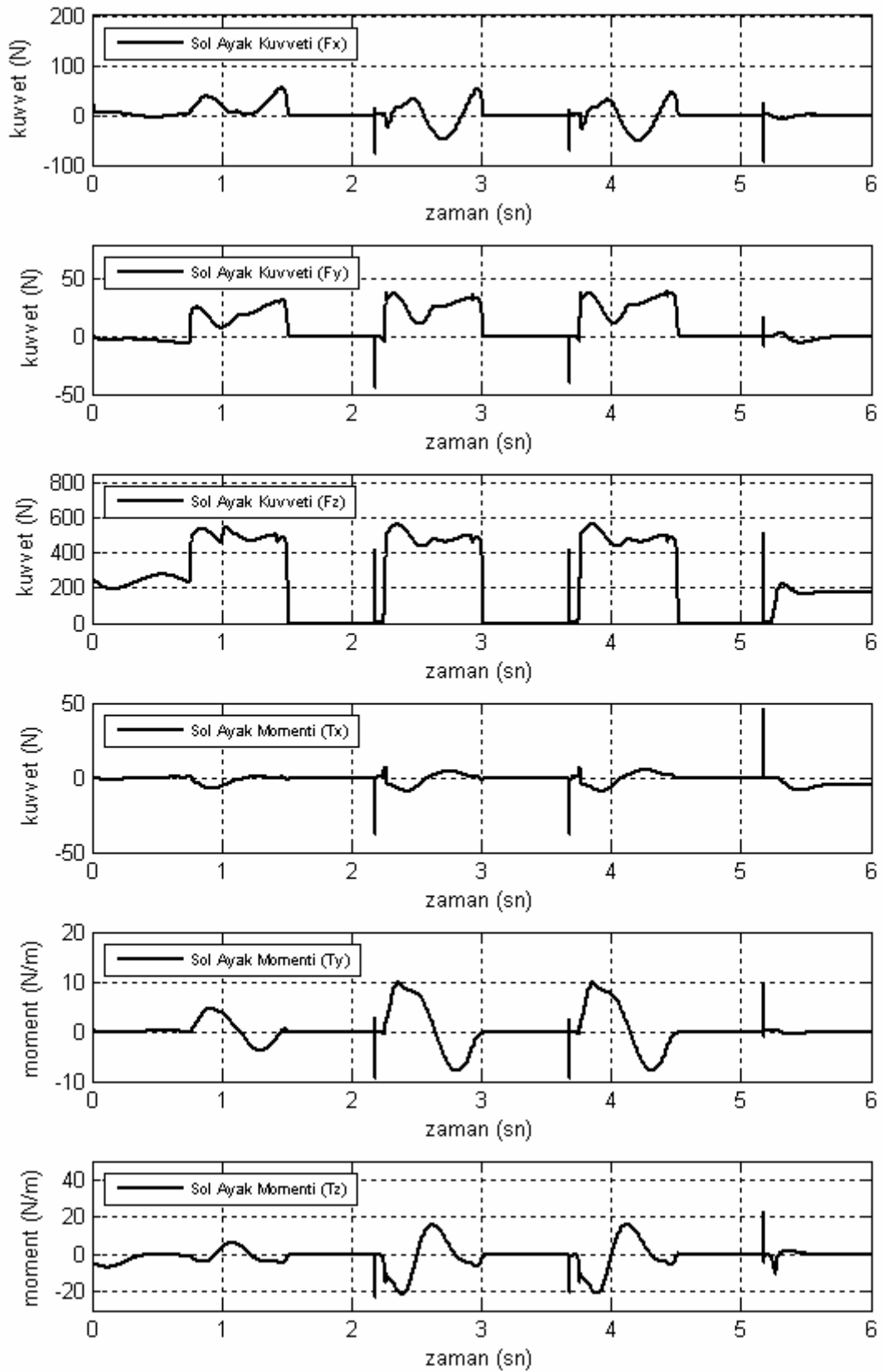


Şekil C. 5: Eklem Torkları (1 km/saat)

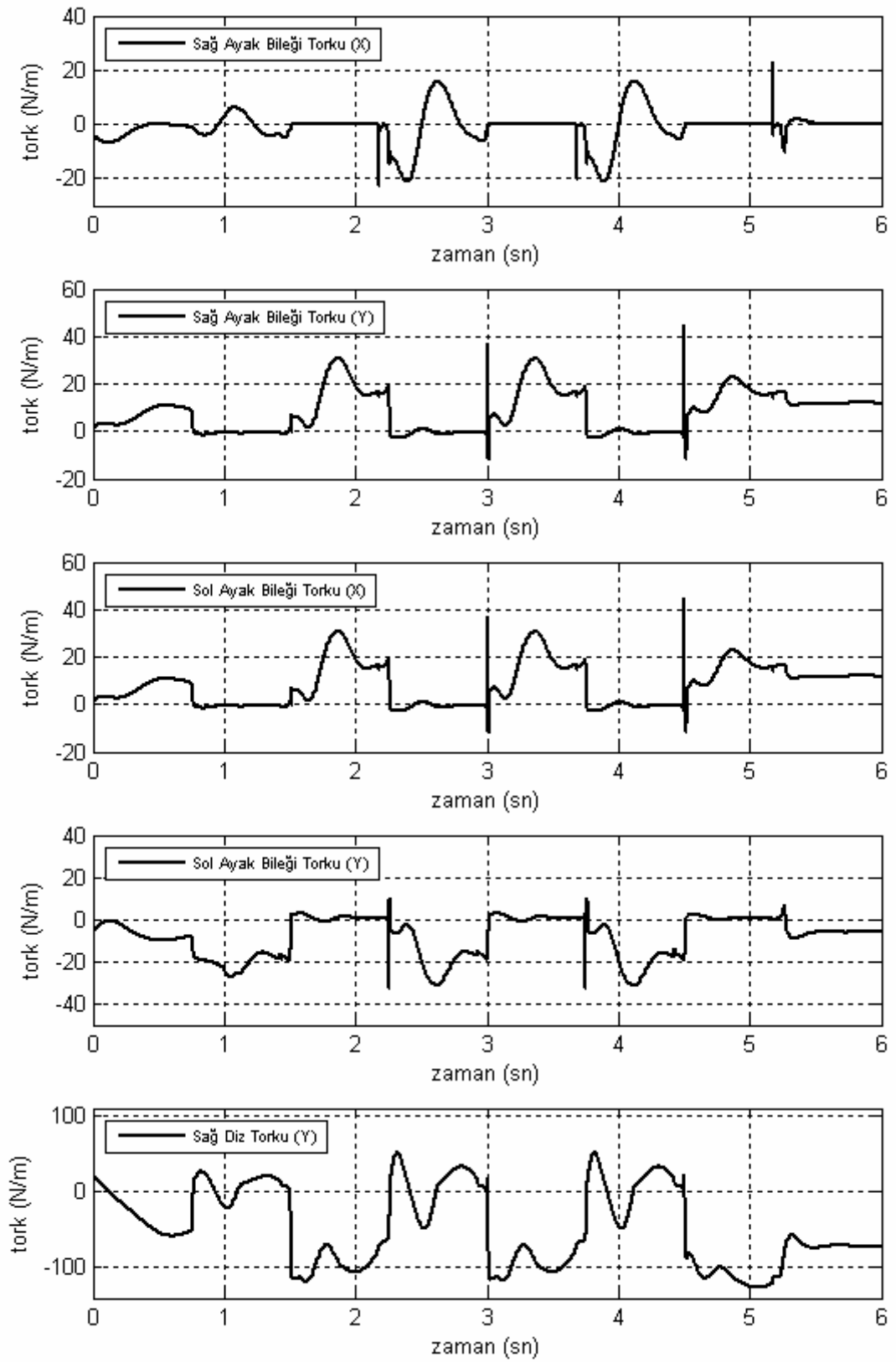
D. MERDİVEN ÇIKMA İÇİN BENZETİM SONUÇLARI



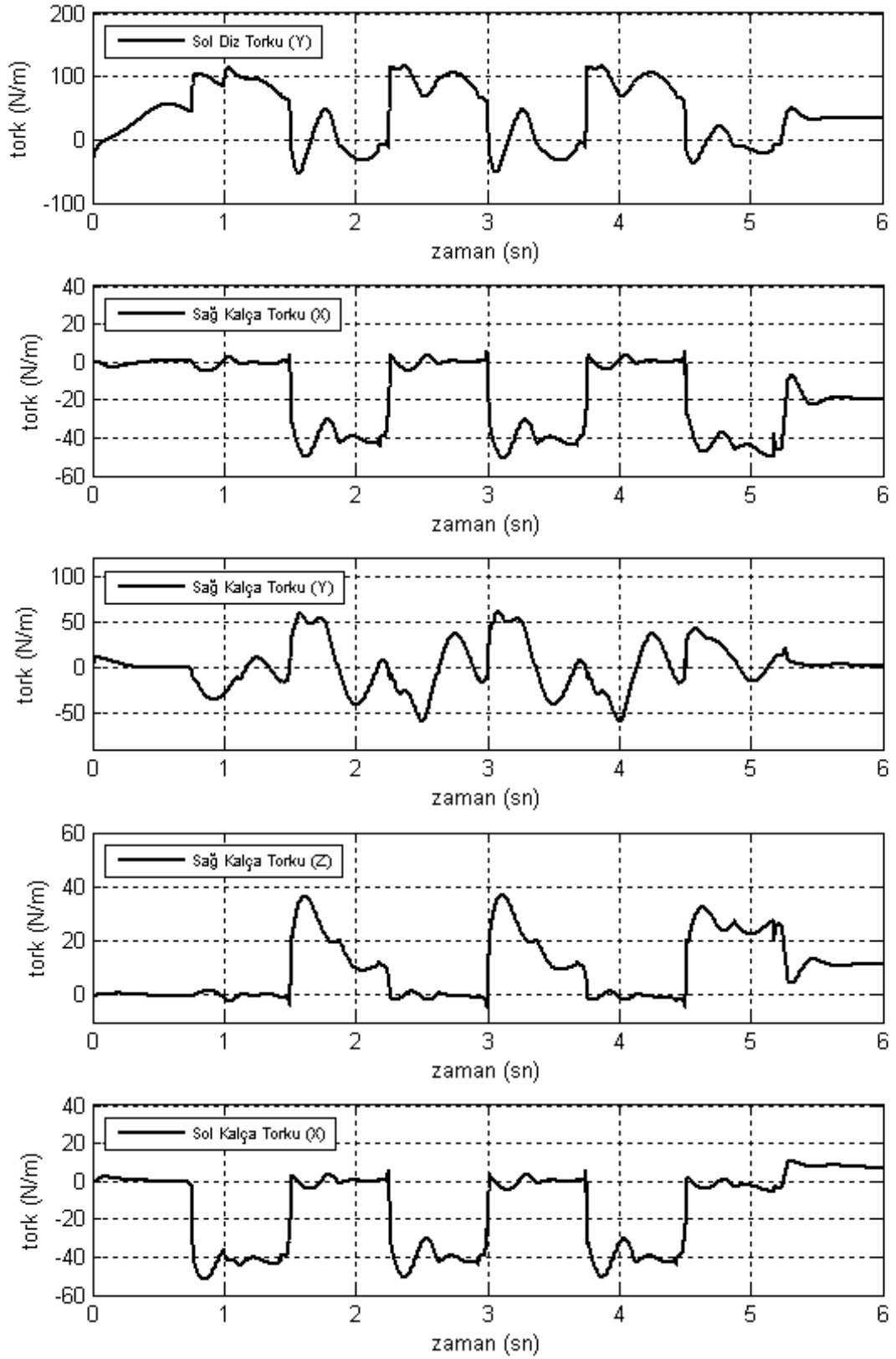
Şekil D. 1: Sağ Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (Merdiven Çıkma)



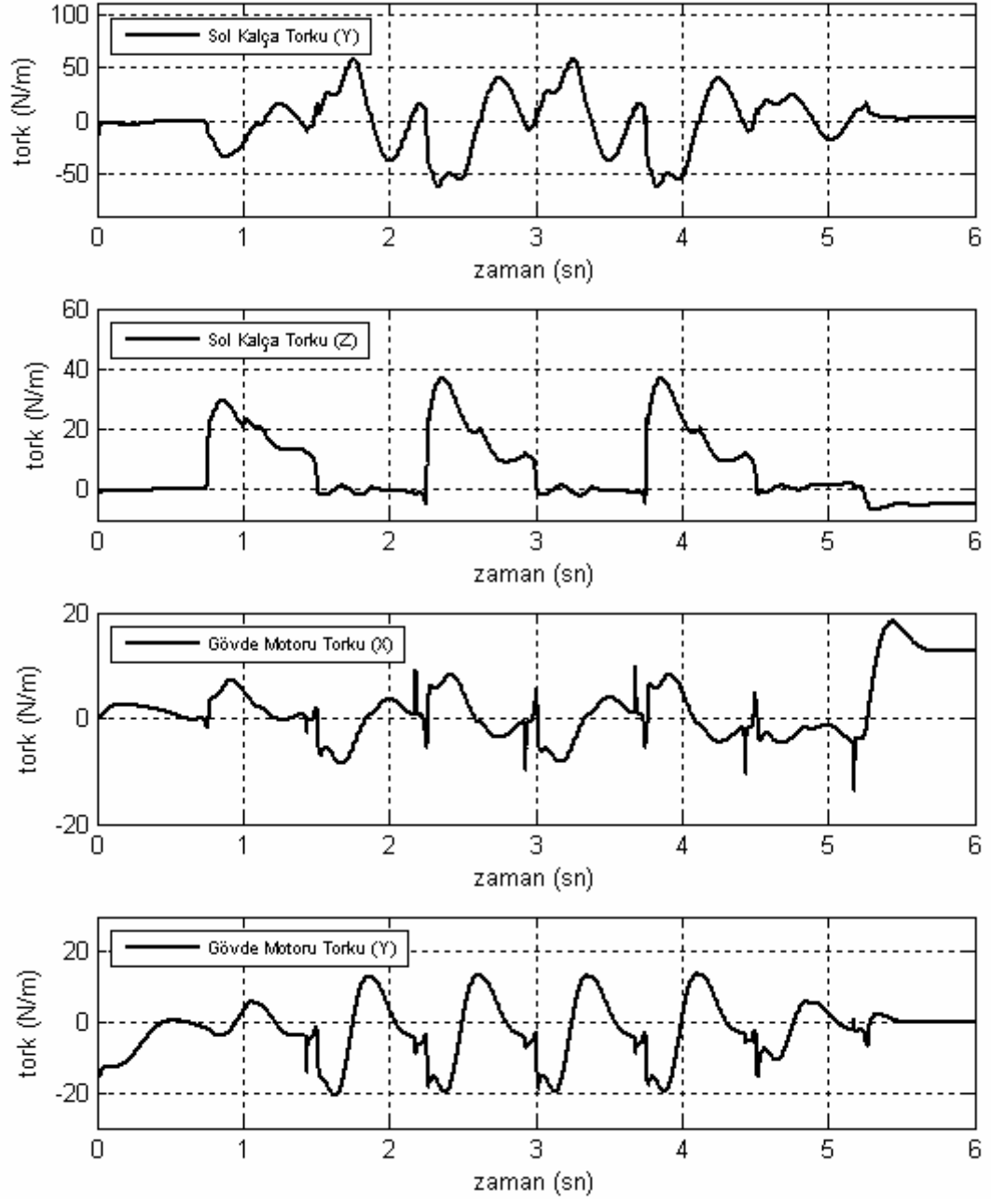
Şekil D. 2: Sol Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (Merdiven Çıkma)



Şekil D. 3: Eklem Torkları (Merdiven Çıkma)

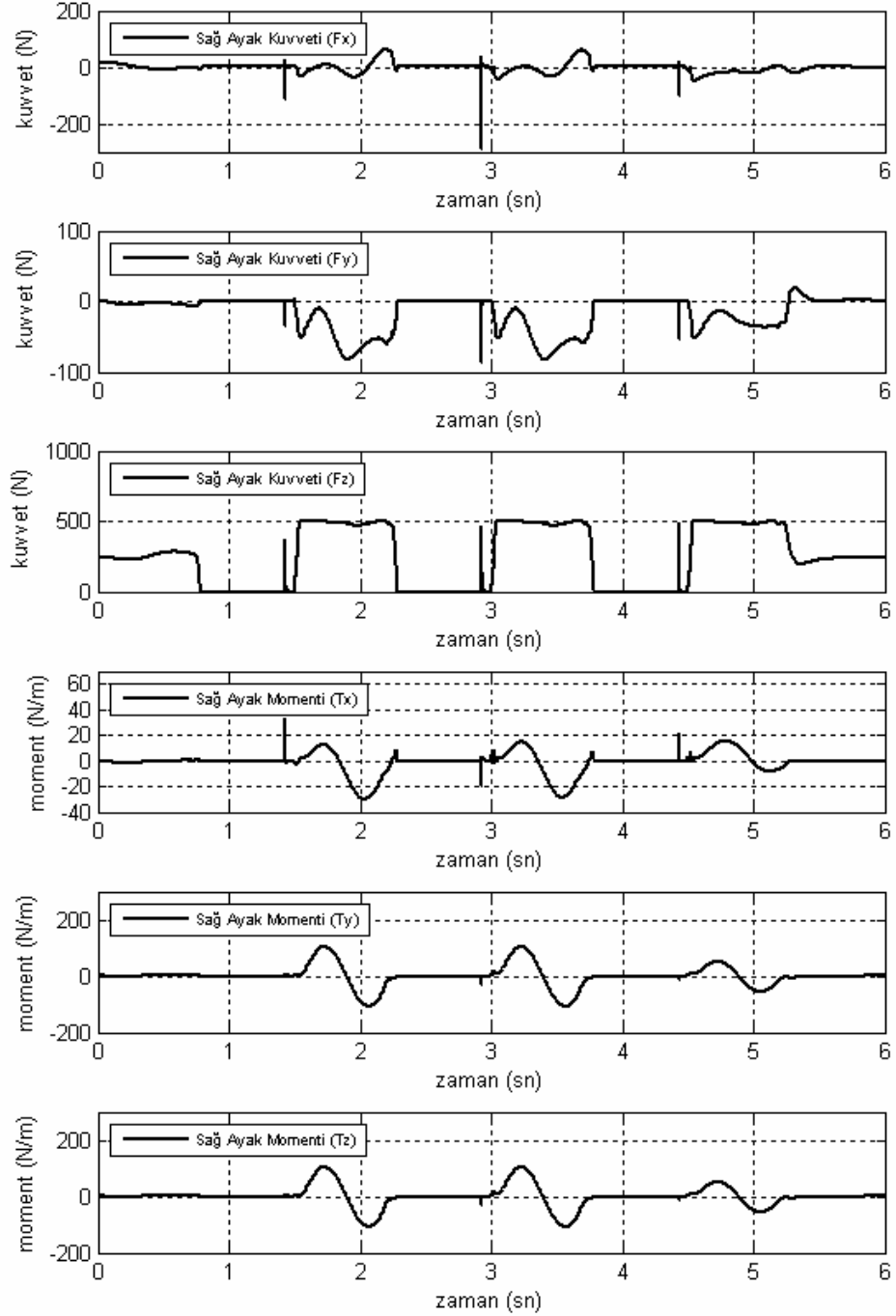


Şekil D. 4: Eklem Torkları (Merdiven Çıkma)

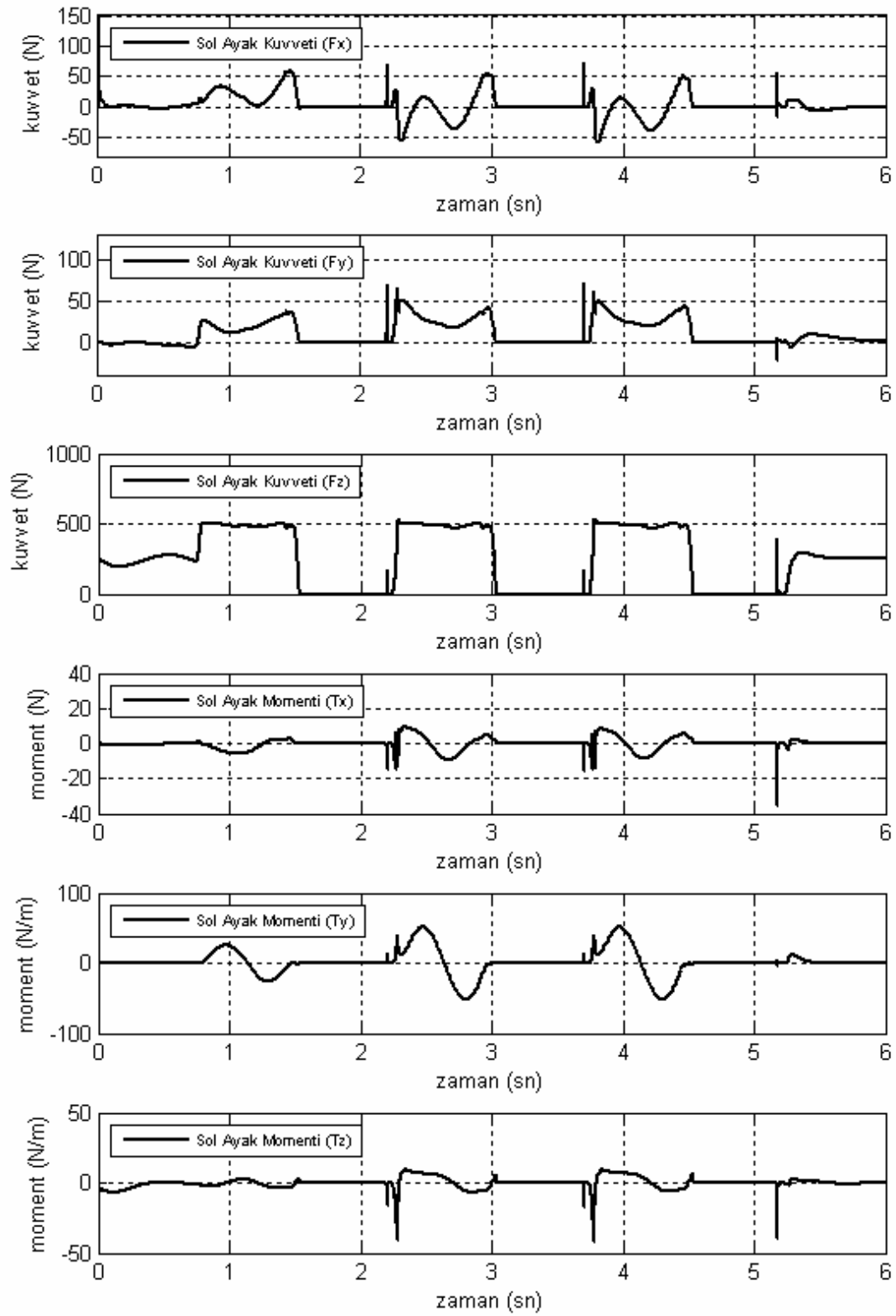


Şekil D. 5: Eklem Torkları (Merdiven Çıkma)

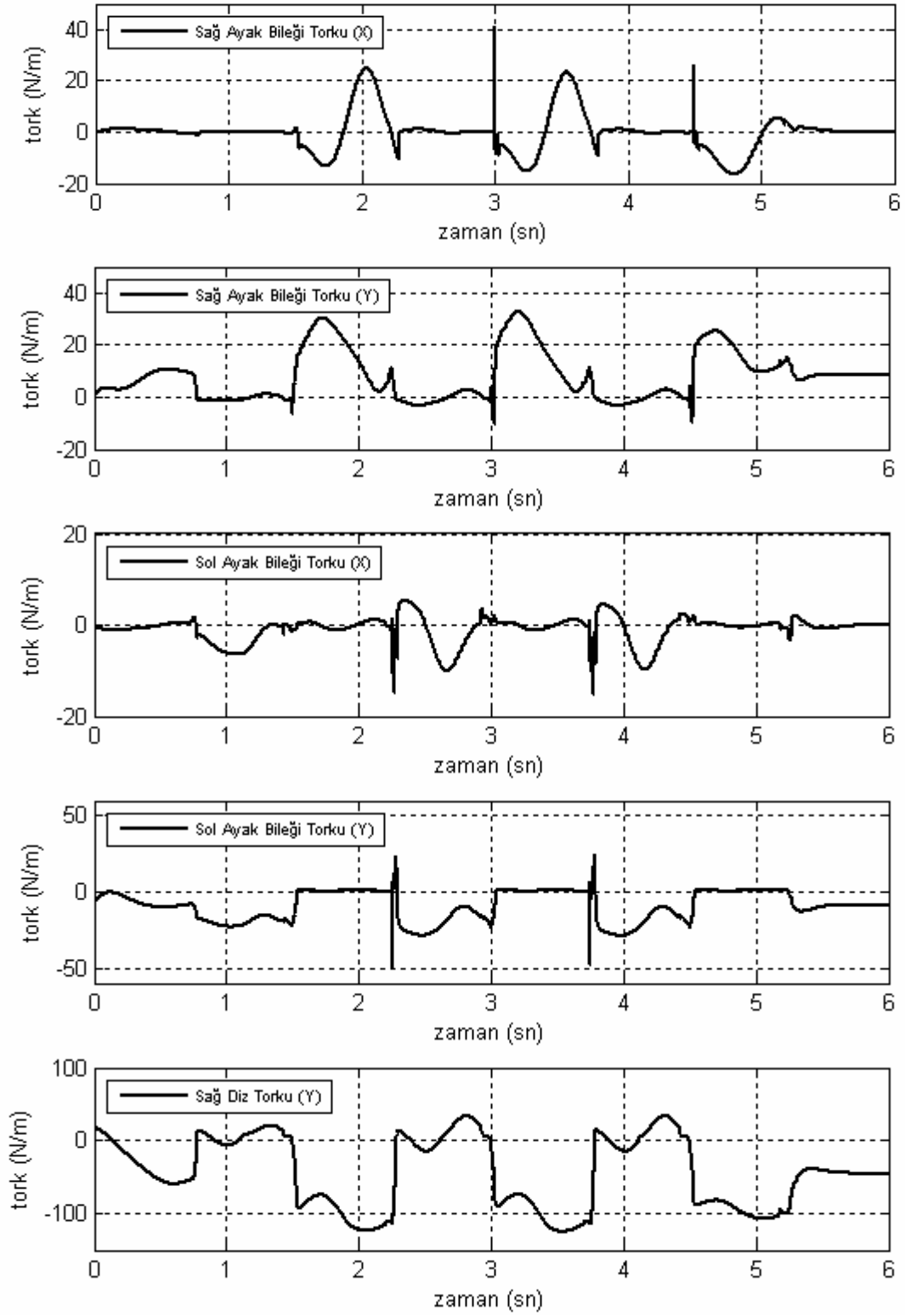
E. DÖNEREK YÜRÜME İÇİN BENZETİM SONUÇLARI



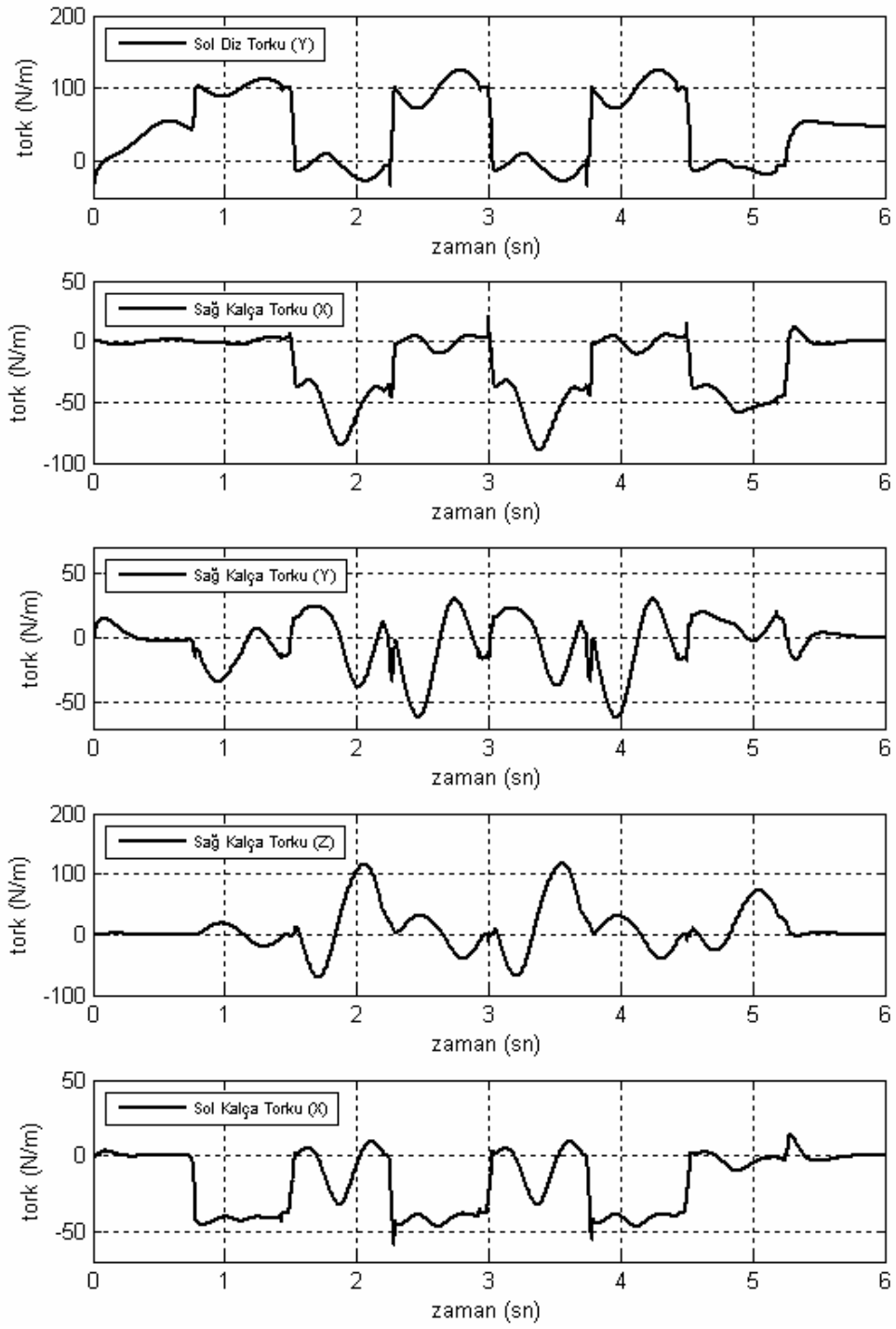
Şekil E. 1: Sağ Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (Dönerек Yürüme)



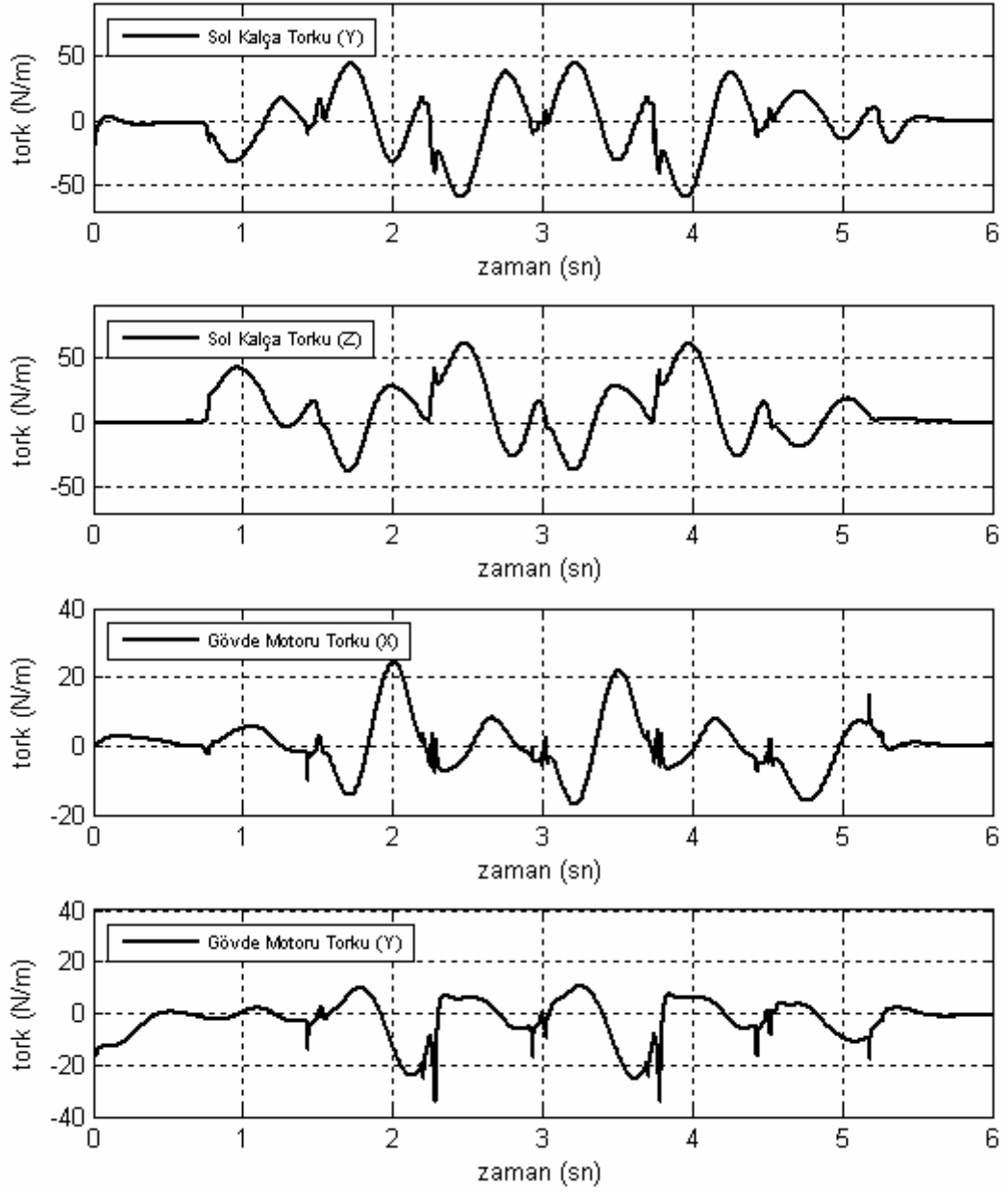
Şekil E. 2: Sol Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (Dönerek Yürüme)



Şekil E. 3: Eklem Torkları (Dönerek Yürüme)

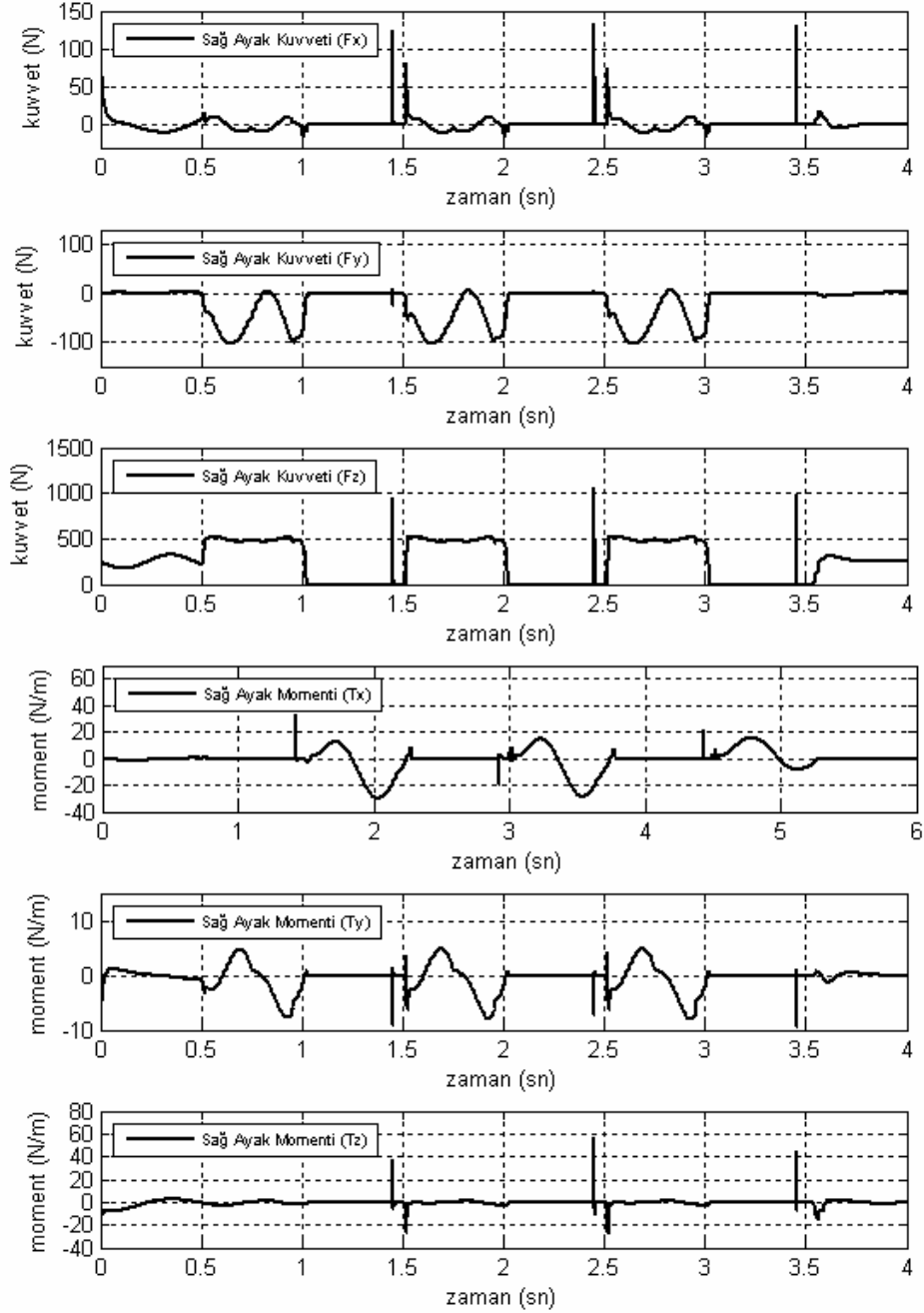


Şekil E. 4: Eklem Torkları (Dönerek Yürüme)

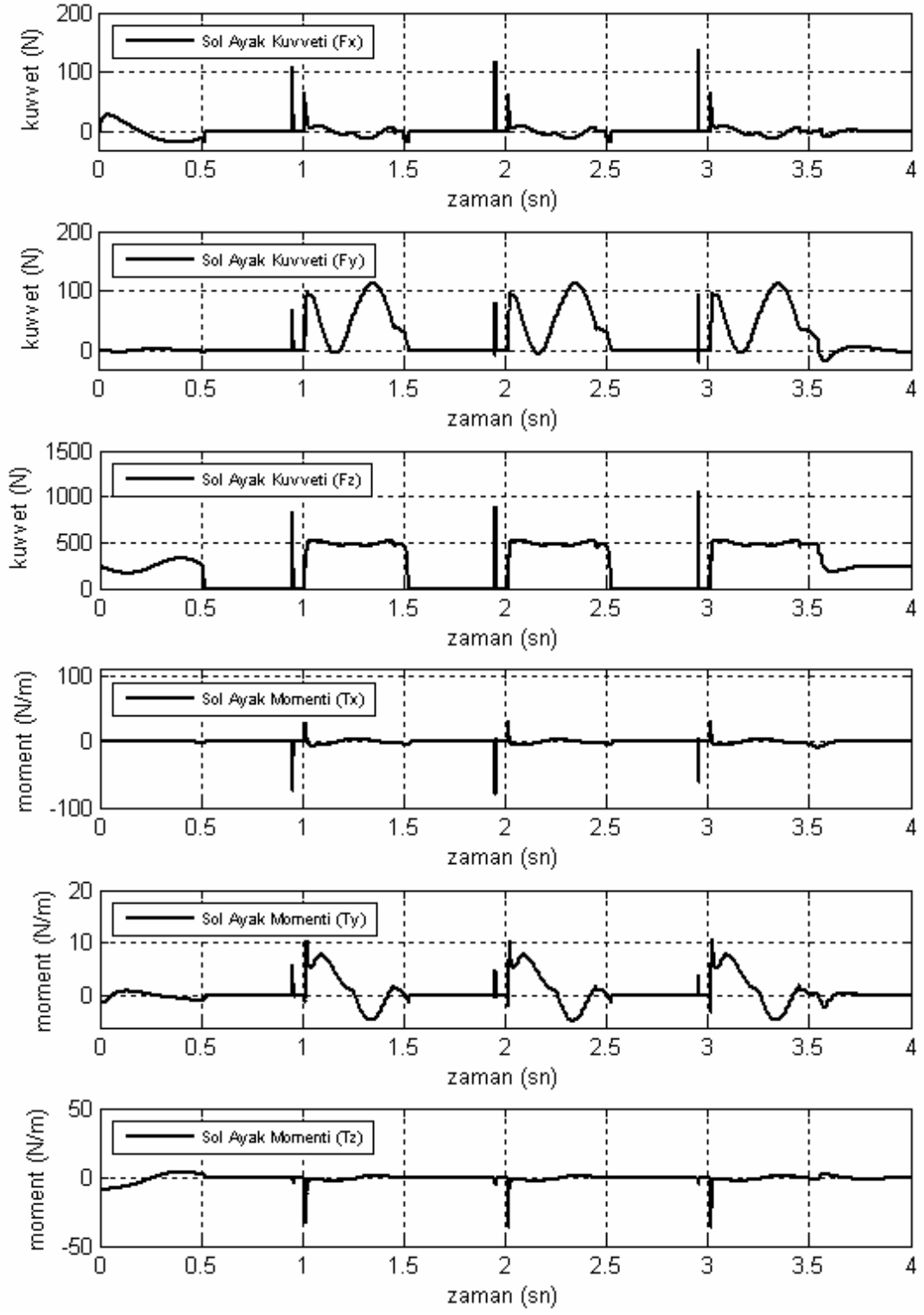


Şekil E. 5: Eklem Torkları (Dönerek Yürüme)

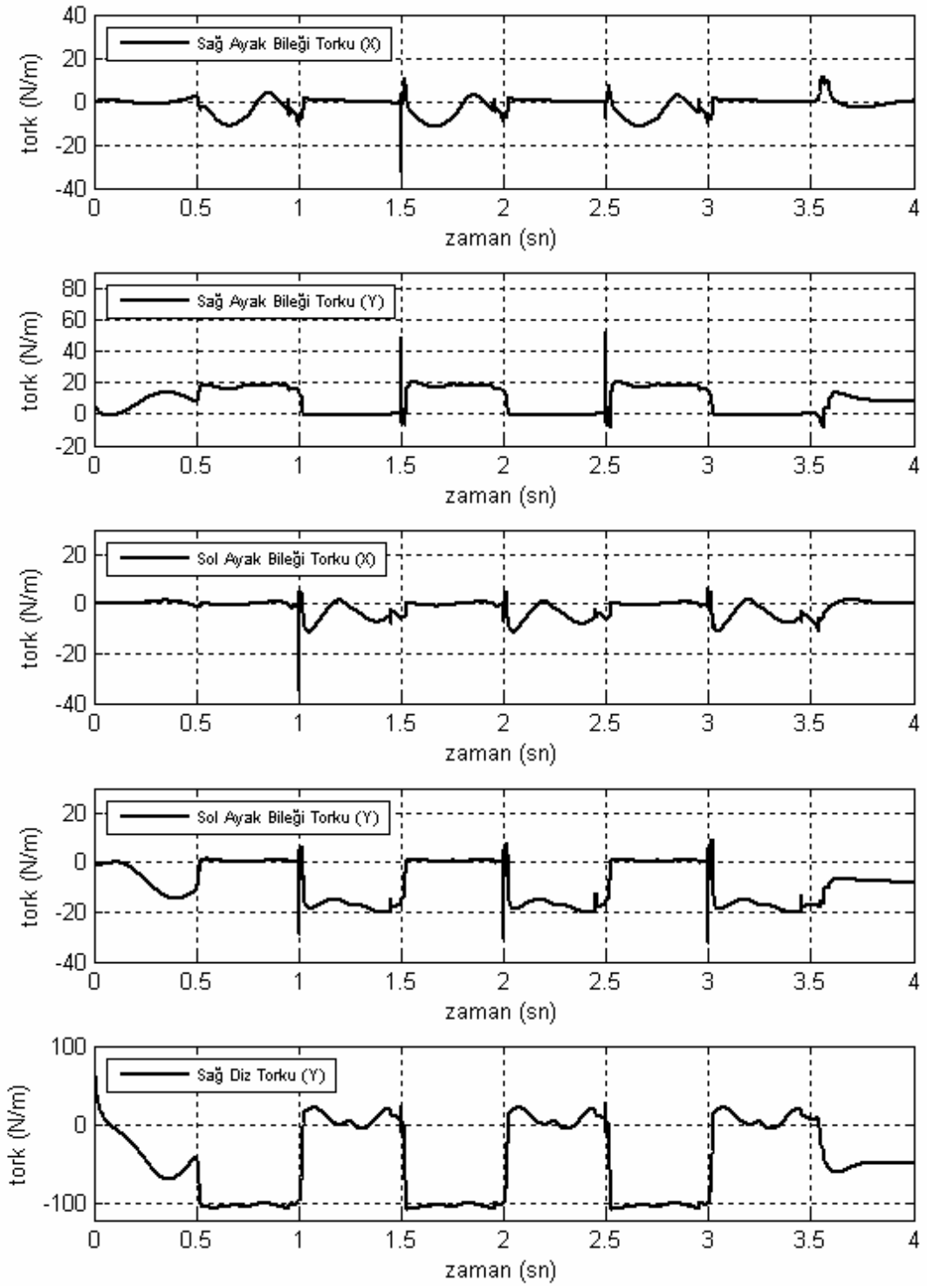
F. YAN YAN YÜRÜME İÇİN BENZETİM SONUÇLARI



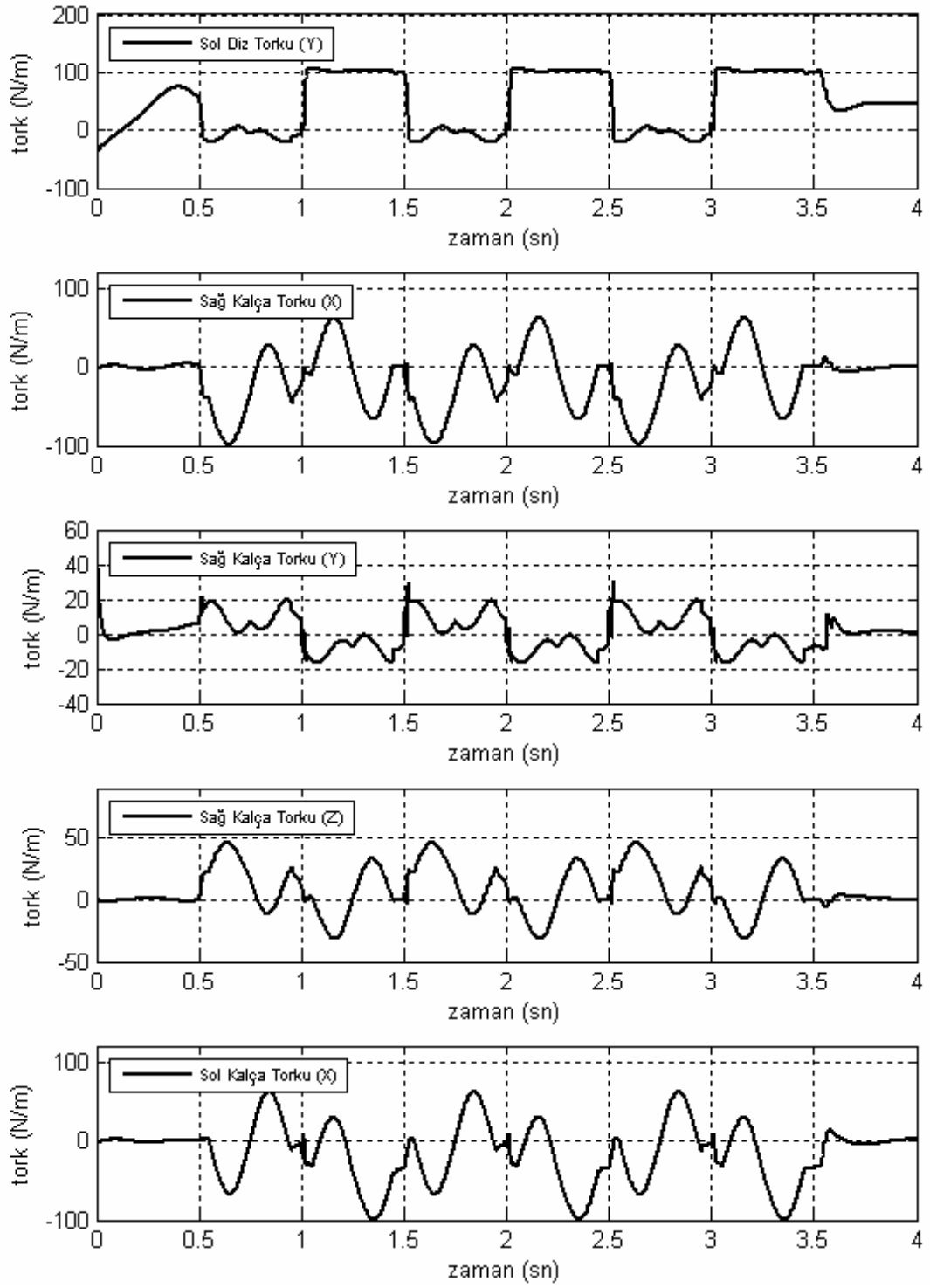
Şekil F. 1: Sağ Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (Yan Yan Yürüme)



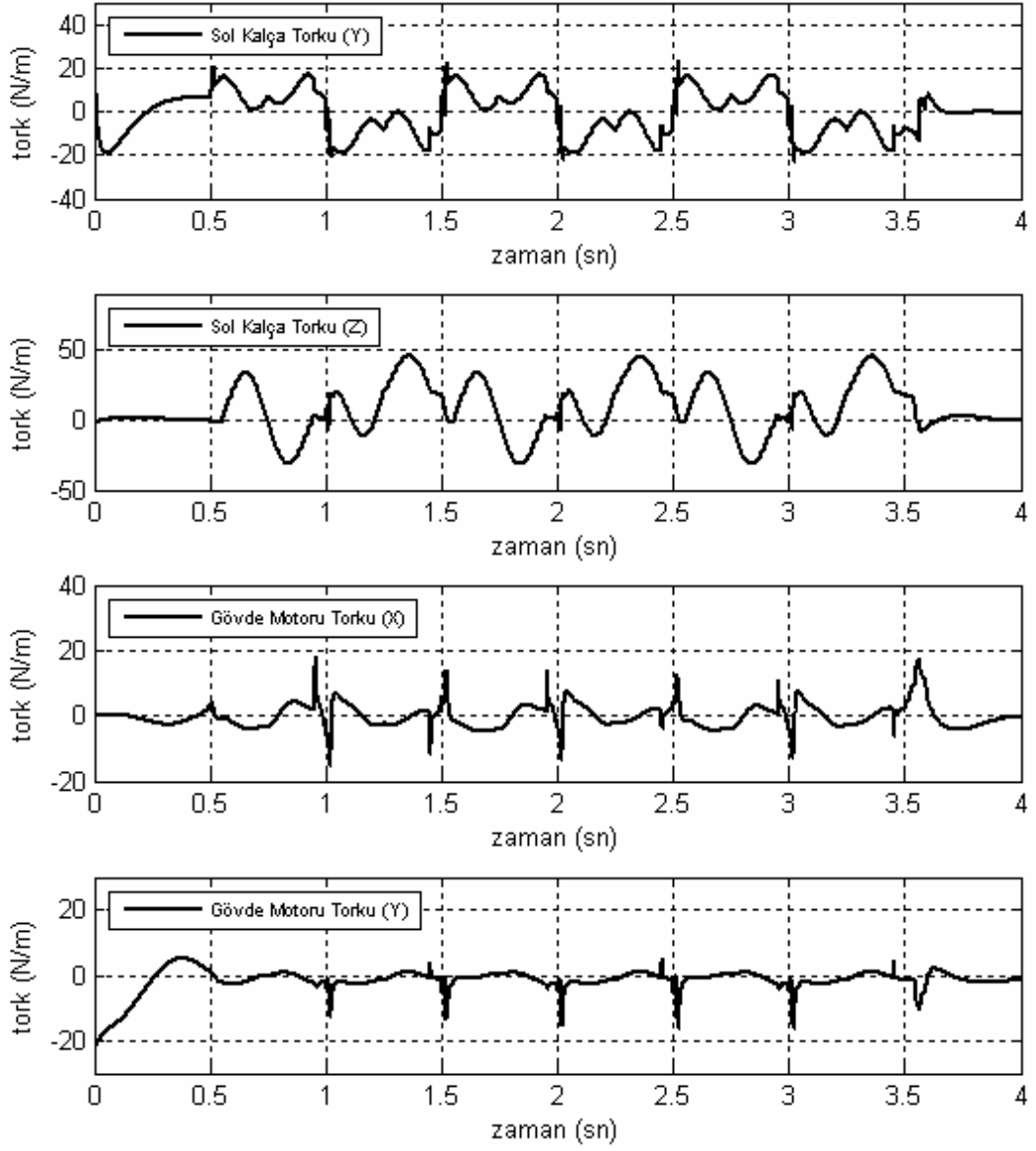
Şekil F. 2: Sol Ayak Kuvvetleri ve Momentleri (Yan Yan Yürüme)



Şekil F. 3: Eklem Torkları (Yan Yan Yürüme)



Şekil F. 4: Eklem Torkları (Yan Yan Yürüme)



Şekil F. 5: Eklem Torkları (Yan Yan Yürüme)

G. UZUVLARA AİT FİZİKSEL PARAMETRELER

Tablo G.1: Uzuvarın Kütile ve Atalet Tensörü Değerleri

Uzuv No.	Uzuv Adı.	Kütile (kg)	Atalet Tensörü (kg.m ²)
0, 12	Sol ve Sağ Ayak	2	Birim Matris
1, 11	Sol ve Sağ Bilek Parçası	0	Sıfır Matris
2, 10	Sol ve Sağ Alt Bacak	3	Birim Matris
3, 9	Sol ve Sağ Üst Bacak	6	Birim Matris
4, 8	Sol ve Sağ Kalça Parçası 1	0	Sıfır Matris
5, 7	Sol ve Sağ Kalça Parçası 2	0	Sıfır Matris
6	Gövde	26	Birim Matris
13, 14	X ve Y Ekseni Motor Volanı Kütlesi	1	Birim Matris

Tablo G.2: Uzuvarın Ağırlık Merkezlerinin Yer Vektörleri(Sol Ayak Yerde)

Uzuv No.	Uzuv Adı	Ağırlık Merkezi Yer Vektörü (m)
12	Ayak	$[3.74E-002 \ 0 \ -3.79E-002]^T$
1	Ayak Bileği Parçası	$[0 \ 0 \ 0]^T$
2	Alt Bacak	$[0 \ 0 \ 0.25]^T$
3	Üst Bacak	$[0 \ 0 \ 0.25]^T$
4	Kalça Parçası 1	$[0 \ 0 \ 0]^T$
5	Kalça Parçası 2	$[0 \ 0 \ 0]^T$
6	Gövde	$[0 \ -0.1 \ 0.45]^T$
13	X Ekseni Motoru Kütlesi	$[0 \ 0 \ 0]^T$
14	Y Ekseni Motoru Kütlesi	$[0 \ 0 \ 0]^T$

ÖZGEÇMİŞ

K. Oytun Yapıcı 1981 yılında İstanbul’da doğdu. 1999 yılında Kabataş Erkek Lisesi’ni bitirdi. Aynı yıl Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı ve 2005 yılında Makina Mühendisi olarak mezun oldu. 2006 Şubat’ında İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Sistem Dinamiği ve Kontrol programında başladığı yüksek lisans eğitimini 2008 Haziran’ında tamamladı. Halen, Kale Altınay Robotik ve Otomasyon A.Ş.’de çalışmaktadır.