

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
TEKNOLOJİ FAKÜLTESİ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ



DENGE ROBOTU TASARIMI VE MODELLENMESİ

BERNA POLAT
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman: Doç. Dr. Mehmet ÇAVAŞ
ELAZIĞ 2018

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DENGİ ROBOTUNUNUN TASARIMI VE MODELLEMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Berna POLAT

(161134107)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Ağustos 2018

Tezin Savunulduğu Tarih : 06 Ağustos 2018

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mehmet ÇAVAŞ (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Ömür AYDOĞMUŞ (F.Ü)

Dr. Öğr. Üyesi Muzaffer ARSLAN (Bingöl Ü)

AĞUSTOS-2018

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	II
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	III
TABLolar LİSTESİ.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ÖZET	VII
ABSTRACT	VIII
SEMBOLLER	IX
KISALTMALAR	X
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
3. PID DENETİM YÖNTEMİ	16
3.1. PID KONTROL AYARI	18
4. SİMMECHANİCS	20
5. DENGİ ROBOTUNUN TASARIMI VE MODELLENMESİ	22
6. SONUÇLAR	42
KAYNAKLAR	43
ÖZGEÇMİŞ.....	48

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2. 1. Ters sarkaç modeli	3
Şekil 2. 2. Segway.	4
Şekil 2. 3. İki tekerlekli taşıyıcı	5
Şekil 2. 4. İki tekerlekli ters sarkaç	6
Şekil 2. 5. Joe denge robotunun görünümü	7
Şekil 2. 6. Denge noktaları	8
Şekil 2. 7. Tek sarkaçlı bir ters sarkaç sistemi için Simmechanics blok diyagramı	9
Şekil 2. 8. Ters sarkaç sisteminin deneysel kurulumu	9
Şekil 2. 9. Simmechanics simülasyon modeli	10
Şekil 2. 10. Matlab gerçek zamanlı toolbox kullanılarak kontrol edilen deneysel model	10
Şekil 2. 11. nBot denge robotunun görünümü	11
Şekil 2. 12. Bir ve ikili PID tasarımı	12
Şekil 2. 13. İki ve üç kontrolörlü ters sarkaç tasarımı	12
Şekil 2. 14. İki tekerlekli bir ters sarkaç sistemi	12
Şekil 2. 15. Robotun solidworks ortamından bir görüntüsü	13
Şekil 2. 16. İlgen ve arkadaşlarının yaptığı sistemin blok diyagramı	14
Şekil 2. 17. Araba-sarkaç sistemi	15
Şekil 3.1. PID ile sistem kontrol diyagramı [1].	16
Şekil 5.1. Denge robotu Solidworks tasarımı	22
Şekil 5.2. Denge robotu Solidworks tasarımı	23
Şekil 5.3. Denge robotu Solidworks tasarımı	23
Şekil 5.4. Ters sarkaç sisteminin Solidworks çizimi	24
Şekil 5.5. Ters sarkaç sisteminin Solidworks çizimi	24
Şekil 5.6. Ters sarkaç sisteminin Solidworks çizimi	24
Şekil 5.7. Ters sarkaç sisteminin SimMechanics blok diyagramı	25
Şekil 5.8. PID eklenmiş ters sarkaç sisteminin SimMechanics modeli	25
Şekil 5.9. Sistemin $\theta=180^\circ$ noktasındaki simülasyon sonucu	26
Şekil 5.10. Sistemin $\theta=180^\circ$ noktasındaki simülasyonun daha yakından görüntüsü	27

Şekil 5.11. Kararsız denge noktasındaki görünümü	28
Şekil 5.12. Sistemin $\theta=0^\circ$ noktasındaki simülasyon sonuçları	29
Şekil 5.13. Kararlı denge noktasındaki görünümü	29
Şekil 5.14. Sistemin $\theta=90^\circ$ noktası simülasyon sonucu	30
Şekil 5.15. Sarkacın $\theta=90^\circ$ noktasındaki görünümü	30
Şekil 5.16. PID parametre değerleri	31
Şekil 5.17. Sarkaç açısı $\theta=180^\circ$ noktasındaki simülasyon sonucu	32
Şekil 5.18. Sarkaç açısı $\theta=180^\circ$ noktasındaki simülasyon sonucunun yakından görünümü	32
Şekil 5.19. Sarkaç açısı $\theta=0^\circ$ noktasındaki simülasyon sonucu	33
Şekil 5.20. PID parametre değerleri	33
Şekil 5.21. Denge robotu SimMechanics blok diyagramı	34
Şekil 5.22. Denge robotunun sabit kuvvet uygulanmış SimMechanics modeli	34
Şekil 5.23. Tekerlek hareket simülasyonu	35
Şekil 5.24. Tekerlek hareket simülasyonu	36
Şekil 5.25. Sarkaç hareketi simülasyonu	36
Şekil 5.26. Denge robotunun PID eklenmiş SimMechanics modeli	37
Şekil 5.27. Sarkaç açısı $\theta=180^\circ$ noktasındaki simülasyonu	38
Şekil 5.28. Sarkaç açısı $\theta=0^\circ$ noktasındaki simülasyonu	38
Şekil 5.29. PID parametre değerleri	39
Şekil 5.30. Tekerleklerin hareket simülasyonu	40
Şekil 5.31. Tekerleklerin hareket simülasyonu	40
Şekil 5.32. PID parametre değerleri	41

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. PID denetleyici kazançları ve etkileri	18
--	----



TEŞEKKÜR

Tez çalışması süresince her zaman hoşgörüsü ile karşılaştığım, tecrübeleri ile yanımda olan danışman hocam Doç. Dr. Mehmet ÇAVAS’ a, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen sayın Doç. Dr. Ömür Aydoğmuş ve Dr. Öğretim Üyesi Mustafa AY hocalarıma, yaşam boyu maddi ve manevi desteklerini hissettiğim annem, babam ve abime en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Berna POLAT

ELAZIĞ-2018



ÖZET

Bu tez çalışmasında iki tekerlekli denge robotu tasarlanarak Matlab programında simülasyonu yapılmıştır. Yapılan çalışma literatürdeki mevcut çalışmalar ile karşılaştırılmış ve mevcut çalışmalara göre programlama ve çalışma hassasiyetinin daha iyi olduğu elde edilen veriler ile ortaya konulmuştur. Diğer çalışmalarda olduğu gibi bu çalışmada da deney düzeneği olarak ters sarkaç sistemi kullanılmış ve denge robotu bu kapsamda tasarlanarak modellenmiştir. Bu tezde yaptığımız çalışmanın tasarım aşamalarında öncelikle ters sarkaç sistemi ve denge robotunun üç boyutlu çizimi Solidworks programı kullanılarak hazırlanmıştır. Daha sonra tasarımı yapılan denge robotu modeli Matlab/Simulink programındaki SimMechanics arabirimine aktararak gerekli blok diyagramlar oluşturulmuştur.

Tasarlanan denge robotunun kontrolü PID kontrol ünitesi ile yapılmış ve PID' nin parametrelerini belirlemek için Matlab/Simulink'deki "PID Tuner" kullanılmıştır. Bu şekilde tasarlanan denge robotunun kontrol parametreleri ayarlanarak sisteme uygulanmış ve bilgisayar ortamında sistemin simülasyonu yapılarak elde edilen veriler değerlendirilip bu tez çalışmasında sunulmuştur. Bu tez çalışmasında elde edilen veriler daha pratik ve daha kararlı çalışan yeni denge robotu modellerinin tasarımlarına katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Ters sarkaç, Denge robotu, SimMechanics, PID kontrolör

ABSTRACT

Balancing Robot Design and Modelling

In this study, a two-wheeled balance robot was designed and its simulation was made in Matlab program. The study was compared to the available studies in literature and it was revealed through the acquired data that its programming and working precision was better than the others. As in other studies, the inverted pendulum system was used as the testing apparatus and the balance robot was designed and modeled within this scope. In the design phases of the study in this thesis, the inverted pendulum system and three dimensional drawing of the balance robot were first prepared using Solidworks program. Next, the designed balance robot model was transferred to SimMechanics interface in Matlab/Simulink program and the necessary block diagrams were formed.

The designed balance robot was checked with PID control unit and “PID Tuner” in Matlab/Simulink was used to determine the parameters of PID. The control parameters of the balance robot designed in this way were adjusted and applied on the system. The simulation of the system was made in computer environment and the acquired data were evaluated and presented in this thesis study. The acquired data will contribute to the design of more practical and stable balance robot models.

Keywords: Inverted pendulum, Balance robot, SimMechanics, PID controller

SEMBOLLER

e	Kazanç Parametreleri Toplanma Noktası
K_p	Oransal kazanç
K_i	İntegral kazancı
K_d	Türevsel kazanç
v	Kontrolör Çıkışı
u	Kontrol Değişkeni
θ	Sarkacın Eksenle Yaptığı Aç

KISALTMALAR

CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
FLC	Bulanık Mantık Kontrol
IMU	Atalet Ölçüm Birimi
LQR	İkinci Dereceden Doğrusal Düzenleyici
PD	Oransal Türevsel Denetim Yöntemi
PID	Oransal İntegratör Türevsel Denetim Yöntemi
SIMO	Tek Girişli – Çok Çıkışlı Sistem



1. GİRİŞ

Modernleşmiş toplumlarda robotların kullanımı oldukça yaygındır. İnsanların hayat kalitesini arttırmak ya da karşılaştıkları sorunlara çözüm bulmak için birçok alanda robotlar kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra robotlar daha özelleşmiş amaçlar için de kullanılabilir. Bu nedenle sorunların çözümü robotlar sayesinde daha kısa bir sürede ve daha kolay bir şekilde çözüm bulunabilmektedir. Boyut, hız, algılama yeteneği veya işlem yapabilme becerisi gibi bireysel yeteneklerin yeterli olmadığı alanlarda robotlar devreye girmektedir. Gün geçtikçe farklı yapıda ve çeşitlerde robotlar tasarlanmaktadır. Robot tasarımının önemli amaçlarından biri de insanın yapamadığı veya veriminin düşük olduğu alanlarda kullanılmasıdır.

Denge robotu bir ya da iki tekerleğe sahip yer ile temas halinde olan ve gövde açısının kontrolü için çeşitli kontrol metotlarının uygulanmasına izin veren bir robot türüdür [1]. Denge robotu kararsız ve doğrusal olmayan yapısıyla birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve birçok bilim adamı bu alanda çeşitli araştırmalar yapmıştır. Bilim insanları için denge robotunun araştırılması farklı kontrol yöntemlerini test etmek ve doğrusal olmayan kompleks bir sistemde nasıl davrandığını görmek için iyi bir deneme ortamı sağlamıştır. Bu ilgi çekici özelliğinin yanı sıra insan hareketlerinin sınırlı olduğu dar alanlarda, eğimli düzlemlerde, kişisel taşıma aracı olarak kullanılmaları bu robotları daha cazip hale getirmektedir.

Denge robotunun yere yatmadan dikey pozisyonda doğrultulması için gövde açısının dengelenmesi gerekmektedir. Aynı zamanda tekerleklerin pozisyonu aynı noktada kalmalı ve robot öne, arkaya, sağa, sola hareket edebilmelidir [1].

Denge robotu ters sarkaç sisteminin geliştirilmiş hali olarak düşünülebilir. Son yıllarda ters sarkaç sistemi insansı robotlar, robotik tekerlekli sandalyeler ve kişisel taşıma sistemleri için ileri geri hareket eden yürüyüş şekilleri tasarımı gibi çeşitli problemlerin çözümü için kullanılmaktadır [2].

Ters sarkaç sistemi kontrol edilmesi zor olan sistemlerden biridir. Sistem doğrusal olmamakla birlikte kararsız bir sistemdir [3]. Sistemi dengelemek için farklı yaklaşımlar uygulanabilir. Sarkacı dikey pozisyonda dengelemek için sarkaç açısı farklı yöntemler ile hesaplanırken, gürültü sinyallerini yok etmek için de çeşitli filtreler ve farklı kontrol teorileri kullanılmaktadır [4].

Bu tez çalışmasında:

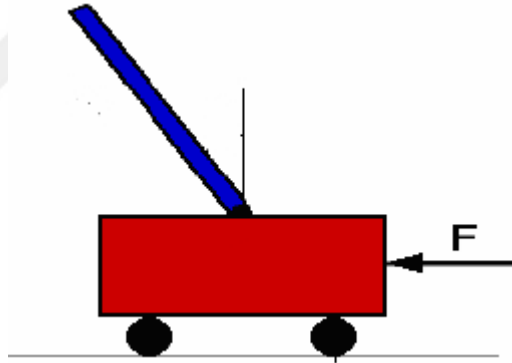
- Solidworks kullanılarak sistemin üç boyutlu modellemesi yapılmıştır.
- Üç boyutlu çizim Matlab/Simulink yazılımının uzantısı olan SimmMechanics arabirimine aktarılmıştır.
- Sistemin kontrolü için bir PID kontrolör tasarlanarak eklenmiştir.
- Simülasyon sonuçları değerlendirilerek açıklanmıştır.



2. LİTERATÜR TARAMASI

Denge robotu ters sarkaç sisteminin geliştirilmiş hali olarak düşünülebilir. Bundan dolayı denge robotlarının incelenmesinde ilk önce Şekil 2.1’de görüldüğü gibi ters sarkaç sistemi üzerinde yapılan araştırmaları incelemek bu çalışma için daha faydalı olacaktır.

Sarkaç bir ip ya da çubuğa bağlı bir kütledir. Bir kuvvet uygulanmadığı takdirde yerçekimine bağlı olarak sabit bir konumda kalır ve sisteme herhangi bir kuvvet uygulandığında ise belirli periyotlarda salınım yapan bir sistemdir. Elimizin içinde yerçekimine zıt yönde bir bastonu tutmaya çalışırsak bu durum ters sarkaç sistemini anlamamıza yardımcı olacaktır. Bastonu elimizin içinde dikey konumda nasıl tutmaya çalışıyorsak, ters sarkaç sisteminde de amaç sarkacı istenilen konumda dik olarak dengede tutabilmektir.



Şekil 2.1 Ters sarkaç modeli [5].

Ters sarkaç sistemi kararsız ve doğrusal olmayan yapısı nedeniyle kontrol edilmesi en zor sistemlerden biri olmakla birlikte bu özelliğinden dolayı da üzerinde birçok kontrol metodunun uygulanmasına imkan vermektedir. Bu yüzden araştırmacıların ilgi odağı olmuş ve birçok çalışma yapılmıştır.

Dikey bir şekilde yükselen roketin modellenmesi, insan kolunun ya da ayakta olan bir insanın fiziksel modellenmesi gibi sistemlerde de ters sarkaç modellemeden yararlanılmaktadır [6].

Yapısal olarak farklı ters sarkaç sistemleri bulunmaktadır. Tek sarkaçlı [7], çift sarkaçlı [8], tek ve çift sarkaçlı dönel sarkaçlı [9] gibi farklı yöntemlerle ters sarkaç sistemlerine rastlanmaktadır.

Ters sarkaç sistemine yapay sinir ağları [10], bulanık mantık [11], genetik algoritmalar gibi akıllı kontrol yöntemleri ve PD, PID, LQR gibi temel doğrusal kontrol metotları ile kayan kipli ve geri adımlamalı gibi doğrusal olmayan kontrol yöntemleri de ters sarkaç sistemine uygulanan kontrol yöntemleridir.

Robotik sistemlerde iki tekerlekli ve kendi dengesini sağlayabilen bir sistem üzerinde yapılan ilk çalışma Dean Kamen (2001) tarafından yapılmış olan Şekil 2.2’de görülen ve Segway olarak adlandırılan kişisel ulaşım aracıdır. Ticari bir ürün olması ile birlikte esneklik, güvenlik ve performans bakımından da önemli ve kişisel kullanıma uygun bir sistem olarak tasarlanmıştır. Günümüzde de bu robotik sistemleri farklı kullanım alanlarında farklı işlemleri gerçekleştirmek için kullanıldıkları görülmektedir.

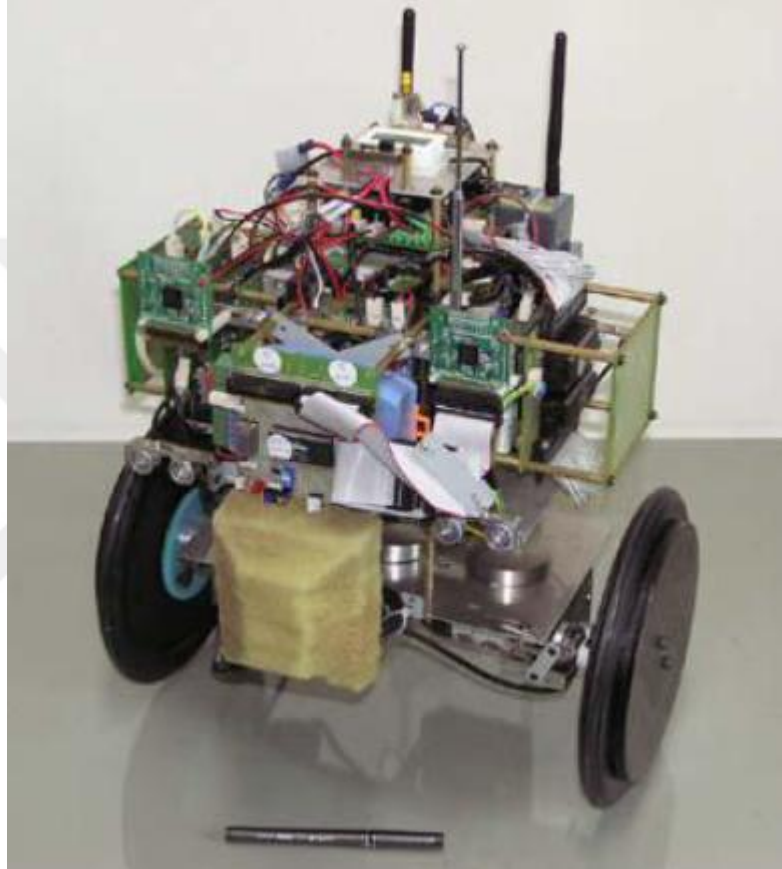


Şekil 2.2. Segway [12].

Ayrıca Segway’ın iki tekerlekli olması ve kendini dengelemesi ile de dengeleyen robotik platformun ortaya çıkmasına öncülük etmiştir. İki tekerlekli kendini dengeleyebilen sistemler yapılarına göre;

1. Robotik platformlar
2. Taşıma araçları olarak iki gruba ayrılmaktadır [13].

Robotik platformlar genellikle küçük boyutlu yapılarıyla karşımıza çıkmaktadır. Şekil 2.3'te iki tekerlekli taşıyıcı robot örneği ve Şekil 2.4'te büyük boyutlu robot örneği görülmektedir.



Şekil 2.3 İki tekerlekli taşıyıcı [14].



Şekil 2.4 İki tekerlekli ters sarkaç [15].

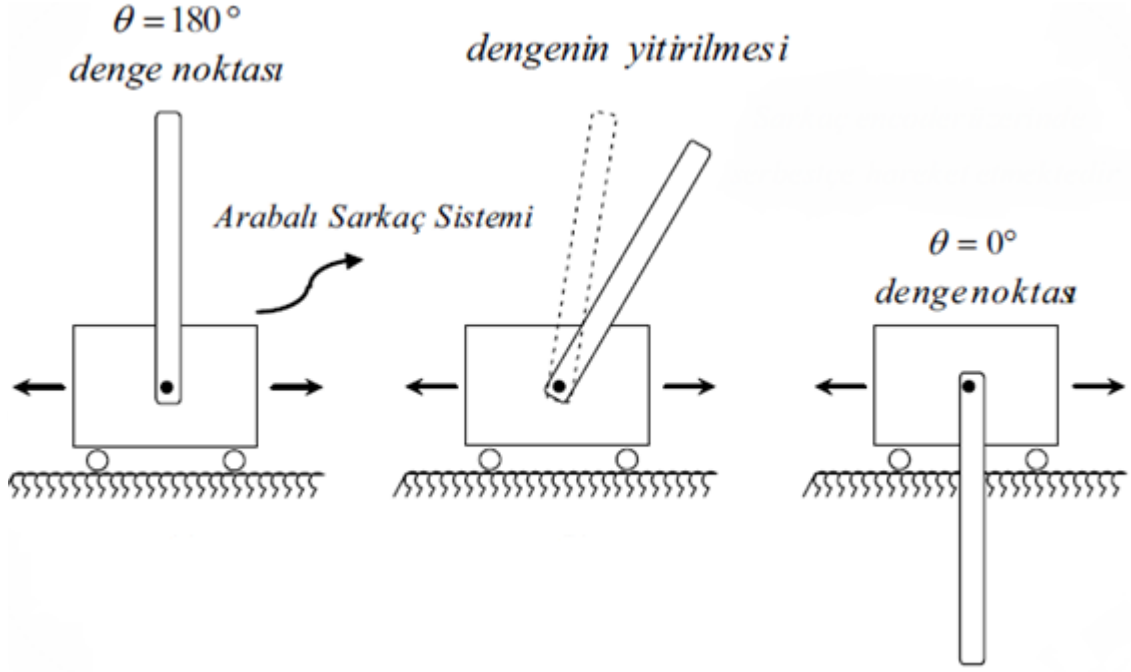
Bu robotların bazıları uyarıcı tarafından idare edilirken diğerleri ise özerk bir şekilde kendi kendini idare edebilmektedir [13]. Bir uyarıcı tarafından kontrol edilen robotlar, bir bilgisayardan bir bluetooth modülü veya bir radyo alıcısı aracılığıyla kontrol edilmektedirler [13]. Tam olarak özerk olan robotlar ise kendilerini idare edebilecek zeka yapısına sahip olabilmektedir. Bulundukları ortamı belirlemek ya da yol planlaması yapmak için ihtiyaç duyulan donanım ve yazılıma sahiptirler.

Grasser ve arkadaşları (2002) tarafından geliştirilen iki tekerlekli denge robotu Joe, üzerindeki bir sürücüye benzetim yapmak amacıyla sarkacın üstüne ağırlık bırakılarak tasarımı yapılmıştır. Robotun eğimini hesaplamak için enkoderler ve jiroskoplar kullanılmıştır [16].



Şekil 2.5 Joe denge robotu [16].

Kızır ve arkadaşları ters sarkaç sistemi üzerinde yaptıkları araştırmada sarkacın dik pozisyonda sabit kalabilmesi için PID ve tam durum geri besleme metotlarını karşılaştırmışlardır. Matlab/Simulink ile uyumlu çalışabilecek bir denetleyici kartı kullanarak uygulama yapılmış ve uygulanan yöntem sarkacın dik pozisyona gelmesini sağlarken ancak tam durum geri besleme yönteminin daha sağlam olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 2.6’da gösterildiği gibi denge noktalarını belirlemişlerdir [17].

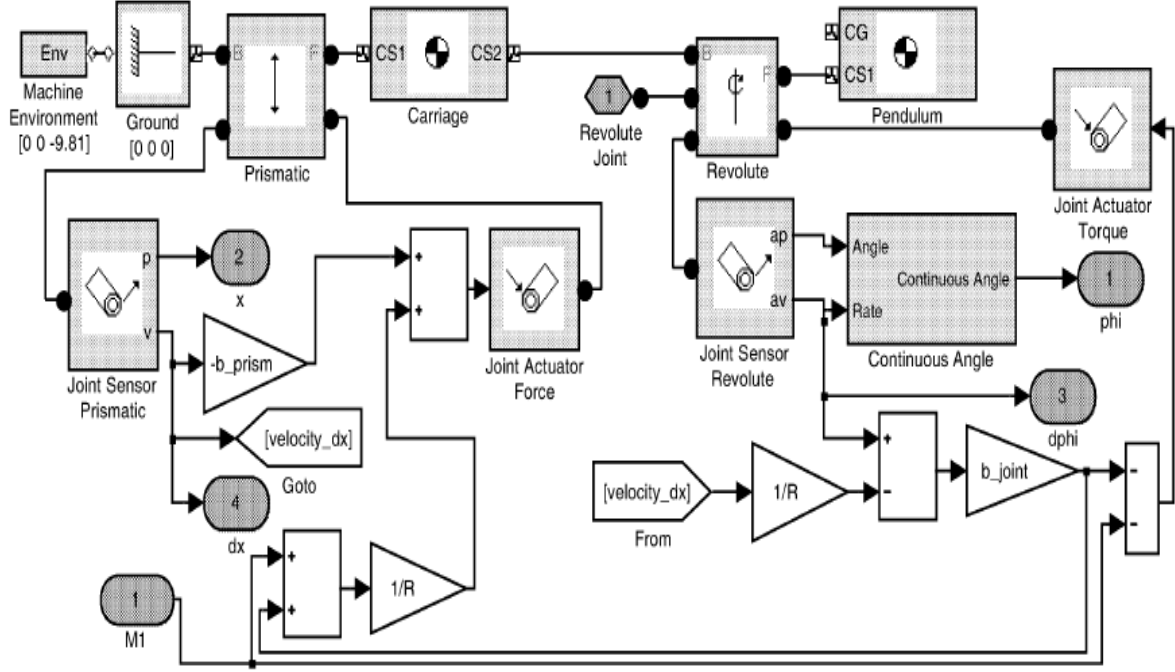


Şekil 2.6 Denge noktaları (Kızır ve ark.) [17].

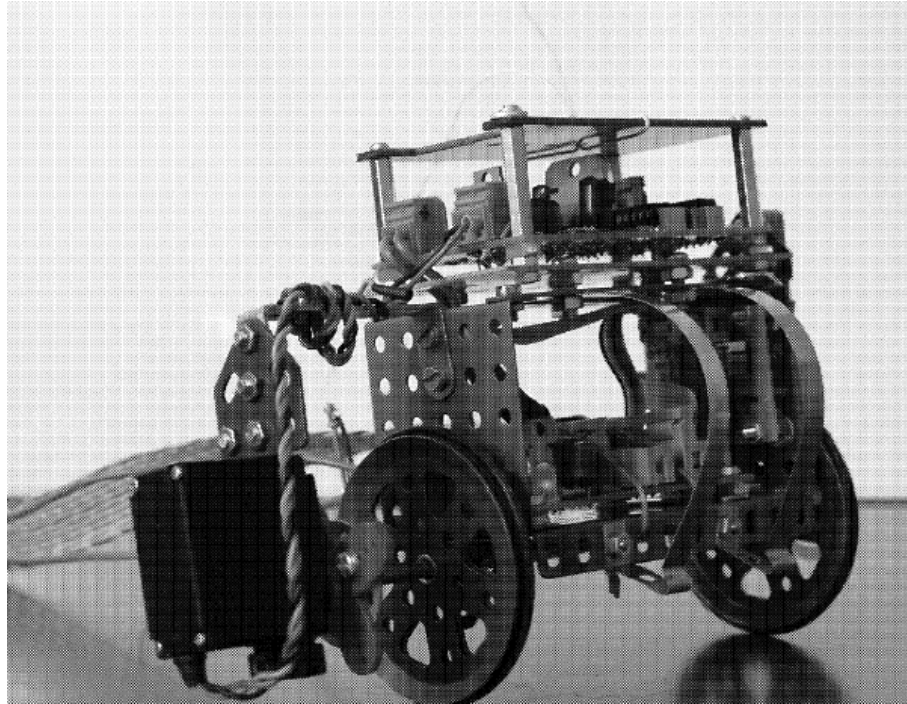
Nasır yaptığı çalışmada ters sarkaç sistemi üzerinde birkaç kontrol teorisinin simülasyon çalışmaları üzerinde durarak PID, LQR ve FLC denetleyici sistemlerini uygulayarak, denetleyicileri karşılaştırmaya yönelik çalışmaları Matlab\Simulink yazılımını kullanarak yapmıştır [5].

Shaoqiang ve arkadaşları ise ters sarkaç sistemi üzerinde Şekil 2.7’de görülen Simmechanics blok modeli ve sistemin matematiksel modelinin sonuçlarını karşılaştırarak kararsız sistem ve robotlar üzerinde Simmechanics alt biriminin kullanımının daha uygun olduğu kanaatine varmışlardır. Şekil 2.8’de görülen deneysel düzenek üzerinde çalışmışlardır [18].

doğrusallaştırma yöntemleri ile karşılaştırmıştır ve Şekil 2.10'da görülen deneysel modeli kullanmıştır [19].



Şekil 2.9 Simmechanics simülasyon modeli (GrepI) [19].



Şekil 2.10 Matlab gerçek zamanlı toolbox kullanılarak kontrol edilen deneysel model (GrepI) [19].

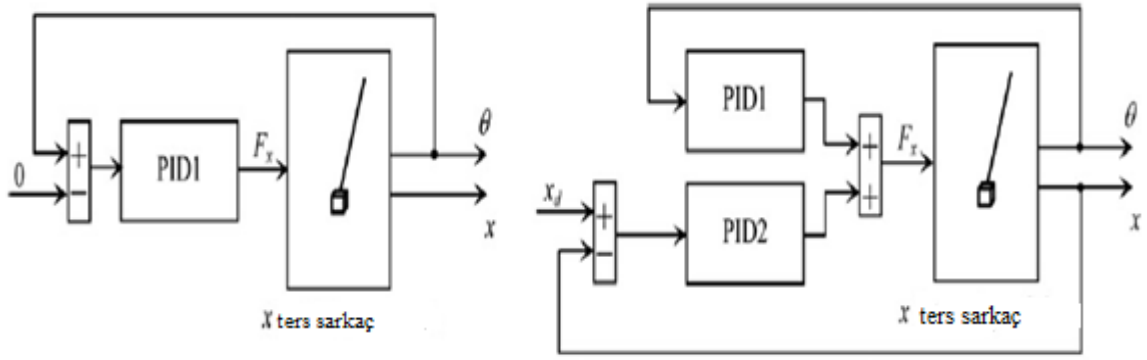
Prasad ve arkadaşları LQR, PID ve her iki kontrolörün birleştirilmesinden oluşan denetleyiciler kullanmışlardır. Matlab\Simulink ortamında modelin benzetimini yaparak sisteme ayrıca gürültüde eklemişlerdir. Gürültülü olan durumda LQR ve PID kontrolörlerinin birleşiminden oluşan denetleyici sistemin daha başarılı olduğu kanaatine varmışlardır [20].

Anderson, Şekil 2.11’de görülen nBot olarak adlandırdığı ve kararlı çalışan bir denge robotu yapmayı başarmıştır. Bu sistemde ivmeölçer ve jiroskoptan oluşan IMU kartı kullanmıştır. Sistemde oluşan gürültüleri yok etmek için de Kalman filtresini kullanmıştır. Sistemde motor enkoderlerinden alınan pozisyon açısı bilgileri robotun yatay ekseninde dengede kalabilmesi için geri besleme durum bilgisi olarak kullanmıştır [21].

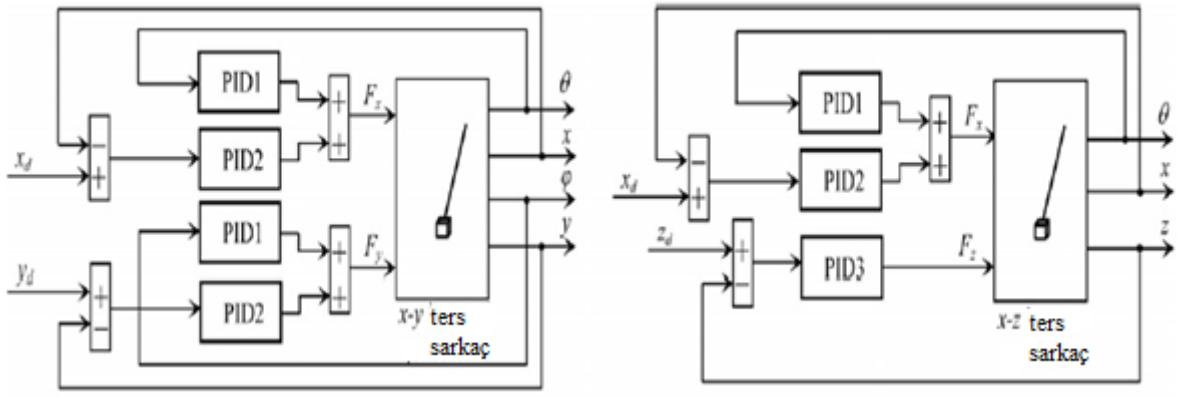


Şekil 2.11. nBot denge robotu [21].

Wang Şekil 2.12 ve Şekil 2.13’de görülen üç farklı ters sarkaç yapısına uygun farklı PID tasarımları yaparak aldığı sonuçlarda PID kontrolörünün üç farklı ters sarkaç sistemi için oldukça uygun olduğu sonucuna varmıştır [22].

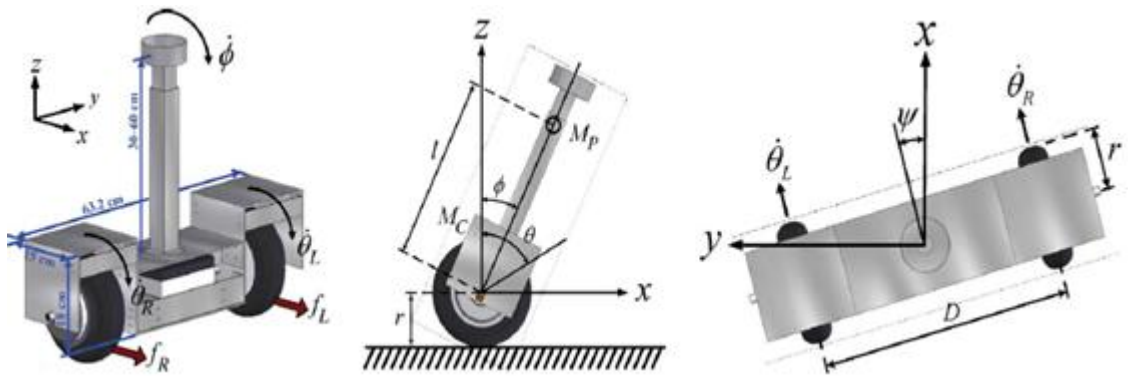


Şekil 2.12. Bir ve ikili PID tasarımı [22].



Şekil 2.13. İki ve üç kontrolörlü ters sarkaç tasarımı [22].

Huang ve arkadaşları ise Şekil 2.14'te görülen iki tekerlekli bir ters sarkaç sisteminin kendini dengede tutabilmesi için iki tekerlekli denge robotu sistemine bulanık kontrol yöntemini uygulamışlardır [23].



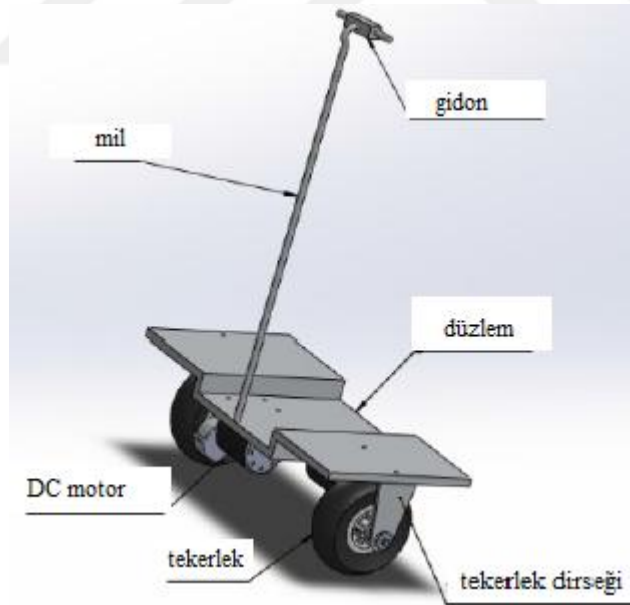
Şekil 2.14. İki tekerlekli bir ters sarkaç sistemi [23].

Sing ve Yadav çift ters sarkaç kullanarak yaptıkları çalışmada PD ve LQR kontrolör kullanarak sistem üzerinde bir performans analizi yapmış ve her iki kontrolörün de sistem üzerinde başarılı olduğunu ancak PD kontrolörün başarısının LQR kontrolörüne oranla daha iyi olduğu kanaatine varmışlardır [24].

Enginoğlu da iki tekerlekli bir robotun dengede durabilmesi için bir çalışma yapmış ve sistemin modellemesini Solidwork paket programını kullanarak hazırlamıştır. PID denetleyici için Matlab\Simulink yazılımını kullanmış ve elde ettiği PID kazanç değerlerini hazırlanan model üzerinde test etmiştir [4].

Arda tarafından yapılan bu çalışma da iki eksenli ters sarkaç modellenmesi ve kontrol edilmesi hedeflenmiş ve kontrolör olarak PID kullanarak Simulink ortamında model tasarımı yapılmıştır. Bu çalışmada sadece sarkaç açısı kontrolü yapılmış, sarkacın konum kontrolü üzerinde durulmamıştır [25].

An ve Li bireysel taşıma aracı olarak Şekil 2.15'te görülen sistemi tasarlamış ve çalışmalarında Matlab\Simulink ortamında PID ve LQR denetleyicilerinin performans analizini yapmışlardır [26].



Şekil 2.15. Robotun solidworks ortamında görüntüsü [26].

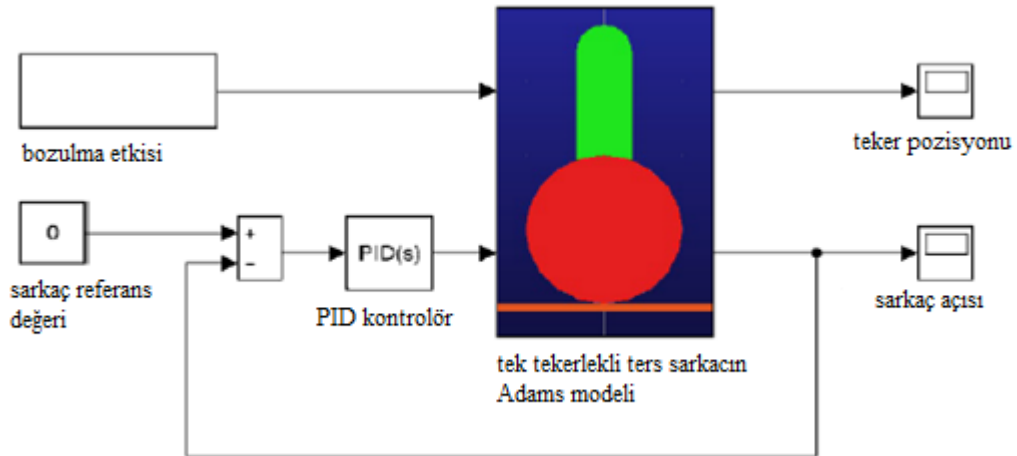
Şen de kendi dengesini sağlayabilen iki tekerlekli bir denge robotu üzerinde çalışmıştır. Sistem için bulanık mantık kontrolü uygulanmış ve Matlab\Simulink yazılımı kullanılarak simülasyon çalışması yapmıştır [27].

Junoh iki tekerlekli ve dengede kalmasını amaçladığı denge robotu üzerinde çalışmış ve sistemde kontrolör olarak PID denetleyiciyi tercih etmiş ve sistemde jiroskop ve ivmeölçerle birleştirilmiş IMU kartı kullanılmıştır [28].

Jose ve arkadaşları da ters sarkaç üzerinde yaptıkları çalışmada PID kontrol metodu ile LQR kontrol metodunu karşılaştırmış ve PID kontrolörün her koşulda sanal ortamda kullanımının uygun olduğu kararına varmış ancak LQR kontrolörünü daha başarılı bulmuştur [3].

Sung yaptığı çalışmada iki tekerlekli dengeleme robotu üzerinde genel kontrol metotları olan LQR, PID ve kayma yöntemini kullanmış ve robotun dengesini sağlamaya çalışmıştır. Kontrolörleri LEGO-Mindstorm EV3 robotu üzerinde test ederek deney sonuçlarının simülasyonunun geçerli olduğu ve fiziksel sistemin bunu doğruladığını göstermiştir [1].

İlgen ve arkadaşları ise tek tekerlekli ters sarkaç sisteminin denge kontrolü ve simülasyon modeli üzerinde çalışarak sistemi Matlab ve Adams yazılımlarını kullanarak simüle etmiştir. PID kontrolörü, sarkaç açısı ve dengenin kontrolü için uygulanarak oldukça başarılı sonuçlar almıştır. Şekil 2.16'da İlgenin ve arkadaşlarının yapmış oldukları sistemin blok diyagramları görülmektedir. Bu çalışma ile kendini dengeleyen taşıma araçları ve iki tekerlekli robotlar için yapılacak araştırmalara katkı sağlayacak yeni bir tasarım modeli olmuştur [29].



Şekil 2.16. İlgen ve arkadaşlarının yaptığı sistemin blok diyagramı [29].

Peker ve Kaya yaptığı çalışmada ters sarkaç sisteminin kontrolünü sağlamak için PID kontrolör kullanarak sistemin cevabını incelemişlerdir. Şekil 2.17’de görülen araba-sarkaç sistemini kullanmışlardır [30].

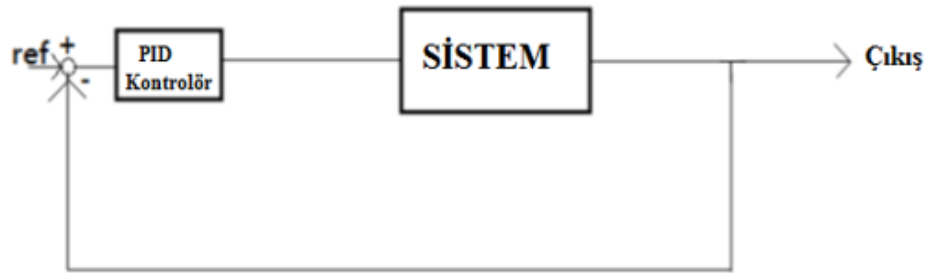


Şekil 2.17. Araba-sarkaç sistemi [30].

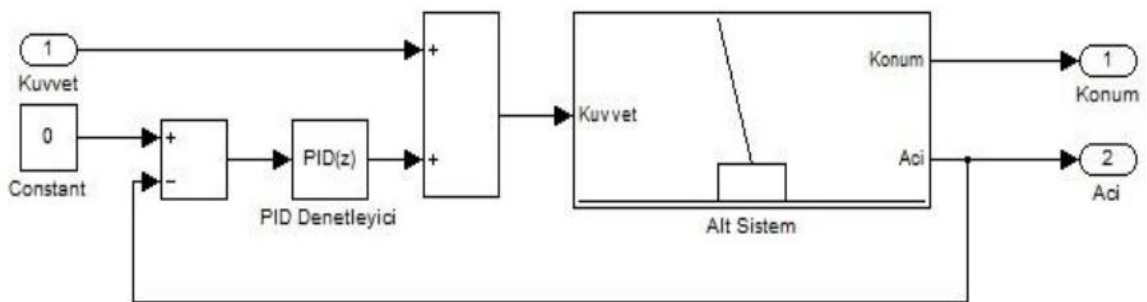
Bu alanda yapılan çalışmalarda da görüldüğü gibi sistemlerde genellikle tercih edilen simülasyon kaynağı Matlab yazılımıdır. Matlab\Simulink ortamını Grepl, Hu ve arkadaşları, Butler ve Bright, Oryschuk, Blankespoor ve Roemer gibi araştırmacılar tercih ederken [19, 31-34], Grepl, Shaoqiang ve arkadaşları gibi diğer bazı araştırmacılar da bu çalışmada bizimde de kullandığımız Matlab\SimMechanics birimini kullanmayı tercih etmişlerdir [19, 18]. Bu sistem üzerinde birçok doğrusal kontrol algoritmaları kullanılarak çalışılmış ve en çok kullanılan ise PID denetleyici olmuştur. PID denetleyici sisteme kolayca uygulanabilmektedir. PID denetleyici Chee ve Abidin, Li ve arkadaşları, Becker, Burkert ve arkadaşları, Goher ve Tokhi, Vallius ve Röning, Nagarajan ve arkadaşları, Burdette gibi araştırmacılar kullanmışlardır[35-42]. PID kontrolörün yapısı ve çalışması ayrıca açıklanacaktır.

3. PID DENETİM YÖNTEMİ

PID denetleyicisi oransal, türevsel ve integral yöntemlerinin bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Ayrıca PID denetleyicisi 3 modlu denetleyici olarak da ifade edilmektedir. İntegral bileşeni büyük yük değişimlerinin meydana getirdiği oransal ofseti azaltmak veya sıfırlamak için kullanılırken türev bileşeni ise genellikle salınımları azaltarak hata sinyalini daha önceden tahmin etmek için kullanılır. Türev bileşeni ise genellikle aniden değişen yüklerin olduğu sistemlerde tercih edilerek PID denetleyici diğer denetleyicilerin yetersiz kaldığı hata oranının belirli seviyeleri aştığı hızlı ve büyük yük değişimlerinin olduğu sistemlerde kullanımı tercih edilmektedir [43]. Şekil 3.1’de PID ile sistem kontrol diyagramı görülmektedir. Şekil 3.2’de ters sarkaç sistemi üzerinde PID denetleyicisi uygulaması görülmektedir.



Şekil 3.1. PID ile sistem kontrol diyagramı [1].



Şekil 3.2. Bir eksenli ters sarkaç sistemi üzerinde PID denetleyici uygulaması [25].

P: Oransal

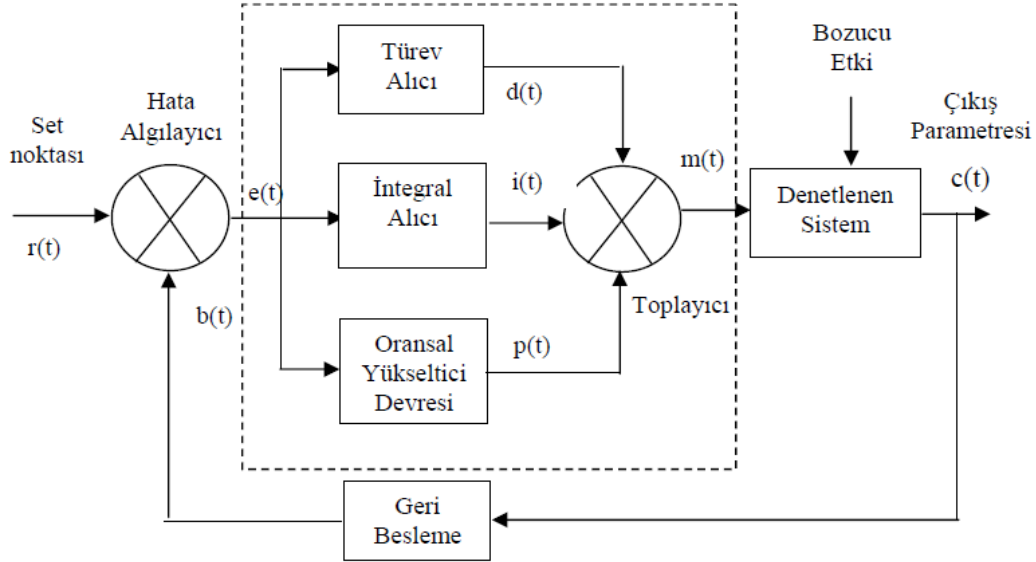
I: İntegral

D: Türevsel

PID algoritmasını,

$$u(t) = P(t) + I(t) + D(T) \quad (3.1)$$

Şeklinde ifade edebiliriz. Denklemdaki $u(t)$ kontrol değişkenidir. Şekil 3.3'te PID kapalı çevrim denetim sistemi görülmektedir.



Şekil 3.3. PID kapalı çevrim denetimi sistemi [43].

PID denetleyici sisteminde giriş değeri ile ölçülen değer arasında oluşan fark sinyalinin türevi ve integrali hesaplanarak hata sinyali elde edilir. Hata sinyali oransal denetleyiciden geçerek toplama devresinde türev, integral ve oransal sinyal ile dengeleme gerilimi toplanır. Böylece dengeleme gerilimi referans alınarak düzeltme yapılır.

Türev yöntemi alt aşım ve üst aşım değerlerini daha az bir seviyeye indirirken integral yöntemi de kalıcı durum hatasını yok etmektedir. Türevsel yöntem daha yüksek kazanç değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır.

PID denetim sisteminin denklemleri aşağıdaki eşitlikler ile ifade edilmektedir.

$$d(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.2)$$

$$i(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (3.3)$$

$$p(t) = K_p e(t) \quad (3.4)$$

K_p : Oransal kazanç

K_i : İntegral kazancı

K_d : Türevsel kazanç

Transfer fonksiyonu ise

$$TF = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (3.5)$$

Şeklindedir.

Sistemde oransal kontrolör (K_p) yükselme zamanını azaltmak için kullanılmaktadır. Değeri azaltır ama sıfırlayamaz (kalıcı durum hatası). İntegral kontrolörü (K_i) kararlı durum hatası üzerinde etkili iken fakat daha kötüye gitmesine de yol açabilir [44].

3.1. PID KONTROL AYARI

PID denetleyiciyi oluşturan oransal, integral, türev kazançlarının sistem üzerinde farklı etkileri mevcuttur. Oransal denetleyici yükselme zamanının azalması üzerinde etki gösterirken kalıcı durum hatasının sıfırlanması üzerinde etkili değildir. İntegral denetleyici kalıcı durum hatasını sıfırlayabilir iken ancak geçici hataların daha da kötü olmasına da yol açabilmektedir. Türev denetleyici ise sistemin kararlılığını arttırarak alt ve üst aşım değerlerini azaltıp geçici hataların daha iyiye gitmesine yardımcı olmaktadır [43].

Denetleyicilerin kazanç değerleri ve sistem üzerindeki etkileri Tablo 3.1. de verilmiştir.

Tablo 3.1. PID denetleyici kazançları ve etkileri [43].

Kontrolör	Kazanc	Yükselme zamanı	Aşım	Oturma zamanı	Kalıcı durum hatası
Oransal	K_p	Azaltır	Arttırır	Biraz arttırır	Azaltır
İntegral	K_i	Biraz azaltır	Arttırır	Arttırır	Yok eder
Türev	K_d	Biraz değiştirir	Azaltır	Azaltır	Çok az etkiler

Tablo 3.1 incelendiği zaman kapalı çevrim kontrol sisteminde önemli olan dört farklı değişkenle karşılaşılmaktadır. Yükselme zamanı, sisteme ilk anda verilen enerjiden set değerinin %90'ı civarındaki değerlere gelinceye kadar geçmesi gereken süredir. Oransal kontrol kazanç arttırıldığı zaman bu süre azalırken, integral kazancı ve türev kazancının bu süre üzerindeki etkisi oldukça azdır. Oransal ve integral kazançları set değerinin üstünde ve altında kalan aşım değerini arttırırken, türev kazancı bu aşımı azaltabilir. Oturma zamanı set değeri çevresinde oluşan osilasyonların göz ardı edilebilecek bir seviyeye inmesi için gerekli olan süredir. Oransal ve integral kazançları oturma zamanını arttırıcı şekilde etki ederken türev kazancı oturma zamanını azaltır. Burada istenilen durum oturma zamanının azaltılmasıdır. Oransal kazanç arttırıldığı zaman kalıcı durum hatasını azaltır ancak yok edemez. İntegral kazancı kalıcı durum hatasını sıfırlayabilir. Fakat türev kazancının bir etkisi yoktur [43].

PID parametrelerinin ayarlanması kapalı çevrim sistemlerinin işleyişi açısından çok önemlidir. Bu parametreler deneysel yöntemlerle ayarlanabildiği gibi farklı matematiksel metotlarla da hesaplanıp ayarlanabilir.

Bir PID devresi deneysel yöntemle oluşturulduğunda aşağıdaki işlemler gerçekleştirilir.

İlk olarak K_p kazancının değeri ayarlanır. K_i ve K_d kazançlarının değerleri sıfır iken çıkış hatasının azaltılması için K_p kazancı sıfırdan başlayarak adım adım arttırılır ve set değerine yakın bir noktadaki kalıcı durum hatasına kadar arttırılmaya devam ettirilir.

İkinci olarak da K_p ve K_i kazancı değiştirilmeden K_d kazancı aşım değerini kabul edilebilir bir seviyeye düşürene kadar arttırılarak kalıcı durum etrafında kontrol edilen değişkenin yaptığı salınımlar incelenir ve en düşük seviyedeki salınımda K_d kazancının değerinin ayarlanması bırakılır. K_d ve K_p kazancı değerleri ile çıkışta kalıcı durum hatası bulunduğundan K_i değeri kalıcı durum hatası yok edilinceye kadar arttırılır [43].

4. SIMMECHANICS

SimMechanics standart simülasyon aracı olan Matlab\Simulink'in bir uzantısıdır. SimMechanics mekaniksel sistemlerin üç boyutlu bir şekilde tasarlanmasını sağlayan geniş kapsamlı olarak kullanılabilir fonksiyon kütüphanesiyle Simulink ortamını çoklu gövdeli mekanik modelleme imkanıyla genişletmektedir. Çoklu gövdeli sistemlerin statik, kinematik, dinamik simülasyonlarının yapılmasına bu şekilde imkan sunmaktadır. Programda oluşturulan tasarımların otomatik olarak üç boyutlu durumları görülebilmekte ve simülasyon aşamasında izlenebilmektedir. Farklı CAD yazılımlarındaki üç boyutlu tasarımları kütle, atalet ve üç boyutlu yapıları da kullanma imkanı sunarak sistemi bir bütün olarak değerlendirmekte ve bu nedenle sil baştan tasarıma ihtiyaç kalmamaktadır [45]. Bazı sistemlerde modelin parametrelerinin tanımlanması oldukça zahmetli bir iştir. Mekaniksel sistemlerin hareket denklemleri el ile oluşturularak ortaya çıkan sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırırken, SimMechanics tasarım için blok diyagramlar yardımı ile modelleme yapılarak ve standart Newton dinamik gücünün ve torkunun kullanıldığı matematiksel sistemlerin simüle edilmesini sağlamaktadır [18]. Bu şekilde mekaniksel sistemler zamandan tasarruf sağlayan blok diyagramları ile birbirine bağlı grafiksel bir şekilde oluşturularak simüle edilebilmektedir. Böylece SimMechanics modeller ile sorunsuz bir şekilde Simulink blok diyagramları kullanılarak ara yüz oluşturmakta, Matlab ve Simulink yazılımlarının tüm olanaklarını kullanabilme imkanı sunmaktadır. Örneğin bir kontrolör tasarlamak için control toolbox, bir optimizasyon yapmak için ise optimizasyon toolbox kullanılabilir. Bu şekilde yapmak istediğimiz işler hızlanmakta ve programlar arasında oluşacak haberleşme sorununu ortadan kaldırmaktadır. Diğer bir avantajı ise tasarımı istediğimiz gibi yapabilme imkanı sunmaktadır. Bu şekilde tasarımın arka planı görülmekte ve dolayısıyla tasarım istenilen doğrultuda ayarlanabilmektedir.

Aynı zamanda SimMechanics görsellik açısından mekanizmanın daha iyi bir şekilde anlaşılmasının yanısıra motor, sensör, eklem vb. kullanılarak sistemin tasarımının gerçek sisteme uygun olarak tasarlanabilmesi açısından da önemlidir. Blokların hangi dinamik elemanları içerdiğinin tam olarak görülememesi dinamik modelin matematiksel denklemlerini anlamakta zaman zaman sıkıntı oluşturmaktadır

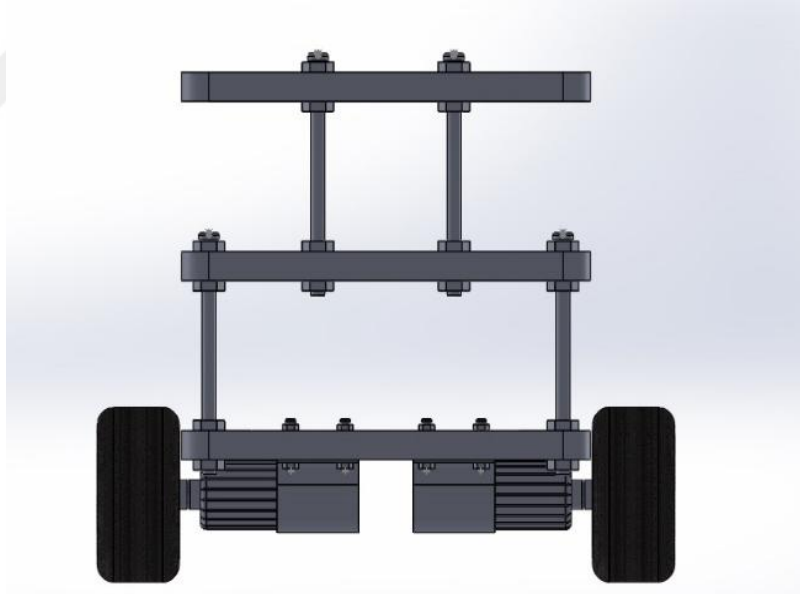
[46]. Oysa SimMechanics'in sağladığı avantajlar ile dinamik modellerin karmaşıktığı sistemlerde bile daha rahat sonuçlar elde edilmektedir.



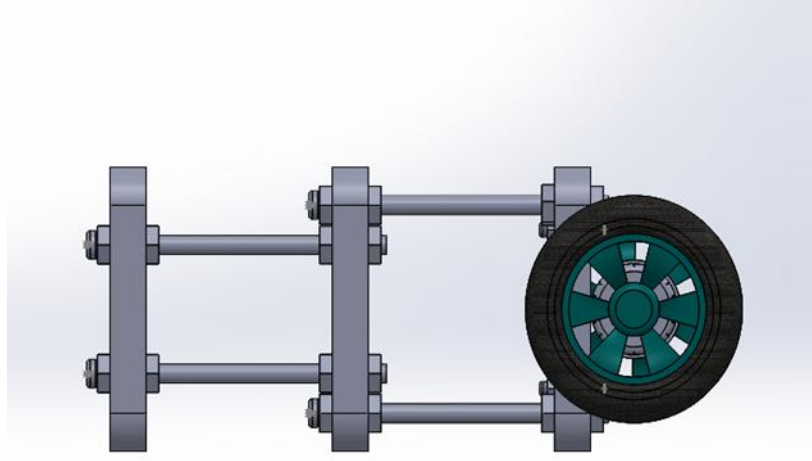
5. DENGİ ROBOTUNUN TASARIMI VE MODELLENMESİ

İki tekerlekli bir denge robotu kendi kendini düşmekten koruyan, gövde açısının kontrolü için çeşitli denge metotlarına ihtiyaç duyan bir robottur. Gövde açısı kontrol edilerek dik bir şekilde ayakta durmasını sağlamak için tekerleğin pozisyonu belirli durumlarda kontrol edilmesi ve tekerlek açısının ve pozisyonunun tespit edilerek kontrol edilmesi gerekmektedir. Bunun için robot yatay pozisyona gelmeden robotu düzeltmek için gövde açısı dengelenerek tekerleklerin pozisyonu aynı durumda kalması sağlanmalıdır [1]. Dengenin sağlanabilmesi için sistem üzerinde farklı yaklaşımlar uygulanmaktadır [4]. Bütün uygulamalarda temel amaç robotu dikey pozisyonda ve denge tutmaktır.

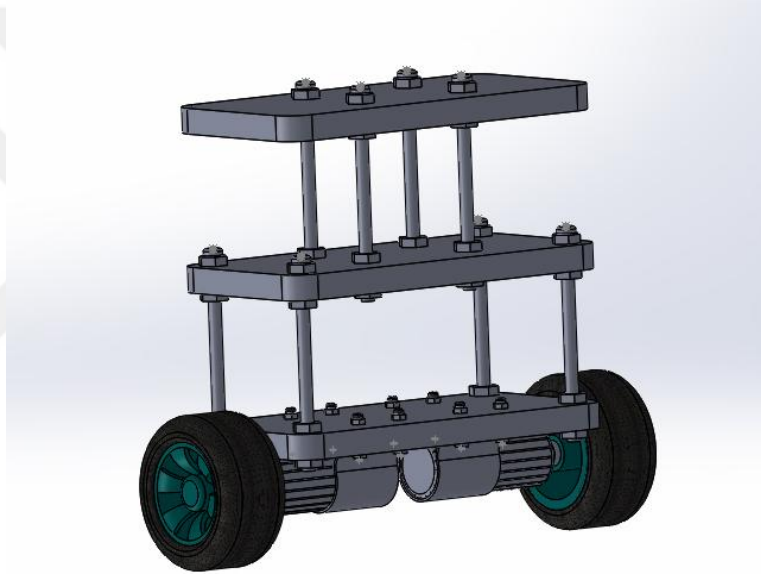
Yaptığımız bu çalışmada iki tekerlekli denge robotunun tasarımı Solidworks ortamında hazırlanarak bütün parçalar üç boyutlu çizilmiştir ve denge robotunun görünümü Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.1. Denge robotunun önden görünümü

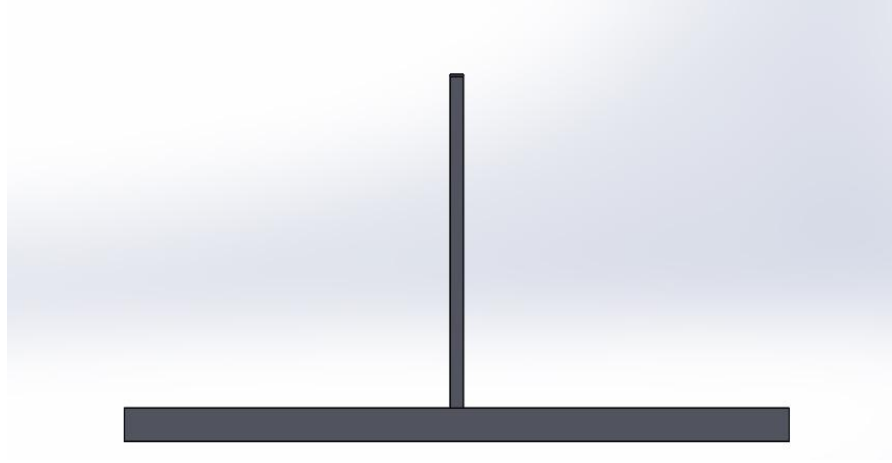


Şekil 5.2. Denge robotunun yandan görünümü

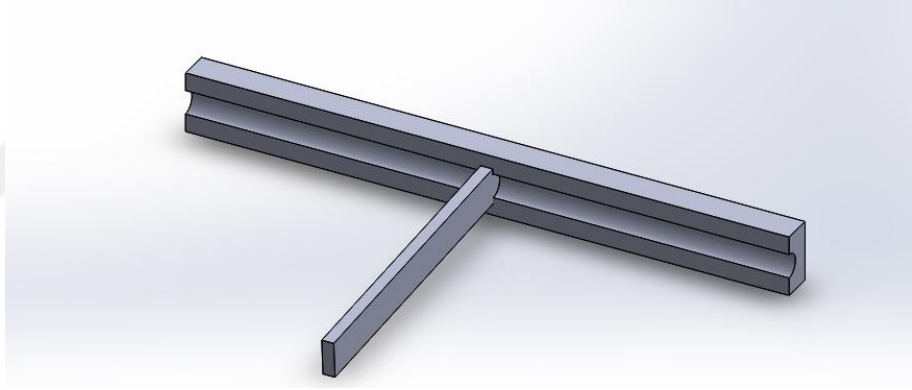


Şekil 5.3. Denge robotunun farklı bir açıdan görünümü

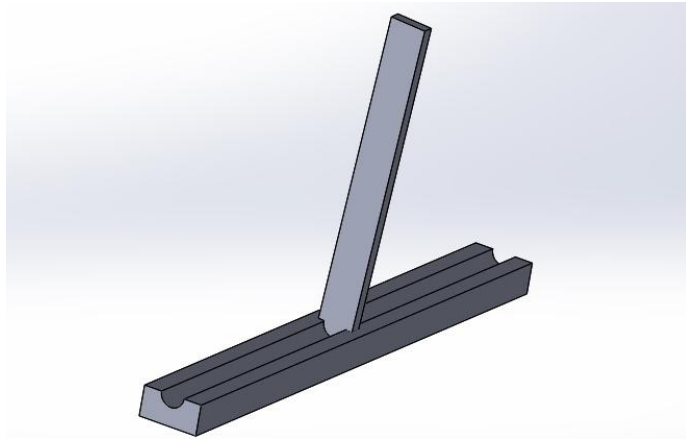
İki tekerlekli bir denge robotu üzerinde yapacağımız çalışmayı öncelikle bir ters sarkaç sistemi üzerinde denenmesi amaçlanmıştır. Ters sarkaç sistemimizin Solidworks modellemesi Şekil 5.4, Şekil 5.5, Şekil 5.6 da görülmektedir.



Şekil 5.4. Ters sarkaç sisteminin dikey pozisyonundaki görünümü

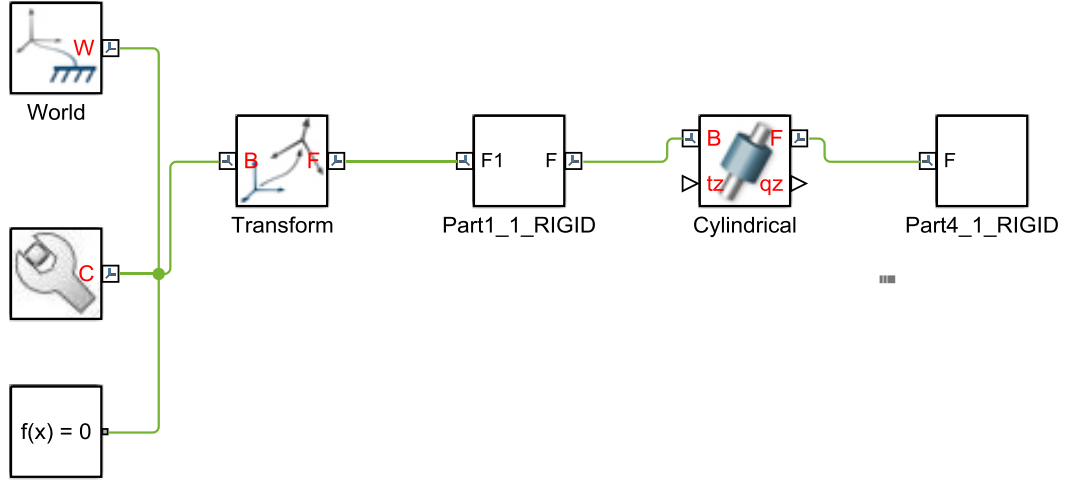


Şekil 5.5. Ters sarkaç sisteminin yatay olarak görünümü



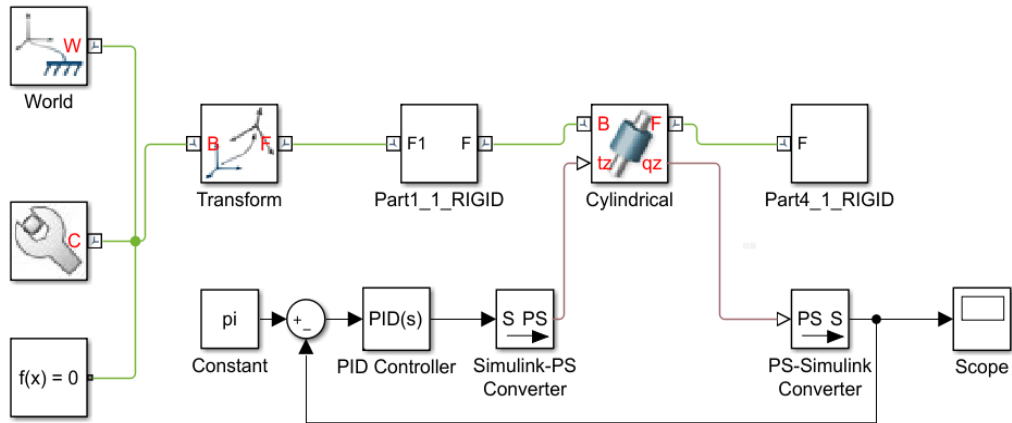
Şekil 5.6. Ters sarkaç sisteminin farklı bir açıdan görünümü

Solidworks'te yaptığımız tasarım, simülasyon araçları olan Matlab/Simulink'in bir uzantısı olan SimMechanics'e second generation olarak aktarılmıştır. Şekil 5.7'de görüldüğü gibi blok diyagramları oluşturulmuştur.



Şekil 5.7. Ters sarkaç sisteminin SimMechanics blok diyagramı

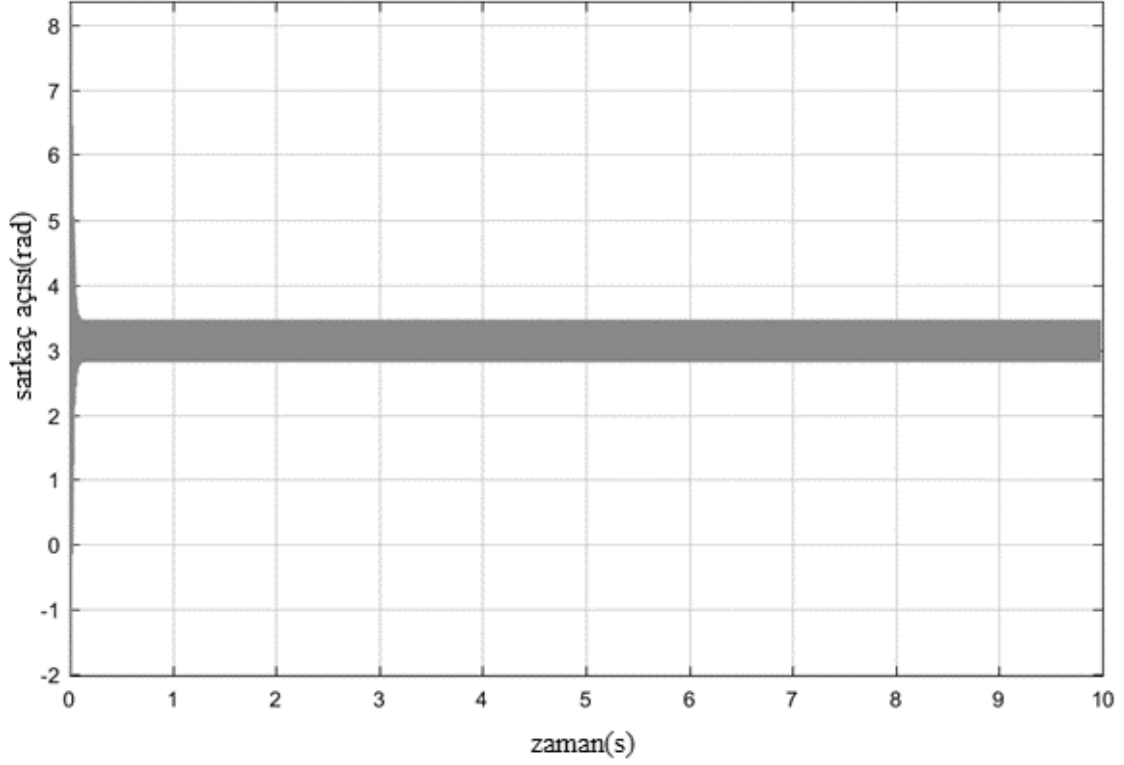
Sarkacın dik konumda dengede kalamadığı görülmüş ve bu dengenin sağlanabilmesi için PID kontrolörü kullanılmıştır ve Şekil 5.8'de PID eklenmiş SimMechanics model görülmektedir.



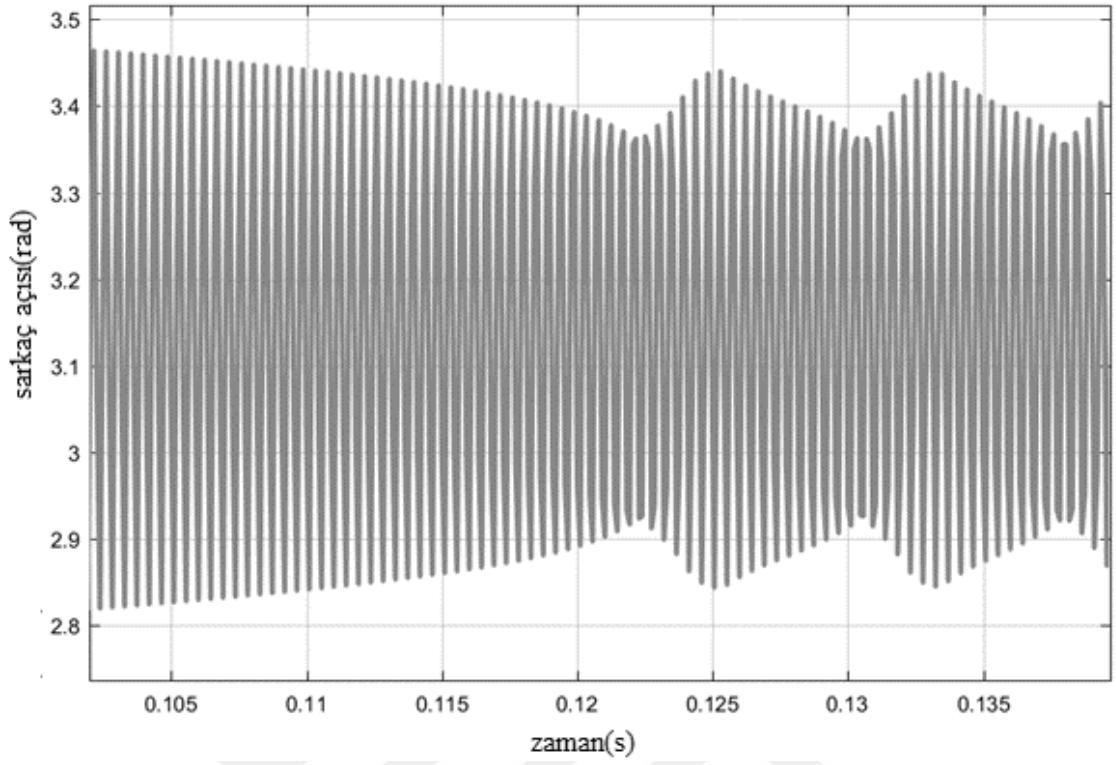
Şekil 5.8. PID eklenmiş ters sarkaç sisteminin SimMechanics modeli

Ters sarkaç sisteminin PID eklenerek sarkaç açısı simülasyonu gösterilmiştir. İlk olarak " $\theta=180^\circ$ " değeri altındaki sonucu incelenmiş ve bu nokta kararsız denge noktası

olarak kabul edilmiştir. PID ayar parametresi ile gerekli kazanç parametreleri ayarlanmadan yapılan simülasyon çalışmasında elde edilen Şekil 5.9’da görüldüğü gibi sistemin salınımının ve titreşiminin yüksek olduğu görülmektedir.

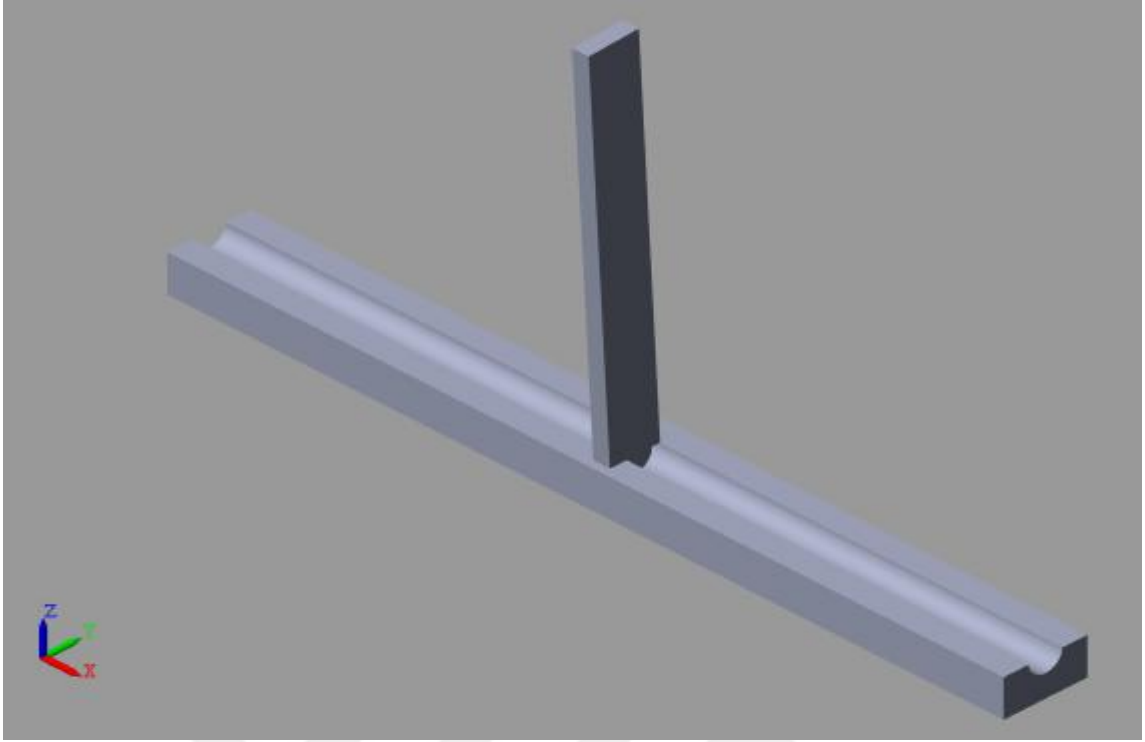


Şekil 5.9. Sistemin $\theta=180^\circ$ noktasındaki simülasyon sonucu



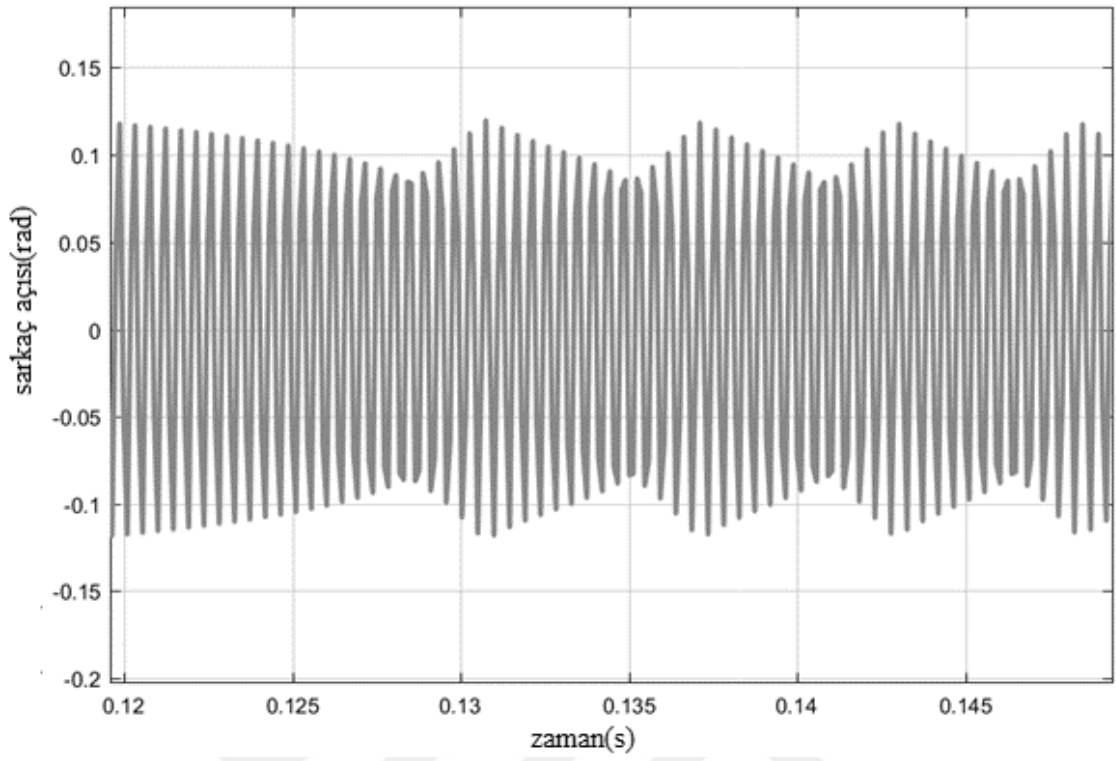
Şekil 5.10. Sistemin $\theta=180^\circ$ noktasındaki simülasyonun daha yakından görüntüsü

Sistem Şekil 5.10 da görüldüğü üzere dik pozisyonda yani $\theta=180^\circ(3.142 \text{ rad})$ civarında salınım yapmaktadır fakat kararsız bir haldedir. Şekil 5.11’de kararsız denge noktasında bulunan ters sarkaç sistemi görülmektedir.

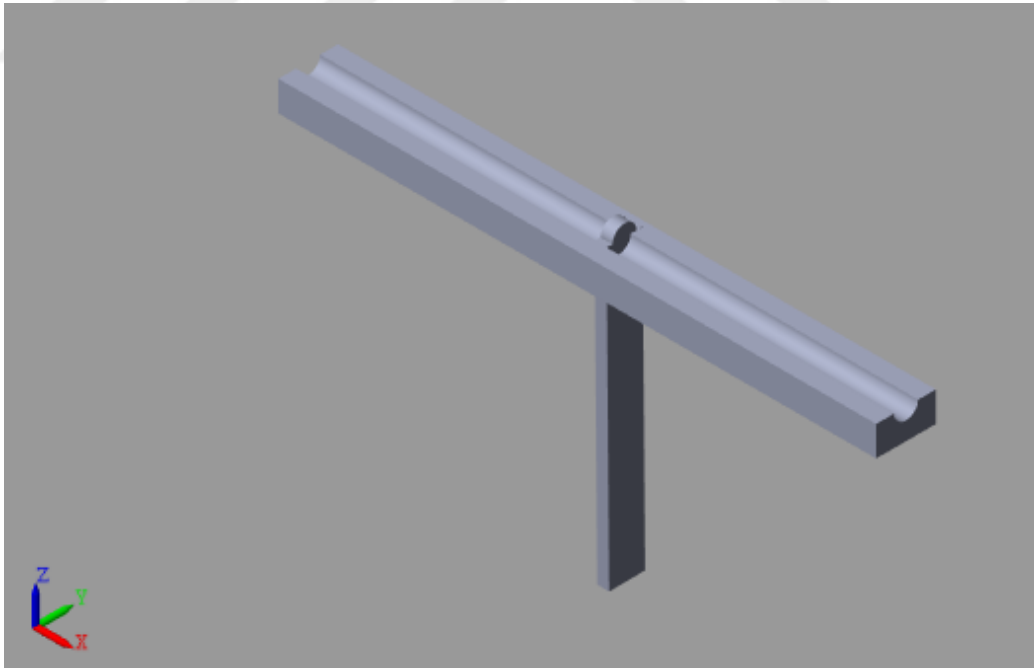


Şekil 5.11. Kararsız denge noktasındaki görünümü

PID parametre ayarları yapılmadan önce ters sarkaç sisteminin Şekil 5.12'deki " $\theta=0^\circ$ " değeri altındaki simülasyon sonuçlarını incelenecek olursa sistemin kararlı denge konumu olan sıfır noktasında salınımlar yaptığı görülmektedir. Şekil 5.13'te kararlı denge noktasında sarkacın konumu görülmektedir.

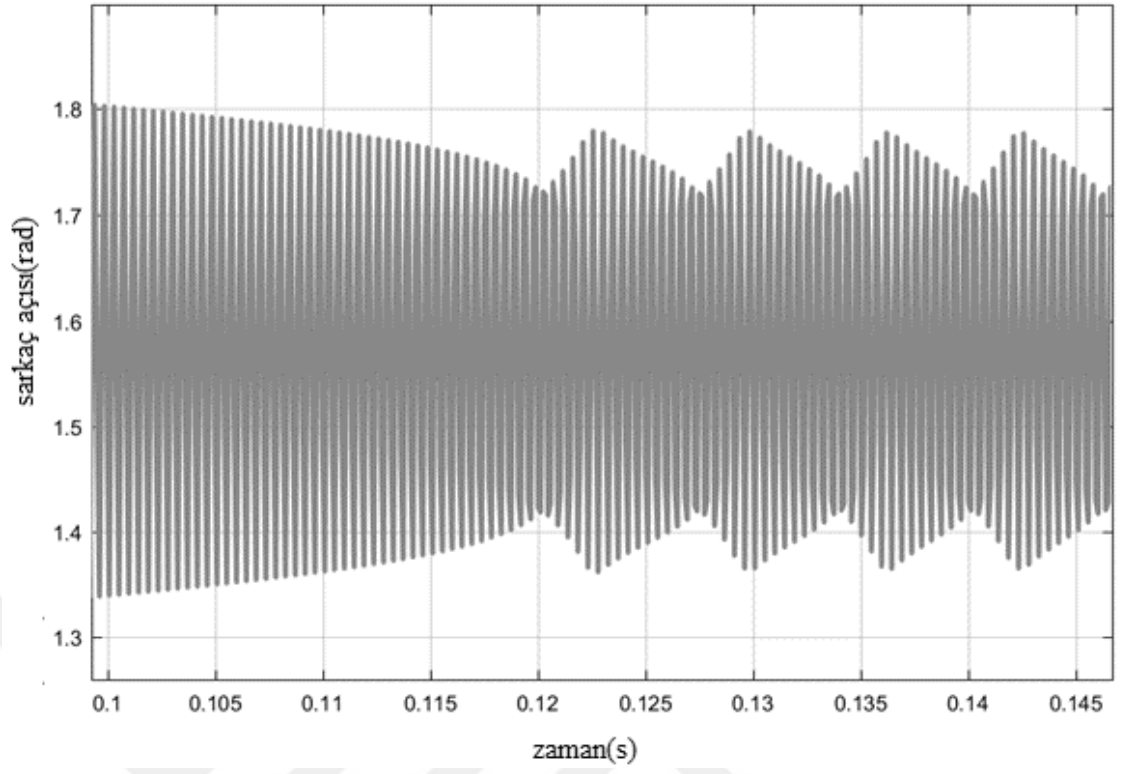


Şekil 5.12. Sistemin $\theta=0^\circ$ noktasındaki simülasyon sonuçları

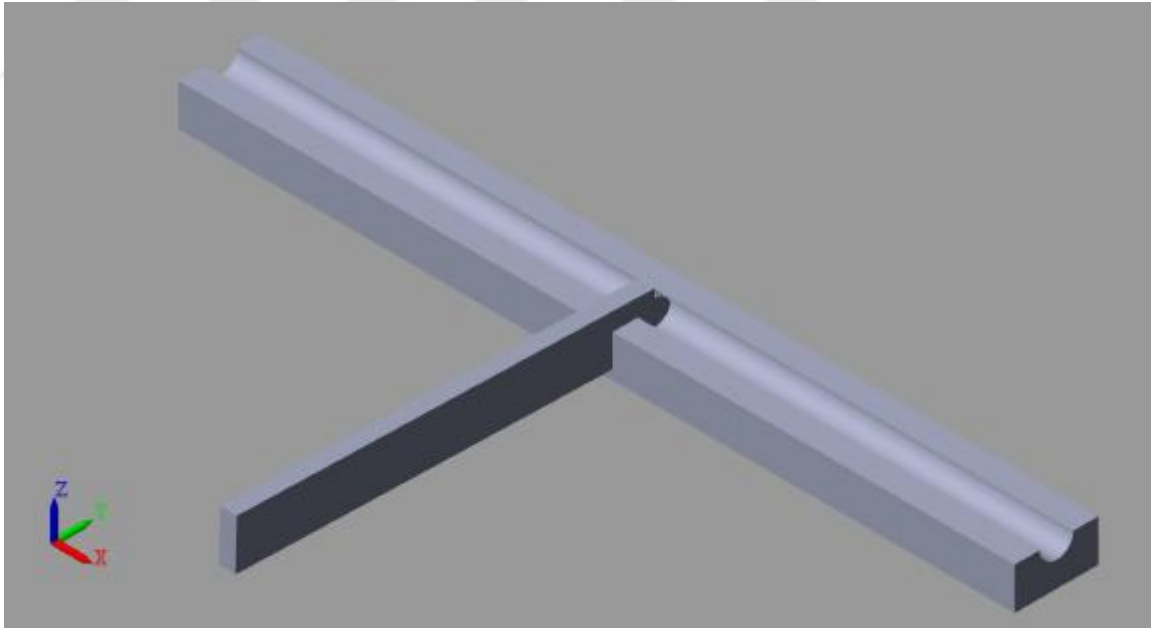


Şekil 5.13. Kararlı denge noktasındaki görünümü

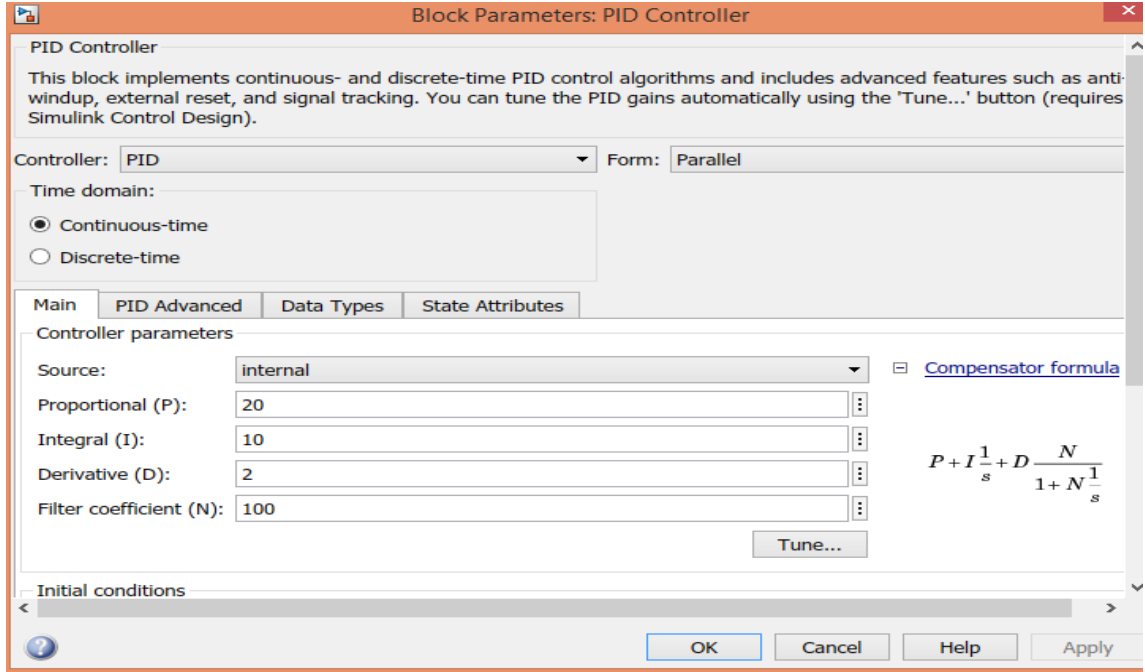
Ters sarkaç sisteminin “ $\theta=90^\circ$ ” noktasındaki simülasyon sonucu ve görünümü Şekil 5.14’te gösterilmiştir. Şekil 5.15’te de sarkacın konumu gösterilmektedir.



Şekil 5.14. Sistemin $\theta=90^\circ$ noktası simülasyon sonucu



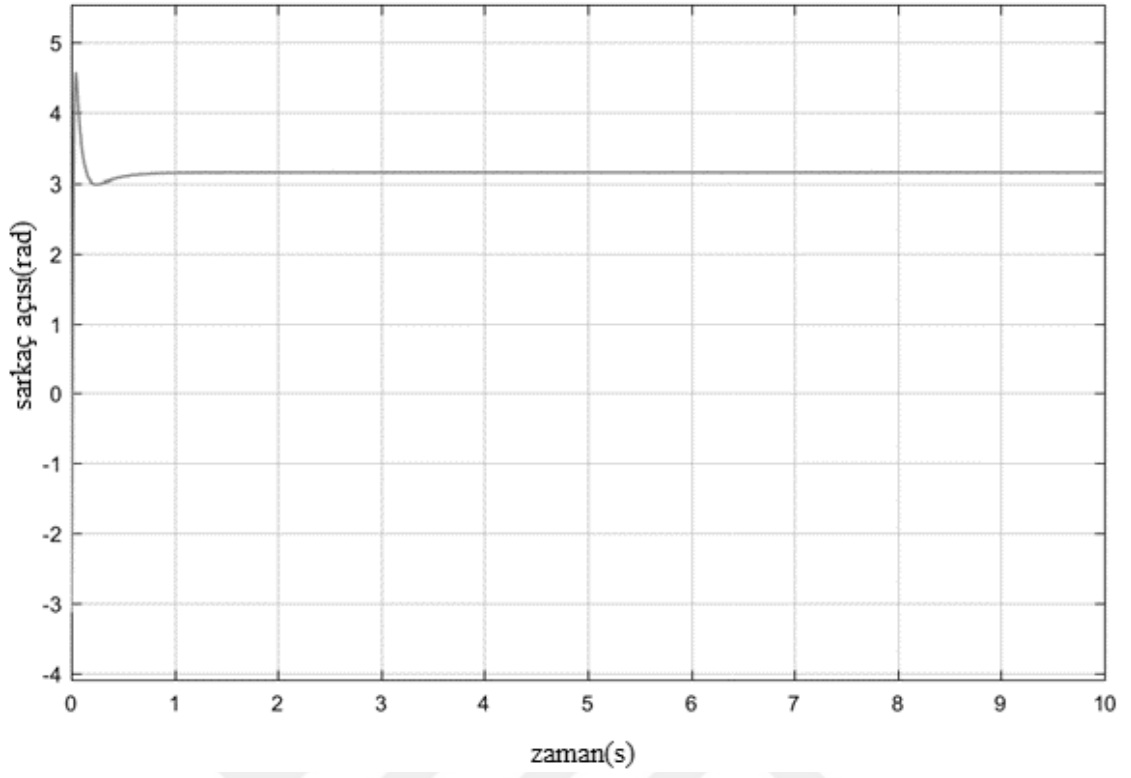
Şekil 5.15. Sarkacın $\theta=90^\circ$ noktasındaki görünümü



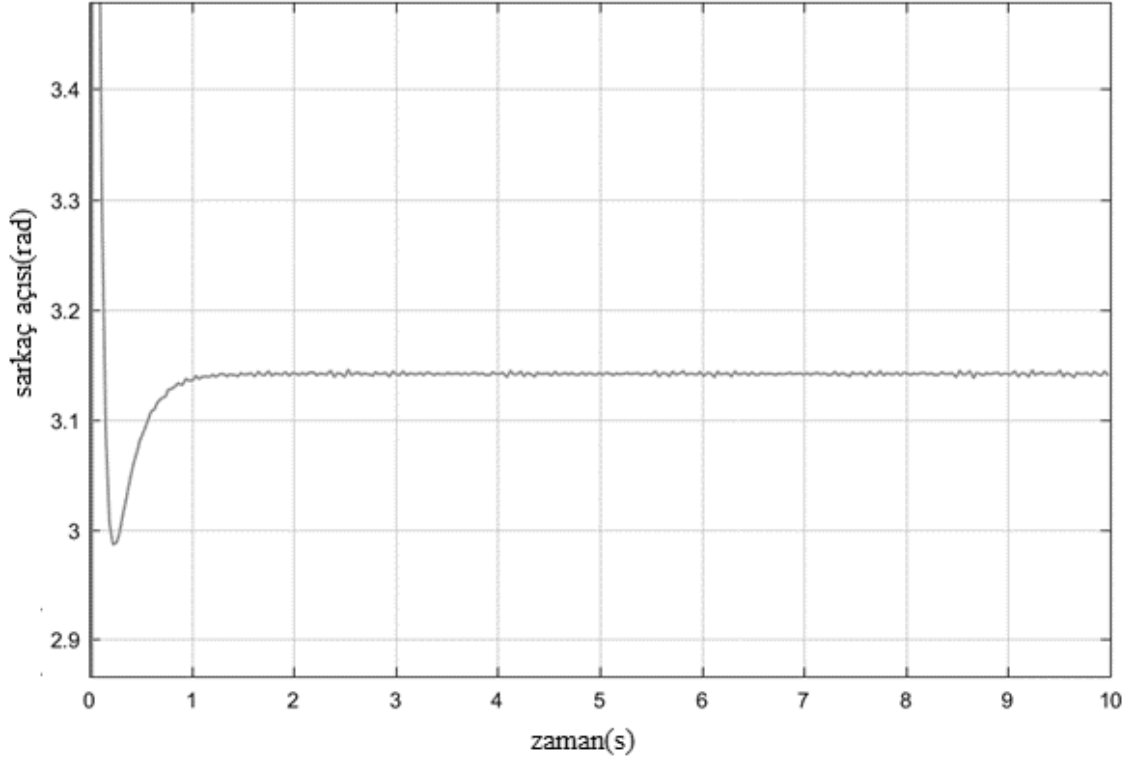
Şekil 5.16. PID parametre değerleri

Bir denge robotunun temelini oluşturan ters sarkaç sisteminin dengesinin sağlanması için kullanılacak PID kontrolörünün parametrelerinin belirlenmesi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu parametrelerin ayarlanması oldukça önemli ve zahmetli bir iştir. Ancak birçok alanda olduğu gibi bu alanda da Simulink işimizi kolaylaştırıp, zamandan tasarruf sağlamaktadır. Simulink kütüphanesinde PID kontrolör bloğu bulunmaktadır. Bu PID bloğu içerisinde bulunan “PID Tuner” seçeneği PID kazanç parametreleri oldukça kolay ve pratik bir şekilde belirlenir.

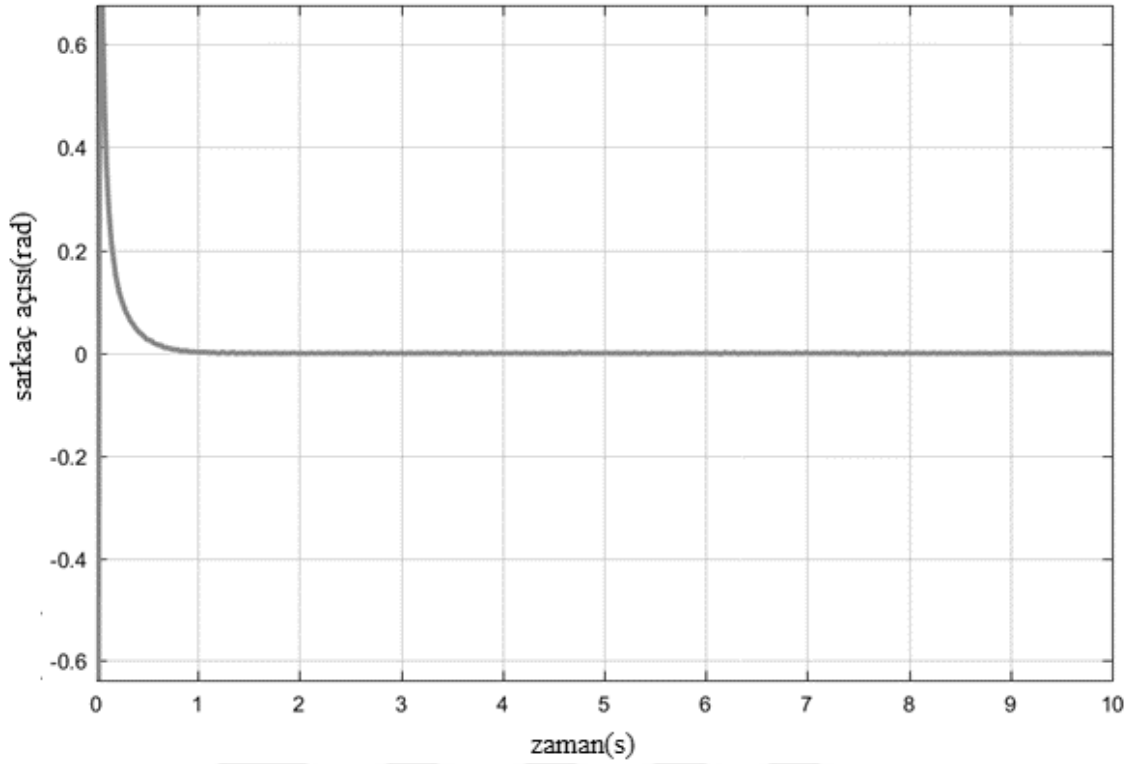
PID kontrol parametreleri PID Tuner seçeneği kullanarak ayarlanmıştır. Şekil 5.16’da PID parametre değerleri gösterilmiştir. Sarkaç açısının kararsız denge noktası olan $\theta=180^\circ$ noktasında Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de görüldüğü gibi dikey olarak dengede kalması sağlanmıştır ve Şekil 5.19’da da $\theta=0^\circ$ yatay denge noktasındaki durumu grafiksel olarak gösterilmiştir. PID parametrelerinin ayarlanması ile denge noktasındaki sapmaların seviyesi azaltılarak denge sağlanmıştır.



Şekil 5.17. Sarkaç açısı $\theta=180^\circ$ noktasındaki simülasyon sonucu



Şekil 5.18. Sarkaç açısı $\theta=180^\circ$ noktasındaki simülasyon sonucunun yakından görünümü



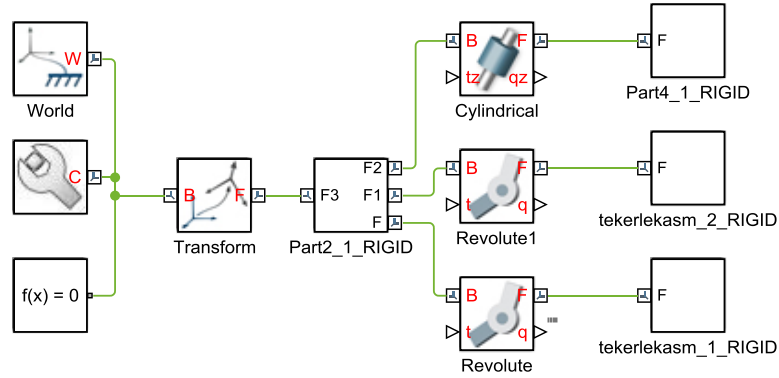
Şekil 5.19. Sarkaç açısı $\theta=0^\circ$ noktasındaki simülasyon sonucu

Şekil 5.20. PID parametre değerleri

Solidworks ortamında hazırlanan üç boyutlu çizim SimMechanics ortamına aktarılmış ve sistemin kararlı bir şekilde dengesini sağlayabilmek için PID kontrolör eklenerek ve Şekil 5.20’de görülen kazanç parametre değerleri ayarlanarak simüle

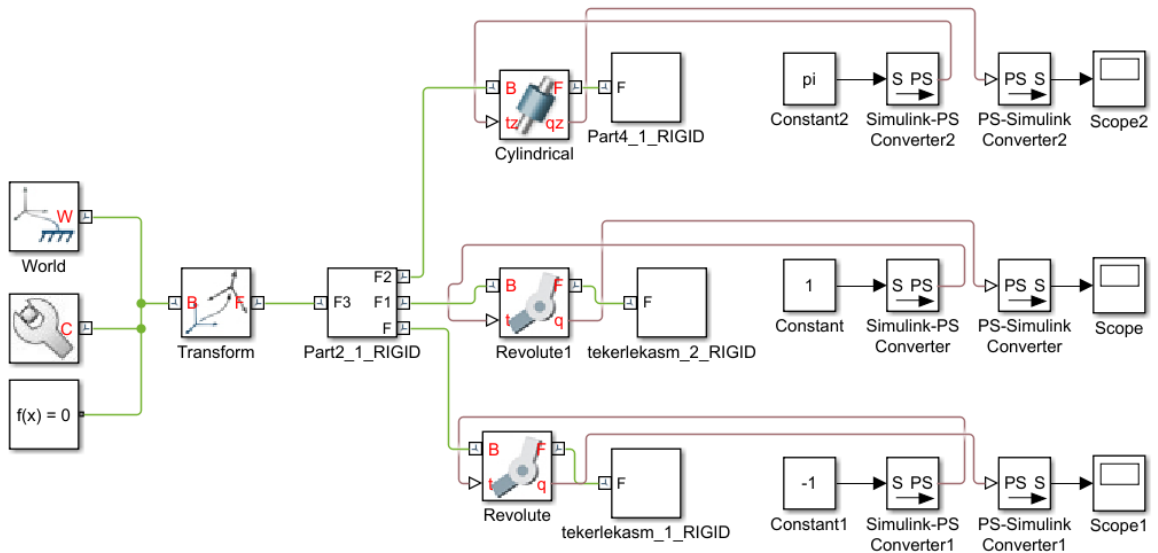
edilmiştir. Simülasyon sonuçları incelenmiş ve PID kontrolörün başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Aynı adımlar denge robotu üzerinde uygulanacaktır.

Denge robotunun üç boyutlu çizimleri Solidworks ortamında modellenerek SimMechanics arabirimine aktarılmıştır. Şekil 5.21’de SimMechanics blok diyagramları görülmektedir.



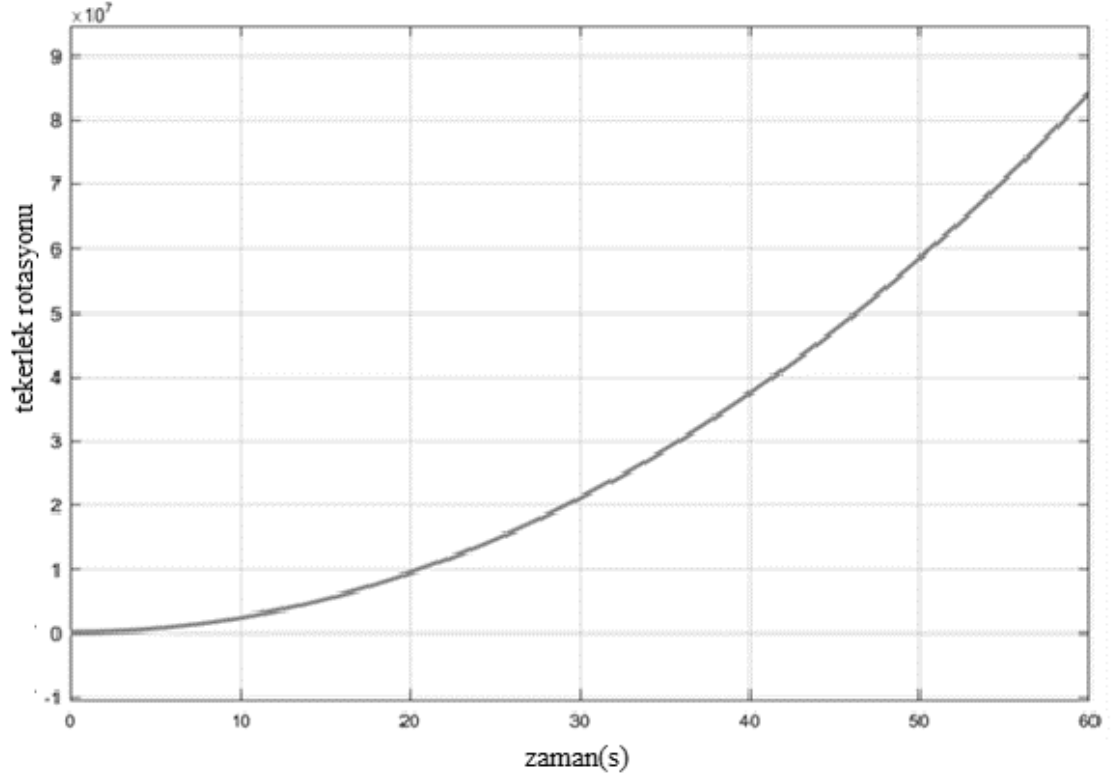
Şekil 5.21. Denge robotu SimMechanics blok diyagramı

Sabit bir kuvvet uygulamadan tekerleklerin hareketi durağan bir konumda iken ancak denge robotunun gövdesi SimMechanics arabirimine aktarım yapılmaya başladığı andan itibaren rastgele salınımlar yapmaktadır. Şekil 5.22’de görüldüğü üzere SimMechanics modele hareket uygulanmıştır.

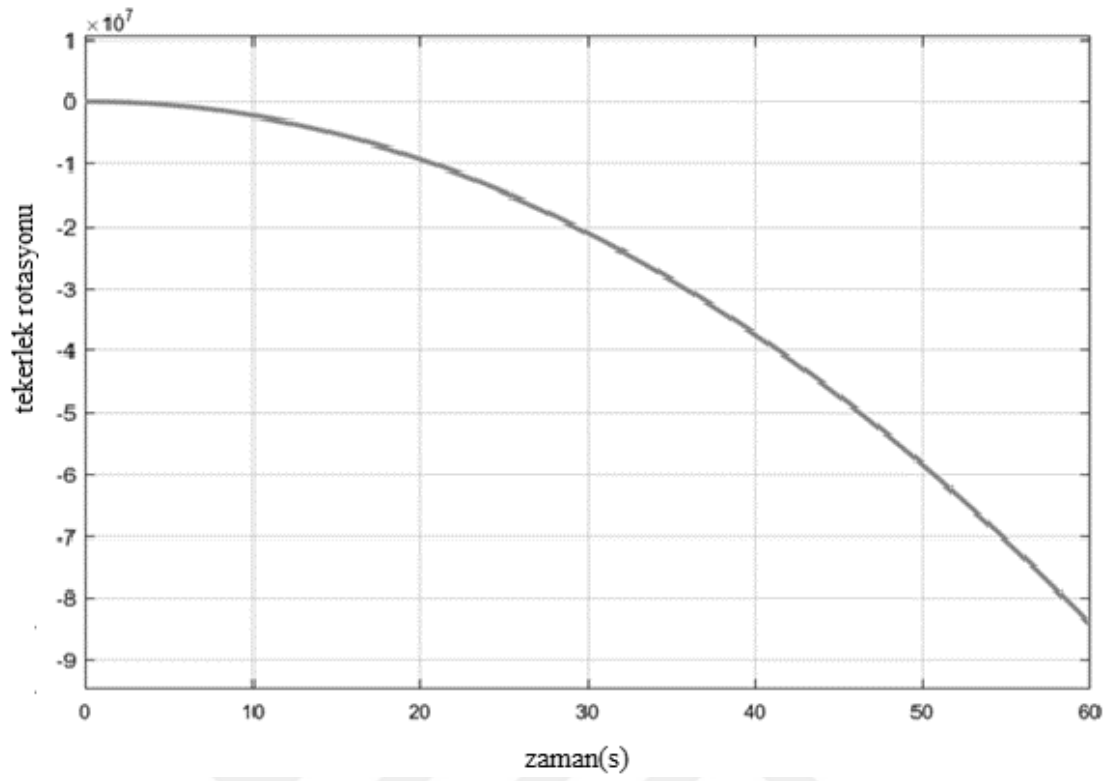


Şekil 5.22. Denge robotunun sabit kuvvet uygulanmış SimMechanics modeli

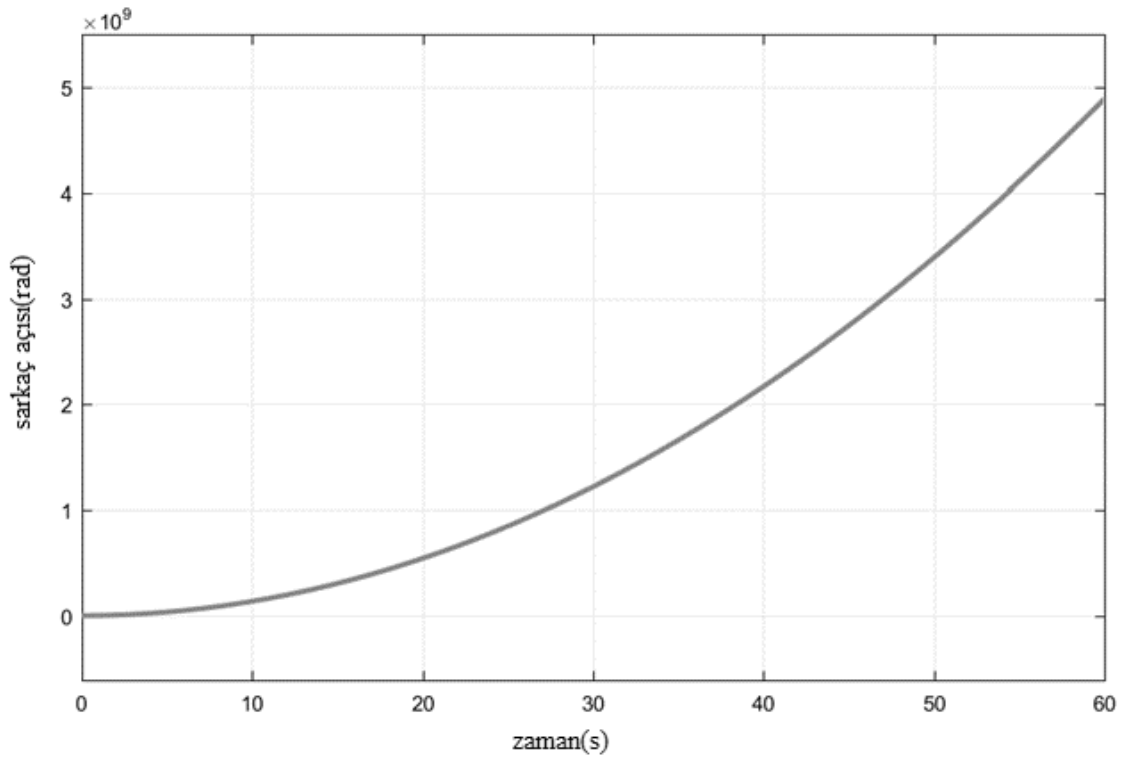
Tekerleklerin hareketi için zıt işaretli olmak üzere constant bloğuna 1 değeri girildi. Zıt işaretli olmasının nedeni tekerlerin birbiri ile farklı yönde dönmesini engellemektir. Şekil 5.23 ve Şekil 5.24’te tekerlerin zıt yönlü hareketi görülmektedir.



Şekil 5.23. Pozitif yönde sonsuza yaklaşan tekerlek hareketi



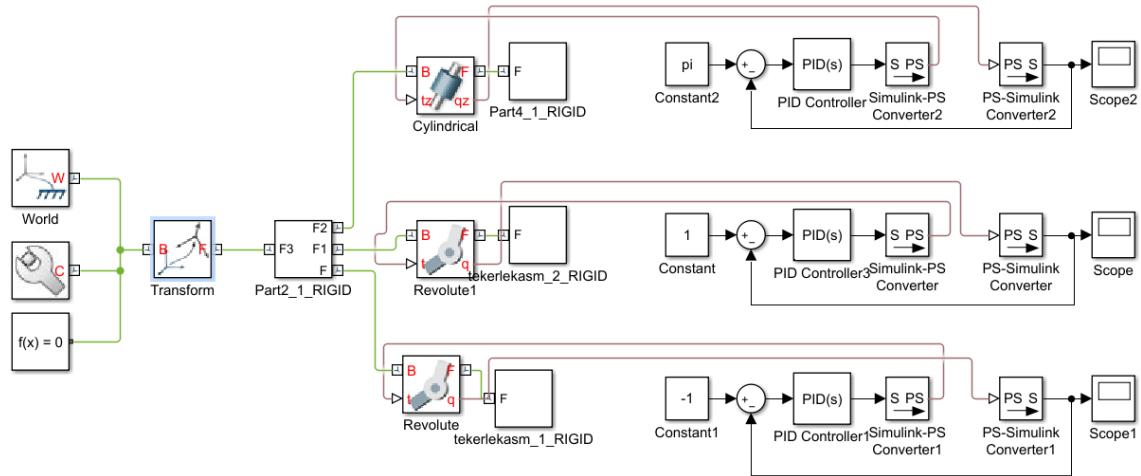
Şekil 5.24. Negatif yönde sonsuza yaklaşan tekerlek hareketi



Şekil 5.25. Sarkaç hareketi simülasyonu

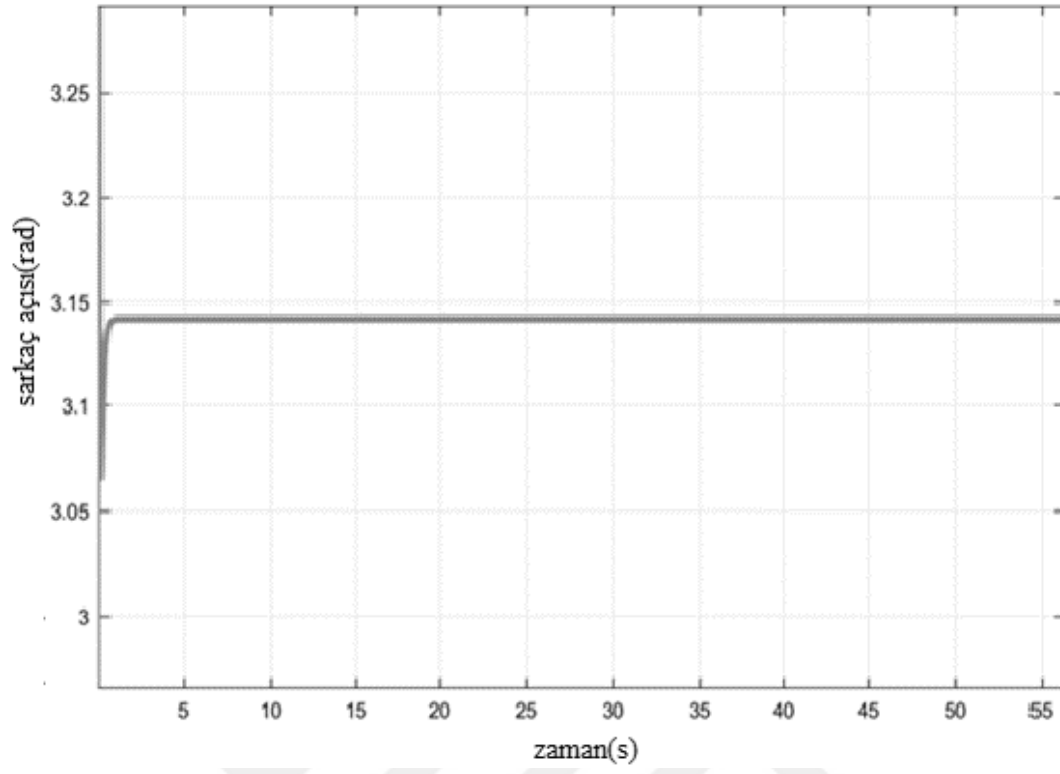
Tekerleklerin ve sarkacın grafiksel sonuçlarından görüldüğü üzere tekerlek ve sarkaç açısı zaman arttıkça sonsuza yaklaşmakta olduğu Şekil 5.23, Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'te görülmektedir. Bir tekerleğin eksi sonsuza diğer tekerleğin artı sonsuza yaklaşması zıt işaretli sabit değerlerin uygulanmasından kaynaklıdır.

Sistemin dengesinin kontrolünü sağlamak için PID kontrolör eklenmiştir. PID kontrol yöntemi tek girişli – tek çıkışlı (SISO) sistemler için iyi bir kontrol metodudur. Yani bir seferde bir girişin kontrol edilmesi manasına gelmektedir. Hem konum kontrolü hem de sarkaç açısının kontrolü aynı zamanda başarılı bir şekilde kullanılamaz [5]. Denge robotunun temelini oluşturan ters sarkaç sistemi ise bir giriş ve çok çıkıştan (SIMO) oluşan bir sistemdir [17]. Bu çalışmada sarkacın dengesi üzerine çalışılmış ve konum kontrolü yapılmamıştır. Sarkacın dikey konumdaki dengesi haricinde tekerleklerin davranışı üzerinde durulmuştur.

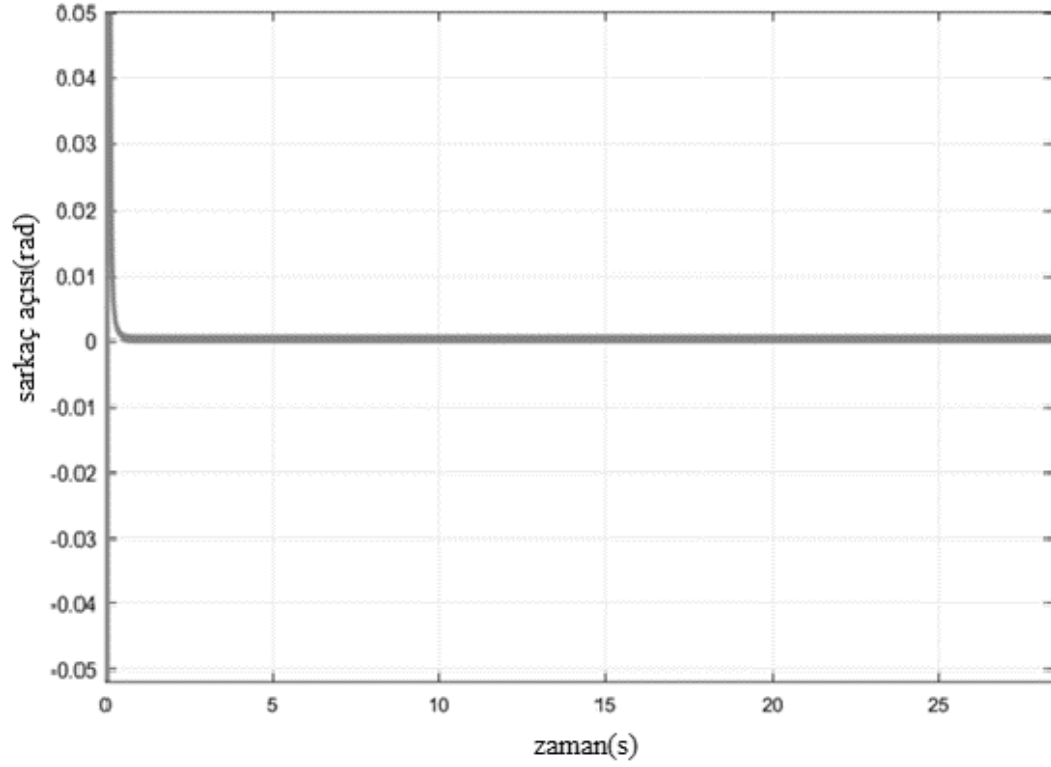


Şekil 5.26. Denge robotunun PID eklenmiş SimMechanics modeli

SimMechanics modeline Şekil 5.26' da görüldüğü gibi PID ekledikten sonra kararsız denge noktası ($\theta=180^\circ$) Şekil 5.27'de ve kararlı denge noktası ($\theta=0^\circ$) Şekil 5.28'de gösterilmiştir.

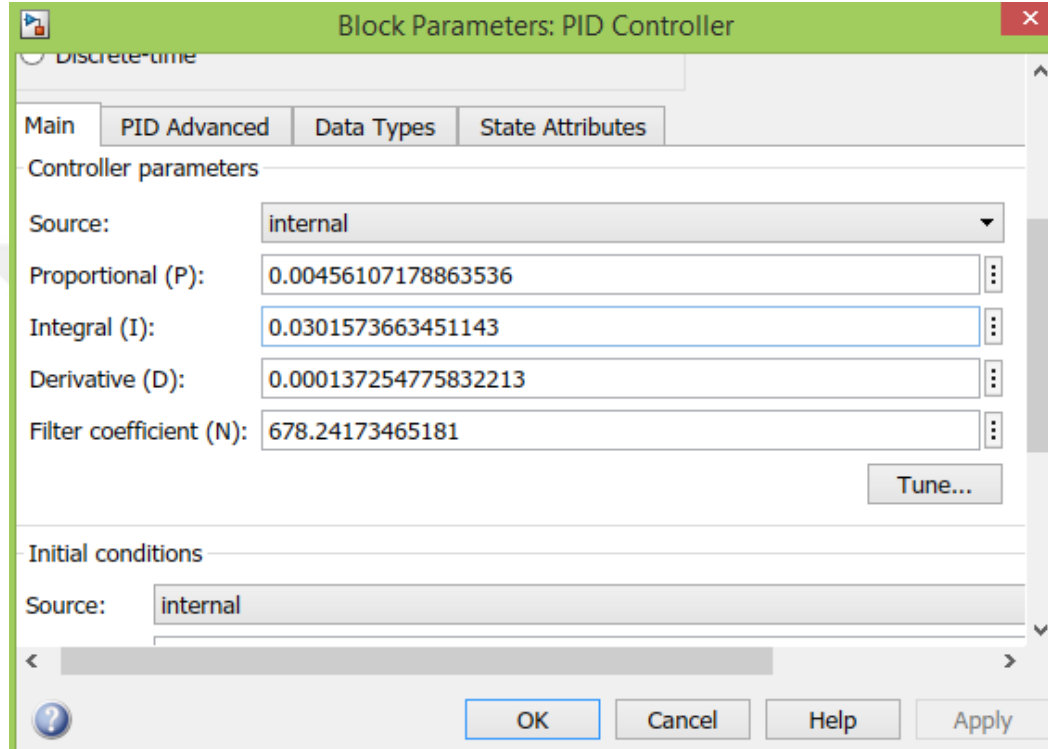


Şekil 5.27. Sarkaç açısı $\theta=180^\circ$ noktasındaki simülasyonu



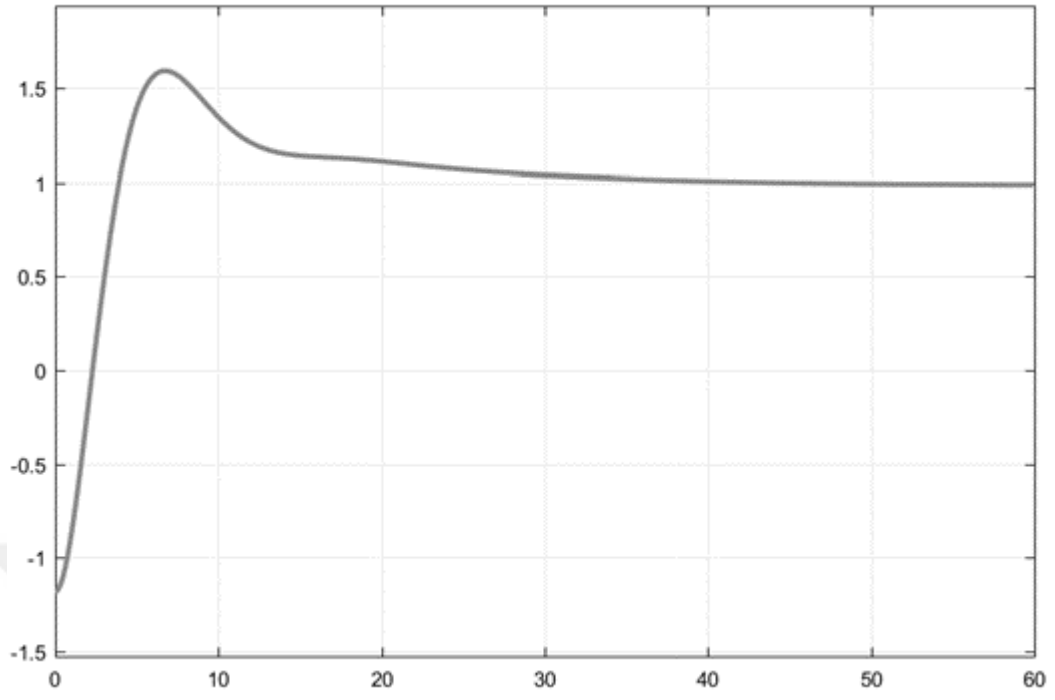
Şekil 5.28. Sarkaç açısı $\theta=0^\circ$ noktasındaki simülasyonu

Şekil 5.27 görüldüğü üzere sarkacın dikey pozisyonda dengesi sağlanmış ve Şekil 5.28’de sarkacın yerçekimi yönündeki kararlı denge noktasında olduğu görülmüştür. Sarkacın dengesi için kullanılan PID ayar parametre değerleri Şekil 5.29’da görülmektedir.

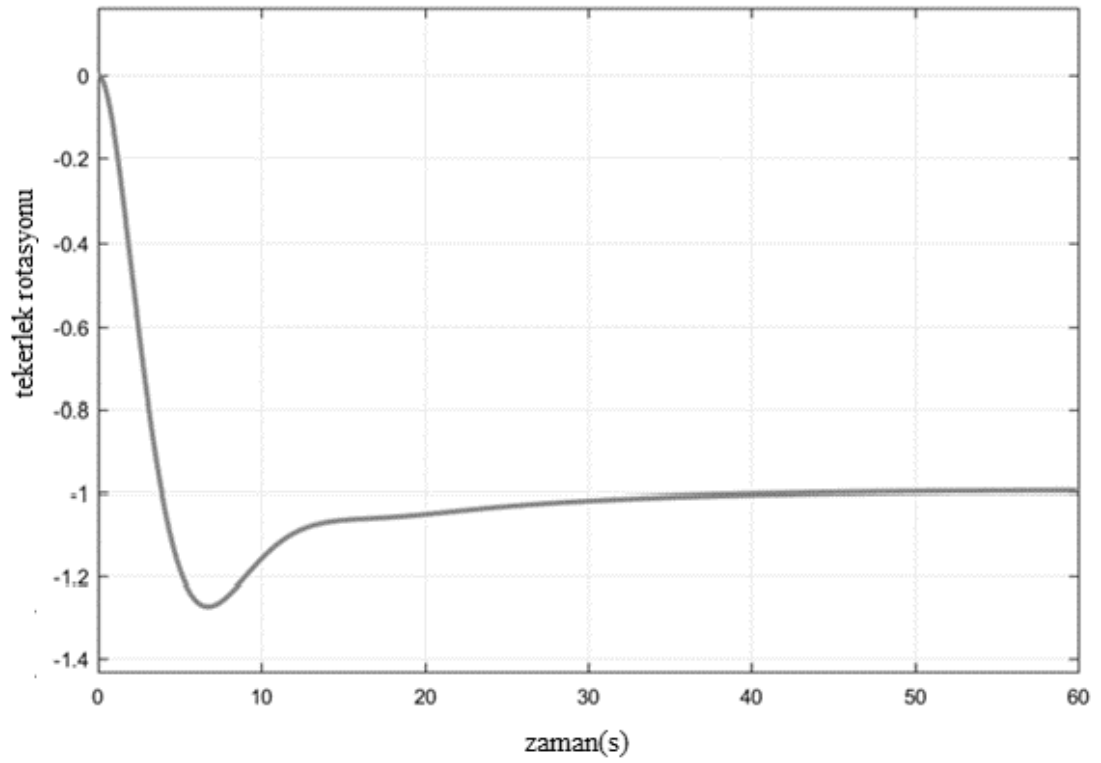


Şekil 5.29. PID parametre değerleri

Şekil 5.29’da görülen PID parametreleri ayarlandıktan sonra tekerleklerin davranışı Şekil 5.30 ve Şekil 5.31’ de görülmektedir.



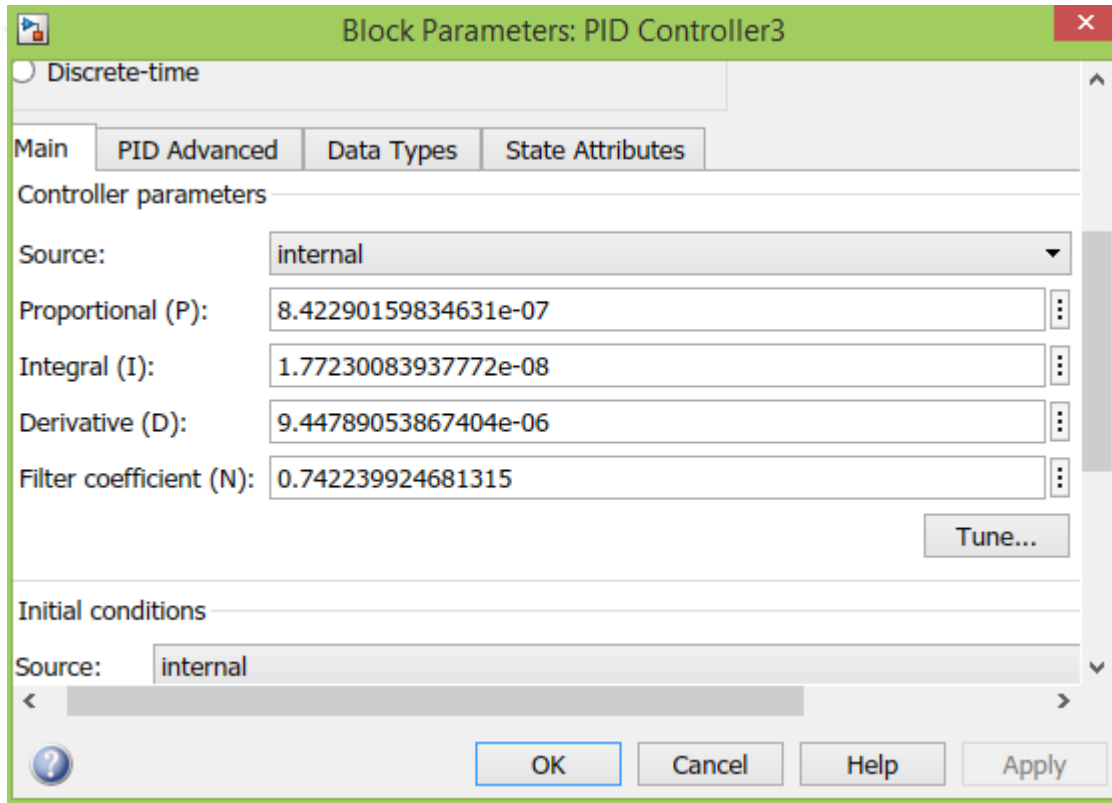
Şekil 5.30. Tekerleğin pozitif yönlü hareket simülasyonu



Şekil 5.31. Tekerleğin negatif yönlü hareket simülasyonu

PID parametre değerleri ayarlanmadan önce tekerleklerin ileri-geri hareketlerinin daha fazla olduğu ve belirli bir aralıkta kalamadığı görölmüştür. Bu problemi çözmek için PID parametreleri ayarlanarak tekerleklerin periyodik olarak ileri-geri dönmesi sağlanmış ve sonra belirli bir aralıkta kalmaya çalıştığı görölmüştür.

Tekerlekleri başlangıçta ters yöne doğru dönmeye başlamaktadır. Geriye doğru dönme sebebi robot gövdesini biraz eğmektir. Sonrasında ise robotun gövde açısını (sarkaç açısı) korumak için tekrar zıt yönde dönmekteler. Robot dikey pozisyonda dengede tutulurken diğer yandan tekerlekler küçük bir bölgede ileri-geri hareket ederek ve kendini dengeleyerek bir noktada sabit tutar. Bu şekilde robot belirli bir açıyla eğimlendiği ve dengede duruyor gibi olduğu görünür.



Şekil 5.32. PID parametre değerleri

Matlab/Simulink yazılımının bize sağladığı kolaylık olan “PID Tuner” seçeneği ile ayarlamış olduğumuz PID parametrelerinin değeri Şekil 5.32 de görölmektedir.

Farklı PID parametreleri de kullanılabilirdi fakat sistemin performansı daha farklı olurdu. Yükselme zamanı, yerleşme zamanı gibi değerlerde, tekerleğin ileri geri dönüş hareketlerindeki sürede yapacağı salınımlarda farklılıklar gözlemlenebilir.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında iki tekerlekli bir denge robotunun tasarımı ve simülasyonu üzerinde çalışılmıştır. Bu çalışmada Solidworks ortamında üç boyutlu tasarımı yapılan denge robotu modeli Matlab/Simulink yazılımının uzantısı olan SimMechanics arabirimine aktararak blok diyagramlar elde edilmiş ve sistemin dengesine yönelik simülasyon çalışması yapılmıştır. Sarkacın dikey pozisyonda olmadığı, salınımlar yaptığı ve tekerlek hareketinin hızla değiştiği grafiğin sonsuza gittiği görülmüş olup sarkacı dikey pozisyonda dengesini sağlamak ve tekerlek hareketini belirli bir aralıkta tutmak için PID kontrol eklenmiştir. PID Tuner seçeneği ile PID parametreleri ayarlanarak sisteme uygulanmıştır.

PID kontrolör ters sarkaç ve denge robotu üzerinde başarılı bir performans göstermiştir. Sarkacın dikey pozisyonda dengesinin kontrolünü gerçekleştirmiştir. PID parametre ayarı değiştirilerek incelenecek olursa dikey pozisyonunu koruyacağı fakat yapacağı salınımlar ve sistemin titreşiminin artacağı görülür. Farklı PID değerleri ile de kararsız denge noktasındaki ($\theta=180^\circ$) denge sağlanabilmektedir.

PID kontrolörü sisteme uygulanmadan önce tekerlek ve sarkaç hareketinin sonsuza doğru gittiği görülmüştür. PID kontrolü sonrasında tekerlek belirli bir aralıkta kalması sağlanmış ve sarkaç ise dikey pozisyonda dengesini koruyabilmiştir.

SimMechanics arabirimi mekaniksel sistemler üzerinde yapılacak çalışmaların simülasyonunu yaparken oldukça başarılı olduğu görülmüştür. Sistemde bir kontrolörle analiz yapılacaksa dinamik modellerin yerine kullanılabilmek için başarılıdır.

Ters sarkaç sistemi üzerinde birçok kontrol yönteminin denenmesi için uygun bir sistemdir. Bu çalışma da sadece PID kontrol ve etkileri incelenmiştir. SimMechanics arabirimi de kullanılarak farklı kontrol yöntemlerinin de performans analizleri araştırılabilir. Farklı kontrol yöntemleri ile konum kontrolü yapılabilir ya da eksen sayısı artırılarak inceleme yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Sung, H.C. 2015. Balancing Robot Control and Implementatren, Mechanical, Engineering, Master of Science.
2. Ooi, R.C., 2003. Balancing a Two Wheeled Autonomous Robot, The University of Western Australia School of Mechanical Engineering, Final Year Thesis.
3. Jose, A., Augustine, C., Malola, S.M. and Chacko, K. 2015. Performance Study of PID Controller and LQR Tecnique for Inverted Pendulum, World Journal of Engineering and Technology, 3,76-81.
4. Enginoğlu, O., 2012. Design Control of Balancing Robot, Graduate School of Natural and Applied Science, Mechatronics Engineering, Thesis of master.
5. Nasır, A.N.K.B., Modelling and Comtroller Design for an Inverted Pendulum System, The University Technology Malaysia.
6. Nagasaki, T., Kajita, K., Kaneko, K., Hirukawa, H., Tanie, K. 2003. “Running Pattern Generation for Humanoid Robot,” Journal-Robotics Society of Japan, VOL 21(8), p.74-80
7. Muskinja, N., Tovornik, B., 2006, Swinging Up and Stabilization of a Real Inverted Pendulum, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, pp.631 - 639.
8. Zhong, W., Röck, H., 2001, Energy and passivity based control of the double inverted pendulum on a cart, Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications (CCA '01), 896 – 901.
9. Krishen, J., Becerra V.M., 2006, Efficient Fuzzy Control of a Rotary Inverted Pendulum Based on LQR Mapping, IEEE International Symposium on Intelligent Control, pp. 2701 – 2706, Germany.
10. Bugeja, M., 2003, Non-Linear Swing-Up and Stabilizing Control of an Inverted Pendulum System, EUROCON Ljubljana, Slovenia
11. Ji, C.W., Lei, F., Kin, K., 1997, Fuzzy logic controller for an inverted pendulum system, ICIPS'97, 1997 IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems, Volume 1, pp. 185 - 189.
12. D. Küçük, 2010, “Design of Two-Wheeled Twin Rotored Hybrid Robotic Platform”, M.Sc Thesis, Atılım University, Ankara.

13. Gocmen, A., 2011, Design Of Two Wheeled Electric Vehicle, M.Sc Thesis, Atılım University, Ankara.
14. Chiu, C. H. and Peng, Y. F., 2006, "Design and Implement of the Self-Dynamic Controller for Two-Wheel Transporter", 2006 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, July 16-21 2006, pp. 480-483, Vancouver, BC, Canada.
15. Choi, D. and Oh, J. H., 2008, Human-friendly Motion Control of a Wheeled Inverted Pendulum by Reduced-order Disturbance Observer, 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 19-23 2008, pp. 2521-2526, Pasadena, CA, USA.
16. Grasser, F., D'arrigo, A., Colombi, S. and Rufer, A., 2002, Joe: A Mobile, Inverted Pendulum, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 49, pp. 107-114.
17. Kizir, S., Bingül, Z., Oysu, C., 2007, "Ters Sarkaç Probleminin PID ve Tam Durum Geri-Besleme Yöntemleri ile Kontrolü", TOK'07 Bildiriler Kitabı, İstanbul.
18. Shaoqiang, Y., Zhong, L., Xingshan, L., 2008, "Modeling and Simulation of Robot Based on Matlab/SimMechanics", Proceedings of the 27th Chinese Control Conference July 16-18, 2008, Kunming, Yunnan, China.
19. R. Grepl, 2009, "Balancing Wheeled Robot: Effective Modelling, Sensory Processing And Simplified Control", Engineering Mechanics, Vol. 16, No. 2, pp. 141-154.
20. Prasad, L., Tyagi, B., Gupta, H. O. 2011. "Optimal Control of Nonlinear Inverted Pendulum Dynamical System with Disturbance Input Using PID Controller & LQR," In Control System, Computing and Engineering (ICCSCE), 2012 International Conference, 23-25 November 2012, Penang, p.540-545.
21. Anderson, D. P. (2010). nBot, a two wheel balancing robot. Retrieved March, 2010, from <http://www.geology.smu.edu/~dpa-www/robo/nbot/>.
22. Wang, J., "Simulation studies of inverted pendulum based on PID controllers", Simulation Modelling Practice and Theory, Sayı 19, Sayfa 440-449, (2011).
23. Huang, C., Wang, W., Chiu, C. , "Design and Implementation of Fuzzy Control on a Two-Wheel Inverted Pendulum", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Cilt 58, Sayı 7, Sayfa 2988-3001, (2011).

24. Singh, N., Yadav, S. K. 2012. “ Comparison of LQR and PD Controller for Stabilizing Double Inverted Pendulum System,” International Journal of Engineering, vol 1(12), p.69-74.
25. Arda, M., 2012. “Çift Eksenli Ters Sarkaç Tasarımı ve Kontrolü Üzerine Bir Araştırma”, Trakya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
26. Wei A. and Yangmin L., 2013, Simulation and Control of a Two-wheeled Selfbalancing Robot, Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) Shenzhen, China, 456 – 461.
27. Şen, M.A., 2014. İki Tekerlekli Robot İçin Bulanık Mantık Tabanlı Kontrolcü Tasarımı ve Arı Algoritması Kullanarak Optimizasyonu, Fen Bilimleri Ens. Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek lisans tezi.
28. Junoh, S.A.B., 2015. “Two-Wheeled Balancing Robot Controller Designed Using PID”, Faculty of Electrical and Electronic Engineering, Master of Science.
29. İlgen, s., Oflaz, E., Gülbahçe, E., Çakan, A., 2016, “Modelling and Control of Single- Wheel Inverted Pendulum by Using Adams and Matlab”, International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers, ISSN: 2147-8228/2147
30. Peker, F., Kaya, İ., 2017. “ PID Tip Denetleyiciler kullanılarak Yapılan Bir Ters Sarkaç Stabilizasyonunun Performans Analizi”, 3,563-574.
31. T. Hu, H. Zhang, X. Dai, X. Xai, R. Liu and B. Qiu, 2007, “Design and Implementation of Self-Balancing Coaxial Two Wheel Robot Based on HSIC”, Proceeding of SPIE, Volume 6794, 6794H-1-9.
32. L. J. Butler and G. Bright, 2008, “Feedback Control of a Self-balancing Materials Handling Robot”, 2008 10th Intl. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision, 17–20 December 2008, pp. 274-278, Hanoi, Vietnam.
33. P. Oryschuk, A. Salerno, A. M. Al-Husseini and J. Angeles, 2009, “Experimental Validation of an Underactuated Two-Wheeled Mobile Robot”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 14, No. 2, April 2009, pp. 252-257.

34. A. Blankespoor and R. Roemer, 2004, "Experimental Verification of the Dynamic Model for a Quarter Size Self-Balancing Wheelchair", Proceeding of the 2004 American Control Conference, June 30 - July 2 2004, pp. 488-492, Boston, Massachusetts, USA.
35. Y. O. Chee and M. S. Z. Abidin, 2006, "Design and Development of Two Wheeled Autonomous Balancing Robot", Student Conference on Research and Development, June 27-28 2006, pp. 169-172, Shah Alam, Selangor, Malaysia.
36. J. Li, X. Gao, Q. Huang, Q. Du and X. Duan, 2007, "Mechanical Design and Dynamic Modeling of a Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot", Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, August 18 – 21 2007, pp. 1614-1619, Jinan, China.
37. A. T. Becker, 2008, "Mobile Robot Motion-Planning Using Wireless Signals For Localization", M.Sc., Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
38. M. Burkert, T. Groll, T. Lai, T. McCoy and D. Smith, 2004, "Segway Design Project", Project Report, Grand Valley State University The Padnos School of Engineering, USA.
39. K. M. Goher and M. O. Tokhi, 2010, "Development, Modeling and Control of a Novel Design of Two-Wheeled Machines", Cyber Journals Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Robotics and Control (JSRC), December Edition.
40. T. Vallius and J. Röning, 2007, "Embedded Object Concept: Case Balancing Two-Wheeled Robot", Proceedings of the SPIE, Vol. 6764.
41. U. Nagarajan, A. Mampetta, G. A. Kantor and R. L. Hollis, 2009, "State Transition, Balancing, Station Keeping, and Yaw Control for a Dynamically Stable Single Spherical Wheel Mobile Robot", 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 12-17 2009, pp. 998-1003, Japan.
42. S. Burdette, 2007, "A Zilog ZNEO based Self-Balancing Robot with PID Control", Project Report, The George Washington University, USA.
43. MEGEP (Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi), 2009. PID Kontrolü, Endüstriyel Otomasyon Teknolojileri
44. Kuşçu, H., "Otomatik Kontrol Ders Notları", Edirne, (2012).

45. URL-1, <http://www.figes.com.tr/matlab/SimMechanics.php>. SimMechanics Hakkında, 2003.
46. Yıldız, İ., 2011. “Uzaysal Hareket Eden Taşıtların Stewart Platform Mekanizması ile Tek Noktadan Kuvvet Geri Beslemeli Kontrolü”, Yıldız Teknik Üni., Makine Müh. ABD, Doktora Tezi.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Berna POLAT

Uyruğu : T.C.

Doğum Yeri ve Tarihi : ELAZIĞ-1994

e-mail : brnpolatt@gmail.com

EĞİTİM

Derece Adı, İlçe, İl Bitirme Yılı

Lise : Kaya Karakaya Anadolu Lisesi Merkez/ELAZIĞ 2012

Üniversite : Fırat Ü. Müh. Fak. Mekatronik Müh. Böl. Merkez/ELAZIĞ 2016

Yüksek Lisans : Fırat Ü. Fen Bilimleri Enst. Mekatronik A.B.D. Merkez/ELAZIĞ 2018

Doktora : -

UZMANLIK ALANI

Mekatronik Sistemler, Robotik, Elektronik Sistemler

YABANCI DİLLER

İngilizce