

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PID VE BULANIK MANTIK KONTROL SİSTEMLERİ İLE İKİ
TEKERLEKLİ KENDİNİ DENGLEYEBİLEN ROBOTİK
SİSTEM TASARIMI

FURKAN PEÇE

KOCAELİ 2020

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PID VE BULANIK MANTIK KONTROL SİSTEMLERİ İLE İKİ
TEKERLEKLİ KENDİNİ DENGELİYEBİLEN ROBOTİK
SİSTEM TASARIMI

FURKAN PEÇE

Prof.Dr. Sedat KARABAY
Kocaeli Üniversitesi

.....

Prof.Dr. Hüseyin Metin ERTUNÇ
Kocaeli Üniversitesi

.....

Prof.Dr. Recep KOCAN
Sakarya Üniversitesi

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 24.11.2020

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

PID ve bulanık mantık kontrol sistemleri ile iki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistem tasarımı başlıklı yüksek lisans tez çalışmasında; sistemin matematik denklemlerinin çıkartılması ve modelinin oluşturulması, MATLAB SIMULINK yardımıyla sistemin hareketlerinin incelenmesi konularına değinilmiştir.

Bu tez çalışması boyunca birlikte çalışmaktan keyif aldığım, bana her türlü yardımda bulunan, tecrübelerini, bilgilerini ve zamanını benimle paylaşan danışmanım ve akıl hocam Sayın Prof.Dr.Sedat KARABAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Yine bu tez çalışması boyunca bana bilgisiyle yardımcı olan Sayın Ar.Gör. Eser YARAR ve benim her zaman yanımda olan desteklerini bir an olsun esirgemeyen aileme de teşekkürü borç bilirim.

Kasım 2020

Furkan PEÇE

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
TABLolar DİZİNİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	3
2. MATEMATİKSEL MODELİN OLUŞTURULMASI	15
2.1. Ters Sarkaç Sistemi	15
2.2. Sistemin Tork Hesabı	24
2.2.1. Sürtünme direnci ile oluşan kuvvet (F_{sk})	25
2.2.2. Aerodinamik direnç ile oluşan kuvvet (F_{ak})	25
2.2.3. Tırmanma ile oluşan kuvvet (F_{tk})	25
3. SİSTEMİN YAPISAL TASARIMI	28
3.1. Üzerine İnsanın Binebileceği Fiziksel Modelin Oluşturulması	28
3.1.1. Mekanik yapı	28
3.1.2. Seçilen motor ve sürücü özellikleri	31
3.1.3. Elektronik ekipmanlar ve özellikleri	33
3.1.4. Maliyet tablosu	35
3.2. Prototip Modelin Oluşturulması	36
3.2.1. Kullanılan motor ve sürücü özellikleri	37
3.2.2. Elektronik ekipmanlar ve özellikleri	38
4. KONTROL SİSTEMİ TASARIMI	40
4.1. PID Kontrolcü Tasarımı	40
4.2. Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) Kontrolcü Tasarımı	43
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	46
5.1. Üzerine İnsanın Binebileceği Robotik Sistem Çıktıları	46
5.2. Prototip Çıktıları	50
6. SONUÇLAR	59
KAYNAKLAR	61
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	64
ÖZGEÇMİŞ	65

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Segway	3
Şekil 1.2.	Ters sarkaç modeli.....	4
Şekil 1.3.	Joe.....	5
Şekil 1.4.	Nbot	6
Şekil 1.5.	Legway	6
Şekil 1.6.	Segway- Puma	8
Şekil 1.7.	Devrilme tipli robot	8
Şekil 1.8.	Chih laboratuvar çalışması	9
Şekil 1.9.	Düz ve eğimli zeminde kendini dengeleyebilen robot	10
Şekil 1.10.	Xu integral kayma kontrol metodlu robotu	10
Şekil 1.11.	Yapay sinir ağ kontrollü test robotu	11
Şekil 1.12.	Tek tekerlekli robot	12
Şekil 1.13.	Kim ve Jung iki tekerlekli robotik sistem.....	13
Şekil 2.1.	Ters sarkaç modeli.....	15
Şekil 2.2.	DC motor modellemesi ve tekerlek ilişkisi	20
Şekil 2.3.	Sistem üzerine etkiyen kuvvetler.....	24
Şekil 3.1.	Sistem çalışma mantığı.....	28
Şekil 3.2.	Tasarımı yapılan iki tekerlekli robotik sistem	29
Şekil 3.3.	Mesh yapısı.....	30
Şekil 3.4.	Eşdeğer stres	30
Şekil 3.5.	Total deformasyon.....	31
Şekil 3.6.	Kendinden redüktörlü fırçalı DC motorlar	32
Şekil 3.7.	Sabertooth motor sürücüsü	32
Şekil 3.8.	Advantech tek kartlı denetleyicisi	33
Şekil 3.9.	LPMS IMU sensör.....	34
Şekil 3.10.	Akü	34
Şekil 3.11.	İki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistem.....	36
Şekil 3.12.	DC motor ve tekerlek	37
Şekil 3.13.	L298N motor sürücüsü	38
Şekil 3.14.	Arduino uno anakartı	38
Şekil 3.15.	MPU 6050 sensör	39
Şekil 3.16.	Pil.....	39
Şekil 4.1.	PID kontrolcü tasarımı	40
Şekil 4.2.	Tune ekranı	41
Şekil 4.3.	Üzerine insanın binebildiği tasarımın PID değerleri	42
Şekil 4.4.	Prototip modelin PID değerleri	42
Şekil 4.5.	Lineer sistem için kapalı çevrim PID kontrolcü blok diyagramı	43
Şekil 4.6.	Bulanık mantık kontrolcü genel yapısı.....	44
Şekil 4.7.	Fuzzy logic kontrolcü üyelik fonksiyonları.....	45
Şekil 5.1.	Değişken kuvvet değerleri için açısız konum grafiği	46
Şekil 5.2.	7.5 kN uygulandığında elde edilen animasyon.....	47
Şekil 5.3.	14.5 kN uygulandığında elde edilen animasyon.....	47
Şekil 5.4.	22 kN uygulandığında elde edilen animasyon.....	48

Şekil 5.5.	29 kN uygulandığında elde edilen animasyon.....	48
Şekil 5.6.	37 kN uygulandığında elde edilen animasyon.....	49
Şekil 5.7.	PID – bulanık mantık lineer konum	50
Şekil 5.8.	PID – bulanık mantık açısal konum	51
Şekil 5.9.	PID – bulanık mantık lineer hız.....	51
Şekil 5.10.	PID – bulanık mantık açısal hız.....	52
Şekil 5.11.	PID – bulanık mantık lineer ivme	53
Şekil 5.12.	PID – bulanık mantık açısal ivme	53
Şekil 5.13.	Twip robotunun denge grafiği	54
Şekil 5.14.	Huang LQR kontrolcü denge grafiği.....	55
Şekil 5.15.	Mahadi ve arkadaşları PD kontrolcü denge grafiği.....	55
Şekil 5.16.	Kim ve Jung tarafından tasarlanan sistemin denge grafiği.....	56
Şekil 5.17.	Kim ve Kwon tarafından tasarlanan sistemin denge grafiği	56



TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1.	Sistem parametreleri.....	26
Tablo 3.1.	Maliyet tablosu	35
Tablo 3.2.	DC motor parametreleri.....	37
Tablo 4.1.	Fuzzy Logic Kontrolcüsü Kural Tablosu	44
Tablo 5.1.	PID – bulanık mantık kontrolcülerinin açısal konum için karşılaştırma sonuçları.....	57
Tablo 5.2.	PID – bulanık mantık kontrolcülerinin lineer ivme için karşılaştırma sonuçları.....	58



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

θ_s	:	Sistemin Açısal Pozisyonu
ϕ_t	:	Tekerin Açısal Pozisyonu
ϕ_m	:	Motorun Açısal Pozisyonu
x_s	:	Sistemin x Ekseninde ki Lineer Yer Değişirilmesi
x_t	:	Tekerlerin x Ekseninde ki Lineer Yer Değişirilmesi
M_s	:	Sistemin Kütlesi
m_t	:	Tekerleklerin Kütlesi
J_s	:	Sistemin Eylemsizlik Momenti
J_t	:	Tekerleklerin Eylemsizlik Momenti
r	:	Tekerleklerin Yarıçapı
g	:	Yerçekimi İvmesi
a	:	İvme
k_m	:	Motorun ve Motor Şaftına Atfedilen Yükün Sürtünme Katsayısı
L	:	Sarkaç Kol Uzunluğu
F_x	:	x Ekseninde ki Kuvvet
F_y	:	y Ekseninde ki Kuvvet
F_s	:	Sürtünme Kuvveti
F_N	:	Normal Kuvvet
T	:	Tork
η	:	Redüktör Oranı
T_m	:	Motor Torku
T_s	:	Sürtünmeden Dolayı Oluşan Tork
$K_{\mathcal{C}}$:	Geri EMF Sabiti
K_t	:	Tork Sabiti
R_a	:	Motor Armatür Direnci
L_a	:	Motor Armatür İndüktansı
i_a	:	Motor Armatür Akımı
b	:	Sürtünme Katsayısı
V_G	:	Giriş Gerilimi
$V_{\mathcal{C}}$:	Çıkış Gerilimi
U_t	:	Kontrol Değişkeni
K_p	:	Oransal Kazanç
K_i	:	İntegral Kazancı
K_d	:	Türev Kazanç

PID VE BULANIK MANTIK KONTROL SİSTEMLERİ İLE İKİ TEKERLEKLİ KENDİNİ DENGELEYEBİLEN ROBOTİK SİSTEM TASARIMI

ÖZET

Bu tezde, iki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemin tasarımı ve kontrol yöntemleri üzerine çalışılmıştır. Ters sarkaç sistemiyle aynı prensibe sahip olan iki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemlerin kontrolü, PID ve bulanık mantık kontrol sistemi ile sağlanmıştır. Matlab Simulink yardımıyla blok diyagramları oluşturulup sonuçlar karşılaştırılmıştır. Giriş olarak kuvvet ve çıkış olarak sistemin açısal değişimi kabul edilmiştir. Matematiksel denklemler, Kirchhoff gerilim ve Lagrange enerji yasalarından elde edilmiştir. Nonlineer denklemleri lineer hale getirip, sistemin durum uzay matrisine ulaşılmıştır. Tasarlanan iki tekerlekli robotik sistem, ters sarkaç mantığına göre kendini dengeye getirebilmektedir. Sistem denge pozisyonundayken, gövdenin açısal hareket yapmasıyla sistemin ağırlık merkezi değişmektedir. Ağırlık merkezindeki değişim ivmeölçer ile programlayıcıya geri besleme yaparak iletilir. Programlayıcı da motor sürücülerine yetki vererek sistemin tekerleklerine gerekli hareketi sağlar. Böylece sistem, kendini tekrardan denge pozisyonuna getirir. Sonuçlara göre, PID kontrolcünün bulanık mantık kontrolcüye göre sistemin denge ve konum kontrolünde daha iyi olduğu anlaşılmıştır. Prototip üretimi için ise, Arduino Uno kart, Mpu 6050 sensör, motorlar, motor sürücüsü, güç kaynağı ve şase için makrolon malzemeler kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bulanık Mantık Kontrol Sistemi, Kendi Kendini Dengeleme, PID Kontrol Sistemi, Segway, Ters Sarkaç Sistemi.

DESIGN OF A TWO-WHEEL SELF-BALANCING ROBOTIC SYSTEM WITH THE PID AND FUZZY LOGIC CONTROL SYSTEMS

ABSTRACT

In this article, the design and control methods of the two-wheel self-balancing robotic system were studied. PID and Fuzzy Logic control systems were used to control two-wheel self-balancing robotic systems which have the same principle as the inverted pendulum system. Block diagrams were created with Matlab Simulink, and the results were compared. The input of the system, the force, the output of the system was considered as angular changes of the system. Mathematical models were derived from Kirchhoff voltage and Lagrangian laws of motion. The state-space matrix of the system was determined by transforming nonlinear equations to linear equations. The designed robotic system can balance itself according to the inverted pendulum logic. While the system is in balance position, the center of gravity of the system changes with the angular movement of the body. The change in the center of gravity is fed back to the controller with the accelerometer. The controller makes motor drivers to move to the wheels of the system. Thus, the system is brought back to the balance position itself. According to the results, it was found that the PID controller is better than the Fuzzy Logic controller in balance and position control of the system. Arduino Uno card, Mpu 6050 sensor, motors, motor driver, power supply and makrolon materials for chassis have used to obtain the prototype.

Keywords: Fuzzy Logic Control System, Self – Balancing, PID Control System, Segway, Inverted Pendulum System.

GİRİŞ

Ters sarkaç modeli prensibiyle yapılan iki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemler insan taşımacılığı için günümüzde önemli rol oynamaktadır. Az enerji harcaması, az yer kaplaması ve kullanımının kolay olmasından dolayı bu robotik sistemlere ihtiyaç duyulmuştur. Ayrıca birçok kontrol yöntemiyle kontrol edilebildiği için akademik araştırmacıların ilgilendiği bir konu olmuştur.

Bu tez çalışmasında okulumuzun laboratuvarında kullanılmak üzere insanın binebileceği iki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemin yapılmasına karar verilmiştir. Solidworks ortamında 3D olarak tasarlanan modelin üretiminin yapılabilmesi için kullanılacak ekipmanların seçimi ve maliyet analizi yapılmıştır. Maliyetin yüksek çıkması ve destek alnamamasından dolayı prototip modelin üretilmesine karar verilmiştir. 3D tasarımın doğruluğunu sağlayabilmek için matematiksel denklemler çıkarıldıktan sonra Matlab Simulink ortamında sisteme farklı giriş değerleri vererek sistemin kendini dengeye getirebildiği simülasyon sonucunda görülmüştür. Gereken kontrol yöntemlerinin sonuçları karşılaştırıldıktan sonra modelin tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 1’de iki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemlerin tarihsel gelişimi ve yapılan çalışmalar hakkında genel bilgiler verilmiştir.

Bölüm 2’de sistemin matematiksel modeli için hesaplamalar anlatılmıştır.

Bölüm 3’de sistemin yapısal tasarımı; fiziksel modelin oluşturulması, mekanik yapı ve kullanılacak elektronik malzemeler belirtilmiştir. Sistemin oluşturabilmesi için gerekli maliyet hesabı yapılmıştır ve bunun sonucunda sistemin prototipinin yapılmasına karar verilip prototip için kullanılan malzeme özellikleri anlatılmıştır.

Bölüm 4’de sistemin kontrolü için uygulanan kontrol yöntemleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Bölüm 5’de Matlab Simulink ortamında elde edilen grafik çıktılarının sonuçları, hangi

durumlarda hangi kontrol yönteminin kullanılacağı ve bu kontrol yöntemlerinden hangisinin tercih edildiği anlatılmıştır.

Bölüm 6’da elde edilen sonuçlar hakkında bilgi verilmiştir.



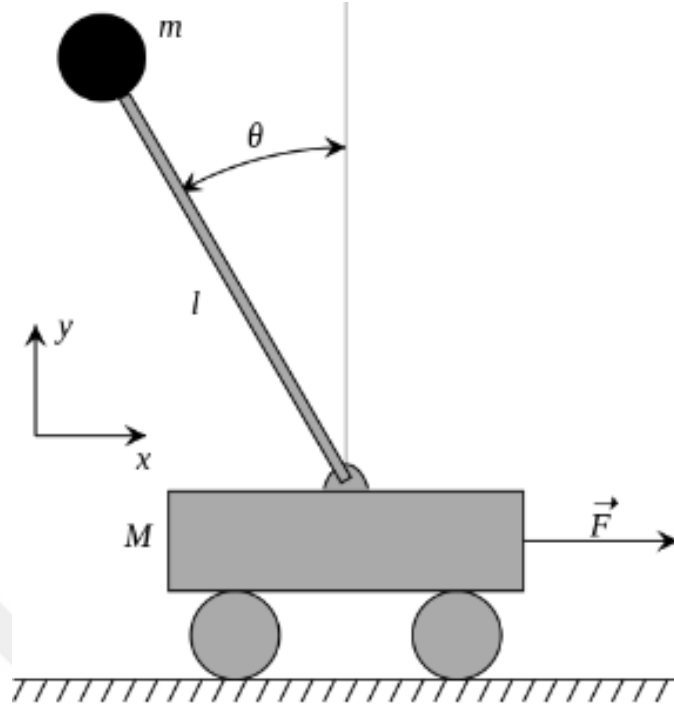
1. GENEL BİLGİLER

1999 yılında Dean Kamen tarafından kurulan Segway firması 2001 yılında bir araç tasarımı gerçekleştirmiştir. Bu araç yüzyılın büyük icadı olarak bulunmuştur. Şekil 1.1'de görülen bu aracın diğerlerinden en farklı özelliği sürücüsünün vücut hareketlerine göre hareket etmesidir. Bu aracın çalışma prensibi; sürücünün vücut hareketlerinden aldığı bilgiye göre yani ileri ve geri hareket etmesinden ve üzerinde bulunan kolun sol ve sağ hareketlerinden dolayı sistemin hareket etmesi ve dönebilmesi amaçlanmıştır. Segway manevra kabiliyetinin yüksek olması, kendi etrafında dönebilmesi sayesinde oldukça tercih edilen bir araç olmuştur [1,2].



Şekil 1.1. Segway

Bu araçlar tasarlanırken Şekil 1.2'deki ters sarkaç modeli prensibi esas alınmıştır. Bu mantığı anlamamız için verebileceğimiz en güzel örnek; parmak ucumuzda bir tahtayı dengede tutmak olacaktır.



Şekil 1.2. Ters sarkaç modeli

Yapılan çalışmalarda robotik sistemlerde kontrol üzerine odaklanılmıştır. Bu kontrol yöntemleri; yapay sinir ağları [3], bulanık mantık [4], oransal – türevsel denetleyici (proportional derivative - PD), oransal – integral – türevsel denetleyici (proportional integral derivative - PID), doğrusal kuadratik regülatör (linear quadratic regülatör – LQR)'dür [5].

Bugeja'nın yaptığı yapay sinir ağları çalışmasında ters çevrilmiş bir sarkacın dengelenmesi ve yapay sinir ağları ile kontrol sistemi tasarımı yapılmıştır. Çoklu giriş ve çoklu çıkış sistemlerinin analizi ve kontrolü için modern durum uzayında incelenmiş ve sarkacın kontrol edilebilmesi için durum geri besleme kontrolörü kullanılmıştır. Bu yöntem tüm kontrolörün karmaşıklığını farklı bant genişliklerinde çalışan ayrı kontrol döngüsüne bölerek azaltmak için kullanılmıştır [3].

Ji ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada ters sarkaç sistemi için bulanık mantık denetleyicisi tasarımı yapılmıştır. Klasik kontrol yöntemlerinde değişken durumlar için istenilen performansı elde etmek zordur. Bulanık mantık denetleyicisi tasarımı için karmaşık matematiksel modele gerek duyulmaz. Kural tablosu oluşturmak için bir dizi temel kurallara gerek duyulmuştur. Sugeno modeli tamamlanmış doğrusal olmayan denklemler kullanılarak iyi performans sonuçları elde edilmiştir. Bu

çalışmada, bulanık mantık denetleyicisinin ters sarkaç sistemleri üzerinde kontrolü için başarılı sonuçlar elde edildiği incelenmiştir [4].

Bu sistemlerle ilgili ilk uygulama 1988 yılında Yamafuji ve Kawamura tarafından gerçekleştirilmiştir. İkiz tekerleğe ve sürüş eksenini üzerinde yapıya sahip olan ters çevrilmiş bir sarkaç olarak tasarlanmıştır. Bu çalışmada, ters sarkaç üzerine etki eden tork, tekerleklerin dönüşünü kontrol edecek şekilde uygulanmıştır. Sistem Routh-Hurwitz'in kararlılık kriterleri ile belirlenebildiği geri besleme kontrol yöntemine göre tasarlanmıştır [6].

Ha ve Yuta tarafından 1996 yılında, iki bağımsız tekerlekli, gövdenin eğim açısal hızını ölçmek için jiroskop ve tekerlek dönüşünü ölçmek için enkoderler kullanılmıştır. Denge ve hız kontrolü, direksiyon kontrolü ve düz çizgi izleme kontrolü olmak üzere 3 adet kontrol algoritması tasarlanmıştır. Bu robota Yamabico Kurara denilmiştir [7].

Şekil 1.3'de gösterilen İsviçre Lozan Federal Teknoloji Enstitüsünde Grasser ve arkadaşları tarafından 2002 yılında mobil tekerlekli ters sarkaç teorisine sahip Joe geliştirilmiştir. Kontrol sistemi birbirinden bağımsız iki adet olarak geliştirilmiştir. Bir kontrolör yanal eksen etrafındaki dengeyi diğer kontrolör dikey eksendeki etkileri kontrol etmiştir. Bir ayırma ünitesi daha sonra bu iki sinyali sırasıyla sağ ve sol taraftaki motorlara uygulanacak torka dönüştürmüştür. Sürücü, sistemi radyo kontrol ünitesi ile denetlemiş ve lineer hızı ile dönüş hızını kontrol sistemine iletmıştır. Maliyeti ve tehlikeyi azaltmak için sürücü yerine ağırlık kullanılmıştır [8].



Şekil 1.3. Joe

Şekil 1.4’de gösterilen Nbot, Joe ile dış görünüşleri aynı olmasına rağmen ticari olarak daha uygundur. Bunun sebebi; sistemde ivmeölçerler ve jiroskoplar bulunur. Sistemi dengeleyebilmek için encoderlerden alınan bilgi geri besleme bilgisi olarak kullanılmıştır [9].



Şekil 1.4. Nbot [9]

Şekil 1.5’de Hassenplug Lego Mindstorms robotik kitini kullanarak Legway adında denge robotu yapmıştır. BrickOs’da robot kontrolcüsünü programlayarak robotun eğim açısını hesaplamıştır [10].



Şekil 1.5. Legway

Nawawi; dinamik modelleme, aktüatör ve sensör seçimi, gömülü kontrolörün Matlab Simulink programında tasarlanması ve kutup yerleştirme kontrol stratejisinin uygulamasını bu çalışmada konu almıştır. Sistemin performansını test etmek için farklı kutuplara sahip kutup yerleştirme kontrolörleri uygulanmıştır. Matlab Simulinkin gerçek zamanlı kontrol kütüphanesini kullanarak gömülü kontrol sisteminin iyi çalıştığını ve tüm sensörlerin deneysel çalışmadan iyi bir geri bildirim sinyali aldığını göstermiştir [11].

Shiroma ve arkadaşları yük taşımak için diğerleriyle aynı yapıya sahip robot üretmiştir. Mekanik olarak kararsız robotun stabil şekilde nesneyi taşıyabilmesi için dıştan gelen kuvveti tahmin etmek, tahmini dış kuvveti kullanarak ayakta durmayı sürdürmek için bir kontrol sistemi tasarlamışlardır. Bu kontrol sistemini kullanarak bir nesneyi yavaşça da olsa insanla birlikte taşıyabildiği deneylerle ispatlanmıştır [12].

Ding ve arkadaşları tarafından insanları taşımak ve onları dik tutabilmek amacıyla üzerinde koltuk bulunan iki tekerlekli bir araç geliştirmiştir [13].

Kaynak sektörünün ilerlemesiyle Bui ve arkadaşları, belirli bir yörüngeye sahip kaynak yapabilen iki tekerlekli ve kaynak yapmak için torçu bulunan araç üretmiştir. Kontrol yöntemi Lyapunov kontrol fonksiyonundan elde edilmiştir. Sistemin performansını arttırmak için hata tanımlanmış ve kontrolör bu hatayı sıfıra çekmek için tasarlanmıştır. Hataları ölçmek ve kontrol yasasının gelişimi için basit bir yöntem önermişlerdir. Simülasyon sonuçlarının sistemin kontrolü için uygun olduğunu göstermişlerdir [14].

2007 yılında Li ve arkadaşları insan ve yük taşıyan bir robot geliştirmiştir. Bu sistem eğimlerde ve dar alanlarda yüksek manevra kabiliyetine sahip olabilmesi için tasarlanmıştır. İnsan taşıma kontrol sistemi ve mal taşıma kontrol sistemi olmak üzere iki kontrol sisteminden tasarlanmıştır. İnsan taşıma modunda ana kontrolör verileri okumuş ve PID kontrolör için referans bilgisi üretmiştir. Mal taşıma modunda ise sistem operatör tarafından yönetilmiştir [15].

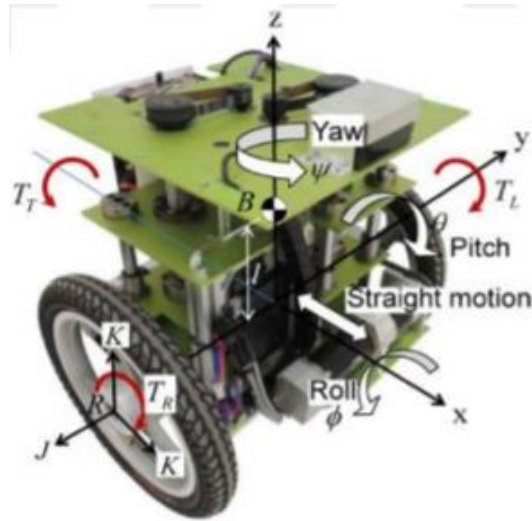
Şekil 1.6'da Segway firması tarafından 2009 yılında yapılan ve Puma olarak adlandırılan araç ticari olarak büyük başarı sağlamıştır. Yan yana iki insanın aynı anda binebileceği ve aracın hava koşullarından etkilenmemesi için üst kısmı kapalı şekilde

üretilmiştir [16].



Şekil 1.6. Segway- Puma

Şekil 1.7’de Kwon ve arkadaşları tarafından üretilen bir robot modeli gösterilmiştir. Kwon ve arkadaşları bu robotta yanal dengede durabilmeyi geliştirmek istemişlerdir. Diğer sistemlerden farkı eğilme mekanizması ile yuvarlanma ve düşey hareketi sağlamıştır. Yani bu sistemin amacı, robotun doğrusal hareketlerine ek olarak devrilme hareketlerini dengelemek istemiş olmalarıdır. Kane ve Lagrange metodlarını karşılaştırarak hareket denklemi oluşturulmuştur. Sistem eğim açısı referansını elde ettiği hız kontrol döngüsü oluşturulmuş ve PID kontrol yöntemi ile kontrol edilmiştir. Yapmış oldukları statik kuvvet analizinde bu sistemin diğer sistemlerden güç tüketiminde daha avantajlı olduğu sonucuna ulaşmışlardır [17].



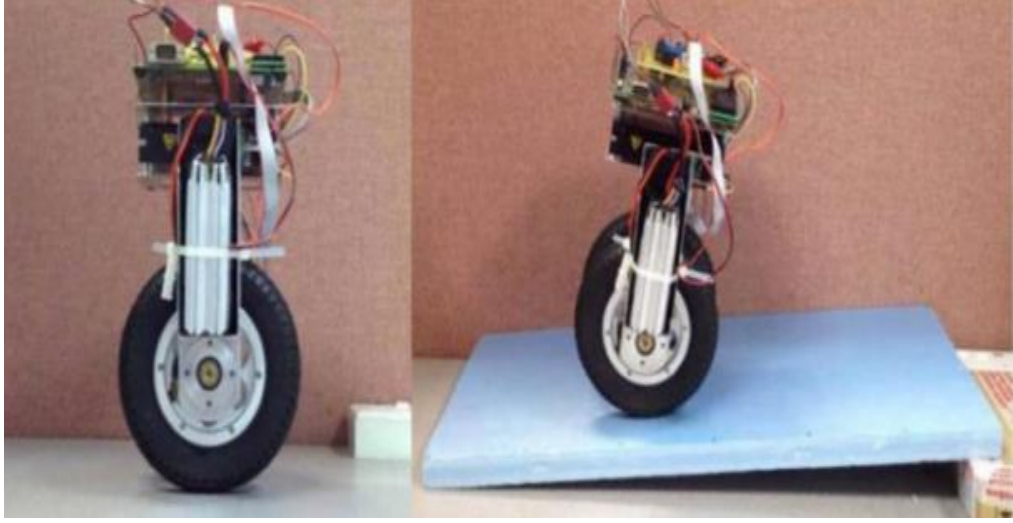
Şekil 1.7. Devrilme tipli robot [17]

2010 yılında Chih tarafından Şekil 1.8’de gösterilen iki tekerlekli kendini dengeleyebilen scooterların dengede olma ve yalpalama hareketini kontrol etmek için radyal fonksiyon tabanlı sinir ağlarını kullanarak adaptif kontrolcü tasarımı yapmıştır. Simülasyonlar ve deneyler sonucunda tasarlanan kontrolcünün sistemi düşük hızlarda yönlendirmek için uygun bir araç olduğu sonucuna ulaşmışlardır [18].



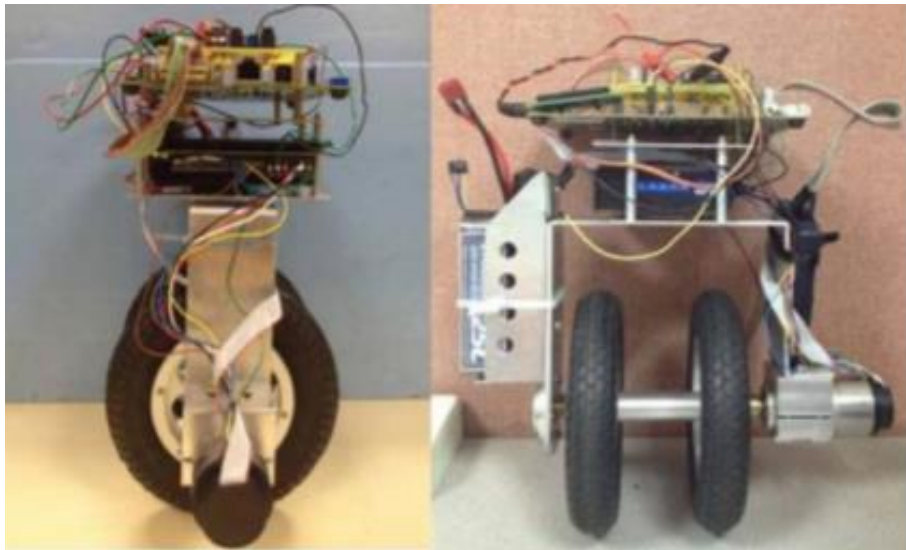
Şekil 1.8. Chih laboratuvar çalışması [18]

Şekil 1.9’da Xu ve arkadaşları tarafından 2013 yılından üretilen iki tekerlekli bir robotun Takagi-Sugeno tipi bir bulanık mantık ile kontrol uygulaması yapılmıştır. Sistemin hareket denklemleri Lagrange metodu kullanılarak oluşturulmuştur. Bulanık mantık kontrolcüsü, sistemin hem sezgisel hem de model bilgisini kullanmıştır. Üyelik fonksiyonları ve kontrol yapısı bu sisteme uygun olarak seçilmiştir. Bulanık mantık kontrolcünün çıkış parametreleri, doğrusal kontrol ile bulanık mantık kontrolcünün çıkışı karşılaştırılarak elde edilmiştir. Bulanık mantık kontrolcüsünün bu uygulamalar için basit bir tasarım olduğu sonucuna varılmıştır. Düz zeminde ve aynı zamanda eğimli zeminde oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir [19].



Şekil 1.9. Düz ve eğimli zeminde kendini dengeleyebilen robot [19]

İlk olarak integral kayma kontrol metodu kullanarak 2014 yılında Xu ve arkadaşları tarafından geliştirilen robot Şekil 1.10'da gösterilmiştir. Tekerleklerin pozisyon kontrolünü sağlamak için bir adet aktüatör kullanılmıştır. Bu yüzden eksik tahrikli bir sistem olarak adlandırılmıştır. Sistemin hareket denklemleri Lyapunov Teorisi kullanılarak oluşturulmuştur ve ekstra serbestlik derecesine sahiptir. Doğrusal kontrol uygulamak için ekstra olan serbestlik derecesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu sistemde integral kayma yüzeyinin uygulanmış olması, eşleşmiş belirsizlikleri ortadan kaldırmıştır. Kontrolcü, uyumsuz belirsizliklere maruz kalan kayma yüzeyini stabilize etmiştir. [20].



Şekil 1.10. Xu integral kayma kontrol metodlu robotu [20]

2005’de Pathak ve arkadaşları hız ve konum için kısmi geri beslemeden bahsetmiştir. Serbest sistemin dinamik modelinde holonomik olmayan kayma kısıtlamaları dikkate alınmıştır. Sistemin hareket denklemleri Newton hareket yasalarından elde edilmiştir. Elde edilen denklemler iki kontrolcü tasarımı için kullanılmıştır. İlk kontrolcü sistemin eğimini ve hızını kontrol etmek için tasarlanmıştır. Diğer kontrolcü ise gidilecek mesafeyi belirten ve sınırlandıran bir kontrolcü olarak tasarlanmıştır. Kontrolcü parametrelerinin belirsizliklerini gidermek için daha fazla çalışma yapılması sonucuna varılmıştır [21].

2006’da Forrest yapay sinir ağları kullanarak geliştirilen robot Şekil 1.11’de gösterilmiştir. Yapay sinir ağları, beyindeki nöronları taklit eden basit işleme elemanları ağıdır. Bu ağın davranışı, giriş verileri ve işlem elemanları arasında sinaptik bağlantılar ile karakterize edilmiştir. Bu sistemin tasarımı için genetik bir algoritma tasarlanmıştır. Bu algoritmanın amacı, istenen ve gerçek çıktılar arasındaki hatayı en aza indirmek olarak belirlenmiştir. Sistem LabView ortamında simüle edilmiştir. Deney sonuçları ile simüle sonuçları birbiriyle uyum göstermiştir [22].



Şekil 1.11. Yapay sinir ağ kontrollü test robotu [22]

2007’de Nawawi ve arkadaşları yüksek güçlü bel eklemlili gövdeden, güvenlik için tasarlanmış kollardan ve ters çevrilmiş sarkaçtan oluşan bir robotik sistem tasarlamışlardır. Eğim açısına, doğrusal konuma ve direksiyon açısına önem veren bir robot modellemiştir. Robotu dengeleyebilmek için durum geri beslemeli kutup

yerleştirme teorisini ortaya atmışlardır. Sistemin denge durma, koşma, dönme ve oturma gibi hareketlerinin gerçekleştirdiğini deneysel olarak doğrulamışlardır [23].

2007’de Jeong ve Takahashi eğim açısı, doğrusal konum ve direksiyon açısı kontrolleri ile üç boyutlu bir sistem olarak modellemiş ve doğrusal kuadratik düzenleyici (LQR) ile geri beslemeyi denemiştir. Sistemin pratik kullanımı için gerekli olan dengede durma, hızlanma ve dönme temel hareketlerini gerçekleştirebileceğini deneysel olarak ispatlamışlardır [24].

2009’da Li ve Xu bulanık mantık teoremi uygulamıştır. Lyapunov metodunu kullanarak sistemin hareket denklemleri elde edilmiştir. Bulanık mantık kontrolcünün, sistem çıkışlarının verilen sınırlı referans sinyallerinin sıfırdan küçük bir değerde olmasını sağlamış ve tüm kapalı döngü sinyallerinin yarı küresel düzgün sınırlılığını garanti etmiştir. Bu sistemin doğruluğunu kapsamlı simülasyonlarla doğrulamışlardır [25].

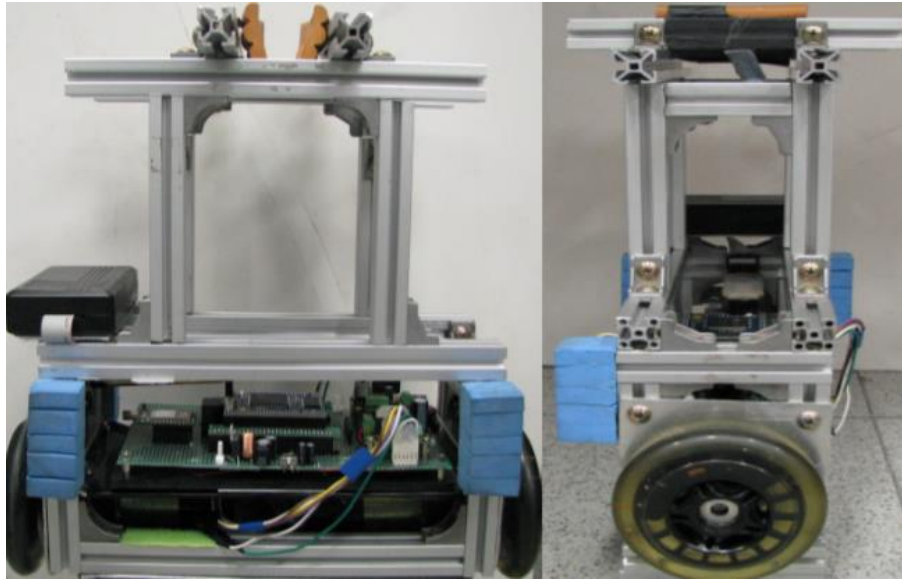
Huang 2010 yılında Şekil 1.12’de gösterilen tek tekerlekli kendini dengeleyebilen bir sistem geliştirmiştir. Lagrange yöntemini kullanarak sistemin matematiksel modeli elde edilmiştir. Ters sarkaç sistemi olarak ele alınan bu sistem için LQR kontrol metodunu kullanmıştır. Sistemin kararlılığını simülasyon çalışmaları ve deneylerle doğrulamıştır [26].



Şekil 1.12. Tek tekerlekli robot [26]

Mahadi ve arkadaşları 2011 yılında kendini dengeleyebilen robotlar üzerinde PD kontrol kullanmıştır. Sistemin hareket denklemlerini Newton yasasından elde etmişlerdir. Projede sadece sarkaç çubuğuna bağlanmış potansiyometre kullanılmıştır. Devre Proteus yazılımında kullanılmış ve sistemin kazanç değerleri için Matlab Simulinkden yararlanılmıştır. Sistem kararlılığını doğrulamak için Kök diyagramı çizilmiştir. Bu sistem tek sensör kullanılmasından dolayı bazı sınırlamalara sahip olmuştur. Sistemin doğruluğunu arttırmak ve sınırlamaları kaldırmak için daha fazla sensör kullanılmasına karar vermişlerdir. [27].

Kim ve Jung 2012 yılında Şekil 1.13'de gösterilen iki tekerlekli kendini dengeleyebilen mobil robotlar üzerinde PID ve bulanık mantık kontrol uygulamışlardır. PID kontrolcü sistemi stabilize edebilse de bulanık mantık kontrolcünün belirsizliklere karşı daha kararlı olması gerektiğini savunmuşlardır. Kim ve Jung iki tekerlekli mobil robot sistemin PID ve bulanık mantık performanslarını karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda PID kontrolcünün iyi çalıştığını ve bulanık mantık kontrolcünün dış etkilere karşı PID kontrolcüye göre daha kararsız sonuçlar verdiğini deneysel olarak ispatlamışlardır.



Şekil 1.13. Kim ve Jung iki tekerlekli robotik sistem [28]

Literatür taramasında görüldüğü üzere bu sistemlerin tasarımının ve sonuçlarının incelenmesi için genellikle Matlab Simulink programı kullanılmıştır. İki tekerlekli kendini dengeleyebilen sistemlerin matematiksel modeli Lagrange, Newton,

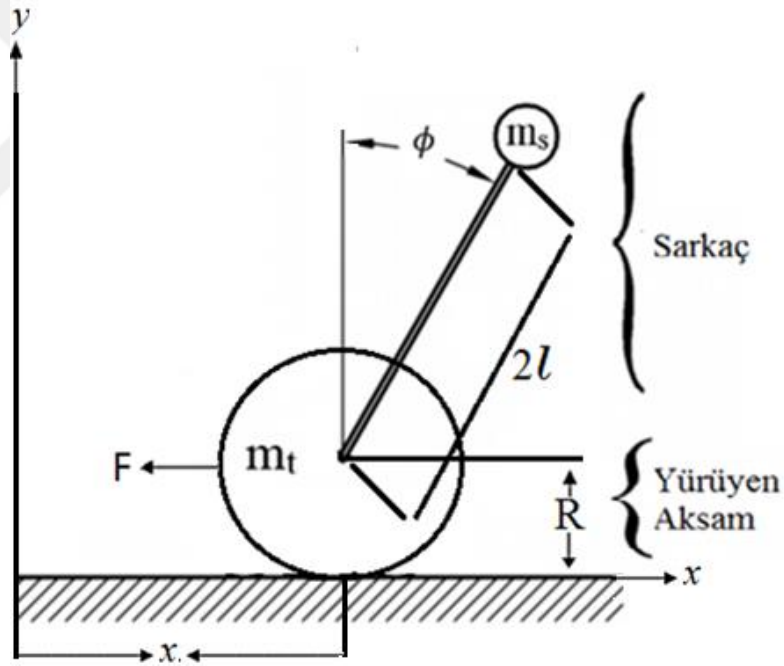
Lyapunov, Kane gibi hareket denklemlerinden elde edilmiştir. Bu sistemlerin üzerinde PID, LQR, PD, bulanık mantık, kutup yerleştirme kontrolü gibi birçok kontrol sistemleri kullanılmıştır. PID ve bulanık mantık kontrolcü, bu sistemlerde sorunsuz kullanılabileceği araştırmalar sonucunda öngör÷lmüştür. Bu kontrol sistemlerinin içinde en çok uygulananı ve en verimli sonuçların alındığı yöntem ise PID kontrol uygulaması olmuştur.



2. MATEMATİK MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Bu bölümde tasarlamak istediğimiz iki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemin matematik denklemlerini elde edebilmek için izlememiz gereken adımlar belirtilmiştir. Sistem, ters sarkaç sisteminin geliştirilmesiyle elde edilmiştir. Bu yüzden ters sarkaç sisteminin çözümü esas alınmıştır. Tasarım aşamasında sistemin düz yolda herhangi bir engebeyle karşılaşmadığı düşünülerek hesaplamalar yapılmıştır.

2.1. Ters Sarkaç Sistemi



Şekil 2.1. Ters sarkaç modeli

Şekil 2.1’de gösterilen ters sarkaç sisteminin matematiksel modeli, sistem iki serbestlik dereceli olduğu için Lagrange diferansiyel denklemlerinden türetilir. Ters sarkaç sisteminin hareketi, X eksenindeki motor tahrikli sistemin doğrusal hareketinden ve sarkaçın ϕ düzlemindeki dönme hareketinden oluşur. Dolayısıyla iki dinamik denklem olacaktır.

Lagrange diferansiyel denklemleri sistemin kinetik enerji ve potansiyel enerji arasındaki fark olarak ifade edilebilir. Yani;

Lagrangian = Kinetik Enerji – Potansiyel Enerji

$$L = KE - PE \quad (2.1)$$

Sistemin toplam kinetik enerjisi, tekerleğin ve gövdenin ötelemeden ve dönmeden meydana gelen kinetik enerjilerin toplamıdır. Gövdenin düşey ve yatay eksenlerde hareketi bulunduğu için hem dönmeden hem de ötelemeden kaynaklı kinetik enerjisi oluşmaktadır. Tekerleğin ise düşey eksenlerde hareketi bulunmadığı için sadece ötelemeden kaynaklı kinetik enerjisi oluşmaktadır. Bu verilen bilgiler ışığında sistemin toplam kinetik enerjisi denklem (2.2)'de gösterilmiştir.

$$KE = \frac{1}{2} m_t V_t^2 + \frac{1}{2} m_s V_s^2 + \frac{1}{2} J \dot{\phi}^2 \quad (2.2)$$

Lagrange yönteminde, kinetik enerjinin kullanılabilmesi için sistemin kütle merkezlerinin çizgisel hızlarının belirlenmesi gerekmektedir. Çizgisel hızların elde edilebilmesi için tekerleğin ve gövdenin konumlarının birinci türevleri alınmıştır. (2.3) numaralı denklemde tekerleğin ağırlık merkezinin konumu (2.4) numaralı denklemde ise sarkacın ağırlık merkezinin konumu verilmiştir.

$$\vec{x}_t = x\vec{i} + R\vec{j} \quad (2.3)$$

$$\vec{x}_s = (x + l \sin \phi)\vec{i} + (2R + l \cos \phi)\vec{j} \quad (2.4)$$

Elde edilen (2.3) ve (2.4) numaralı denklemlerin birinci dereceden türevleri alınarak tekerleğin ve sarkacın çizgisel hızları (2.5) ve (2.6) numaralı denklemlerde gösterilmiştir.

$$\vec{V}_t = \dot{\vec{x}}_t = \dot{x}\vec{i} \quad (2.5)$$

$$\vec{V}_s = \dot{\vec{x}}_s = (\dot{x} + l\dot{\phi} \cos \phi)\vec{i} + (-l\dot{\phi} \sin \phi)\vec{j} \quad (2.6)$$

(2.5) ve (2.6) numaralı denklemlerden elde edilen tekerleğin ve sarkacın çizgisel hızlarını (2.2) numaralı denklemde yerlerine yazılmıştır. Elde edilen (2.7) numaralı denklem sistemin toplam kinetik enerjisidir. Denklem (2.7)'deki hız ifadelerinin

kareleri yerlerine yazılıp düzenlenirse sistemin kinetik enerji denkleminin son hali denklem (2.9)'da ki gibi elde edilir.

$$KE = \frac{1}{2} m_t \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_s \left((\dot{x} + l\dot{\phi} \cos \phi)^2 + (-l\dot{\phi} \sin \phi)^2 \right) + \frac{1}{2} J \dot{\phi}^2 \quad (2.7)$$

$$KE = \frac{1}{2} m_t \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_s (\dot{x}^2 + 2l\dot{x}\dot{\phi} \cos \phi + l^2 \dot{\phi}^2 \cos^2 \phi + l^2 \dot{\phi}^2 \sin^2 \phi) + \frac{1}{2} J \dot{\phi}^2 \quad (2.8)$$

$$KE = \frac{1}{2} m_t \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_s (\dot{x}^2 + 2l\dot{x}\dot{\phi} \cos \phi + l^2 \dot{\phi}^2) + \frac{1}{2} J \dot{\phi}^2 \quad (2.9)$$

Lagrange denkleminin yazılabilmesi için sistemin denge konumundaki potansiyel enerjisinin hesaplanması gerekmektedir. Tekerleğin ve gövdenin potansiyel enerjileri ayrı ayrı düşünülmüştür ancak tekerleğin düşey yönde hareketi bulunmadığından dolayı potansiyel enerjisi sıfırdır. Sistemin potansiyel enerjisinin genel hali denklem (2.10)'da belirtilmiştir.

$$PE = m_s g l (1 - \cos \phi) \quad (2.10)$$

Elde edilen (2.9) ve (2.10) numaralı denklemler (2.1) numaralı denklemde yerlerine yazılıp gerekli sadeleştirmeler yapıldığında sistemin kinetik ve potansiyel enerjisi denklemine bağlı olan Lagrange denklemi (2.11) numaralı denklemde gösterilmiştir.

$$L = \left[\frac{1}{2} m_t \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_s (\dot{x}^2 + 2l\dot{x}\dot{\phi} \cos \phi + l^2 \dot{\phi}^2) + \frac{1}{2} J \dot{\phi}^2 \right] - [m_s g l (1 - \cos \phi)] \quad (2.11)$$

Lagrange denkleminin en genel hali (2.12) numaralı denklemde verilmiştir. İki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistem, iki serbestlik derecesine sahip olduğu için x ve ϕ koordinatlarına göre çözümlenecektir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\delta L}{\delta q_i} \right) = Q_i \quad (2.12)$$

Sistem iki serbestlik derecesine sahip olduğu için iki farklı dinamik denklemleri oluşmaktadır. (2.12) numaralı denklemin x ve ϕ koordinatlarına göre yeniden oluşturulduğunda (2.13) ve (2.14) numaralı denklemler elde edilir. (2.13) numaralı denklemde eşitliğin sağ tarafında dış kuvvetler etki etmektedir ama sistemin açısız hareketi için dışarıdan bir kuvvet etki etmediği için eşitliğin sağ tarafı sıfır olacaktır.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{x}} \right) - \left(\frac{\delta L}{\delta x} \right) = F_x - b\dot{x} \quad (2.13)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{\phi}} \right) - \left(\frac{\delta L}{\delta \phi} \right) = 0 \quad (2.14)$$

(2.13) numaralı denklemde önce kısmi türevler alınıp ardından zamana göre türevler alınır.

$$\left(\frac{\delta L}{\delta \dot{x}} \right) = m_t \dot{x} + m_s \dot{x} + m_s l \dot{\phi} \cos \phi \quad (2.15)$$

(2.15) numaralı denklemin zamana göre türevi alınır.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{x}} \right) = \frac{d}{dt} (m_t \dot{x} + m_s \dot{x} + m_s l \dot{\phi} \cos \phi) = (m_t + m_s) \ddot{x} + m_s l \ddot{\phi} \cos \phi - m_s l \dot{\phi}^2 \sin \phi \quad (2.16)$$

$$\left(\frac{\delta L}{\delta x} \right) = 0 \quad (2.17)$$

(2.16) ve (2.17) numaralı denklemler (2.13) numaralı denklemde yerlerine yazıldığında x koordinatı için (2.18) numaralı denklem elde edilir. (2.18) numaralı denklemde eşitliğin sağ tarafındaki ifadeler dış kuvvetleri ifade etmektedir. Buradaki $b\dot{x}$ terimi sürtünme kuvvetini ifade etmektedir. (2.18) numaralı denklemde gerekli işlemler yapıldığında (2.19) numaralı denklem elde edilir.

$$(m_t + m_s) \ddot{x} + m_s l \ddot{\phi} \cos \phi - m_s l \dot{\phi}^2 \sin \phi = F_x - b\dot{x} \quad (2.18)$$

$$(m_t + m_s) \ddot{x} + b\dot{x} + m_s l \ddot{\phi} \cos \phi - m_s l \dot{\phi}^2 \sin \phi = F_x \quad (2.19)$$

(2.14) numaralı denklem içinde önce kısmi türevler alınıp ardından zamana göre türevler alınır.

$$\frac{\delta L}{\delta \phi} = m_s l \dot{x} \cos \phi + m_s l^2 \dot{\phi} + J \dot{\phi} \quad (2.20)$$

$$\frac{\delta L}{\delta \dot{\phi}} = -m_s l \dot{x} \sin \phi + m_s g l \sin \phi \quad (2.21)$$

(2.20) numaralı denklemin zamana göre türevi alınır.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{\phi}} \right) = \frac{d}{dt} (m_s l \dot{x} \cos \phi + m_s l^2 \dot{\phi} + J \dot{\phi}) = (m_s l^2 + J) \ddot{\phi} + m_s l \ddot{x} \cos \phi -$$

$$m_s l \ddot{x} \sin \phi \quad (2.22)$$

(2.21) ve (2.22) numaralı denklemleri (2.14) numaralı denklemde yerlerine yazıldığında ϕ koordinatını için (2.24) numaralı denklem elde edilir. Sisteme dışarıdan kuvvet etki etmediği için eşitliğin sağ tarafı sıfıra eşittir. (2.23) numaralı denklemde gerekli işlemler yapıldığında (2.24) numaralı denklem elde edilir.

$$(m_s l^2 + J) \ddot{\phi} + m_s l \ddot{x} \cos \phi - m_s l \dot{x} \dot{\phi} \sin \phi - (-m_s l \dot{x} \dot{\phi} \sin \phi + m_s g l \sin \phi) = 0 \quad (2.23)$$

$$(m_s l^2 + J) \ddot{\phi} + m_s l \ddot{x} \cos \phi - m_s g l \sin \phi = 0 \quad (2.24)$$

Yukarıda elde ettiğimiz (2.19) ve (2.24) numaralı hareket denklemleri düzenlenirse (2.25) numaralı ve (2.26) numaralı denklemler elde edilir. Elde edilen bu denklemler sistemin doğrusal olmayan dinamik denklemleridir.

$$\ddot{x} = \frac{F_x - b\dot{x} - m_s l \dot{\phi} \cos \phi + m_s l \dot{\phi}^2 \sin \phi}{m_t + m_s} \quad (2.25)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{m_s g l \sin \phi - m_s l \ddot{x} \cos \phi}{m_s l^2 + J} \quad (2.26)$$

(2.26) numaralı denklemi (2.19) numaralı denklemde yerine yazılır;

$$F_x = (m_t + m_s) \ddot{x} + b\dot{x} + m_s l \left(\frac{m_s g l \sin \phi - m_s l \ddot{x} \cos \phi}{m_s l^2 + J} \right) \cos \phi - m_s l \dot{\phi}^2 \sin \phi \quad (2.27)$$

\ddot{x} elde etmek için gerekli işlemler yapıldığında (2.28) numaralı denklem elde edilir.

$$\ddot{x} = \frac{-(m_s l^2 + J) b \dot{x} - m_s^2 l^2 g \cos \phi \sin \phi + (m_s l^2 + J) m_s l \dot{\phi}^2 \sin \phi + (m_s l^2 + J) F_x}{(m_s l^2 + J)(m_t + m_s) - m_s^2 l^2 \cos^2 \phi} \quad (2.28)$$

(2.25) numaralı denklemi (2.24) numaralı denklemde yerine yazılır;

$$(m_s l^2 + J) \ddot{\phi} + m_s l \left(\frac{F_x - b\dot{x} - m_s l \dot{\phi} \cos \phi + m_s l \dot{\phi}^2 \sin \phi}{m_t + m_s} \right) \cos \phi - m_s g l \sin \phi = 0 \quad (2.29)$$

$\ddot{\phi}$ elde etmek için gerekli işlemler yapıldığında (2.30) numaralı denklem elde edilir.

$$\ddot{\phi} = \frac{(m_t + m_s)(m_s g l \sin \phi) + m_s l b \cos \phi \dot{x} - m_s^2 l^2 \cos \phi \sin \phi \dot{\phi}^2 - F_x m_s l \cos \phi}{(m_s l^2 + J)(m_t + m_s) - m_s^2 l^2 \cos^2 \phi} \quad (2.30)$$

Bu tezin temel amacı, sarkaçın, robotik sistemin pozisyonundaki değişikliklere tepki olarak sarkaçı dik konumda tutacak şekilde bir kontrolör tasarlamak olduğundan, dikey olarak yukarı denge pozisyonu ile ilgili denklemlerin lineerleştirilmesi için aşağıda belirtilen kabuller yapılır.

$$\sin \phi = \phi$$

$$\cos \phi = 1$$

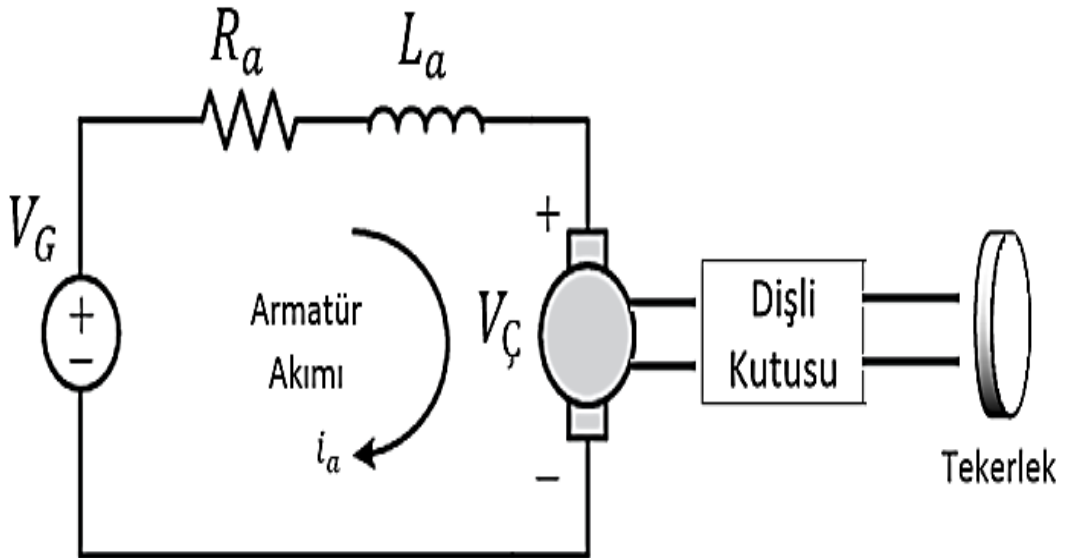
$$\dot{\phi}^2 = 0$$

Yukarıda belirtilen kabuller denklem (2.28) ve denklem (2.30)'da yerlerine yazılıp gerekli işlemler ve sadeleştirmeler yapıldığında (2.31) numaralı ve (2.32) numaralı denklemler elde edilir. Bu elde edilen denklemler sistemin doğrusal dinamik denklemleridir.

$$\ddot{x} = \frac{-(m_s l^2 + J)b\dot{x} - m_s^2 l^2 g \phi + (m_s l^2 + J)F_x}{(m_s l^2 + J)(m_t + m_s) - m_s^2 l^2} \quad (2.31)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{(m_t + m_s)(m_s g l \phi) + m_s l b \dot{x} - F_x m_s l}{(m_s l^2 + J)(m_t + m_s) - m_s^2 l^2} \quad (2.32)$$

İki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemde, sistemin tahriği DC motor tarafından gerçekleştirilir. Daha gerçekçi model oluşturmak için motor özellikleri sistemin matematiksel modeline eklenmelidir.



Şekil 2.2. DC motor modellemesi ve tekerlek ilişkisi

Şekil 2.2’de gösterilen DC Motor elektrik devre şemasında giriş gerilimi V_G aşağıda belirtilen Kirchhoff gerilim yasasından hesaplanmıştır.

$$V_G = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + V_{\zeta} \quad (2.33)$$

DC Motorlarda motor armatür indüktansı $L_a \cong 0$ kabul edilebilir. $L_a \cong 0$ kabulü yapıldığında (2.33)’deki denklem aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$V_G = i_a R_a + V_{\zeta} \quad (2.34)$$

Kirchhoff Gerilim Yasasına göre motorun manyetik alanı hareketinden dolayı üretilen V_{ζ} değeri (2.35) nolu denklemde belirtildiği gibi şaftın açısal hızı ile orantılıdır [29].

$$V_{\zeta} = K_{\zeta} \dot{\phi}_m \quad (2.35)$$

$$i_a = \frac{V_G}{R_a} - \frac{K_{\zeta}}{R_a} \dot{\phi}_m \quad (2.36)$$

$$T_m = K_t i_a \quad (2.37)$$

Denklem (2.36)’deki i_a değerini (2.37) numaralı denklemde yerine yazarsak (2.38) numaralı denklem elde edilir.

$$T_m = K_t \left(\frac{V_G}{R_a} - \frac{K_{\zeta}}{R_a} \dot{\phi}_m \right) \quad (2.38)$$

(2.38) numaralı denklemde V_G elde edebilmek için gerekli işlemler yapılır.

$$V_G = \frac{T_m R_a}{K_t} + K_{\zeta} \dot{\phi}_m \quad (2.39)$$

(2.39) numaralı denkleme Laplace dönüşü uygulanır.

$$V_G(s) = \frac{T_m(s) R_a}{K_t} + K_{\zeta} s \phi_m(s) \quad (2.40)$$

Ayrıca motor tarafından oluşturulan tork, hem (2.37) numaralı denklemde gösterilen armatür akımıyla orantılıdır hem de (2.41) numaralı denklemde gösterildiği gibi yazılabilir [30].

$$T_m(s) = (J_m s^2 + Ds) \phi_m(s) \quad (2.41)$$

J_m motorun eylemsizlik momentini, D ise motorun viskoz sönümlemesini ifade etmektedir. (2.41) numaralı denklem (2.40) numaralı denklemde yerine yazılır.

$$V_G(s) = \frac{(J_m s^2 + Ds)\phi_m(s)(R_a)}{K_t} + K_C s \phi_m(s) \quad (2.42)$$

DC motorun giriş (gerilim) ve çıkış (açısal konum) arasındaki transfer fonksiyonu (2.43) numaralı denklemde gösterilmiştir.

$$\frac{\phi_m(s)}{V_G(s)} = \frac{K_t}{(J_m s^2 + Ds)(R_a) + K_t K_C s} \quad (2.43)$$

Açısal konumun türevi açısal hızı vermektedir. (2.45) numaralı denklemi (2.43) ve (2.40) numaralı denklemlerde yerlerine yazılır.

$$\omega(s) = \frac{d\phi_m}{dt} = s\phi_m(s) \quad (2.44)$$

$$\phi_m(s) = \frac{\omega(s)}{s} \quad (2.45)$$

$$\frac{\omega(s)}{V_G(s)} = \frac{K_t}{(J_m s + D)(R_a) + K_t K_C} \quad (2.46)$$

$$V_G(s) = \frac{T_m(s)R_a}{K_t} + K_C \omega(s) \quad (2.47)$$

(2.46) numaralı denklemde $\omega(s)$ (2.47) numaralı denklemde yerine yazılıp gerekli işlemler yapıldığında (2.48) numaralı açısal hız içermeyen T_m denklemi elde edilir.

$$T_m(s) = \frac{K_t}{R_a} \left(1 - \frac{K_t K_C}{R_a (J_m s + D) + K_t K_C} \right) V_G(s) \quad (2.48)$$

(2.48) numaralı denklemde parametreler yerlerine yazılarak T_m değeri elde edilecektir. Bu değere göre motor seçimi yapılacaktır.

(2.47) numaralı denklemden T_m formülü elde edilir.

$$T_m = V_G(s) \frac{K_t}{R_a} - \frac{K_t K_C}{R_a} \omega(s) \quad (2.49)$$

T_m ile F_x kuvveti arasındaki ilişki denklem (2.50)'de gösterilmiştir.

$$T_m \eta = F_x R \quad (2.50)$$

$$T_m = F_x \frac{R}{\eta} \quad (2.51)$$

(2.51) numaralı denklem (2.49) numaralı denklemde yerine yazıldığında:

$$F_x(s) = V_G(s) \left(\frac{\eta}{R} \right) \frac{K_t}{R_a} - \left(\frac{\eta}{R} \right) \frac{K_t K_C}{R_a} \omega(s) \quad (2.52)$$

denklem elde edilir.

$$\omega(s) = \left(\frac{\eta}{R} \right) s x(s) \quad (2.53)$$

(2.53) numaralı denklem (2.52) numaralı denklemde yerine yazılıp ters Laplace dönüşümü alınarak sistemin girişi motor volatajı $V_G(t)$, sistemin hızı $\dot{x}(t)$ ve sistemin çıkışı $F(t)$ arasındaki ifadeyi veren (2.54) numaralı denklem elde edilir.

$$F_x(t) = V_G(t) \left(\frac{\eta}{R} \right) \frac{K_t}{R_a} - \left(\frac{\eta}{R} \right)^2 \frac{K_t K_C}{R_a} \dot{x}(t) \quad (2.54)$$

Elde ettiğimiz (2.54) numaralı denklemi (2.31) ve (2.32) numaralı denklemlerde yerlerine yazarak sistemin çıkışlarının motor parametrelerine ve giriş gerilimine bağlı olması sağlanmış olur.

$$\ddot{x} = \frac{-(m_s l^2 + J) b \dot{x} - m_s^2 l^2 g \phi + (m_s l^2 + J) \left(V_G(t) \left(\frac{\eta}{R} \right) \frac{K_t}{R_a} - \left(\frac{\eta}{R} \right)^2 \frac{K_t K_C}{R_a} \dot{x}(t) \right)}{(m_s l^2 + J)(m_t + m_s) - m_s^2 l^2} \quad (2.55)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{(m_t + m_s)(m_s g l \phi) + m_s l b \dot{x} - \left(V_G(t) \left(\frac{\eta}{R} \right) \frac{K_t}{R_a} - \left(\frac{\eta}{R} \right)^2 \frac{K_t K_C}{R_a} \dot{x}(t) \right) m l}{(m_s l^2 + J)(m_t + m_s) - m_s^2 l^2} \quad (2.56)$$

Bu bölümde, sistemin düz bir zeminde hareket edeceği ve tekerleklerin zemin üzerinde kaymadan yuvarlanacağı ve yatay hareket yapacağı varsayılmıştır.

İki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemin doğrusal olmayan denklemleri (2.28) numaralı ve (2.30) numaralı denklemlerde gösterilmiştir. Sistemin doğrusal hareket denklemlerinin elde edilebilmesi için kabuller yapılmıştır. Yapılan kabuller denklem (2.28)'de ve denklem (2.30)'da yerlerine yazılarak ve gerekli işlemler yapılarak (2.31) numaralı ve (2.32) numaralı denklemler elde edilmiştir.

Sistemin elde edilen hareket denklemlerinin motor parametrelerine bağı olabilmesi için Kirchhoff gerilim yasaı denklemleri ıkartılmııtır. Elde edilen (2.54) numaralı denklem (2.31) numaralı ve (2.32) numaralı denklemlerde yerlerine yazılarak (2.55) numaralı ve (2.56) numaralı sistemin motor parametrelerine bağı hareket denklemleri elde edilmiıtır.

Matlab Simulink programında PID ve bulanık mantık kontrol sistemlerinin tasarlanabilmesi için sistemin hareket denklemlerine ihtiyaç vardır. Bu yzden motor parametrelerine bağı hareket denklemleri elde edilmiıtır.

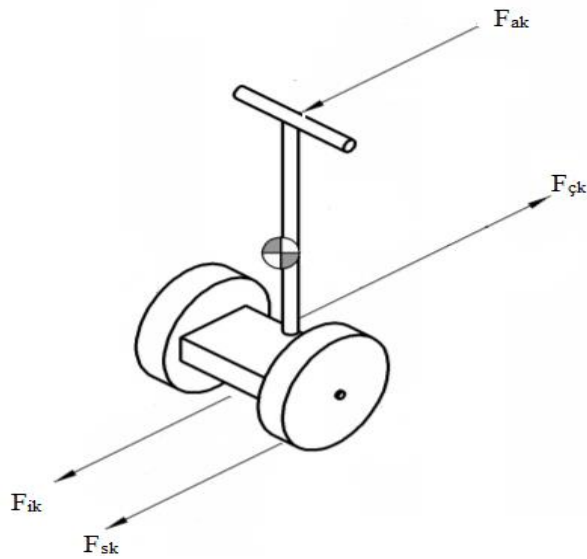
2.2. Sistemin Tork Hesabı

Üzerine insanın binebileceğı bir sistem tasarımında tork kestirimi oldukça önemlidir. Bunu kestirebilmek için sistemin ve taşıyacağı insanın ağırlığı, sistemin hızı gibi parametreler optimum şartlarda belirlenmelidir.

Sistemin tork kestirimi yapılırken çekiş kuvveti olarak bilinen kuvvet için denklem üretmek gerekmektedir.

Bu kuvvetin elde edilmesi Şekil 2.3’de gösterilen parametrelere bağıdır;

- Sürüklenme direnci ile oluşan kuvvet (F_{sk})
- Aerodinamik direnç ile oluşan kuvvet (F_{ak})
- Tırmanma ile oluşan kuvvet (F_{tk})



Şekil 2.3. Sistem üzerine etkiyen kuvvetler

2.2.1. Sürtünme direnci ile oluşan kuvvet (F_{sk})

Lastik ile zemin arasında oluşan kuvvet olarak bilinmektedir. Lastiğin şekline, yapısına ve hava basıncına bağlıdır. Sürtünme direnci ile oluşan kuvvet denklem (2.57)'de gösterilmiştir.

$$F_{sk} = \mu mg \quad (2.57)$$

Denklem (2.57)'deki μ değeri lastiğin kalitesi ve hava basıncına bağlı olarak 0,005-0,02 arasında değişmektedir. İki tekerlekli robotik sistemin tasarımında μ değeri 0,02 olarak kabul edilmiştir.

2.2.2. Aerodinamik direnç ile oluşan kuvvet (F_{ak})

Sistemin havaya karşı gösterdiği direnç olarak bilinmektedir. Sistemin tasarımına bağlıdır. Aerodinamik direnç ile oluşan kuvvet denklem (2.58)'de gösterilmiştir.

$$F_{ak} = \frac{1}{2} \rho A C_d V^2 \quad (2.58)$$

Denklem (2.58)'de ifade edilen ρ değeri havanın yoğunluğunu, A sistemin rüzgâr tarafından etkilendiği alanı, C_d sistemin aerodinamik sürtünme katsayısını ifade etmektedir. Denklem, hızın karesi ile orantılı olduğu için elde edeceğimiz değer oldukça büyüktür. Bu yüzden sisteme etki eden rüzgâr alanını en az seviyeye indirmek oldukça önemlidir.

Yapılan araştırmalarda C_d değeri sedan araçlarda 0,3-0,5 arasında, otobüslerde 0,5-0,7 arasında, motosikletlerde 0,7-0,9 arasındadır. İki tekerlekli robotik sistemlerde ise 0,9 değerindedir. Modellenen sistemde C_d değeri 0,9 olarak kabul edilmiştir.

Modellenen sistemin deniz seviyesinde kullanılacağı varsayıldığı için uluslararası atmosfer şartlarındaki ρ değerinin $1,225 \text{ kg/m}^3$ olarak kullanılması kabul edilmiştir.

2.2.3. Tırmanma ile oluşan kuvvet (F_{tk})

Sistemin eğim durumunda yani zemine ψ kadar açı yapmasıyla oluşan kuvvette tırmanma kuvveti denir. Tırmanma ile oluşan kuvvet denklem (2.59)'da gösterilmiştir [31].

$$F_{tk} = mg \sin \psi \quad (2.59)$$

Tasarım aşamasında sistemin düz yolda herhangi bir engebeyle karşılaşmadığı düşünülerek hesaplamalar yapılmıştır. Bu yüzden tırmanma ile oluşan kuvvet, $\psi = 0$ olduğundan çekiş kuvvetine etki etmemektedir.

Yukarıda verilen bilgiler kullanılarak denklem (2.60)'da gösterilen çekiş kuvveti denklemi elde edilmiştir.

$$F_{\text{çk}} = F_{\text{sk}} + F_{\text{ak}} \quad (2.60)$$

Çekiş kuvveti, lastik yarıçapı (R) ve tork ile orantılıdır. Bu denklem (2.61)'de gösterilmiştir.

$$F_{\text{çk}} = \frac{T}{R} \quad (2.61)$$

Elde edilen kuvvet denklemleri, (2.60) numaralı denklemde yerlerine yazıldığında sistemin tork kestirim denklemi elde edilir. Denklem (2.62)'de gösterilen tork denklemi sistemin motor seçiminde önemli rol oynamaktadır.

$$\frac{T}{R} = \mu mg + \frac{1}{2} \rho A C_d V^2 \quad (2.62)$$

Tablo 2.1. Sistem parametreleri

Toplam Ağırlık	100 kg	Hava Yoğunluğu (ρ)	1,225 kg/m ³
Lastik Yarıçapı (R)	0,15 m	Sürüklenme Katsayısı (C_d)	0,9
Sürtünme Katsayısı (μ)	0,02	Hız (V)	30 m/sn
Öz İzdüşüm Alanı (A)	1,02 m ²		

Sistem tasarımında 1,80 m boyunda 0,5 m genişliğinde ortalama 80 kg insanın bineceği düşünülmüştür.

$$T = 0,15 \left((0,02)(100)(9,81) + \frac{1}{2} (1,225)(1,02)(0,9)(30)^2 \right) = 78,8 \text{ Nm} \quad (2.63)$$

Tasarlanan sistemin motor seçiminin yapılabilmesi için Tablo 2.1’de gösterilen sistem parametrelerinin (2.62) numaralı denklemlerde yerine yazılması gerekmektedir. Denklem (2.63)’de elde edilen tork değeri sistemde kullanılacak motor seçiminde önemli rol oynamaktadır.

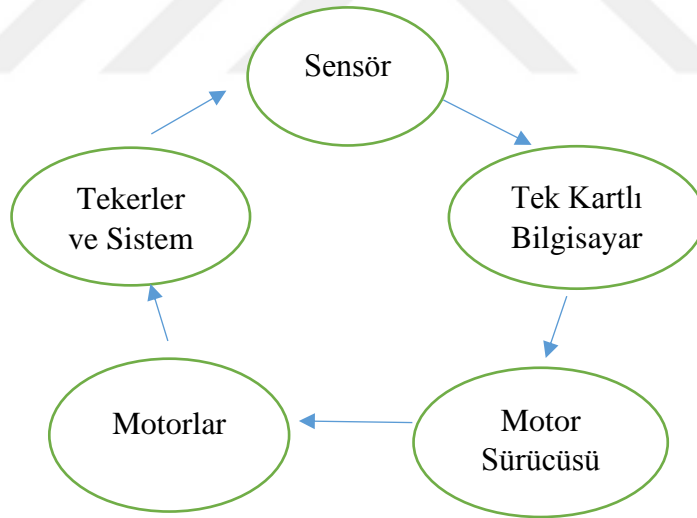


3. SİSTEMİN YAPISAL TASARIMI

3.1. Üzerine İnsanın Binebileceği Fiziksel Modelin Oluşturulması

Bu bölümde tasarlamak istediğimiz iki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemin hangi parçalardan oluştuğuna değinilmiştir. İki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistem mekanik ve elektronik parçalardan oluşan mekatronik bir sistemdir. Yapısında motorlar, motor sürücüsü, piller, sensörler, kontrol cihazları bulunmaktadır.

Sistemin çalışma mantığı Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Sensörler sistem bilgilerini değerlendirir ve bu bilgileri tek kartlı bilgisayara gönderir. Veriler tek kartlı bilgisayarda işlendikten sonra motorları harekete geçirmek için motor sürücüsü bir sinyal üretir. Üretilen bu sinyal, motorları ve tekerlekleri harekete geçirir.

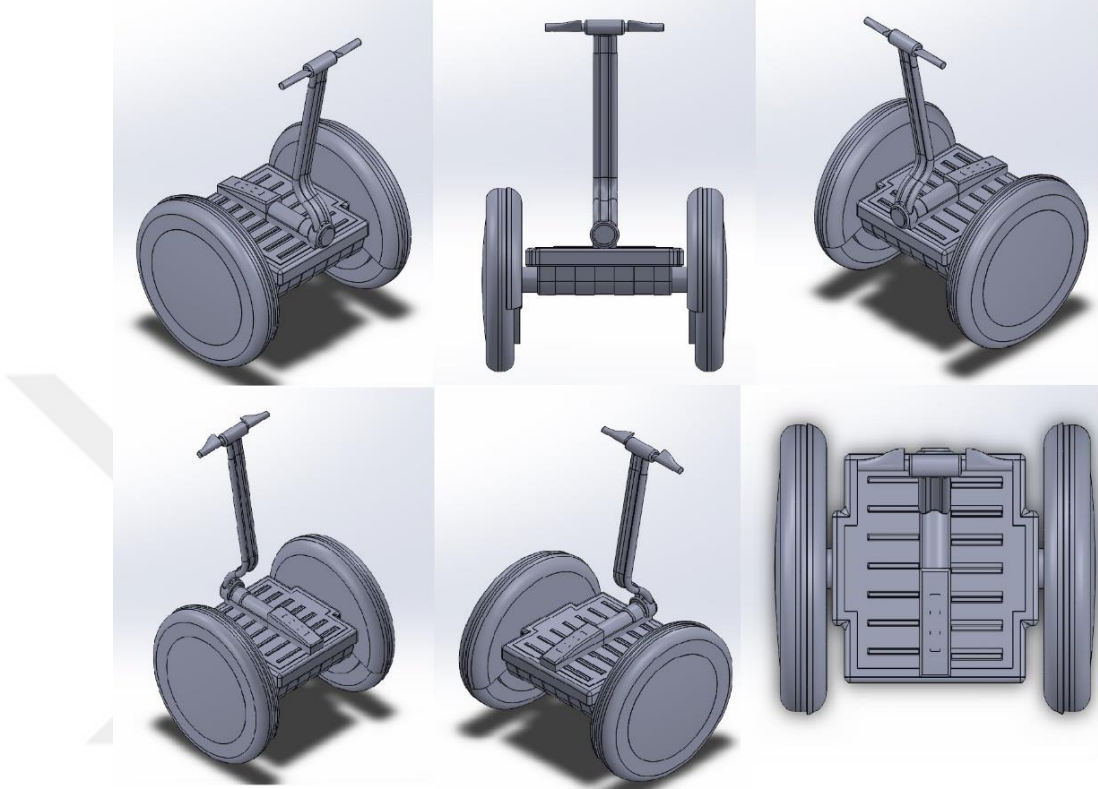


Şekil 3.1. Sistem çalışma mantığı

3.1.1. Mekanik yapı

İnsanın binebileceği boyutlardaki sistemin tasarımı Solidworks ortamında yapılmıştır. Solidworks ortamında elde edilen 3D tasarım görünümü Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Üzerinde insanın durabileceği alt parça alüminyumdan ve tekerleklerin üzeri saç malzemeden olacak şekilde tasarlanmıştır. Gövde yüksekliği yerden yaklaşık 100 mm

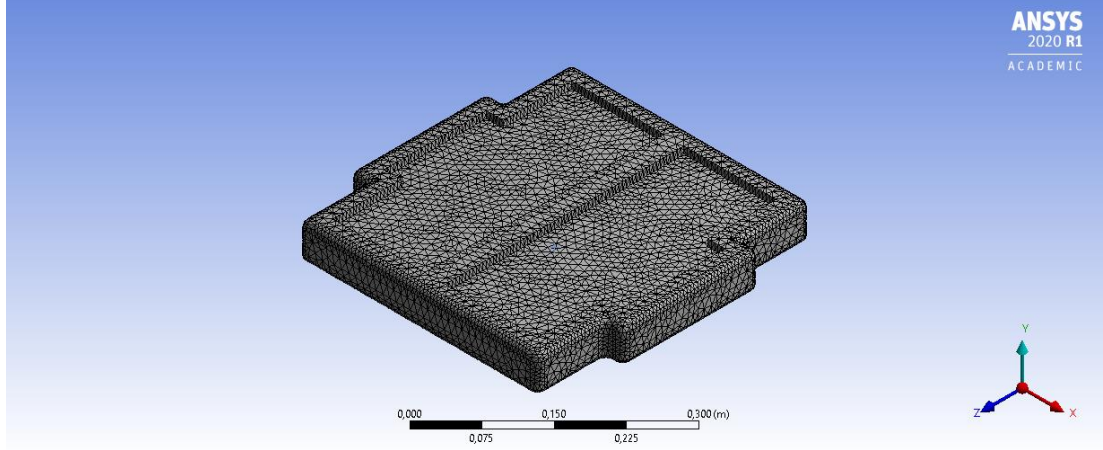
olacak şekilde tasarım ve tekerlek seçimi yapılmıştır. Sistemin toplam kütlesi 20 kg olarak Solidworks ortamında hesaplanmıştır. Ayrıca motorlardan gelen tahriğin tekerleklere iletilmesi için redüktör kullanılması düşünülmüştür.



Şekil 3.2. Tasarımı yapılan iki tekerlekli robotik sistem

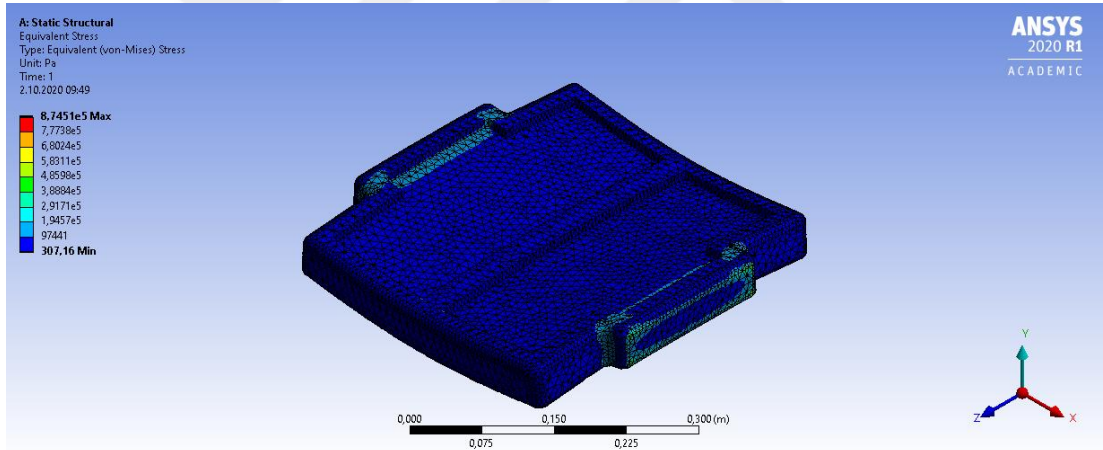
İnsanın üzerinde duracağı alt parçanın 20 mm kalınlığa, 400 mm genişliğe ve 500 mm uzunluğa sahip 7075 serisi alüminyum malzemenin imal edileceği düşünülmüştür. Alüminyum 7075 serisi diğer alüminyum serilerine göre daha sert ve dayanıklıdır. Bu yüzden 7075 serisi kullanılması planlanmıştır. Alüminyum malzemenin 80 kg ağırlığa sahip insan tarafından total deformasyona uğrayıp uğramadığını görebilmek için Ansys analiz programından yararlanılmıştır. Bu sonuçların rahat görülebilmesi için 27000 ölçekte büyütüldü.

Şekil 3.3'te 49318 eleman kullanılarak bölünen alüminyum malzemenin mesh yapısı gösterilmiştir. 85195 tane düğüm kullanılmıştır. Ortalama eleman boyu 5 mm'dir. Quad-three mesh yapısına sahiptir.



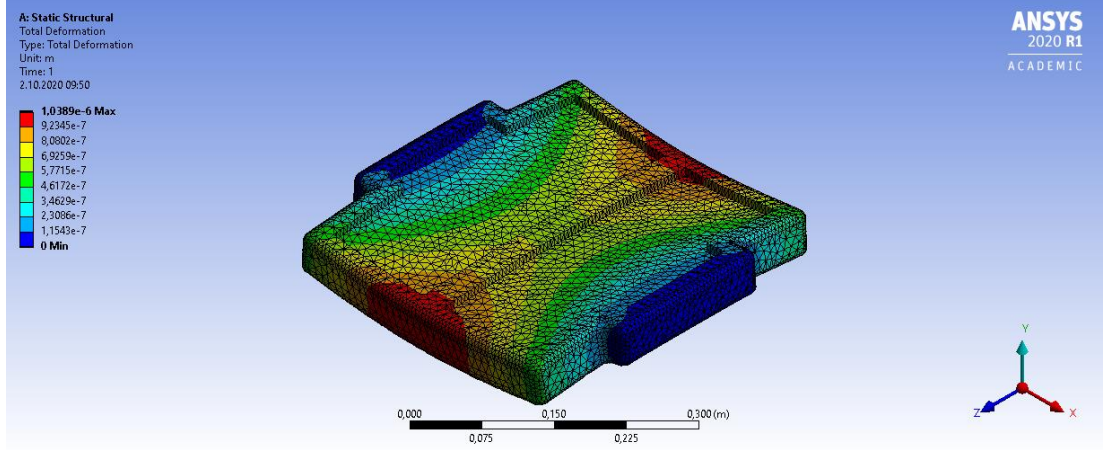
Şekil 3.3. Mesh yapısı

Şekil 3.4'te alüminyum malzemeye etki eden eşdeğer stres değerleri gösterilmiştir. Bu parçaya etki eden minimum stres 0,307 KPa maksimum stres ise 870 KPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.4. Eşdeğer stres

Alüminyum parçanın total deformasyon analizi Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Parçanın minimum deformasyonu motor bağlantı yerlerinde 0 değerini almıştır. Maksimum deformasyon orta noktanın uç kısımlarında $1,03 \cdot 10^{-6}$ m olarak analiz edilmiştir. Şekil 3.5'te kırmızı ile gösterilen bölgelerde maksimum deformasyon oluşmaktadır. Ancak çok ufak olduğu için alüminyum malzemede kalıcı değişime yol açmamıştır.



Şekil 3.5. Total deformasyon

Sistemin sola, sağa ve ileri, geri hareketini yönetmesi için yönlteç kullanılmıştır. Bu yönlteç 40 mm dış çapa 1.5 mm et kalınlığına ve 1 m uzunluğa sahip alüminyum borudan yapılması planlanmıştır. Yönltecin alüminyum plakaya bağlanması P238 numara ile adlandırılan küre bilyalı yatakla sağlanacaktır.

Bu sistemin tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Bu hususların en önemlisi; sistemin ağırlık merkezinin X ve Y koordinat merkezine olabildiğince yakın olmasıdır. Eğer bu ağırlık merkezi X ve Y koordinat merkezinden uzakta olduğu zaman sistemi bu yönlere doğru eğecektir. Bu da sistemin kafa sallaması diye tabir edilen hata yapmasına yol açacaktır. Ayrıca sistemin kendini daha çabuk dengeye getirebilmesi için ağırlık merkezinin Z koordinatı olabildiğince yukarıda olmalıdır.

Robotun tasarımı sırasında sensörler, motorlar, motor sürücüler ve mikrodnetleyici kartları da modellenmesi gerekmektedir. Sistemin tasarımında tüm ekipmanların kolay montajı düşünülmüştür ve tüm ekipmanların montajı alt plakaya yapılmıştır. Sistemin ağırlık merkezi önemli olduğu için bileşenlerin simetrik olarak yerleştirilmesi düşünülmüştür.

3.1.2. Seçilen motor ve sürücü özellikleri

İki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemlerde doğru DC motor seçimi oldukça önemlidir. Çünkü mikrodnetleyiciden DC motor sürücüsüne gönderilen sinyal doğru olsa bile motorlar istenilen devirde ve torkta çalışmıyorsa robotu

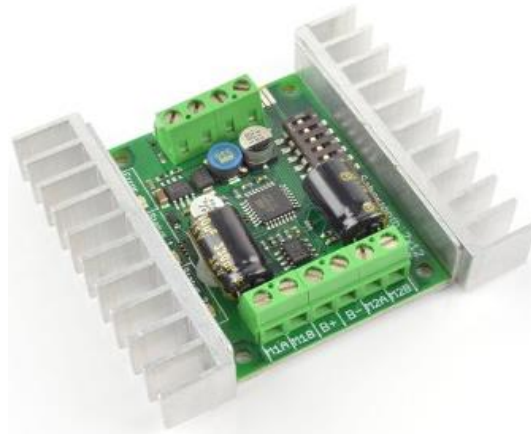
dengelemek oldukça zor olabilir. Denklem (2.63)'ten elde edilen tork değerine göre Şekil 3.6'da gösterilen Bobet marka kendinden redüktörlü fırçalı doğru akım motoru seçilmiştir.



Şekil 3.6. Kendinden redüktörlü fırçalı DC motorlar [32]

Şekil 3.6'da gösterilen kendinden redüktörlü fırçalı DC motorlar 500 watt, 24 volt ve dakikada en fazla 1800 devir hıza sahiptir. En fazla 25 amper akım sağlar. Yük altındaki çıkış torku 100 Nm'dir. Redüktörleri kullanmamızın amacı, şaft hızını düşürürken torku arttırmaktır.

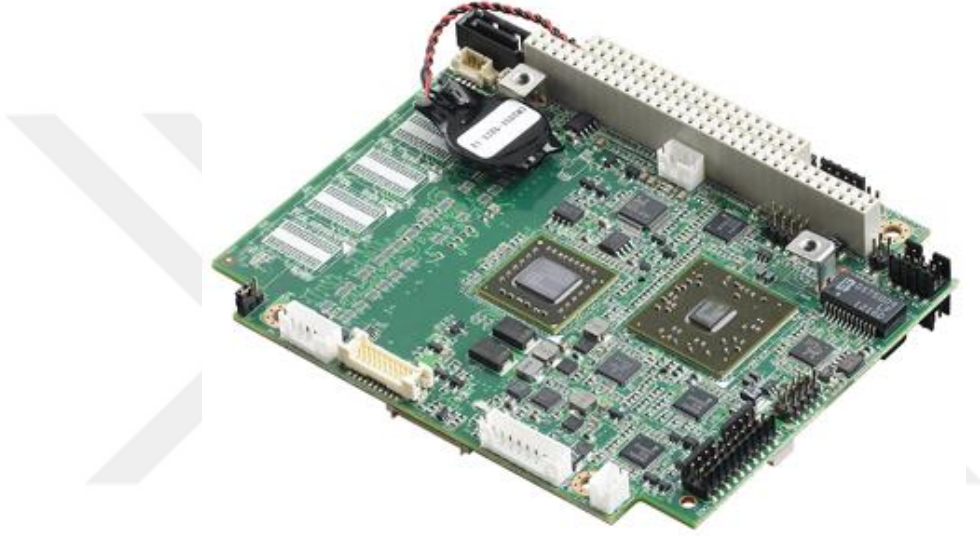
DC motorlardan yüksek tork elde edebilmek için motorlara gönderilen akımların kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu kontrol motor sürücüsü tarafından sağlanmaktadır. Şekil 3.7'de gösterilen Sabertooth motor sürücüsü 25 amper akımı sağlayabilecek özelliğe sahip piyasadaki en ucuz ve oldukça verimli çift motorlu sürücülerden biridir. En az 6 volt en fazla 30 volt gerilim ile çalışabilmektedir. Motorların fazla akım çekeceği durumlarda en fazla 50 amper akım sağlayabilmektedir.



Şekil 3.7. Sabertooth motor sürücüsü [33]

3.1.3. Elektronik ekipmanlar ve özellikleri

İki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemin sorunsuz bir şekilde çalışabilmesi ve kolay kullanılabilmesi için Advantech tek kartlı denetleyicisi kullanılması düşünülmüştür. Bu anakart hem tek başına hem de çevresindeki elektronik ekipmanlarla birlikte çalışabilmektedir. Veri toplama işlemi tek bir kart üzerinden yapıldığı için boyut, ağırlık, güç tüketimi ve maliyet açısından oldukça avantaj sağlamaktadır.



Şekil 3.8. Advantech tek kartlı denetleyicisi [34]

Şekil 3.8’de gösterilen Advantech marka denetleyicisi AMD işlemci 615 MHz’de çalışır. Veri toplama 18 bit analog giriş, 14 bit analog çıkış ve 30 adet programlanabilir dijital giriş ve çıkış ile sağlanır. Güç girişi, usb girişi ve reset butonu bulunmaktadır. Bu elektronik ekipmanın çalışabilmesi için 12 volt DC güç kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. C programlamaya benzeyen denetleyici açık kaynaklı kod yazılımı kullanmaktadır.

İki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemlerde sistem yanıtları sensörler tarafından algılanır. Bu sistemlerin dengede durmasını sağlamak için eğim açısının sabitlenmesi gerekmektedir. Bu eğim açısını sabitleyebilmek, Euler açılarını ve açısal hızı ölçebilmek için IMU (Inertial Measurement Unit) sensör kullanılması gerekmektedir. Bu sistem için Şekil 3.9’da gösterilen Lpms marka sensör kullanılması düşünülmüştür.



Şekil 3.9. LPMS IMU sensör [35]

Dinamik ve statik ortamlarda 3 eksenle açısal hız ölçümü yapan jiroskop, 3 eksenle ivme ölçümü yapan DC ivmeölçer ve 3 eksenle ölçüm yapan magnetometreye sahiptir. IMU bilgisayarlara RS 232 üzerinden bağlanır.

Sistemi dengeleyebilmek için gereken güç, Şekil 3.10'da gösterilen 2 adet 12 volt seri bağlanmış akü ile sağlanması düşünülmüştür. Motor sürücüsüne 24 volt doğrudan uygulanması planlanmıştır. Motorlar aşırı yükte çalışırken iki tahrik motoru için bol miktarda akım sağlayabilecek şekilde seçileceklerdir.



Şekil 3.10. Akü [36]

3.1.4. Maliyet tablosu

İnsanın binebileceği gerçek boyutlarda tasarımı oluşturulan sistemin Tablo 3.1’de maliyet analizi yapılmıştır.

Tablo 3.1. Maliyet tablosu

	Marka	Adet	Fiyat
Mikroişlemci	Advantech	1	2700 TL
Atalet Ölçü Sensör (IMU)	Lpms Imu	1	2500 TL
Motor	Bobet	2	2200 TL
Motor Sürücüsü	Sabertooth	1	800 TL
Tekerlekler	Ø 300x50 Dolgu Teker	2	800 TL
Batarya	QSM	2	450 TL
İşçilik		1	5000 TL
		Toplam	14450 TL

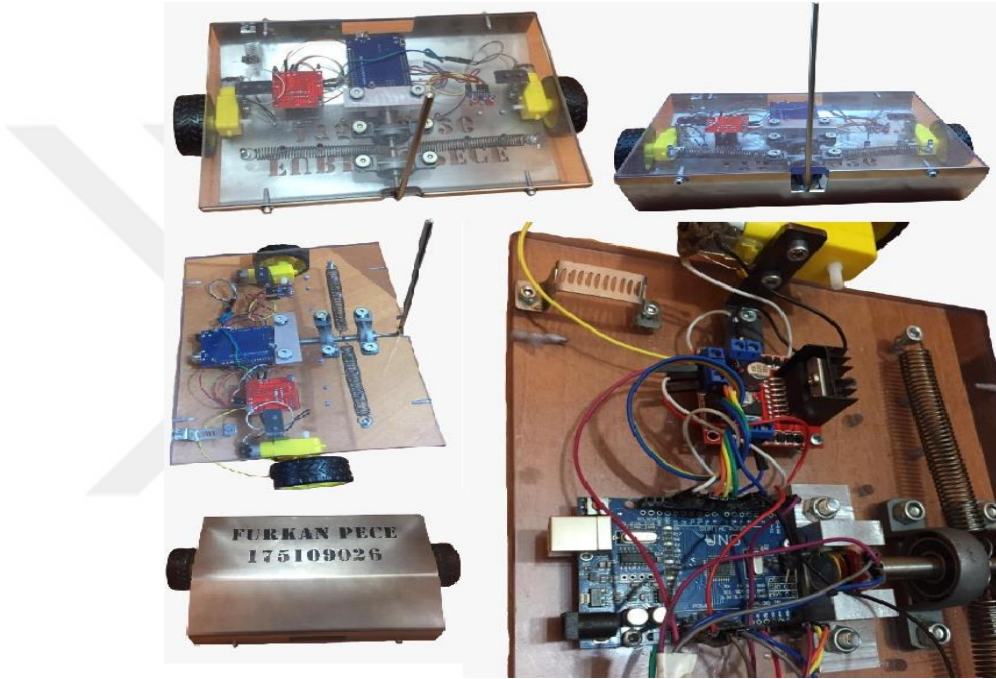
Maliyet analizin sonucunda tasarlanan sistemin üretilebilmesi için hesaplanan miktarın yüksek olmasından ve destek alınamamasından dolayı sistemin prototipinin yapılmasına karar verilmiştir. Prototipi yapılacak sistem, tasarlanan sistemde kullanılacak olan yöneltecin 1:5 oranında, tekerleklerin 1:3 oranında, alt plakanın yaklaşık 1:2 oranında küçültülmesiyle oluşturulmuştur.

3.2. Prototip Modelin Oluşturulması

Hazır sistemlerin pahalı olması sebebiyle bu sistemlerin daha uygun yollarla imal edilebilmesi için birçok araştırma yapılmıştır. Mikrokontrolcü olarak Arduino Uno anakartı, ivmeölçer sensörü ve motor sürücüsünün kullanılmasıyla tüm işlemler basit hale gelmiştir. İvmeölçer sensöründen alınan bilgiler Arduino ana kartında işlenerek

motor sürücülerine bilgi gönderir ve motorların tahriki sağlanır. Ön tarafında bulunan yönelteç sayesinde sistem sola ve sağa döner.

Sistemin hafif olması için mekanik parçalar makrolon malzemeden imal edilmiştir. Sağa ve sola hareketi sağlayan sarkaç sisteminin parçası kolay hareket edebilmesi ve dayanıklı olabilmesi için paslanmaz krom borudan imal edilmiştir. Çalışma kapsamında tasarlanan iki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistem toplam 3 kg ağırlığa sahiptir.



Şekil 3.11. İki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistem

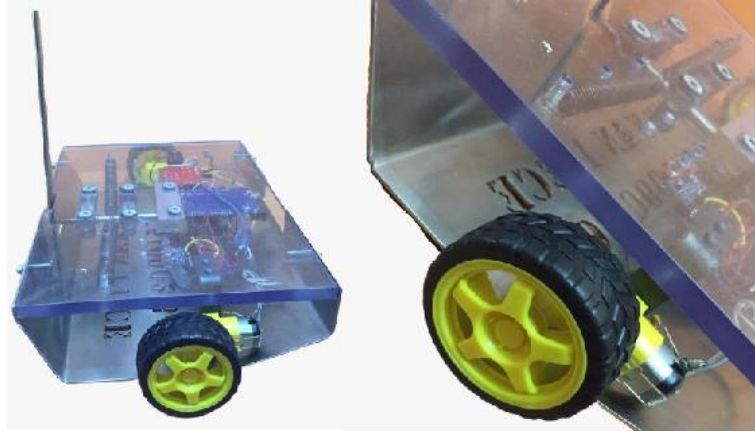
Şase Şekil 3.11’de gösterildiği gibi 10 mm kalınlığında 250 mm genişliğe 300 mm uzunluğa sahip olan makrolon malzemeden yapılmıştır. Makrolon malzeme şeffaf olması, darbe dayanımı yüksek olması, camdan daha hafif olmasından dolayı tercih edilmiştir. Tekerlekler dengeyi sağlayabilmek için makrolonun ortasından bağlanmıştır. Yönelteç Ø10 mm civa çeliğinden kaynaklı bir şekilde tasarlanmıştır. Yöneltecin makrolona bağlanması 2 adet P000 numara ile adlandırılan sabit küre bilyalı yataklarla sağlanmıştır.

3.2.1. Kullanılan motor ve sürücü özellikleri

Prototip üretimi için Şekil 3.12’de gösterilen DC motorlar kullanılmıştır. DC motorlar, sistemin ağırlığı ölçüldükten sonra bu ağırlığı kaldırabilecek torku üretebilen ve piyasada kolaylıkla bulunan motorlar arasından seçilmiştir. Seçilen DC motor parametreleri Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

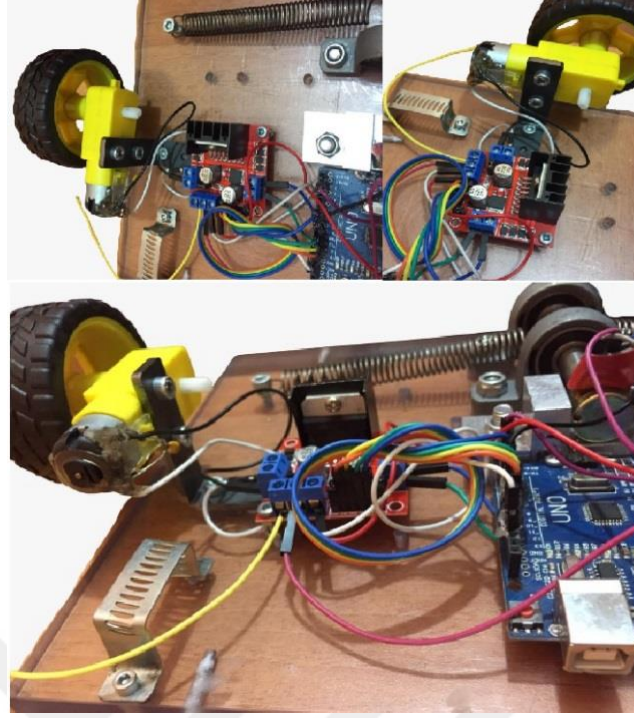
Tablo 3.2. DC motor parametreleri

Çalışma Gerilimi	3-12 V DC
Redüksiyon Oranı	1:48
Hız	250 rpm (@6V)
Akım	95mA-160mA
Ağırlık	29g
Tork	0.6Nm



Şekil 3.12. DC motor ve tekerlek

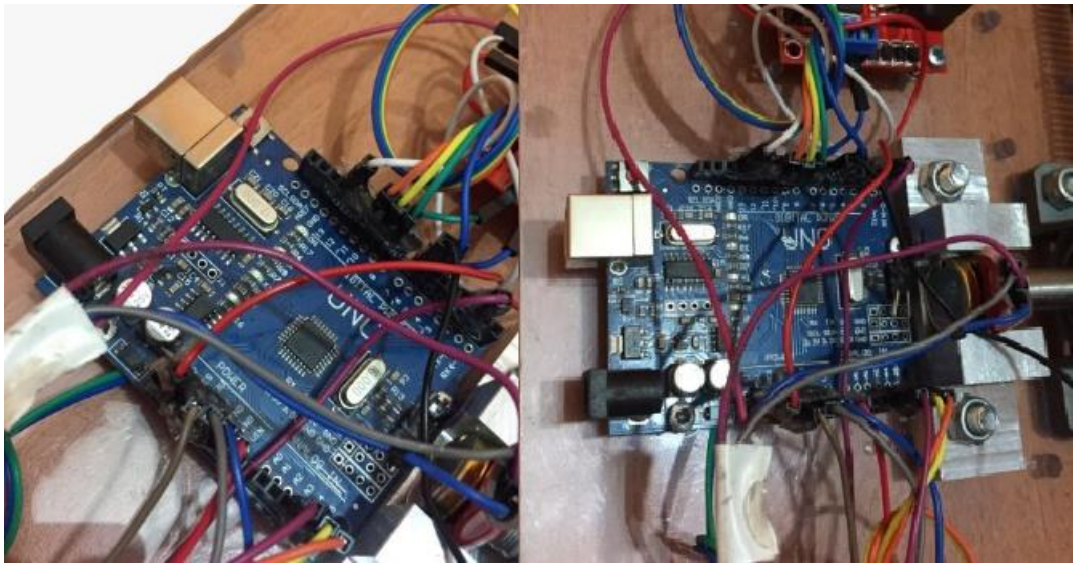
Prototipten yüksek tork elde edebilmek için motorlara gönderilen akımların kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu kontrol motor sürücüsü tarafından sağlanmaktadır. Şekil 3.13’te gösterilen L298N motor sürücüsü en az 25 amper akımı sağlayabilecek özelliğe sahip piyasadaki en ucuz ve oldukça verimli çift motorlu sürücülerden biridir. Üzerinde dahili regülatöre ve yüksek sıcaklıklara dayanabilmesi için dahili soğutucuya sahiptir.



Şekil 3.13. L298N motor sürücüsü

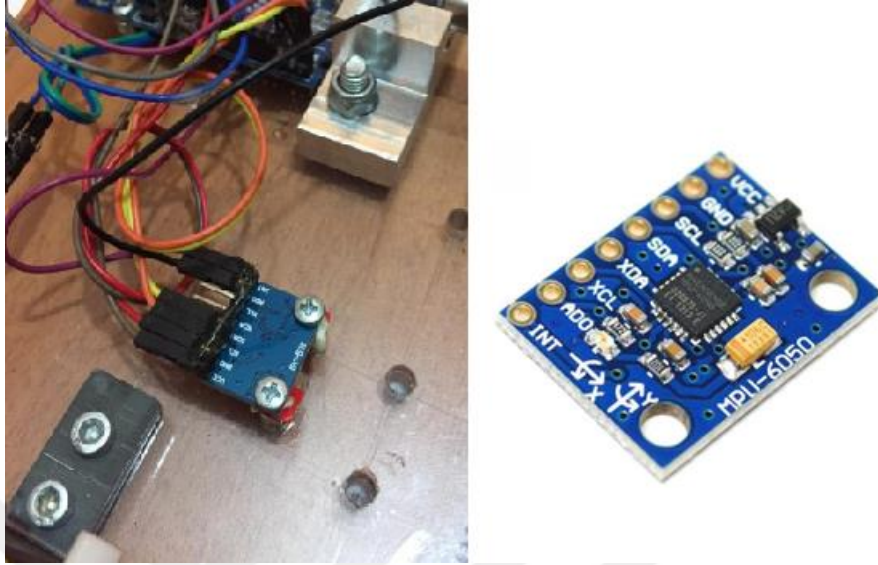
3.2.2. Elektronik ekipmanlar ve özellikleri

İki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemin sorunsuz bir şekilde çalışabilmesi için Arduino Uno anakartı kullanılmış olup sistemin beyni olarak görev almıştır. Şekil 3.14'te gösterilen Arduino sistemin verilerini işlemek ve buna göre gereken kararları almak için kullanılmıştır.



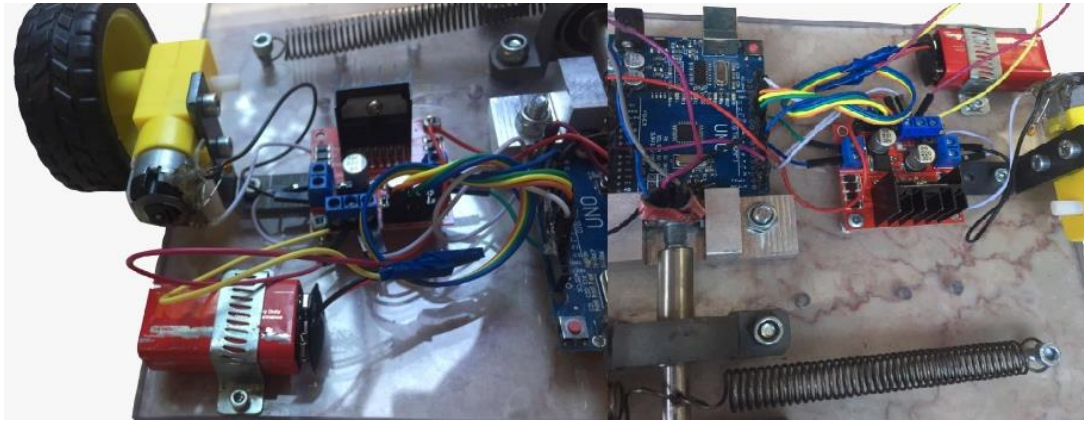
Şekil 3.14. Arduino uno anakartı

Ayrıca sistemin konum bilgisini alıp tekerleklere hareket vermesi için Şekil 3.15'te gösterilen MPU 6050 6 eksen ivme ve jiroskop sensörü kullanılmıştır.



Şekil 3.15. MPU 6050 sensör

Şekil 3.16'da gösterilen iki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sisteme hareket 9V pillerle sağlanmıştır.



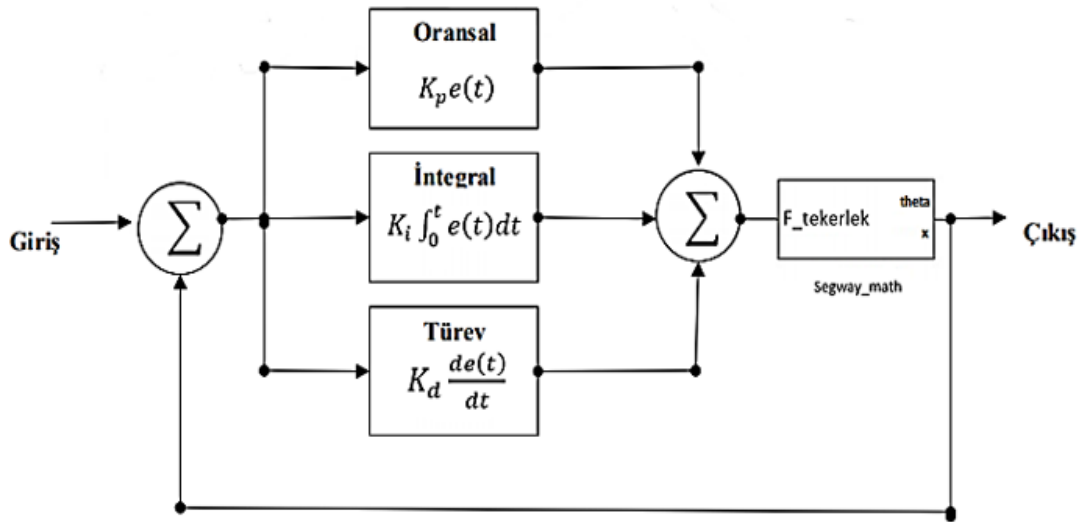
Şekil 3.16. Pil

4. KONTROL SİSTEMİ TASARIMI

Bu bölümde 3.Bölümde modellenen iki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemin kontrolü için, kontrol sistemlerinin tasarımı açıklanacaktır. Elde ettiğimiz hareket denklemlerini kullanarak PID ve bulanık mantık (Fuzzy Logic) kontrolcülerini Matlab Simulink yardımıyla incelenecektir. Üzerine insanın binebileceği sisteme PID kontrolcü, prototip modele PID ve bulanık mantık (Fuzzy Logic) kontrolcülerini uygulanacaktır.

4.1. PID Kontrolcü Tasarımı

3 modlu denetleyici olarak da ifade edilen PID denetleyicisi, oransal, türevsel ve integral yöntemlerinin bir araya gelmesiyle elde edilmektedir. Türev bileşeni genellikle hata sinyalini daha önceden tahmin etmek, salınımları azaltmak için kullanılırken integral bileşeni ise oransal ofseti azaltmak ve sıfırlamak için kullanılır. Kısaca, PID sistemin çıkışı ile referans değeri arasındaki hata farkının sıfır olmasını sağlamaktadır [4].



Şekil 4.1. PID kontrolcü tasarımı

PID algoritması denklem 4.1 ve 4.2’de gösterilmiştir.

$$U_t = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (4.1)$$

$$U_t = Ke(t) + \frac{K}{T_i} \int_0^t e(t) dt + KT_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.2)$$

K_p : Oransal Kazanç

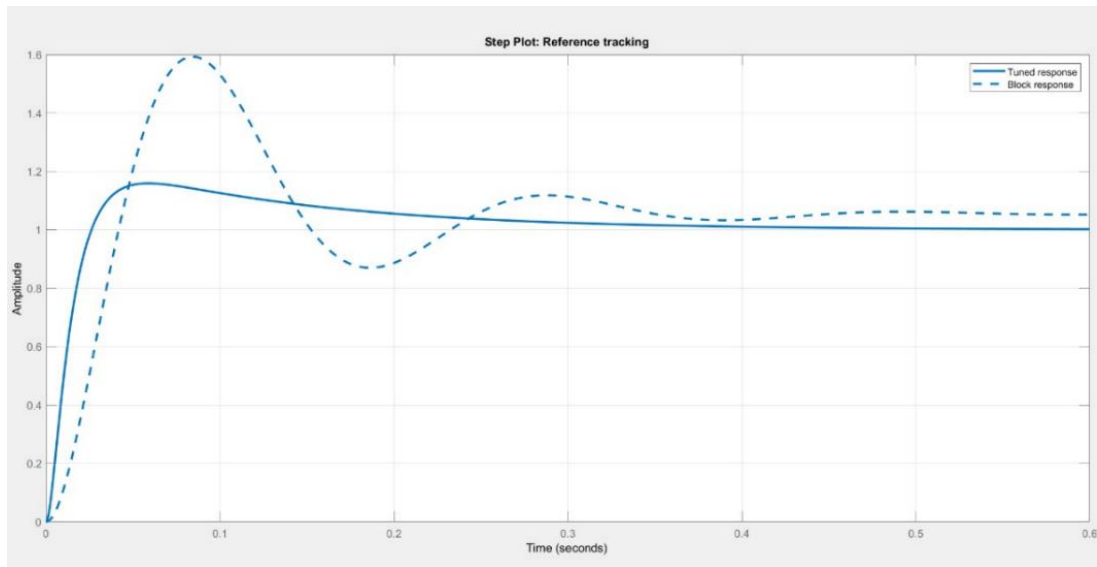
K_i : İntegral Kazancı

K_d : Türev Kazanç

PID denetim sisteminin transfer fonksiyonu denklem 4.3'deki gibidir.

$$TF = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (4.3)$$

K_p , K_i , K_d değerleri Matlab Simulink PID kontrolcünün içerisinde bulunan Tune kısmından hesaplanır. Şekil 4.2'de Tune kısmından sistemin tepki süresi ve geçici davranış değerleri ayarlanır. Bunun için sistemin tepki süresini ne kadar azaltırsak kalıcı duruma geçme süresi o kadar erken olur. Geçici davranış değeri ne kadar azalırsa sistemin tepe noktası da o kadar artar. Bu yüzden optimum tepki süresi ve geçici davranış değeri elde etmek gerekmektedir. Şekil 4.3'te üzerine insanın binebileceği tasarım için Şekil 4.4'te ise prototip model için PID kontrolcüsünün K_p , K_i , K_d değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Tune ekranı

Controller: PID Form: Parallel

Time domain:
 Continuous-time
 Discrete-time

Discrete-time settings
Sample time (-1 for inherited): -1

Compensator formula

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Main Initialization Output Saturation Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: internal

Proportional (P): 132.65

Integral (I): 0.085

Derivative (D): 2.82

Use filtered derivative

Filter coefficient (N): 100

Şekil 4.3. Üzerine insanın binebildiği tasarımın PID değerleri

Controller: PID Form: Parallel

Time domain:
 Continuous-time
 Discrete-time

Main PID Advanced Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: internal Compensator formula

Proportional (P): 64.8278434017893

Integral (I): 144.085158471237

Derivative (D): 6.10218853313438

Filter coefficient (N): 150

Select Tuning Method: Transfer Function Based (PID Tuner App) Tune...

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Initial conditions

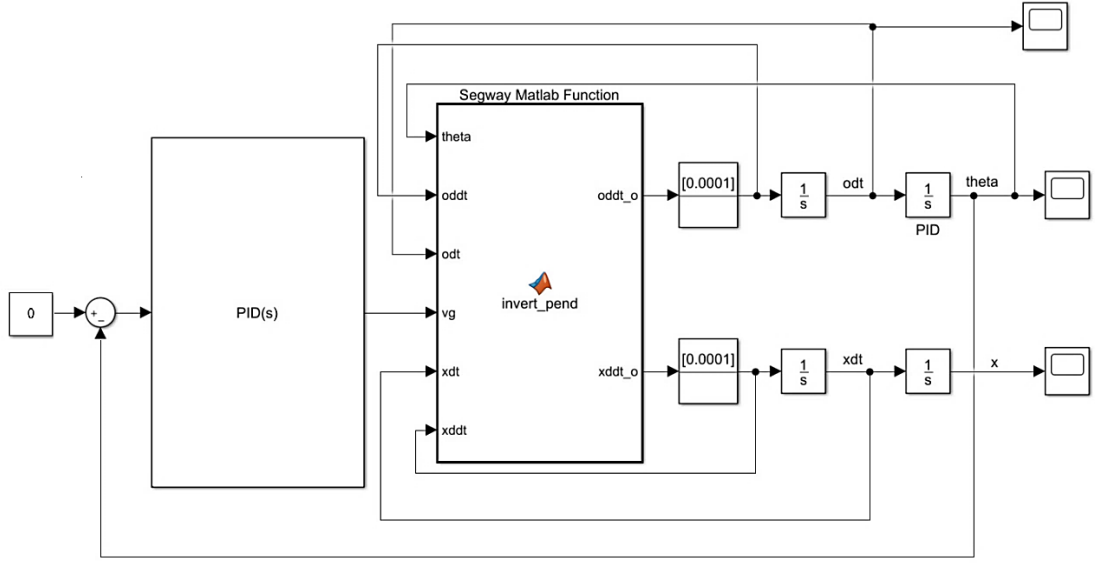
Source: internal

Integrator: 0

Filter: 0

Şekil 4.4. Prototip modelin PID değerleri

Elde edilen matematiksel modelin Matlab Simulink yardımıyla, PID kontrol yöntemiyle kontrol edilebilmesi için Şekil 4.4'te gösterilen kazanç değerleriyle birlikte Şekil 4.5'te gösterilen blok diyagramı kurulur.



Şekil 4.5. Lineer sistem için kapalı çevrim PID kontrolcü blok diyagramı

4.2. Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) Kontrolcü Tasarımı

Bulanık mantık (Fuzzy Logic) Prof. Lotfi A. Zadeh'in 1965 yılında yayınladığı makalelerle duyuldu. Bulanık mantığın denetim sistemlerine uygulanması ilk olarak 1974 yılında Mamdani tarafından gerçekleştirilmiştir [37,38].

Bulanık mantık, modelleme aşamasında kuralların ve değişkenlerin esnek bir şekilde belirlenmesidir. Sayısal verilerin sözel ifadelerinden yola çıkarak denetleyiciler arasında insanın düşünce yapısına yaklaşmayı sağlamıştır ve matematiksel verilerin bir araya gelmesiyle oluşan disiplin bütünüdür [38].

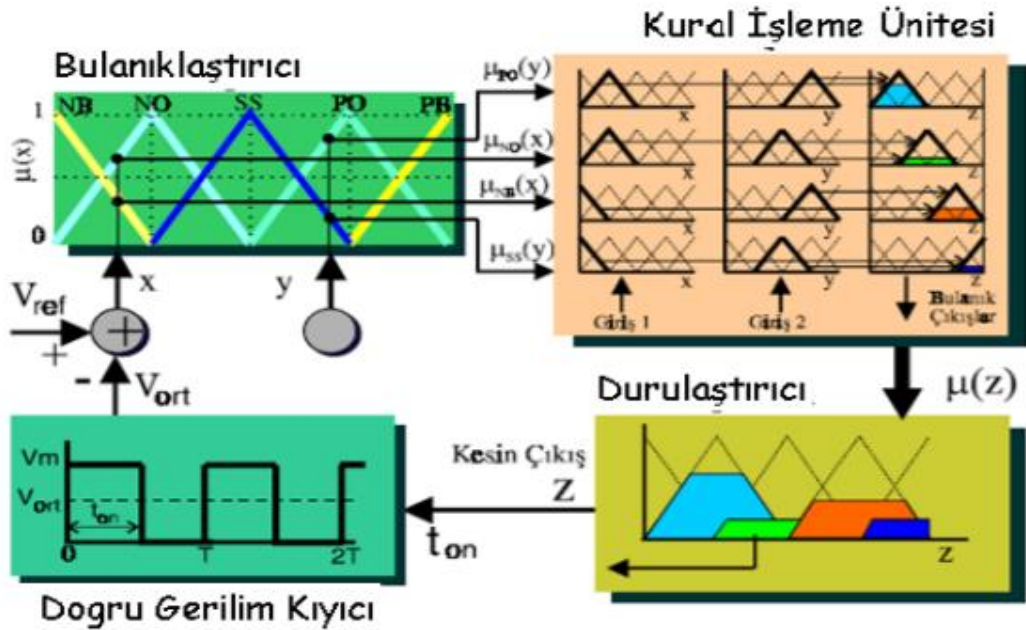
Bulanık mantık, bulanık küme kuramına dayanır. Klasik kümeler sisteminde 0 ve 1 değerlerini alırken bulanık mantık sisteminde 0 ve 1 olduğu gibi 0 ve 1 arasındaki değerler de vardır. Yani klasik küme sisteminde bir eleman bir kümeye ya tamamen aittir (1) ya da tamamen hariçtir (0). Bulanık mantık sisteminde ise bir eleman belirlenen derecelere göre birçok kümeye ait olabilmektedir. Örneğin, klasik kümeler sisteminde insan ya uzundur ya kısadır. Bulanık mantık sisteminde ise insan derecelerine göre 0.7 değeriyle uzun insanlar kümesine, 0.3 değeriyle kısa insanlar kümesine girebilmektedir. Burada önemli olan sayıların alt ve üst limitleri arasındaki değerleri NB (Negatif Büyük), NO (Negatif Orta), NK (Negatif Küçük), SS (Sıfır), PK (Pozitif Küçük), PO (Pozitif Orta) ve PB (Pozitif Büyük) gibi kümelerle kullanmaktır.

Bu değerler ve kurallar ters sarkaç tipli mobil robot için Yoo ve arkadaşları tarafından geliştirilip prototip modele Tablo 4.1.'de gösterilen kural tablosu uygulanmıştır [39].

Tablo 4.1. Fuzzy Logic Kontrolcüsü Kural Tablosu [39]

e_θ	e_θ						
	NB	NO	NK	SS-SR	PK	PO	PB
NB	NB	NB	NO	NO	NK	NK	SS
NO	NB	NO	NO	NK	NK	SS	PK
NK	NO	NO	NK	NK	SS	PK	PK
SS-SR	NO	NK	NK	SS	PK	PK	PO
PK	NK	NK	SS	PK	PK	PO	PO
PO	NK	SS	PK	PK	PO	PO	PB
PB	SS	PK	PK	PO	PO	PB	PB

Bulanık mantık sisteminin genel yapısı Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Oranlama ve Bulandırma kısımlarında tahmin edilen değerler bulanık mantık kümelerine dönüştürülür. Çıkarım kısmında ise kurallara dikkat edilerek sistem sonuçlarının bulanık mantıkla gösterimi sağlanır. Bu kurallar denetleticinin en önemli kısmıdır [38].

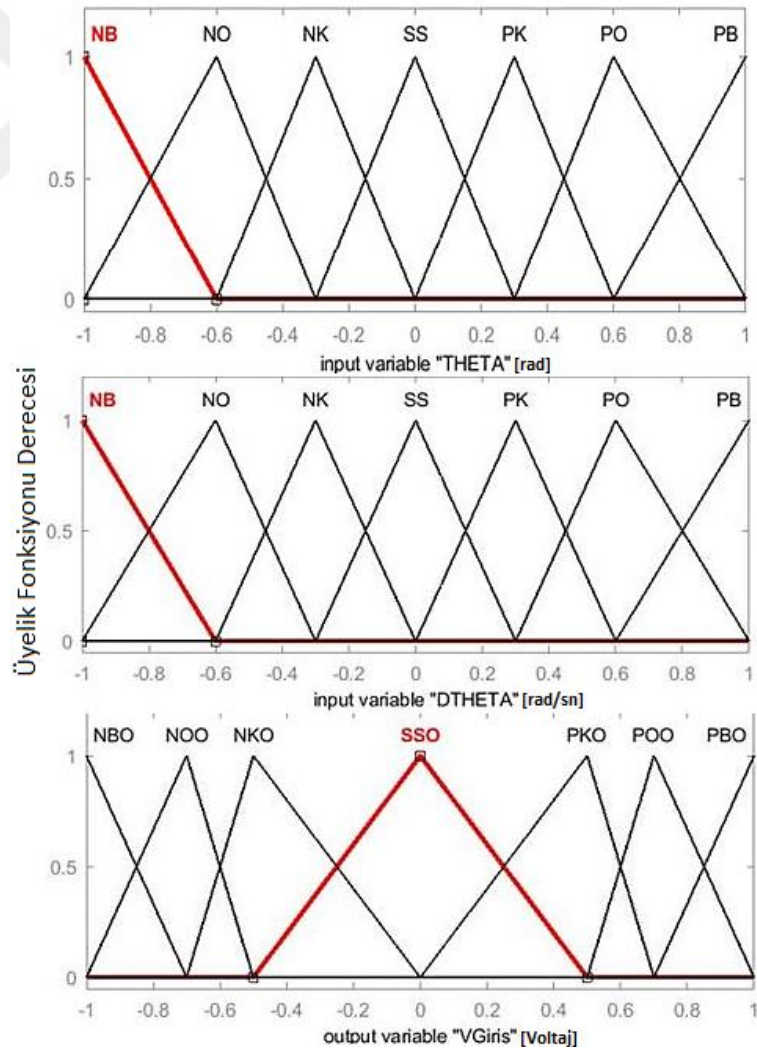


Şekil 4.6. Bulanık mantık kontrolcü genel yapısı [37]

Karmaşık sistemlerde kural kısmının doğru olabilmesi için yardımcı yöntemler kullanılabilir. Durulaştırıcı kısmında ise hangi kuralların nasıl birleştirileceği belirlenir. Son aşama olan oranlamada ise bu sonuçlar fiziksel değerlere çevrilerek uygun çarpanlarla oranlanır [38].

Bulanık mantık sisteminde, matematiksel modele ihtiyaç olmaması, insan düşünme tarzına en yakın kontrolcü olması, yazılımın kolay ve ucuz olması sistemin en büyük avantajlarıdır.

Yoo ve arkadaşları tarafından geliştirilen ters sarkaç tipli mobil robot için oluşturulan kural tablosu bulanık mantık kontrolcüye uygulanarak, girişler ve çıkış için 7 şer adet olmak üzere toplamda 21 adet üçgen üyelik fonksiyonu oluşmaktadır. Şekil 4.7'de girişler ve çıkış üyelik fonksiyonları gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Fuzzy logic kontrolcü üyelik fonksiyonları

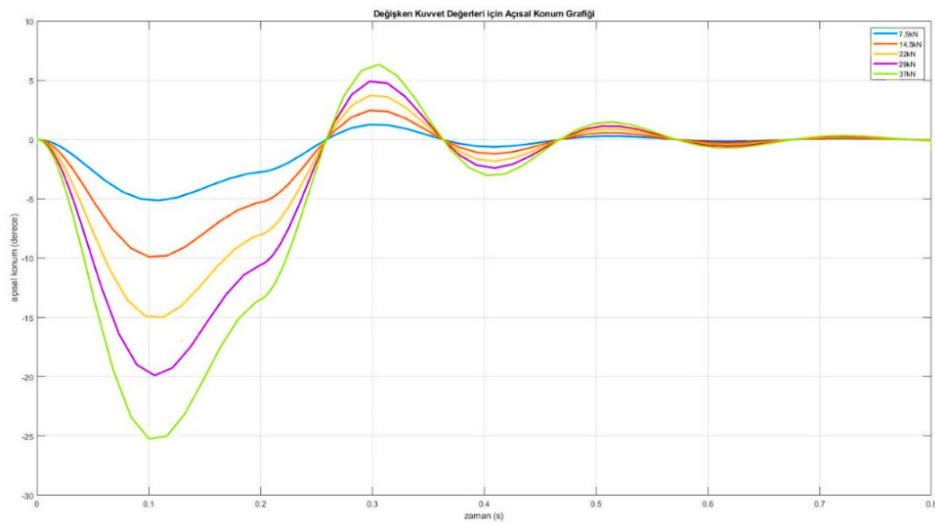
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, iki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemin matematiksel modeli ve lineer denklemleri, Lagrange yasaları ve Kirchhoff gerilimi kullanılarak elde edilmiştir. Solidworks ortamında insanın binebileceği iki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.1.'de maliyet analizi yapıldıktan sonra sistemin üretiminin bu koşullar altında gerçekleştirilemeyeceğine karar verilmiştir.

5.1. Üzerine İnsanın Binebileceği Robotik Sistem Çıktıları

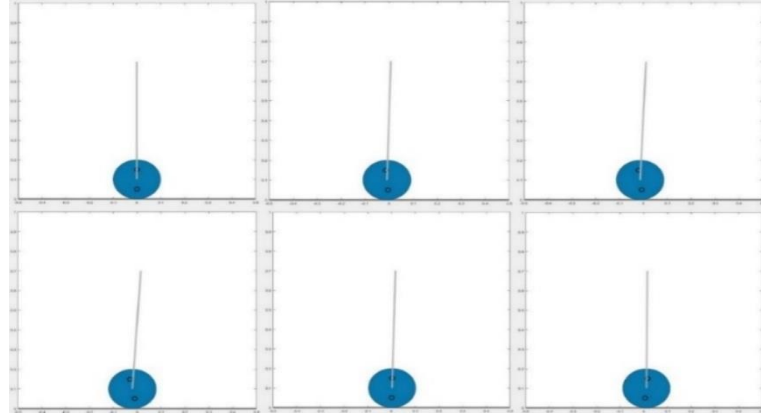
Üzerine insanın binebileceği sistemin ve denklemlerin doğruluğunu sağlayabilmek için Matlab Simulink programında PID kontrolcü ile birlikte sisteme 5 farklı giriş değerleri verilerek animasyon görüntüleri elde edilmiştir. Değişken kuvvet değerleri için açılma konum grafiği Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

Üzerine insanın binebileceği sisteme normal şartlarda insanın uygulayabileceği maksimum kuvvet 1 kN olarak belirlenmiştir. Ancak sisteme anlık (impule) olarak 1 kN'luk kuvvet uygulandığında sistem 0.6° açı salınımları yapmaktadır. Buda sistemin animasyon resimlerinde belli olmamaktadır. Bu yüzden sistemin doğru çalıştığını görebilmek için büyük kuvvetler uygulanmıştır.



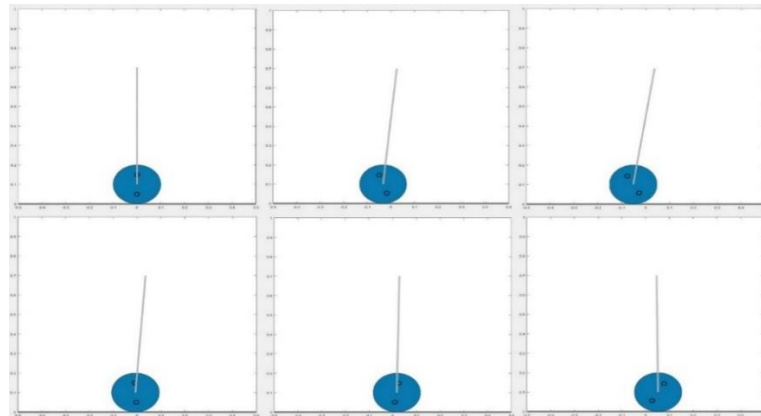
Şekil 5.1. Değişken kuvvet değerleri için açılma konum grafiği

Şekil 5.2’de sisteme 7.5 kN kuvvet uygulanmıştır. Bu kuvvet sonucunda sistem maksimum 5° açı salınımları yapmaktadır. Sistemin dengeye gelmesi için toplam yol aldığı mesafe 0,12 m’dir. Sistemin dengeye gelmesi için geçen toplam süre yaklaşık 0,55 sn’dir.



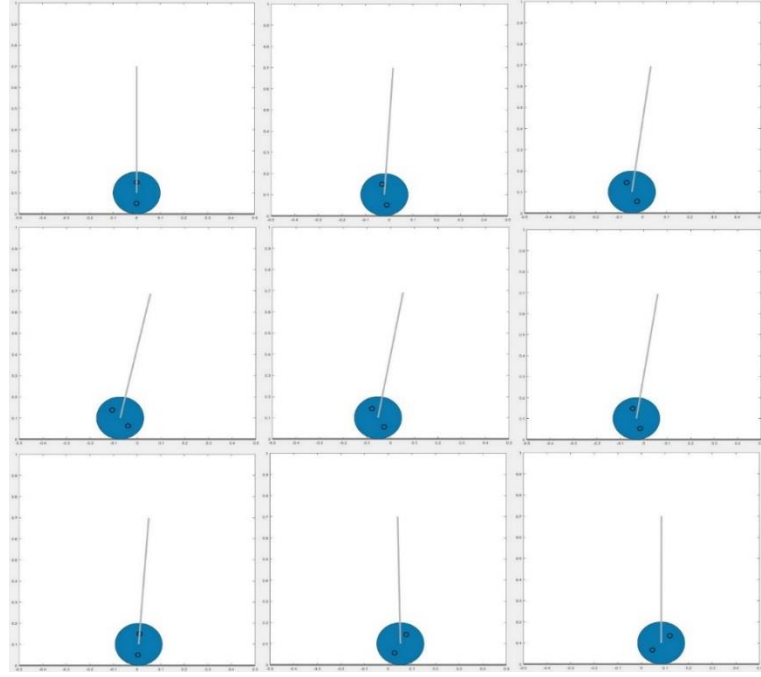
Şekil 5.2. 7.5 kN uygulandığında elde edilen animasyon

Şekil 5.3’te sisteme 14.5 kN kuvvet uygulanmıştır. Bu kuvvet sonucunda sistem maksimum 10° açı salınımları yapmaktadır. Sistemin dengeye gelmesi için toplam yol aldığı mesafe 0,24 m’dir. Sistemin dengeye gelmesi için geçen toplam süre yaklaşık 0,6 sn’dir.



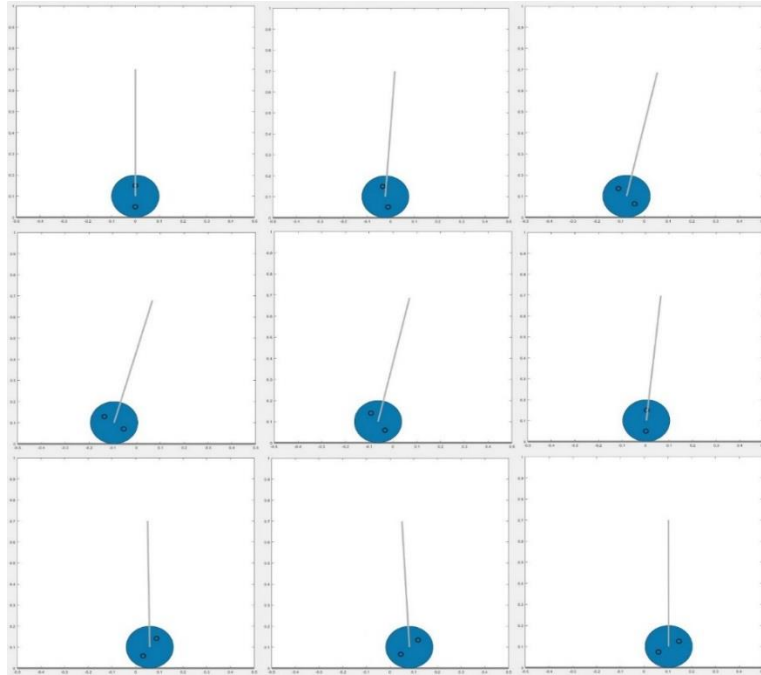
Şekil 5.3. 14.5 kN uygulandığında elde edilen animasyon

Şekil 5.4’te sisteme 22 kN kuvvet uygulanmıştır. Bu kuvvet sonucunda sistem maksimum 15° açı salınımları yapmaktadır. Sistemin dengeye gelmesi için toplam yol aldığı mesafe 0,35 m’dir. Sistemin dengeye gelmesi için geçen toplam süre yaklaşık 0,7 sn’dir.



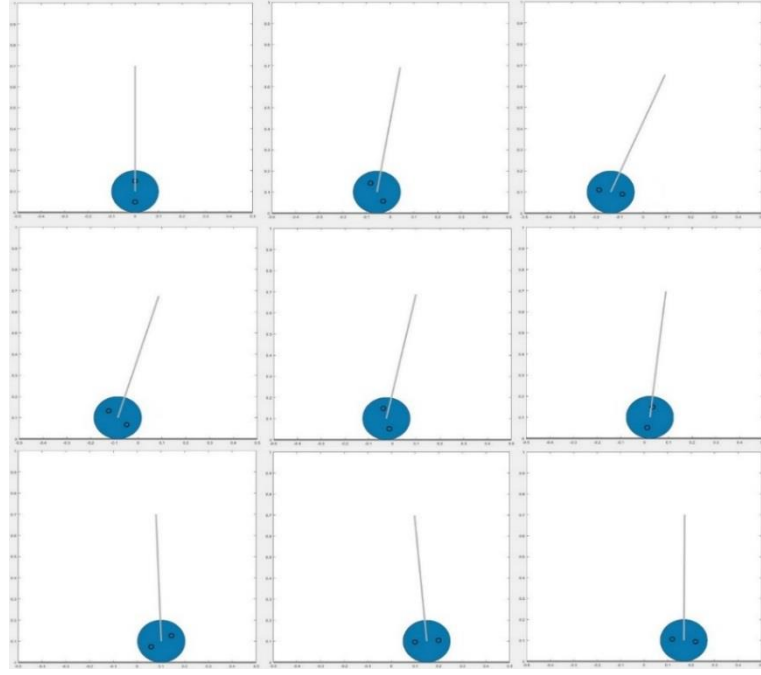
Şekil 5.4. 22 kN uygulandığında elde edilen animasyon

Şekil 5.5'te sisteme 29 kN kuvvet uygulanmıştır. Bu kuvvet sonucunda sistem maksimum 20° açı salınımları yapmaktadır. Sistemin dengeye gelmesi için toplam yol aldığı mesafe 0,4 m'dir. Sistemin dengeye gelmesi için geçen toplam süre yaklaşık 0,8 sn'dir.



Şekil 5.5. 29 kN uygulandığında elde edilen animasyon

Şekil 5.6'da sisteme 37 kN kuvvet uygulanmıştır. Bu kuvvet sonucunda sistem maksimum 25° açı salınımları yapmaktadır. Sistemin dengeye gelmesi için toplam yol aldığı mesafe 0,45 m'dir. Sistemin dengeye gelmesi için geçen toplam süre yaklaşık 1 sn'dir.



Şekil 5.6. 37 kN uygulandığında elde edilen animasyon

İnsanın binebileceği iki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemin tasarımı yapıldıktan sonra 5 farklı giriş değerleri verilmiştir. Bu giriş değerleri sonucunda sistem farklı çıkış değerleri göstermiştir. Bunlar;

Sisteme 7.5 kN giriş değeri verildiğinde maksimum 5° açı yapmıştır ve kendini dengeye getirebilmek için x ekseninde toplam 0,12 m yol almıştır.

Sisteme 14.5 kN giriş değeri verildiğinde maksimum 10° açı yapmıştır ve kendini dengeye getirebilmek için x ekseninde toplam 0,24 m yol almıştır.

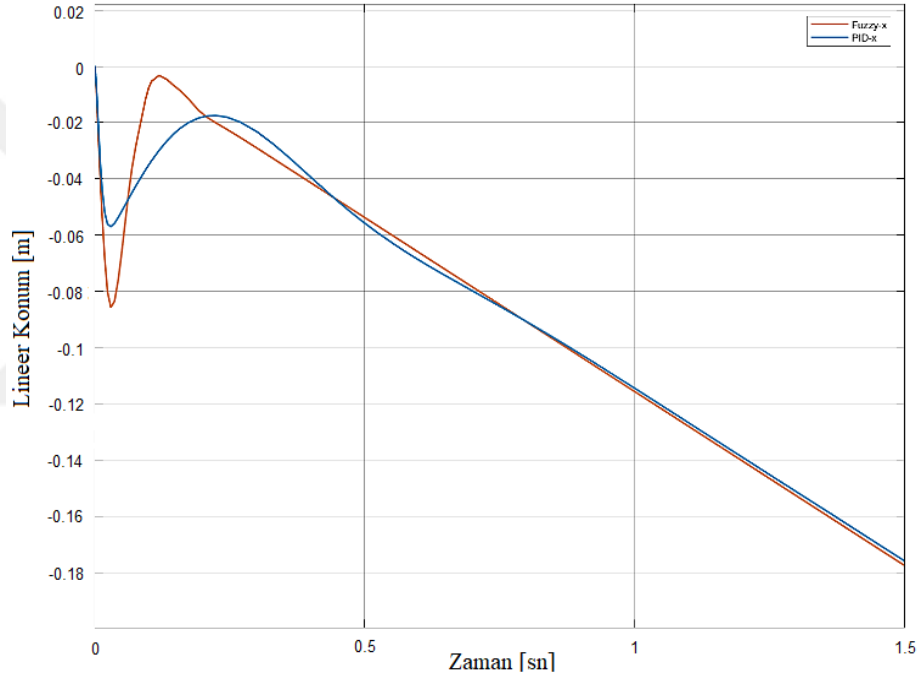
Sisteme 22 kN giriş değeri verildiğinde maksimum 15° açı yapmıştır ve kendini dengeye getirebilmek için x ekseninde toplam 0,35 m yol almıştır.

Sisteme 29 kN giriş değeri verildiğinde maksimum 20° açı yapmıştır ve kendini dengeye getirebilmek için x ekseninde toplam 0,4 m yol almıştır.

Sisteme 37 kN giriş değeri verildiğinde maksimum 25° açı yapmıştır ve kendini dengeye getirebilmek için x ekseninde toplam 0,45 m yol almıştır.

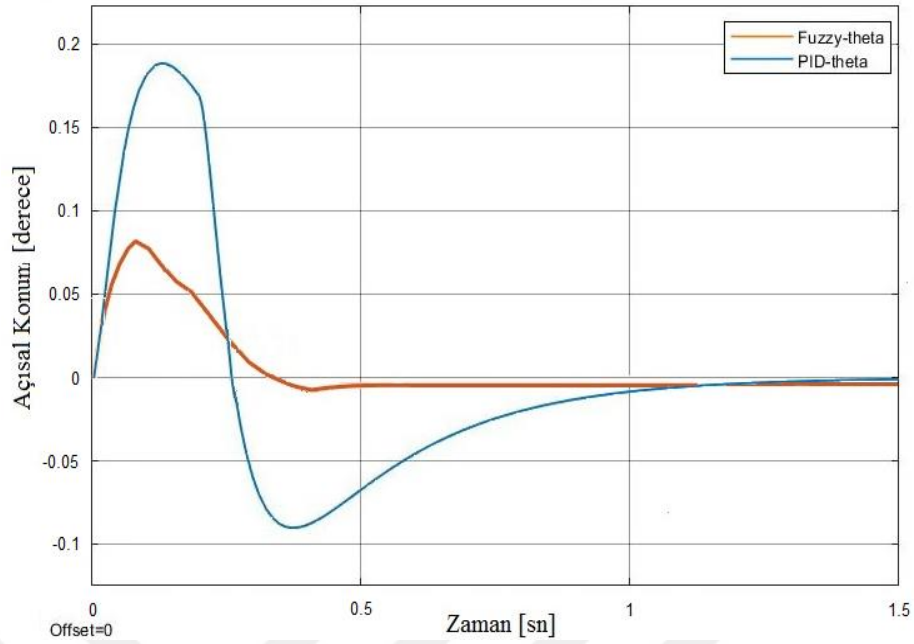
5.2. Prototip Model Çıktıları

Maliyetin yüksek olmasından dolayı prototip sistemin tasarımına karar verilmiştir. Bu tez çalışmasında sistemin elde edilen matematiksel modeline Matlab Simulink ortamında açı geri beslemesine sahip PID ve bulanık mantık kontrolcüsü uygulanmıştır. Her iki kontrolcü içinde sisteme 0.2 kN kuvvet uygulanmış ve elde edilen sonuçlar konum, zaman ve ivme grafikleri değerlendirilerek ele alınmıştır.



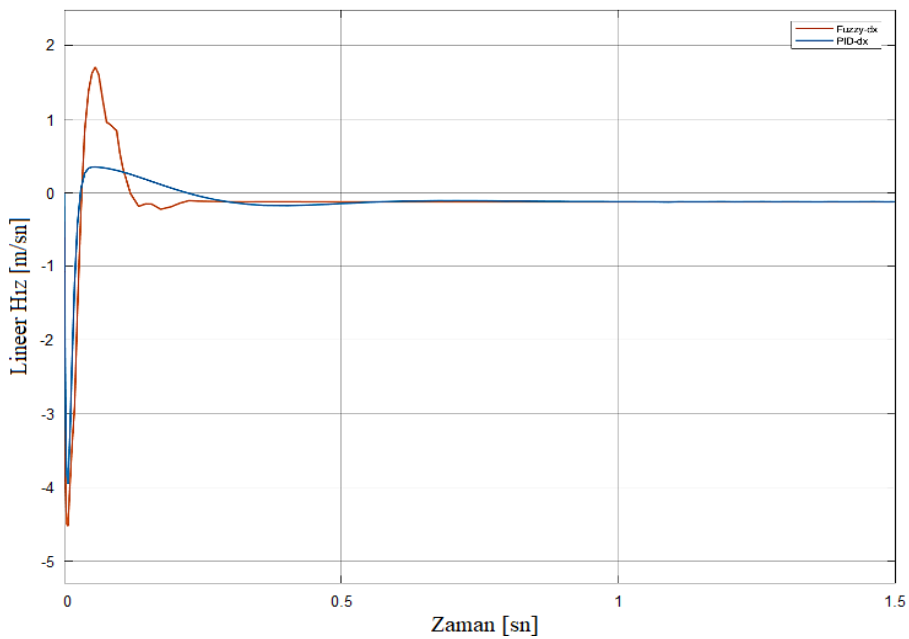
Şekil 5.7. PID – bulanık mantık lineer konum

Şekil 5.7’de sistemin PID ve bulanık mantık kontrolcü ile lineer konumundaki hareketinin sonucu gösterilmiştir; yani zaman arttıkça sonsuza yaklaşmakta olduğu görülmektedir. Bunun sebebi sisteme enerji verdiğimizde başlangıç noktasında sistem kendiliğinden dengede duramadığı için o anki konumundan düşmekte olduğu görülmektedir, fakat sistemi dengeye getirmek için gerekli şartlarda çalıştırıldığında sistemin konum değişimine daha doğru cevaplar verdiği görülmektedir.



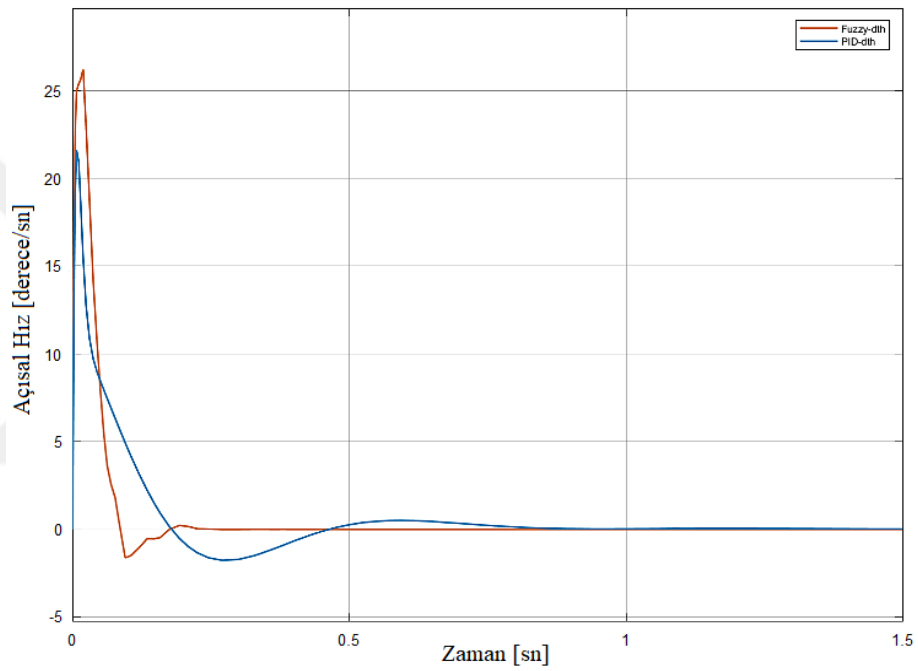
Şekil 5.8. PID – bulanık mantık açısız konum

Şekil 5.8’de sistemin PID ve bulanık mantık kontrolcü ile açısız konumundaki hareketinin sonucu gösterilmiştir. Bulanık mantık kontrolcüsünün 0.4 s’de sistemi denge pozisyonuna getirdiği ancak PID kontrolcüsünün bulanık mantık kontrolcüye göre 1.1 s geciktiği ve 0.2° açı salınımlarıyla kendini dengeye getirdiği gözlemlenmiştir. Şekil 5.8’de daha net bir şekilde fark edildiği üzere PID kontrolcü sisteminde daimî rejim hatasının olduğu ve yük altında titreme yapabileceği görülmektedir.



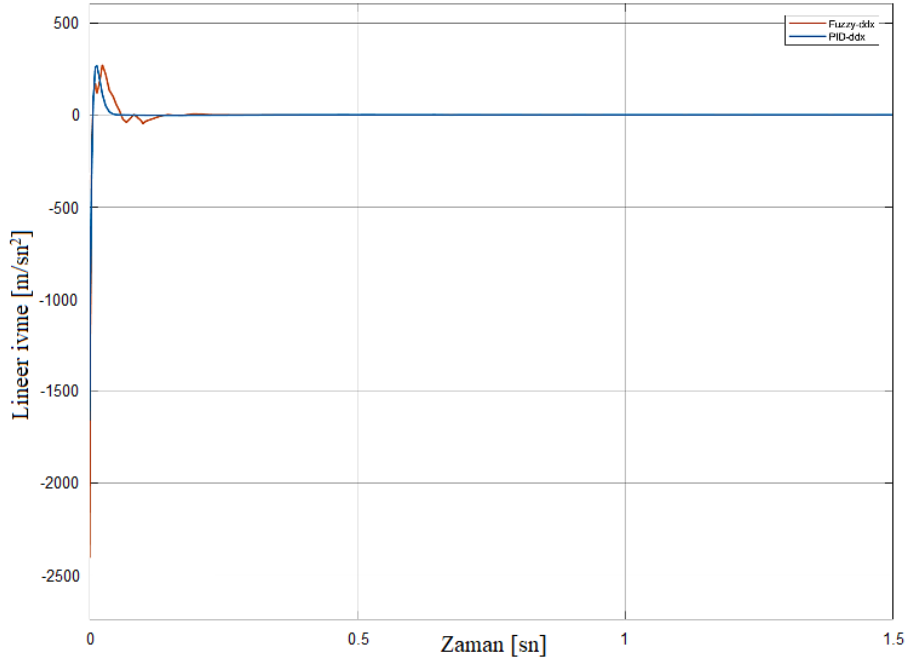
Şekil 5.9. PID – bulanık mantık lineer hız

Şekil 5.9’da sistemin PID ve bulanık mantık kontrolcü ile lineer hız grafiği gösterilmiştir. Bulanık mantık kontrolcünün tepe noktası PID kontrolcüye göre oldukça fazladır. Bu durumdan dolayı sistemi dengede tutabilmek için daha fazla enerji harcamak zorundadır. Her iki kontrolcüde de oturma zamanı ve yükselme zamanı aynı olduğu ama PID kontrolcünün kendini dengeye getirebilmesi için harcadığı enerji miktarının bulanık mantık kontrolcüye göre daha az olduğu Şekil 5.9’da görülmektedir. Böylelikle ani hareketlenme gibi durumlarda PID kontrolcüsü tercih edilir.



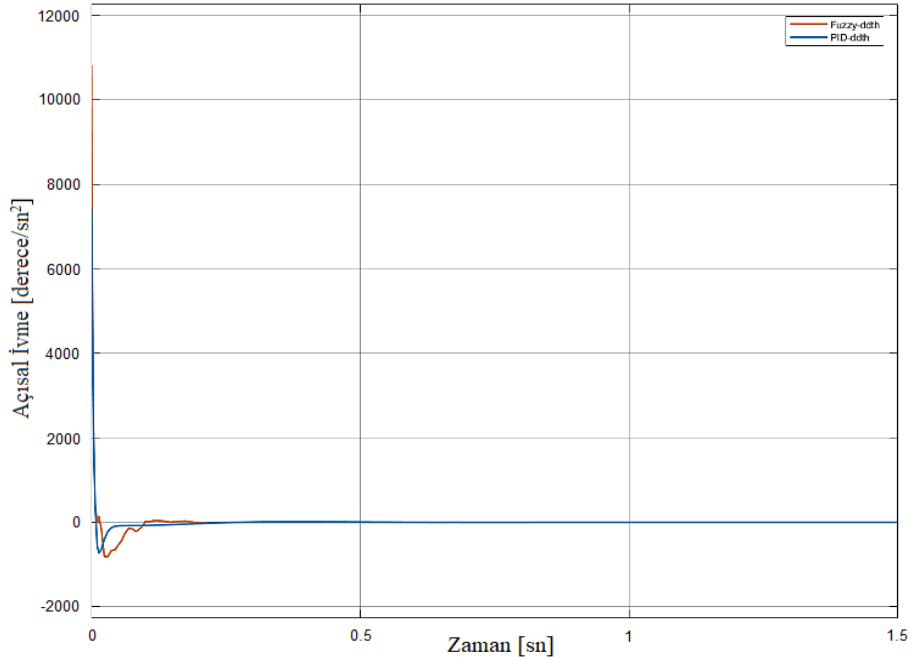
Şekil 5.10. PID – bulanık mantık açısal hız

Yukarıda gösterilen Şekil 5.10’da sistemin PID ve bulanık mantık kontrolcü için elde edilen açısal hız grafiği gösterilmiştir. PID kontrolcü ile bulanık mantık kontrolcünün tepe noktalarının farklı olduğu, öte yandan PID ve bulanık mantık kontrolcünün yükselme zamanının birbirleriyle hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Ancak bulanık mantık kontrolcünün oturma zamanı 0.3 s iken PID kontrolcünün oturma zamanı 1 s’leri bulmaktadır. Şekil 5.10’dan anlaşıldığı üzere yüksek hızlarda bulanık mantık kontrolcüsü PID kontrolcüye göre daha iyi performans göstermektedir.



Şekil 5.11. PID – bulanık mantık lineer ivme

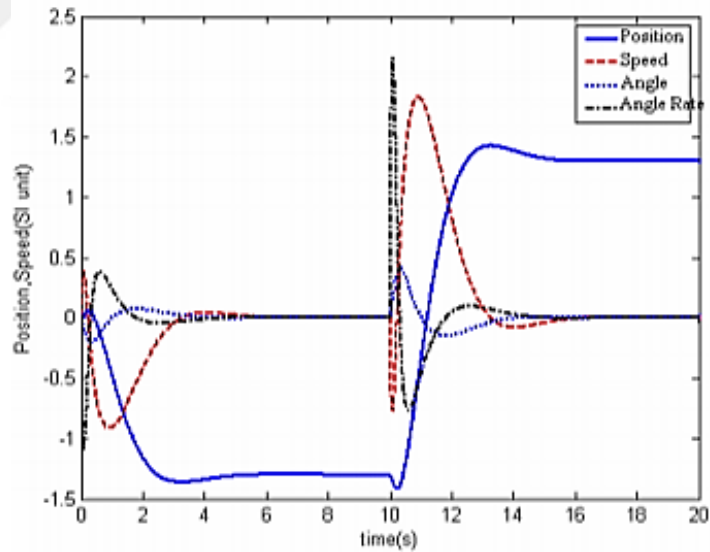
Şekil 5.11’de sistemin PID ve bulanık mantık kontrolcü ile lineer ivme grafiği gösterilmiştir. Her iki kontrolcüde de tepe noktalarının, yükselme zamanlarının ve oturma zamanlarının aynı olduğu gözlemlenmiştir; ancak tepe noktalarının çok yüksek değerlere sahip olması ani ivmelenmelerden dolayı sistemin çok fazla enerji harcamasına neden olmaktadır.



Şekil 5.12. PID – bulanık mantık açısal ivme

Şekil 5.12’de sistemin PID ve bulanık mantık kontrolcü ile açısız ivme grafiği gösterilmiştir. Her iki kontrolcüde de tepe noktalarının, yükselme zamanlarının ve oturma zamanlarının aynı olduğu gözlemlenmiştir. Açısız ivmenin daha fazla olması sistemin yavaşlamalarında ve hızlanmalarında oldukça önemlidir ancak ivmenin çok yüksek olması sistemi kazaya götürebilir. Bu yüzden optimal olması istenmiştir.

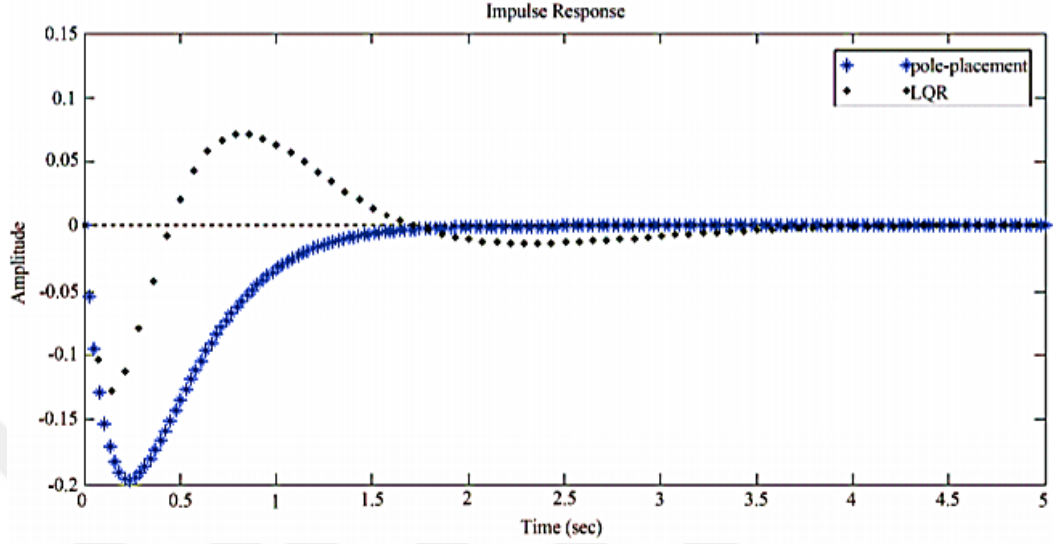
2007 yılında Nawawi ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, tasarladıkları Twip isimli iki tekerlekli robotu dengede tutabilmek için matematiksel model oluşturup özel tasarlanan denetleyici ile kontrol edilmiştir. Şekil 5.13’te mavi kesikli çizgilerle gösterilen Twip isimli robotun açı değişimini ifade etmektedir. Nawawi ve arkadaşlarının yaptığı simülasyonun sonucunda elde edilen grafiklere göre, sistemin harekete başladığındaki açı salınımı ve sonraki tutarsızlığı dikkat çekmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada elde edilen simülasyon sonuçlarının, Nawawi ve arkadaşlarının yaptıkları simülasyon sonuçlarına göre daha kararlı olduğu gözlemlenmiştir [23].



Şekil 5.13. Twip robotunun denge grafiği [23]

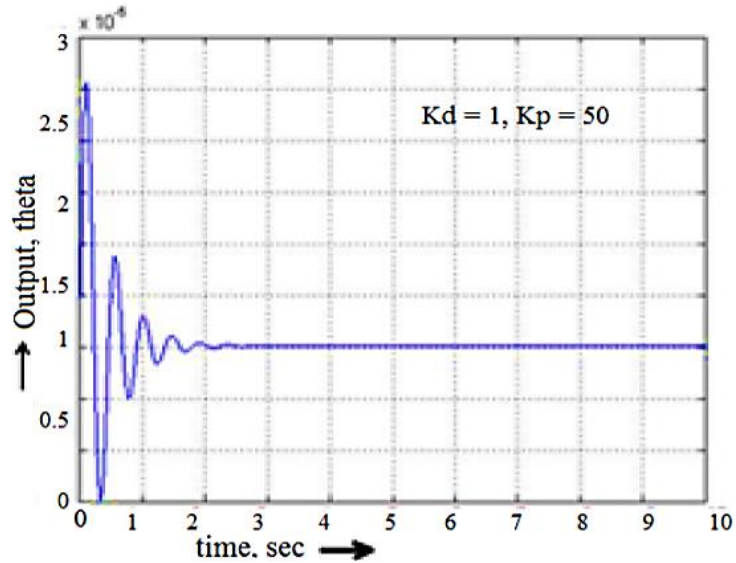
Huang 2010 yılında sistemin matematiksel modelini elde etmek için Lagrange yöntemini kullanarak tek tekerlekli sistem geliştirmiştir. Ters sarkaç sistemi olarak ele alınan bu sistem için LQR kontrol metodunu kullanmıştır. Şekil 5.14’te gösterilen kontrol sistemi simülasyonlarından elde edilen açı değişimi grafiği ile bu çalışmada simülasyonlarından elde edilen açı değişimi grafiği karşılaştırıldığında, Huang’ın salınım derecesinin daha az olduğu gözlenmektedir. Bu nedenle Huang’ın elde ettiği

kontrol yöntemi bu çalışmada uygulanan kontrol yönteminden daha kararlı olduğu gözlemlenmiştir [26].



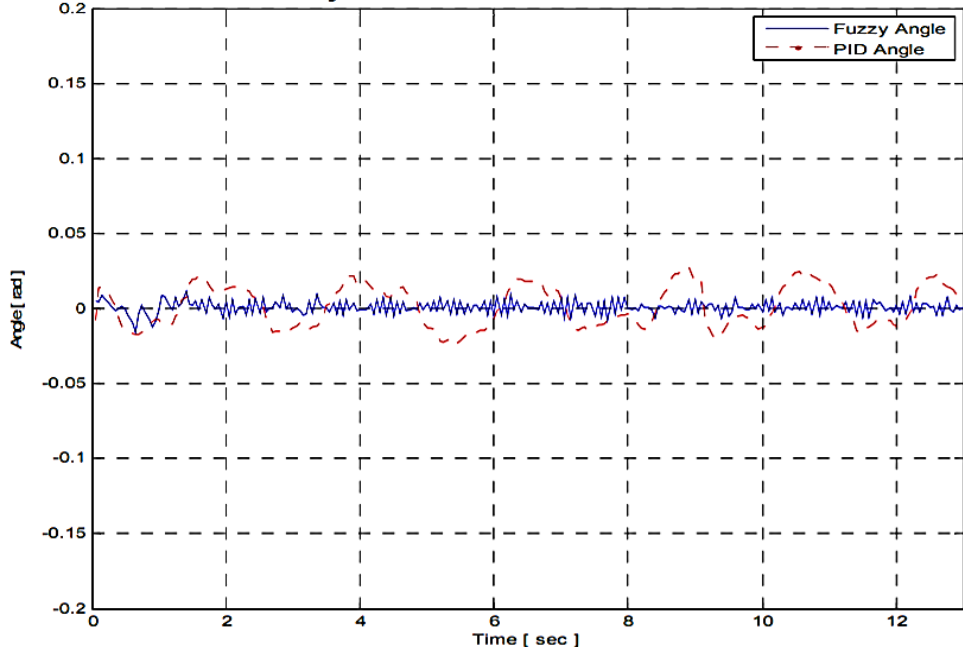
Şekil 5.14. Huang LQR kontrolcü denge grafiği [26]

Mahadi ve arkadaşları 2011 yılında hareket denklemlerini Newton yasalarından elde ettikleri kendini dengeleyebilen robotlar üzerinde PD kontrol kullanmıştır. Sistem kararlılığını doğrulamak için Kök diyagramı çizilmiştir. Şekil 5.15'te simülasyon grafiğinde görülen açı değişimi oldukça küçük değerlere sahiptir. Mahadi ve arkadaşları tarafından uygulanan kontrol sistemlerinin bu çalışmada yapılan kontrol sistemlerine göre daha kararlı olduğu gözlemlenmiştir [27].

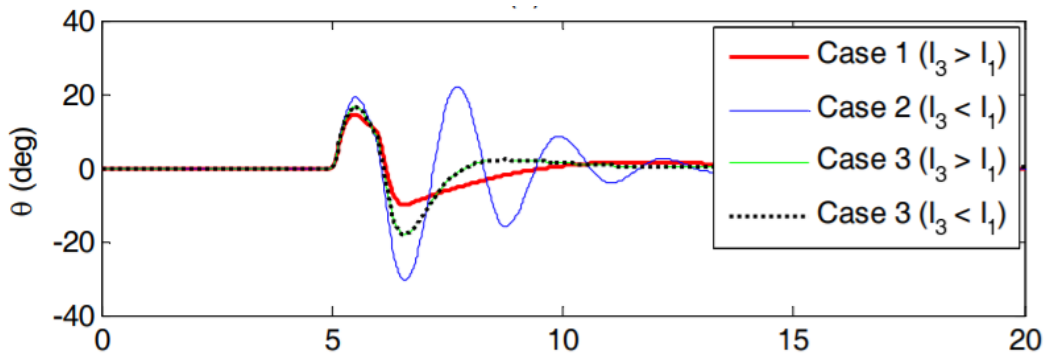


Şekil 5.15. Mahadi ve arkadaşları PD kontrolcü denge grafiği [27]

Kim ve Jung 2012 yılında iki tekerlekli kendini dengeleyebilen mobil robotlar üzerinde PID ve bulanık mantık kontrol uygulamışlardır. Şekil 5.16'da gösterilen simülasyon sonucunda PID kontrolcünün iyi çalıştığını ve bulanık mantık kontrolcünün dış etkilere karşı PID kontrolcüye göre daha kararsız sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu çalışmada yapılan kontrol sistemlerinin, Kim ve Jung tarafından uygulanan kontrol sistemlerine göre daha kararlı olduğu gözlemlenmiştir [28].



Şekil 5.16. Kim ve Jung tarafından tasarlanan sistemin denge grafiği [28]



Şekil 5.17. Kim ve Kwon tarafından tasarlanan sistemin denge grafiği [17]

Kim ve Kwon 2015 yılında iki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotlar için Kane ve Lagrange metodlarını karşılaştırarak hareket denklemleri oluşturmuşlardır. Açık kontrol döngüsü oluşturulmuş ve PID kontrol yöntemi ile kontrol edilmiştir. Şekil 5.17'de görülen denge grafiğinde robotun 5 saniye boyunca hareket etmediği ve 5

saniyeden sonra kendini dengeye getirebilmek için harekete geçtiği gözlemlenmiştir. Şekil 5.17’de gösterilen denge grafiği incelendiğinde; çalışmada uygulanan kontrol sistemlerinin Kim ve Kwon tarafından uygulanan kontrol sistemlerine göre daha kararlı olduğu gözlemlenmiştir [17].

Tasarlamış olduğumuz prototip iki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemin her iki kontrolcü tarafından da kontrol edilebildiği görülmüştür. Açısal konum ve lineer ivme sistemi kontrol edebilmek için önem taşımaktadır. Şekil 5.8’de açısal konum grafiğinden elde edilen sayısal veriler Tablo 5.1’de, Şekil 5.11’de lineer ivme grafiğinden elde edilen veriler Tablo 5.2’de gösterilmiştir.

Tablo 5.1. PID – bulanık mantık kontrolcülerinin açısal konum için karşılaştırma sonuçları

Kontrol Metodu	Yükselme Zamanı	Oturma Zamanı
PID	0.25 s	1.5 s
Bulanık Mantık	0.15 s	0.4 s

Bulanık mantık kontrolcüsü Mamdani – Centroid algoritmasıyla tasarlanmıştır ve bulanık mantık kontrolcüsüne ne kadar fazla kural girilirse sistemin o kadar kararlı hale geldiği tespit edilmiştir. Şekil 5.8’de görüldüğü üzere PID kontrolcüsünün yükselme zamanı bulanık mantık kontrolcüsüne göre daha fazladır. Her iki kontrolcünün de sinyalinin tepe noktası hemen hemen aynıdır. PID kontrolcüsü bulanık mantık kontrolcüsüne göre yaklaşık 1.1 s geç oturmaktadır. Bulanık mantık kontrolcüsünün PID kontrolcüye göre daha hızlı ve daha az salınımla cevap verdiği görülmüştür ayrıca daha az hareket ederek denge kontrolü sağladığı Tablo 5.1. ve Şekil 5.8’de görülmüştür. Aynı zamanda bulanık mantık kontrolcü PID kontrolcüye göre referans açığı daha iyi takip etmiştir. İki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemin, bulanık mantık kontrolcü verilerinin Matlab Simulink ortamında elde edilen sonuçlarının, sistemin denge ve konum kontrolünde başarılı olduğu Tablo 5.1.’de anlaşılmıştır.

Tablo 5.2. PID – bulanık mantık kontrolcülerinin lineer ivme için karşılaştırma sonuçları

Kontrol Metodu	Yükselme Zamanı	Oturma Zamanı
PID	0.02 s	0.05 s
Bulanık Mantık	0.04 s	0.25 s

Tablo 5.2.'de görüldüğü üzere PID kontrolcüsünün yükselme zamanı bulanık mantık kontrolcüsüne göre daha kısadır. Her iki kontrolcünün de sinyalinin tepe noktası aynıdır. Bulanık mantık kontrolcüsü PID kontrolcüsüne göre yaklaşık 0.2 s geç oturmaktadır. Bulanık mantık kontrolcüsünün yüksek hız ve ivmelerde salınımla cevap verdiği ve aynı zamanda yüksek lineer ve açısal hız ile yüksek lineer ve açısal ivme gerekli durumlarda PID kontrolcünün bulanık mantık kontrolcüye göre üstün olduğu Tablo 5.2. ve Şekil 5.11'de görülmüştür. Matematiksel modeli çıkartılan ve dinamiği hakkında yeterli bilgi sahibi olunan bir sistemin, PID kontrol verilerinin Matlab Simulink ortamında oluşturulmasıyla daha kısa sürede tasarımı yapılabileceği ve bulanık mantık kontrolcüye kıyasla sistemin kontrolünde oturma zamanının geç olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada insanın binebileceği iki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemin Lagrange yasaları ve Kirchhoff gerilim denklemleri kullanılarak sistemin matematiksel modeli elde edilmiştir. Üzerine insanın binebileceği sistemin tasarımı Solidworks ortamında gerçekleştirilmiştir. Üzerine binilecek alt plakanın total deformasyonunu hesaplamak için Ansys programı kullanılmıştır. Elde edilen sonuca göre alt plaka kalıcı şekil değişimine uğramamıştır. Üzerine insanın binebileceği sistemin 3D katısı tasarlandıktan sonra kullanılacak ekipmanlar belirlenmiştir. Motor tork hesabı yapıp sistemin maliyeti hesaplanmıştır. Maliyetin yüksek çıkmasından dolayı sistemin prototipinin yapılmasına karar verilmiştir. Üzerine insanın binebileceği 3D katının doğruluğunu ispatlamak için sisteme Matlab Simulink programında PID kontrolcü kullanılarak 5 farklı giriş değeri verilmiştir. PID kontrolcünün katsayıları Matlab Simulink programının Tune optimizasyon kısmından elde edilmiştir. Bunların sonucunda sistemin animasyon resimleri oluşturulmuştur. Elde edilen görüntülerden sistemin kendini dengeye getirebildiği ve böylelikle tasarlanan sistemin doğruluğu ispatlanmıştır.

Maliyet sebebiyle prototipi yapılacak sistemin matematiksel denklemleri hesaplandıktan sonra Matlab Simulink ortamında PID ve bulanık mantık kontrolcülerini tasarlanmıştır. Tasarlanan her iki kontrolcünün de sistemi kontrol edebildiği görülmüştür. PID kontrolcünün katsayıları Matlab Simulink programının Tune optimizasyon kısmından elde edilmiştir. Bulanık mantık kontrolcüsünün açıl konum kontrolünde PID kontrolcüye göre daha iyi olduğu ortaya çıkmıştır. Öte yandan PID kontrolcünün de yüksek hız ve ivme kontrolünde bulanık mantık kontrolcüsüne göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışma kendiliğinden dengelenebilen iki tekerlekli robotik sistemlerin PID veya bulanık mantık kontrol yöntemlerinden biriyle kontrol edildiğinde konum, hız ve ivme bakımından hangisinin daha iyi sonuç verebileceğine ve tercih edilebileceğine aynı zamanda gelecekte bu alanda yapılacak çalışmalara da ışık tutacaktır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda iki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemin daha çok gelişebilmesi için çalışılması gereken bazı noktalar vardır. Sistemin matematiksel modeli oluşturulurken üzerinde gidilen zeminin özellikleri, eğim açıları, tekerleklerin esnekliği gibi durumlar hesaba katılarak matematiksel denklemler elde edilebilir. Yüksek hızlarda manevra açılarının keskin olabilmesi için tekerleklerin yatması için mekanik tasarım gerçekleştirilebilir. Çeşitli alanlarda kullanılabilmesi için sisteme 6 eksenli robot kol montajı yapılabilir. Eksen sayısı artırılarak farklı kontrol yöntemleriyle sistemin kontrolü yapılabilir.

Bu çalışmanın sonucunda, Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde iki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistem prototipi üretilmiştir. Yukarıda belirtilen kontrol yöntemlerinden PID kontrolcü prototip sisteme uygulanmıştır ve sistemin sorunsuz bir şekilde kontrol edilebildiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] D. Kamen, Segway. <http://tr-tr.segway.com/>, (Ziyaret tarihi: 6 Ocak 2018).
- [2] Çelik U., Kendini Dengeleyebilen İki Tekerlekli Aracın Tasarımı ve Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri, İstanbul, 2014,363872.
- [3] Bugeja M., Non-Linear Swing-Up and Stabilizing Control of An Inverted Pendulum System, *EUROCON*, Ljubljana, Slovenia, Ekim 2003.
- [4] Ji C.W., Lei F., Kin K., Fuzzy Logic Controller for An Inverted Pendulum System, *IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems*, Beijing, China, 28-31 Ekim 1997.
- [5] Polat B. Denge Robotu Tasarımı ve Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri, Elazığ, 2018,524841.
- [6] Yamafuji K., Kawamura T., Study on The Postural and Driving Control of A Coaxial Bicycle, *Transactions of The JSME*, 1988, **54**(501), 1114-1121.
- [7] Ha Y.S., Yuta S., Trajectory Tracking Control for Navigation of The Inverse Pendulum Type Self-Contained Mobile Robot, *Robotics and Autonomous Systems*, 1996, **17**(2), 65-80.
- [8] Grasser F., D'Arrigo A., Colombi S., Rufer A., JOE: A Mobile, Inverted Pendulum, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Şubat 2002, **49**(1), 107-114.
- [9] Anderson D. P., nBot A Two Wheel Balancing Robot, <http://www.geology.smu.edu/~dpa-www/robo/nbot/>, (Ziyaret tarihi: 8 Mart 2018).
- [10] Hassenplug S., Steve's LegWay, <http://www.teamhassenplug.org/robots/legway/>, (Ziyaret tarihi: 8 Mart 2018).
- [11] Nawawi S., Real-Time Control System for A Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot, *Advanced Knowledge Application in Practice*, 2010, **16**, 299-312.
- [12] Shiroma N., Matsumoto O., Tani K., Cooperative Behavior of A Mechanically Unstable Mobile Robot for Object Transportation, *JSME International Journal*, 1999, **42**(4), 965-973.

- [13] Ding F., Huang J., Wang Y., Matsuno T., Fukuda T., Sekiyama K., Modeling and Control of A Novel Narrow Vehicle, Robotics and Biometrics (ROBIO), *IEEE International Conference*, Tianjin, China, 14-18 Aralık 2010.
- [14] Bui T. H., Nguyen T., Chung T. L., Kim S. B., A Simple Nonlinear Control of A Two-Wheeled Welding Mobile Robot, *International Journal of Control Automation and Systems*, 2003, **1**(1), 35-42.
- [15] Li J., Gao X., Huang Q., Du Q., Duan X., Mechanical Design and Dynamic Modeling of A Two Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot, *Automation and Logistics IEEE International Conference*, Jinan, China, 18-21 Ağustos 2007.
- [16] Segway Robotics, Project PUMA, <http://rmp.segway.com/puma/>, (Ziyaret tarihi: 10 Mart 2018).
- [17] Kwon S., Kim S., Yu J., Tilting-Type Balancing Mobile Robot Platform for Enhancing Lateral Stability, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, **20**(3), 1470–1481.
- [18] Umay Y. İki Tekerlekli Kendini Dengeleyebilen Mobil Bir Aracın Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri, Elazığ, 2018, 523375.
- [19] Xu J. X., Guo Z. Q., Lee T.H., Design and Implementation of A Takagi Sugeno-Type Fuzzy Logic Controller on A Two-Wheeled Mobile Robot, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, **60**(12), 5717–5728.
- [20] Xu J. X., Guo Z. Q., Lee T. H., Design and Implementation of Integral Sliding-Model Control on an Underactuated Two-Wheeled Mobile Robot, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, **61**(7), 3671–3681.
- [21] Pathak K., Franch J., Agrawal S. K., Velocity and Position Control of A Wheeled Inverted Pendulum by Partial Feedback Linearization, *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, **21**(3), 505-513.
- [22] Charles E. Forrest Jr., A Neural Network Control System for The Segway Robotic Mobility Platform, Thesis of Master of Graduate Faculty of North Carolina State University, 2006.
- [23] Nawawi S., Ahmad M., Osman J., Development of A Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot, *Research and Development 5th Student Conference*, Malaysia, 11-12 Aralık 2007.
- [24] Jeong S. H., Takahashi T., Wheeled Inverted Pendulum Type Assistant Robot: Inverted Mobile Standing and Sitting Motions, *IEEE/RSJ International Conference*, 2 Kasım 2007.
- [25] Li Z. Xu C., Adaptive Fuzzy Logic Control of Dynamic Balance and Motion for Wheeled Inverted Pendulums, *Fuzzy Sets and Systems*, 2009, **160**(12), 1787-1803.

- [26] Huang C. N., The Development of Self-Balancing Controller for One-Wheeled Vehicles, *Scientific Research*, 2010, **2**, 212-219.
- [27] Hasan M., Saha C., Rahman M., Sarker R. I., Aditya S. K., Balancing of An Inverted Pendulum Using PD Controller, *Dhaka Univ. J. Sci.*, 2012, **60**(1), 115-120.
- [28] Kim H.W., Jung S., Fuzzy Logic Application to A Two-wheel Mobile Robot for Balancing Control Performance, *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, 2012, **12**(2), 154-161.
- [29] Göçmen A. Design Of Two Wheeled Electric Vehicle, Yüksek Lisans Tezi, Atılım Üniversitesi, Fen Bilimleri, Ankara, 2011, 290235.
- [30] Ata B. Quadratic Optimal Control of an Inverted Pendulum Using Artificial Bee Colony Algorithm, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri, Adana, 2014, 372932.
- [31] Larminie J., Lowry J., *Electric Vehicle Technology Explained*, 1., Wiley, West Sussex, 2003.
- [32] <https://turkish.alibaba.com/product-detail/in-stock-of-motor-factory-made-100nm-rv-worm-gear-doulbe-shaft-24v-dc-motor-500w-with-encoder-60761799528.html>, (Ziyaret tarihi: 20 Eylül 2020).
- [33] <https://www.robotshop.com/uk/sabertooth-dual-regenerative-motor-driver.html>, (Ziyaret tarihi: 20 Eylül 2020).
- [34] <https://alitek.advantech.com/products/PCM-3356/mod/0706F4D5-2E44-473A-A7B7-53BD1A7BD1A0>, (Ziyaret tarihi: 20 Eylül 2020).
- [35] <https://zenshin-tech.com/product/lpms-rs232al2/>, (Ziyaret tarihi: 20 Eylül 2020).
- [36] <https://www.enerjimar.com/p-19685-QSM-12V-14AH-Elektrikli-Bisiklet-Akusu-6DZM14-Jel-Aku.html>, (Ziyaret tarihi: 20 Eylül 2020).
- [37] Altaş H., *Bulanık Mantık: Bulanık Denetim*, Enerji, Elektromekanik, Bilesim Yayıncılık A.Ş., İstanbul, 1999.
- [38] Şen A. M. İki Tekerlekli Robot İçin Bulanık Mantık Tabanlı Kontrolcü Tasarımı ve Arı Algoritması Kullanarak Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri, 2014, 380940.
- [39] Yoo H. H., Choi B. J., Design of Simple-Structured Fuzzy Logic Systems for Segway-Type Mobile Robot, *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, 2015, **15**(4), 232-239.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Peçe F.**, Karabay S., Yarar E., PID Ve Bulanık Mantık Kontrol Sistemleri İle İki Tekerlekli Kendini Dengeleyebilen Robotik Sistem Tasarımı, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2020, **3**(1), 99-108.



ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Kocaeli’de tamamladı. 2012 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde elde ettiği başarıdan dolayı 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü’nde çift anadal yapmaya hak kazandı. Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2017 yılında Makine Mühendisi olarak ve Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü’nden 2018 yılında Mekatronik Mühendisi olarak mezun oldu. 2017- 2020 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı.

