



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ATALET TEKERİ SARKAÇ SİSTEMİNİN TASARIMI, MODELLENMESİ VE
KONTROLÜ

MEHMET ALİ KOÇ

Aralık 2017

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ATALET TEKERİ SARKAÇ SİSTEMİNİN TASARIMI, MODELLENMESİ VE
KONTROLÜ

MEHMET ALİ KOÇ

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Mehmet Kürşat YALÇIN

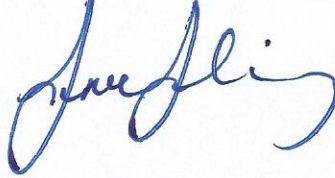
Aralık 2017

Mehmet Ali KOÇ tarafından **Mehmet Kürşat YALÇIN** danışmanlığında hazırlanan
“**ATALET TEKERİ SARKAÇ SİSTEMİNİN TASARIMI, MODELLENMESİ VE**
KONTROLÜ” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik Elektronik Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek
Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Mustafa Seçkin DURMUŞ, Pamukkale Üniversitesi



Üye : Yrd. Doç. Dr. Yusuf ŞAHİN, Niğde Ömer Halisdemir
Üniversitesi



Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet Kürşat YALÇIN, Niğde Ömer Halisdemir
Üniversitesi



ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri
üyeleri tarafından/....../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim
Kurulu’nun/....../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR V.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Mehmet Ali KOÇ

ÖZET

ATALET TEKERİ SARKAÇ SİSTEMİNİN TASARIMI, MODELLENMESİ VE KONTROLÜ

KOÇ, Mehmet Ali

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman

: Yrd. Doç. Dr. Mehmet Kürşat YALÇIN

Aralık 2017, 53 sayfa

Bu tez çalışmasında eksik eyleyicili mekanik sistemlerden biri olan atalet tekeri sarkaç sisteminin tasarımı, modellenmesi ve kontrolü üzerine çalışılmıştır. Atalet tekeri sarkaç sisteminin mekatronik tasarımı yapıp üretilmiştir. Atalet tekeri sarkaç sisteminin modeli doğrusallaştırılarak Doğrusal Kuadratik Regülatör kontrolcü tasarlanmıştır. Tasarlanan kontrolcü benzetim ortamına ve gerçek sisteme uygulanmış ve elde edilen sonuçlar gösterilerek tartışılmıştır. Nihai amaçta üniversitemiz Mekatronik Mühendisliği Bölümüne atalet tekeri sarkaç sistemi deney seti kazandırılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Atalet Tekerli Sarkaç Sistemi, Eksik Eyleyicili Mekanik Sistemler, UMS, LQR, Doğrusallaştırma, Benzetim, Gerçek Sistem

SUMMARY

DESIGNING, MODELING AND CONTROL OF INERTIA WHEEL PENDULUM

KOÇ, Mehmet Ali

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electric Electronics Engineering

Supervisor : Assistant Professor Dr. Mehmet Kürşat YALÇIN

December 2017, 53 pages

In this thesis; the designing, modeling and control of inertia wheel pendulum which is one of the under actuated mechanical systems is studied. The mechatronic design of the inertial pendulum system has been made and produced. A Linear Quadratic Regulator based controller is proposed after linearizing the model of inertia wheel pendulum. The results which obtained by applying the proposed controller to the real-time system and simulation model are discussed. As final purpose; inertia wheel pendulum testbed introduced into Department of Mechatronics Engineering at our university.

Keywords: Inertia Wheel Pendulum, Under Actuated Mechanical Systems, UMS, LQR, Linearization, Simulation, Real-time

ÖN SÖZ

Bu tez çalışması boyunca bilgi ve tecrübesi ile yönlendirerek gerek teknik bilgi gerekse de ilgili kaynaklara ulaşma konusunda destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli danışmanım Yrd. Doç. Dr. Mehmet Kürşat YALÇIN ve Yrd. Doç. Dr. Yusuf ŞAHİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xi
SİMGE VE KISALTMALAR	xii
BÖLÜM I GİRİŞ	1
BÖLÜM II ATALET TEKERİ SARKACI SİSTEMİNİN MEKATRONİK TASARIMI.....	14
2.1 Atalet Tekerı Sarkacı Siteminin Mekanik Tasarımı	14
2.2 Atalet Tekerı Sarkacı Siteminin Elektronik Tasarımı.....	19
BÖLÜM III ATALET TEKERİ SARKACI SİSTEMİNİN MODELİNİN ÇIKARTILMASI, DOĞRUSALLAŞTIRILMASI VE KONTROLCÜ TASARIMI....	25
3.1 Atalet Tekerı Sarkacı Sisteminin Modelinin Çıkartılması ve Doğrusallaştırılması .	25
3.2 Atalet Tekerı Sarkacı Sistemi İçin Kontrolcü Tasarımı.....	28
BÖLÜM IV LQR KONTROLCÜNÜN BENZETİM ORTAMINDA VE GERÇEK SİSTEMDE UYGULANMASI VE GÖZLEMLER.....	30
BÖLÜM V SONUÇ.....	46
KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Atalet tekeri sarkacı parametrelerinin değerleri	27
---	----



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Gövde parçasının çizimi	15
Şekil 2.2. Teker parçasının çizimi	15
Şekil 2.3. Zemin parçasının çizimi	16
Şekil 2.4. Parçaların birleştirilmiş hali.....	16
Şekil 2.5. Ana kartın şematik tasarımı	20
Şekil 2.6. Ana kartın pcb tasarımı.....	20
Şekil 2.7. Gerilim bölücü devresi	21
Şekil 2.8. Atalet tekeri sarkacı sisteminin veri iletim şeması	23
Şekil 2.9. Atalet tekeri sarkacı sisteminin kontrolünün Matlab Simulink modeli.....	23
Şekil 2.10. Kontrol bloğunun alt modeli.....	24
Şekil 3.1. Atalet tekeri sarkacı	26
Şekil 4.1. Atalet tekeri sarkaç sistemine uygulanan bozucu işareti	30
Şekil 4.2. Benzetim ortamında pozitif bozucu etkisinde gövdenin açısal konumu	31
Şekil 4.3. Gerçek sistemde pozitif bozucu etkisinde gövdenin açısal konumu	31
Şekil 4.4. Pozitif bozucu etkisiyle gövdenin açısal konumunun değişimi.....	32
Şekil 4.5. Benzetim ortamında pozitif bozucu etkisinde gövdenin açısal hızı	33
Şekil 4.6. Gerçek sistemde pozitif bozucu etkisinde gövdenin açısal hızı	33
Şekil 4.7. Pozitif bozucu etkisinde gövdenin açısal hızı.....	34
Şekil 4.8. Benzetim ortamında pozitif bozucu etkisinde atalet tekerinin açısal hızı	34
Şekil 4.9. Gerçek sistemde pozitif bozucu etkisinde atalet tekerinin açısal hızı	35
Şekil 4.10. Pozitif bozucu etkisinde atalet tekerinin açısal hızı.....	35
Şekil 4.11. Benzetim ortamında pozitif bozucu etkisinde uygulanan kontrol işareti	36
Şekil 4.12. Gerçek sistemde pozitif bozucu etkisinde uygulanan kontrol işareti	37
Şekil 4.13. Pozitif bozucu etkisinde uygulanan kontrol işareti.....	37
Şekil 4.14. Benzetim ortamında negatif bozucu etkisinde gövdenin açısal konumu	38
Şekil 4.15. Gerçek sistemde negatif bozucu etkisinde gövdenin açısal konumu	39
Şekil 4.16. Negatif bozucu etkisinde gövdenin açısal konumu	39
Şekil 4.17. Benzetim ortamında negatif bozucu etkisinde gövdenin açısal hızı.....	40
Şekil 4.18. Gerçek sistemde negatif bozucu etkisinde gövdenin açısal hızı.....	40

Şekil 4.19. Negatif bozucu etkisinde gövdenin açısal hızı	41
Şekil 4.20. Benzetim ortamında negatif bozucu etkisinde atalet tekerinin açısal hızı....	41
Şekil 4.21. Gerçek sistemde negatif bozucu etkisinde atalet tekerinin açısal hızı.....	42
Şekil 4.22. Negatif bozucu etkisinde atalet tekerinin açısal hızı	42
Şekil 4.23. Benzetim ortamında negatif bozucu etkisinde uygulanan kontrol işareti.....	43
Şekil 4.24. Gerçek sistemde negatif bozucu etkisinde uygulanan kontrol işareti.....	43
Şekil 4.25. Negatif bozucu etkisinde uygulanan kontrol işareti	44



FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 2.1. Atalet tekeri sarkacı sistemi	17
Fotoğraf 2.2. Enkoder yerine kullanılan potansiyometrenin birleştirilmesi	18
Fotoğraf 2.3. Motor şaftı ile atalet tekerinin elastik bağlantısı	18
Fotoğraf 2.4. Motor sürücü kartı ile ana kartının üstten görünümü.....	19
Fotoğraf 2.5. V-DAQ veri edinim kartı	22



SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
θ_b	Atalet tekeri sarkacı gövdesinin açısal konumu
θ_w	Atalet tekeri sarkacı tekerinin açısal konumu
l_b	Eksen noktası ile kütle merkezi arasındaki mesafe
l	Eksen noktası ile motorun eksen merkezi arasındaki mesafe
m_b	Atalet tekeri sarkacı gövdesinin ağırlığı
m_w	Atalet tekeri sarkacı tekerinin ağırlığı
I_b	Atalet tekeri sarkacı gövdesinin atalet momenti
I_w	Atalet tekeri sarkacı tekerinin atalet momenti
C_b	Atalet tekeri sarkacı gövdesinin dinamik sürtünme katsayısı.
C_w	Atalet tekeri sarkacı tekerinin dinamik sürtünme katsayısı
T_m	Motorun ürettiği tork
g	Yer çekimi ivmesi
u	Giriş işareti
K_m	Motorun tork sabiti
A_a, B_a	Atalet tekeri sarkacının ayrık zaman modelinin sırasıyla durum ve giriş matrisleridir.
A, B	Atalet tekeri sarkacının sırasıyla durum ve giriş matrisidir.

Kısaltma	Açıklama
LQR	Lineer Kuadratik Regulator
PPR	Devir Başına Darbe
DAQ	Veri Eldesi
DSC	Dinamik Yüzey Kontrol
UMS	Eksik Eyleyicili Mekanik Sistem
IDA-PBC	Arabağlantılı Sönümleyici Atama Pasiflik Tabanlı Kontrol
SMC	Kayan Mod Kontrol
MSS	Çoklu Kayan Yüzey
PHS	Port Hamiltonian Sistem
CLF	Kontrol Lyapunov Fonksiyonları

BÖLÜM I

GİRİŞ

Atalet tekeri sarkacı bir ucunda dönen bir tekerin olduğu bir ters sarkaç sistemidir. Atalet tekeri sarkaç sisteminde atalet tekerine etki eden bir eyleyici olmasına karşın iki adet serbestlik derecesi olması sebebiyle eksik eyleyicili mekanik sistemler (UMS) grubu altında sınıflandırılır. Daha çok robotik sistemlerde etkin olarak kullanılan eksik eyleyicili mekanik sistemler; sahip olduğu serbestlik derecesinden daha az sayıda eyleyiciye veya girişe sahip olan sistemler olarak tanımlanabilir. Atalet tekeri sarkaç sistemi ile birlikte dönel sarkaç sistemi, araba-çubuk sistemi, acrobot sistemi vb. sistemler eksik eyleyicili mekanik sistemler için test sistemleri olarak kullanılmaktadır. Günlük hayatta ise mobil robotlar başta olmak üzere robotik, otomobil, hava araçları, deniz altı araçları, uydular ve füzeler gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Eksik eyleyicili sistemlerin genelinde olduğu gibi atalet tekeri sarkaç sistemi de doğrusal olmayan bir sistemdir. Bununla birlikte eyleyici etki eden ile etki etmeyen serbestlik dereceleri arasında doğrusal olmayan bir bağlantı mevcuttur. Maliyetin düşürülmesi, kullanım alanının azaltılması, ağırlığın düşürülmesi, performanstaki iyileştirmeler gibi ihtiyaçlardan ötürü eksik eyleyici sistemler kullanılmaktadır. Kompleks işlevlerin yerine getirilmeye çalışılması ve doğrusal olmayan yapısı gibi sebepler bu tarz sistemlerin geliştirilmesinde yeni kontrol stratejileri gerektirmektedir. Bu bağlamda akademik çevrelerce bu konuya olan ilgi sürekli artmaktadır. Göreceli basit yapısı ve önerilen yeni kontrol kurallarının başarısının test edilmesinde en iyi sınama ortamlarından biri olması itibarıyla atalet tekeri sarkaç sistemi teoride ve pratikte birçok araştırmanın konusu olmuştur. Atalet tekeri sarkaç sistemi üzerine yapılan ilk çalışmalardan biri Spong (2001) tarafından yapılmıştır. Bu tarihten bu yana konunun güncelliği giderek artmaktadır.

Enev (2014) yaptığı çalışmasında atalet tekeri sarkacı sistemini kontrol etmek için iki farklı geri beslemeli doğrusallaştırma yöntemi önerip bunların karşılaştırmasını yapmıştır. İlk yöntemde doğrusal olmayan sistem için tam durumlu doğrusallaştırma (full-state linearization) yöntemini kullanarak doğrusal bir sistem modeli çıkartmıştır. Bu yeni model için kontrolcü tasarlayıp sınama ortamında (testbed) gerçek zamanlı sonuçlar elde etmiştir. İkinci yöntemde ise giriş-çıkış doğrusallaştırması (input-output

linearization) yöntemini kullanarak yeni bir doğrusal sistem modeli elde etmiştir. İlkinde olduğu gibi yeni model için bir kontrolcü tasarlayıp sinama ortamında gerçek zamanlı sonuçlar elde etmiştir. Çalışmanın sonuç kısmında bu iki geri beslemeli doğrusallaştırma yönteminin başarısını karşılaştırarak tam durumlu doğrusallaştırma yöntemi kararlı limit çevrimi sonucunu verirken giriş-çıkış doğrusallaştırma yöntemi ise asimptotik kararlı bir sonuç verdiği belirtmiştir.

Lixia ve Baoli (2016) atalet tekeri sarkacı için karma bir kontrol yöntemi önerip bir atalet tekeri sarkacı deney seti üzerinde uygulayarak gerçek zamanlı sonuçlar elde etmiştir. İki aşamalı olan bu karma yöntemin ilk aşamasında yukarı salınım (swing-up) kontrolcü tasarlanmıştır. Ardından sistemi denge noktası etrafında dengede tutabilecek bir kontrolcü tasarlanmıştır. Bu kontrolcü sistem denge noktası etrafında doğrusallaştırıldıktan sonra elde edilen yeni model için tasarlanmıştır. Sistem denge noktası çevresinde belirli bir aralığa, $\pm 10^\circ$, ulaşınca ikinci kontrolcüye geçiş yapacak şekilde tasarlanmıştır. Deney seti üzerinde kontrolcü denenerek gerçek zamanlı sonuçlar gösterilerek bu karma kontrolcü yönteminin başarısı belirtilmiştir.

Khoroshun (2016) üst denge noktası konumunda kararlı olması için bir atalet tekeri sarkacı sistemi üzerinde çalışmalar yapmıştır. Dinamik yüzey kontrol (DSC) yöntemini kullanarak tasarladığı kontrolcü ile sistemin asimptotik kararlı olduğunu Lyapunov fonksiyonları yöntemi ile ispatlamıştır. Devamında sistemin robustluğu incelenip robustluk aralığı tanımlanmıştır. Tasarlanan kontrolcü gerçek bir sistem üzerinde uygulanarak elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

He vd. (2017) eksik eyleyicili mekanik sistemler için (UMS) sonlu zamanlı kararlılaştıran gözlemleyici temelinde genel olarak uygulanabilecek kontrolcü yöntemi önermiştir. Bu yöntemi de eksik eyleyicili mekanik sistemlerden atalet tekeri sarkacı sistemi ve akrobatik robot modelini kullanarak benzetim sonuçları elde etmiştir. Çalışma, eksik eyleyicili mekanik sistemler için tasarlanmış bir sonlu zamanlı kararlılaştıran gözlemleyici kullanılarak kısmi durum geri beslemeli ve sanal bir çıkış geri beslemeli kontrolcülerin birleşmesiyle oluşan karma kontrolcü yöntemini ortaya atmıştır. İleri sürülen kontrolcünün genel olarak eksik eyleyicili mekanik sistemlerin kararlılaştırılmasında kullanılabileceği kararlılık analizleri yapılarak sunulmuş ve iki ayrı sistem için uygulanan benzetim sonuçları ile gösterilmiştir.

Zhang vd. (2016) çalışmasında tam eyleyicili olmayan atalet tekeri sarkacı sistemi için koordinat dönüşümü ve tersine zaman stratejisi temelinde sistemi kararlı hale getiren bir kontrolcü tasarlamıştır. İlk olarak koordinat dönüşümü yaparak kaskat doğrusal olmayan bir sistem modeli elde etmiştir. Devamında tersine zaman stratejisini kullanarak atalet tekeri sarkacının hareketini belirleyecek bir hareket yörüngesi tasarlamıştır. Son olarak ise bu yörüngeyi takip edecek ve yörüngede kalarak sistemin kararlı olmasını sağlayacak iki kontrolcü önermiştir. Bunlardan ilkinde LQR yöntemini, ikincisinde ise çıkış geri beslemeli kontrolcü yöntemini kullanarak tasarladığı kontrolcülerini nümerik örnek üzerinde uygulayıp benzetim sonuçları ile sistemin kararlı hale geldiğini göstermiştir.

Gritli vd. (2017) atalet tekeri sarkacı sistemi IDA-PBC (interconnection and damping assignment passivity-based control) ile tasarlanmış kontrolcü etkisinde kendinden oluşturduğu limit çevriminin takibini amaçlayan bir çalışma yapmıştır. Çalışma başında atalet tekeri sarkacı sistemi IDA-PBC temelli kontrolcü etkisindeyken 1 periyotlu kararlı limit çevrimini Hopf bifurkasyonu vasıtasıyla oluşturabileceği gösterilmiştir. Bu sayede; çalışmada incelenen problem oluşturulan bu hareketi referans kabul edip bu referansın takip edilmesi olarak belirtilmiştir. Yeni problem takip etme hatasının asimptotik kararlılığıdır. Tek yönlü kısıtlamaların tanımlanması ile bilineer matris eşitsizliklerinin lineer matris eşitsizliklerine dönüştürülmesi problemin çözümünde ana yöntem olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak tasarlanan kontrolcü üç farklı senaryo düşünülerek benzetim ortamında denenmiştir. İlkinde atalet tekeri sarkacı sistemi için sadece nominal dinamiklerin geçerli olduğu benzetim, ikincisinde sabit ve zamanla değişen sürtünme etkisinin altındaki benzetim ve üçüncüsünde sabit ve zamanla değişen dış bozucuların etkisindeki benzetim sonuçları verilerek sistemin robustluğu üzerinde de değerlendirilmede bulunmuştur.

Avelar vd. (2017) atalet tekeri sarkacı sisteminde doğrusal olmayan sürtünmelerinin telafisi üzerine yaptığı çalışmada atalet tekeri sarkacı sisteminin modellenmesinde özellikle viskoz ve Coulumb sürtünmelerinin etkisini de dikkate alarak geri beslemeli doğrusallaştırma yöntemi temelinde yeni kontrolcü tasarlanmıştır. Sistemde var olan sürtünmelerin modele eklenmesiyle oluşan yeni model için tasarlanan kontrolcü sürtünme etkisinin olmadığı model için tasarlanan kontrolcü ile karşılaştırılmış. Her iki kontrolcü deney seti üzerinde uygulanarak gerçek zamanlı sonuçları gösterilmiştir. Çalışma

sonucunda sürtünmeli model için tasarlanan kontrolcünün baarisının daha iyi olduğu gösterilmiştir.

Hernandez ve Sira-Ramirez (2003) atalet tekeri sarkacı sisteminin yukarı salınım ve dengelenmesi problemlerini birlikte çözebilen bir genelletirilmi PI kontrolcü tasarımı gerekletirmitir. Sarkacın açısal konumunun tek ölçülen durum değişkeni olarak kullanıldığı bu çalışmada SMC (sliding mode control) temelli genelletirilmi PI ve sürekli zamanlı genelletirilmi PI olmak üzere iki farklı kontrolcü tasarımı önerilmiştir. Deney düzeneği üzerinde uygulanan her iki kontrolcünün başarısı gerçek zamanlı sonuçlar gösterilerek belirtilmiştir.

Bapiraju vd. (2004) atalet tekeri sarkacı sisteminin dengelenmesi ve kontrol edilmesi metotları üzerine yaptığı çalışmada  farklı doğrusallaştırma yöntemine durum geri beslemeli kontrolcü tasarlamış ve benzetim ortamında ve gerçek sistemde uygulayarak elde ettiği sonuçları göstermiştir. Bunlara ek olarak bulanık mantık ile kontrolcü tasarlamış ve benzetim ortamında ve gerçek sistemde uygulayarak elde ettiği sonuçları göstermiştir. İlkinde doğrusal olmayan sistemi denge noktası etrafında doğrusallatırmıtır. İkincisinde tüm sistemi doğrusal ve doğrusal olmayan iki alt sistem formuna getirip doğrusal olmayan alt sistem için lineer regülatör tasarlayarak doğrusallaştırma yapmıştır. csnde model dönüşümü yaparak sistemin doğrusal modelini elde etmiştir. Son olarak bir bulanık mantık kontrolcü algoritması tasarlayarak sisteme uygulamıştır.

Acosta ve Lopes-Martinez (2005) iki serbestlik derecesi olan eksik eyleyicili sistemlerin yapıcı yönde geri beslemeli doğrusallatırılması konusunda yoğunlamıtır. Klasik geri beslemeli doğrusallatırmanın ve Lyapunov fonksiyonlarının kullanıldığı bir sözde kod oluşturulmuştur. Bu sözde kod sayesinde her bir sistem için sürtünme etkilerinin yapıcı yönde modele eklenmesi amaçlanmıştır. Araba üstündeki sarkaç, atalet tekeri sarkacı ve dönel sarkaç sistemlerinde bu yöntem uygulanıp ilgili harici kontrolcü tasarlanmıştır. Dönel sarkaç sistemi deney ortamında gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

IDA-PBC yönteminden yola çıkılarak atalet tekeri sarkacı sistemine uygulanan torku önceden belirlenen sınırlar içinde kalmasını sağlayarak sistemin performansı iyiletirilmeye çalışılmıştır (Santibanez vd., 2005). Tasarlanan kontrolü sayesinde;

uygulanacak kontrol işaretinin önceden belirlenmiş ya da sistemin mekanik özelliklerinden doğan sınırlar içinde kalması sağlanmıştır. Sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış kontrolcülerin performansları yapılan benzetimlerin sonuçları gösterilerek karşılaştırılmıştır.

Qaiser vd. (2006) MSS (multi sliding surface) kontrol yöntemini kullanarak atalet tekeri sarkacı sistemi için kontrol yöntemi tasarlamıştır. Sisteme kısmi geri beslemeli doğrusallaştırma uygulayarak sistem modelini kaskat bir formda dönüştürmüştür. Böylece MSS kontrol yönteminin kullanılabilmesi sağlanmıştır. Ayrıca Lyapunov fonksiyonları ile oluşturulan bu formun kararlılığı analiz edilmiştir. Tasarlanan kontrolcü benzetim ortamında denenerek elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Bir başka çalışmada ise atalet tekeri sarkacı sisteminin DSC (dynamic surface control) yöntemi kullanılarak kontrol edilmesi amaçlanmıştır (Qaiser vd., 2006). İki aşamalı yöntemde ilk aşamada Kontrol Lyapunov fonksiyonları (CLF) yöntemi kullanılarak kararlı olan bir sistem modeli elde edilmiştir. İkinci aşamada DSC yöntemi ile atalet tekeri sarkacı sisteminin önceden belirtilmiş bir kararlı yörüngeyi takip etmesi sağlanmıştır. Tasarlanan ikili kontrolcü yapısının uygulanmasıyla elde edilen benzetim sonuçları gösterilmiştir. Devam niteliğinde; atalet tekeri sarkacı sistemi için önerilen yeni bir doğrusal olmayan kontrolcü tasarımı önerilmiştir (Qaiser vd. 2007). Kısmi geri beslemeli doğrusallaştırma ve model dönüşümü uygulanarak kaskat bir doğrusal ve doğrusal olmayan alt sistem elde edilmiştir. Bu ikili yapı için sıfır dinamikleri sağlayacak bir kontrolcü ile sistemi kararlılaştıracak kontrolcü önerilmiştir. DSC temelli olan bu tasarımın başarısı benzetim ortamında sınanarak belirtilmiştir. Mehdi vd. (2012) yaptığı çalışmada ise atalet tekeri sarkacı sisteminin ayrık zamanlı DSC kontrolü gerçekleştirilmiştir. Kısmi geri beslemeli doğrusallaştırma uygulanarak sürülen ve süren olmak üzere iki alt sistem formunda model elde edilmiştir. Sürülen alt sistem için Lyapunov kontrol fonksiyonları temelli kontrolcü, süren alt sistem için DSC temelli bir kontrolcü oluşturulmuştur. Ardından kontrolcüler ayrık zaman uzayına dönüştürülmüştür. Benzetim ortamında sürekli zamanlı ve ayrık zamanlı kontrolcüler test edilerek iki kontrolcünün başarısı karşılaştırılmıştır.

Atalet tekeri sarkacı sistemi üzerine yapılan çalışmalardan bir diğeri de Huaven vd. (2008) tarafından ileri sürülen yeni bir kararlılık tasarımı yöntemidir. İlk önce koordinat dönüşümü uygulanarak elde edilen yeni model için geri basamaklama (backstepping) tekniği ve satürasyon fonksiyonları birlikte kullanarak sistemi kararlı hale getiren bir

kontrolcü tasarlanmıştır. Sistem için önerilen satürasyon fonksiyonları ile birlikte yapının kararlılık analizi yapılmış ve asimptotik kararlı olduğu gösterilmiştir. Benzetim ortamında elde edilen sonuçlar ile tasarlanan kontrolcünün başarısı gösterilmiştir.

Eksik eyleyicili mekanik sistemler için kararlı limit çevrimi üretilmesine yönelik çalışmada atalet tekeri sarkacı sistemi üzerinde uygulama yapılmıştır (Andary vd., 2008). Kısmi geri beslemeli doğrusallaştırma uygulanarak elde edilen sistem modelinin kararlı bir limit çevrimini takip etmesi amaçlanmıştır. Burada sistemin kararlı olmasını sağlayacak referans limit çevrimi seçimi bir optizimasyon problemi olarak tanımlanmıştır. Üretilen yörüngenin takibi için ise klasik PD kontrolcü tasarlanmıştır. Üretilen kararlı limit çevrimi referansı ve tasarlanan kontrolcü atalet tekeri sarkacı deney setinde uygulanarak elde edilen sonuçlar ve benzetim sonuçları belirtilmiştir. Bu çalışmanın devamı niteliğinde olan çalışmada Andary vd. (2009) atalet tekeri sarkacı sisteminde sürekli bozucu etkilerinin hesaplatılıp giderilmesini sağlayarak önceki çalışmasını genişletmiştir. Bahsi geçen çalışmada kullandığı kontrolcü tasarımına ek olarak bozucu etkilerini hesaplatmada kullanılacak bir parametrenin modele eklenmesiyle bozucu etkilerinin giderilmesi amaçlamıştır. Atalet tekerine bozucu bir ağırlığın eklenmesi ve açölçerin ofsetinin olması gibi sürekli bozucu etkileri altında önerilen yöntemin başarısı deney ortamında gerçek zamanlı sonuçlarla gösterilmiştir. Andary vd. (2012) eksik eyleyicili mekanik sistemlerin kontrol edilmesi için iki parçalı modelden bağımsız kontrolcü yapısını atalet tekeri sarkacı sistemine uygulayan bir çalışma da yapmıştır. Sistemin modelinin çıkartılmasına ve kullanılmasına gerek olmayan bu kontrolcü de ilk olarak limit çevrimi referansını takip etmesini sağlayacak bir kontrolcü işareti üretilmesi öngörülmüştür. İkinci modelden bağımsız kontrolcü ise sistemin durum değişkenini her bir yarım döngü bitiminde istenilen değere getirmeyi amaçlamaktadır. Böylece referans takibi sağlanmıştır. Hem deney setinden hem de benzetim ortamından elde edilen sonuçlar gösterilerek kontrolcü yapısının gürbüzlüğü üzerinde değerlendirilmelerde bulunulmuştur.

Luna ve Auigular (2010) atalet tekeri sarkacı sisteminin yörüngede kararlılaştırılması için iki farklı kontrolcü önermiştir. Her iki kontrol yöntemi de eyleyicinin doyuma ulaşmasını önleyen kontrolcü parametrelerinin hesaplanmasını ön görür. Sınırlandırılmış giriş işaretinin uygulandığı istem ilk önce denge noktası etrafında doğrusallaştırılır. Devamında nyquist eğrisi çizilerek ilgili bölgeler tanımlanır. Son olarak birinci yöntemde

tanımlayıcı fonksiyonlar kullanılarak giriş işaretini doyuma ulaştırmayan kontrolcü parametreleri uygulanır. İkinci yöntemde ise LPRS (Locus of a Perturbed Relay System) kullanılarak giriş işaretini doyuma ulaştırmayan kontrolcü parametreleri uygulanır. Her iki kontrolcü benzetim ortamında ve gerçek zamanlı denenerek elde edilen sonuçlarla birlikte kontrolcülerin performansları karşılaştırılmıştır.

Atalet tekeri sarkacı sistemi için SMC yöntemini kullanarak çıkış geri beslemeli kontrolcü tasarlanıp sistemin kararlı olması sağlanmıştır (Khalid ve Memom, 2014). Öncelikle sistem doğrusal olan ve doğrusal olmayan iki alt sistem şeklinde kaskat bir forma dönüştürülmüştür. Doğrusal olmayan alt sistem CLF (Control Lyapunov Function) yöntemi ile global asimptotik kararlı forma getirilmiştir. Doğrusal alt sistem için SMC metodunu kullanarak bir kontrolcü tasarlanmıştır. Tasarlanan kontrolcü uygulandığında tüm sistemin kararlı olduğu gösterilmiştir. Devamında yüksek kazançlı gözlemleyici kullanılarak tüm sistem çıkış işaretli geri besleme formuna dönüştürülmüştür. Gözlemleyici ile kestirilen değişkenler ölçülemeyen değişkenler yerine kullanılmıştır. Benzetim ortamında elde edilen sonuçlarla tasarlanan kontrolcünün başarısı gösterilmiştir. Khalid ve Memon (2016) devam niteliğindeki çalışmada bir önceki çalışmayla benzer biçimde atalet tekeri sarkacı sistemi için genişletilmiş yüksek kazançlı gözlemleyiciyi kullanarak çıkış geri beslemeli kontrolcü tasarlayıp benzetim ortamından elde ettiği sonuçları göstermiştir. Bu çalışmada atalet tekeri sarkacı sistemine iki kere model dönüşümü uygulanarak sistem bir önceki çalışmada önerilen genel kontrol edilebilir forma dönüştürmüştür. Bu kısımda durum değişkenlerini yüksek kazançlı gözlemleyici kullanarak kestirilen değişkenleri uygulamıştır. İlk çalışmada olduğu gibi doğrusal olmayan alt sistem için CLF yöntemini, doğrusal alt sistem için SMC yöntemini kullanarak kontrolcü tasarımı yapmıştır. Benzetim ortamında elde ettiği sonuçları göstererek ölçülen değişkenlerin performansı ile gözlemleyici tarafından kestirilen değişkenlerin performansı karşılaştırılmıştır. Ayrıca gözlemleyici durumunda bir miktar gecikmenin varlığından söz edilmiştir.

Atalet tekeri sarkacı sistemi için yeni bir SMC kontrol yöntemini Sun vd. (2015) önermiştir. Yaptıkları çalışmada sistem modeline gürültü ve bozucu gibi bilinmeyen etkileri ifade edebilecek değişken eklenmiştir. İlgili model dönüşümlerini yaparak tanımladığı hata denklemleri üzerinden yeni bir SMC kontrol yöntemi önermiştir. Önerilen kontrol yöntemi ile atalet tekeri sarkacı sistemi için tasarlanan kontrolcü üç

farklı senaryoya benzetim ortamında uygulanmıştır. İlkinde herhangi bozucu etkisinin olmadığı, ikincisinde bozucu etkisinin olduğu ve üçüncü senaryoda atalet tekeri sarkacı sistemindeki kütle ve atalet gibi büyüklüklerin hatalı ölçüldüğü varsayımı yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar gösterilerek her bir durum için sergilenen performanslar karşılaştırılmıştır.

Haddad vd. (2015) atalet tekeri sarkacı sisteminin kararlı hale gelmesinde model referanslı adaptif IDA-PBC yöntemini önermiştir. Çalışmanın temel amacı IDA-PBC yapısı ile yörünge izleme hatalarını daha hızlı bir şekilde giderecek bir adaptasyon kuralını birleştirmektir. Atalet tekeri sarkacı sistemi modeli koordinat dönüşümü kullanılarak Hamilton denklemleri şeklinde ifade edilmiş ve Hamiltonian fonksiyonu elde edilmiştir. IDA-PBC yöntemi kullanılarak sistemi kararlı hale getiren bir kontrolcü kuralı öne sürülmüştür. Devamında hatayı daha çabuk giderecek bir hata değişkeni kontrol kuralına eklenmiştir. PCHS (port controlled Hamiltonian systems) kullanılarak bu hata değişkeninin katsayılarını kestiren adaptif bir kontrol kuralı oluşturulmuştur. Gerçek modelden elde edilen PCHS değerlerini referans olarak alıp istenilen PCHS değerleri ile referans farkından doğan hatanın kontrol edilmesi tasarımın genel amacıdır. Deney seti üzerinde ve benzetim ortamında hem IDA-PBC ile tasarlan kontrolcü hem de model referanslı adaptif IDA-PBC ile tasarlan kontrolcü denenmiştir. Elde edilen sonuçlar gösterilerek her iki kontrolcünün performansı değerlendirilmiştir. Genişleterek yaptığı diğer bir çalışmada ise atalet tekeri sarkacı sisteminin kararlı kılınıp bozucu etkilerine karşı gürbüz bir özellik göstermesi amaçlanmıştır. Model referanslı adaptif IDA-PBC olarak tasarlanan kontrolcü ile kontrol edilen sistem, eşlenmiş bozucu etkisi altında Monte Carlo Simülasyon analizi yapılarak sistemin gürbüzlüğü değerlendirilmiştir.

Ahsan vd. (2017) atalet tekeri sarkacı sisteminin model tabanlı öngörülü kontrol ile kararlı hale getirilmesi üzerinde durmuştur. Atalet tekeri sarkacı sistemi için genelleştirilmiş öngörülü kontrol tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bir sonraki aşamada Laguerre fonksiyonları yöntemi kullanılarak model tabanlı öngörülü kontrol tasarımı oluşturulmuştur. Bu sayede sistemin daha dinamik ve gürbüz bir özellik sergilemesi amaçlanmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen her iki kontrolcü benzetim ortamında uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar gösterilerek her iki kontrolcünün performansı karşılaştırılmıştır. Başka bir çalışmada atalet tekeri sarkacı için doğrusal olmayan model

öngörölü kontrol yöntemi üzerinde durulmuştur (Sowman vd., 2015). Önerilen doğrusal olmayan model öngörölü kontrol yöntemi ile tasarlanan kontrolcü; kontrolcüde kullanılan doğrusal olmayan problemin çözümü için geçen süre büyük olduğu için deney seti üzerinde uygulanamamıştır. Gerçek zamanlı olarak uygulanması amacıyla bu kontrolcüye dayalı bir ağ yapısı oluşturularak yaklaşık kesinleştirme (approximate explicit) gerçekleştirilmiştir. ağ yapısı atalet tekeri sarkacı sisteminin kontrol edilmesinde kullanılacak mikroişlemci gibi ekipmanların özellikleri dikkate alınarak oluşturulmuştur. Her iki yöntemle oluşturulan kontrolcüler benzetim ortamında uygulanmış ve elde edilen sonuçlar gösterilerek performansları karşılaştırılmıştır.

Zayane-Aissa vd. (2015) bozucu etkisindeki eksik eyleyicili mekanik sistemlerin kontrolü üzerine yaptığı çalışmada atalet tekeri sarkacı sistemi için yüksek dereceli SMC yöntemini kullanarak bir kontrolcü tasarımı gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada başarmak istenen bozucu etkilerinin sistemin kontrolü üzerindeki olumsuz etkileri gidermektir. Bunu da atalet tekeri sarkacı sistemi modeline bozucu etkisini de belirten bir değişken ekleyerek sağlamıştır. Devamında yarı-sürekli yüksek dereceli SMC kontrol kuralı için üç dereceli bir kayan yüzey değişkeni oluşturmuştur. Değişken denklemlerinde kullanılan çıkış işaretinin türevlerini ise yüksek dereceli SMC türevleyici kullanarak gerçekleştirmiştir. Tasarlanan kontrolcü benzetim ortamında uygulanarak değişik bozucu etkilerine karşı göstermiş olduğu performanslar karşılaştırılmıştır.

Newton mekaniği PHS sistemler için ayrık zamanlı IDA-PBC kontrol kuralı önerenilen çalışmada atalet tekeri sarkacı üzerinde uygulanmıştır (Aoues vd., 2015). İlk başta genel manada Newton mekaniği için PHS sistem modelinin tanımı yapıldıktan sonra bu modele göre yine genel bir sürekli zamanlı IDA-PBC kontrolcü tasarım yöntemi gösterilmiştir. Devamında ayrık zamanlı PHS sistem modeli sürekli zamanlı PHS sistem modeline yaklaşım yapılarak oluşturulmuştur. Bu ayrık zamanlı PHS sistem modeli için de ayrık zamanlı bir IDA-PBC kontrol kuralı önerilmiştir. Elde edilen kontrol kuralı ile örnekleme zamanından bağımsız olarak sistemin kararlı davranış sergilediği ispatlanmıştır. Son olarak bu kontrolcü bir atalet tekeri sarkacı sistemine benzetim ortamında uygulanmıştır. Farklı örnekleme zamanları için elde edilen sonuçlar gösterilerek kontrolcünün gösterdiği performanslar değerlendirilmiştir.

Lu vd. (2016) atalet tekeri sarkacı sisteminin global kararlılığı için yeni bir SMC temelli kontrol stratejisi önermiştir. Çalışmada atalet tekeri sarkacı sistemine model dönüşümü uygulanarak SMC yöntemiyle kontrol edilebilir hale getirilmiştir. Ardından sistemin bozucu etkilerine cevap vermesini sağlayacak bir değişken eklemiştir. Önerdiği kontrol kuralında ilk olarak başlangıç koşulları üzerine etki etmesi için yardımcı bir fonksiyon tanımlanmıştır. Devamında SMC tabanlı bir kontrol kuralına bu yardımcı fonksiyon eklenmiş ve Lyapunov fonksiyonlarını kullanarak sistemi kararlı hale getirecek kontrolcü işareti oluşturmuştur. Önerilen kontrolcü ile sistemin kararlı olduğunun analizi yapılmış ve kararlı olduğu ispatlanmıştır. Tasarlanan kontrolcü benzetim ortamında atalet tekeri sistemine uygulanmış ve değişik bozucu etkileri altında göstermiş olduğu performanslar elde edilen sonuçlar ile gösterilmiştir.

Larimi vd. (2016) eksik eyleyicili bir sisteminin kontrolünü iki katmanlı hibrit bir kontrolcü ile gerçekleştirmiştir. Kontrolcünün tasarımında izlenen yol; ilk katmanda çıkış işareti geri beslemeli doğrusallaştırma yöntemi ile sistemin doğrusal olmayan özelliklerini gidererek doğrusal davranmasını ve eyleyici etkisi altında olmayan değişkeninin kararlılığını sağlamaktır. İkinci katmanda ise eyleyici etkisi altındaki değişkenin bulanık mantık tabanlı bir kontrolcü ile önceden belirtilen denge noktasına ulaşmasını sağlamaktır. Birinci katmanda sistem kararlı hale geldikten sonra ikinci kontrolcünün devreye girmesi ön görülmüştür. Benzetim ortamında iki katmanlı hibrit kontrolcü ve sadece çıkış işareti geri beslemeli kontrolcü uygulanıp elde edilen sonuçlar gösterilerek kontrolcülerin performansı karşılaştırılmıştır.

Atalet tekeri sarkacı sistemini global kararlı hale getirilmesinin üç farklı satürasyon tekniği ile gerçekleştirilebileceği önerilmiştir (Ye vd., 2008). Çalışmada atalet tekeri sarkacı sistemi modeline model dönüşümü uygulanmıştır. Önerilen ilk teknikte iki kere geri basamaklama yöntemi uygulanmıştır. Bu durum nedeniyle iki kere türevlenebilir bir satürasyon fonksiyonu kontrol kuralı olarak önerilmiştir. Önerilen kontrol kuralı ile atalet tekeri sarkacı sisteminin kararlı olduğu Lyapunov kararlılık analizi kullanılarak ispatlanmıştır. İkinci ve üçüncü teknikte ise model dönüşümü sonucu elde edilen yeni model yüksek dereceli terimleri olan bir integral serisi olarak varsayılmış ve modeli ileri beslemeli forma dönüştürecek ikinci bir model dönüşümü uygulanmıştır. Devamında ise bu yüksek dereceli terimlerin sönümlenip tüm sistemi asimptotik kararlı bir aralığa

sokacak küçük satürasyon seviyeleri tanımlanmış ve bu seviyeleri sağlayacak satürasyon fonksiyonları önerilmiştir.

Atalet tekeri sarkacı sisteminin bozucuları aktif reddeden doğrusal kontrol üzerine yapılan çalışmada genelleştirilmiş PI bozucu gözlemleyici kullanılmıştır (Ramirez-Neria vd., 2015). Çalışmada ilk olarak sistem denge noktası etrafında doğrusallaştırılarak durum geri beslemeli kontrol uygulanmıştır. Devamında modele bozucu etkilerini ve doğrusal modelde kendini göstermeyen sistem dinamiklerini belirtmek amacıyla yeni bir değişken eklenmiş ve model dönüşümü uygulanmıştır. Yeni modele ise bozucu etkilerinin değerini altıncı dereceden polinom uydurma kullanılarak genelleştirilmiş PI kontrolcü önerilmiştir. Bu sayede bozucu etkilerinin kestirilmesi de sağlanmıştır. Atalet tekeri sarkacı sistemine uygulanan her iki kontrolcünün performansları elde edilen sonuçlar gösterilerek karşılaştırılmıştır.

Owczarkowski vd. (2014) LQR (Linear Quadratic Regulator) ile atalet tekeri sarkacı sistemini iz takibi kontrolünü gerçekleştirmiştir. Atalet tekeri sarkacı sistemini denge noktası etrafında doğrusallaştırarak elde edilen doğrusal sistem modeline LQR uygulanmasındaki amaç mümkün olan en optimal değerlere ulaşmaya çalışmaktır. Bu da Riccati denklemleri ile tanımlanan maliyet fonksiyonu ile gerçekleştirilir. Ayrık zamanda maliyet fonksiyonunu hesaplamak daha kolay olduğu için önerilen LQR katsayıları atalet tekeri sarkacı sisteminin ayrık zaman modeline göre hesaplatılmıştır. Belirlenen LQR katsayıları atalet tekeri sarkacı sistemi deney setine uygulanarak farklı durumlar için gösterdiği performanslar karşılaştırılmıştır.

Nguyen ve Huynh (2016) atalet tekeri sarkacı sistemini dengelemek için iki çevrimli kontrol yapısı üzerine çalışmıştır. Ana çevrim olarak LQR, iç çevrim olarak PI kontrolcü önerilmiştir. LQR atalet tekeri sistemini denge noktasına getirip kararlı kılmayı amaçlamaktadır. PI kontrolcü ise ana çevrimde giriş olarak kullanılan torkunun istenilen değerde olmasını sağlamak için DC motora uygulanması gereken voltajı kontrol etmek içindir. Önerilen kontrolcü tasarımı benzetim ortamında ve gerçek sistem üzerinde uygulanarak elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

Gajamohan vd. (2012) Cubli olarak adlandırdığı 3 boyutlu (3B) atalet tekeri sarkacı sistemini gerçekleştirmek için ilk önce prototip olarak tek eksenli bir atalet tekeri sarkacı sistemi üzerinde çalışmıştır. Çalışmanın amacı tek köşesi üzerinde dengede durabilen 3B

bir atalet tekerinin mekanik ve elektronik tasarımı ile kontrolünü gerçekleştirmektir. Prototip aşamasında sadece tek eksenli bir atalet tekeri sarkacı sistemi tasarlanıp üretilmiş ve kontrolü sağlanmıştır. Tasarımda atalet tekeri yüksek hızla dönerken ani frenleme yapılarak yukarı zıplaması planlanmıştır. Atalet tekeri sarkacı sisteminin LQR ile tasarlanan kontrolcü kullanılarak denge noktası etrafında kararlı davranması sağlanmıştır. Prototip tasarlanırken seçilen her bir parçanın ve önerilen her bir yöntemin 3B Cubliye uyumlu olması dikkate alınmıştır. Önerilen LQR kontrolcü atalet tekeri sistemi denge noktası etrafında doğrusallaştırdıktan sonra elde edilen ayrık zaman modeli kullanılarak tasarlanmıştır. Prototip üzerinde uygulanan kontrolcü ile elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Prototip çalışmasının genişletilmesiyle Gajamohan vd. (2013) Cubli 3B atalet tekeri sarkacı sistemini bir köşesi üzerinde dengelemeyi başarmıştır. İlk başta Cublinin prototip çalışması baz alınarak mekatronik tasarımı gerçekleştirilmiştir ve üretimi yapılmıştır. Kullanılan üç atalet tekeri ve Cubli yuvası gövdeler olarak kabul edip çok gövdeli yapılar için kullanılan Kane denklemleri yöntemi kullanılarak 3B atalet tekeri sisteminin modeli çıkartılmıştır. Sistem denge noktası etrafında doğrusallaştırılmıştır. Elde edilen doğrusal sistem modelinde bulunan parametreler frekans bölgesi temelinde bir offline sistem tanımlama yöntemi kullanılarak kestirilmiştir. Eğim kestirimini yapmak için her bir yüzeye yerleştirilen altı ivmeölçerden alınan ölçümleri kullanan bir algoritma kullanılmıştır. Cublinin kontrol edilmesi için durum matrisinde gözlemlenemeyen yaw açısı açık bir integreter olarak belirtilmiş ve kontrol edilemeyen kısımlar kanonik model dönüşümü yapılmıştır. Bu durumda uygulanan LQR kontrolcü ile 3B atalet tekeri sarkacı sistemi bir köşesi üzerinde dengelenerek elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Son olarak Muehlebach ve D'Andrea (2017) 3B atalet tekeri sarkacı sisteminin doğrusal olmayan analizi ve kontrolünü gerçekleştirmiştir. Çalışmada hareket denklemlerinden yola çıkarak 3B atalet tekeri sisteminin modeli çıkartılmıştır. Geri basamaklama (backstepping) yöntemi kullanılarak hemen hemen her yerde kararlı kılacak bir kontrol kuralı önerilmiştir. Önerilen kontrol kuralının sistemi kararlı kıldığı Lyapunov fonksiyonları kullanılarak gösterilmiştir. Devamında ise model dönüşümü yapılarak durum geri beslemeli doğrusallaştırma yöntemi ile bir kontrolcü önerilmiştir. İkinci kontrolcünün amacı sistemin önceden tanımlanmış dengesiz hareket yörüngesini minimum hata ile takip etmesini sağlamaktır. Yukarı zıplatma aşamasında önceden ideal bir yörünge tanımlanmıştır. Birçok kez deneme yanılma yapılarak en optimal yukarı zıplatmayı gerçekleştirmek için gradyan temelli bir öğrenme algoritması kullanılmıştır. Tasarlanan

kontrolcülerin ve yukarı zıplatma hareket yörüngesinin 3B atalet tekeri sarkacı sistemine uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar gösterilerek başarıları değerlendirilmiştir.

Bu tezin konusu üniversitemizin Mekatronik Mühendisliğine kazandırılmak amacıyla atalet tekeri sarkacı deney düzeneğinin yapılmasıdır. Bu amaçla atalet tekeri sarkacı deney düzeneğinin mekatronik tasarımı ve üretimi, atalet tekeri sarkaç sisteminin modelinin çıkartılması, bu modelin lineerleştirilmesi, lineer modele uygun kontrolcünün tasarlanmasını konuları üzerinde durulmuştur. Tasarlanan kontrolcü benzetim ortamında ve gerçek sistemde uygulanarak elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ışığında başarılı ve başarısız olarak görülen hususlar üzerinde durulmuştur. İleriki aşamalarda bu deney düzeneğinin uygulamalı eğitimin bir parçası olarak etkin bir şekilde kullanılması arzulanmaktadır.

BÖLÜM II

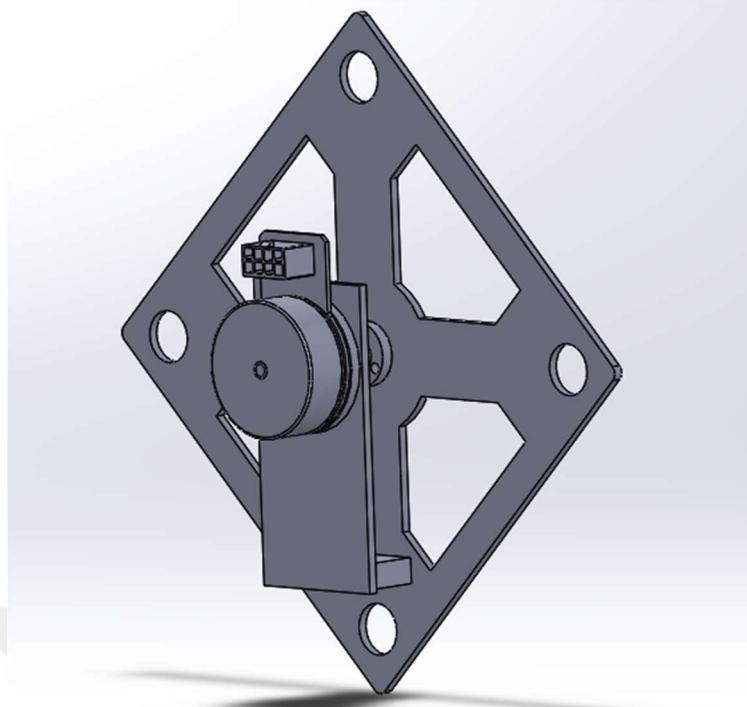
ATALET TEKERİ SARKACI SİSTEMİNİN MEKATRONİK TASARIMI

Genel olarak atalet tekeri sarkacı sisteminin mekatronik tasarımı yapılırken ve gerekli parçalar seçilirken Gajomohan vd. (2012) tarafından yapılan Cubli prototip çalışması baz alınmıştır. Üretim ve montaj aşamasında ise birçok değişiklikler gerçekleştirilmiştir. Bunlardan en önemlisi sistemin kontrolü için harici bir mikroişlemci kartı yerine bilgisayar ortamında Matlab Simulink'in tercih edilmesidir. Bu sayede tezin önemli amaçlarından biri olan öğrencilerin üzerinde çalışabileceği, kullanımı kolay ve öğrenmesi basit bir deney seti düzeneğinin oluşturulması amaçlanmıştır.

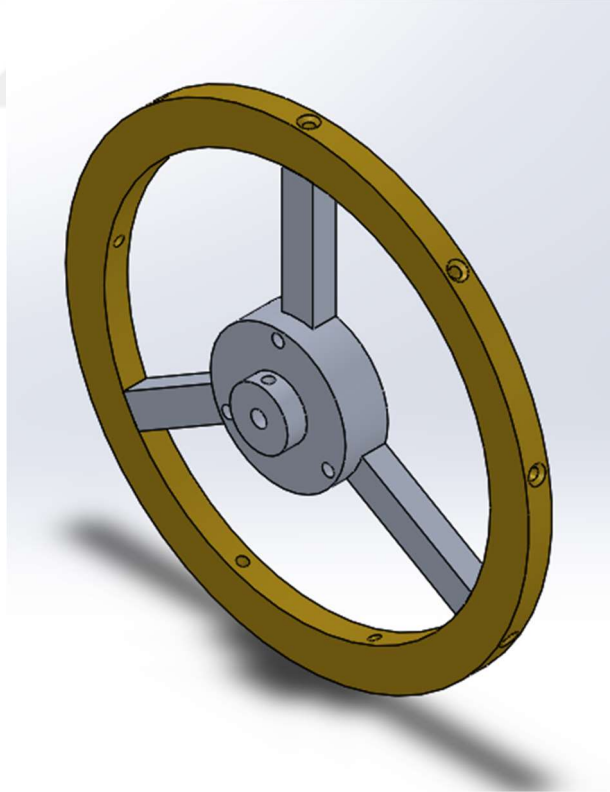
Bir başka çalışmada ise Merlo-Zapata vd. (2014) atalet tekeri sarkacı sistemini modelledikten sonra imalatını gerçekleştirerek kendi deney setlerini yapmışlardır. Mekanik yapılar, güç beslemesi ile veri elde edilmesi ve işlenmesi olmak üzere çalışma üç ana bölümde yürütülmüştür. İki enkoder, DC servo motor, analog servo motor sürücü, güç kaynağı, DAQ kartı, bilgisayar ve atalet tekeri sarkacı sisteminin mekanik aksamaları kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında atalet tekeri sarkacı sisteminin tasarımı mekanik ve elektronik olmak üzere iki bölümde incelenmiştir.

2.1 Atalet Tekerı Sarkacı Siteminin Mekanik Tasarımı

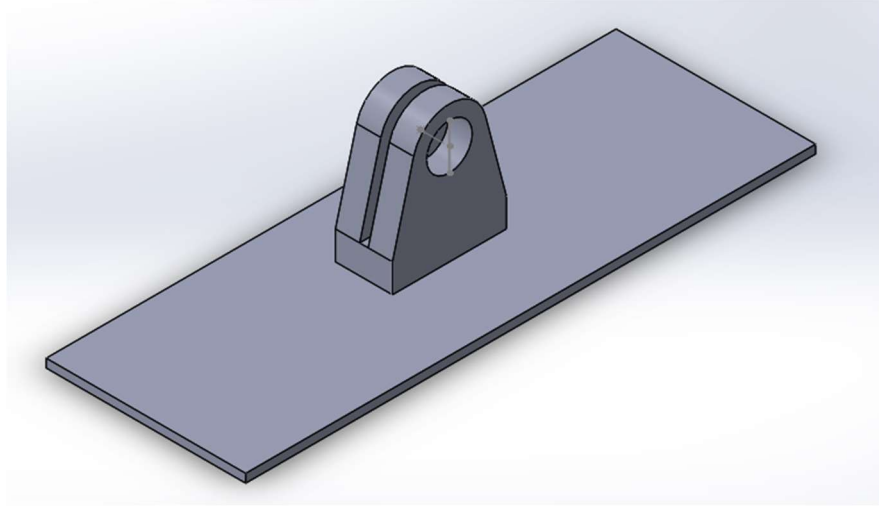
Gajomohan vd. (2012) yaptığı çalışmaya benzer şekilde gövde kısmı için 15x15 cm boyutlarında düzlemsel bir levha düşünülmüştür. 12 cm çapındaki atalet tekeri kendi merkezi ile gövdenin orta noktası çakışacak şekilde yerleştirilmiştir. Gövdenin bir köşesinden levha düzleminin normali doğrultusunda bir eksen, dönme eksenı noktası olarak kabul edilmiştir. Bu eksen noktasının serbestçe dönmesini sağlayacak bir platform hazırlanmıştır. Bütün katı parçalar Solidworks ortamında tasarlanmıştır. Tasarım yapılırken tekeri döndürecek motor ve motorun monte edileceği düzlem gövde ile bütünleşik olarak çizilmiştir. Aynı düzlem üzerinde ayrıca bir frenleme mekanizması da bulunmaktadır. Şekil 2.1-3'te her bir parçanın ayrı ayrı çizilmiş hali gösterilmişken Şekil 2.4'te parçaların birleştirilmiş hali gösterilmiştir.



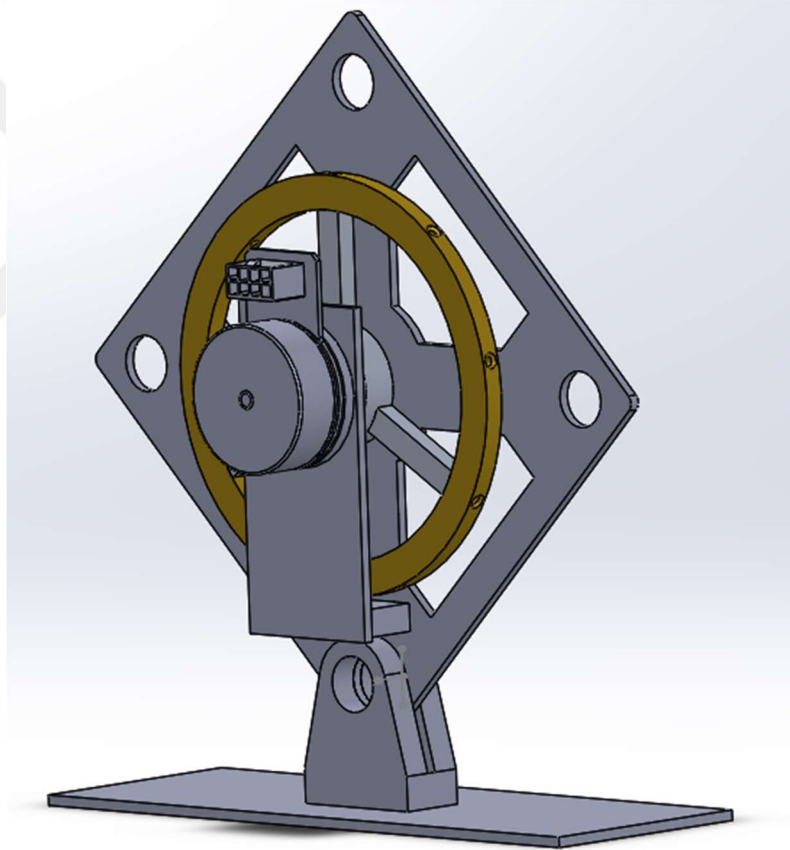
Şekil 2.1. Gövde parçasının  izimi



Şekil 2.2. Teker parçasının  izimi



Şekil 2.3. Zemin parçasının çizimi



Şekil 2.4. Parçaların birleştirilmiş hali

Tekerin dönmesini sağlayacak eyleyici olarak Maxon Motor AG firmasının EC-45-flat serisi 50 W fırçasız DC motoru seçilmiştir. Çizim için gerekli ölçüler ürün kataloğundan yararlanarak oluşturulmuştur. Tekerin serbestçe dönmesini sağlayacak rulman çizimde teker parçasının içine gömülmüştür. Frenleme mekanizması için kullanılacak RC servo

motor, çizimlerde gösterilmemiştir. Bunlara ek olarak, atalet tekerinin ve gövdenin serbest dönmesini sağlayacak iki adet rulman kullanılmıştır. Gövdenin açısal konumu ölçmek için kullanılması planlanan artırılmış enkoder devir başına 100 darbe üretmektedir. Bu durumun ölçülen değerlerin hata payını oldukça yükseltmesi sebebiyle enkoder yerine potansiyometre ve gerilim bölücü devresi kullanılmıştır. Fotoğraf 2.1’de atalet tekeri sarkacı sisteminin üretilmiş hali gösterilmektedir.



Fotoğraf 2.1. Atalet tekeri sarkacı sistemi

Fotoğraf 2.2’de gövdenin açısal konumunu ölçmekte kullanılan potansiyometrenin sisteme eklenmesi gösterilmiştir. Bu durumun olumsuz yanı ölçümlerin gürültülü olmasıdır.



Fotoğraf 2.2. Enkoder yerine kullanılan potansiyometrenin birleştirilmesi



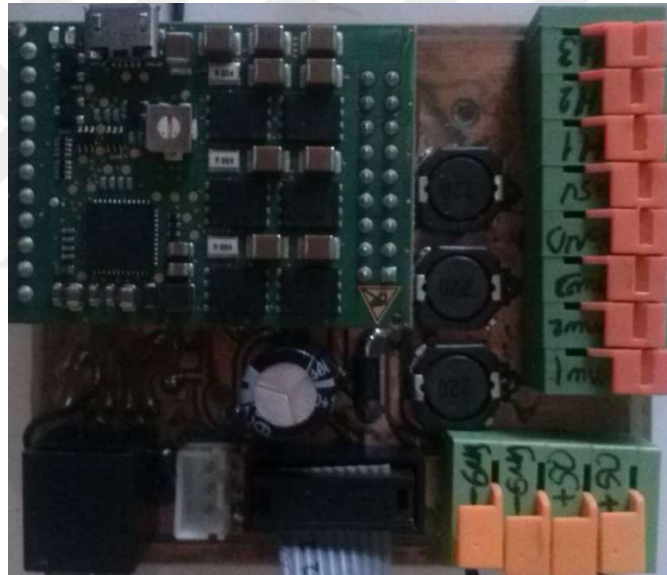
Fotoğraf 2.3. Motor şaftı ile atalet tekerinin elastik bağlantısı

Atalet tekeri ile eyleyici işlevini yerine getirecek motor birleştirilirken motorun eksenini ile atalet tekerinin merkezinin çakışmadığı görülmüştür. Ayrıca motorun kafesi aldığı darbelerden dolayı küçük miktarda yalpalanmaya sebep olmuştur. Katı bir birleştirme yapılması durumunda bu sorunların motor şaftını zorlayacağı ve bozuk bir dairesel harekete sebep olacağından küçük miktarda hareket serbestliği olabilen bir çözüm üretilmiştir. Fotoğraf 2.3’de görüldüğü gibi elastik bir malzeme kullanılarak birleştirme

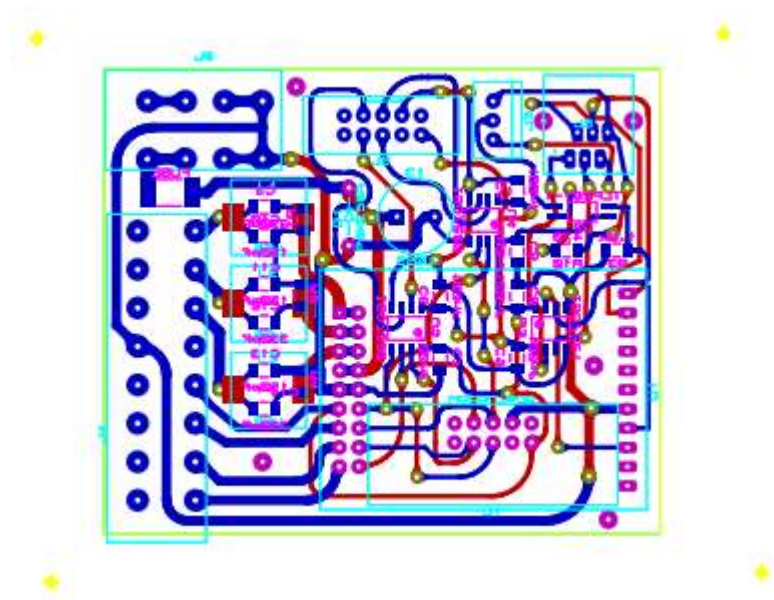
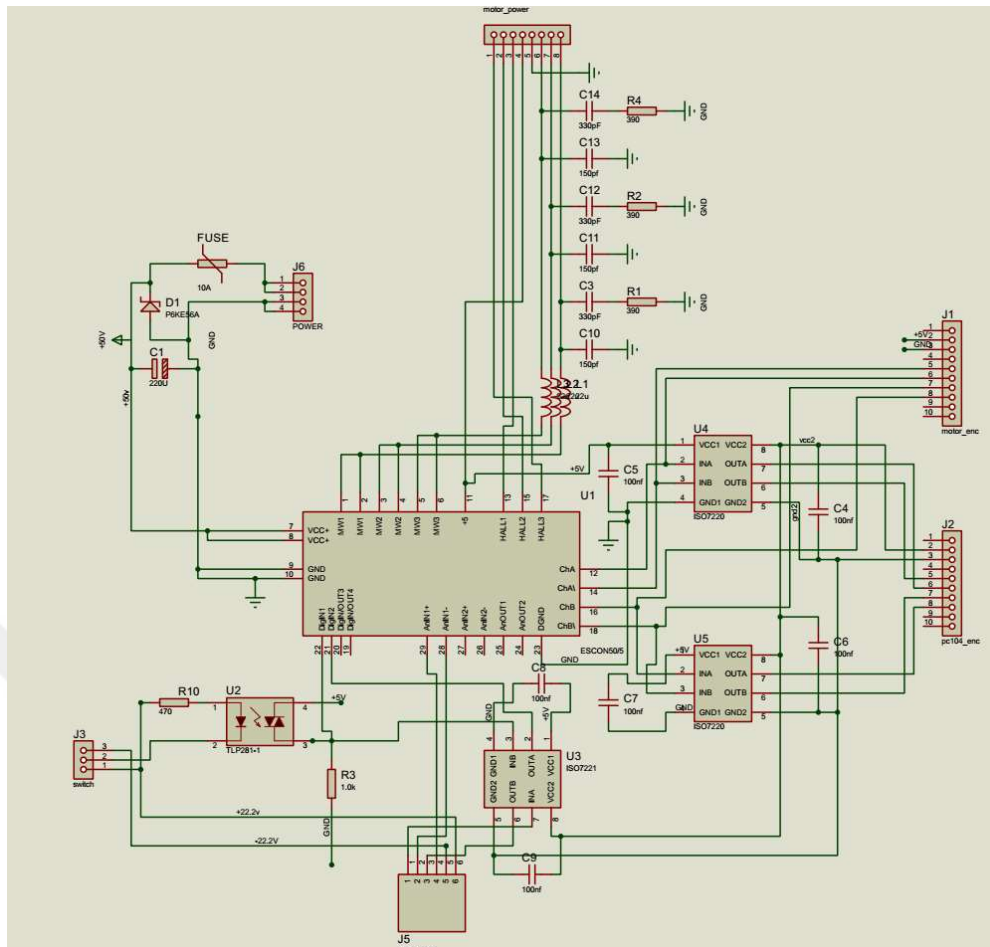
yapılmıştır. Bu sayede çok hafif olan eksen kaçıklığının ve yalpalanmanın olumsuz etkileri giderilmiştir. Ancak bu durum sistemin kontrol edilmesini daha da zor hale getirmiştir.

2.2 Atalet Tekerı Sarkacı Siteminin Elektronik Tasarımı

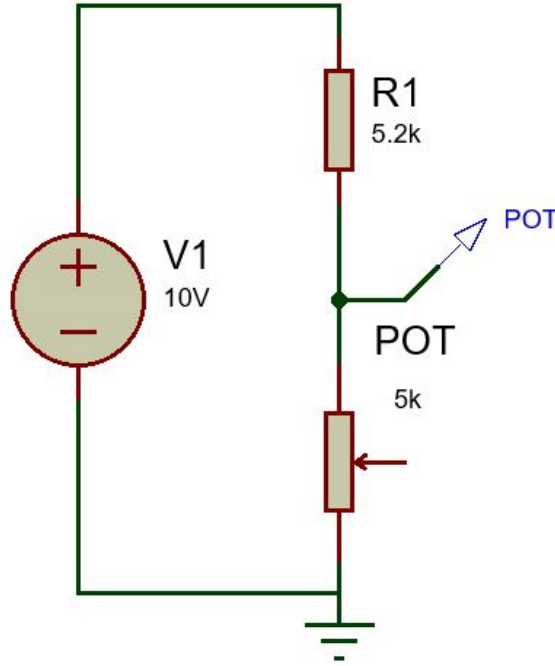
Atalet sarkacı siteminin elektronik tasarımında eyleyici olarak 50 W fırçasız DC motorun seçildiği bahsedilmişti. Motoru sürmek için aynı firmaya ait ESCON MODULE 50/5 serisi motor sürücü kartı seçilmiştir. Bu sürücü kartı için kullanım kılavuzuna bakılarak bir ana kart tasarımı gerçekleştirilip üretimi yapılmıştır. Fotoğraf 2.4'te motor sürücüsü ile ana kartının üstten görünüşü gösterilmiştir. Şekil 2.5'te ana kartın şematik tasarımı ve Şekil 2.6'da ana kartın pcb tasarımı gösterilmiştir.



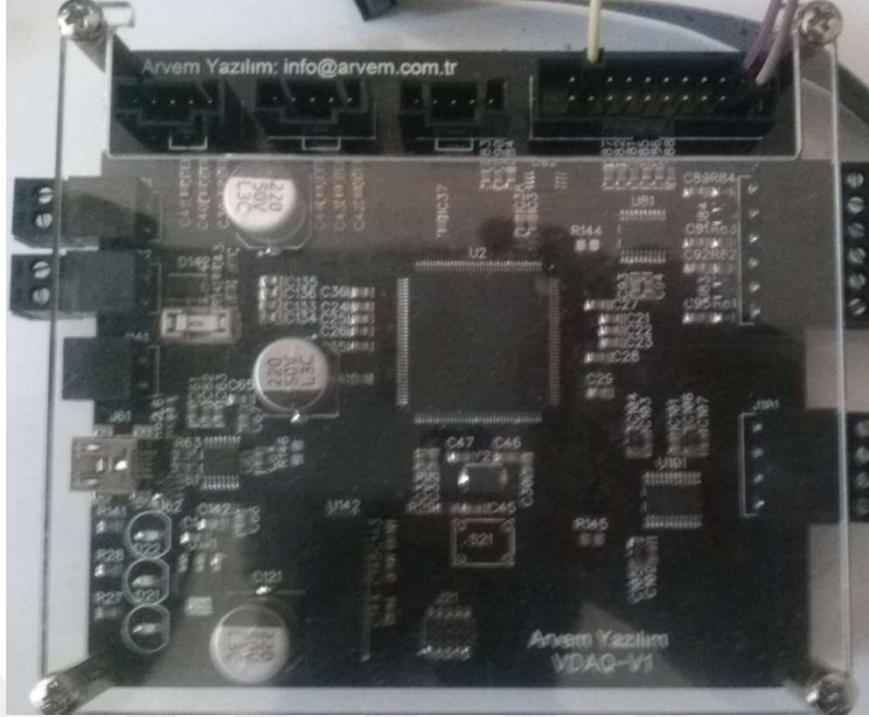
Fotoğraf 2.4. Motor sürücü kartı ile ana kartının üstten görünüşü



Motor üzerinde bulunan hall-sensorler; motorun ve dolayısıyla atalet tekerinin açısai hızını ölçmektedir. Ölçülen hız bilgisini motor sürücü kartı 0-4 V arasındaki bir analog sinyale dönüştürmektedir. Gövdenin açısai konumun ölçmek için kullanılan potansiyometre ve gerilim bölücü düzeneği ise 0-10 V arasında bir analog sinyal üretmektedir. Bu iki analog sinyal V-daq DAQ (Veri Edinimi) kartında bulunan ADC'ler (Analog Dijital Dönüştürücü) kullanılarak dijital ortama aktarılmıştır. Frenleme mekanizmasında kullanılacak RC servo motor yine V-daq DAQ kartında bulunan PPM (Pulse Position Modulation) sinyalleri kullanılarak sürülmüştür. Fotoğraf 2.5'te gösterilen V-daq aynı zamanda bilgisayar ile haberleşmeyi sağlamaktadır. Matlab Simulink üzerinden üretilen kontrol sinyali V-daq üzerinde bulunan DAC (Dijital Analog Dönüştürücü) kullanılarak motor sürücü kartına uygulanmaktadır.

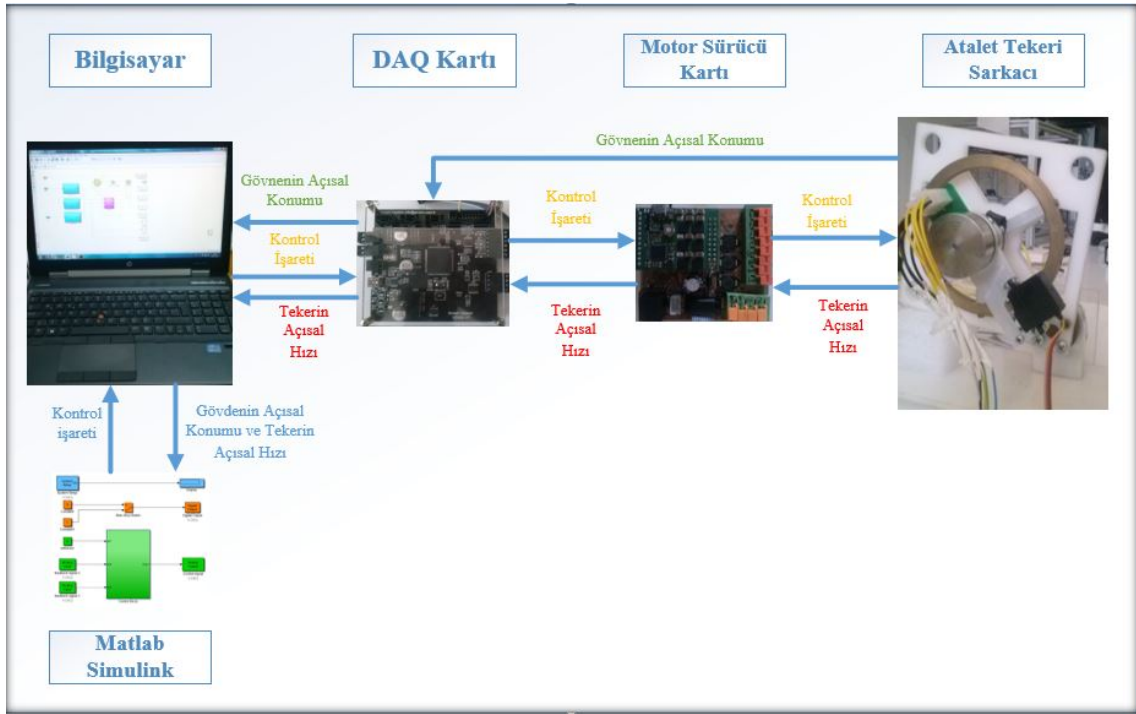


Şekil 2.7. Gerilim bölücü devresi

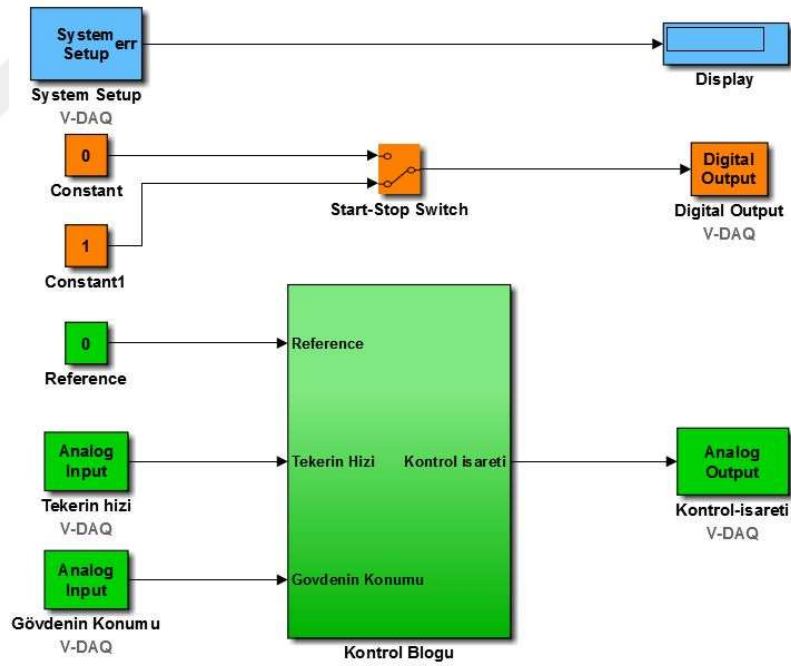


Fotoğraf 2.5. V-DAQ veri edinim kartı

Şekil 2.8’de gösterilen atalet tekeri sarkacı sisteminin veri iletimi şemasında belirtildiği üzere çift yönlü bir veri aktarımı mevcuttur. Atalet tekeri sarkacından gelen hız verisi motor sürücü kartına, buradan DAQ kartına ardından ise bilgisayar ortamında Matlab Simulink ile tasarlanan kontrol algoritmasına aktarılır. Benzer şekilde potansiyometre ile ölçülen konum bilgisi DAQ kartı üzerinden bilgisayara ve dolayısıyla Matlab Simulink ile tasarlanan kontrol algoritmasına aktarılır. Ters yöndeki veri iletiminde ise kontrol algoritması ile üretilen kontrol işareti bilgisayar üzerinden DAQ kartına ardından motor sürücü kartına ve buradan atalet tekeri sarkacı sisteminde eyleyici olarak kullanılan motora aktarılır. Aynı iletim yoluyla atalet tekeri sarkacı sisteminin başlatılıp durdurulmasını sağlayan dijital sinyal motor sürücü kartına aktarılarak sürücü kartının motoru başlatıp durdurması sağlanır.



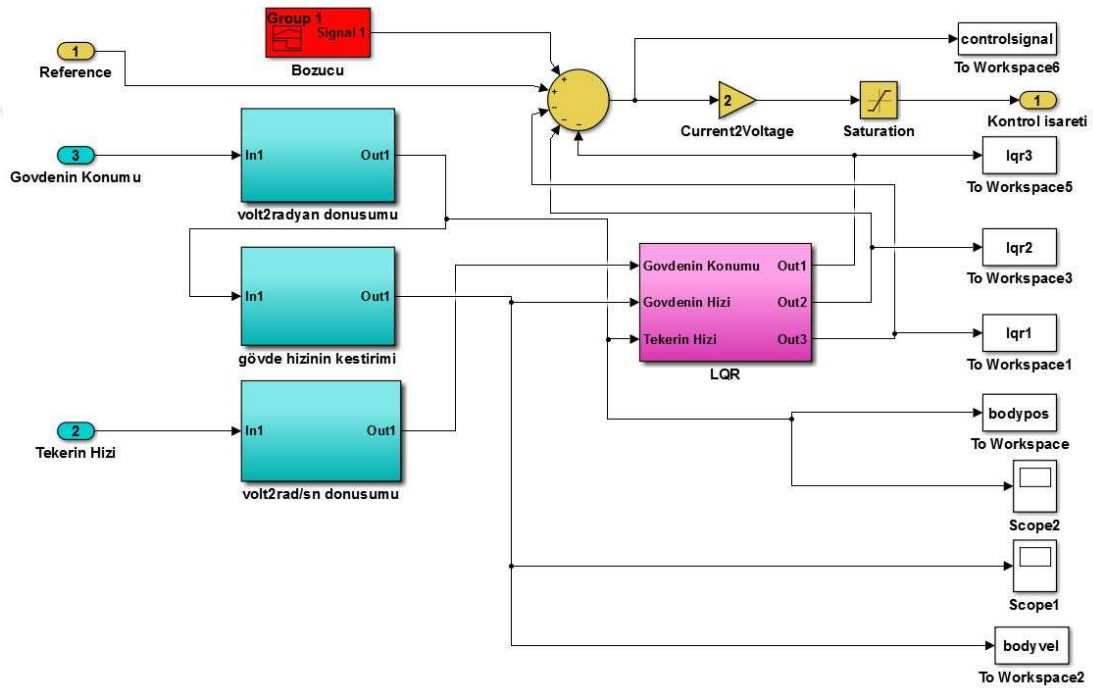
Şekil 2.8. Atalet tekeri sarkacı sisteminin veri iletim şeması



Şekil 2.9. Atalet tekeri sarkacı sisteminin kontrolünün Matlab Simulink modeli

Şekil 2.9’da atalet tekeri sarkacı sistemini kontrol etmek için kullanılan Matlab Simulink modeli gösterilmiştir. Şekil 2.9’da mavi bloklardan oluşan kısım DAQ kartı ile bilgisayar arasındaki veri iletiminin hatasız bir şekilde yapıldığını denetlemek içindir. DAQ kartı ile bilgisayar haberleşmesinin sorunsuz gerçekleşmesi için bilgisayarda ve Matlab

programında bazı ayarlamaların yapılması gerekmektedir. Sistem ayarı eğer doğru yapılmış ve DAQ kartı ile bilgisayar haberleşmesi sorunsuz sağlanıyorsa çıkışta 0 değerini aksi durumda 1 değerini üretir. Turuncu renkteki bloklar ise atalet tekeri sarkacı sisteminin başlatılıp durdurulmasını sağlayan dijital sinyalin üretilmesi için kullanılır. Yeşil bloklar ise sistem kontrolünün yapıldığı temel bloklardır. Görüldüğü üzere giriş olarak referans işareti, gövdenin açısal konumu ve eyleyicinin açısal hızı uygulanmış çıkış olarak da atalet tekeri sarkacı için kontrol işareti, eyleyiciye uygulanacak akım verisi üretilmiştir.



Şekil 2.10. Kontrol bloğunun alt modeli

Şekil 2.9’da verilen kontrol bloğunun alt modeli Şekil 2.10’de gösterilmiştir. İleri yöndeki akışı gösteren sarı bloklarda referans işaretinden LQR kontrolcü ile elde edilen geri besleme işaretleri çıkartılarak atalet tekeri sarkacı sistemine uygulanacak kontrol işareti üretilir. Açık mavi bloklarda ise atalet tekeri sarkacı sisteminden elde edilen geri besleme sinyallerini ilgili fiziksel büyüklüğe dönüştürür. Burada 0-10 V arasında gelen sinyal gövdenin açısal konumu verisine dönüştürülür. Devamında ayrık zamanlı türev elemanı kullanılarak gövdenin açısal hızı kestirilir. 0-4 V arasında gelen sinyal eyleyicinin açısal hızı verisine dönüştürülür. Böylece LQR ile elde edilen kontrolcü katsayıları, pembe blok, sisteme uygulanır.

BÖLÜM III

ATALET TEKERİ SARKACI SİSTEMİNİN MODELİNİN ÇIKARTILMASI, DOĞRUSALLAŞTIRILMASI VE KONTROLCÜ TASARIMI

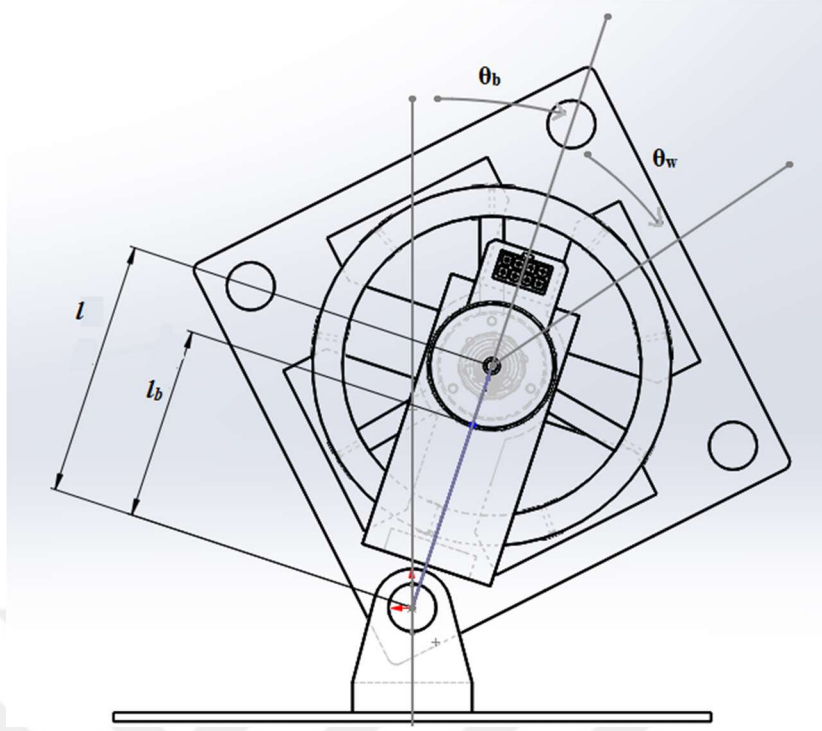
İkinci bölümde tasarımı gerçekleştirilen atalet tekeri sarkacı sisteminin kontrol edilmesi ile ilgili matematiksel metodoloji bu bölümde anlatılacaktır. Bilindiği üzere hiçbir model gerçek sistemin yerini tam olarak tutmayıp sadece kullanılabilir modeller vardır. Atalet tekeri sarkacı sisteminin mekatronik tasarımında Gajamohan vd. (2012) dikkate alınan çalışması bu bölümde de referans olarak alınmıştır. Verilen matematiksel ifadelerin göreceli olarak basit ve anlaşılır olması, sistem modelinin dinamik denklemlerinden yola çıkılarak elde edilmesi ve hareket denklemlerinin kullanması sayesinde atalet tekeri sarkacı sisteminde bulunan sürtünmelerin de modelde kullanılıyor olması bu tercihin yapılmasındaki sebeplerden bazılarıdır.

3.1 Atalet Tekerı Sarkacı Sisteminin Modelinin Çıkartılması ve Doğrusallaştırılması

Şekil 3.1’de verilen θ_b atalet tekeri sarkacının gövdesinin açısal konumu, θ_w atalet tekeri sarkacının tekerinin açısal konumu, l_b eksen noktası ile kütle merkezi arasındaki mesafe ve l eksen noktası ile motorun eksen merkezi arasındaki mesafedir. Yerçekimi ivmesi $g = 9.81 \text{ ms}^{-2}$ alınıp motorun ürettiği tork T_m ’dir.

$$T_m = K_m u(t) \quad (3.1)$$

Sistemin giriş işareti olarak $u(t)$ alındığında K_m motorun tork sabitidir. Atalet tekeri sarkacının gövdesinin ağırlığı m_b ve atalet tekeri sarkacının tekerinin ağırlığı m_w ’dir. Atalet tekeri sarkacının gövdesinin atalet momenti ve tekerinin atalet momenti sırasıyla I_b ve I_w ’dir. C_b ve C_w ise atalet tekeri sarkacının gövdesinin ve tekerinin dinamik sürtünme katsayısıdır. Eşitlik (3.2)’de atalet tekeri sarkacının dinamik denklemleri verilmiştir.



Şekil 3.1. Atalet tekeri sarkacı

$$\ddot{\theta}_b = \frac{(m_b l_b + m_w l) g \sin \theta_b - T_m - C_b \dot{\theta}_b + C_w \dot{\theta}_w}{I_b + m_w l^2},$$

$$\ddot{\theta}_w = \frac{(I_b + I_w + m_w l^2)(T_m - C_w \dot{\theta}_w)}{I_w(I_b + m_w l^2)} - \frac{(m_b l_b + m_w l) g \sin \theta_b - C_b \dot{\theta}_b}{I_b + m_w l^2} \quad (3.2)$$

Eşitlik (3.2)'de verilen atalet tekeri sarkacı sisteminin dinamik denklemleri $\sin \theta_b$ teriminin bulunmasından dolayı doğrusal olmayan denklemlerdir. Sarkacın dikey ekseninde dengede tutulmasının amaçlandığı dikkate alınırsa bu denge noktası etrafında lineerleştirilebilir. Küçük açısal değişimlerin gerçekleştiği varsayımı yapılarak lineerleştirme yapılmıştır. Bu koşul altında lineer olmayan terim yerine $\sin \theta_b = \theta_b$ kullanılabilir. Atalet tekeri sarkacı sisteminin dinamik modelinde durum değişkenleri olarak $x \equiv \theta_b, \dot{\theta}_b, \dot{\theta}_w$ seçilmiştir. Durum değişkenlerini denge noktası etrafında, $(\theta_b, \dot{\theta}_b, \dot{\theta}_w) = (0, 0, 0)$, lineerleştirilerek Eşitlik (3.3) elde edilir.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.3)$$

Eşitlik (3.3)'de $x(t)$ durum değişkeni vektörü, $u(t)$ giriş vektörü ve $A B$ matrisleri sırasıyla durum ve giriş matrisini temsil etmektedir.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{(m_b l_b + m_w l)g}{I_b + m_w l^2} & -\frac{C_b}{I_b + m_w l^2} & \frac{C_w}{I_b + m_w l^2} \\ -\frac{(m_b l_b + m_w l)g}{I_b + m_w l^2} & \frac{C_b}{I_b + m_w l^2} & -\frac{C_w(I_b + I_w + m_w l^2)}{I_w(I_b + m_w l^2)} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{K_m}{I_b + m_w l^2} \\ \frac{K_m(I_b + I_w + m_w l^2)}{I_w(I_b + m_w l^2)} \end{bmatrix}$$

Gajamohan vd. (2012) yaptığı çalışmada deneysel yöntemler kullanarak gövde ve tekerin atalet momenti ve dinamik sürtünme katsayılarının bulunması ayrıntılı bir şekilde anlatılmış. Yapılan deneyler sonucunda hesaplatılan atalet momenti ve dinamik sürtünme katsayıları değerleri en küçük kareler yöntemi uygulanarak belirlenmiştir. Atalet tekeri sarkacı sisteminde ölçülen ve hesaplanan tüm katsayılar Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Atalet tekeri sarkacı parametrelerinin değerleri

l	0.082 m
l_b	0.072 m
m_b	0.519 kg
m_w	0.216 kg
I_b	$4.13 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
I_w	$0.60 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
C_b	$1.04 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
C_w	$0.05 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
K_m	$25.1 \times 10^{-3} \text{ Nm} \cdot \text{A}^{-1}$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 96,7928397616502 & -0,186300333334289 & 0,00895674679491773 \\ -96,7928397616502 & 0,186300333334289 & -0,0922900801282511 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -4,49628689104870 \\ 46,3296202243820 \end{bmatrix}$$

Atalet tekeri sarkacının dengede kalmasını sağlayacak kontrolcü bilgisayar üzerinden uygulanacağı için ayrık zaman sistem modelinin kullanılması gerekmektedir. Eşitlik (3.3)

ile verilen sürekli zaman uzayındaki atalet tekeri sarkacı sisteminin dinamik modeli *zero-holder* tutucu kullanılarak ayırık zamanlı modele dönüştürülmüştür. Dönüştürme yapılırken DAQ kartı ile bilgisayar arasında veri iletiminin kayıpsız gerçekleştiği en küçük örnekleme zamanı seçilmeye çalışılmıştır. Buna karşılık düşük örnekleme zamanının seçilmesi daha büyük bir veri seti ile çalışılmasına neden olarak işlem yükünü artırmaktadır. Bu koşullar altında 10 ms örnekleme zamanı uygun görülmüştür. Açık çevirim sistemin kararsız kökü dikkate alındığında (637.4 ms) yaklaşık 60 kat küçülmüş bir aralık olan 10 ms örnekleme zamanının çok daha iyi bir performans sergileyeceği öngörülmektedir. Gajamohan vd. (2012) ise örnekleme zamanını 20 ms seçmişlerdir. Bu bağlamda bu çalışmada daha iyi bir modelleme gerçekleştirilmiştir.

$$x[k + 1] = A_a x[k] + B_a u[k], \quad k \in \mathbb{N}_0 \quad (3.4)$$

Eşitlik (3.4)'te verilen A_a ve B_a matrisleri atalet tekeri sarkacının ayırık zaman modelinin sırasıyla durum ve giriş matrisleridir.

$$A_a = \begin{bmatrix} 1,00484039554099 & 0,0100068156053508 & 4,4778 \times 10^{-7} \\ 0,968544757254252 & 1,00297620588017 & 8,9587 \times 10^{-5} \\ -0,968141502964116 & -0,00297563797747936 & 0,999077463909621 \end{bmatrix},$$

$$B_a = \begin{bmatrix} -0,000224786913944687 \\ -0,0449727682251806 \\ 0,463113117370100 \end{bmatrix}$$

3.2 Atalet Tekerı Sarkacı Sistemi İçin Kontrolcü Tasarımı

Eşitli (3.4)'te verilen ayırık zamanlı atalet tekeri sarkacı sistemi modeli için geri beslemeli LQR (Linear Quadratic Regulator) kontrolcü tasarlanmıştır. Eşitlik (3.5)'te atalet tekeri sarkacı sistemine uygulanan kontrol işareti tanımlanmıştır.

$$u[k] = -K_a \left(\theta_b[k], \widehat{\theta}_b[k], \dot{\theta}_w[k] \right) \quad (3.5)$$

Eşitlik (3.5)'te θ_b eksen noktasına yerleştirilen gövdenin potansiyometre yardımı ile ölçülen açısal konum bilgisi, $\widehat{\theta}_b$ gövdenin ayırık zamanlı türev elemanı ile kestirilen açısal hız bilgisi ve $\dot{\theta}_w$ ise tekerin motor üzerinde bulunan *hall-sensor* ile ölçülen açısal hız

bilgisidir. Eşitlik (3.6)'da verilen maliyet fonksiyonunu minimize eden $K_a = (K_{a1}, K_{a2}, K_{a3})$, geri beslemeli LQR kontrolcünün katsayılarıdır.

$$\widehat{\theta}_b[k] = \frac{K(\theta_b[k] - \theta_b[k-1])}{T_s}, \quad K = 1, T_s = 0.01 \quad (3.6)$$

$$J(u) = \sum_{k=1}^{\infty} x^T[k] Q x[k] + u^T[k] R u[k], \quad Q \geq 0, R > 0 \quad (3.7)$$

Eşitlik (3.5) ile verilen kontrol işareti $u[k]$, R matrisi ile ağırlıklandırılır ve sistem modelinin durum değişkeni vektörü $x[k]$, Q matrisi ile ağırlıklandırılır. Bu ikisinin toplamıyla elde edilen maliyet fonksiyonu Eşitlik (3.7) ile belirtilmiştir. Bu maliyet fonksiyonunda önceden belirlenmiş Q ve R matrisleri kullanılarak K_a 'nın değeri hesaplanır. Kontrolcü tasarlamak için kullanılan Q ve R matrislerinin seçiminde öncelikle birim matrisler kullanılmıştır. İstenilen sonuç elde edilemeyince $\widehat{\theta}_b$ ve $\widehat{\theta}_w$ durumlarına karşılık gelen satırlar onda bir oranında küçültülmüştür. Bu yöntem iyi bir performans sergilendiği düşünülen bir kontrol işareti bulunana kadar tekrarlanmıştır. Kontrol işaretinin ± 5 A çalışma aralığında olması gerektiği böyle bir yol izlenmiştir. Süreç sonunda kullanılmasına karar verilen Q ve R matrisleri aşağıda verilmiştir.

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,001 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0001 \end{bmatrix}, \quad R = [1]$$

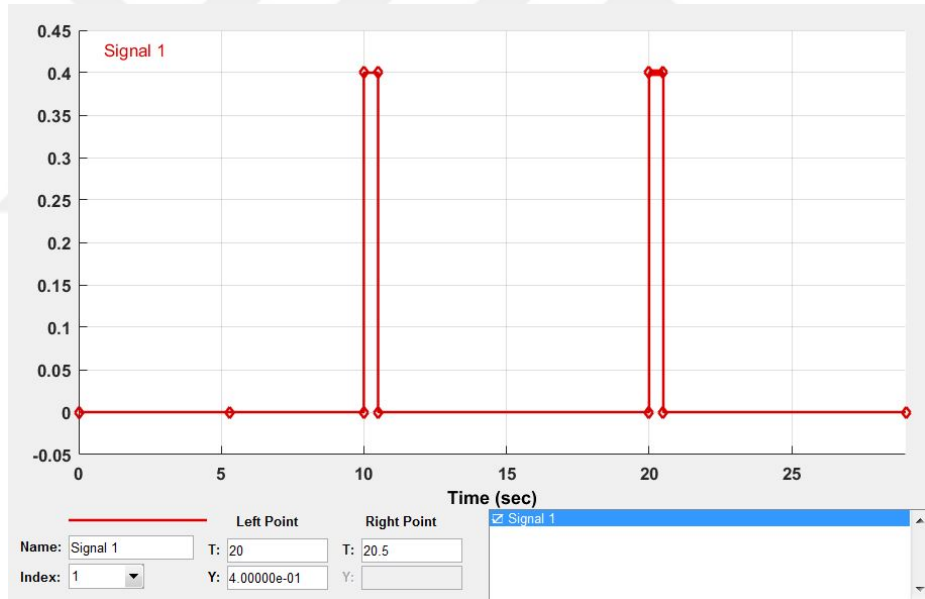
$$K_a = [-6,00651308444553 \quad -0,607349417813034 \quad -0,0100566212467007]$$

Bu değerler daha küçültülse de LQR katsayılarına etkisi yok denecek kadar azdır. Çok büyük orandaki küçültmeler kullanıldığında ise maliyet fonksiyonun hesaplatılamadığı görülmüştür. Atalet tekeri sarkacı sisteminin ayrık zamanlı modeli için belirlenen Q ve R matrisleri kullanılarak tasarlanan LQR kontrolcü katsayıları aşağıda verilmiştir. Bir sonraki bölümde kontrolcü gerçek sisteme ve benzetim ortamında uygulaması sonucu elde edilen sonuçlar gösterilerek değerlendirmeler yapılmıştır.

BÖLÜM IV

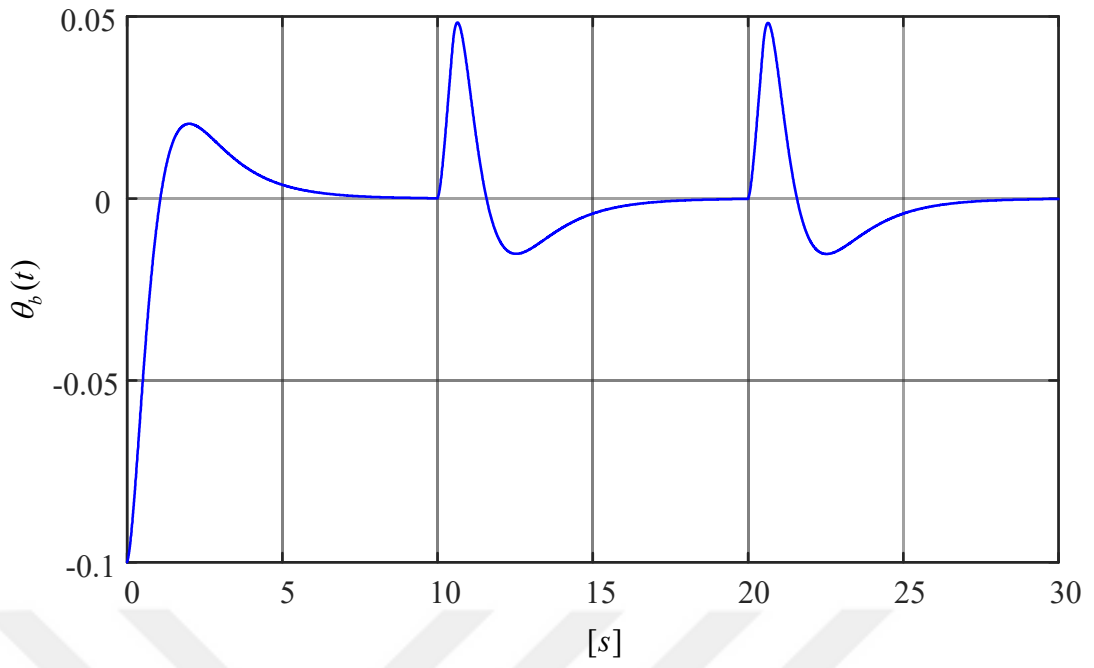
LQR KONTROLCÜNÜN BENZETİM ORTAMINDA VE GERÇEK SİSTEMDE UYGULANMASI VE GÖZLEMLER

Bu bölümde tasarlanan LQR kontrolcünün benzetim ortamında ve gerçek sistemde uygulanması ile elde edilen sonuçlar gösterilmiş ve çıkan sonuçlar ışığında yapılan gözlemler belirtilmiştir. LQR kontrolcü iki farklı senaryo altından sınanarak LQR kontrolcünün başarısı gözlemlenmiştir. Bu senaryoların ilkinde onuncu ve yirminci saniyelerde 0.5 saniye kadar uygulanan 0.4 büyüklüğündeki bir bozucu sinyali pozitif yönde etki edecek şekilde; ikincisinde ise negatif yönde etki edecek şekilde uygulanmıştır. Her iki senaryoda da gövdenin açisal konumu için başlangıç koşulu 0.1 radyan, yaklaşık 5.7° , diğer durumlar için sıfır olarak uygulanmıştır.

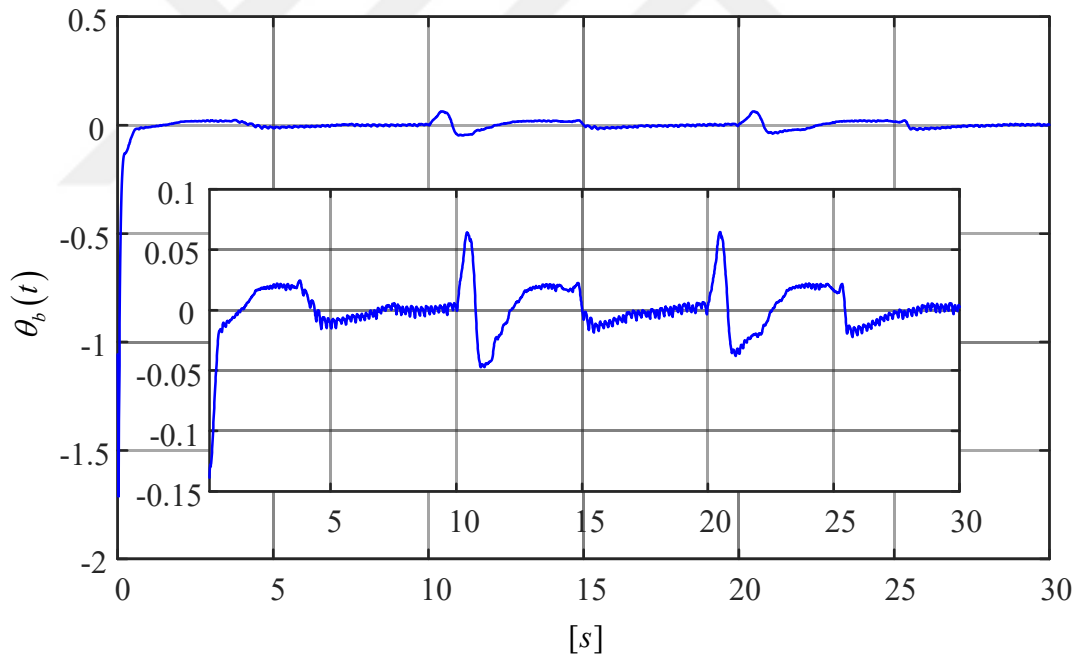


Şekil 4.1. Atalet tekeri sarkaç sistemine uygulanan bozucu işareti

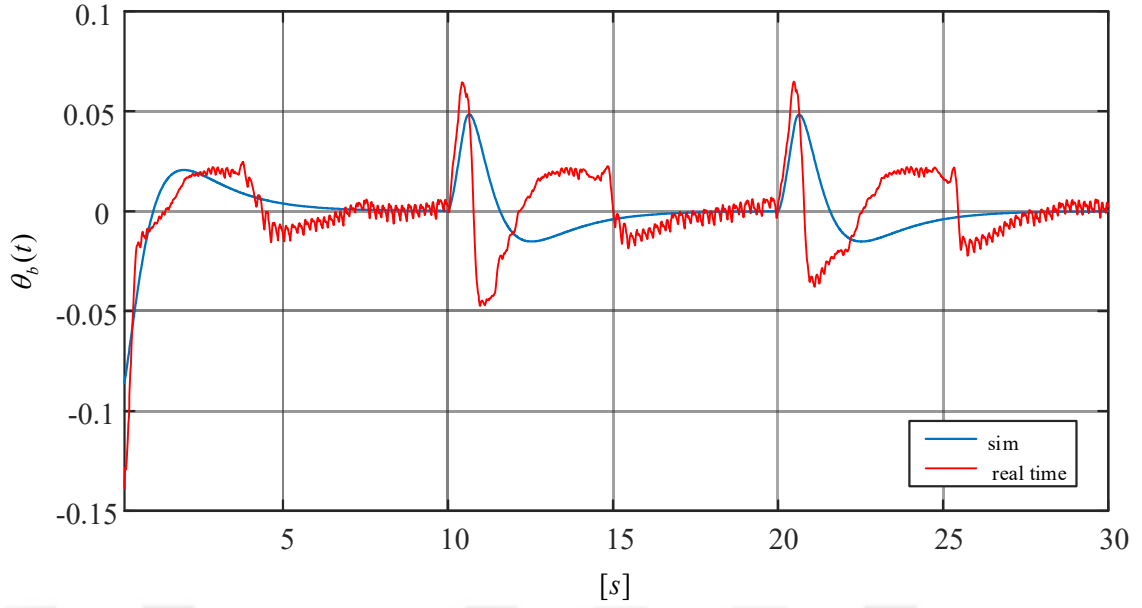
Şekil 4.1’de atalet tekeri sarkaç sistemine uygulanan bozucu işareti gösterilmiştir. Pozitif yönde olan bozucu işareti ikinci senaryoda ise negatif yönde uygulanmıştır. Bu iki senaryonun uygulanmasındaki amaç bozucu pozitif yönde veya negatif yönde uygulandığında kontrolcünün aynı başarıyı gösterip göstermediğini gözlemlemektir.



Şekil 4.2. Benzetim ortamında pozitif bozucu etkisinde gövdenin açısal konumu

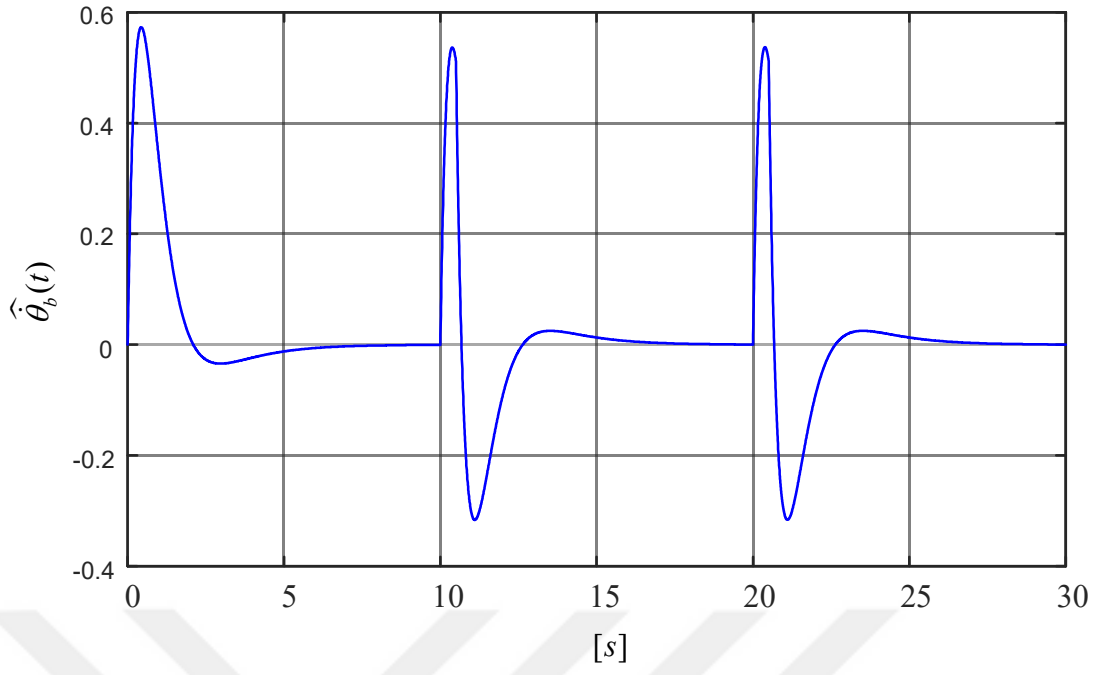


Şekil 4.3. Gerçek sistemde pozitif bozucu etkisinde gövdenin açısal konumu

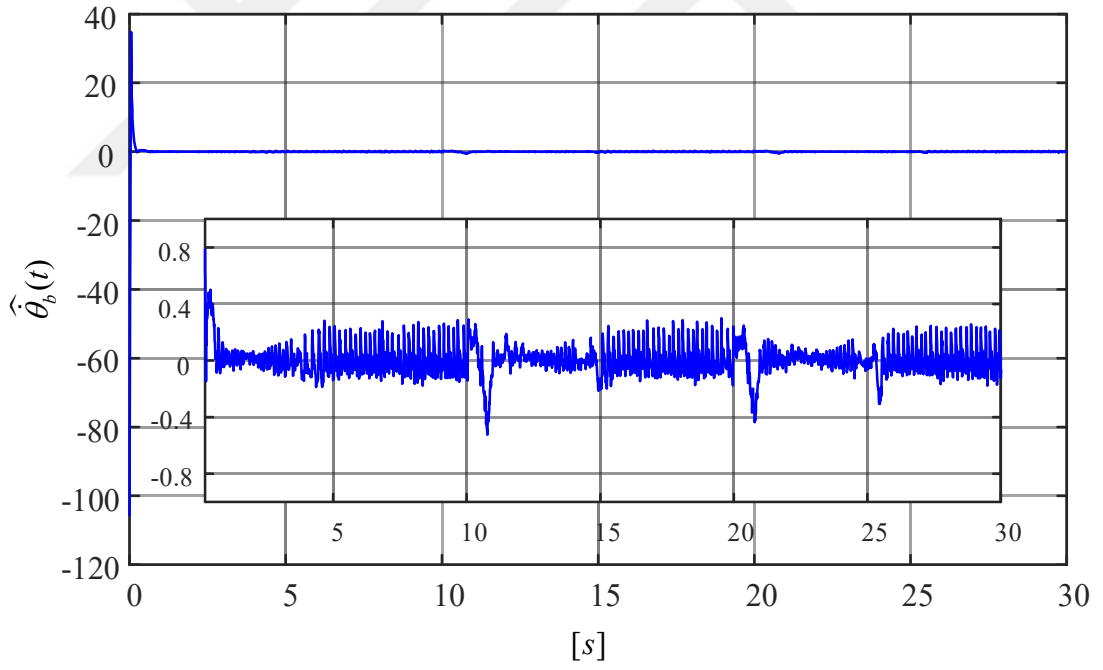


Şekil 4.4. Pozitif bozucu etkisiyle gövdenin açısal konumunun değişimi

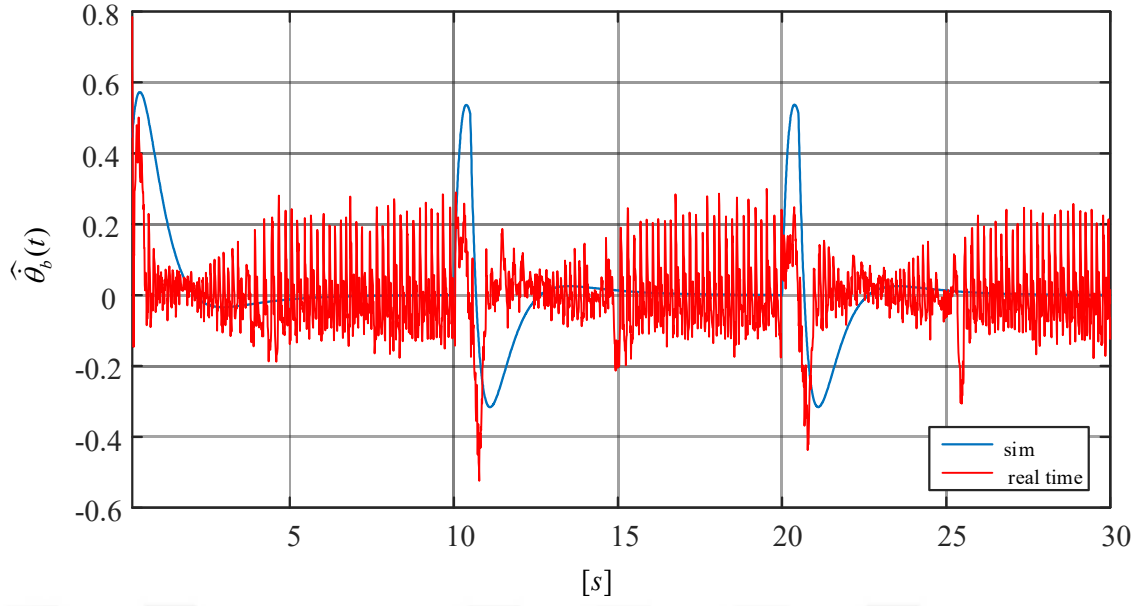
LQR kontrolcünün benzetim ortamında uygulanmasıyla elde edilen gövdenin açısal konumunun değişimi Şekil 4.2’de gerçek sistemde uygulanmasıyla elde edilen gövdenin açısal konumunun değişimi Şekil 4.3’de verilmiştir. Şekil 4.4 incelendiğinde gözlemlenen ilk sonuç gerçek sistemdeki gürültü etkisidir. Gürültünün büyüklüğü yaklaşık 0.005 radyan olarak gözlemlenmiştir. Diğer bir durum ise gerçek sistemde başlangıçta yaklaşık 0.2 saniyelik bir bozukluğunun olmasıdır. DAQ kart ile bilgisayar arasında ilk haberleşmenin sağlanması ve eyleyicinin başlangıçta çalıştırılması için geçen süre bu durumun sebebi olduğu düşünülmektedir. Bunun haricinde gerçek sistemde gövdenin açısal konumunun değişimi; benzetim ortamında gövdenin açısal konumunun değişimine genel hatlarıyla benzer davranış sergilemiştir. Her iki şekilde de atalet tekeri sarkacı sistemi yaklaşık 8 saniye içinde kendini denge konumunda sabitlediği gözlemlenmiştir. Gerçek sistemde bozucunun gösterdiği etkinin biraz daha fazla olduğu ve geri toplama yaparken ikinci bir aşım yaptığı görülmüştür. Benzetim ortamında bozucu sonrasında kendini toparlaması yumuşakken gerçek sistemde çok daha serttir. Bu durum atalet tekeri sarkacı sisteminin modelinin gerçek sisteme göre geçici durum cevabında farklılığa neden olan eksikliklerinin olduğu sonucunu doğurmaktadır. Bütün bu belirtilen hususların diğer durumlara da benzer şekilde etki etmiştir.



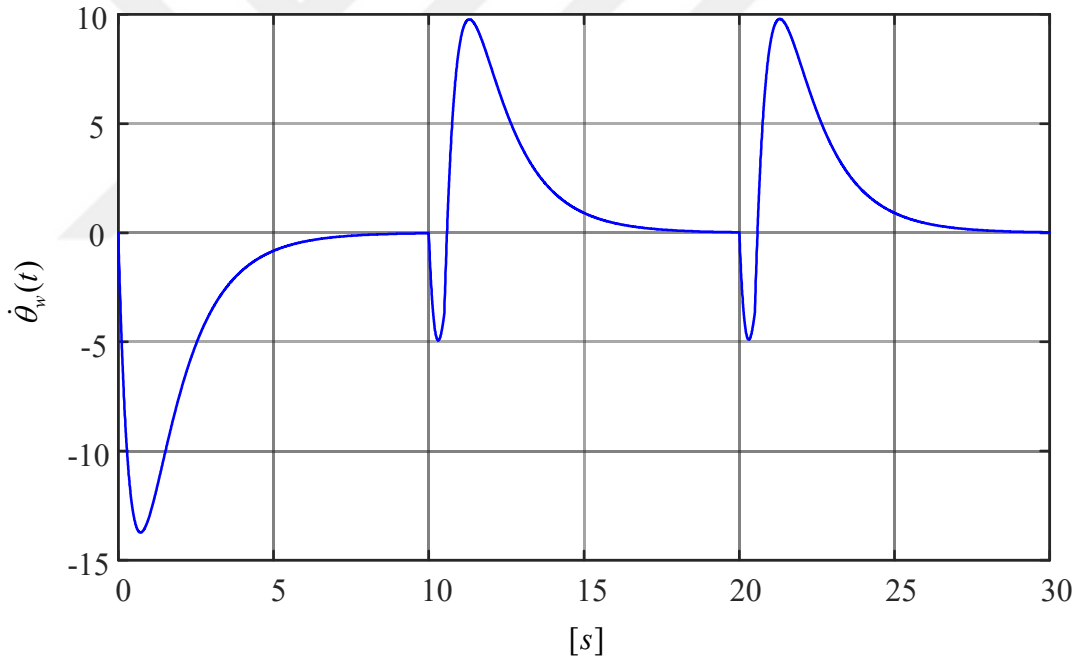
Şekil 4.5. Benzetim ortamında pozitif bozucu etkisinde gövdenin açısal hızı



Şekil 4.6. Gerçek sistemde pozitif bozucu etkisinde gövdenin açısal hızı



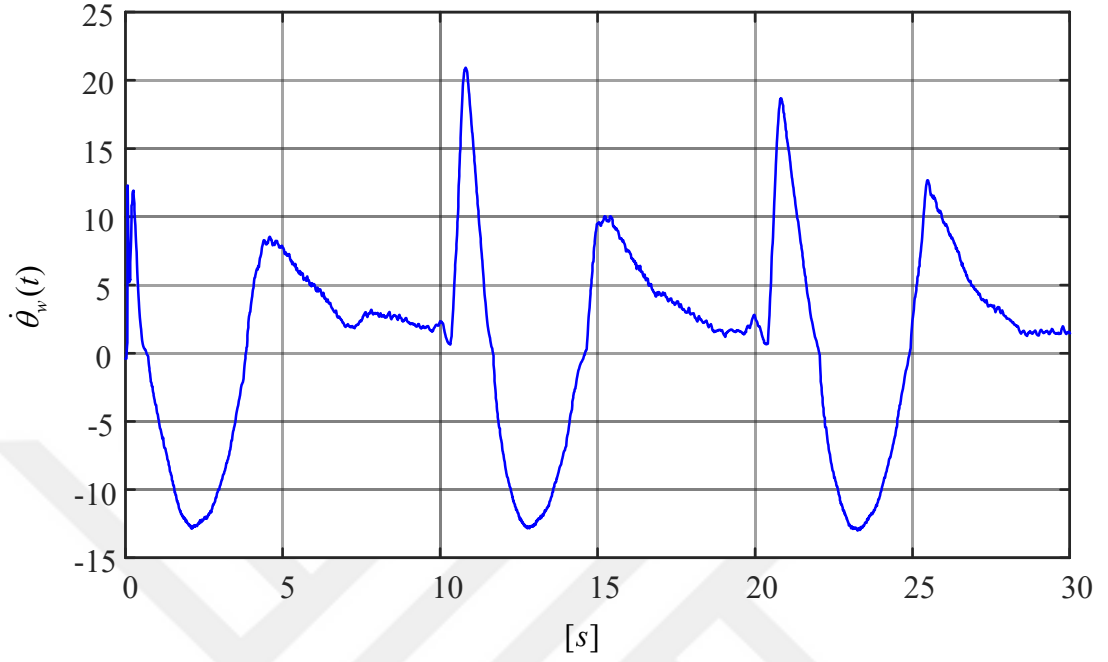
Şekil 4.7. Pozitif bozucu etkisinde gövdenin açısal hızı



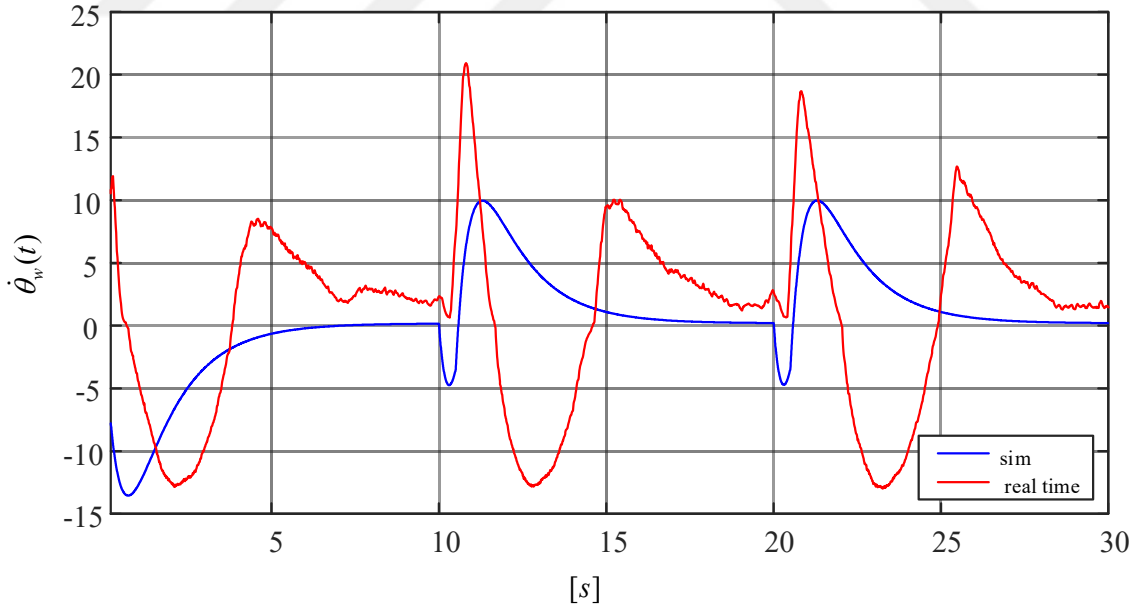
Şekil 4.8. Benzetim ortamında pozitif bozucu etkisinde atalet tekerinin açısal hızı

Şekil 4.5'te benzetim ortamında gövdenin açısal hız değişimi Şekil 4.6'da ise gerçek sistemde gövdenin açısal hız değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.7 incelendiğinde gerçek sistemde var olan gürültülerin atalet tekeri sarkacı sisteminin dengelenmesinde geçici hal cevabı üzerindeki olumsuz etkileri görülmektedir. Öyle ki sanal ortamda bozucu etkisiyle yaklaşık 0.5 rad/sn seviyesine çıkması beklenen açısal hızın 0.3 rad/sn seviyesinde kaldığı buna karşılık geri toplama aşamasında ise 0.3 rad/sn seviyesinde olması beklenirken

0.5 rad/sn seviyesine çıkarak ikinci bir aşım sebep olmuştur. Gerçek sistemde sert olan geçici hal cevabının bir diğer sebebinin bu durum olduğu görülmüştür.



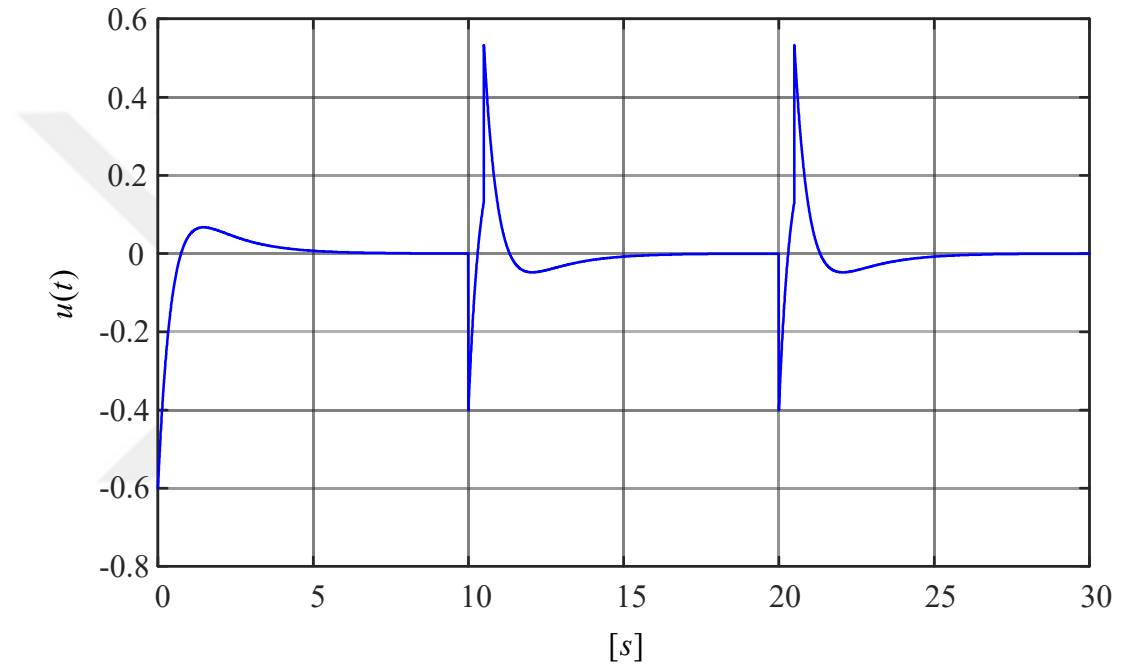
Şekil 4.9. Gerçek sistemde pozitif bozucu etkisinde atalet tekerinin açısal hızı



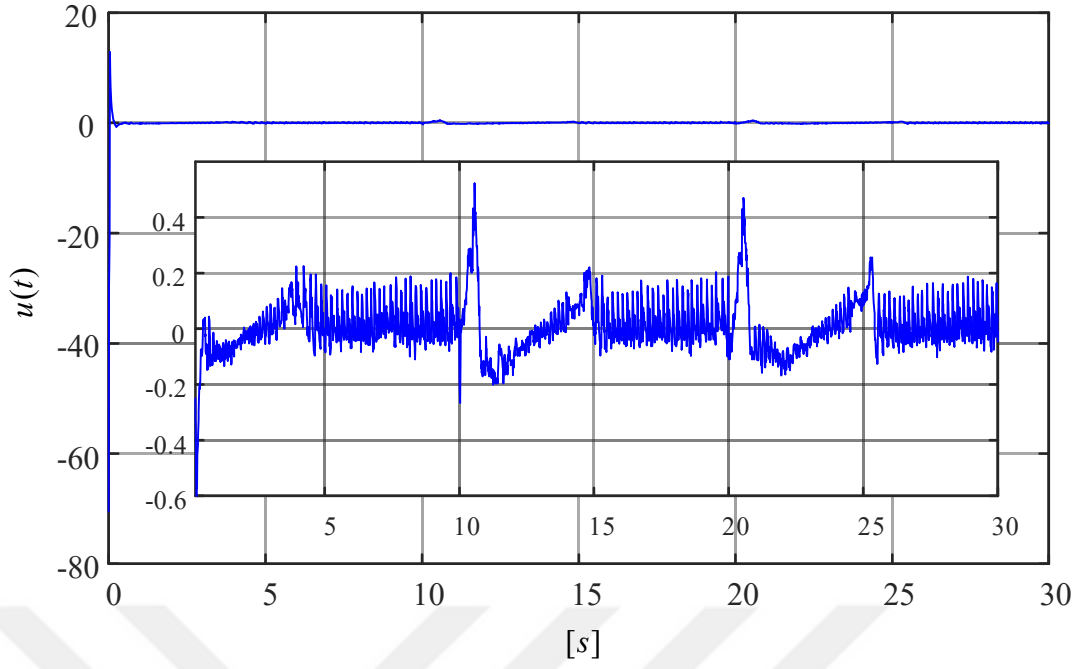
Şekil 4.10. Pozitif bozucu etkisinde atalet tekerinin açısal hızı

Atalet tekeri sarkacı sisteminin son durum değişkeni olan tekerin açısal hızına ilişkin benzetim ortamında ve gerçek sistemdeki değişimler sırasıyla Şekil 4.8 ve 4.9’da gösterilmiştir. Şekil 4.10 incelendiğinde benzetim ortamında yaklaşık 7 saniye içerisinde

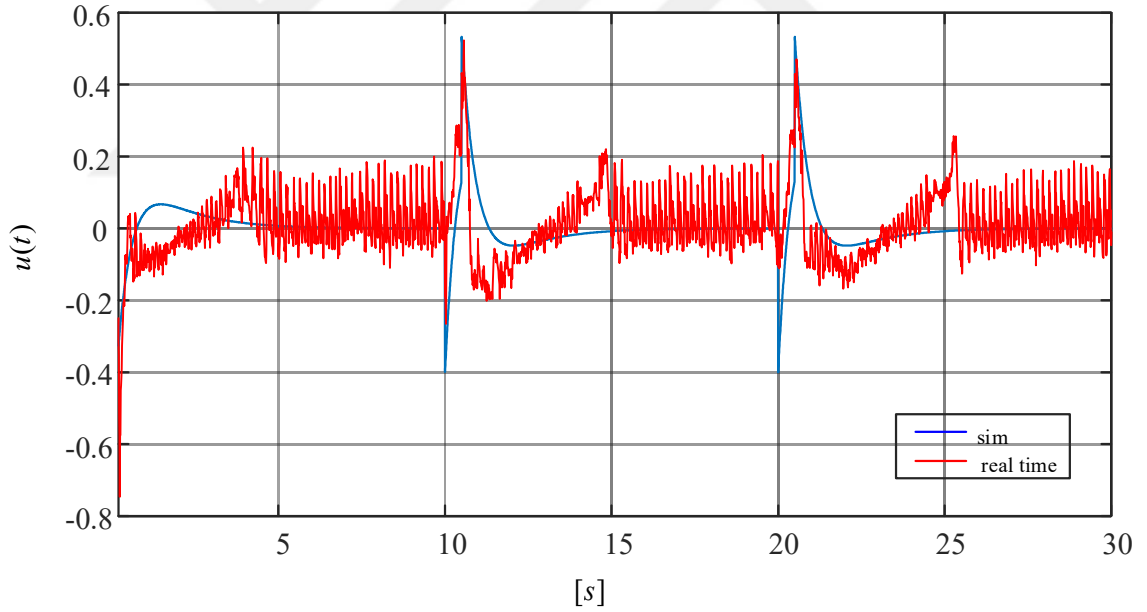
denge konumuna ulaşan tekerin hızı gerçek sistemde yaklaşık 9 saniyede denge konumuna ulaştığı görülmüştür. Ayrıca gerçek sistemde gürültü nedeniyle teker hızı yaklaşık 1 rad/sn sürekli hal hatasına sahiptir. Bozucu etkisinin teker hızına olan etkisi gerçek sistemde var olan sürekli hal hatası nedeniyle benzetim ortamındakine göre daha küçüktür. Buna rağmen bozucu etkisinden sonra geri toparlarken gövdenin konumu ve hızından doğan olumsuzlukları giderip atalet tekeri sarkacı sistemini istenen değerlerde kalmasını sağlamak için benzetim ortamındakine göre daha fazla çaba sarf ettiği görülmüştür.



Şekil 4.11. Benzetim ortamında pozitif bozucu etkisinde uygulanan kontrol işareti



Şekil 4.12. Gerçek sistemde pozitif bozucu etkisinde uygulanan kontrol işareti

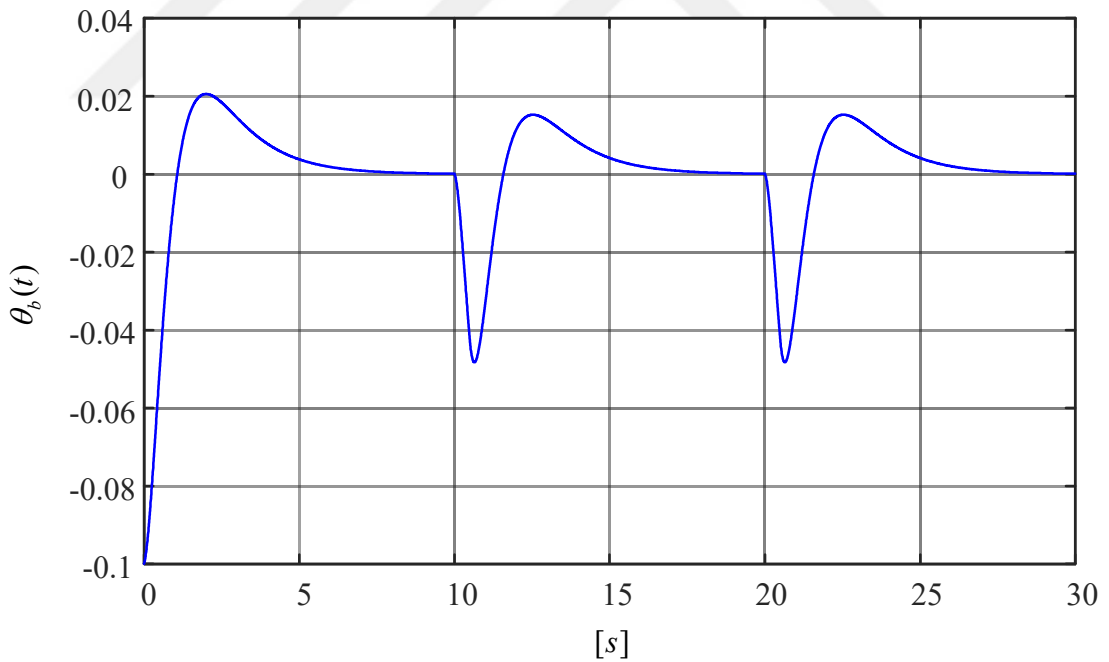


Şekil 4.13. Pozitif bozucu etkisinde uygulanan kontrol işareti

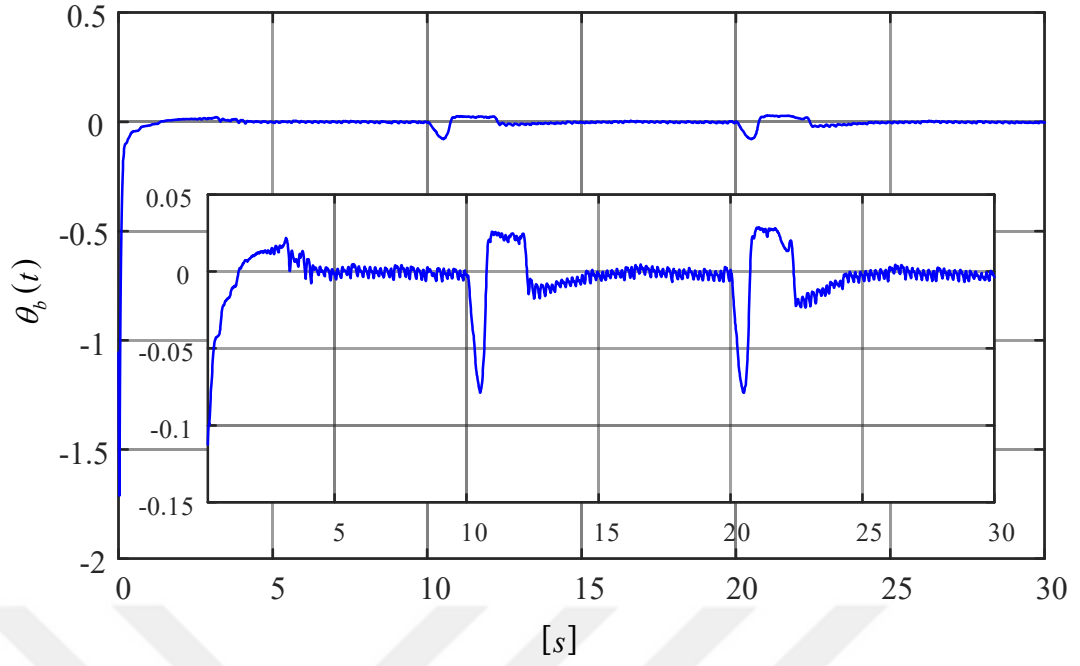
Şekil 4.11 ve 4.12’de sırasıyla benzetim ortamında ve gerçek sistemde uygulanan kontrol işaretinin değişimi verilmiştir. Şekil 4.13 incelendiğinde gürültülerden kaynaklanan olumsuz etkiler gerçek sistemde uygulanan kontrol işaretinde de kendini göstermektedir. Bununla birlikte uygulanan kontrol işareti atalet tekerini eylediği için gerçek sistemde atalet tekerinin hız değişimi ile kontrol işareti arasında doğrudan bir ilişkinin olduğu görülmüştür. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde bozucu etkisinde gürültülere rağmen

atalet tekeri sarkacı sisteminin durumları ile uygulanan kontrol işareti arasında tam bir tutarlılığın olduğu ortaya çıkmıştır.

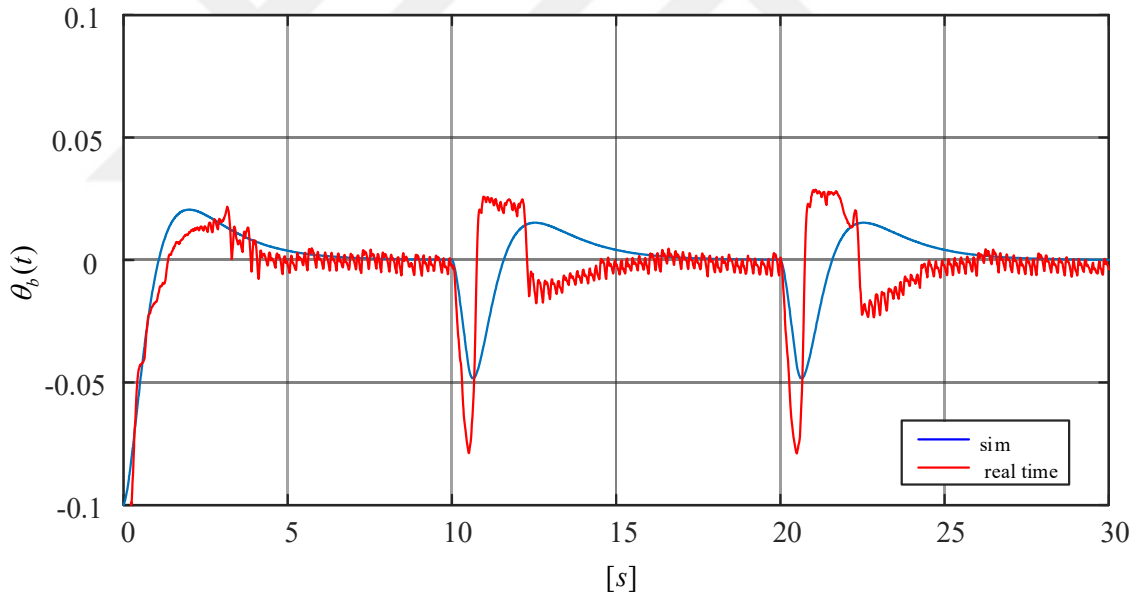
İkinci senaryoda ise atalet tekeri sarkacı sistemini negatif yönde etkileyen bozucu etkisinde tasarlan LQR kontrolcünün başarısı gözlemlenmiştir. Sırasıyla benzetim ortamında ve gerçek sistemde negatif bozucu etkisiyle gövdenin açısal konumunu değişimi Şekil 4.14-16'da, gövdenin açısal hızının değişimi 4.17-19'da, atalet tekerinin açısal hızının değişimi 4.13 ve 4.14'te gösterilmiştir. Şekil 4.15 ve 4.16'da ise sırasıyla benzetim ortamında ve gerçek sistemde atalet tekeri sarkacı sistemine uygulanan kontrol işareti gösterilmiştir. Bu senaryonun amacı ilk senaryoda gözlemlenen aynı davranışın tersi yönde de tekrarlanabilir olup olmadığını tespit etmektir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde genel anlamda aynı davranışın sergilendiği söylenebilir. Buna karşının gerçek sistemde negatif bozucu etkisinden sonra kendini toparken yaptığı aşımın daha basık olduğu gözlenmiştir. Ek olarak negatif bozucu etkisinde atalet tekerinin hızı yaklaşık 4 rad/sn sürekli hal hatasına sahiptir.



Şekil 4.14. Benzetim ortamında negatif bozucu etkisinde gövdenin açısal konumu

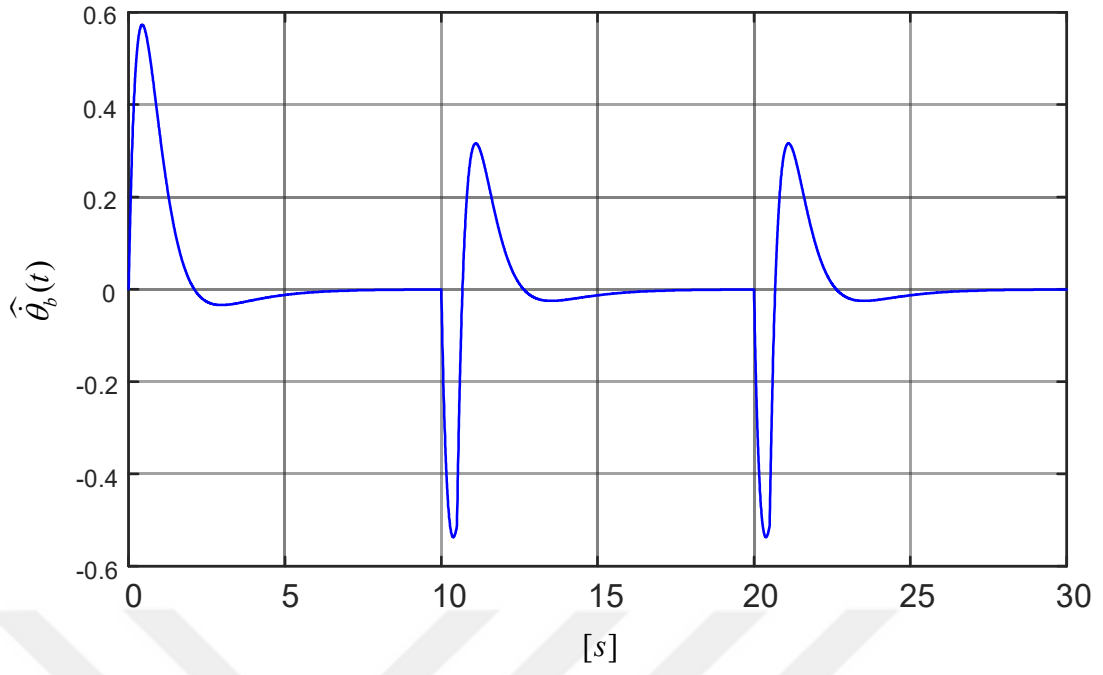


Şekil 4.15. Gerçek sistemde negatif bozucu etkisinde gövdenin açısal konumu

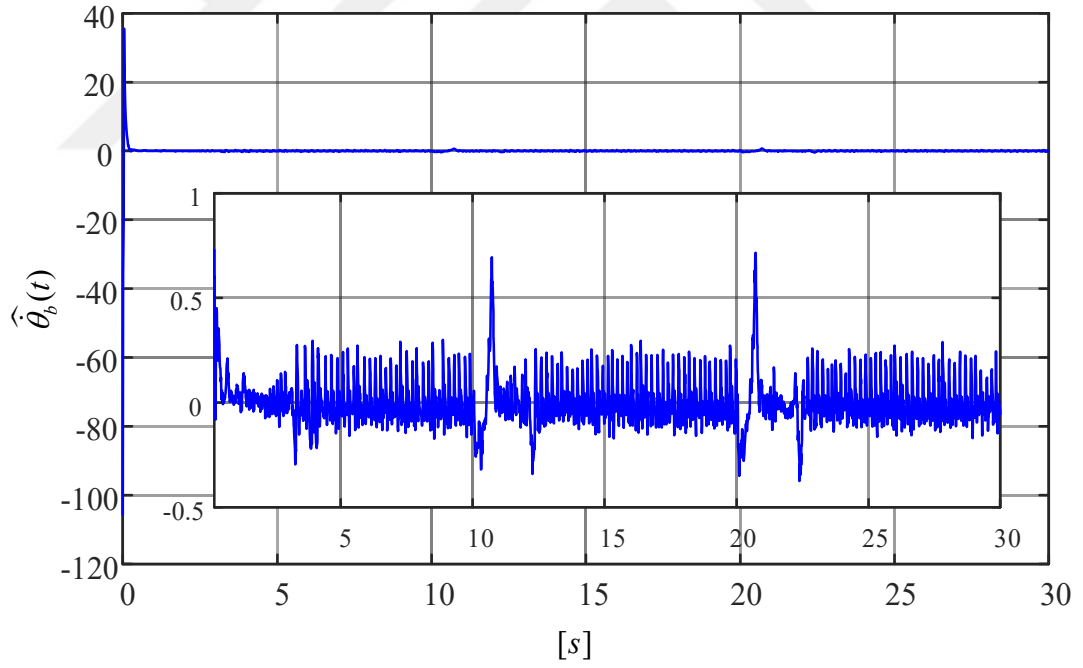


Şekil 4.16. Negatif bozucu etkisinde gövdenin açısal konumu

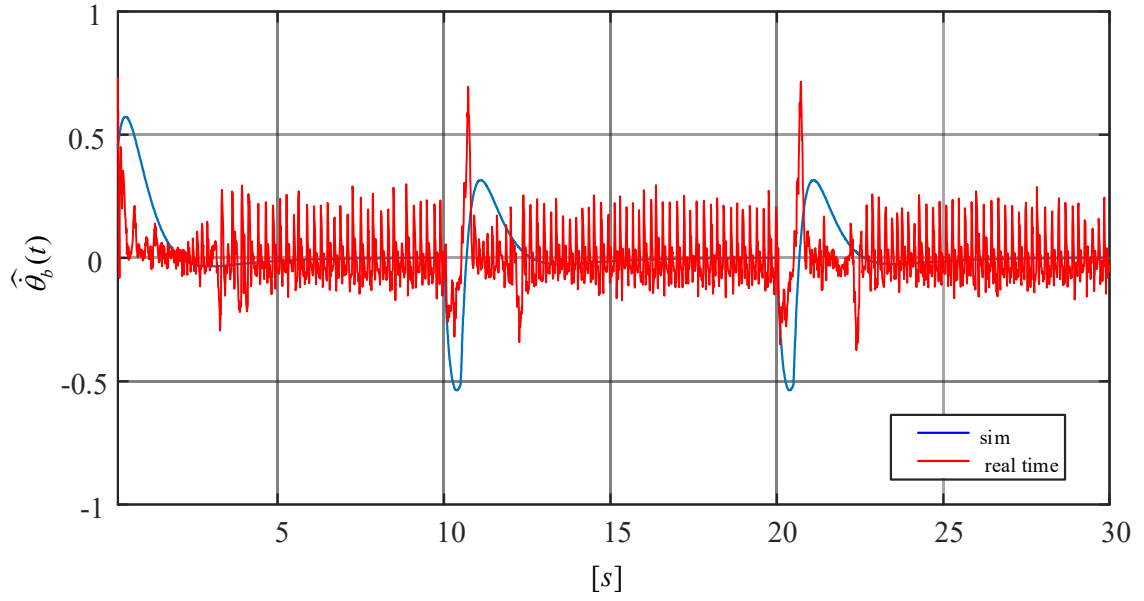
Şekil 4.16 ile 4.4 karşılaştırıldığında negatif yönde bozucu etkisi altında gerçek sistemde elde edilen sonuçta aşım beklenen tepe değeri görülmemiştir. Bu durumun deney esnasında sistemin sınır değerlerine ulaşmasından dolayı kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.17. Benzetim ortamında negatif bozucu etkisinde gövdenin açısal hızı

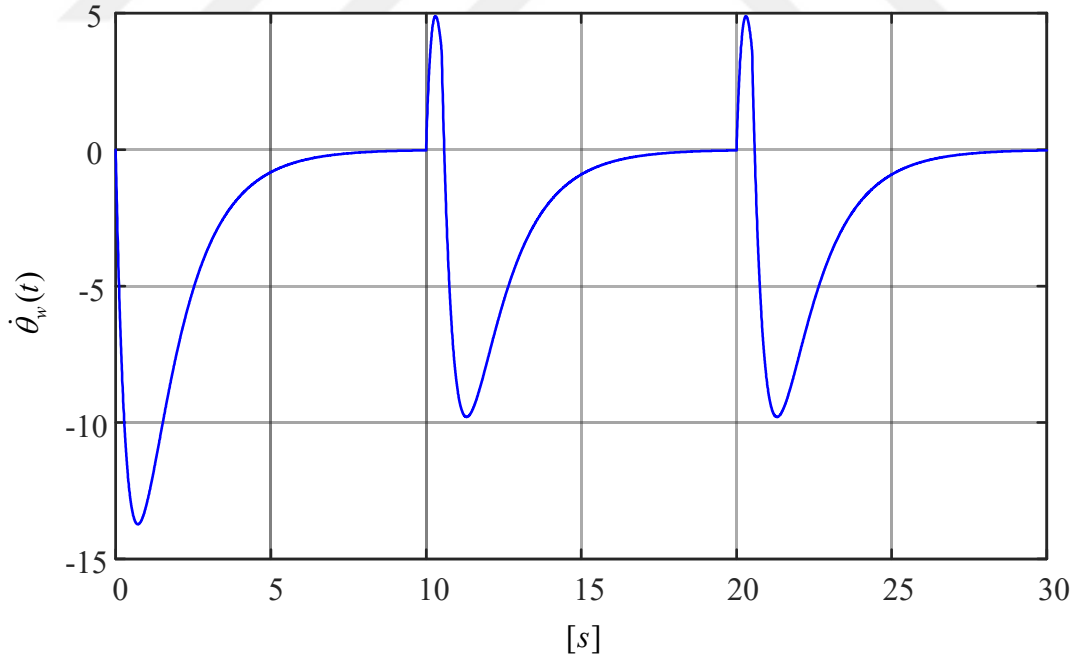


Şekil 4.18. Gerçek sistemde negatif bozucu etkisinde gövdenin açısal hızı

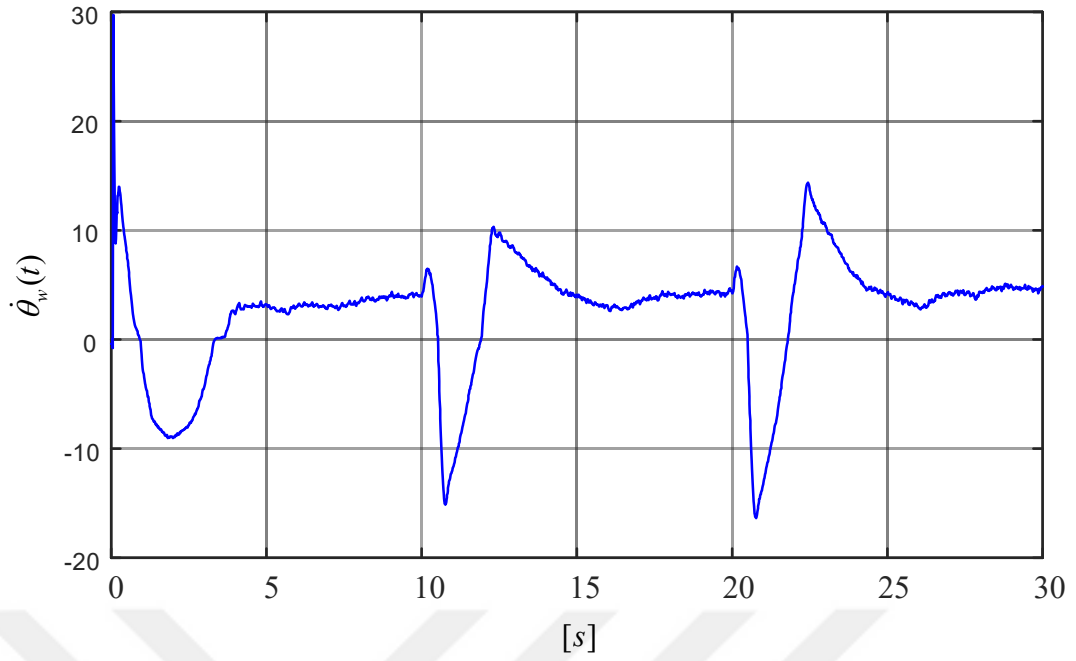


Şekil 4.19. Negatif bozucu etkisinde gövdenin açısal hızı

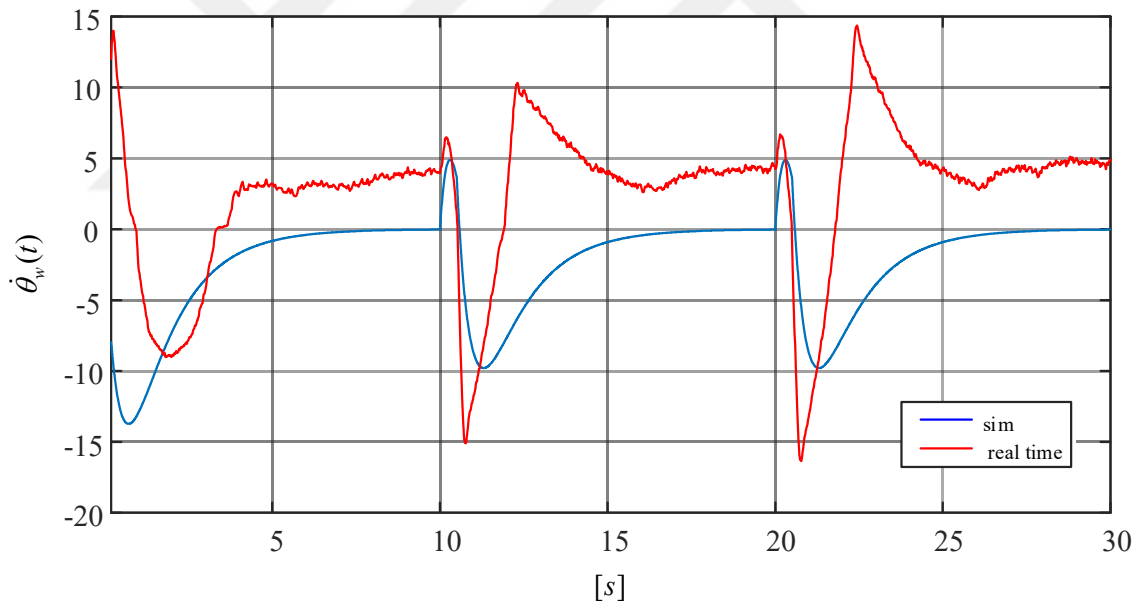
Şekil 4.19 ile 4.7 karşılaştırıldığında negatif yönde bozucu etkisinin ile pozitif yönde bozucu etkisinin giderilmesinde benzer davranışın sergilendiği görülmektedir. Bu durum önerilen kontrolcünün istenen başarıyı gerçeklediğini göstermiştir.



Şekil 4.20. Benzetim ortamında negatif bozucu etkisinde atalet tekerinin açısal hızı

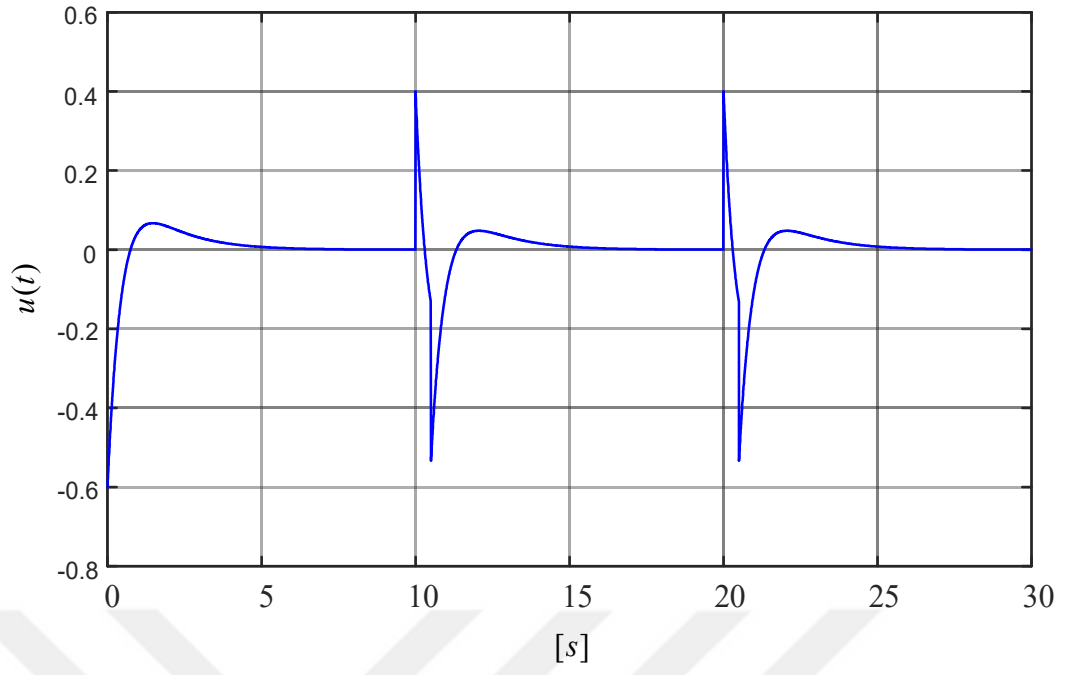


Şekil 4.21. Gerçek sistemde negatif bozucu etkisinde atalet tekerinin açısal hızı

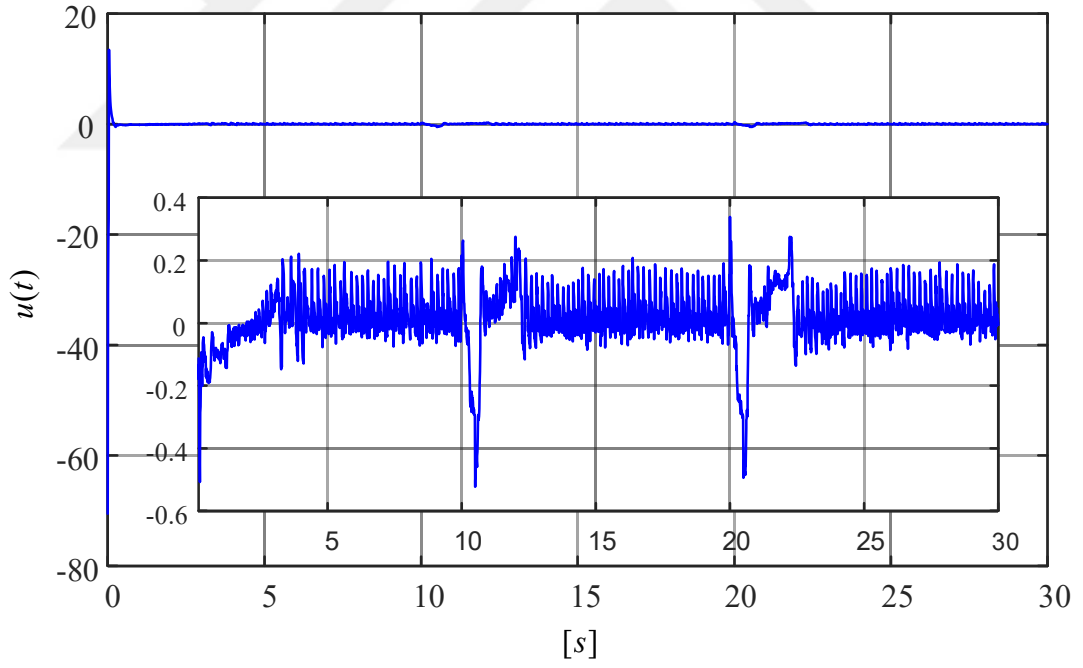


Şekil 4.22. Negatif bozucu etkisinde atalet tekerinin açısal hızı

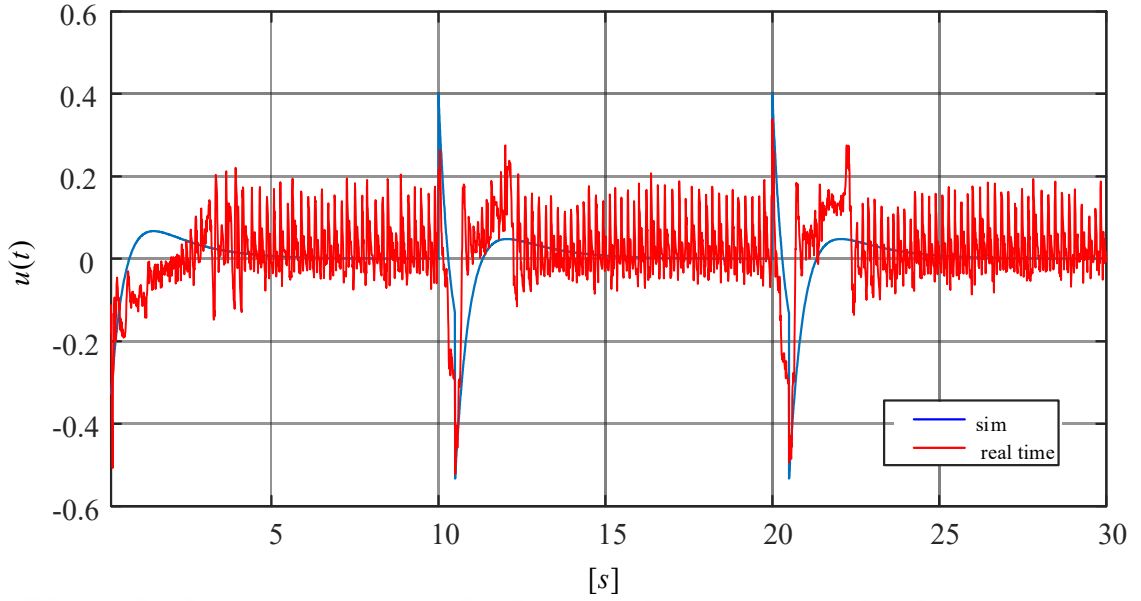
Şekil 4.22 ile 4.10 karşılaştırıldığında negatif bozucu etkisi altında atalet tekeri hızının daha fazla sürekli hal hatası verdiği görülmektedir. Bu durum negatif bozucu etkisi altında daha kontrolcünün daha az başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.23. Benzetim ortamında negatif bozucu etkisinde uygulanan kontrol işareti



Şekil 4.24. Gerçek sistemde negatif bozucu etkisinde uygulanan kontrol işareti



Şekil 4.25. Negatif bozucu etkisinde uygulanan kontrol işareti

Elde edilen sonuçlar Gajamohan vd. (2012) yaptığı çalışma ile karşılaştırıldığında 0.058 rad olan sürekli hal hatasının bu çalışmada giderilmiştir. Bu gövdenin açısız konumu ölçülürken belirtilen sıfır referans değeri sistemin çalışmadan dengede kaldığı nokta olarak seçilmesiyle sağlanmıştır. Bir başka iyileştirme ise atalet tekerinin açısız hızı alçak geçirgen filtre kullanılmadan denge noktasına ulaşabiliyor olmasıdır. Gürültü etkisinde ise küçük oranda bir iyileştirme sağlanabilmiştir. Gövdenin açısız konumu ölçmede kullanılan potansiyometre yerine yüksek PPC değerine sahip mutlak enkoder kullanılması gürültünün giderilmesine olumlu etkiler yapacağı tespit edilmiştir. Önemli olan bir diğer husus da gövdenin açısız hızının ölçülmesi yerine kestiriminin yapılmasıdır. Kestirim sonucu elde edilen açısız hız Gajamohan vd. (2012) çalışmasında ölçüm ile elde edilen hız ile karşılaştırıldığında kestirim işleminin gerçek sonuçlarla örtüşmesi hususunda oldukça başarılı olduğu görülmüştür. Kestirimin kullanılması maliyet açısından da olumlu etkiler sağlamıştır. Bu çalışmada seçilen örnekleme zamanının Gajamohan vd. (2012) çalışmasında seçilen örnekleme zamanından daha düşük olması bir diğer önemli farktır. Bu sayede bu çalışmadaki model gerçek sistem gibi davranmada doğal olarak daha iyi bir performans sergilemiştir. Bu olumlu değişikliklerin atalet tekeri sarkacı sisteminin üretiminde ortaya çıkan tüm olumsuzluklara rağmen gerçekleştirildiği ayrıca belirtilmelidir.

Owczarkowski vd. (2014) çalışmasında da bu çalışmada olduğu gibi gürültülerin sistem cevabına etkisi gözlemlenmiştir. Owczarkowski vd. (2014) çalışmasında sürekli zamanlı atalet tekeri sarkacı modeli kullanılmışken bu çalışmada ayrık zamanlı model kullanılmıştır. Ayrıca Owczarkowski vd. (2014) çalışmasında atalet tekeri sarkacı sisteminin modellenmesinde dört adet durum değişkeni tanımlanmıştır. Bu çalışmada ise Gajamohan vd. (2012) çalışmasında olduğu gibi üç durum değişkeni kullanılarak atalet tekeri sarkacı sistemi modellenmiştir. Owczarkowski vd. (2014) çalışmasında LQR katsayılarını modifiye ederek daha optimal bir kontrolcü elde edebilmiştir. İleriki çalışmalarda bu tarz iyileştirmelerin yapılması mümkündür.



BÖLÜM V

SONUÇ

Tezin ana amacı olan atalet tekeri sarkaç sisteminin başarıyla gerçekleğiği elde edilen sonuçlar değeriendirilerek gösterilmiştir. Üniversitemizin Mekatronik Mühendisliği Bölümüne lisans ve lisansüstü çalışmalarda kullanılmak amacıyla bu sınama ortamı kazandırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar benzer çalışmalarla karşılaştırılarak başarılı ve başarısız yönleri üzerinde durulmuştur. Ölçümlerde oluşan gürültülerin giderilmesi konusunun ileriki çalışmalarda üzerinde durulması gereken öncelikli konu olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca mekanik aksamda karşılaşılan problemlerin çözümü de üzerinde çalışılan diğer bir konudur. Literatürde geçen diğer kontrol yöntemlerinin kullanılarak yeni kontrolcülerin tasarlanması ve uygulanması yeni amaç olarak seçilmiştir.

Atalet tekeri sarkaç sisteminin denge noktasına zıplaması sağlayacak frenleme mekanizması sistemde var olmasına rağmen frenleme esnasında oluşan kuvvete karşı koyabilecek parçanın eksikliği nedeniyle yukarı zıplama özelliği henüz gerçekleştirilememiştir. Bu konudaki eksiklik giderilmeye çalışılmaktadır.

KAYNAKLAR

Acosta, J. A. and Lopez-Martinez, M., “Constructive feedback linearization of underactuated mechanical systems with 2-DOF”, ***44th IEEE Conference on Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference. CDC-ECC’05***, Seville, Spain, s. 4909–4914, 12-15 December, 2005.

Aguilar-Avelar, C., Rodríguez-Calderón, R., Puga-Guzmán, S. and Moreno-Valenzuela, J., “Effects of nonlinear friction compensation in the inertia wheel pendulum”, ***Journal of Mechanical Science and Technology*** 31(9), 4425–4433, 2017.

Ahsan, M., Khalid, M. U. and Kamal, O., “Stabilization of an Inertia Wheel inverted Pendulum using Model based Predictive Control”, ***IEEE 14th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)***, Islamabad, Pakistan, s. 265–270, 10th – 14th January, 2017.

Andary, S., Chemori, A., Benoit, M. and Sallantin, J., “A dual model-free control of underactuated mechanical systems, application to the inertia wheel inverted pendulum”, ***American Control Conference (ACC) IEEE***, Montréal, Canadas, s. 1029–1034, 27-29 June, 2012.

Andary, S., Chemori, A. and Krut, S., “Stable limit cycle generation for underactuated mechanical systems, application: Inertia wheel inverted pendulum”, ***IEEE/RSJ International Conference of Intelligent Robots and Systems, (IROS)***, Nice, France, s. 526–531, 22-26 September, 2008.

Andary, S., Chemori, A. and Krut, S., “Estimation-based disturbance rejection in control for limit cycle generation on inertia wheel inverted pendulum testbed”, ***IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (IROS)***, St. Louis, USA, s. 1302–1307, 11-15 October, 2009.

Aoues, S., Eberard, D. and Marquis-Favre, W. “Discrete IDA-PBC control law for Newtonian mechanical port-Hamiltonian systems”, *IEEE 54th Annual Conference on Decision and Control (CDC)*, Osaka, Japan, s. 4388–4393, 15-18 December, 2015.

Bapiraju, B., Srinivas, K. N., Prem Kumar, P. and Behera, L., "On balancing control strategies for a reaction wheel pendulum", *Proceedings of the IEEE INDICON*, Kharagpur, India, s. 199-204, 20-22 December, 2004.

Enev, F., “Feedback Linearization Control of the Inertia Wheel Pendulum”. *Cybernetics and Information Technologies* 14(3), 2014.

Gajamohan, M., Merz, M., Thommen, I. and D’Andrea, R., “The cubli: A cube that can jump up and balance”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vilamoura, Algarve, Portugal, s. 3722–3727, October 7-12, 2012.

Gajamohan, M., Muehlebach, M., Widmer, T. and D’Andrea, R., “The Cubli: A reaction wheel based 3D inverted pendulum”, *IMU*. 2(2), 2013.

Gritli, H., Khraief, N., Chemori, A. and Belghith, S., “Self-generated limit cycle tracking of the underactuated inertia wheel inverted pendulum under IDA-PBC”, *Nonlinear Dynamics* 89(3), 2195–2226, 2017.

Haddad, N. K., Chemori, A., Pena, J. J. and Belghith, S., “Stabilization of inertia wheel inverted pendulum by model reference adaptive IDA-PBC: from simulation to real-time experiments”, *IEEE 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT)*, Tlemcen, Algeria, s. 1–6, 25-27 May, 2015.

Haddad, N. K., Chemori, A. and Belghith, S., “Robustness enhancement of IDA-PBC controller in stabilising the inertia wheel inverted pendulum: theory and real-time experiments”, *International Journal of Control* 1–16, 2017.

He, G., Chen, R. and Zhang, Y., “Globally Stabilizing a Class of Underactuated Mechanical Systems on the Basis of Finite-Time Stabilizing Observer”, *Journal of*

Intelligent & Robotic Systems 86(3–4), 353–366, 2017.

Hernandez, V. M. and Sira-Ramirez, H., “Generalized PI control for swinging up and balancing the inertia wheel pendulum”, *IEEE Proceedings of the American Control Conference*, Denver, CO, USA, C. 4, s. 2809–2814, 4-6 June, 2003.

Huawen, Y., Yang, H., Shuqing, H. and Weihua, G., "Novel stabilization design for the inertia wheel pendulum", *27th Chinese Control Conference*, Kunming, China, s. 26-30, 16-18 July, 2008.

Khalid, N. and Memon, A. Y., “Output feedback stabilization of an inertia wheel pendulum using sliding mode control”, *IEEE UKACC International Conference on Control*, Loughborough, U.K, s. 157–162, 9-11 July, 2014.

Khalid, N. and Memon, A. Y., “Output Feedback Control of a Class of Under-Actuated Nonlinear Systems Using Extended High Gain Observer”, *Arabian Journal for Science and Engineering* 41(9), 3531–3542, 2016.

Khoroshun, A. S., “Stabilization of the Upper Equilibrium Position of a Pendulum by Spinning an Inertial Flywheel”, *International Applied Mechanics* 52(5), 547–556, 2016.

Larimi, S. R., Iqbal, O., Garbowski, J., Hoorfar, M. and Najjaran, H., “Two-layer hybrid control of an underactuated system”, *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Budapest, Hungary, s. 3864–3869, 9-12 October, 2016.

Lixia, Y. and Baoli, M. “Nonlinear Control of Inertial Wheel Pendulum and Its Implementation Based on STM32”, *Proceedings of the 2015 Chinese Intelligent Systems Conference*, s. 493–502, 2016.

Lu, B., Fang, Y. and Sun, N., “Global stabilization of inertia wheel systems with a novel sliding mode-based strategy”, *IEEE 14th International Workshop on Variable Structure Systems (VSS)*, Nanjing, China, s. 200–205, 1-4 June, 2016.

Luna, V. J. and Aguilar, L. T., “Two relay based control for orbital stabilization of inertia wheel pendulum—The bounded input case”, *IEEE 11th International Workshop on Variable Structure Systems (VSS)*, Mexico City, Mexico, s. 313–318, 26 - 28 June, 2010.

Mehdi, N., Malik, F. M., Bhatti, A. I. and Qaiser, N., “Sampled data dynamic surface control for inertia wheel pendulum”, *IEEE International Conference on Robotics and Artificial Intelligence (ICRAI)*, Rawalpindi, Pakistan, s. 91–95, 22-23 October, 2012.

Merlo-Zapata, C. A., Antonio-Cruz, M., Silva-Ortigoza, R., Taud H., Rivera-Zarate, I., Munoz-Carrillo, D. and Hernandez-Guzman, V. M., “Modeling and Construction of an Inertia Wheel Pendulum Test-Bed”, *IEEE International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering*, Cuernavaca, Mexico, s. 116–121, 18-21 November, 2014.

Muehlebach, M. and D’Andrea, R., “Nonlinear Analysis and Control of a Reaction-Wheel-Based 3-D Inverted Pendulum”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 25(1), 235–246, 2017.

Nguyen, T. S. and Huynh, T. H., "Study on a two-loop control architecture to balance an inertia wheel pendulum", *IEEE 3rd National Foundation for Science and Technology Development Conference on Information and Computer Science (NICS)*, Danang, Vietnam, s. 29-33, 14-16 September, 2016.

Owczarkowski, A., Lis, M. and Koziarski, P., “Tracking control of an inertial wheel pendulum by LQR regulation”, *IEEE 19th International Conference On Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, Miedzyzdroje, Poland, s. 384–388, 2-5 September, 2014.

Qaiser, N. and Iqbal, N., “Stabilization of inertia wheel pendulum using multiple sliding surfaces control technique” *IEEE Multitopic Conference INMIC’06*, Islamabad, Pakistan, s. 461–466, 23-24 December, 2006.

Qaiser, N., Iqbal, N. and Hussain, A., “Stabilization of non-linear inertia wheel pendulum

system using a new dynamic surface control based technique”, *IEEE International Conference on. Engineering of Intelligent Systems*, Islamabad, Pakistan, s. 1–6, 22-23 April, 2006.

Qaiser, N. and Iqbal, N., “A novel nonlinear controller design for the inertia wheel pendulum”, *IEEE International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology IBCAST*, Islamabad, Pakistan, s. 58–62, 8-11 January, 2007.

Ramirez-Neria, M., Sira-Ramírez, H., Garrido-Moctezuma, R. and Luviano-Juarez, A., “On the linear Active Disturbance Rejection Control of the inertia wheel pendulum”, *IEEE American Control Conference (ACC)*, Chicago, IL, USA, s. 3398–3403, 1-3 July, 2015.

Santibanez, V., Kelly, R. and Sandoval, J., “Control of the inertia wheel pendulum by bounded torques”, *44th IEEE Conference on Decision and Control European Control Conference CDC-ECC’05*, Seville, Spain, s. 8266–8270, 12-15 December, 2005.

Sowman, J., Laila, D. S. and Longo, S., “Real-time approximate explicit nonlinear model predictive control for the swing-up of a reaction wheel pendulum”, *IEEE 54th Annual Conference on Decision and Control (CDC)*, Osaka, Japan, s. 4308–4313, 15-18 December, 2015.

Spong, M. W., Corke, P. and Lozano, R., “Nonlinear control of the reaction wheel pendulum”, *Automatica* 37(11), 1845–1851, 2001.

Sun, N., Fang, Y. and Chen, H., “A Novel sliding mode control method for an inertia wheel pendulum system”, *IEEE International Workshop on Recent Advances in Sliding Modes (RASM)*, Istanbul, Turkey, s. 1–6, 9-11 April, 2015.

Ye, H., Liu, G. P., Yang, C. and Gui, W., “Stabilisation designs for the inertia wheel pendulum using saturation techniques”. *International Journal of Systems Science* 39(12), 1203–1214, 2008.

Zayane-Aissa, C., Laleg-Kirati, T. M. and Chemori, A., “Control of a perturbed under-actuated mechanical system”, *IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, Sydney, Australia, s. 294–299, 21-23 September, 2015.

Zhang, A., Yang, C., Gong, S. and Qiu, J., “Nonlinear stabilizing control of underactuated inertia wheel pendulum based on coordinate transformation and time-reverse strategy”, *Nonlinear Dynamics* 84(4), 2467–2476, 2016.



ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Ali KOÇ 2008 yılında kazandığı İstanbul Teknik Üniversitesi Kontrol Mühendisliği Bölümü'nden Haziran 2013'te mezun oldu. Şubat 2015'de Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'ne araştırma görevlisi olarak atandı. 2015 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans programına başladı. Halen Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmakta olup kontrol mühendisliği alanında çalışmalarına devam etmektedir.

