

**Aktif Sönümlenme Denetimi İle Bacaklı Robotlarda Model  
Tabanlı Enerji Ve Koşma Kontrolü**

**Program Kodu: 1001**

**Proje No: 114E277**

Proje Yürütücüsü:  
**Doç. Dr. Uluç Saranlı**

**Bursiyerler:**

Görkem Seçer

Merve Özen

Hasan Eftun Orhon

OCAK 2017  
ANKARA

## Önsöz

Bu proje, koşma ve diğer dinamik davranışları gerçekleştirebilecek yapıya sahip esnek bacaklı robotlarda kullanılacak, ters dinamik benzeri yeni bir denetim yöntemi geliştirilmesi konusuna odaklanmıştır. Bu kapsamda “sanal sönümler kontrolü” adlı yeni bir yöntem geliştirilerek, bacaklı koşma davranışları sırasında davranışın her adımda kaybettiği enerjiyi en etkili şekilde geri alabilmesi sağlanmıştır. Proje kapsamında bu yeni yöntemin geçerliliğini bilimsel olarak ortaya koymak için yeni bir robot platformu geliştirilerek biraraya getirilmiş, sistematik deneyler aracılığı ile de önerilen yöntemlerin karşılaştırmalı olarak performansları değerlendirilmiştir. Bu proje TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı bünyesinde iki senelik bir süreç zarfında gerçekleştirilmiştir.

## İçindekiler

Önsöz.....	2
İçindekiler.....	3
Tablolar.....	4
Şekiller.....	5
Özet.....	8
Abstract.....	9
1. Giriş.....	10
1.1 Canlılarda Bacaklı Hareketlilik ve Dinamik Davranışlar.....	10
1.2 Koşma Davranışlarının Modellenmesi ve Kontrolü.....	11
1.3 Mobil Robotlarda Bacaklı Hareketlilik.....	13
2. Aktif Sönümlenme Denetimi ile Bacaklı Koşma Davranışlarında Enerji Kontrolü.....	15
2.1 Seri-Esnek Eyleyicili Bacak Modeli.....	15
2.2 Değişken Sönümlenme Katsayısına Sahip Şablon Bacak Modeli.....	16
2.3 Değişken Sönümlenme Katsayısı ile Sanal Şablonun Yükseklik Kontrolü.....	17
3. Dikey Eksende Zıplama Davranışlarının İncelenmesi Amaçlı Deneysel Platform.....	19
3.1 Hafif ve tek eksenli doğrusal bacak eklemi tasarımı.....	19
3.2 Motor bağlantısı ve vidalı mil düzeneği.....	20
3.3 Yay Uzunluğunun Ölçülmesi için Doğrusal Kodlayıcı Düzeneği.....	21
3.4 Dikey kızak mekanizması.....	22
3.5 Elektromekanik Kontrol ve Veri Toplama Altyapısı.....	23
3.6 Deneysel Sistemin Temel Fonksiyon Testleri.....	28
4. Aktif Sönümlenme Kontrolünün Dikey Eksende Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi.....	32
4.1 Alternatif Kontrol Yöntemleri.....	33
4.2 Benzetim Ortamı ve Modeller.....	34
4.3 Karşılaştırmalı Benzetim Sonuçları.....	34
4.4 Deneysel Platform ve Sistemik Deney Süreçleri.....	37
4.4.1 Pozisyon kontrolü.....	37
4.4.2 Hız Kestirimi ve Filtrelenmesi.....	40
4.5 Karşılaştırmalı Deney Sonuçları.....	40
5. Destekleyici Çalışmalar.....	48
5.1 Seri Esnek Eyleyicili Bilek Eklemi ile Yürüme Kontrolü.....	48
5.2 Giriş-Çıkış Verileri ile Periyodik Davranışa Sahip Sistemlerin Parametrik Tanılaması.....	52
6. İki Boyutlu Koşma Davranışları için Aktif Sönümlenme Kontrolü.....	55
7. Sonuç.....	59
8. Gelecekte Yapılacak Çalışmalar.....	60
9. Kaynakça.....	61

## **Tablolar**

Tablo 1. Deneysel platform üzerinde belirlenen ve benzetim sonuçlarını elde etmek için kullanılan sistem parametreleri .....	34
Tablo 2. Karşılaştırmalı deneyler ile ilgili şekillerde kullanılan, değişik kontrolcü alternatifleri için kısaltmalar.....	41

## Şekiller

- Şekil 1: Solda: Yaylı ters sarkaç (YTS) modeli, Sağda: YTS modeli ile koşma davranışının değişik aşamaları.....11
- Şekil 2. Seri eyleyicili Yaylı Ters Sarkaç Modeli.....15
- Şekil 3. (a) Fiziksel robota karşılık gelen, sabit sönümlenme katsayılı seri eyleyicili yaylı ters sarkaç modeli, (b) Sanal olarak kuvvet kontrolü ile gerçekleştirilecek olan, sönümlenme katsayısı ayarlanabilen yaylı ters sarkaç modeli. ....16
- Şekil 4: Platform tasarımında ayak ile vidalı mil başı arasında kullandığımız Sarrus mekanizması. Solda tasarım çizimleri, sağda ise ürettiğimiz prototip görünmektedir.....20
- Şekil 5: Motor, bilyeli vida ve sarrus üst plakası ile bağlantı mekanizması. En solda kavramsal gösterim, ortada tasarım çizimleri, en sağda ise üretim sonrasındaki deneysel sistem resimleri gösterilmiştir.....21
- Şekil 6: Yay sıkışmasını ölçecek olan doğrusal kodlayıcı düzenekleri. Solda ilk iterasyonun tasarım çizimleri, ortada ise prototip resmi gösterilmektedir. En sağda ise en son sistemde kullanılan ve dikey robot konumunu ölçen kodlayıcı düzeneği gösterilmiştir. ....22
- Şekil 7: Bacak platformu ve kızak düzeneği. Solda tasarım çizimleri, sağda ise prototipin üretilmiş son hali gösterilmektedir. ....23
- Şekil 8: Darbelere karşı dayanıklı ayak tasarımı .....23
- Şekil 9: Deneysel platformun kontrol sisteminin altyapısı.....24
- Şekil 10: EPOS-2 için tasarlanmış olan Simulink real-time bloku.....25
- Şekil 11: CAN aracılığı ile tekli mesaj iletişimi sağlayan SDOout bloku.....25
- Şekil 12: Platform kontrolünü sağlayan yazılım sisteminin genel yapısı .....26
- Şekil 13: Enkoder okumak için tasarlanan Arduino tabanlı sistem ve devre tasarımı .....27
- Şekil 14: Enkoder okuma sisteminin daha kompakt bir şekilde son gerçekleştirilmesi .....27
- Şekil 15: Enkoder sisteminden gelen verileri işleyen Simulink bloku.....28
- Şekil 16: Deneysel sonuçları elde etmek için kullanılan sistemin genel görünümü.....28
- Şekil 17: Temel işlevsellik testi sırasında eyleyiciye iletilen pozisyon komutları ve gerçek eyleyici pozisyonu. Sağdaki grafik periyodik hareket sırasındaki detaylı verileri göstermektedir. ....29
- Şekil 18: Temel işlevsellik testi sırasında eyleyici motoru tarafından çekilen akım. Sağdaki grafik periyodik hareket sırasındaki detayları göstermektedir. ....30
- Şekil 19: Temel işlevsellik testi sırasında eyleyicinin hızı. Sağdaki grafik periyodik hareket sırasındaki detaylı davranışı göstermektedir. ....30

Şekil 20: Eyleyici sistem tanılama örnek test girdileri ve çıktıları.....	31
Şekil 21 Robot sistem tanılama girdileri ve çıktıları.....	32
Şekil 22: Alternatif kontrol yöntemleri kullanılarak seri elastik eyleyici ile atılan bir adımın eyleyici girdileri ve yörüngeleri.....	35
Şekil 23: 0.2m eyleyici hareket kısıt altında değişik yöntemler ile verilebilen maksimum enerji miktarı. Yüksek değerler daha iyi performansı ifade etmektedir.....	36
Şekil 24: Tüm kontrol yöntemlerinin tek bir adımda istenilen yükseklik değişikliğine göre yüzde kontrol hataları. Düşük değerler daha iyi performansı ifade etmektedir.....	36
Şekil 25: İki serbestlik dereceli genel kontrolcü yapısı [Youla et al., 1976].....	39
Şekil 26: Seri esnek eyleyici kontrolü için kullanılan kontrolcünün son halinin geribesleme yapısı.....	39
Şekil 27: DS yöntemi ile atılan bir adımda deneysel platformun hareket verileri ve eyleyici girdileri.....	41
Şekil 28: CD yöntemi ile atılan bir adımda deneysel platformun hareket verileri ve eyleyici girdileri.....	42
Şekil 29: DVD yöntemi ile atılan bir adımda deneysel platformun hareket verileri ve eyleyici girdileri.....	42
Şekil 30: RUVD yöntemi ile atılan bir adımda deneysel platformun hareket verileri ve eyleyici girdileri.....	43
Şekil 31: BVD yöntemi ile atılan bir adımda deneysel platformun hareket verileri ve eyleyici girdileri.....	43
Şekil 32: Belirli bir başlangıç yüksekliğine ulaşıttan sonra verilen yeni yükseklik komutu içeren bir örnek deneyden veriler.....	44
Şekil 33: İstenilen yükseklik değişimine göre tek adımda elde edilen yüzde takip hataları. Standart sapmalar değişik başlangıç yüksekliklerine göre alınmıştır.....	45
Şekil 34: İstenilen yükseklik değişikliğine göre adım sırasında kullanılan güç profilinin mutlak değer olarak maksimum değerleri.....	45
Şekil 35: İstenilen yükseklik değişikliğine göre adım sırasında kullanılan güç profilinin mutlak değer olarak ortalama değeri.....	46
Şekil 36: Kontrol yöntemlerinin farklı yüksekliklere göre istenilen yükseklik değerine göre yüzde olarak limit döngü kontrol hataları.....	47
Şekil 37: Tüm farklı kontrol yöntemlerinin farklı yüksekliklere göre limit döngü tepe güç harcamaları.....	47
Şekil 38: Tüm farklı kontrol yöntemlerinin farklı yüksekliklere göre limit döngü ortalama güç harcamaları.....	48
Şekil 39: Pergel Yürüme Modelinin yapısı ve ilgili tanımlar.....	49

Şekil 40: Pergel Yürüme Modelinde yürüme sırasındaki bir adımda geçilen aşamalar. ....	49
Şekil 41: Örnek bir periyodik yürüme davranışının yerdeki bacağın faz uzayında gösterimi. 50	
Şekil 42: Bilekteki seri esnek yayın ön sıkışma miktarına göre elde edilen periyodik sabit çözümler (solda) ve bunlara karşılık gelen eigendeğerler (sağda). ....	51
Şekil 43: Bilek yayının ön sıkışmasının geribeslemeli olarak kontrolü ile sistemin kararlılığının artırılması. ....	52
Şekil 44: Mathieu benzeri bir sistemin parametrelerinin önerdiğimiz kestirim yöntemi ile bulunmaları.....	55
Şekil 45: Sanal sönümlenme kontrolü fikrinin hiyerarşik bir yapıda anlatımı .....	56
Şekil 46: Farklı sanal bacak parametre seçim yöntemlerine ilişkin simülasyon sonuçları.....	58

## Özet

Mobil robotların arazi şartlarında ihtiyaç duyulan hareketlilik ve performansı gösterebilmeleri için, bacaklı tasarımların yüksek potansiyele sahip oldukları bilinmektedir. Buna rağmen, gerek bacaklı hareketin matematiksel modellenmesi ve denetimindeki, gerekse bu yapıya sahip robotların güvenilir, dayanıklı ve yüksek performanslı olarak tasarlanmalarındaki zorluklar bu alandaki gelişmelerin yavaş ilerlemesine sebep olmuştur. Bu kapsamda yaygın olarak kabul görmüş olan Yaylı Ters Sarkaç (YTS) modeli, hem doğadaki birçok canlının koşma ve yürüme hareketlerini ifade edebilmiş, hem de bacaklı robot tasarımlarını destekleyebilmiştir. Buna rağmen bu modelin robotlar üzerinde pratik uygulanabilirliğinde özellikle sistemin enerji seviyesinin adımdan adıma verimli bir şekilde değiştirilebilmesi noktasında halen çözülmemiş birçok güncel problem bulunmaktadır. Tamamlamış olduğumuz bu proje kapsamında, bu modelin seri esnek eyleyiciye sahip bir bacak yapısı üzerinde, sanal olarak sönümlenme katsayısının değiştirilmesi aracılığı ile enerji ve güç açısından yüksek verimlilikte kontrolü için yeni bir yöntem önerilmiş, gerekli analizler gerçekleştirilerek sonuçlar deneysel bir platform üzerinde doğrulanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda öncelikle grubumuz tarafından geçmiş projelerde geliştirilmiş olan ve YTS modelinin tek bir adımdaki davranışını analitik olarak ifade edebilen çözümlerin geçerliliğini koruyacak bir şekilde seri esnek eyleyicili bir sistemin sönümlenme katsayısı değiştirilebilen bir YTS modeli gibi davranmasını sağlayacak bir kontrolcü önerilmiştir. Bu şekilde, sistemin kütle merkezinin YTS modeli dinamiklerine göre davranması sağlandıktan sonra, bir adımda sistemde istenilen enerji değişikliğini elde edebilmek için gerekli sanal sönümlenme katsayısı ilgili çözümlerin yarı-analitik ters çözümleri ile bulunmuş ve bu denetim yönteminin geçerliliği benzetim ortamında doğrulanmıştır.

Bu şekilde analitik altyapısını kurmuş olduğumuz özgün kontrol yönteminin pratik gerçekleştirilebilirliği ve bilimsel geçerliliğini ortaya koymak için de proje kapsamında dikey ekseninde dinamik ve sürekli zıplama davranışlarını gerçekleştirebilecek olan bir deneysel platform tasarlanmış ve üretilmiştir. Önermiş olduğumuz özgün yöntemin bu platform üzerinde testleri gerçekleştirilmiş, ve literatürde sıklıkla gündeme getirilen ve bacak yay sabitinin sanal olarak değiştirilmesi fikrine dayanan alternatif yöntemlere enerji ve güç açısından çok daha verimli bir yaklaşım olduğu deneysel olarak ortaya konmuştur. Bu deneyleri takiben yöntemin iki boyutlu koşma davranışlarına genellenmesi ile ilgili analitik çalışmalar tamamlanmış ve dinamik koşma davranışlarının robotlarda verimli bir şekilde gerçekleştirilebilmeleri için yeni bir yöntem ortaya konmuştur.



## Abstract

Legged morphologies are known to have high potential for mobile robot applications in achieving the necessary mobility and performance in the field. However, difficulties in the design, mathematical modeling and analysis of such platforms to have the necessary reliability, durability and high-performance resulted in relatively slow progress in this area. In this context, the widely accepted Spring-Loaded Inverted Pendulum (SLIP) model has been able to accurately represent and reproduce running and walking movements of biological runners as well as legged robot designs. Nevertheless, there are many challenging problems to be solved before results related to this model can practically be applied to robotic platforms, particularly when the energy level of the system needs to be changed efficiently from one step to the next. In the context of this project, we proposed a novel method for energy and power efficient control of locomotion with the SLIP model on a leg structure with a series of flexible actuators by virtually changing the damping coefficient, verifying the correctness of our results through systematic experiments on a physical platform.

To this end, we first proposed an “embedding” controller that uses the series-elastic actuator to force the system center-of-mass to behave like a SLIP model whose damping coefficient can be virtually tuned, maintaining the validity of analytic approximate solutions to the single step trajectories of the SLIP model that were developed by our group in previous projects. Built on this embedding of the SLIP model with a tunable damping coefficient, we then constructed a deadbeat controller to determine the virtual damping coefficient required to obtain the desired energy change in the system in one step through the computation of a quasi-analytic inverse solution to the approximate solutions, subsequently verifying the validity of the resulting controller in simulation.

In order to demonstrate the practical feasibility and scientific validity of this novel control method, we have designed and built an experimental platform capable of performing vertically constrained continuous bouncing behaviors that capture radial oscillations of running behaviors. We have tested our novel control method on this platform, showing that it is much more efficient than alternative methods in the literature that are based on the idea of virtually changing the leg spring constant with respect to power and energy efficiency. Following these experiments, we have also completed analytical work on the generalization of our method to two-dimensional running behaviors, yielding a novel method for realizing efficient dynamic running behaviors in legged robots.

## 1. Giriş

Bu projenin odak noktasını oluşturan konu, bacaklı robotlarda dinamik koşma davranışlarının hassas ve verimli kontrolü için kullanılacak eyleyici yapısı ve kontrol algoritmalarıdır. Bu kapsamdaki önemli problemlerden birisi, koşma sırasında sistemde bulunan eyleyicilerin bir adımdan bir sonrakine sistemden istenilen enerji değişikliğini en verimli bir şekilde ve en az anlık güç gerektirecek (dolayısı ile daha küçük motorların kullanımını mümkün kılacak) bir şekilde nasıl gerçekleştirileceğidir. Bu proje kapsamında gerçekleştirdiğimiz çalışmalar ile bu amaçları gerçekleştirebilecek ve geçerliliği deneysel bir platform üzerinde ortaya konmuş yeni bir kontrol algoritması önerdik. Bu raporda bu konu ile ilgili literatürdeki son durum, ve yapmış olduğumuz tüm çalışmalar, önermiş olduğumuz kontrol yönteminin detayları ile elde edilen sonuçları sunduk.

### 1.1 Canlılarda Bacaklı Hareketlilik ve Dinamik Davranışlar

Doğada gözlemlediğimiz ve yer yüzünde yüksek hareketliliğe sahip hayvanların neredeyse tamamı bacaklı bir morfolojiye sahiptir [LaBarbera, 1983] ve geniş bir yelpazede davranış türleri sergilerler. Bu davranışlar arasında çok yavaş ve planlı gerçekleştirilen kinematik davranışlar olduğu gibi (örn. bazı yavaş hareket eden böcekler [Cruse, 1976]), aynı şekilde yüksek hızda ve canlının gövdesinin ve tüm uzuvlarının sahip olduğu momentumu etkili şekilde kullandıkları dinamik davranışlar (örn. koşma, zıplama gibi) da bulunmaktadır [Jindrich and Full, 2002]. Burada yavaş hareket biçimlerini seçen canlılar kas ve iskelet sistemlerinin kırılabilirliği sebebiyle yüksek kuvvetlere maruz kalmalarını gerektirecek olan dinamik davranışları gerçekleştiremezken, dinamik davranış sergileyebilen canlılar ise gerektiğinde yavaş ve daha kontrollü hareket edebilirler. Bunun sonucunda robotik alanında da koşma, zıplama, hatta yürüme gibi göreceli yavaş fakat dinamik davranış biçimlerinin incelenmesi önem kazanmaktadır [Holmes et al., 2006].

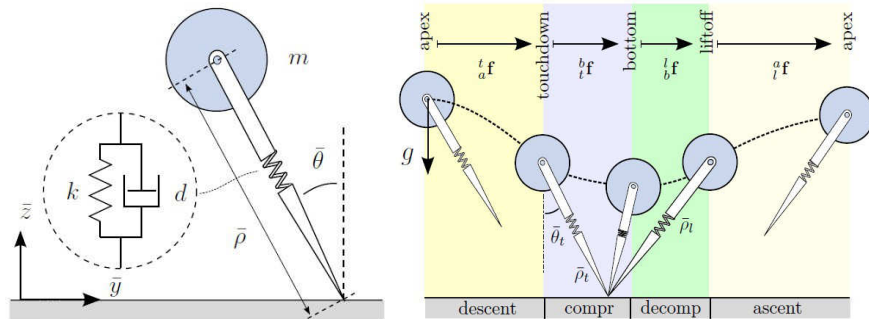
Biyolojide gözlemlenen bu tür dinamik davranışların incelenmesi ilk olarak biyomekanik alanındaki çalışmalar ile gerçekleşmiştir. Özellikle çok yaygın olarak gözlemlenen ve yüksek performansı sebebiyle ilgi çeken koşma davranışları için ilk somut bilimsel çıktılar Cavagna'nın koşma davranışları sırasında yapılan mekanik iş miktarlarını incelemesi ile başlamıştır [Cavagna et al., 1964, Cavagna et al., 1977]. Daha sonra Alexander ve Jayes dikey eksenindeki gövde hareketlerini ve bunların yere uygulanan kuvvet ile ilişkisini inceleyerek basit modellerin bu davranışları açıklayabileceği fikrini ortaya sürmüştür [Alexander and Jayes, 1978]. Bu süreçte bacak yapılarındaki esnekliğin rolünün incelenmesi (McMahon) ve koşma sırasındaki beklenmedik enerji verimliliğinin kaynağı olarak pasif esnekliğin kullanılıyor olabileceği fikirleri kabul görmeye başlamış, ve tüm bunlar sonuçta

oldukça basit bir yay-kütle modelinin birçok canlıdaki koşma davranışlarının temelinde yatan prensibi ifade edebildiğinin ortaya konmasıyla devam etmiştir [Blickhan and Full, 1993].

Biyomekanik alanında ortaya konan bu gelişmeler, robotik, dinamik sistemler ve kontrol alanında çalışan araştırmacıların da ilgisini çekmiştir. Bu kapsamda 1.3. Bölüm'de anlatacağımız şekilde bazı robot platformlarının tasarımına paralel olarak, önerilen yay-kütle modelinin analizi ve kontrolü ile ilgili çalışmaları mümkün kılan ve daha formal şekilde tanımlanmış olan Yaylı Ters Sarkaç (YTS, ing. Spring-Loaded Inverted Pendulum, SLIP) modeli ortaya konmuştur [Schwind, 1998]. Bu modelin biyolojide koşma davranışı sergileyen çok değişik boyut ve yapılarda canlılar tarafından benimsendiği ve kontrol amacı ile kullanıldığı veriler ile ortaya konmasını takiben artık koşma davranışlarının hem biyomekanik, hem de robotik alanında incelenmesi için neredeyse tamamıyla bu model kullanılmaya başlanmıştır [Blickhan, 1989, Altendorfer et al., 2000, Ghigliazza et al., 2005]. Bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar 1.2. Bölümde özetlenmiştir.

## 1.2 Koşma Davranışlarının Modellenmesi ve Kontrolü

Bir önceki bölümde anlatıldığı gibi, doğada kıvrak hareket kabiliyetine sahip birçok bacaklı canlının koşma davranışlarının etkili olarak modellenmesi Yaylı Ters Sarkaç ile mümkün olmaktadır [Blickhan and Full, 1993]. Bu modelin temel yapısı Şekil 1'de gösterilmiştir ve temel olarak noktasal bir kütle ile esnek bir bacedan oluşmaktadır. Modelin en basit halinde kütsüz ve sürtünmesiz bir bacak yapısı varsayılsa da, literatürde bu model üzerine yapılan birçok çalışma modele değişik ek özellikler katarak koşma davranışının önemli özellikleri üzerine odaklanmışlardır. Son yıllarda grubumuzun da yapmış olduğu çalışmalar özellikle bacedaki radyal yönde sürtünme varlığında modelleme, analiz ve kontrol prensiplerine odaklanmıştır [Saranli et al., 2010, Arslan and Saranli, 2012, Ankarali and Saranli, 2010, Ankarali and Saranli, 2011].



Şekil 1: Solda: Yaylı ters sarkaç (YTS) modeli, Sağda: YTS modeli ile koşma davranışının değişik aşamaları

YTS modeli ile yapılan çalışmalar öncelikle bu modelin biyolojide görülen koşma davranışlarında canlıların kütle merkezlerinin hareketinin bu model ile ne kadar hassas bir şekilde ifade edilebileceği üzerine odaklanmıştır ve değişik boyda, değişik bacak sayılarına sahip ve değişik yapılarda birçok canlı için modelin öngörülerinin geçerli ve hassas olduğu ortaya konmuştur [Blickhan and Full, 1993, Altendorfer et al., 2000]. Bunu takiben YTS modeli üzerindeki çalışmalar öncelikle modelin enerji seviyesinin kontrolü için dikey eksenindeki davranışına odaklanmıştır [Koditschek and Buehler, 1991], daha sonra ideal ve sürtünmesiz YTS için hibrid koşma davranışının olanak verdiği hareket biçimlerinin sistematik karakterizasyonu üzerine çalışmalar yapılmıştır [Schwind, 1998, Schwind and Koditschek, 2000]. Buna paralel olarak, özellikle uçuştan yerle temas fazına geçerkenki bacak açısı gibi kontrol parametreleri kullanılarak sistemin kararlılığı ve kontrolü üzerine çalışmalar yapılmıştır [Ghigliazza et al., 2005, Altendorfer et al., 2004, Carver, 2003, Schmitt, 2006, Seipel and Holmes, 2007]. Bu kapsamdaki önemli sonuçlardan bir tanesi, herhangi bir geribesleme olmadan bile, sabit bir bacak açısı seçilerek sistemin kararlı hale getirilebildiğini gösteren çalışmalar sonucunda elde edilmiştir [Ringrose, 1997, Ghigliazza et al., 2005].

YTS modeli ile ilgili literatürde odak noktasını oluşturan konulardan bir tanesi de bu modelin hareketinin dinamik denklemlerinin yaklaşık çözümleri olmuştur. Bir adım içinde sistemin hareketi normalde doğrusal olmayan bir diferansiyel denklem ile ifade edilmektedir. Fakat, bu denklemler yapıları itibarı ile analitik çözümü olmayan üç-gövde problemine eşdeğer olduklarından basit bir şekilde sistemin zamana göre hareketini ifade eden çözümlere çevrilmeleri mümkün olmamaktadır. Fakat YTS modelinin tek bir adımdaki davranışını görece basit denklemler ile ifade edebilmek, hem kontrolcü tasarımı, hem de sistemin kararlılık analizi için büyük faydalar sağlayabilir. Bu doğrultuda öncelikle Schwind tarafından yapılan çalışmalar belirli varsayımlar altında, karmaşık da olsa yaklaşık çözümler ortaya koyabilmiştir [Schwind, 1998, Schwind and Koditschek, 2000]. Bunu takiben Geyer tarafından yapılan çalışmalarda sürtünmesiz bacak yapısı ve yerçekiminin etkisinin doğrusallaştırılması ile daha basit çözümler bulunmuştur [Geyer et al., 2005]. Bu çalışmalardan yola çıkarak grubumuz tarafından gerçekleştirilen çalışmalar bacakta sürtünmenin varlığında ve yerçekiminin de etkisini göz önünde bulundurarak çok daha hassas yaklaşık çözümler ortaya koymuş [Saranli et al., 2010, Ankarali and Saranli, 2010], bunların deneysel doğrulanmaları ile de literatürde YTS modelinin daha sağlam bir temele dayanarak ilerlemesini sağlamıştır [Uyanik et al., 2015]. Bu yaklaşık çözümler üzerine adaptif kontrol [Uyanik et al., 2011], durumu kestirimi [Gur and Saranli, 2012], adım planlaması [Arslan and Saranli, 2012] gibi konularda çalışmalar da yapılmıştır.

Özet olarak, YTS modeli bacaklı koşma davranışları için çok yaygın olarak kullanılan ve birçok araştırmacının halen üzerinde çalışmakta olduğu ve bünyesinde henüz çözülmemiş araştırma problemlerini içeren bir modeldir. Bu raporda detaylandırdığımız projemizin ana odak noktası da bu modelin gerçekçi robot yapıları için bir hedef “şablon” olarak kullanılarak, [Full and Koditschek, 1999] hem analitik geçerliği olan, hem de enerji etkililiği yüksek olan bir koşma denetimi yöntemini destekleyebileceği yöntemlerin geliştirilmesi olmuştur.

### **1.3 Mobil Robotlarda Bacaklı Hareketlilik**

Doğada bacaklı yapıların yüksek performansını gözlemleyen araştırmacılar, robot tasarımlarında bacakların nasıl kullanılabileceğini uzun süredir incelemektedirler. Bu kapsamda ortaya konan ilk platformlar, göreceli olarak denge sorunlarının daha az olması sebebiyle dört veya daha fazla bacağa sahip yapılar üzerine odaklanmışlardır [Waldron et al., 1984]. İki veya dört bacaklı robotlarda yerle temas yüzeyi oldukça küçük olduğundan, gerek dengenin korunması için uygulanabilecek kuvvetlerin azlığı, gerekse bunu gerçekleştirmek için gereken yoğun algılayıcı desteği ve geribesleme ihtiyacı da yüksek olmaktadır [Goswami, 1999, Vukobratovic and Borovac, 2004]. Bu sebeple iki bacaklı robot platformları üzerindeki çalışmalar daha yavaş ilerlemiş ve ancak son yıllardaki teknolojik gelişmeler ile hız kazanmıştır.

Bu konudaki en önemli istisnalar, yukarıda bahsi geçen yay-kütle modellerinin, klasik anlamda statik denge ihtiyacı olmadan, sürekli zıplayarak koşma davranışını ve uzun süreli kararlılığı sağlayabiliyor olmalarından esinlenilerek yapılan, Raibert’ın bacaklı robotları olmuşturlar [Raibert, 1986]. Massachusetts Institute of Technology bünyesinde tasarlanan bu robotlar, içlerinde bulunan sıkışmış hava yardımı ile esneklik elde eden bacaklar ve bunlara bir dış pompa ile itki verilmesi ile enerji girdisi sağlayan bir kontrol yapısı ile, statik denge olmadan da dinamik olarak kararlı koşma davranışları elde edilebileceğini göstermişlerdir [Raibert, 1987, Raibert, 1990]. Birçok anlamda günümüzde robotlarda koşma davranışlarının elde edilmesinde, bacaklı robot tasarımı ve kontrolünde çığır açmış olan bu çalışmalar temel alınmaktadır.

Bu platformları takiben, benzer yapıda fakat koşma davranışlarının enerji verimliliğine daha çok odaklanan McGill Üniversitesindeki ARL tek bacaklı robotları literatürde yer almıştır [Gregorio et al., 1997]. Bu platformların en önemli özelliği, hava yastığı ile esnekliğin elde edilmesindense, bacak ile aynı yönde bir helezon yay ve buna seri olarak bağlanan bir doğrusal motor kullanımı ile yalnızca elektriksel yapıda bir bacak tasarımı önerilmiş olmasıdır. ARL robotları üzerindeki ilk çalışmaları takiben, bacak hareketi ile gövde

salınımlarının da daha verimli ve etkili kontrol edilebilmesi için esnek mekanizmaların kullanımı üzerine daha ileri çalışmalar da yapılmıştır [Ahmadi and Buehler, 2006].

ARL tek bacaklı robotlarını takiben tasarlanıp üretilen robotlar arasında önemli bir yeri BowLeg tutmaktadır [Zeglin, 1999]. Diğer alternatiflere oranla oldukça basit bir yapıya sahip olan bu robot bükülme yoluyla esneklik elde eden bir bacak tasarımı kullanmış, ve sistem havada iken bacadaki yayın sıkıştırılarak enerji depolaması ile sisteme kaybettiği enerjiyi geri veren bir yapıdadır. Bu şekilde eyleyiciler tarafından yapılan mekanik iş hiçbir şekilde negatif olmamakta, dolayısı ile sistemin verimi yüksek olmaktadır. Bu sistemin zorlukları hem doğrusal olmayan yay özellikleri sebebiyle modeller ile uyuşmaması ve bunun sonucunda hassas kontrolün mümkün olmaması, hem de algısal olarak sistemin içinde bulunduğu durumun ölçülmesindeki zorluklar olmuştur.

Bacaklı koşma davranışlarının robotik alanındaki yansımalarında önemli adımlardan bir tanesi, aktif olarak esnekliği ayarlanabilen bir bacak tasarımı olan Amasc platformu [Hurst et al., 2004], ve bunu takiben tasarlanıp üretilen BiMASC yapısı [Hurst et al., 2007] ve bunu kullanan MABEL robotu olmuştur [Hurst, 2011, Park et al., 2011]. Bu tasarımda dönel bir eklem ile gerçekleştirilen bacak boyu serbestlik derecesi, iki tane birbirine zıt çalışan yayın ortak olarak gerilmeleri ve gevşemeleri ile net sertliği değişebilen bir yay özelliğine sahip gibi görünmektedir. Bu tasarımdaki kuvvet aktarımları kablolar şile sağlanmakta, bunun sonucunda sistem karmaşıklığı ve ağırlığı oldukça artmaktadır. Bu platformun yapılması sonucunda görülmüştür ki, YTS modelinin kontrolü için sıklıkla önerilmiş olan yay sabitinin değiştirilmesine dayalı kontrol yöntemleri pratik ve gerçekleştirilebilir değildir. Bunun sonucunda bu robot tasarlayan grup da seri-esnek eyleyici yöntemlerine yönelmiştir.

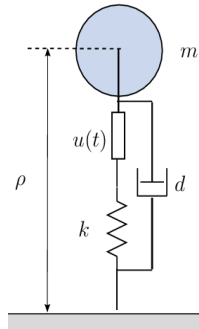
Bu şekilde esnekliğe seri olarak bağlanan bir eyleyici aracılığı ile sisteme enerji verilmesi fikrinin önemli robotik gerçeklemleri arasında ATRIAS robotu bulunmaktadır [Grimes and Hurst, 2012, Hubicki et al., 2016]. Bu platform BiMASC platformunun bir sonraki iterasyonu gibi görünse de, aslında farklı bir eyleyici yapısına sahiptir. Diferansiyel olarak birbirine bağlı iki dönel eklem farkları bacak uzunluğuna, toplamları ise bacak açısına etki edecek bir şekilde kinematik bağlantıların yapıldığı bu robotta hem YTS, hem de incelenmek istenen diğer türlü modeller kuvvet kontrolü aracılığı ile ortaya konabilmektedir. Aslında projemizde önerilmiş olan ve deneysel olarak doğruluğu ortaya konmuş olan koşma davranışı için kontrol yönteminin uygulanabileceği en uygun platformlardan birisi ATRIAS'tır fakat yüksek maliyeti sebebiyle bilimsel doğrulama çalışmalarından çok daha sonraki aşamalarda kullanılması uygun görülmüştür. Yine de halihazırda ATRIAS dinamik koşma davranışlarını gerçekleştirebilen dünyadaki az sayıda otonom robotlar arasındadır.

Bu önemli çalışmalar haricinde, ve koşma haricindeki bacaklı davranışları gerçekleştiren birçok robot platformu literatürde bulunabilmektedir. Fakat projemizin kapsamı açısından en önemli platformları ve özelliklerini bu kısımda özetlemeye çalıştık. Gerek kinematik davranışlar gerçekleştirebilen, gerekse yürüme gibi dinamik fakat farklı yapıdaki davranışlar için tasarlanmış platformlar ile ilgili bilgiler bu konular ile ilgili yayınlar ve ilgili literatürde incelenebilir.

## 2. Aktif Sönümlenme Denetimi ile Bacaklı Koşma Davranışlarında Enerji Kontrolü

### 2.1 Seri-Esnek Eyleyicili Bacak Modeli

Yukarıda, 1.2. Bölümde detaylandırılmış olan Yaylı Ters Sarkaç modelinin fiziksel gerçekleşmesinde en uygun yapılar, 1.3. Bölümde anlatıldığı şekilde bacadaki esneklik ile seri olarak bağlanmış eyleyicileri barındıran tasarımlar olmuştur. Bu sebeple çalışmamızda öncelikle bu yapıya sahip bir robot modeli üzerinde önerdiğimiz yöntemin prensiplerini, yapısını ve altyapısını anlatacağız. Seri eyleyicili bacak platformlarının değişik mekanik yapılar ile gerçekleştirmeye çalıştıkları tasarım aslında ortak özelliklere sahiptir ve Şekil 2'de gösterilen şekilde bir modele karşılık gelmektedir. Burada konumu  $u(t)$  şeklinde denetlenen bir motor ile yay seri bağlanmış, tüm sistemin sürtünmesi ise paralel bir sönümlenme elemanı ile sisteme dahil edilmiştir.



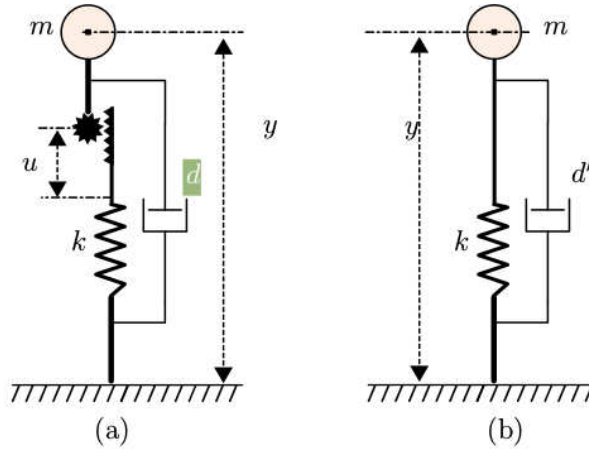
Şekil 2. Seri eyleyicili Yaylı Ters Sarkaç Modeli

Bu model göreceli olarak basit görünmesine rağmen, seri eyleyicinin varlığı YTS modeli için yapılan hiçbir çalışmanın olduğu şekliyle kullanılamamasına sebep olmaktadır. Bu sorunu çözmek üzere yapılan çalışmalar yaklaşık doğrusallaştırma, doğrudan bacadaki kuvvet kontrolü ile sanal yay sabiti kontrolü gibi, bu sistemi YTS'ye indirgemeye çalışan yaklaşımları içermektedir. Bu yaklaşımların en önemli sorunu ise, enerji verimliliği açısından oldukça kötü bir performans göstermeleridir ki bunun sebebi kontrol algoritmasının sistemin kendi dinamiklerinin öngördüğü yörüngeler yerine, kendi analitik çözümlerini gerçekleştirmelerine olanak sağlayacak yörüngeleri sisteme zorla yaptırmak durumunda kalmalarıdır. Projemizin

ilk döneminde yaptığımız çalışmalar bu yöntemlere alternatif olarak enerji verimliliği yüksek ve etkili özgün bir kontrol algoritması geliştirilmesini kapsamıştır ve proje öncesindeki çalışmalarımızın üzerine kurulmuştur.

## 2.2 Değişken Sönümlenme Katsayısına Sahip Şablon Bacak Modeli

Enerji verimliliği yüksek bir denetim algoritması geliştirmek için proje kapsamında önerdiğimiz yöntem, Şekil 2’de gösterilen seri-esnek eyleyicili sistemdeki motor konumu  $u(t)$ ’nin uygun şekilde kontrol edilerek, gövdenin hissettiği kuvvetin, farklı bir sönümlenme katsayısına sahip sanal bir YTS modeli tarafından öngörülen miktarı takip etmesinin sağlanması üzerine kuruludur.



Şekil 3. (a) Fiziksel robota karşılık gelen, sabit sönümlenme katsayılı seri eyleyicili yaylı ters sarkaç modeli, (b) Sanal olarak kuvvet kontrolü ile gerçekleştirilecek olan, sönümlenme katsayısı ayarlanabilen yaylı ters sarkaç modeli.

Şekil 3’de sol tarafta fiziksel robotlarda kullanılan seri elastik eyleyicili bacak yapısının dikey eksene kısıtlanmış bir modeli görünmektedir. Bu modeldeki sönümlenme katsayısı,  $d$ , sabittir ve sistemin mekanik özelliklerine bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Sağdaki model ise, sanal olarak kuvvet kontrolü kullanılarak gerçekleştirilecek olan ve sönümlenme katsayısı  $d'$ , istenilen şekilde seçilebilecek bir yapıda tasarlanan bir sanal, *şablon modeldir*. Sağdaki fiziksel modelin, gövdenin hissettiği kuvvetler açısından soldaki gibi davranabilmesi için sağlanması gereken kuvvet denklemi

$$-g - \frac{k}{m}(y - y_0 - u) - \frac{d}{m}\dot{y} = -g - \frac{k}{m}(y - y_0) - \frac{d^*}{m}\dot{y}$$

yapısındadır ve bunun çözümü sonucunda ortaya çıkan gerekli eyleyici konumu



$$u_e(t) = \frac{d - d^*}{k} \dot{y}(t)$$

şeklinde ortaya çıkmaktadır. Sistemin ayağı yerle temas halinde iken eyleyici konumu bu şekilde seçildiği takdirde, fiziksel sistemin gövdesi şablon modelin öngördüğü kuvvetleri hissedecektir.

Bu kontrolcü yapısının en önemli avantajı, önerilen şablon modelinin pasif YTS modelinin tıpatıp aynısı olmasıdır. Bunun bir sonucu olarak, literatürde YTS ile ilgili olarak yapılmış analitik çalışmaların ve yaklaşık çözümlerin tamamı kullanılabilir hale gelmektedir. Bunun sonucunda, şablon modeli üzerinde kontrolcü tasarımı için gerekli altyapı oluşmaktadır. Yanlız, şunu da gözlemlemek gerekir ki, bu şablon modelde kontrol girdisi olarak sanal sönümlenme katsayısı önerildiğinden, projemiz kapsamında özgün bir kontrolcü yöntemi geliştirilmesi gerekmiştir ki ilerleyen bölümlerde bu yöntemden detaylıca bahsedeceğiz.

### 2.3 Değişken Sönümlenme Katsayısı ile Sanal Şablonun Yükseklik Kontrolü

Fiziksel robot sisteminin sanal şablonu etkili olarak gerçeklediğini varsaysak bile, sistemin bir adımdan bir sonrakine hareketini ve zaman içinde istenen davranışı göstermesini sağlamak için şablonu kontrol edecek bir yapının da ortaya konması gerekmektedir. Bu doğrultuda öncelikle şablon modelin tek bir adım içindeki hareketinin yaklaşık bir analitik çözümü kullanılacaktır. Bu çözüm, grubumuzun geçmiş çalışmalarında ortaya koymuş olduğu bir çözümdür. Projemizin ilk aşamasında odaklanmış olduğumuz dikey model için bu çözüm aşağıda özetlenmiştir ve buna ek olarak özgün olarak önermiş olduğumuz, sönümlenme katsayısına dayalı kontrol yöntemi de detaylandırılmıştır.

Öncelikle, şablon sistemin sahip olduğu hareket denklemleri

$$\ddot{y} = -g - \frac{k}{m}(y - y_0) - \frac{d'}{m}\dot{y}$$

ile ifade edilebilir. Bu sistem, Şekil 1'de gösterildiği gibi, uçuş (flight) ve temas (stance) fazlarından geçmektedir. Uçuş fazı basit balistik denklemler ile ifade edilebilir olup çözümü bilinmektedir. Normalde iki boyutlu YTS modelinin temas dinamikleri yalnızca yaklaşık olarak çözülebilmeye rağmen, dikey modeldeki çözümler

$$\begin{aligned} y(t) &= M e^{-\xi \omega_n t} \cos(\omega_n \sqrt{1 - \xi^2} t + \phi) + \frac{F}{\omega_n^2} \\ \dot{y}(t) &= -M \omega_n e^{-\xi \omega_n t} \cos(\omega_n \sqrt{1 - \xi^2} t + \phi + \phi_2) \end{aligned}$$

ile verilmektedir. Buradaki semboller

$$M := (c_1^2 + c_2^2)^{1/2}, \phi := -\text{atan}(c_2/c_1), \phi_2 := -\text{atan}(1 - \xi^2)^{1/2}/\xi$$

$$\omega_n := \sqrt{k/m}, \xi := d'/(2\sqrt{km})$$

olarak tanımlanmıştır. Ayrıca  $c_1$  ve  $c_2$  temas anının başlangıç durumu kullanılarak bulunmaktadır:

$$c_1 = g/\omega_n^2,$$

$$c_2 = (\dot{y}_{td} + c_1 \xi \omega_n)/(\omega_n \sqrt{1 - \xi^2})$$

Buna ek olarak temasın en alt noktasının (bottom) ve kalkış anının (liftoff) bulunması da sistemin tek bir adımının çözümü için gereklidir ve bunların çözümleri

$$t_b = (\pi/2 - \phi - \phi_2)/(\omega_n \sqrt{1 - \xi^2})$$

$$t_{lo} = \frac{2\pi - \text{acos}(k(y_0 - F/\omega_n^2)e^{2\xi\omega_n t_b}/(\overline{MM})) - \phi - \phi_3}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}}$$

ile verilmiştir. Burada da yeni tanımlar

$$\overline{M} := \sqrt{k^2 - 2kd'\omega_n \cos \phi_2 + d'^2\omega_n^2}$$

$$\phi_3 := -\text{atan}(d'\omega_n \sin \phi_2/(k - d'\omega_n \cos \phi_2))$$

şeklinde verilmiştir. Bu tanımlar sonucunda, şablon modelin tek bir adımının analitik bir çözümü ortaya çıkmaktadır. Bu çözüm sayesinde, sistemin bulunduğu konumdan, bir adım içinde istenen herhangi başka bir yüksekliğe varabilmesi için gerekli sanal sönümleme katsayısı bulunabilecektir. Denklemlerin yapısı analitik olsa da, karmaşıklıkları sebebiyle doğrudan analitik bir çözüm mümkün olmamaktadır. Buna rağmen, bu çözüm oldukça basit tek boyutlu bir sayısal çözüm problemi haline getirilebilir. Sistem yörüngesinin tepe anındaki konumu ölçülebildiği varsayıldığında, ve istenen bir sonraki yükseklik  $X^*$  olarak adlandırılırsa,

$$d^* = \text{solve}_{d'} \left( g y_{lo,k}(d') + \frac{1}{2} \dot{y}_{lo,k}^2(d') - g X^* = 0 \right)$$

nümerik olarak çözüldüğünde ortaya çıkan  $d^*$ , şablon modelin bir adım içinde istenen yüksekliğe varabilmesini sağlayacaktır.

### 3. Dikey Eksende Zıplama Davranışlarının İncelenmesi Amaçlı Deneysel Platform

Proje kapsamındaki önemli çalışmalardan bir tanesi, yukarıda önermiş olduğumuz aktif sönümlenme kontrolünün gerçekleştirilebilmesi ve doğrulanabilmesi için yeterli özelliklere sahip bir deneysel platformun geliştirilmesi olmuştur. Bu bölümde bu platformun tasarım ve üretim aşamalarını detaylı olarak anlatacağız.

Öncelikle tasarladığımız platformun önceki bölümlerde karşılaştırmalı olarak anlatmış olduğumuz yöntemlerin tamamını gerçekleştirmeye müsait olacak şekilde gerekli istekleri sağlaması gerekmektedir. Bu istekler şöyle belirlenmiştir:

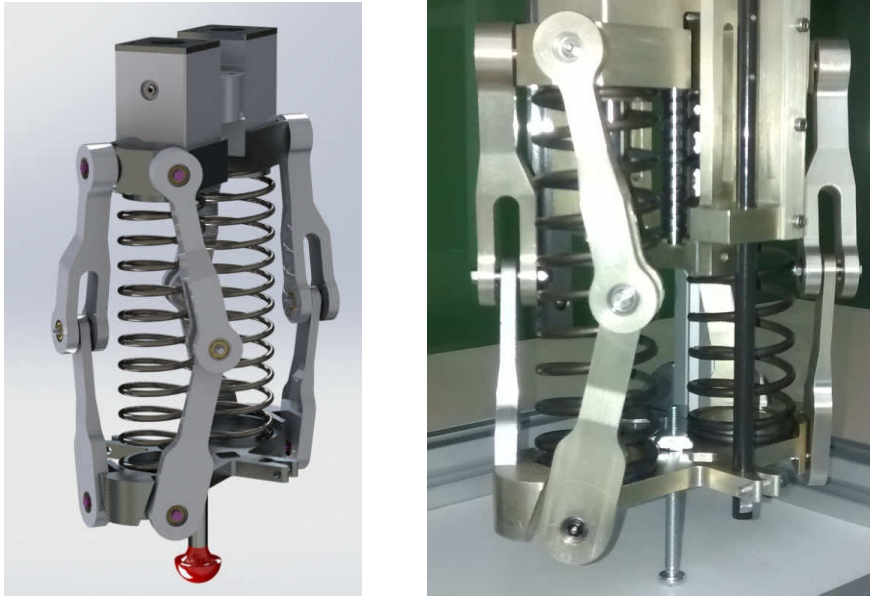
1. YTS modelinde ayak kütlelerinin sıfır olduğu varsayıldığından, platformun ayak görevi gören kısımlarının ağırlıklarının mümkün olan en az şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bacaklı platformların tamamında bu zaten önemli ve her zaman istenilen bir özelliktir.
2. Platformda kullanılacak olan ve esnekliği sağlayacak olan yayların uzunluklarının yüksek hızda ölçülebilmelerini sağlayacak olan gerekli algılayıcıların sisteme dahil edilmeleri gerekmektedir. Önermiş olduğumuz kontrolcü bacak uzunluğu ve hızının ölçülmesini gerektirdiğinden yalnızca motor konumunun bilinmesi yeterli olmamaktadır.
3. Platformda kullanılacak olan motorun sağlayabileceği güç, en verimsiz olan yay sabitinin ayarlanmasına dayalı yöntemi de gerçekleyebilecek şekilde seçilmelidir. Tasarlamakta olduğumuz platform araştırma amaçlı bir düzeneğe olduğundan, bu da normalde önerdiğimiz yöntemin gerektireceğinden daha yüksek güçlü motorlar gerektiği anlamına gelmektedir.
4. Bacak yapısının, dikey eksene kısıtlı bir modelin doğrulanması için kullanılacağından, düşük sürtünmeli dikey bir kızağa monte edilmesi gerekecektir. Bu düzeneğin dikey eksen dışındaki serbestlik derecelerini etkili bir şekilde ortadan kaldırarak modellerimizi gerçekleştirmeyi mümkün kılması istenmektedir.

Tüm bu istekleri sağlayan ve deneysel sonuçlarımızı elde etmek için kullanmış olduğumuz platformun detayları aşağıdaki kısımlarda verilmiştir.

#### 3.1 Hafif ve tek eksenli doğrusal bacak eklemi tasarımı

İlk olarak tasarımın önemli bir parçası olan, ayak noktasının bacak ekseninde tek serbestlik derecesi ile hareket etmesini sağlayan kısım üzerine odaklanacağız. Normalde tek eksende hareket doğrusal rulmanlar ve miller kullanılarak gerçekleştirilebilir. Fakat bu tür bir düzeneğin

genellikle kullanılması gereken parçaların yapıları itibarı ile ağırlığı çok fazla olmaktadır ve yer ile çarpışma anında oldukça fazla enerji kaybı olmasına yol açmaktadır. Daha basit ve hafif parçalar ile tasarlanabilecek dönel eklemlili parçaların ise, tam olarak doğrusal bir harekete kısıtlı kalacak şekilde tasarlanmaları da karmaşık bir problemdir. Bu kapsamda projenin ilk tasarım aşamasında Sarrus mekanizması adı verilen, ve iki parçanın birbirlerine tamamen paralel kalacak şekilde tek eksenli bir şekilde hareket etmelerini sağlayacak bir sistem kullanmaya karar verdik. Ayak ile motordan gelen vidalı milin bağlı olduğu bu Sarrus tasarımı Şekil 4'de solda gösterilmiştir.



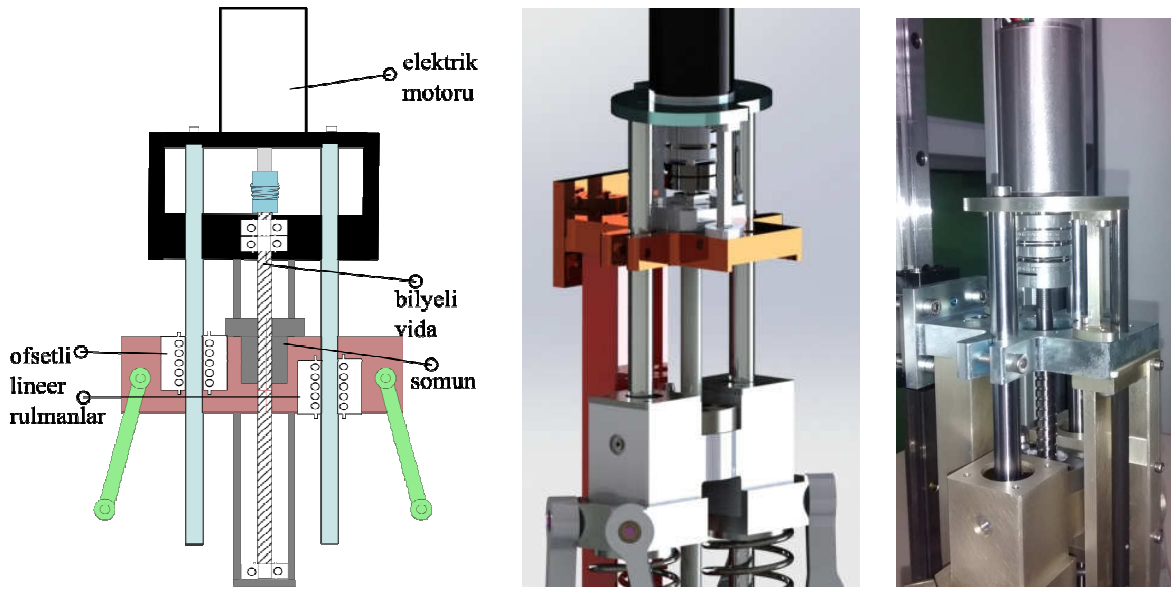
Şekil 4: Platform tasarımında ayak ile vidalı mil başı arasında kullandığımız Sarrus mekanizması. Solda tasarım çizimleri, sağda ise ürettiğimiz prototip görünmektedir.

Bu yapıda ayağın bağlı olduğu düzlemsel alt parça ile üstteki motor vidalı mil başının bağlanacağı düzlemsel parça her zaman paralel kalmaktadır. Bu iki düz parça arasında yerleştirilen sıkışma yayları da bacağın esnekliğini oluşturmaktadır. Bu tasarımın üretimi tamamlanmış halinin resmi de Şekil 4'de sağda gösterilmiştir. Bu tasarımların tamamı bursiyer öğrencilerimiz tarafından yapılmış olup, üretimler hizmet alımı olarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan malzeme sert 7075 T6 temperli alüminyum olup hafiflik ve dayanım açısından gerekli özellikleri sağlamaktadır.

### 3.2 Motor bağlantısı ve vidalı mil düzeneği

Önerdiğimiz yapıdaki en önemli tasarım zorluklarından bir tanesi, yayların serbestlik derecesi ile aynı yönde hareket edecek fakat tek eksene kısıtlanmış bir eyleyici hareketini gerçekleştirebilecek, yeterince dayanıklı ve yanal kuvvetlere de dayanabilecek bir

mekanizmayı ortaya koymaktır. Ayak mekanizmasının aksine bu yapı gövdede olacağından ağırlık isterleri o kadar kısıtlı değildir. Dolayısı ile bu kısım için doğrusal rulman ve mil yapısı kullanmayı uygun gördük. Bu sistemin daha sonra ikinci serbestlik derecesini de destekleyebilmesi için yanal yükler karşı koyabilmesi de önemli olduğundan, çift yataklı bir tasarım kullandık. Platformda kullandığımız motor ve vidalı milin yatakları Şekil 5'de solda gösterilmiştir. Bu mekanizmanın fiziksel platformda üretilmiş hali de aynı şekli sağ tarafında verilmiştir. Bu sistemin tasarımında motor üzerine binen aksel yükler en aza indirilerek, yanal yükler ve sistemin yaylardan gelen kuvvetinin gövdeye rulmanlar aracılığı ile aktarılması sağlanmıştır.



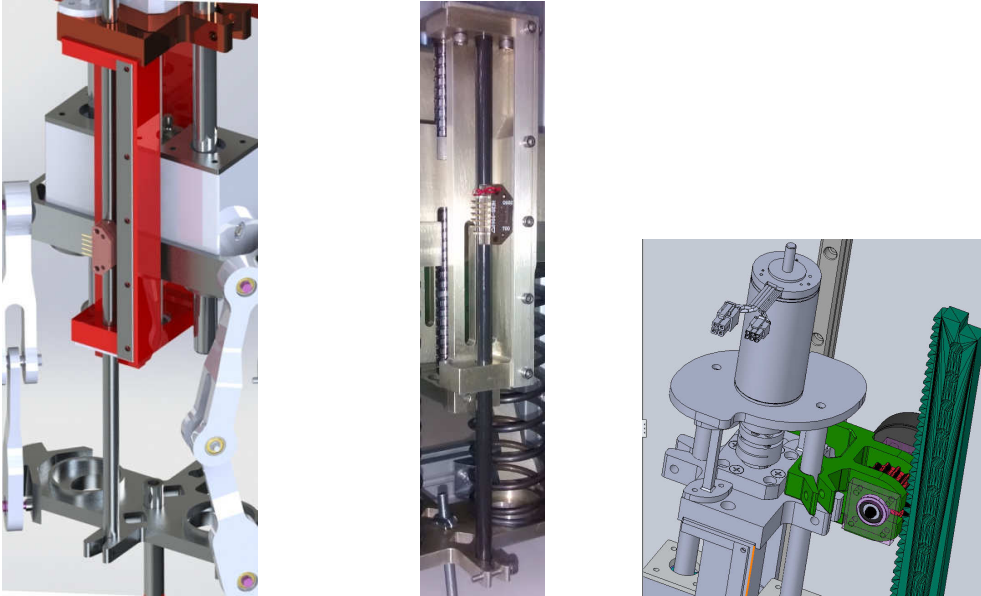
Şekil 5: Motor, bilyeli vida ve sarrus üst plakası ile bağlantı mekanizması. En solda kavramsal gösterim, ortada tasarım çizimleri, en sağda ise üretim sonrasındaki deneysel sistem resimleri gösterilmiştir.

Tasarladığımız sistemde motor için Maxon 393025 EC40 170 W motor ile 110516 HEDL 5540 dönel kodlayıcının birleşik hali seçilmiştir. Sistemde vidalı mil kullanıldığından, ayrıca bir dişli kutusu kullanılmamıştır. Bu motor ve kodlayıcı çifti, gerekli güç ve konum ölçüm hassasiyetini tüm deneylerimiz için bize verebilmiştir.

### 3.3 Yay Uzunluğunun Ölçülmesi için Doğrusal Kodlayıcı Düzeneği

Tasarımımızdaki önemli öğelerden bir tanesi de yay ve motor uzunluklarının toplamının ölçülmesini sağlayacak olan doğrusal kodlayıcı düzeneğidir. Bu düzenek sayesinde yayın tam olarak ne kadar sıkıştığı ölçülerek, kontrol algoritmalarımızın gerektirdiği algılayıcı bilgileri edinilmiş olacaktır. Bu düzenek ayak plakasına monte edilen bir mil üzerine takılan

kodlayıcı ünitesinin, gövdeye monte edilmiş olan kodlayıcı şeridi okuması ile çalışmaktadır. Bu düzeneğin detaylı tasarım resmi Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu düzenek projenin ilk aşamalarından sonra üretilerek sisteme monte edilmiştir fakat yapılan ön deneyler sonrasında sistemdeki esneme ve dönme payları sebebiyle yeterli performans vermediği gözlemlenmiştir. Bu sebeple deneysel süreçleri sorunsuz şekilde gerçekleştirebilmek için, dikey robot konumunu kesin olarak ölçebilecek bir kodlayıcı sistemi tasarıma eklenerek üretilmiştir. Dikey robot konumu ve motor konumu bilindiği zaman yay sıkışma miktarı kinematik olarak hesaplanabildiğinden bu yeni mekanizma istenen algoritmaları gerçekleştirebilmek için yeterli olmuştur. Buna ek olarak bacak yerle temas halinde değilken robotun bulunduğu enerji seviyesinin ölçümü de bu mekanizma ile gerçekleştirilmiştir. Tasarım revizyonu Şekil 6'da en sağda gösterilmiştir.



Şekil 6: Yay sıkışmasını ölçecek olan doğrusal kodlayıcı düzenekleri. Solda ilk iterasyonun tasarım çizimleri, ortada ise prototip resmi gösterilmektedir. En sağda ise en son sistemde kullanılan ve dikey robot konumunu ölçen kodlayıcı düzeneği gösterilmiştir.

### 3.4 Dikey kızak mekanizması

Son olarak da, tüm bacak sisteminin dikey eksene kısıtlı şekilde hareket etmesini sağlayacak ve muhtelif algılayıcı ve işlemci ünitelerini destekleyecek olan bir çerçeve ve kızak yapısı da proje kapsamında tasarlanarak üretilmiştir. Bu tasarımda bacağın yerle çarpışması sonucunda oluşacak sarsıntı ve salınımları azaltmak için kalın sigma profilden bir yapı ve ağır bir taban ünitesi kullanılmıştır.



Şekil 7: Bacak platformu ve kızak düzeneği. Solda tasarım çizimleri, sağda ise prototipin üretilmiş son hali gösterilmektedir.

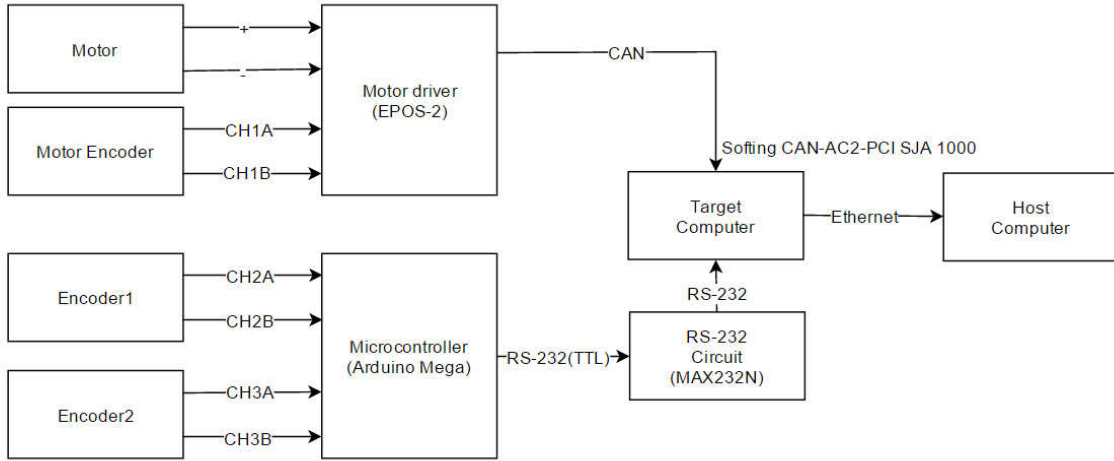
Bu kızaklama sistemine ek olarak, sistemin sürekli olarak yere çarpması sırasında oluşacak darbeleri en aza indirmek amacıyla yumuşak fakat dayanıklı bir ayak ünitesi de sisteme son deneyler öncesinde dahil edilmiştir. Bu ayak yapısı ile ilgili parçalar ve robota monte edilmiş hali Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8: Darbelere karşı dayanıklı ayak tasarımı

### 3.5 Elektromekanik Kontrol ve Veri Toplama Altyapısı

DeneySEL platformumuzun kontrolünü sağlayan alt sistemler ve bağlantıları da Şekil 9'de gösterilmiştir. Bu kapsamda öncelikle Matlab Simulink ortamında çalışan kontrol algoritmaların desteklemek üzere bu altyapı ile uyumlu ve bir hedef bilgisayar (target computer) sisteme dahil edilmiştir.



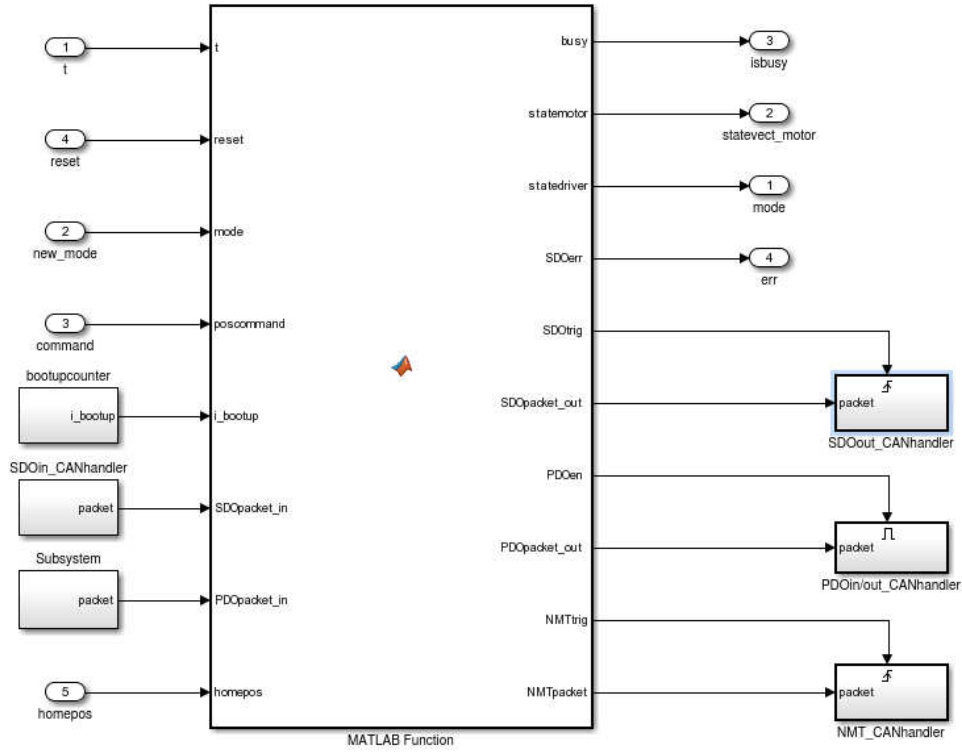
Şekil 9: Deneysel platformun kontrol sisteminin altyapısı

Bu bilgisayar üzerindeki CAN arayüzü ile Maxon EPOS-2 motor sürücüsü ile iletişim kurmaktadır ve deneysel platformdaki seri eyleyicinin konum kontrolünü mümkün kılmaktadır. Bu kapsamda seçilmiş olan Maxon 393025 EC40 170 W motor ile 110516 HEDL 5540 dönel kodlayıcının birleşik hali sistemde kullanılmaktadır.

Sistemdeki bu ana motora ek olarak, hem yayın uzunluğunu, hem de sistemin dikey konumunun deneysel amaçlı olarak doğrudan ölçümü için iki ek enkoderin de kontrol bilgisayarı tarafından okunması gerekmektedir. Bunu mümkün kılmak için proje kapsamında Arduino mikroişlemcisini temel alan bir veri okuma sistemi geliştirilmiş ve RS232 seri bağlantı üzerinden Simulink'e bağlanmıştır. Bu alt sistemle ilgili detayları aşağıda verilmiştir.

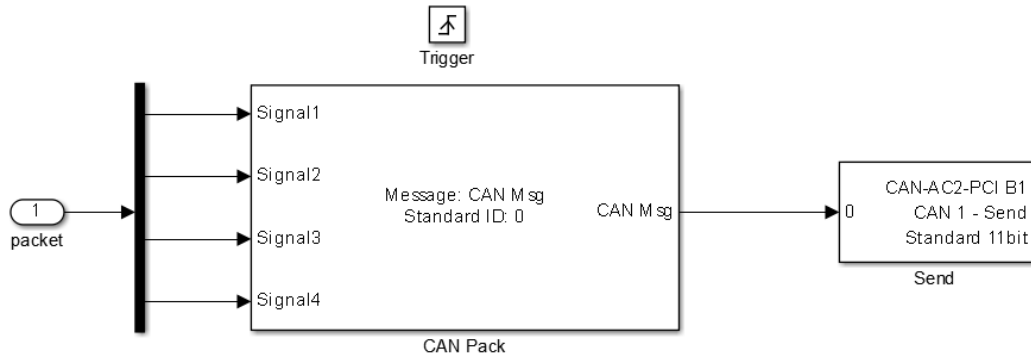
Öncelikle temel motor kontrolünü gerçekleştiren Simulink sistemini detayları ile anlatılacaktır. Bu doğrultuda ilk olarak EPOS-2 motor sürücüsünü CAN bağlantısı üzerinden kontrol edebilmek için genel amaçlı bir blok tasarlanmıştır. Şekil 10'de iç yapısı gösterilen bu blok, Simulink gerçek zamanlı kütüphanelerindeki temel CAN bloklarını kullanmakta fakat bunlar üzerinde sistematik olarak kalibrasyon, hız kontrolü ve konum kontrolü özelliklerini kullanmak ve sürekli veri toplayabilmek için gerekli ek yapıları içinde barındırmaktadır.





Şekil 10: EPOS-2 için tasarlanmış olan Simulink real-time bloku

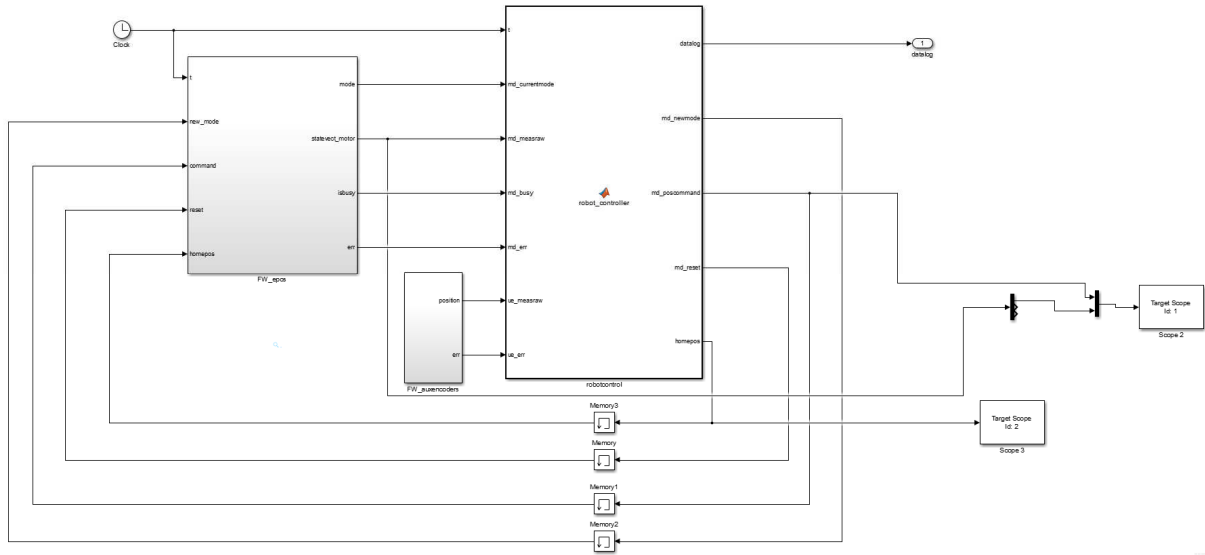
Bu bloktaki temel fonksiyon, CAN bus tanımındaki başlangıç (NMT), tek mesaj (SDO) ve sürekli mesaj (PDO) özelliklerini soyutlayan üç blok aracılığı ile mümkün olmaktadır. Bu blokların iç yapısı oldukça benzer olmakla birlikte, SDO için olan mesaj gönderme bloku Şekil 11’de gösterilmiştir. Burada ana kontrolcü tarafından tetiklenmeyi sağlayan trigger özelliği, istenilen zamanda mesaj gönderilmesini sağlamaktadır. Buna ek olarak, mesaj almayı sağlayan SDOin bloku da gelen cevapları işleyerek kontrol blokuna göndermektedir.



Şekil 11: CAN aracılığı ile tekli mesaj iletişimi sağlayan SDOout bloku

Simulink ortamında kontrol algoritmalarının değişimi kolay ve en etkili tasarlanmalarının yolu "MATLAB function" bloku aracılığı ile, değişik girdi ve çıktılar arasında gerekli fonksiyonel bağlantıyı bir program aracılığı ile kurabilen blok mümkün kılmaktadır. Bu bloğun iç yapısı genel amaçlı olarak ilk kalibrasyon, hız kontrolü ve konum kontrolü yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Burada bir durum makinesi (state machine) aracılığı ile, EPOS-2 motor kontrolcüsünün gerektirdiği tüm ilk konfigürasyon ve mesajlaşma adımlarını gerçekleştiren oldukça kapsamlı bir kod yazılmış ve testleri gerçekleştirilmiştir. Bu blok CANOpen standardını takip eden tüm motor sürücüler için kullanılabilir bir yapıya sahiptir.

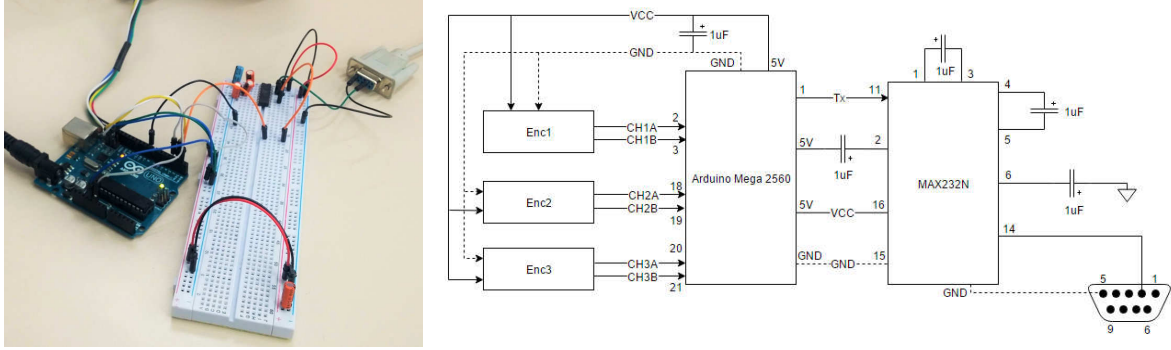
EPOS-2'nin kontrolünü sağlayan bu blok, genel olarak deneysel platformun kontrolünü sağlayan bir üst seviye kontrolcü yapısı içinde bulunacak şekilde tasarlanmıştır. Bu yapı Şekil 12'de gösterilmiştir ve temel olarak bu bir MATLAB fonksiyon bloku ile gerçekleştirilmiştir. Bu fonksiyon bloku EPOS-2 bloku ile bağlantı kurarak gerekli komutları, mod değişikliği isteklerini ve istenen konum/hız bilgilerini göndermektedir ve böylece ana motorun kontrolünü sağlamaktadır. Buna ek olarak yukarıda bahsi geçmiş olan ve enkoder bilgilerini okuyan alt sistem ile de bağlantı kuran bir alt blok ile de iletişim kurarak gelen konum bilgilerini almakta ve bunları kontrol amaçlı olarak kullanmaktadır.



Şekil 12: Platform kontrolünü sağlayan yazılım sisteminin genel yapısı

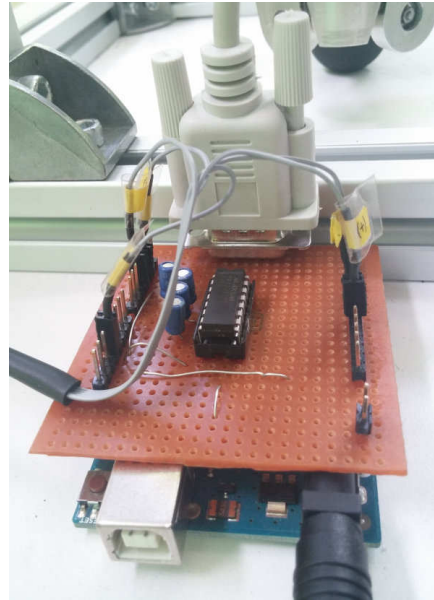
Bu noktada proje kapsamında tasarlayıp gerçekleştirdiğimiz enkoder arayüz devresi ve yazılımının da detaylarından bahsedilebilir. Bu doğrultuda ilk olarak temel testleri ve geliştirilmesi Şekil 13'de gösterilen şekilde gerçekleştirilmiş olan bu sistem, periyodik olarak kodlayıcıdan gelen quadrature sinyallerini takip eden ve bunları bir RS232 bağlantısı üzerinden PC'ye aktaran gömülü bir yazılımdan ibarettir. Geliştirilmesi tamamlanan bu

sistem, daha uzun vadeli kullanım için Şekil 14'de gösterilen revizyon ile robot platformu bünyesinde kullanılmıştır.



Şekil 13: Enkoder okumak için tasarlanan Arduino tabanlı sistem ve devre tasarımı

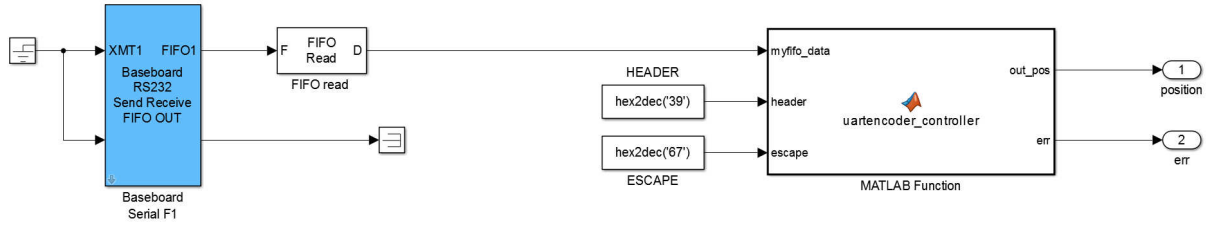
Bu sistemdeki en önemli öğelerden bir tanesi Arduino üzerinde gerçekleştirilmiş olan yazılım olmuştur. Bu gömülü yazılım sürekli olarak üç farklı enkoderden gelen sinyalleri kesintiler aracılığı ile takip ederek ilgili sayaçları güncellemektedir. Bu veriler ise 1KHz hızında örneklenerek, 115200 baud'luk bir iletişim hızında seri bağlantı üzerinden hata giderici bir protokol aracılığı ile PC platformuna aktarılmaktadır. Böylece robot kontrol sistemi kesintisiz olarak enkoderlerden gelen verileri toplayarak işleyebilmektedir.



Şekil 14: Enkoder okuma sisteminin daha kompakt bir şekilde son gerçekleştirilmesi

Bu gömülü sistemi tamamlayıcı nitelikte, Simulink üzerinde proje kapsamında gerçekleştirilen bir blok tasarımı gelen verileri işleyerek kontrolcü blokuna göndermektedir. Bu blok tasarımı da gerçek zamanlı Simulink'te bulunan seri port desteği üzerine, gelen verileri işleyen bir MATLAB fonksiyon bloku ile tasarlanmıştır. Hata tespiti ve düzeltmesini de checksum

aracılığı ile gerçekleştiren bu bloğun güvenilir şekilde çalıştığı sistem testleri sırasında gösterilmiştir.

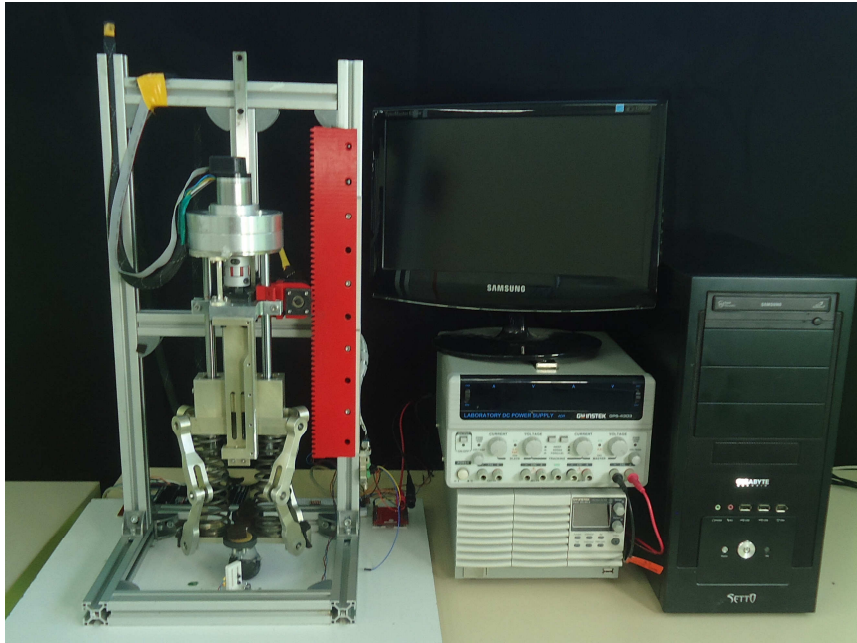


Şekil 15: Enkoder sisteminden gelen verileri işleyen Simulink bloku

Yukarıda anlattığımız öğelerin tamamı birleştiğinde, robot platformu ile proje kapsamındaki tüm deneyleri yapabilecek ve istenen kontrolcülerin Matlab ortamında gerçekleştirilebileceği bir sistem oluşturulmuştur. Bu yapı mevcut projede olduğu kadar, gelecekteki projelerimizde de oldukça güvenilir ve hızlı şekilde robot sistemlerinin kontrolünü sağlamamıza olanak verecektir. Bu kapsamda yaptığımız çalışmaların sonuçları oldukça tatmin edici olmuştur.

### 3.6 Deneysel Sistemin Temel Fonksiyon Testleri

Projenin kapsamında tasarlanan ve yukarıda detayları anlatılan platformun tasarım ve üretimini takiben, temel işlevsellik testlerini gerçekleştirdik. Deneysel sonuçları elde etmek için kullanılan sistemin son hali Şekil 16'da gösterilmiştir.

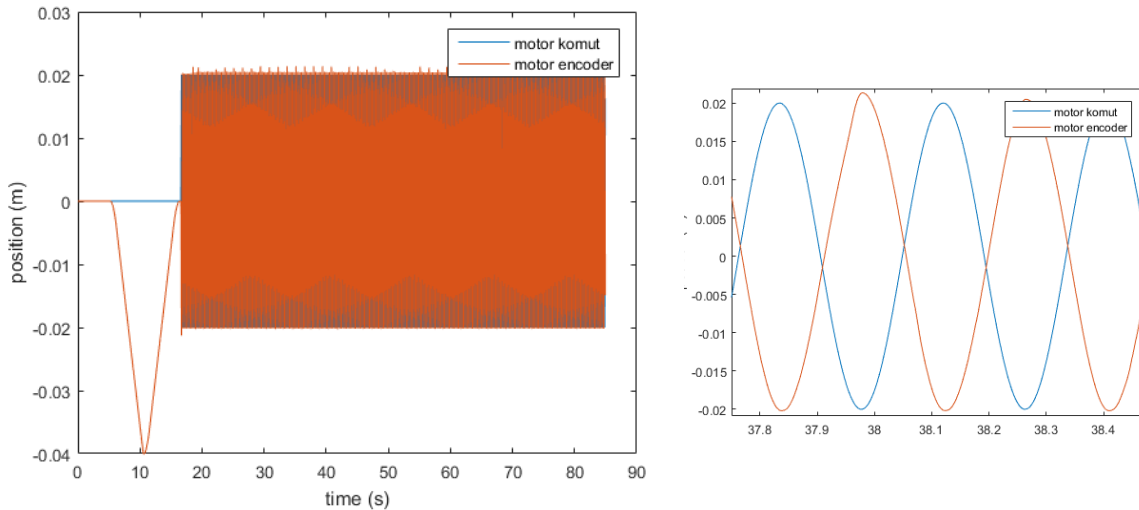


Şekil 16: Deneysel sonuçları elde etmek için kullanılan sistemin genel görünümü.

Bu alanda ilk olarak bacak üzerindeki seri elastik eyleyici kontrol eden motor sürücüsüne açık döngü komutlar verilerek sonucunda elde edilen davranışlar incelenmiştir.. Bu deneyler sırasında sürücüyü

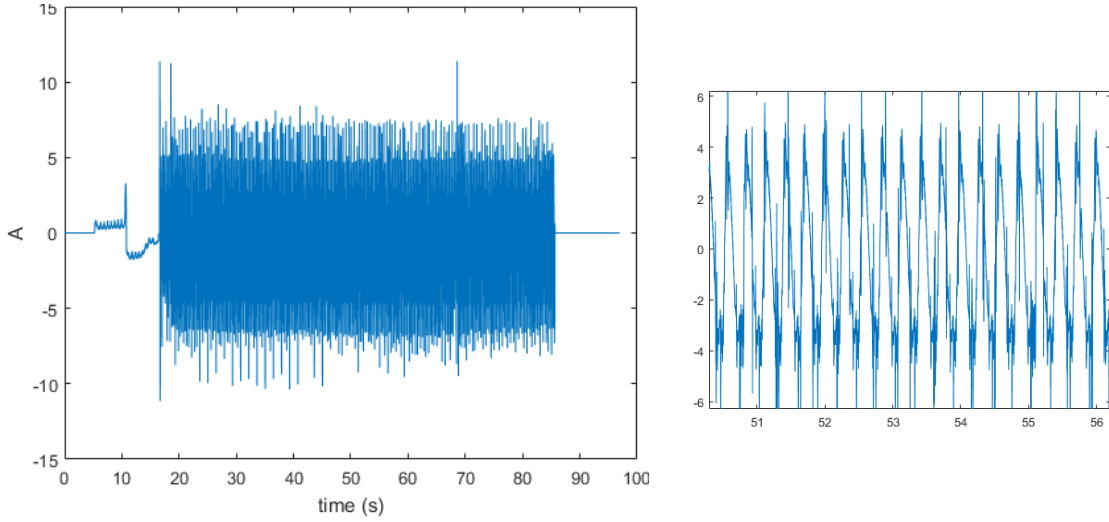
1. Eyleyicinin açılış anındaki konumunu bulan ve sonrasında eyleyiciyi mümkün olan hareket aralığının orta noktasına getiren homing hareketi yaptırılmıştır
2. Bacağın limit döngüye girerek zıplamasını sağlayacak sinusoidal konum komutları motor sürücüyü gönderilerek seri eyleyicinin bu komutları takip etmesi sağlanmıştır. Bu deney sonucunda, kontrolcüden bağımsız olarak robotun zıplama kabiliyeti işlevsel olarak incelenmiştir. Şekil 17, Şekil 18 ve Şekil 19'te yapılan deneylerden bir örnek için toplanan veriler gösterilmiştir.

Bu kısımda bu temel deneyler ile ilgili detayları raporlandırdık. İlk olarak Şekil 17'de motor sürücüyü iletilen pozisyon komutları ve bu komutlar altında seri eyleyicinin gerçek konumu görülebilir. İlk 20 saniye boyunca motor sürücüyü pozisyon komutu iletilmemiş, fakat sürücü homing moduna konfigüre edilerek eyleyicinin orta noktasının bulunması istenmiştir. Bu şekilden de görülebildiği üzere eyleyici mekanik limite ulaşana kadar bir yönde yavaş bir şekilde hareket etmiş daha sonra da yine yavaş bir şekilde tersi yönde hareket ederek eyleyicinin orta noktası bulunmuştur. Bu deney kapsamında eyleyicinin ilk pozisyonu orta nokta olarak ayarlandığı için homing sonrasında eyleyici başlangıç konumuna dönmüştür. Homing tamamlandıktan sonra, bacağın teorik doğal frekansından yola çıkılarak eyleyiciye 3 Hz'de 20 mm genlikli sinusoidal bir komut verilmiştir. Bu komut altında bacak dinamikleri limit döngüye girerek robota yaklaşık 60 s boyunca zıplama hareketi yaptırmıştır.

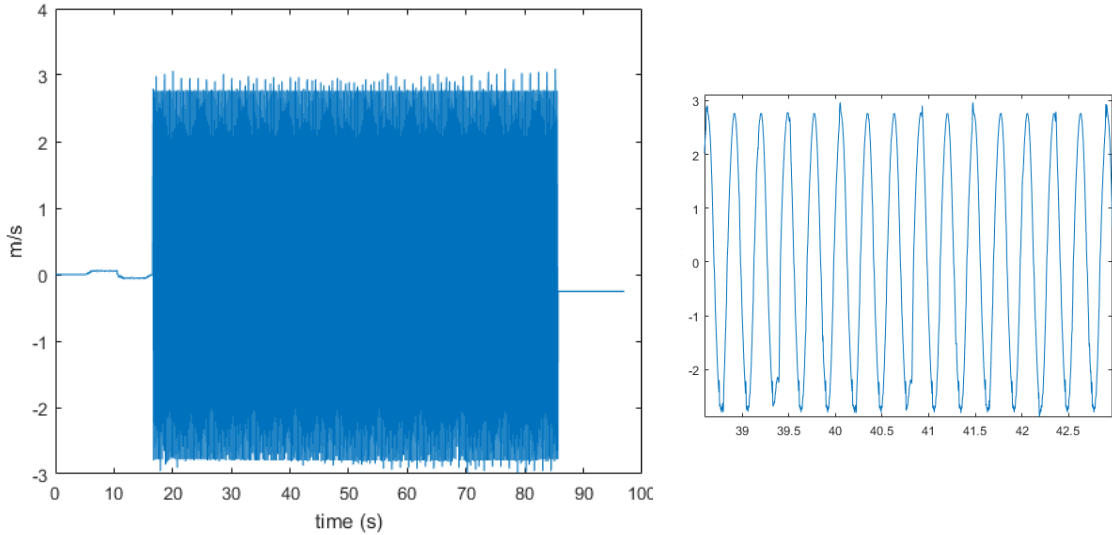


Şekil 17: Temel işlevsellik testi sırasında eyleyiciye iletilen pozisyon komutları ve gerçek eyleyici pozisyonu. Sağdaki grafik periyodik hareket sırasındaki detaylı verileri göstermektedir.

Şekil 18'de bu hareket sırasında motor tarafından çekilen akım gösterilmektedir. Buna göre motor tarafından çekilen akım yaklaşık 4A genlikte periyodik bir sinyaldir. Motorun maksimum anlık akımının 60A olduğu ve eyleyicinin strok limitinin +/- 50 mm olduğu göz önüne alınırsa robot ile dinamik bir şekilde zıplama kontrolü yapılması sırasında problem yaşanmayacağı bu deneyler sonucunda belirlenmiştir.



Şekil 18: Temel işlevsellik testi sırasında eyleyici motoru tarafından çekilen akım. Sağdaki grafik periyodik hareket sırasındaki detayları göstermektedir.

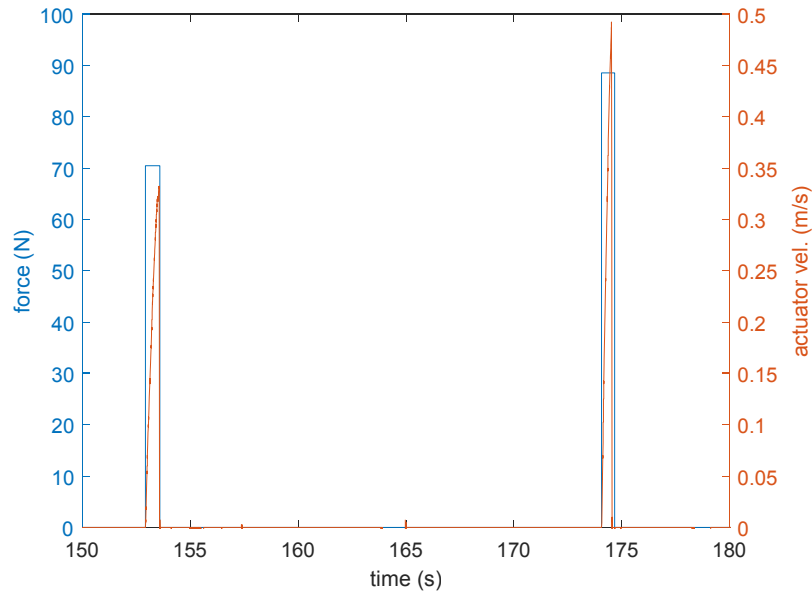


Şekil 19: Temel işlevsellik testi sırasında eyleyicinin hızı. Sağdaki grafik periyodik hareket sırasındaki detaylı davranışı göstermektedir.

Sistem işlevsellik testleri tamamlandıktan sonra, kontrollü zıplama algoritmalarının uygulanmasından önce sistemin dinamik olarak hassas bir şekilde modellenebilmesi amacıyla sistem tanılama testleri yapılmıştır. Bu kapsamda iki farklı test gerçekleştirilmiştir:

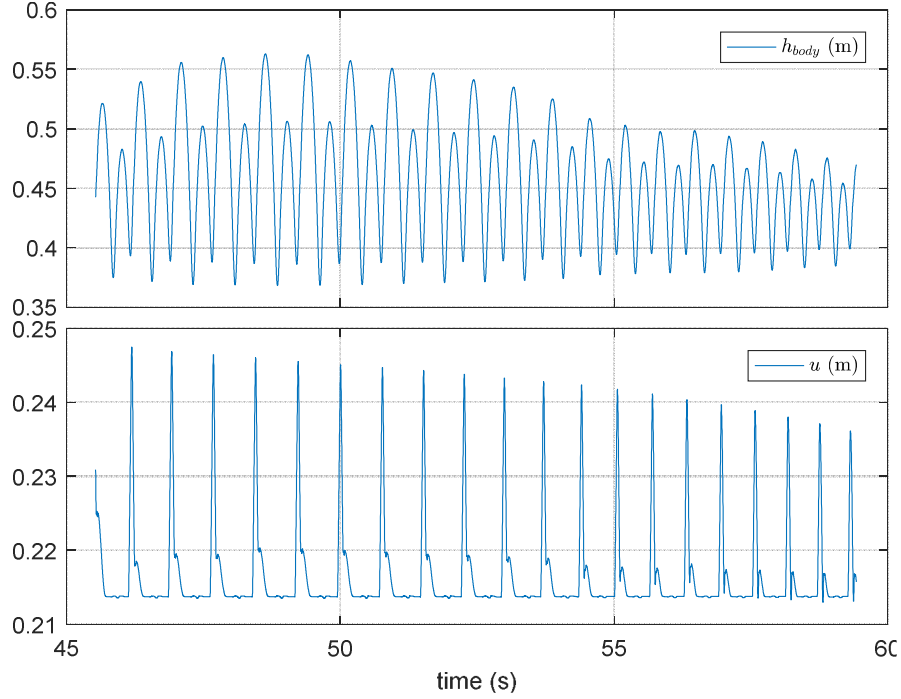
1. Eyleyici parametrelerinin bulunmasına yönelik karakterizasyon testleri
2. Bacak parametrelerinin bulunmasına yönelik zıplama testleri

Birinci deneyler kapsamında yerçekiminin ve elastik bacağın etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla robot yatak şeklinde konumlandırılmıştır. Eyleyiciye Şekil 20'deki gibi farklı tork girdileri birim basamak şeklinde uygulanarak, eyleyicinin ulaştığı kararlı hal hızı ve geçici hal hız cevabı kaydedilmiştir. Bu veriler ışığında, eyleyicinin kütlesi (lineer harekete yansıtılmış motorun dönel ataletinin ve eyleyicinin sadece lineer hareket eden kısımlarının kütlesinin toplamı), viskoz sürtünme katsayısı, yapışma ve Coulomb sürtünme kuvvetleri bulunmuştur.



Şekil 20: Eyleyici sistem tanılama örnek test girdileri ve çıktıları.

Eyleyici tanılamasından elde edilen sonuçlar eyleyici pozisyonunun hassas kontrolünü mümkün kılmıştır. Bu veriler ışığında, robotun çalışma uzayını yüksek oranda kapsayacak bir zıplama senaryosu planlanmış ve bu senaryo eyleyici kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu senaryo boyunca robot pozisyonu, hızı, eyleyici komutu ve eyleyici gerçek konumu Şekil 21'de gösterilmiştir. Bu deneyden toplanan veriler ışığında, robotun gövdesinin kütlesi, ayağının kütlesi, robot havadayken maruz kaldığı viskoz sürtünme katsayısı, bacak yay sabiti ve viskoz sürtünme katsayısı bulunmuştur.



Şekil 21 Robot sistem tanılama girdileri ve çıktıları.

Sonuç olarak deney platformu üzerinde robotun zıplamasına yönelik temel işlevsellik testleri sonucunda sistemin isterler dahilinde çalıştığı belirlenmiştir. Nitekim ilerleyen bölümlerde sunacağımız davranışsal testlerde sorun yaşanmamış olması da bu sonuçları desteklemektedir.

#### 4. Aktif Sönümlenme Kontrolünün Dikey Eksende Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi

Yukarıda detaylandırmış olduğumuz şekilde seri esnek eyleyicili YTS modelinin enerji kontrolü birçok avantajı bünyesinde barındırmaktadır. Öncelikle önerilen yöntemde eyleyici her zaman yay kuvveti ile aynı yönde bir hıza sahip olacağından, negatif mekanik iş yapmamakta, dolayısı ile de eyleyiciden elde edilen enerjiyi en verimli şekilde kullanabilmektedir. Buna ek olarak, sisteme verilen enerjinin eyleyici tarafından sağlanması tüm adım süresine yayıldığı için eyleyiciden sağlanması gereken anlık güç gereksinimi alternatif yöntemlere göre çok daha az olmaktadır. Son olarak da, bu yöntem kullanıldığında adım süresince kütle merkezinin hissettiği kuvvet farklı bir sönümlenme sabitine sahip olsa da YTS modeli ile tam olarak örtüşmektedir ki bu da YTS için geliştirilmiş olan tüm analitik yaklaşık çözümlerin ve kararlılık analizlerinin geçerli olmasını sağlamaktadır. Bunun sonucunda literatürde önerilmiş olan kontrolcüler, analiz yöntemleri ve kararlılık analizleri geçerli ve kullanılabilir hale gelmektedir. Bu avantajları rapor kapsamında hem benzetim, hem de deneysel ortamda göstereceğiz.



#### 4.1 Alternatif Kontrol Yöntemleri

Önermiş olduğumuz aktif sönümlenme kontrolü yönteminin avantajları ve performansını değerlendirebilmek için literatürde YTS modelinin kontrolü için gerçekçi olmasa da kabul görmüş olan bacak yay sabiti üzerinden yapılan kontrol yöntemini karşılaştırma amaçlı olarak kullanacağız. Bu bölümde bu yöntemi kısaca detaylandıracağız.

Yukarıdaki bölümlerde anlatıldığı gibi YTS modelinin enerji kontrolü sistemin bir adımdan diğerine sahip olduğu mekanik enerjinin değiştirilebilmesini gerektirir. Bunun analitik olarak ilk akla gelen yolu, yerle temas sırasında, bacak bir miktar sıkışmış halde iken yay sabitinin değiştirilmesi, bunun sonucu olarak da yayın aynı uzunluğuna karşılık gelen potansiyel enerjinin artırılması olmaktadır. Bu yöntemin önemli bir özelliği YTS modelinin, parçalı olarak da olsa adım sırasında geçerliliğini koruması ve bunun sonucunda analitik yöntemleri kullanılabilir kılmasıdır.

Adım içinde en az yay sabiti değişikliği ile aynı enerjiyi verebilmek için, bu değişikliğin yapılması uygun olan nokta yayın en çok sıkışmış olduğu “en alt” nokta olmaktadır. Bacağın radyal sıkışma hızı takip edilerek, yayın sıkışma fazından genleşme fazına geçildiği anda yay sabiti değiştirilirse

$$\Delta E = \frac{1}{2}(k_d - k_c)(r_b - r_0)^2$$

ifadesi sisteme verilen enerjiyi vermektedir. Burada  $k_c$  ve  $k_d$  sıkışma ve genleşme sırasında kullanılacak yay sabitleri ve  $r_b$  de yayın en sıkışık olduğu andaki uzunluğunu ifade etmektedir. Sıkışma sırasındaki yay sabitinin verildiği varsayılırsa, bir adımdan diğerine sistemde yapılması istenen enerji değişikliği komutu kullanılarak genleşme yay sabiti bulunabilir ve bu şekilde modelin enerji kontrolü sağlanabilir.

Bu noktada doğal olarak akla gelen ilk soru, yay sabiti değişikliğinin fiziksel olarak nasıl gerçekleştirileceğidir. Bu doğrultuda da, hem fiziksel robotlardaki yapıya karşılık gelmesi, hem de önerdiğimiz yöntem ile karşılaştırılabilir olması açısından seri esnek eyleyici yapısını kullanacağız. Bu kapsamda sönümlenme katsayısını değiştirmek için kullandığımız yöntem benzeri bir şekilde eyleyici konumu  $u(t)$  yay sabitini değiştirmek için de kullanılabilir. Bu amacı gerçekleştirmek için

$$u_k(t) = \frac{k - k^*}{k}(y(t) - y_0)$$

şeklinde bir eyleyici konum komutu kullanılabilir ki bu sistemin kütle merkezinin hissettiği kuvvetin sanki  $k^*$  yay sabitine sahip bir esneklikten geliyormuş gibi şekillendirilmesini sağlayacaktır.

Bu kontrolcü makul görünmesine rağmen önemli problemlerden bir tanesi, yayın en fazla sıkıştığı anda yay sabitinin değişmesi gerektiğinden, eyleyicinin konum komutunda sürekli keskin bir değişimin olması, ve motorun bunu kesin olarak takip edebilmesi için de sonsuz anlık güç gerektirecek olmasıdır. Fiziksel bir sistemde bu kısa bir süre de olsa motorun çok yüksek güç harcamasına ve istenilen profili hatalı bir şekilde takip etmesine sebep olacaktır. Bu da bu kontrol yönteminin enerji verimliliği açısından kötü ve kontrol hassasiyetini düşüren bir yapıda olmasına sebep olacaktır. Bu gözlemleri benzetim ve deneysel sonuçlar kısmında da göstereceğiz.

#### 4.2 Benzetim Ortamı ve Modeller

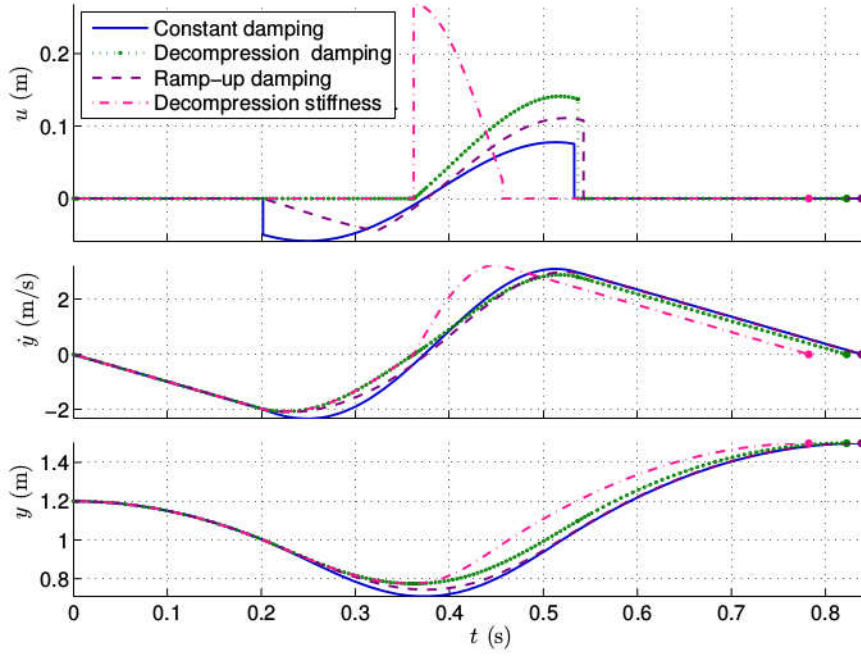
Yukarıda anlatılan aktif sönümlenme kontrolü yönteminin hassasiyet ve performans değerlendirmesi amacı ile dikey robot platformumuzun dinamiklerini mümkün olduğunca hassas bir şekilde ifade edebilen bir benzetim modelini Matlab ortamında gerçekleştirdik. Bu model, noktasal bir kütleyle bağlı ve sıfırdan farklı kütle ve atalet momenti olan bir motor yapısına seri olarak bağlı olan bir sistemin dinamiklerini içermektedir. Bu kapsamda fiziksel robot platformumuzun parametreleri sistem çıkarımı yöntemleri ile belirlenmiş ve Tablo 1'de verilmiştir.

Parametre	Açıklama	Belirlenen değer
$m$	Gövde kütlesi	4.81 kg
$m_f$	Bacak kütlesi	0.7 kg
$k_p$	Bacak yay sabiti	6200 N/m
$d_p$	Bacak sönümlenme katsayısı	3.25 N s/m

Tablo 1. Deneysel platform üzerinde belirlenen ve benzetim sonuçlarını elde etmek için kullanılan sistem parametreleri

#### 4.3 Karşılaştırmalı Benzetim Sonuçları

Projenin ilk dönemi içerisinde önermiş olduğumuz kontrol algoritmasının literatürde varolan diğer yöntemler ile karşılaştırmalı bir analizini gerçekleştirdik. Bu kapsamda yapılmış olan çalışmalarda en sıklıkla kullanılan yöntem bacağın yay sabitinin sanal olarak değiştirilmesi olarak ortaya çıkmaktadır. Buna ek olarak, önerdiğimiz yöntemin kullanımında yapısal bazı alternatifler de bulunmaktadır. Bu seçeneklerin tamamının bir adım içerisindeki kullanımları sırasında oluşan eyleyici konum profilleri ve sistem yörüngeleri Şekil 22'de gösterilmektedir.



Şekil 22: Alternatif kontrol yöntemleri kullanılarak seri elastik eyleyici ile atılan bir adımın eyleyici girdileri ve yörüngeleri.

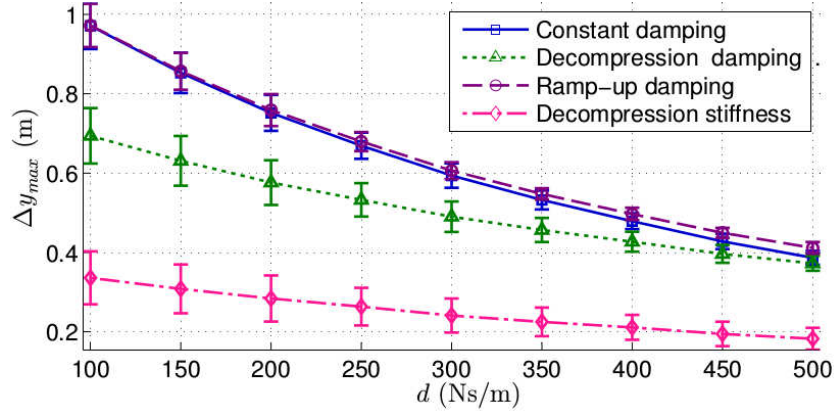
Bu kapsamda değerlendirdiğimiz denetim algoritmaları şu şekilde listelenebilir:

1. Tüm temas fazı boyunca sabit bir sanal sönümlenme katsayısı kullanımı (constant damping)
2. Temas fazının ikinci yarısında normalden farklı bir sönümlenme katsayısı kullanımı (decompression damping)
3. Temas başlangıcında gereken sönümlenme katsayısına doğru yavaş yükselme (ramp-up damping)
4. Temas fazının ortasında yay sabitinde sanal değişiklik (decompression stiffness)

Bu alternatiflerden ilk üçü önermiş olduğumuz yöntem ile ilgili, dördüncüsü ise literatürde kullanılan kontrol yöntemine karşılık gelmektedir. İlk üç yöntem arasındaki temel fark, sanal olarak sönümlenme katsayısı değiştirildiğinde, eyleyicinin yapması gereken harekete yansıyan ani değişiklikler ve bunların yarattığı yüksek güç gereksinimleridir. Bu problemi çözmek için verimliliği azaltsa da temas ortasında ayarlamaya başlamak, veya bir başlangıç stratejisi kullanmak gerekmektedir. Bu farklar Şekil 22'ün en üst figüründe gösterilmektedir.

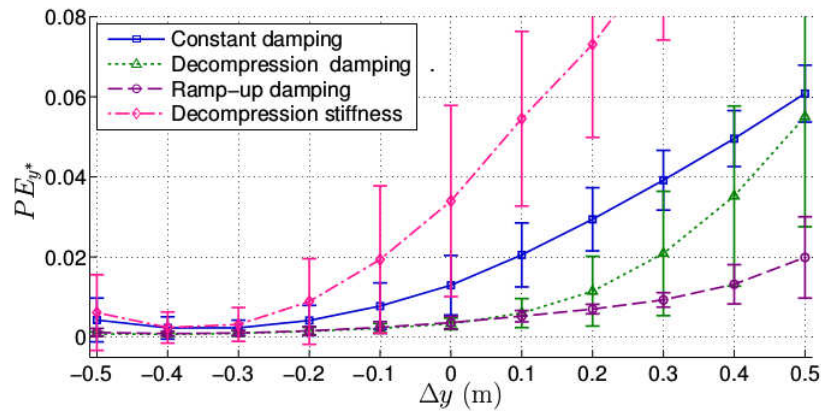
Bu kapsamda ilk olarak fiziksel sönümlenme katsayısına bağlı olarak değişik yöntemler ile eyleyici kısıtları altında verilebilen maksimum enerji miktarını karşılaştırdık. Bu sonuçlar Şekil

23'de verilmiştir. Burada ortaya çıkan sonuç, aynı eyleyici ile önerdiğimiz yöntemin daha fazla enerji girdisi sağlayabildiği olmuştur ki bu enerji verimliliğinin önemli belirteçlerinden biridir. Önerdiğimiz yöntemler arasında da en iyi olarak temas başında yumuşak bir geçiş ile istenen sönümlenme katsayısına ulaşan yöntem görülmüştür.



Şekil 23: 0.2m eyleyici hareket kısıt altında değişik yöntemler ile verilebilen maksimum enerji miktarı. Yüksek değerler daha iyi performansı ifade etmektedir.

Bu sonuçları takiben, tüm kontrolcülerin tek adım içinde gerçekleştirebildiği kontrol hassasiyetini değerlendirmek için, istenilen yükseklik değişikliğini bir fonksiyonu olarak tek adımda ortaya çıkan takip hatasını değerlendirdik. Bu sonuçlar da Şekil 24'da verilmiştir. Burada PE yükseklik hedefine göre yüzde takip hatasını göstermektedir. Önerilen yöntemlerden en hassas takip gerçekleştirebilen "ramp-up" olarak adlandırdığımız, temas fazının başından sonra yavaşça istenilen komut profilini yakalayan ve devam eden yöntem olmuştur.



Şekil 24: Tüm kontrol yöntemlerinin tek bir adımda istenilen yükseklik değişikliğine göre yüzde kontrol hataları. Düşük değerler daha iyi performansı ifade etmektedir.

Bu çalışmalarımız sonucunda vardığımız noktada, tasarladığımız deneysel platformda kullanılmak üzere temas fazının başlangıcından itibaren istenilen sanal sönümlenme değerini yakalayarak devam eden kontrolcünün en uygunu olacağı ortaya çıkmıştır. Projede öngördüğümüz deneyler aracılığı ile yukarıda sunmuş olduğumuz sonuçları deneysel olarak da doğrulayarak, proje teklifimizde öngörmüş olduğumuz sonuçları yayına dönüştürebileceğimize inanıyoruz. Özellikle de bu yöntem iki boyuta genellendiğinde, ki bu doğrultudaki çalışmalarımıza başlamış bulunmaktayız, bacaklı koşma davranışlarının enerji kontrolü açısından önemli bir ilerleme sağlayan özgün bir yöntem önermiş olacağız.

#### **4.4 Deneysel Platform ve Sistemik Deney Süreçleri**

Deneysel platform ile sistemik deneylere geçirmeden önce elektromekanik kontrol sisteminde bazı geliştirmeler/değişiklikler yapılmıştır. Bu çalışmalar iki temel bileşen etrafında şekillenmiştir:

Temel fonksiyon testleri kapsamında Maxon EPOS motor sürücüsü pozisyon kontrol modunda kullanılmıştır. Sürücünün bu modda detaylı testleri yapıldığında yeterli performansın alınamadığı, bu bağlamda pozisyon kontrolünün ihtiyaç duyulana göre çok daha yavaş olduğu görülmüştür. Bu sorunlar gözlenerek, Maxon EPOS sürücünün tork kontrolü modunda kullanılmasına, pozisyon kontrolünün ise Bölüm 3.5'te anlatılan kontrol ve veri toplama bilgisayarı üzerinde gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.

Gövde pozisyonunu ölçen enkoderin dijital quantalama gürültüsü nedeniyle, enkoderden toplanan veriden sadece türevlenerek elde edilen hızın sistem performansını etkileyecek şekilde gürültülü olduğu tespit edilmiştir. Yüksek frekanslı bu gürültüleri minimize etmek için bir filtre kullanılması gerektiğine karar verilmiştir.

##### **4.4.1 Pozisyon kontrolü**

Hassas bir pozisyon kontrolü için kontrol algoritmasının dört temel gereksinimi karşılaması gerektiğine kanaat getirilmiştir : 1) Yüksek takip performansı (Tracking) 2) Sıfır kararlı hal hatası (Steady-state) 3) Yay kuvveti ve eyleyici mekanizmasının içerdiği yüksek sürtünme gibi bozucu etkilerin minimize edilmesi (Disturbance rejection) 4) Model parametrelerinin değişimi ve tam olarak bilinmemesinden kaynaklı olarak diğer üç performans metriğinin düşmemesi (Robustness).

Bu dört gereksinimi sağlamak amacıyla kontrol sisteminde öncelikle geleneksel kontrol alternatifleri değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, klasik PID, kaskad P/PI, yalnızca PD ve durum geri beslemeli kontrol alternatifleri denenmiştir. Ancak bu alternatiflerin hiç biri tüm gereksinimleri sağlayamamıştır. PID kontrolcü içerdiği iki adet sıfır nedeniyle kapalı çevrim

kutuplarının istenen şekilde konumlandırılmasına rağmen takip performansını sağlayamamaktadır. Yalnızca PD kontrol takip performansını sağlayabilse de kararlı hal hatası ve bozucu etki/modelleme hatası gibi ihtiyaçları sağlayamamaktadır. Durum geri beslemeli kontrol ise bozucu etkilerin minimize edilmesinde yeterli olamamaktadır. Tüm bunlar göz önüne alınarak yaklaşık 25 yıl önce ortaya atılan iki serbestlik dereceli bir kontrol yöntemi olan bozucu gözleyici kontrolcüsünün uygulanmasına karar verilmiştir [Umeno and Hori, 1991]. Bu yöntem, gürbüz bir kontrol yöntemidir ve seçilen nominal bir kontrolcünün üzerine eklenerek sistem gürbüzlüğünü ve bozucu etkinin reddedilmesini garanti eder. Nominal kontrolcü olarak sıklıkla PD ya da PID gibi klasik kontrolcüler kullanılmaktadır. Dolayısıyla, bozucu gözleyici yöntemi klasik yöntemlerin güvenilirliğine sahiptir. ayrıca yapısı gereği kontrol performansına etki eden bozucu etki/modelleme hatası gibi fenomenleri yok ettiği için ileri mekatronik kontrol uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir.

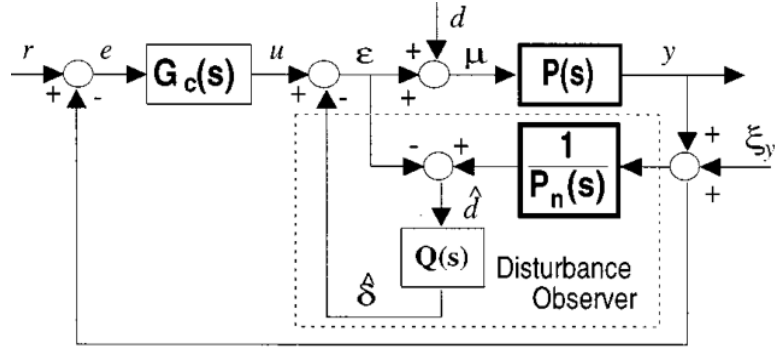
İki serbestlik dereceli kontrolcü kuramı Youla tarafından ortaya atılmıştır. Aşağıdaki denklemlerde verildiği gibi yalnızca hatayı kullanan kontrolcüler tek serbestlik derecesine sahipken, referans sinyal ve ölçümü belli bir yapıya mahkum etmeden serbestçe kullanan kontrolcülere iki serbestlik dereceli kontrolcüler denmektedir. Klasik kontrolcü yapısı

$$u(s) = C(s)(r(s) - y(s))$$

iken, iki serbestlik dereceli kontrol yapısı

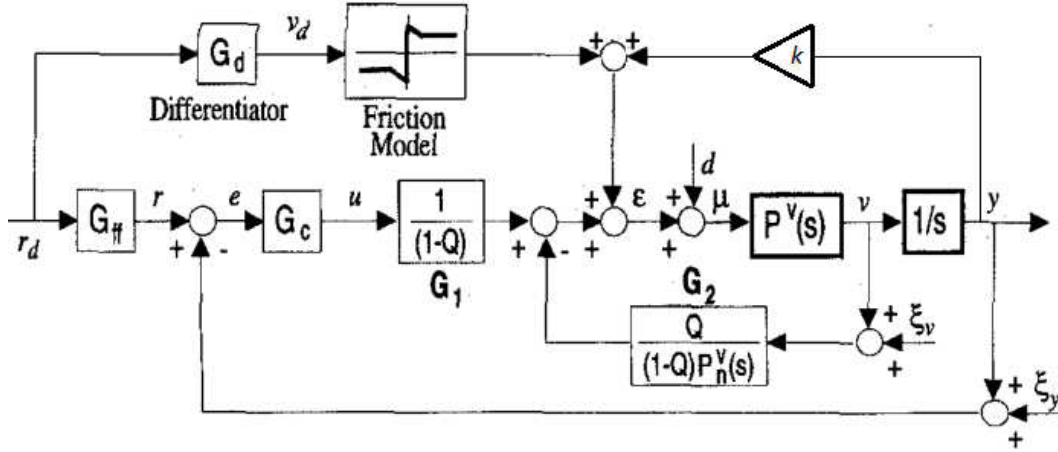
$$u(s) = C_r(s)r(s) - C_y(s)y(s)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada,  $u(s)$  kontrol sinyalini,  $r(s)$  referans sinyali,  $y(s)$  ölçümü,  $C(s)$  klasik tek serbestlik dereceli geri besleme kontrolcüsü transfer fonksiyonunu,  $C_r(s)$  ve  $C_y(s)$  ise modern iki serbestlik dereceli geri besleme kontrolcüsü transfer fonksiyonlarını temsil eder. Sahip olduğu ekstra serbestlik derecesi sistem performansının farklı yönlerden tüne edilmesine olanak tanımaktadır. Örneğin bir serbestlik derecesi ile takip performansı ve stabilite ayarlanırken diğer serbestlik derecesi ile bozucu etki ve/veya gürbüzlük tüne edilebilir. Youla'nın non-minimum faz bir sistemi stabilize eden iki serbestlik dereceli kontrolcü transfer matrisleri [Youla et al., 1976] dikkate alınarak iki serbestlik dereceli kontrol sistemi Şekil 25'te gösterilmiştir. Burada  $G_c(s)$  nominal kontrolcüyü,  $P_n(s)$  nominal sistem transfer fonksiyonunu,  $P(s)$  gerçek sistemin transfer fonksiyonunu  $Q(s)$  ise ikinci serbestlik derecesine ait olan alçak geçiren filtreyi temsil etmektedir.



Şekil 25: İki serbestlik dereceli genel kontrolcü yapısı [Youla et al., 1976]

Yay kuvvetinin ve eyleyici sürtünmesinin ileri yol kontrol sinyali olarak eklenmesiyle sistemdeki nihai kontrolcü yapısı Şekil 26'daki gibi elde edilir.



Şekil 26: Seri esnek eyleyici kontrolü için kullanılan kontrolcünün son halinin geribesleme yapısı.

Nominal kontrolcü olan  $G_c$ 'nin tasarımı kadar  $Q$  filtresinin seçimi de önemlidir. Alçak geçirgen  $Q$  filtresi ve yüksek geçirgen karaktere sahip komplement  $1-Q$  sisteminin hassasiyet fonksiyonu üzerinden model belirsizlik ve bozucu etkilerinin reddi gibi performans metrikleri ayarlanmaktadır [Lee and Tomizuka, 1996].  $Q$  filtresinin model belirsizlik ve bozucu bastırma performanslarına etkisi ters bağlantılı olduğu için bu iki performansın birden ihtiyaç duyulduğu durumlarda  $Q$  filtresi bir H-inf problemi olarak modellenerek optimum şekilde seçilir [Tefaye et al., 2000]. Bu bağlamda,  $Q$  filtresinin seçimine yönelik çalışmalar inceledikten sonra  $Q$  filtresi üçüncü dereceden Butterworth filtresi olarak seçilmiştir. Genel geçer kurallar izlenerek  $Q$  filtresinin zaman sabiti de örnekleme zamanının 12 katı olarak seçilmiştir.

#### 4.4.2 Hız Kestirimi ve Filtrelenmesi

Gövde pozisyonunu ölçen enkoder verisinin türevlenmesi sonucu elde edilen hız verisinin filtrelenmesi için öncelikli olarak farklı mertebeden FIR ve IIR filtreler denenmiştir. Ancak hiçbir yöntem ile istenilen performans elde edilememiştir. Klasik yöntemler ile istenilen gürültü bastırımı elde edilse de yüksek faz gecikmesinden kurtulunamamıştır. Bu sorunlardan yola çıkılarak, beyaz gürültülü jerk modeline sahip üçüncü dereceden hedef modelini baz alan bir Kalman filtresine karar verilmiştir. Bu hedefin sürekli zaman modeli aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} w(t)$$

Bu sistemin ayrık zaman modeli şu şekilde edilir:

$$x_{k+1} = F_3 x_k + w_k, \quad F_3 = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$Q = \text{cov}(w_k) = S_w Q_3, \quad Q_3 = \begin{bmatrix} T^5/20 & T^4/8 & T^3/6 \\ T^4/8 & T^3/3 & T^2/2 \\ T^3/6 & T^2/2 & T \end{bmatrix}$$

Burada  $F_3$  durum geçiş matrisini,  $Q$  ise proses kovaryans matrisini temsil etmektedir. Bu model temelinde Kalman filtre uygulanarak hız kestirimi yüksek performansla elde edilebilir.

#### 4.5 Karşılaştırmalı Deney Sonuçları

Benzetim ortamında yapılan karşılaştırmaların deney platformu üzerinde tekrarlanmasından önce, zıplama kontrolünün şablon tabanlı tüm yöntemler için doğru çalıştığı test edilmiştir. Bu amaçla tüm kontrol yöntemleri denenmiş ve bir adım için her bir yönteme ilişkin eyleyici girdileri ve robot hareketleri Şekil 27-Şekil 31 arasında gösterilmiştir. Burada değişik kontrolcüler için kullanılan kısaltmalar Tablo 2'de gösterilmiştir.

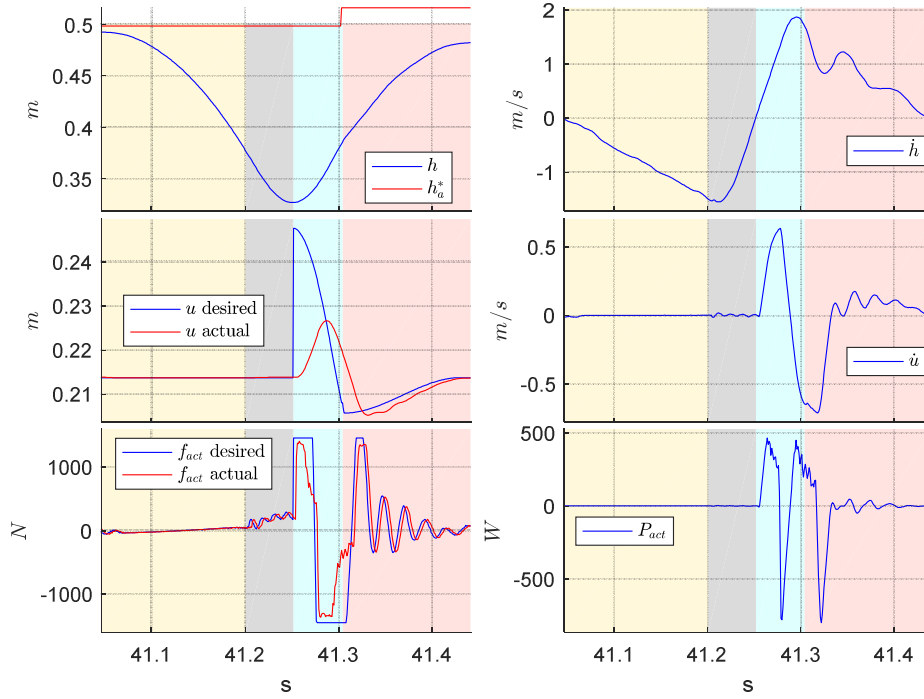
Kısaltma	Açıklama
DD	Decompression damping, yalnızca genişleme sırasında değişken sönümlenme
DS	Decompression stiffness, yalnızca genişleme sırasında değişken yay sertliği
RUVD	Ramp-up variable damping, değişken sönümlenmeye rampa fonksiyonu ile ulaşan kontrolcü



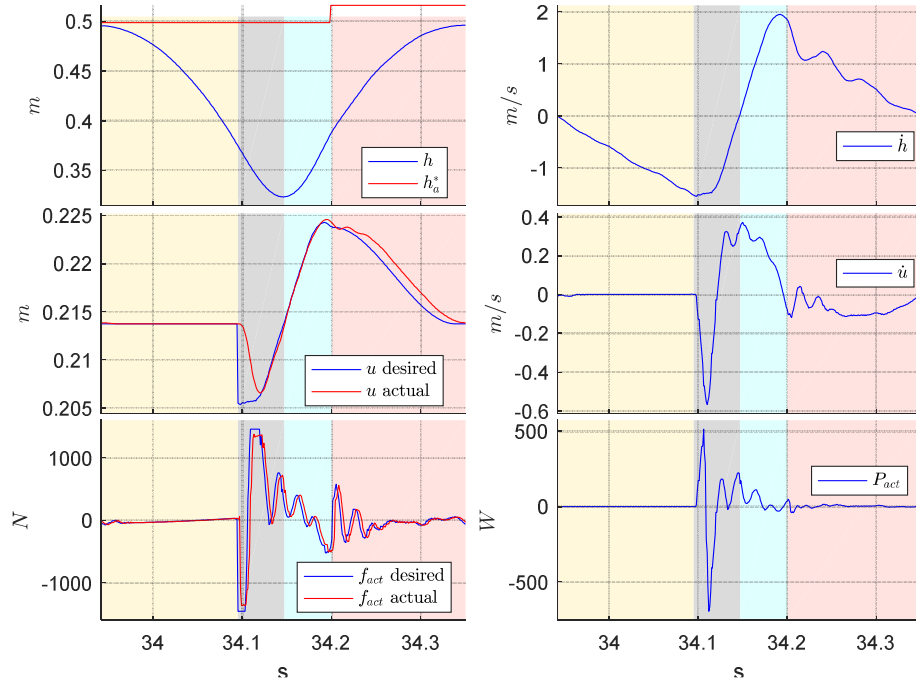
BVD	Biased variable damping, ofset ile dengelenen değişken sönümleme
CD	Constant damping, tüm adımda sabit fakat fizikselde değişik sönümleme

Tablo 2. Karşılaştırmalı deneyler ile ilgili şekillerde kullanılan, değişik kontrolcü alternatifleri için kısaltmalar.

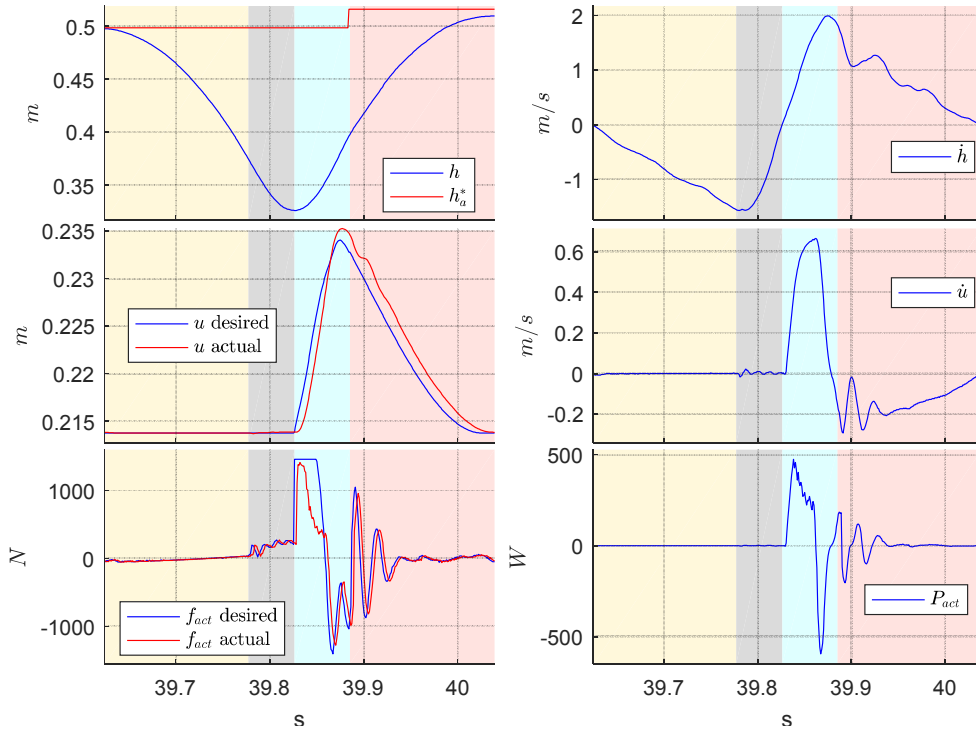
Bu şekiller incelendiğinde, istenen eyleyici pozisyonları ve eyleyici kontrolü altında oluşan robot pozisyonlarının Şekil 22 ile benzerlik gösterdiği en önemli farkın ise deneysel platform üzerindeki eyleyici dinamiklerinin benzetim ortamında modellenenden daha zorlayıcı olmasının sonucu olarak ortaya çıkan yüksek güç harcaması olduğu söylenebilir. Platformun daha yüksek güç gerektirmesinin sonucu olarak özellikle DS ve CD gibi eyleyici pozisyon komutunda süreksizlikler içeren yöntemlerin tek adım kontrol hataları benzetimlere göre artmıştır.



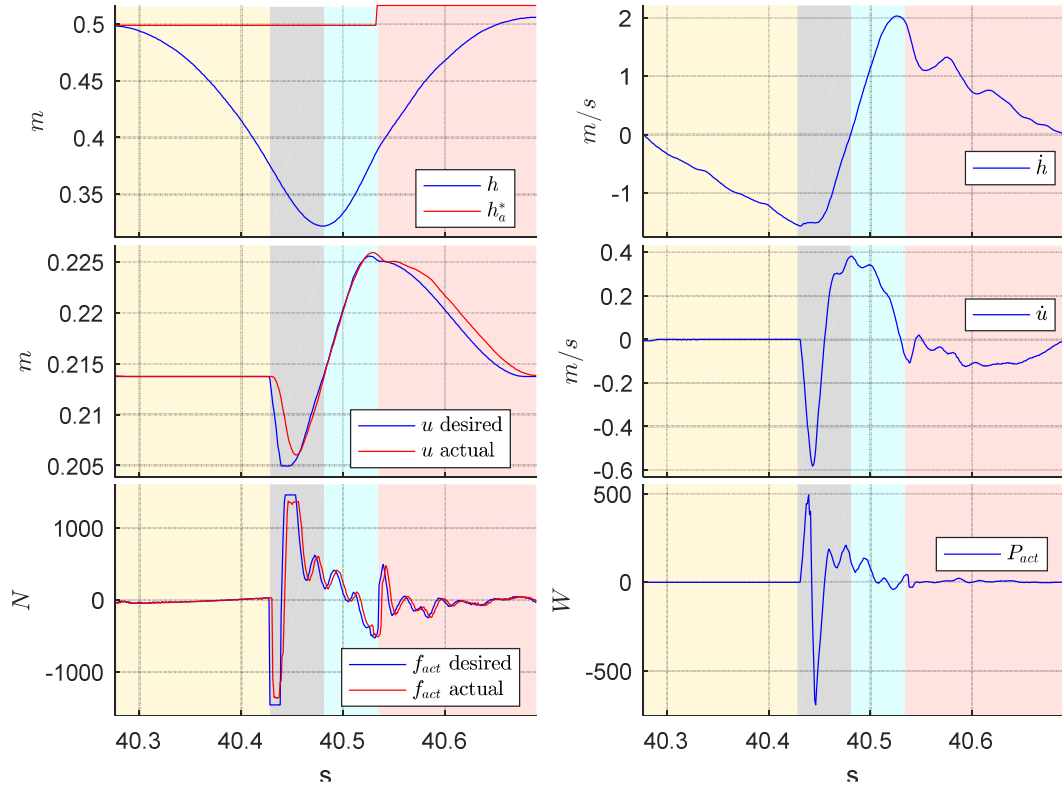
Şekil 27: DS yöntemi ile atılan bir adımda deneysel platformun hareket verileri ve eyleyici girdileri.



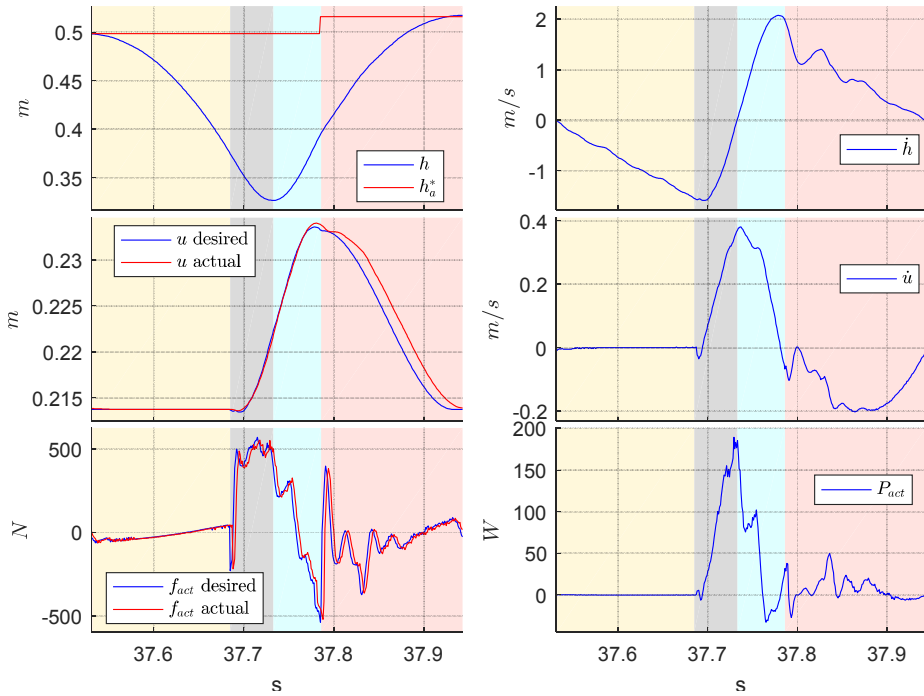
Şekil 28: CD yöntemi ile atılan bir adımda deneysel platformun hareket verileri ve eyleyici girdileri.



Şekil 29: DVD yöntemi ile atılan bir adımda deneysel platformun hareket verileri ve eyleyici girdileri.



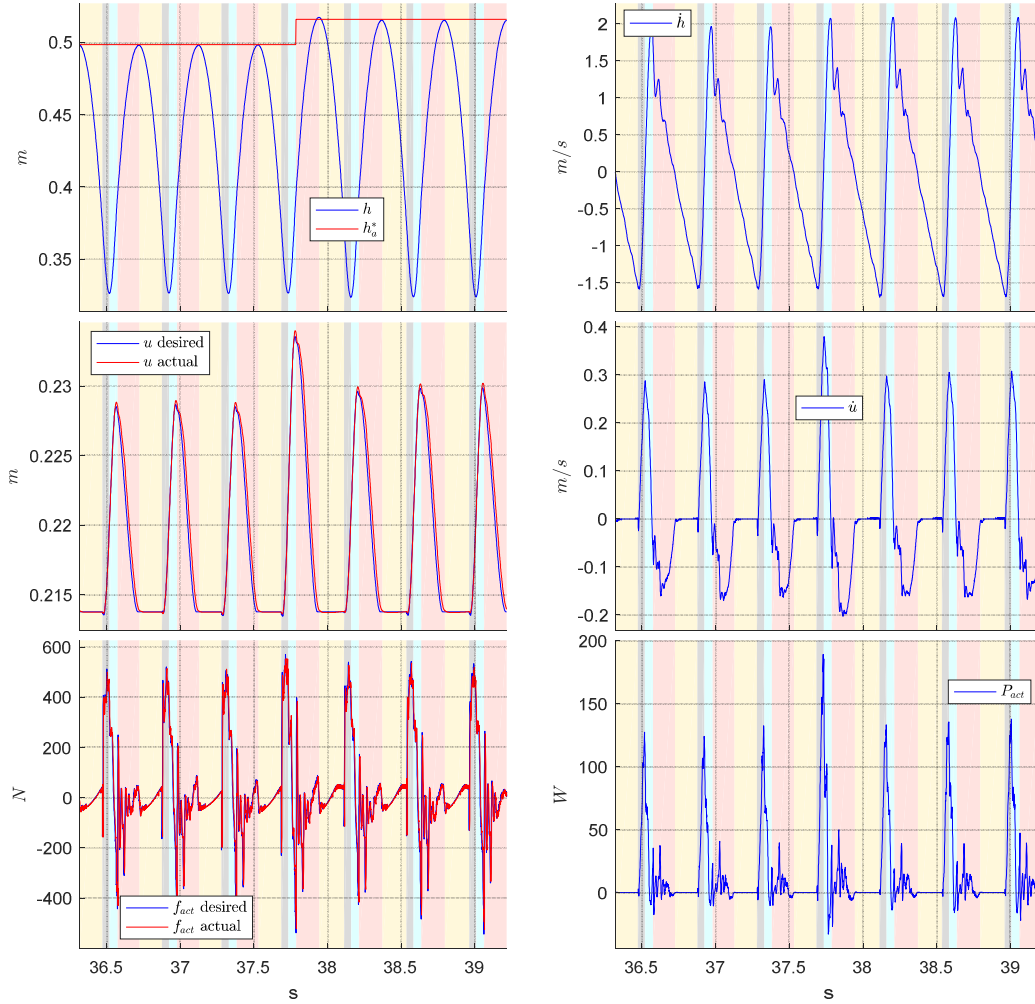
Şekil 30: RUV yöntemi ile atılan bir adımda deneysel platformun hareket verileri ve eyleyici girdileri.



Şekil 31: BVD yöntemi ile atılan bir adımda deneysel platformun hareket verileri ve eyleyici girdileri.

Tek adımlık bu deneyler ile benzetim sonuçlarının örtüştüğü gözlenerek, sistematik deneylere geçilmiştir.

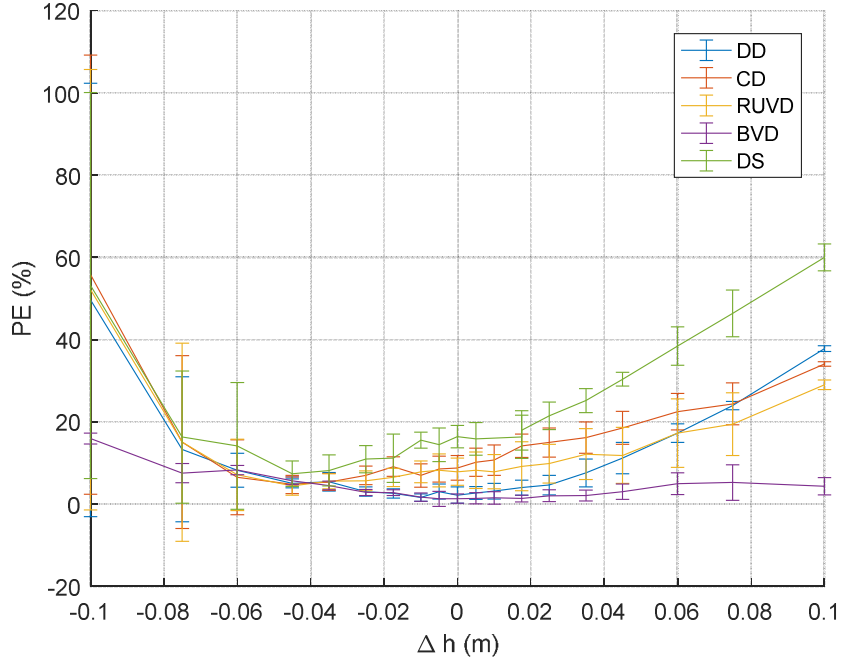
Benzetim ortamında yapılan karşılaştırmalar göz önüne alınarak, deneysel platform ile yapılacak deneyler kurgulanmıştır. Buna göre, farklı başlangıç koşullarından başlatılarak platformun farklı yüksekliklere zıplayacağı bir deney senaryosu Bölüm 4'te anlatılan tüm kontrol yöntemleri için uygulanmıştır. Bu deneysel sürecin bir örneği



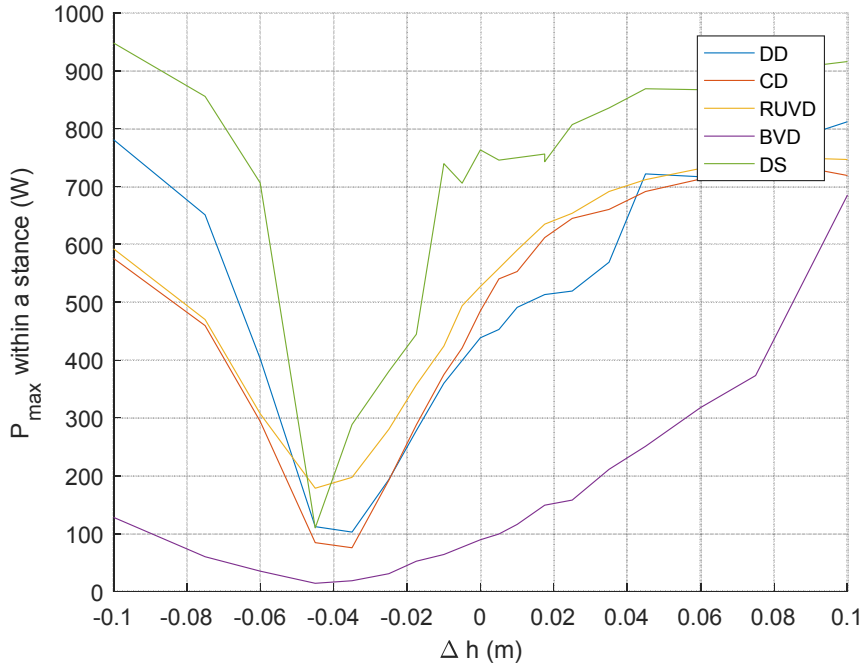
Şekil 32: Belirli bir başlangıç yüksekliğine ulaşıldıktan sonra verilen yeni yükseklik komutu içeren bir örnek deneyden veriler.

Kontrol yöntemleri geçici hal ve kalıcı hal performansları anlamında iki farklı kategoride kıyaslanmıştır. Öncelikle, tek adımdaki kontrol hatası, tek adımdaki tepe ve ortalama güç harcamaları göz önüne alınarak kontrol yöntemlerinin geçici cevap performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir (bkz. Şekil 33-Şekil 35). Buna göre, benzetim sonuçlarıyla paralel şekilde en az tepe güç ihtiyacına sahip kontrol yönteminin BVD, DD ve RUVD olduğu

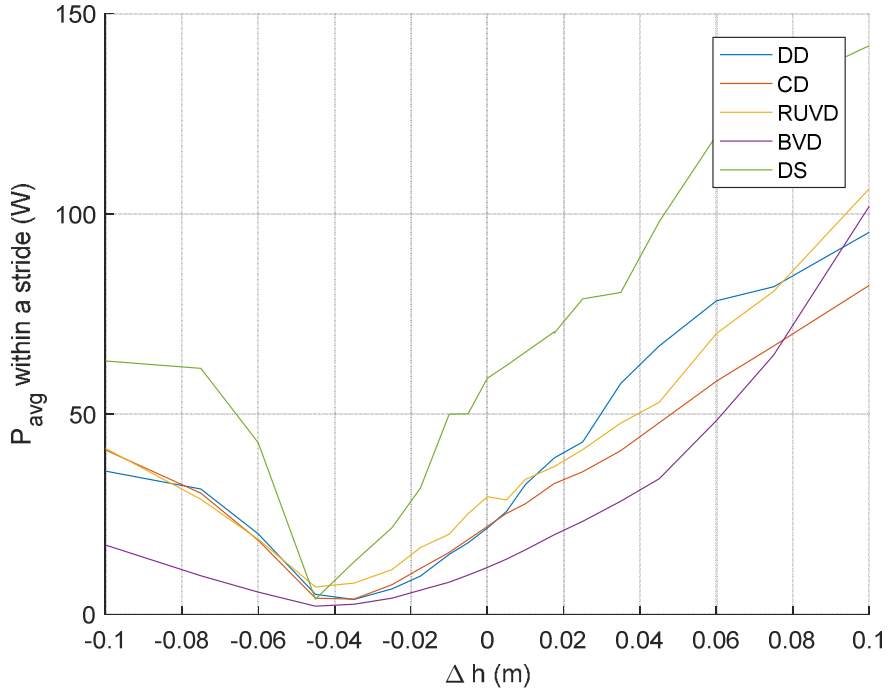
görülmüştür. Yine benzetim sonuçlarıyla uyumlu olacak şekilde, daha az tepe güç ihtiyacına sahip yöntemlerin daha düşük tek adım kontrol hatasına sahip olduklarını gözleyebiliriz.



Şekil 33: İstenilen yükseklik değişimine göre tek adımda elde edilen yüzde takip hataları. Standart sapmalar değişik başlangıç yüksekliklerine göre alınmıştır.

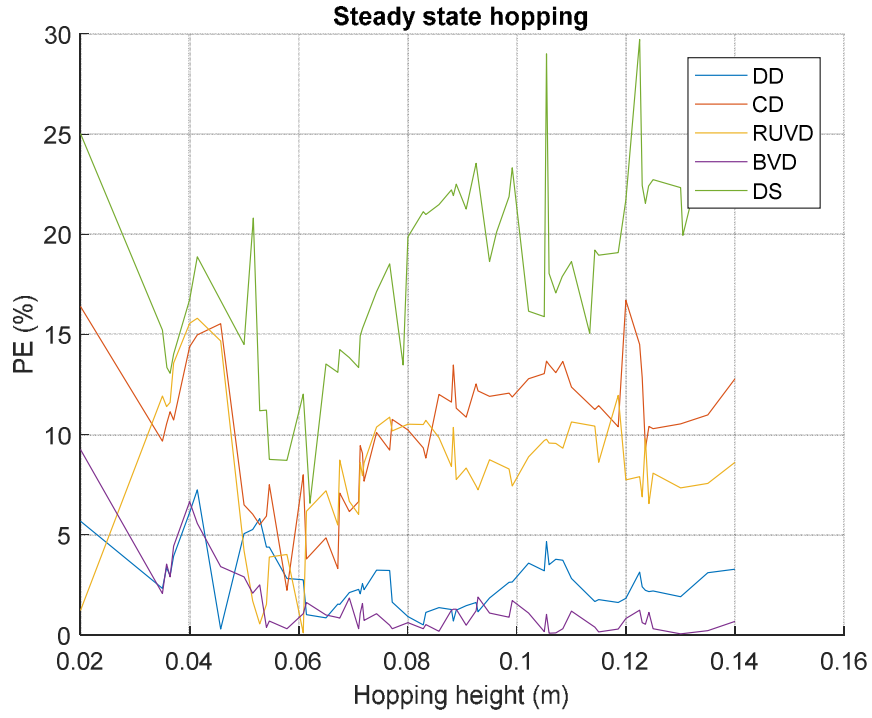


Şekil 34: İstenilen yükseklik değişikliğine göre adım sırasında kullanılan güç profilinin mutlak değer olarak maksimum değerleri.

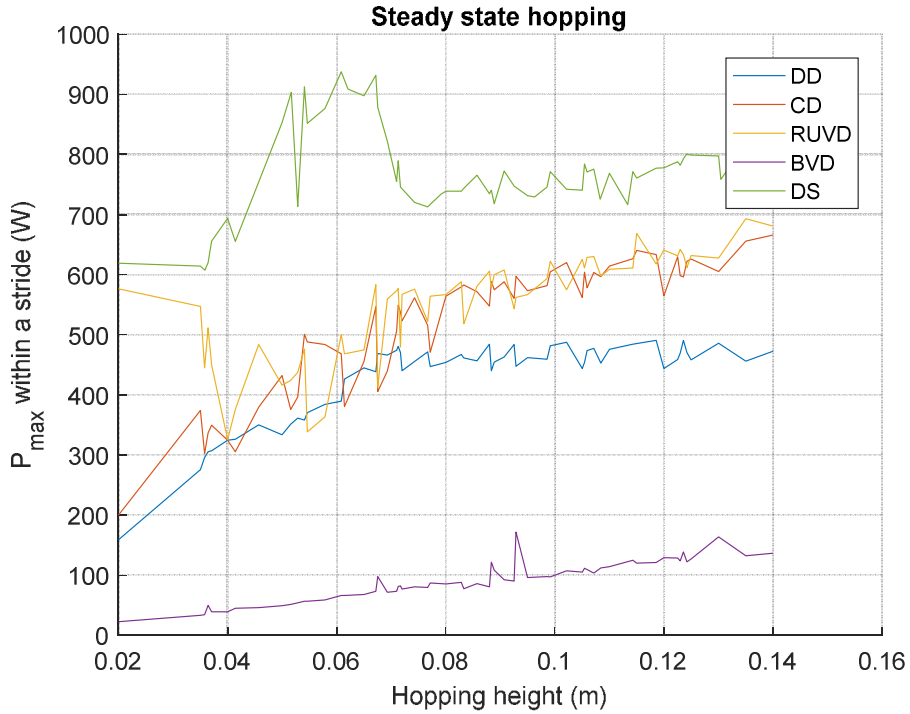


Şekil 35: İstenilen yükseklik değişikliğine göre adım sırasında kullanılan güç profilinin mutlak değer olarak ortalama değeri.

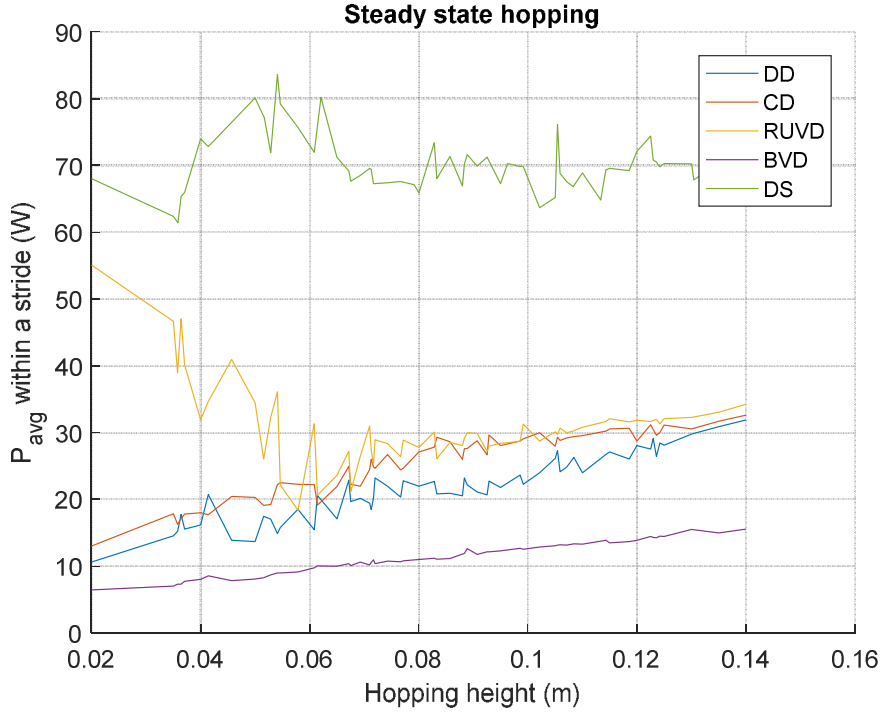
Tek adım sonuçları üzerinden yapılan geçici cevap performansı karşılaştırmasından sonra, kararlı hal cevabı performansı karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, verilen bir başlangıç koşulu altında zıplama yükseklik komutu değiştirildikten sonra robotun limit döngüye girene kadar zıplaması beklenmiş (yaklaşık üç sıçrama) daha sonra yeni zıplama yükseklik komutu verilmiştir. Bu bağlamda, robotun limit döngüye girmesinden sonra toplanan veriler ile kararlı halde kontrol hatası ve tepe/ortalama güç tüketimleri baz alınarak kontrol yöntemlerinin karşılaştırması yapılabilir. Bu verileri içeren Şekil 36-Şekil 38 incelendiğinde, özellikle DD ve BVD yöntemlerinin sıfıra yakın bir kararlı hal hatasıyla kontrol yapabildiğini görmek mümkündür. Kararlı hal performansı incelendiğinde farklı yöntemlerin ortalama güç tüketimleri birbirine epey yakınken tepe güç ihtiyaçları arasında büyük fark olduğu görülebilir. Ayrıca, BVD yönteminin tepe güç ihtiyacı kendisine en yakın yöntem olan DD'nin dörtte biridir.



Şekil 36: Kontrol yöntemlerinin farklı yüksekliklere göre istenilen yükseklik değerine göre yüzde olarak limit döngü kontrol hataları.



Şekil 37: Tüm farklı kontrol yöntemlerinin farklı yüksekliklere göre limit döngü tepe güç harcamaları.



Şekil 38: Tüm farklı kontrol yöntemlerinin farklı yüksekliklere göre limit döngü ortalama güç harcamaları.

Sonuç olarak, tek adım geçici hal cevabı ve limit döngü kararlı hal cevapları kıyaslandığında, sönümlenme tabanlı yöntemlerin literatürde mevcut yay sabit değişimini hem kontrol doğruluğu hem de güç tüketimi anlamında sürklase ettikleri görülmüştür.

## 5. Destekleyici Çalışmalar

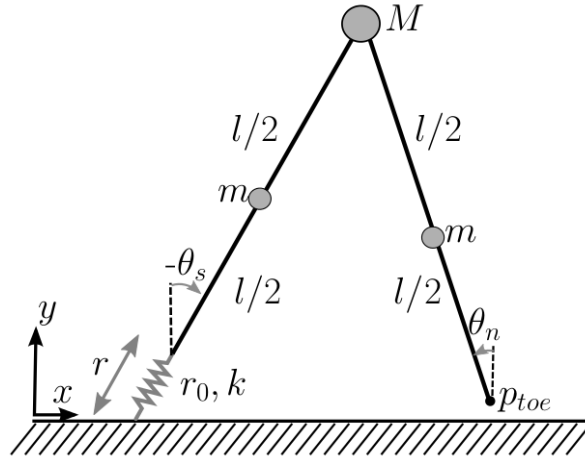
Proje kapsamında yapılmış olan ve YTS modelinin aktif sönümleme kontrolü ile kullanılmasının yanında, proje süresince bu konuyu destekleyici ve ilgili alanlarda bazı alt problemlerin çözüldüğü çalışmalar da yaptık. Bu bölümde bu çalışmalar özet olarak detaylandırılacaktır.

### 5.1 Seri Esnek Eyleyicili Bilek Eklemi ile Yürüme Kontrolü

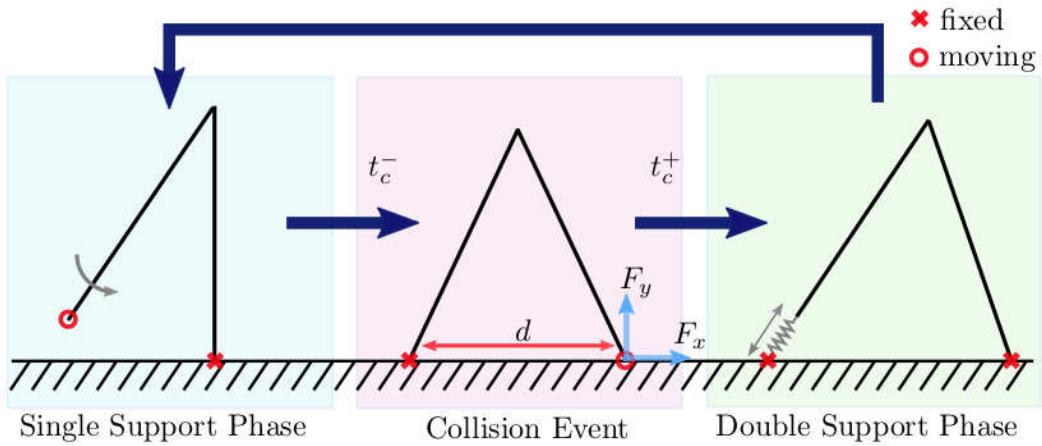
Proje kapsamında ağırlıklı olarak seri esnek eyleyici yapısına sahip bacak modellerine odaklandık. Bu tür yapılar hem enerji verimlilikleri hem de pratik gerçekleştirilebilirlikleri konusunda avantajlar içermektedir. Normalde koşma davranışları sırasında tek bir adım sırasında esnekliğin sıkışarak genişmesi ile dinamik bir davranış elde edilmektedir. Fakat bu durum yürüme davranışları sırasında farklı gelişmektedir. Proje kapsamında gerçekleştirdiğimiz destekleyici çalışmaların arasında bu tür bir seri esnek eyleyici yapısının yürüme davranışları için nasıl kullanılabileceği üzerine sonuçlar bulunmaktadır.



Bu alanda sıklıkla kullanılmakta olan Pergel Yürüme modeli Şekil 39'de verilmiştir. Bu model noktasal kütleye sahip bir gövdeye bağlı iki sert bacadan oluşmaktadır ve ikili bir sarkaç yapısına benzemektedir. Yürüme davranışının her anında en az bir bacak yerle temas halindedir ve sarkaç salınımına benzer bir şekilde ilerlemektedir. Yerde olmayan bacak yerle temas haline geçtiğinde bir çarpışma olur ve sistemdeki momentum yeni bacağa aktarılır. Bu noktada yapmış olduğumuz özgün çalışma çerçevesinde, yerden kalkmak üzere olan bacak üzerinde bilek eklemi itkisini modelleyecek bir seri esnek eyleyici yerleştirdik. Bacak yerdeyken eyleyici yayı germekte ve yerden kalkmadan hemen önce sistem bu yaya depolanmış enerjiyi geri kazanmaktadır. Yürüme davranışı sırasındaki bu geçişler Şekil 40'de gösterilmiştir.



Şekil 39: Pergel Yürüme Modelinin yapısı ve ilgili tanımlar.



Şekil 40: Pergel Yürüme Modelinde yürüme sırasındaki bir adımda geçilen aşamalar.

Bu sistemin dinamik denklemleri proje kapsamında yaptığımız çalışmalar sırasında türetilmiştir ve detayları ilgili proje çıktısı makalelerimizde bulunabilir. Özet olarak dinamik denklemler üç ögeden oluşmaktadır. İlk olarak tek bacağın yerle temas halinde olduğu fazdaki denklemler literatürde standard pergel yürüme modeli ile eşdeğerdir ve çeşitli

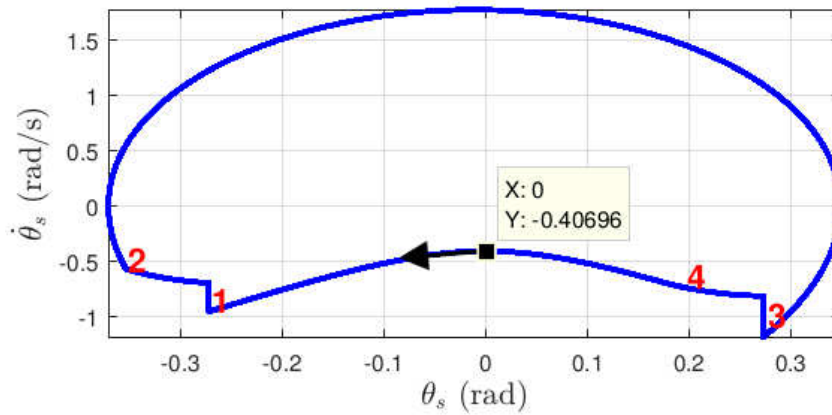
kaynaklardan bulunabilir. Bunu takiben gerçekleşen çarpışma durumunda ise, çarpışma sonrası yaylı bilek eklemi devreye gireceğinden denklemler farklı şekilde gerçekleşmektedir. Bu çarpışma sonrası elde edilen bilek genişleme hızı

$$\dot{r}^+ = \frac{2ml \sin(\theta_s^- - \theta_n^-) \dot{\theta}_n^- - (3m + 4M) \sin(2(\theta_s^- - \theta_n^-)) \dot{\theta}_s^-}{7m + 8M + 3 \cos(2(\theta_s^- - \theta_n^-))}$$

şeklinde türetilebilir. Burada s (stance) ve n (non-stance) alt indisleri yerdeki ve havadaki bacaklar için açıları belirtmekte ve durum değişkenlerini belirlemektedir.

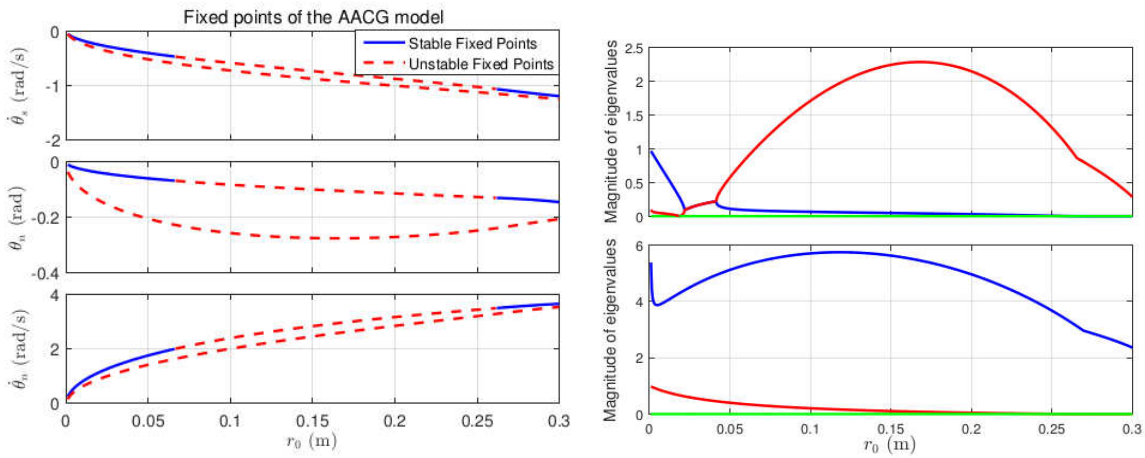
Çarpışma sonrasında sistem tek bir serbestlik derecesi ile arka bacağın radyal yönde açılması ile ilerler. Bu fazda da dinamik denklemler literatürde sıklıkla kullanılan Lagrange-Euler yöntemi ile bulunabilir ve çalışmalarımız sırasında kullanılan denklemler bu şekilde elde edilmiştir.

Bu tür periyodik davranışa sahip sistemlerde kararlılık analizi gerçekleştirebilmek için Poincare yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler sistemin periyodik yörüngelerinin tamamının transversal olarak kestikleri bir alt uzay tanımlayarak, bir adımdan diğerine bu kesişimlerin ayrık bir sistem olarak modellenmesi prensibi üzerinden çalışırlar. Seri esnek eyleyicili pergel yürüme modeli bünyesinde bu kesiti biz yerdeki bacağın dik olduğu noktadan almayı seçtik. Bu seçim sonucunda havadaki bacağın açısı ve her iki bacağın da hızları olmak üzere üç boyutlu bir durum vektörü elde edilmektedir. Proje kapsamında yaptığımız çalışmalarda ilk olarak bu Poincare kesiti içerisinde görünen periyodik yörüngeleri belirledik. Örnek olarak, yerdeki bacağın açı ve açısal hızını gösteren faz uzayında örnek bir periyodik çözüm Şekil 41'de gösterilmiştir. Bu gösterimde yerle çarpışma olayları 1 ve 3 numaralı olarak gösterilmiştir.



Şekil 41: Örnek bir periyodik yürüme davranışının yerdeki bacağın faz uzayında gösterimi.

Bu şekilde elde edilen periyodik davranışların bir sonraki aşamada yay sabiti ve ön gerilmesine nasıl bağlı oldukları çalışmalarımız sırasında incelenmiştir. Bu sayede ön sıkışma miktarına göre değişik periyodik çözümler ve bunların eigendeğerleri bulunmuştur ve böylece sistemin hem açık döngülü olarak nasıl periyodik davranışlar gösterebildiği ve bunların nasıl kararlılık seviyelerine sahip oldukları ortaya konmuştur. İlgili sonuçlar Şekil 42'de gösterilmiştir. Bu sonuçlardan da görülebileceği gibi, sabit olarak seçilen bir yay ön sıkışma miktarı, belirli aralıklarda kararlı davranış gösterirken (eigendeğerlerin 1'in altında olduğu bölgeler), diğer parametre değerleri için açık döngülü olarak kararlı davranış mümkün olmamaktadır.



Şekil 42: Bilekteki seri esnek yayın ön sıkışma miktarına göre elde edilen periyodik sabit çözümler (solda) ve bunlara karşılık gelen eigendeğerler (sağda).

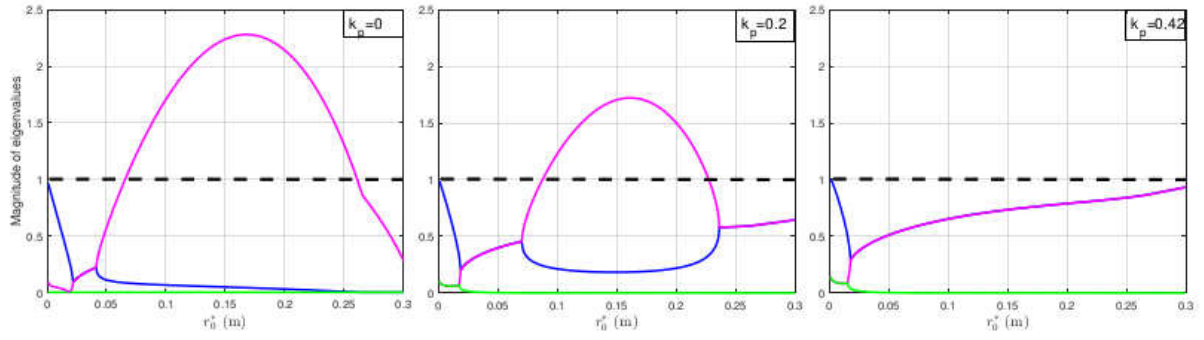
Bu bulgular ışığında çalışmalarımız sırasında önerdiğimiz özgün yöntemlerden bir tanesi, sistemin ölçülen ileri hızına göre ön sıkışma miktarını geribesleme ile ayarlamak şeklinde bir kontrolü tasarımı olmuştur. Bu kapsamda Şekil 42'de solda gösterilen hız fonksiyonu

$$\dot{\theta}_s^{fp} = f(r_0)$$

olarak ifade edilirse bu fonksiyon üzerine yaydaki ön sıkışmanın k numaralı adımdaki değeri

$$r_0[k] = f^{-1}(\dot{\theta}_s^*) - k_p(\dot{\theta}_s^*[k] - \dot{\theta}_s[k])$$

olarak seçilebilir. Bu şekilde bir geribesleme her adımda ölçülen bacak açısız hızının, istenen hızdan farkına göre yayda saklanan enerji miktarını ayarlayacak, ve bu şekilde sistemin kararlı şekilde yürümesini sağlayacaktır. Bu kontrolü altında sistemin eigendeğerlerinin değişimi Şekil 43'da gösterilmiştir. Buradan da görülebileceği gibi, değişik geribesleme sabitleri kullanılarak sistemin kararlılığı istenildiği şekilde ayarlanabilmektedir.



Şekil 43: Bilek yayının ön sıkışmasının geribeslemeli olarak kontrolü ile sistemin kararlılığının artırılması.

Sonuç olarak proje kapsamında yapmış olduğumuz çalışmalar ile seri esnek eyleyici yapılarının koşma davranışlarında olduğu gibi yürüme davranışlarında da bilek eklemi aracılığı ile kullanılabileceğini göstermiş olduk.

## 5.2 Giriş-Çıkış Verileri ile Periyodik Davranışa Sahip Sistemlerin Parametrik Tanılaması

Proje kapsamındaki odak noktamızı oluşturan bacaklı sistemler koşma davranışları sırasında periyodik yörüngeler izlemektedirler. Her ne kadar proje kapsamında tasarladığımız mekanik yapıda koşma davranışını gerçekleştirmek için gerekli parametreleri doğrudan ölçebiliyor veya basit kontrollü deneyler ile bulabiliyorsak da, daha karmaşık robotik sistemlerde veya biyolojik canlılarda benzer davranışları incelerken bu tür kontrollü deneyler bazen mümkün olmamaktadır. Bu durumlarda kontrol algoritmalarının kararlılığını artırabilmek ve sistemin genel davranış özelliklerini anlayabilmek için sistem tanıma (system identification) yöntemleri kullanımı gereği daha da yoğunlaşmaktadır.

Proje kapsamında bu alanda bazı çalışmalarını da gerçekleştirerek proje çıktılarımız arasında bulunan yayınlar aracılığı ile literatüre ekledik. Bu tür sistemlerde ve periyodik davranışlar varlığında sistem tanınması yapabilmek için varolan yöntemlerin uygulanabilirliği oldukça düşüktür. Genelde doğrusal sistemler ve noktasal kararlılık içeren sistemler için geliştirilmiş olan bu yöntemler doğrusal olmayan ve periyodik limit döngüleri içeren koşma davranışları için uygun değildir. Bu kapsamda uygulanabilecek yaklaşımlardan bir tanesi, sistem davranışlarının limit döngüsü etrafında doğrusallaştırılarak, doğrusal fakat zamana göre periyodik bir sistem haline getirilmeleridir. Sonuçta elde edilen sistem

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t)$$

yapısına sahip olacaktır ve burada  $\mathbf{A}(t)$  ve  $\mathbf{B}(t)$  matrislerinin  $T$  periyoduna sahip oldukları varsayılmıştır. Bu sistemde yalnızca ölçümler aracılığı ile  $\mathbf{A}(t)$  ve  $\mathbf{B}(t)$  bilinmeyenlerinin

bulunması çalışmamızın ana amacı olmuştur. İlk aşamada tüm bacaklı davranışlarda olduğu gibi koşma davranışlarında da sistemin hibrit bir yapısı olmaktadır. Bunun bir sonucu olarak sistemin yapısı ayırık olarak çarpışma anında değişmektedir. Çalışmamızda bu durumu değişik anlarda 0 ve 1 değerine sahip olabilen  $s(t)$  adlı bir fonksiyon ile modelledik. Bu yapıda sistem matrislerinin hibrit yapısını genel bir şekilde

$$A(t) = \sum_{i=1}^M A^i(t)s^i(t), \quad B(t) = \sum_{i=1}^M B^i(t)s^i(t).$$

olarak ifade ettik. Bunu takiben, sistem matrislerinin Fourier açılımları ile periyodik sinyallerin toplamı olarak ifadesini gerçekleştirdik. Elde edilen açılımlar varlığında sistem denklemleri

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{jn\omega_p t} \mathbf{x}(t) + \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n e^{jn\omega_p t} \mathbf{u}(t)$$

şeklini almaktadır. Bu aşamada kesintili adım fonksiyonları üzerinde de aynı açılım uygulandığında

$$s^i(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_n^i e^{jn\omega_p t}$$

elde edilmektedir. Tüm bu değerler yerine konularak Fourier uzayında harmonik denge kurulduğunda elde edilen yapı

$$\begin{aligned} (j\omega)X(j\omega) = & \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_k^1 \left\{ \underbrace{\sum_{n=-\infty}^{\infty} S_{n-k}^1 X(j\omega - jn\omega_p)}_{X_k^1(j\omega)} \right\} + \dots \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_k^M \left\{ \underbrace{\sum_{n=-\infty}^{\infty} S_{n-k}^M X(j\omega - jn\omega_p)}_{X_k^M(j\omega)} \right\} + \\ & \sum_{k=-\infty}^{\infty} B_k^1 \left\{ \underbrace{\sum_{n=-\infty}^{\infty} S_{n-k}^1 U(j\omega - jn\omega_p)}_{U_k^1(j\omega)} \right\} + \dots \sum_{k=-\infty}^{\infty} B_k^M \left\{ \underbrace{\sum_{n=-\infty}^{\infty} S_{n-k}^M U(j\omega - jn\omega_p)}_{U_k^M(j\omega)} \right\} \end{aligned}$$

şeklini almaktadır ve matris formuna sokulduğunda bu denklem

$$(j\omega)X(j\omega) = \underbrace{[A_{-K}^1 \cdots A_0^1 \cdots A_K^1]}_{A^1} \underbrace{\begin{bmatrix} X_{-K}^1(j\omega) \\ \vdots \\ X_0^1(j\omega) \\ \vdots \\ X_K^1(j\omega) \end{bmatrix}}_{\mathcal{X}^1(j\omega)} + \cdots + \underbrace{[A_{-K}^M \cdots A_0^M \cdots A_K^M]}_{A^M} \underbrace{\begin{bmatrix} X_{-K}^M(j\omega) \\ \vdots \\ X_0^M(j\omega) \\ \vdots \\ X_K^M(j\omega) \end{bmatrix}}_{\mathcal{X}^M(j\omega)} +$$

$$\underbrace{[B_{-K}^1 \cdots B_0^1 \cdots B_K^1]}_{B^1} \underbrace{\begin{bmatrix} U_{-K}^1(j\omega) \\ \vdots \\ U_0^1(j\omega) \\ \vdots \\ U_K^1(j\omega) \end{bmatrix}}_{\mathcal{U}^1(j\omega)} + \cdots + \underbrace{[B_{-K}^M \cdots B_0^M \cdots B_K^M]}_{B^M} \underbrace{\begin{bmatrix} U_{-K}^M(j\omega) \\ \vdots \\ U_0^M(j\omega) \\ \vdots \\ U_K^M(j\omega) \end{bmatrix}}_{\mathcal{U}^M(j\omega)}$$

şekline dönüşmektedir. Bu yapıdaki sistem matrisleri daha sonra sistemin durum değişkenleri ve çıktısının ölçümleri ile kestirilebilmektedir. Bu türetimlerin detayları ilgili makalelerimizde bulunabilir. Sonuç olarak örnek bir Mathieu sistemi üzerinde bu yöntem uygulandığında normalde

$$A_0^1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -39.4784 & -3.7699 \end{bmatrix}, A_1^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -3.9478 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_0^2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -39.4784 & -1.2566 \end{bmatrix}, A_1^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -7.8957 & 0 \end{bmatrix}$$

şeklinde olan sistem matrislerinin Fourier açılımları

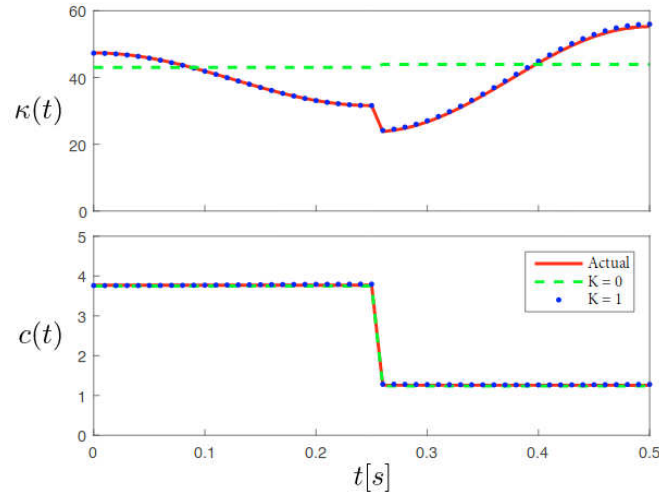
$$\hat{A}_0^1 = \begin{bmatrix} 0.0002 & 0.9999 \\ -39.4404 & -3.7786 \end{bmatrix}$$

$$\hat{A}_1^1 = \begin{bmatrix} -0.0001 - j0.0003 & -0.0001 - j0.0000 \\ -3.9253 + j0.0095 & 0.0090 - j0.0012 \end{bmatrix}$$

$$\hat{A}_0^2 = \begin{bmatrix} 0.0009 & 1.0003 \\ -40.0038 & -1.2824 \end{bmatrix}$$

$$\hat{A}_1^2 = \begin{bmatrix} 0.0002 - j0.0008 & -0.0001 - j0.0002 \\ -7.9860 + j0.0242 & 0.0017 + j0.0084 \end{bmatrix}$$

şeklinde kestirilebilmektedir. Sonuç olarak sistem parametrelerinin zamana bağlı olarak değişimleri de Şekil 44'de gösterilmiştir.



Şekil 44: Mathieu benzeri bir sistemin parametrelerinin önerdiğimiz kestirim yöntemi ile bulunmaları

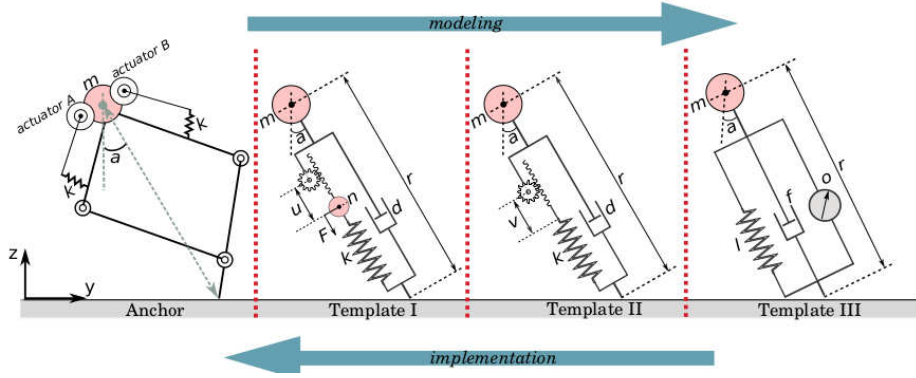
Sonuç olarak, önermiş olduğumuz yöntem ile içerisinde hibrit öğeler bulunan ve zamana göre periyodik değişim gösteren sistem matrisleri ile modellenmiş dinamik sistemlerdeki parametrelerin kestirimi için özgün bir yöntemi de projemiz kapsamındaki yan çıktılardan biri olarak geliştirmiş olduk. Bu çalışmalarımızın tüm teknik detayları ilgili makale çıktılarımızda bulunabilir.

## 6. İki Boyutlu Koşma Davranışları için Aktif Sönümlenme Kontrolü

İki boyutta çalışan bir bacak modeli, yerle teması sırasında iki serbestlik derecesine sahiptir. Önceki bölümlerde detaylandırmış olduğumuz aktif sönümlenme kontrolcüsü, yalnızca bacağın radyal serbestlik derecesi üzerinde kurgulanmış ve dönел dinamiklerin hesaba henüz katılmadığı bir durum altında çalışacak şekilde türetilmişti. Bu bölümde projenin son kısmında gerçekleştirdiğimiz çalışmalar sırasında bu yöntemin iki boyutlu modelde çalışacak şekilde genellenmesi ile ilgili detayları ve bu modelin benzetim testlerini sunacağız.

Öncelikle Şekil 45’de gösterilen yaklaşımımızın genel yapısı gösterilmiştir. Bu yaklaşımda fiziksel bir bacaklı robot platformu (örneğin ATRIAS, veya geliştirmiş olduğumuz platform), aşamalı olarak detayları azalan şablon modeller aracılığı ile dinamik açıdan basitleştirilmektedir. Örneğin ilk aşamada kinematik detaylar soyutlanarak bacak seri bir motor ve yay ile fiziksel sönümlenme elemanına indirgenmekte, motorun kütlesi ve ataleti halen göz önünde bulundurulmaktadır. İkinci aşamada bu ataletin etkisi kaldırılmakta ve yalnızca eyleyici, yay ve sönümlenme elemanı kalmaktadır. Son aşamada ise motor aracılığı ile sönümlenme katsayısı sanal olarak kontrol edilerek basit bir yaylı ters sarkaç modeli elde edilmektedir. Bu şekilde bir hiyerarşik şablon tabanlı kontrol kurgusu sayesinde her aşamada gerekli algoritmalar net ve analizi tamamlanmış şekilde ilerleyebilmektedir. En sağda görülen

şablon model ise YTS modelinin kendisi olduğundan, üst seviye koşma kontrolcülerinin tasarımı için uygun bir çerçeve sağlamaktadır.



Şekil 45: Sanal sönümlenme kontrolü fikrinin hiyerarşik bir yapıda anlatımı

Doğal olarak bu yapının gerçekleştirilebilmesi için sağdan sola doğru giden ok yönünde her basit sistemin bir sonraki seviye içine “gömülmesi” gerekmektedir. Projemizin ana odağı en sağdaki III. şablon modelinin II. model içine gömülmesi ve bunun platformumuz ile uzun vadede gerçekleştireceğimiz I. model içindeki gerçekleştirilmesi olmuştur. Bu son aşamayı benzetim ortamında gerçekleştirerek, enerji ve hassasiyet kazanımlarını sistematik olarak inceledik.

Yukarıdaki tüm modeller havadayken yalnızca yer çekiminin etkisi altında hareket ederler. Matematiksel olarak basit olan bu dinamiklere karşın yerdeyken modellerin dinamikleri çok daha karmaşıktır.

En karmaşık yapıya sahip olan I. modelin yerdeyken konfigürasyon uzayını noktasal gövdenin radyal ve açısal pozisyonu ile seri eyleyicinin pozisyonu tanımlar:

$$q := (r, u, \theta).$$

Bu uzayda robotun dinamikleri şu şekilde yazılabilir:

$$\ddot{q} = M^{-1}(q) (\Upsilon^T - C(q, \dot{q}) - G(q))$$

$$\Upsilon = (-d\dot{r}, F, 0)$$

$$M(q) = \begin{bmatrix} m_b + m_a & -m_a & 0 \\ -m_a & m_a & 0 \\ 0 & 0 & m_b r^2 + m_a (r - u)^2 \end{bmatrix}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_b r \dot{\theta}^2 - m_a (r - u) \dot{\theta}^2 \\ m_a (r - u) \dot{\theta}^2 \\ 2m_b r \dot{r} \dot{\theta} + 2m_a (r - u) (\dot{r} - \dot{u}) \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} (m_b + m_a)g \cos \theta + k(r - u - r_0) \\ -m_a g \cos \theta - k(r - u - r_0) \\ -m_b g r \sin \theta - m_a g (r - u) \sin \theta \end{bmatrix}$$



En sağdaki III. şablon modelinin konfigürasyon uzayı ise gövdenin radyal ve açısar pozisyonundan ibarettir. Bu nedenle III. modelin dinamikleri nispeten daha basit ve şu şekildedir:

$$\ddot{r} = r\dot{\theta}^2 - g \cos \theta - \frac{l}{m_b}(r - r_0) - \frac{f}{m_b}\dot{r} - \frac{o}{m_b}$$

$$\ddot{\theta} = \frac{g \sin \theta - 2r\dot{\theta}}{r}$$

Burada  $l$ ,  $f$  ve  $o$  koşma kontrolcüsü tarafından seçilecek ayarlanabilir sanal bacağın yay sabiti, sönümlenme katsayısı ve sabit kuvvet parametreleridir. Dikey eksene kısıtlı model bünyesinde bu parametrelerin seçimine ilişkin olarak sönümlenme katsayısının ayarlanmasının yöntemsel olarak nasıl gerçekleştirileceği ve enerji verimliliği açısından avantajlarını daha önceki bölümlerde anlatmıştık. Ayrıca seçilen sönümlenme katsayısının verimli bir şekilde III. model üzerinde gerçekleştirilmesi için bu kontrol yönteminin üç farklı modifikasyonunu önermiştik.

III. modelin I. model üzerinde gerçekleştirilmesi için eyleyicinin iki ucu arasında yarattığı kuvvet kullanılmaktadır. Pratik sistemlerde konum kontrollü eyleyiciler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerde eyleyici kuvveti eyleyiciyi istenen pozisyona götürmek üzere geri beslemeli bir kontrolcü tarafından hesaplanarak sisteme uygulanır. Biz de buradan yola çıkarak şablon gerçekleştirme problemimize iki aşamalı bir çözüm getireceğiz:

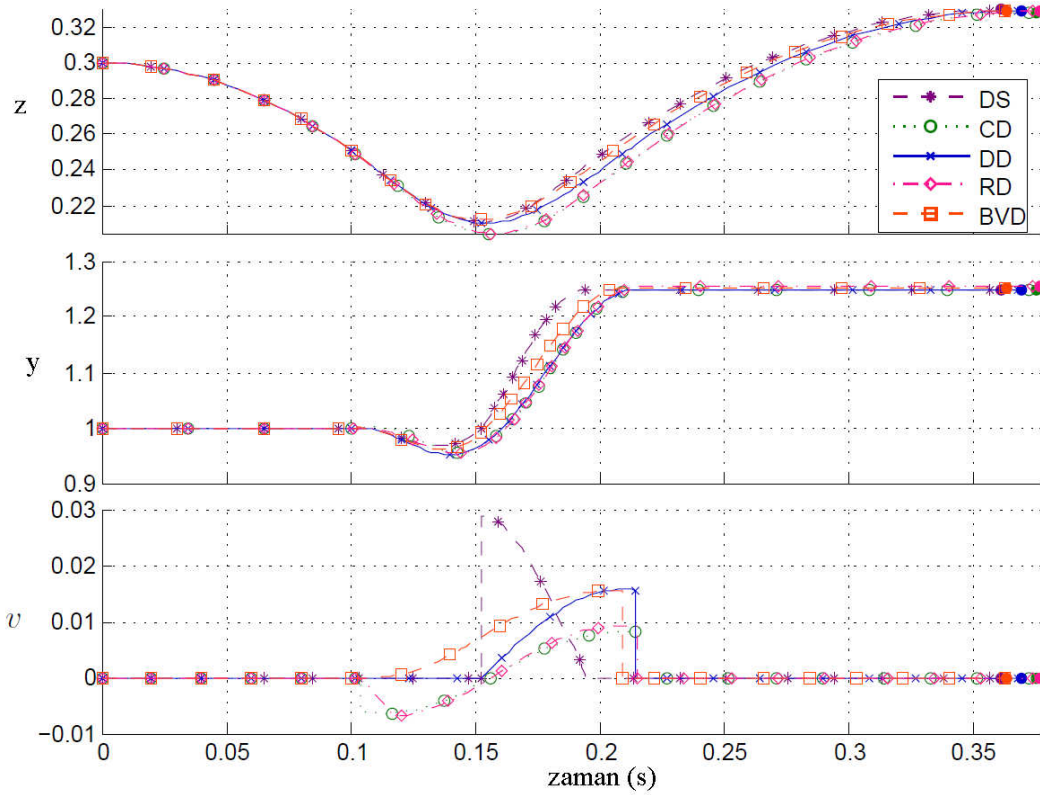
1. şablon I'in, III. şablon model üzerinde gerçekleştirilmesi için ihtiyaç duyulan eyleyici pozisyonunun belirlenmesi,
2. İstlenen eyleyici pozisyonuna ulaşmak için uygulanacak kuvvetin belirlenmesi.

Bunların arasından ikinci alt-problemin çözümüne ilişkin literatürde birçok yöntem önerilmektedir. Biz de proje kapsamında şu anda bu yöntemlerden en popüler olan PID kontrollü eyleyicinin pozisyonunu kontrol etmek için seçtik.

Birinci alt problemin çözümüne yönelik olarak ise şablon I ile III'ü birbirine bağlayan ara bir model olarak şablon II' kullanılır. şablon II modeli tıpkı model I ve III gibi radyal ve açısar dinamiklere sahip noktasal bir gövdeye sahiptir. Fakat diğer iki modelden farklı olarak şablon II modeli ideal bir pozisyon kontrollü eyleyiciye sahiptir. şablon II üzerindeki eyleyicinin ideal olması dinamiklerinin olmaması ve emredilen tüm pozisyon komutlarının mükemmel bir şekilde gerçekleştirildiği anlamına gelir. şablon II modeli eyleyicisi pozisyon komutu aşağıdaki şekilde seçilerek şablon III modelinin hatasız gerçekleştirilmesi sağlanabilir:

$$v = \frac{k - l}{k}(r - r_0) + \frac{d - f}{k}\dot{r} - \frac{o}{k}$$

Şablon III'yi hatasız şekilde şablon II modeli üzerinde gerçekleştirdiğimiz için bir sonraki aşamada Şablon II modelini Şablon I üzerinde gerçekleyerek Şablon III'yi dolaylı şekilde Şablon I üzerinde gerçekleyebiliriz. Bu amaçla, Şablon II eyleyici komutu  $v$  alt-problem 2 kapsamında tasarlanan pozisyon kontrolcü ile Şablon I üzerinde gerçekleştirilebilir. Şablon II'nin Şablon I üzerinde ne kadar etkin ve doğrulukla gerçekleştiği öncelikli olarak eyleyici kuvvetinin büyük çoğunluğunun gövdenin ivmelenmesine/frenlenmesine harcanmasını gerektirir. Bir diğer deyişle eyleyici kütlelerinin ivmesi ( $v$ 'nin zamana göre ikinci türevi) yeterince düşükse Şablon II, Şablon I üzerinde yüksek doğrulukla gerçekleştirilebilir. Eyleyici komutu  $v$  Şablon III modelinin ayarlanabilir bacak parametrelerine ve Şablon II/I modellerinin bacak parametrelerine bağlıdır. Örneğin, ayarlanabilir bacak parametreleri ( $l, f, o$ ) üst seviye modellerin bacak parametrelerine eşit seçilirse eyleyici komutu sıfır olmaktadır. Aksi durumda, ayarlanabilir bacak parametreleri ( $k, d, O$ )'dan çok farklı seçilirse eyleyici komutu  $v$  yüksek ivmeler gerektirerek Şablon II'nin Şablon I üzerinde düşük doğrulukla gerçekleştirilmesine sebep olabilir. Dolayısıyla, koşma kontrolünün etkin bir şekilde yapılabilmesi için ayarlanabilir bacak parametrelerinin bu durum göz önüne alınarak seçiminin yapılması büyük önem arz etmektedir.



Şekil 46: Farklı sanal bacak parametre seçim yöntemlerine ilişkin simülasyon sonuçları.

Önceki bölümlerde detaylandırılan sanal sönümlenme katsayısı yönteminin üç varyasyonu bu açıdan incelenmiştir ve eksikleri olduğuna kanaat getirilmiştir. Buradan yola çıkılarak sanal sönümlenme katsayısı tabanlı koşma kontrolü için yeni bir modifikasyon önerilmektedir. Literatürde sıklıkla kullanılan yay sabiti değiştirme yöntemi (DS), projenin ilk aylık döneminde geliştirilen sanal sönümlenme katsayısı varyasyonları (CD, DD ve RD) ve bu dönemde geliştirilen sanal sönümlenme katsayısı varyasyonu (BVD)'ye ait örnek simülasyon çıktıları Şekil 46'te verilmiştir.

Buraya kadar seçilen bir Şablon III modelinin gerçekçi eyleyici dinamiklerine sahip Şablon I modeli üzerinde nasıl gerçekleştirileceğinden bahsettik. Fakat, Şablon III'ün sanal bacak parametrelerinin nasıl seçileceğinden henüz bahsetmedik. Bu amaçla grubumuzun daha önceki çalışmalarında geliştirdiği bacak yerdeykenki dinamiklerinin yaklaşık çözümünü kullanarak, Şablon III sanal bacak parametre seçimini istenen koşma yüksekliği ve hızına bacağı ulaştıracak bir optimizasyon problemi olarak ele almaktayız. Bu optimizasyon problemi kapsamında, bacağın koşma sırasındaki istenen enerjisi sanal bacak parametreleri ile enerjinin koşma yüksekliği/hızına dağılımı ise bacağın bir sonraki yere değme açısı ( $\theta_{td}$ ) ile ayarlanır. Bu metodoloji aşağıdaki gibi içiçe bir optimizasyon problemi olarak modellenerek çözülür:

$$\arg \min_{\theta_{td}} (y_a^* - y_a(l', f', o'))^2 + (z_a^* - z_a(l', f', o'))^2$$

Burada  $l'$ ,  $f'$ ,  $o'$  içteki optimizasyon olan koşma enerjisi probleminin çözümüdür

$$\arg \min_{l', f', o'} \left( \frac{\dot{y}_a^{*2} - \dot{y}_a^2}{2} + g(z_a^* - z_a) \right)$$

Sonuç olarak projenin bu döneminde, önerdiğimiz yeni bir kontrol yöntemi olan sanal sönümlenme katsayısının iki boyutlu koşma davranışına uyarlanması yapılmıştır. Önümüzdeki dönemde bu yöntemin iki boyutlu koşmada literatürdeki mevcut yöntemlerle kıyaslaması yapılarak avantajları gösterilecektir.

## 7. Sonuç

Bu projemiz kapsamında yapmış olduğumuz çalışmalar ağırlıklı olarak bacaklı robotlarda koşma ve yürüme davranışlarının, seri-esnek eyleyiciler varlığında nasıl gerçekleştirilebileceği üzerine odaklanmıştır. Bu çerçevede öncelikle bu yapıya sahip bacak tasarımlarının varlığında koşma davranışları için sistemin kütle merkezinin sönümleme katsayısı sanal olarak pozitif veya negatif olabilecek şekilde değiştirilebilen bir kuvvet profilini hissedebilmesi için gerekli eyleyici kontrolünü geliştirdik. Bu sayede sistem enerjisinde istenen artış veya azalmayı sağlayacak bir yeni kontrol yapısı önerdik. Bunu takiben, bu

sanal sönümlleme katsayısının tek bir adımda istenen değışikliği gerçekleştirebilmesi için özgün bir kontrol algoritması önerdik ve tüm bu yapının hem dikey düzlemde, hem de iki boyutta koşma davranışlarının etkili kontrolü için geçerli bir yöntem olduğunu benzetim çalışmaları ile ortaya koyduk.

Proje kapsamında önermiş olduğumuz koşma davranışı kontrolcülerinin pratik gereklenebilirliklerini ortaya koymak için de, dikey ekseninde zıplama davranışları gerçekleştiren özgün bir robotik platform tasarlayarak ürettik ve sistematik deneyler için kullandık. Bu platform üzerinde aktif sönümlleme kontrolcüsünü gerçekleyerek, hem enerji hem de g verimliliği açısından alternatif yöntemlere göre üstünlüğünü ortaya koyduk. Sonuç olarak bu tür bacak tasarımlarında gerekli motor büyüklüğünün azaltılması (güç verimi) ve adım başına harcanan enerjinin en aza indirilmesi (enerji verimliliği) açılarından özgün bir kontrol yöntemi önermiş ve yöntemimizi deneysel olarak doğrulamış olduk.

Bu çalışmalarımıza ek olarak, bu konuları destekleyici nitelikte bazı sonuçları da proje kapsamında elde ettik. Bunlardan ilki seri esnek eyleyiciler ile desteklenen bir bilek ekleminin pasif yürüme davranışları sırasındaki kullanımı ve bu kapsamda kararlı bir şekilde hız kontrolü elde edebilen için bir geribeslemeli kontrolcü tasarlanması oldu. Bu yapıdaki bir sistemin tüm dinamik özelliklerini benzetim ortamında inceleyerek seri esnek eyleyici yapılarının koşma davranışlarında olduğu kadar yürüme davranışları için de önemli olduğunu göstermiş olduk. Buna ek olarak, koşan ve yürüyen sistemlerde kaçınılmaz olarak gözlemlenen periyodik limit döngüsü yörüngelerinin varlığında sistemin parametrelerinin kestirilebilmesi için de harmonik transfer fonksiyonlarını kullanan yeni bir sistem kestirim yöntemi önerdik ve benzetim ortamında doğruladık. Böylece karmaşık yapıdaki robotik ve biyolojik sistemlerin periyodik davranışlar varlığında parametrik olarak daha iyi karakterize edilebilmeleri için gerekli yöntemlerin geliştirilmesi için de önemli bir başlangıç yapmış olduk.

Projenin süresi boyunca gerek ulusal ve uluslararası konferanslarda bildiriler ve sunumlar, gerekse uluslararası dergilerde makaleler şeklinde çalışmalarımızı literatürde de sunduk. Bunun sonucu olarak proje ıktılarımızın yaygın etkilerini ortaya koymaya başladık ve bu çalışmalara önümüzdeki aylarda da devam ederek tüm sonuçlarımızı uluslararası literatürde duyurmayı planlamaktayız.

## **8. Gelecekte Yapılacak alışmalar**

Raporun nceki bölümlerinde detaylandırdığımız gibi, tamamlamış olduğumuz bu projede, bacaklı koşma davranışlarının enerji ve g açısından verimli bir şekilde, ser, esnek eyleyici yapısına sahip bacak tasarımlarında gerçekleştirilebilmesi için sanal olarak gövde tarafından hissedilen sönümlleme katsayısının değiştirilmesine dayanan bir kontrol yöntemini geliştirdik

ve deneysel olarak doğruladık. Bu bölümde daha sonraki çalışmalarda odaklanılabilecek bazı araştırma problemlerinden bahsedecek ve elde etmiş olduğumuz sonuçların bu çalışmaları nasıl destekleyeceğini tartışacağız.

Doğal olarak bu projedeki sonuçlarımızın ilk olarak uygulanabileceği konu, iki boyutlu koşma davranışının sanal sönümlenme kontrolü ile deneysel bir platformda gerçekleşmesi olacaktır. Bu alanda en uygun platformlardan bir tanesi ATRIAS robotu olmakla birlikte, bu sistemin mekatronik karmaşıklığı ve maliyeti Türkiye’de akademik ortamda bu robotun imalatını oldukça zorlaştırmaktadır. Bunun bir sonucu olarak iki boyutlu koşma davranışlarının bu şekilde deneysel ortamda gerçekleştirilebilmeleri ve önerdiğimiz yöntemin verimlilik kazanımlarının ortaya konabilmesi için ya yurtdışı ortaklığı ile çalışmalar yapılacak, ya da daha küçük bir boyutta fakat iki boyutlu davranışlara olanak sağlayan bir tasarım bünyesinde bu davranışlar gerçekleştirilecektir.

Bu şekilde iki boyutlu koşma davranışları için yapılacak odaklı doğrulama çalışmalarının sonrasında, grubumuzun daha önce önermiş olduğu, koşma davranışları için reaktif adım planlama yönteminin [Arslan and Saranlı, 2012], sanal sönümlenme kontrolü gibi pratik uygulanabilirliği yüksek bir yapı altında incelenerek uyarlanması ve fiziksel olarak gerçekleştirilmeleri önemli gelecek araştırma yönleri arasındadır. Bunun gerçekleştirilebilmesi için de iki boyutta koşabilen, iki bacaklı bir deneysel platformun tasarlanarak üretilmesi gerekecektir ki grubumuzun gelecek dönemler içinde önereceği projeler arasında bu çalışmalar da bulunmaktadır.

Son olarak, daha uzun vadede, önermiş olduğumuz sanal sönümlenme kontrolü yönteminin dört veya daha fazla bacağa sahip platformlar ve gövde üzerinde de eklemlerin varlığında kullanımı bilimsel açıdan önemli gelecek çalışmalar arasında yer almaktadır. Bu tür platformlarda değişik eklemler arasındaki koordinasyon ve enerji verimliliği büyük önem taşımaktadır. Tüm eklemlerdeki sönümlenme katsayılarının sanal olarak kontrol edilmeleri aracılığı ile bu tür platformların verimli ve kararlı bir şekilde koşma davranışlarını gerçekleştirebilmeleri, mümkün olduğu takdirde bu alanda önemli ilerlemeler sağlayacaktır. Uzun vadede grubumuzun çalışmaları bu yönde de ilerleyecektir.

## 9. Kaynakça

[Ahmadi and Buehler, 2006] Ahmadi, M. and Buehler, M. (2006). Controlled passive dynamic running experiments with the arl-monopod ii. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(5):974–986.

- [Alexander and Jayes, 1978] Alexander, R. M. and Jayes, A. S. (1978). Vertical movement in walking and running. *Journal of Zoology, London*, 185:27–40.
- [Altendorfer et al., 2004] Altendorfer, R., Koditschek, D. E., and Holmes, P. (2004). Stability Analysis of Legged Locomotion Models by Symmetry-Factored Return Maps. *The International Journal of Robotics Research*, 23(10-11):979–999.
- [Altendorfer et al., 2000] Altendorfer, R., Saranli, U., Komsuoglu, H., Koditschek, D. E., Brown, J. H. B., Buehler, M., Moore, N., McMordie, D., and Full, R. (2000). Evidence for spring loaded inverted pendulum running in a hexapod robot. In Rus, D. and Singh, S., editors, *Experimental Robotics VII*, Lecture Notes in Control and Information Sciences, chapter 5, pages 291–302. Springer.
- [Ankarali and Saranli, 2010] Ankarali, M. M. and Saranli, U. (2010). Stride-to-stride energy regulation for robust self-stability of a torque-actuated dissipative spring-mass hopper. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 20(033121).
- [Ankarali and Saranli, 2011] Ankarali, M. M. and Saranli, U. (2011). Control of underactuated planar pronking through an embedded spring-mass hopper template. *Autonomous Robots*, 30(2):217–231. 10.1007/s10514-010-9216-x.
- [Arslan and Saranli, 2012] Arslan, O. and Saranli, U. (2012). Reactive planning and control of planar spring-mass running on rough terrain. *Robotics, IEEE Transactions on*, 28(3):567–579.
- [Blickhan, 1989] Blickhan, R. (1989). The spring-mass model for running and hopping. *Journal of Biomechanics*, 22:1217–1227.
- [Blickhan and Full, 1993] Blickhan, R. and Full, R. J. (1993). Similarity in multilegged locomotion: Bouncing like a monopode. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 173(5):509–517.
- [Carver, 2003] Carver, S. (2003). *Control of a Spring-Mass Hopper*. Ph.d., Cornell University.
- [Cavagna et al., 1977] Cavagna, G. A., Heglund, N. C., and Taylor, C. R. (1977). Mechanical work in terrestrial locomotion: two basic mechanisms for minimizing energy expenditure. *Am. J. Physiol.*, 233:R243–R261.
- [Cavagna et al., 1964] Cavagna, G. A., Saibene, F. P., and Margaria, R. (1964). Mechanical work in running. *Journal of Applied Physiology*, 19(2):249–256.
- [Cruse, 1976] Cruse, H. (1976). The function of the legs in the free walking stick insect, *carausius morosus*. *Journal of comparative physiology*, 112(2):235–262.

- [Full and Koditschek, 1999] Full, R. J. and Koditschek, D. E. (1999). Templates and anchors: Neuromechanical hypotheses of legged locomotion. *Journal of Experimental Biology*, 202:3325–3332.
- [Geyer et al., 2005] Geyer, H., Seyfarth, A., and Blickhan, R. (2005). Spring-mass running: simple approximate solution and application to gait stability. *Journal of Theoretical Biology*, 232(3):315–328.
- [Ghigliazza et al., 2003] Ghigliazza, R. M., Altendorfer, R., Holmes, P., and Koditschek, D. (2003). A simply stabilized running model. *SIAM Journal on Applied Dynamical Systems*, 2:187–218.
- [Ghigliazza et al., 2005] Ghigliazza, R. M., Altendorfer, R., Holmes, P., and Koditschek, D. (2005). A simply stabilized running model. *SIAM Rev.*, 47(3):519–549.
- [Goswami, 1999] Goswami, A. (1999). Postural stability of biped robots and the foot-rotation indicator (fri) point. *The International Journal of Robotics Research*, 18(6):523–533.
- [Gregorio et al., 1997] Gregorio, P., Ahmadi, M., and Buehler, M. (1997). Design, control, and energetics of an electrically actuated legged robot. *Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 27(4):626–634.
- [Grimes and Hurst, 2012] Grimes, J. A. and Hurst, J. W. (2012). The design of atrias 1.0 a unique monopod, hopping robot. In *Proc. of the International Conference on Climbing and Walking Robots*.
- [Gur and Saranli, 2012] Gur, O. and Saranli, U. (2012). Model based proprioceptive state estimation for spring-mass running. In *Robotics: Science and Systems VII*. The MIT Press.
- [Holmes et al., 2006] Holmes, P., Full, R., Koditschek, D., and Guckenheimer, J. (2006). The dynamics of legged locomotion: Models, analyses, and challenges. *SIAM Review*, 48(2):207–304.
- [Hubicki et al., 2016] Hubicki, C., Grimes, J., Jones, M., Renjewski, D., SprÄ¶witz, A., Abate, A., and Hurst, J. (2016). Atrias: Design and validation of a tether-free 3d-capable spring-mass bipedal robot. *The International Journal of Robotics Research*.
- [Hurst, 2011] Hurst, J. W. (2011). The electric cable differential leg: A novel design approach for walking and running. *International Journal of Humanoid Robotics*, 08(02):301–321.

- [Hurst et al., 2004] Hurst, J. W., Chestnutt, J. E., and Rizzi, A. A. (2004). An actuator with mechanically adjustable series compliance. Technical Report CMU-RI-TR-04-24, Robotics Institute, Carnegie Mellon University.
- [Hurst et al., 2007] Hurst, J. W., Chestnutt, J. E., and Rizzi, A. A. (2007). Design and philosophy of the bimasc, a highly dynamic biped. In *Proceedings of the Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 1863–1868.
- [Jindrich and Full, 2002] Jindrich, D. L. and Full, R. J. (2002). Dynamic stabilization of rapid hexapedal locomotion. *Journal of Experimental Biology*, 205(18):2803–2823.
- [Koditschek and Buehler, 1991] Koditschek, D. E. and Buehler, M. (1991). Analysis of a simplified hopping robot. *International Journal of Robotics Research*, 10(6):587–605.
- [LaBarbera, 1983] LaBarbera, M. (1983). Why the wheels won't go. *The American Naturalist*, 121(3):395–408.
- [Lee and Tomizuka, 1996] Lee, H. S. and Tomizuka, M. (1996). Robust motion controller design for high-accuracy positioning systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 43(1):48–55.
- [Park et al., 2011] Park, H.-W., Sreenath, K., Hurst, J., and Grizzle, J. (2011). Identification of a bipedal robot with a compliant drivetrain. *Control Systems, IEEE*, 31(2):63–88.
- [Raibert, 1986] Raibert, M. (1986). *Legged robots that balance*. MIT Press series in artificial intelligence. MIT Press, Boston.
- [Raibert, 1987] Raibert, M. (1987). Running with symmetry. *International Journal of Robotics Research*, 5(4):3–19.
- [Raibert, 1990] Raibert, M. H. (1990). Trotting, pacing and bounding by a quadruped robot. *Journal of Biomechanics*, 23(1):79–98.
- [Ringrose, 1997] Ringrose, P. R. (1997). *Self-Stabilizing Running*. Doctor of philosophy in computer science, Massachusetts Institute of Technology.
- [Saranli et al., 2010] Saranli, U., Arslan, O., Ankarali, M. M., and Morgul, O. (2010). Approximate analytic solutions to non-symmetric stance trajectories of the passive spring-loaded inverted pendulum with damping. *Nonlinear Dynamics*, 62(4):729–742.
- [Schmitt, 2006] Schmitt, J. (2006). A simple stabilizing control for sagittal plane locomotion. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 1(4):348–357.



- [Schwind, 1998] Schwind, W. J. (1998). *Spring Loaded Inverted Pendulum Running: A Plant Model*. Phd, University of Michigan.
- [Schwind and Koditschek, 2000] Schwind, W. J. and Koditschek, D. E. (2000). Approximating the stance map of a 2-dof monoped runner. *Journal of Nonlinear Science*, 10:533–568.
- [Seipel and Holmes, 2007] Seipel, J. and Holmes, P. (2007). A simple model for clock-actuated legged locomotion. *Regular and Chaotic Dynamics*, 12(5):502–520.
- [Tesfaye et al., 2000] Tesfaye, A., Lee, H. S., and Tomizuka, M. (2000). A sensitivity optimization approach to design of a disturbance observer in digital motion control systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 5(1):32–38.
- [Umeno and Hori, 1991] Umeno, T. and Hori, Y. (1991). Robust speed control of dc servomotors using modern two degrees-of-freedom controller design. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 38(5).
- [Uyanik et al., 2015] Uyanik, I., Morgul, O., and Saranli, U. (2015). Experimental validation of a feed-forward predictor for the spring-loaded inverted pendulum template. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(1):208–216.
- [Uyanik et al., 2011] Uyanik, I., Saranli, U., and Morgul, O. (2011). Adaptive control of a spring-mass hopper. In *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 2138 –2143.
- [Vukobratovic and Borovac, 2004] Vukobratovic, M. and Borovac, B. (2004). Zero-moment point-thirty five years of its life. *International Journal of Humanoid Robotics*, 1(1):157–173.
- [Waldron et al., 1984] Waldron, K. J., Vohnout, V. J., Pery, A., and McGhee, R. B. (1984). Configuration design of the Adaptive Suspension Vehicle. *International Journal of Robotics Research*, 3(2):37–48.
- [Youla et al., 1976] Youla, D., Bongiorno, J., and Jabr, H. (1976). Modern wiener-hopf design of optimal controllers part i : The single-input-output case. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 21(1):3–13.
- [Zeglin, 1999] Zeglin, G. (1999). *The Bow Leg Hopping Robot*. Doctoral thesis in robotics, Carnegie Mellon University. CMU-RI-TR-99-33.

**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. ULUÇ SARANLI
Proje No:	114E277
Proje Başlığı:	Aktif Sönümlleme Denetimi İle Bacaklı Robotlarda Model Tabanlı Enerji Ve Koşma Kontrolü
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	18
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü. MÜHENDİSLİK F. BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/12/2014 - 01/12/2016
Onaylanan Bütçe:	163013.67
Harcanan Bütçe:	144192.57
Öz:	<p>Mobil robotların arazi şartlarında ihtiyaç duyulan hareketlilik ve performansı gösterebilmeleri için, bacaklı tasarımların yüksek potansiyele sahip oldukları bilinmektedir. Buna rağmen, gerek bacaklı hareketin matematiksel modellenmesi ve denetimindeki, gerekse bu yapıya sahip robotların güvenilir, dayanıklı ve yüksek performanslı olarak tasarlanmalarındaki zorluklar bu alandaki gelişmelerin yavaş ilerlemesine sebep olmuştur. Bu kapsamda yaygın olarak kabul görmüş olan Yaylı Ters Sarkaç (YTS) modeli, hem doğadaki birçok canlının koşma ve yürüme hareketlerini ifade edebilmiş, hem de bacaklı robot tasarımlarını estekleyebilmiştir. Buna rağmen bu modelin robotlar üzerinde pratik uygulanabilirliğinde özellikle sistemin enerji seviyesinin adımdan adıma verimli bir şekilde değiştirilebilmesi noktasında halen çözülmemiş birçok güncel problem bulunmaktadır. Tamamlamış olduğumuz bu proje kapsamında, bu modelin seri esnek eyleyiciye sahip bir bacak yapısı üzerinde, sanal olarak sönümlleme katsayısının değiştirilmesi aracılığı ile enerji ve güç açısından yüksek verimlilikte kontrolü için yeni bir yöntem önerilmiş, gerekli analizler gerçekleştirilerek sonuçlar deneysel bir platform üzerinde doğrulanmıştır.</p> <p>Bu amaç doğrultusunda öncelikle grubumuz tarafından geçmiş projelerde geliştirilmiş olan ve YTS modelinin tek bir adımdaki davranışını analitik olarak ifade edebilen çözümlerin geçerliliğini koruyacak bir şekilde seri esnek eyleyicili bir sistemin sönümlleme katsayısı değiştirilebilen bir YTS modeli gibi davranmasını sağlayacak bir kontrolcü önerilmiştir. Bu şekilde, sistemin kütle merkezinin YTS modeli dinamiklerine göre davranması sağlandıktan sonra, bir adımda sistemde istenilen enerji değişikliğini elde edebilmek için gerekli sanal sönümlleme katsayısı ilgili çözümlerin yarı-analitik ters çözümleri ile bulunmuş ve bu denetim yönteminin geçerliliği benzetim ortamında doğrulanmıştır.</p> <p>Bu şekilde analitik altyapısını kurmuş olduğumuz özgün kontrol yönteminin pratik gerçekleştirilebilirliği ve bilimsel geçerliliğini ortaya koymak için de proje kapsamında dikey eksende dinamik ve sürekli zıplama davranışlarını gerçekleştirebilecek olan bir deneysel platform tasarlanmış ve üretilmiştir. Önermiş olduğumuz özgün yöntemin bu platform üzerinde testleri gerçekleştirilmiş, ve literatürde sıklıkla gündeme getirilen ve bacak yay sabitinin sanal olarak değiştirilmesi fikrine dayanan alternatif yöntemlere enerji ve güç açısından çok daha verimli bir yaklaşım olduğu deneysel olarak ortaya konmuştur. Bu deneyleri takiben yöntemin iki boyutlu koşma davranışlarına genellenmesi ile ilgili analitik çalışmalar tamamlanmış ve dinamik koşma davranışlarının robotlarda verimli bir şekilde gerçekleştirilebilmeleri için yeni bir yöntem ortaya konmuştur.</p>
Anahtar Kelimeler:	bacaklı robotlar, koşma davranışının kontrolü, sanal sönümlleme kontrolü, seri esnek eyleyiciler
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

Proje Yapılan Yayınlar:	<ol style="list-style-type: none"><li>1- Stability of Planar Compass Gait Walking with Series Elastic Ankle Actuation (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum),</li><li>2- Eksik Eyleyicili Kendini Dengeleyen Küresel Tekerlekli Mobil Robot Üzerinde İntegral Kontrol ile Hassas Yol Takibi (Bildiri - Ulusal Bildiri - Sözlü Sunum),</li><li>3- Path Following with An Underactuated Self-Balancing Spherical-Wheel Mobile Robot (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</li><li>4- Toward Data-Driven Models of Legged Locomotion using Harmonic Transfer Functions (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</li><li>5- Stability and control of planar compass gait walking with series-elastic ankle actuation (Makale - İndekli Makale),</li><li>6- Parametric Identification of Hybrid Linear-Time-Periodic Systems (Makale - Diğer Hakemli Makale),</li><li>7- Energy Efficient Control of Monopedal Running Through Tunable Damping (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</li></ol>
-------------------------	---

TÜBİTAK