



**ALTI SERBESTLİK DERECELİ UÇUŞ
SİMÜLATÖRLERİNİN MATEMATİKSEL
ANALİZİ VE KONTROLÜ**

Merve KURT

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Ahmet DURLU**

**2021
Her hakkı saklıdır.**



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALTI SERBESTLİK DERECELİ UÇUŞ SİMÜLATÖRLERİNİN
MATEMATİKSEL ANALİZİ VE KONTROLÜ

Merve KURT

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ahmet DUMLU

Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği

Erzurum

2021

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

21 / 06 / 2021

İmzası

Merve KURT

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALTI SERBESTLİK DERECELİ UÇUŞ SİMÜLATÖRLERİNİN MATEMATİKSEL ANALİZİ VE KONTROLÜ

Merve KURT

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ahmet DUMLU

Bu tez çalışmasında; havacılık sektöründe eğitim amaçlı olarak kullanılan altı serbestlik dereceli uçuş simülatörlerinin mekanik tasarımları hakkında bilgi verilmiş ve sistemlerin kontrolü için gerekli olan detaylı tüm matematiksel analizler ayrıntılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Öncelikle örnek bir simülatöre ait kinematik analizler yapılmış ardından sistemde eyleyici olarak kullanılan doğrusal motorların dinamik modeli Kirchhoff ve Newton kanunları kullanılarak elde edilmiştir. Yapılan matematiksel analizler sonucunda elde edilen tüm çıktılar sistemin gerçek zamanlı yörünge kontrolünde kullanılmıştır. Matlab-Simulink’ de hazırlanan kinematik, kontrol ve veri iletişim alt fonksiyonları sayesinde sistemin farklı yörüngeler için vermiş olduğu performans çıktıları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Gerçek zamanlı yörünge kontrol deneylerinden elde edilen bulgulara göre sistem için yapılan matematiksel analizlerin doğru olduğu ve özellikle PID kontrolcü parametrelerinin tüm sistem parametrelerine bağlı olarak belirlenmesiyle sistemin yörünge takip performansının artırılabilceği gösterilmiştir.

2021, 94 sayfa

Anahtar Kelimeler: Altı Serbestlik Dereceli Paralel Manipülatör, Uçuş Simülatörleri, Kinematik Analiz, PID Kontrol, Doğrusal Motor

ABSTRACT

MS. Thesis

MATHEMATICAL ANALYSIS AND CONTROL OF SIX DEGREES OF FREEDOM FLIGHT SIMULATORS

Merve KURT

Erzurum Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical Electronic Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Ahmet DÜMLÜ

In this thesis study; information was given about the mechanical designs of six-degree-of-freedom flight simulators used for training purposes in the aviation industry, and all the detailed mathematical analyzes required for the control of the systems were carried out in detail. First of all, kinematic analyzes of a sample simulator were made, and then the dynamic model of linear motors used as actuators in the system was obtained by using Kirchhoff and Newton's laws. All the outputs obtained as a result of the mathematical analyzes were used in the real-time trajectory control of the system. Thanks to the kinematics, control and data communication sub-functions prepared in Matlab-Simulink, the performance outputs of the system for different trajectories were examined in detail. According to the findings obtained from the real-time trajectory control experiments, it has been shown that the mathematical analyzes for the system are correct and the trajectory tracking performance of the system can be increased, especially by determining the PID controller parameters depending on all system parameters.

2021, 94 page

Keywords: Six Degrees of Freedom Parallel Manipulator, Flight Simulators, Kinematic Analysis, PID Control, Linear Motor

TEŞEKKÜR

Tez çalışması süresince sağlamış olduğu destek ve yönlendirmeleriyle çalışmamın tamamlanmasında büyük emeği olan saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Ahmet DUMLU 'ya tavsiye ve yardımları için teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışma döneminde desteklerini esirgemeyen tüm çalışma arkadaşlarıma, hocalarıma destekleri ve sağlamış oldukları çalışma ortamı için teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarım sırasında desteklerini hep hissettiğim sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Merve KURT
Haziran 2021



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	7
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	13
3.1. Paralel Mekanizmaların İsimlendirilmesi	13
3.2. Paralel Mekanizmaların Çalışma Uzayı ve Tekillik	14
3.3. Uçuş Simülatörü Olarak Kullanılan Paralel Mekanizmaların Serbestlik Derecelerinin Belirlenmesi	16
3.4. Uçuş Simülatörlerinde Kullanılan Stewart Platformunun Kinematik Analizi.....	17
3.5. Uçuş Simülatörlerinde Kullanılan Doğrusal Motorlarının Modellenmesi ve Transfer Fonksiyonun Elde Edilmesi.....	22
3.5.1. Motorun Elektriksel Eşitliğinin Elde Edilmesi	22
3.5.2. Motorun Mekaniksel Eşitliğinin Elde Edilmesi	24
3.5.3. Motorun Elektriksel ve Mekaniksel Denklemlerinin Birleştirilmesi	26
3.6. Uçuş Simülatörlerinin Yörünge Kontrolünün PID Kontrol ile Gerçekleştirilmesi..	28
3.7. Tez Çalışmasında Kullanılan Prototip Uçuş Simülatörünün Özellikleri	31
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	34
4.1. Simülasyon Sonuçlarındın Elde Edilen Bulgular	34
4.2. Gerçek Zamanlı Yörünge Kontrol Deneylerinden Elde Edilen Bulgular	58
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	87
KAYNAKLAR	88
EKLER.....	93

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
r_b	Sabit platform yarıçapı
λ	Çalışma uzayına ait serbestlik derecesi
r_p	Hareketli platform yarıçapı
n	Kinematik bağ sayısı
j_i	i . Serbest dereceli eklem sayısı
f_i	Eklemlerin serbestlik derecesi
F	Mekanizmanın serbestlik derecesi
${}^A R_B$	Rotasyon matrisi
t	Öteleme vektörü
l_i	i . bacak uzunluğu
R_m	Motor direnci
L_m	Endüktans
k_m	Geri-emf sabiti
$\dot{x}_l(s)$	Yük mil açısal hızı
$I_m(t)$	Armatür akımı
$V_m(s)$	Motor giriş gerilimi
$e_b(t)$	Geri-emf gerilimi
τ_m	Motor torku
B_m	Motor mili üzerindeki viskoz sürtünme
B_l	Yük üzerindeki viskoz sürtünme
J_l	Yükün atalet momenti
J_m	Motor milinin atalet momenti
τ_{ml}	Yük torkundan motor miline etki eden tork
τ_l	Yüke uygulanan toplam tork
K_g	Çark oranı
η_g	Dişli kutusu verimliliği

Kısaltmalar

PM	Paralel Manipölatör
SP	Stewart Platformu
SPM	Stewart Platform Mekanizması
SD	Serbestlik Derecesi
SI/SO	Tek-Girişli Tek-Çıkışlı
PID	Oransal İntegral Türevsel Kontrol
DH	Denavit Hartenberg



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1 (a) Seri manipülatör (b) Paralel manipülatör	1
Şekil 1. 2 Havelsan' a ait uçuş simülatörü.....	5
Şekil 2. 1 Gough ve Whitehall tarafından tasarlanan lastik test makinası	7
Şekil 2. 2 Stewart tarafından dizayn edilen uçuş simülatörü	8
Şekil 3. 1 (a)3-3'lük PM mekanizması (b) 6-6'lük PM mekanizması (c) 6-3'lük PM mekanizması	14
Şekil 3. 2 Tez çalışmasında kullanılan paralel mekanizma	16
Şekil 3. 3 Stewart platform mekanizmasında bacak uzunluğu gösterimi	18
Şekil 3. 4 Stewart platform mekanizmasının eksen takımı	20
Şekil 3. 5 DC Motor Armatür Akımı ve Dişli Takımı	23
Şekil 3. 6 Yörünge takip denetleyici tasarımı	29
Şekil 3. 7 Stewart platformun genel görünüşü	31
Şekil 3. 8 Stewart platformun bileşenleri	32
Şekil 3. 9 Sisteme ait parametrelerin mekanizma üzerinde gösterimi	33
Şekil 4. 1 Matlab_Simulink programında hazırlanan simülasyon tasarımı	34
Şekil 4. 2 Simülasyonda kullanılan PID denetleyici tasarımı	35
Şekil 4. 3 Simülasyon 1 için PID denetleyicisi ile gerçekleştirilen konum değişimleri. 39	
Şekil 4. 4 Simülasyon 1 için PID denetleyicisinin kullanılması durumunda bacaklarda meydana gelen konum hataları	39
Şekil 4. 5 Simülasyon 1 için kullanılan denetleyici işaretleri	42
Şekil 4. 6 Simülasyon 2 için PID denetleyicisi ile gerçekleştirilen konum değişimleri .46	
Şekil 4. 7 Simülasyon 2 için PID denetleyicisi kullanılması durumunda bacaklarda meydana gelen konum hataları	47
Şekil 4. 8 Simülasyon 2 için kullanılan denetleyici işaretleri	50
Şekil 4. 9 Simülasyon 3 için PID denetleyicisi ile gerçekleştirilen konum değişimleri .53	
Şekil 4. 10 Simülasyon 3 için PID denetleyicisi kullanılması durumunda bacaklarda meydana gelen konum hataları	54
Şekil 4. 11 Simülasyon 3 için kullanılan denetleyici işaretleri	57
Şekil 4. 12 Gerçek zamanlı Stewart platform uygulamasında kullanılan tasarım	58
Şekil 4. 13 Gerçek zamanlı Stewart platformun ön panel gösterimi.....	60
Şekil 4. 14 Gerçek zamanlı Stewart platform uygulamasının çalışma içeriği	62

Şekil 4. 15 Gerçek zamanlı deney 1 için PID denetleyicisi ile gerçekleştirilen konum değişimleri.....	66
Şekil 4. 16 Gerçek zamanlı sistemde deney 1 için PID denetleyicisi kullanılması durumunda bacaklarda meydana gelen konum hataları	67
Şekil 4. 17 Gerçek zamanlı sistemde deney 1 için kullanılan denetleyici işaretleri	70
Şekil 4. 18 Gerçek zamanlı deney 2 için PID denetleyicisi ile gerçekleştirilen konum değişimleri.....	74
Şekil 4. 19 Gerçek zamanlı sistemde deney 2 için PID denetleyicisi kullanılması durumunda bacaklarda meydana gelen konum hataları	75
Şekil 4. 20 Gerçek zamanlı sistemde deney 2 için kullanılan denetleyici işaretleri	78
Şekil 4. 21 Gerçek zamanlı deney 3 için PID denetleyicisi ile gerçekleştirilen konum değişimleri.....	82
Şekil 4. 22 Gerçek zamanlı sistemde deney 3 için PID denetleyicisi kullanılması durumunda bacaklarda meydana gelen konum hataları	83
Şekil 4. 23 Gerçek zamanlı sistemde deney 3 için kullanılan denetleyici işaretleri	86

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. 1. Seri ve paralel mekanizmaların karşılaştırılması	2
Çizelge 3. 1. PID denetleyicilerinin karşılaştırılması.....	30
Çizelge 3. 2. Sisteme ait parametreler.....	33



1. GİRİŞ

Elektromekanik teknolojisinde yaşanan gelişmelerle birlikte hassas hareket kabiliyetine sahip manipülatörler endüstriyel uygulamaların vazgeçilmez bir parçası haline gelmişlerdir. Endüstriyel fabrika ortamlarında bir ürünü bir noktadan bir noktaya taşıma, ürünün belirli bir noktasına müdahale etme, ürünü boyama ve ürünleri birleştirme gibi kesin bir görevi yerine getirebilmek için farklı tipte manipülatörler kullanılmaktadır. Literatürde manipülatörlerin ilk tasarım modeli seri manipülatörler olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 1.1 (a)' da gösterilen seri manipülatörler, açık döngü mimarisine sahip olup birbirlerine seri olarak bağlanmış bileşenlerden oluşmaktadır. Diğer bir manipülatör tipi ise Şekil 1.1 (b)' de gösterildiği gibi paralel yapıya sahip olup, bu tip sistemlerde hareketli ve sabit platformlar en az iki bağımsız kinematik bağ ile birleşmiştir. Paralel mekanizmalar ortak bir platforma paralel yapıda bağlanmış bağlardan meydana gelir. Bu mekanizmalar hareketsiz ve hareketli platforma eklemler aracılığıyla bağlıdır. Bağlarda bulunan prizmatik eyleyiciler bağların boyunu değiştirir. Bir başka deyişle; paralel mekanizmalar bir veya birden fazla kapalı döngüye sahiptirler (Bhaskar Dasgupta 1998).



(a)



(b)

Şekil 1. 1 (a) Seri manipülatör (b) Paralel manipülatör (Demirci 2020)

Paralel ve seri manipülatörler karşılaştırıldığında her iki sistemin de birbirlerine göre avantajlara ve dezavantajlara sahip olduğu görülür. Özellikle paralel manipülatörler kapalı çevrim kinematik mimarilerinden dolayı seri manipülatörlere göre daha fazla rijitliğe sahip olup bu özelliği sayesinde daha yüksek hızlarda çalıştırılabilmektedirler. Şekil 1.1 (a)' da görülebileceği üzere, seri manipülatörlerde bulunan her bir bağ, kendinden sonra gelen bağların ve bağlara bağlı tüm motorların ağırlığını kaldırabilecek kapasitede olması gerekmektedir. Bu durum eyleyicilerin ağırlığının ve boyutunun

1. GİRİŞ

artmasına neden olmakla ve aynı zamanda yüksek hız ve ağırlık gerektiren durumlarda mekanizmanın performansını düşürmektedir. Seri manipülatörde karşılaşılan diğer bir dezavantaj ise açık döngü mimariden dolayı toplamsal konum veya hız hatasına sahip olmasıdır. Sistemde bulunan eyleyicilerin birbirlerine seri bağlanmasından dolayı her bir eyleyici hatası kendinden sonra gelen eyleyiciye yeni bir hata eklemektedir. Fakat paralel manipülatörler kapalı döngü yapıda bulunmalarından dolayı eyleyici hataları sistem içinde eklenerek büyümektedir. Seri manipülatörlerin paralel yapıya göre en önemli avantajı ise tarayabildikleri mesafe bir başka değişle çalışma uzaylarının daha yüksek olmasıdır. Bununla birlikte paralel manipülatörlerin tasarımı, kontrolü ve kinematiği seri manipülatörlere göre oldukça karmaşıktır (Dasgupta ve Mruthyunjaya (1998)).

Çizelge 1.1’de seri ve paralel yapıda bulunan mekanizmaların sahip oldukları özelliklerinin karşılaştırılmasına değinilmiştir. Bu farklı yapılar matematiksel analiz olarak değerlendirilmesinde seri mekanizmalarda düz kinematik analiz kolay, ters kinematik denklemlerin çözümü ise paralel manipülatörlere göre oldukça zordur. Bununla birlikte paralel mekanizmalarda düz kinematik denklemlerin çözümü oldukça karmaşık, ters kinematik denklemlerin çözümü seri manipülatörlere göre daha kolaydır. Tüm bu özellikler dikkate alındığında paralel manipülatör özellikle ağır yük taşıma kapasitesinin, hassasiyetinin ve kontrol performansının seri manipülatörlere göre daha iyi olması nedeniyle havacılık sektöründe uçuş simülatörü olarak daha çok tercih edilmektedir.

Çizelge 1. 1 Seri ve paralel mekanizmaların karşılaştırılması

	PARALEL MEKANİZMA	SERİ MEKANİZMA
Taşıma Kapasitesi	Fazla	Az
Çalışma Uzayı	Sınırlı	Geniş
Ters Kinematik Hesaplama	Kolay	Zor
Birim Yükte Harcanan Güç	Az	Fazla

Gelişen teknoloji ile birlikte paralel yapıya sahip mekanik sistemler endüstriyel robotik uygulamalar dışında özellikle uzay ve havacılık alanında simülatör olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle havacılık alanında sistemde oluşabilecek ufak bir kullanım ya da bakım hatası can kaybına neden olabileceği için güvenliği ön planda tutmak amacıyla simülatör teknolojisinin kullanımı zaruri hale gelmiştir.

Uçuş simülatörü; pilot eğitimi, tasarımı veya diğer amaçlar için uçak uçuşunu ve uçuğu ortamı yapay olarak hayata geçiren bir simülatördür. Uçağın nasıl uçuğunu, uçuş kontrolleri uygulamalarına nasıl tepki verdiklerini, diğer uçak sistemlerinin etkilerini ve hava aracının hava yoğunluğu, türbülans, bulut, yağış gibi dış etkenlere nasıl tepki verdiğini gösterir. Uçuş simülasyonu; uçuş eğitimi, uçağın tasarımı, tasarımın geliştirilmesi ve uçak karakteristikleri üzerine yapılan araştırmalara da yardımcı olmak üzere çeşitli nedenlerle kullanılır.

Deneyimli pilotluk adayları yetiştirmek için ilk gerçek uçuştan önce sanal ortamda simülatör yardımıyla eğitim verilerek hazırlık aşamasına getirilmek istenir. Bu eğitimi alacak pilot adayının gerçek uçaktaki öteleme ve dönme hareketlerini en yakın seviyede algılaması gerekmektedir. Pilot adayının bu hareketleri algılaması için bilgisayar programları ve yazılımları ile gerçekliğe yakın uçuş ortamı oluşturulur. Bu olayın gerçekliğe yakın olması için mekanizmanın alt tarafına monte edilmiş ve pilotun kontrolü doğrultusunda hareket eden paralel yapı mevcuttur. Pilot için uçuş esnasında karşılaşması olası olumsuz durumlarda daha önceden benzetim çalışması gerçekleştirilerek tecrübelendirilmiş olunur. Bu durumların sağlamış oldukları avantajlar sayesinde günümüzde birçok uçuş simülatörü için Stewart platform sisteminden yararlanılmıştır.

Uçuş simülatöründe verilen eğitimler işlevlerine göre sınıflandırılabilir. Bu eğitimlerden bazıları şunlardır:

Kokpit Prosedürleri Eğitimi (CPT): Kokpit işlevlerinin gösterildiği kısımdır. Pilot adaylarının kokpit ortamında bulunan cihazları tanıması ve bunların nasıl kullanılacağını öğrenmesi amaçlanmaktadır.

Havacılık Eğitim Cihazı (ATD): Havacılık eğitim cihazı eğitiminde uçuş yönetimi ve kumandasının kullanımında pilot adaylarına tecrübe kazandırılmak amaçlanmaktadır. Uçuş simülatör eğitimlerinin asıl kısmıdır.

1. GİRİŞ

Temel Enstrüman Eğitim Cihazı (BITD): Bu kısımda pilot adayının uçuş araçlarını okuması ve yorumlaması istenir. Temel aletli uçuş eğitimidir. Görüş dışı koşullarda aletli uçuş yöntemlerinin eğitimi bu tip simülatörde verilmektedir.

Uçuş ve Seyrüsefer Prosedürleri Eğitmeni (FNPT): Giriş seviyesi uçuş ve seyrüsefer eğitiminin verildiği simülatördür.

Entegre Prosedürler Eğitmeni (IPT): Bu simülatör eğitimi kısmında kokpit göstergeleri, LCD ekranlarında benzetimi gerçekleştirilerek üç boyutlu sanal kokpit ortamı oluşturulmuştur. Bu ortam pilot adaylarının kokpitteki işleyiş ve sistem yerleşimine aşinalık oluşturur.

Uçuş Eğitim Cihazı (FTD): Uçuş dinamik modellenmesinin gerçeğe en yakın seviyede gerçekleştirilmesinin amaçlandığı uçuş simülatör eğitimidir. Uçağın uçuş karakteristiklerinin ön planda olduğu simülatör aşamasıdır.

Tam Uçuş Simülatörü (FFS): Uçuş esnasında meydana gelebilecek manevra ve ivmelenmenin benzerinin yaşatıldığı simülatör eğitimidir. Bu eğitimde hareketli platformlardan yararlanılmaktadır. Uçak çeşidine özel, yüksek uçuş tam sistem benzetimidir.

Tam Görev Simülatörü (FMS): Askeri tip uçaklar için uçuş simülatör eğitimin verildiği kısımdır. Bu kısım silah ve sensör sistemlerinin gerçeğe yakın modellenerek benzetiminin gerçekleştirildiği ortamı oluşturur.

Verilen uçuş simülatör eğitimleri sayesinde havacılık sektöründe gerçeğe yakın ortam oluşturularak önceden meydana gelebilecek hasarlar için maliyeti aza indirmiş olup ve taşımacılık esnasında güvenliği üst düzeyde gerçekleştirmektedir. HAVELSAN'ın uçuş simülatörleri konusunda yapmış olduğu çalışmalar insan yaşamını kolaylaştırmış ve bu doğrultuda sundukları çözümler ile oluşturdukları teknoloji ortamını bizlere sunmaktadır. HAVELSAN'ın uçuş eğitim cihazları, tecrübeli mühendisler tarafından her düzeyde pilot eğitimi için üretilmekte olup konfigürasyonlar müşteri ihtiyaçlarına göre düzenlenmektedir. Ayrıca HAVELSAN'ın sunmuş olduğu uçuş eğitim cihazları, kaliteli eğitim olanağı sağlamaktadır. Şekil 1.2 de HAVELSAN'a ait uçuş simülatörü gösterilmektedir.



Şekil 1. 2 Havelsan' a ait uçuş simülatörü (Havelsan 2018)

Bu tez çalışmasında uçuş simülatörlerinin matematiksel analizini ve kontrolünü gerçekleştirmek için alt ve üst platformu 6 noktadan bağlı 6-6' lik Stewart platform sistemi üzerinde çalışılmıştır.

Birinci bölümde, seri ve paralel mekanizmalar hakkında bilgi verilerek bu mekanizmaların karşılaştırılması yapılmıştır. Havacılık sektöründe eğitim amaçlı olarak kullanılan altı serbestlik dereceli bir uçuş simülatörünün mekanik tasarımı hakkında bilgi verilerek uçuş simülatörleri esnasında verilen eğitimlerin açıklaması yapılmıştır.

İkinci bölümde, tez konusu ile ilgili olarak altı serbestlik dereceli uçuş simülatörlerinin analizi için kullanılan Stewart platform mekanizmasının ve uçuş simülatörlerinin literatür çalışmasına yer verilmiştir.

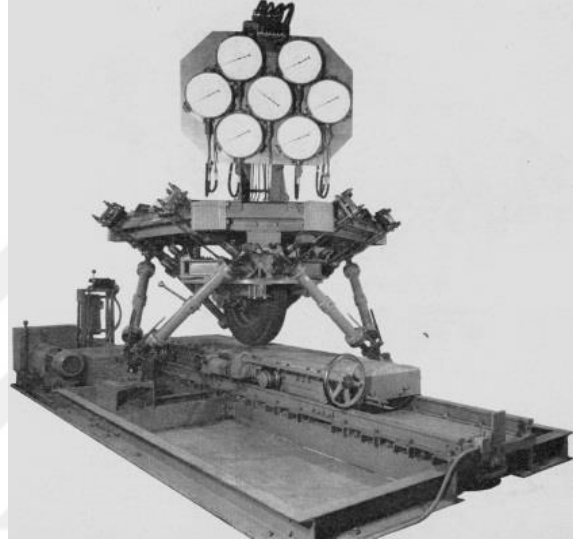
Üçüncü bölümde, farklı tasarımlarda bulunan paralel mekanizmaların isimlendirilmesi yapılarak mekanizmaya ait tekillik ve çalışma uzayı hakkında yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Paralel mekanizmasının serbestlik derecelerinin analizi yapılarak tez çalışmasında kullanılan sistemin serbestlik derecesinin altı olduğu matematiksel analizle hesaplanmıştır. Tez aşamasında kullanılan paralel mekanizmanın kontrolünü gerçekleştirmek için kinematik analiz yöntemleri değerlendirilerek bu tez çalışmasında bahsedilen ters kinematik analizi yapılmıştır. Daha sonra ters kinematik analizi yöntemi kullanılarak MATLAB programında yazılımı gerçekleştirilip bacak boy uzunluğu bulunmuştur. Paralel mekanizmada eyleyicilerin tahrik olayını gerçekleştirmek için Kirchhoff ve Newton kanunlarından yararlanılarak mekanizmada bulunan doğrusal

motorların modellenmesi ve transfer fonksiyonun elde edilmesi için gerekli formüller elde edilmiştir. Son olarak PID denetleyicisi hakkında açıklamalara yer verilerek tez çalışmasında kullanılan paralel mekanizmanın tasarımı ve teknik özelliklerine değinilmiştir.

Dördüncü bölümde, yörünge kontrolünün PID denetleyicisi ile gerçekleşmesinin MATLAB/Simulink programında tasarımı yapılarak benzetim sonuçları incelenmiştir. Son olarak Matlab-Simulink' de hazırlanan kinematik, kontrol ve veri iletişim alt fonksiyonları aracılığıyla prototip bir uçuş simülatörünün farklı yörüngeler için performans çıktıları ayrıntılı bir şekilde deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Gerçek zamanlı yörünge kontrol deneylerinden elde edilen sonuçlara göre yapılan matematiksel analizlerin doğru olduğu ve özellikle PID denetleyici parametrelerinin tüm mekanizma parametrelerine bağlı olarak belirlenmesiyle sistemin yörünge takip performansının artırılabilceği sonucu deneysel olarak kanıtlanmıştır.

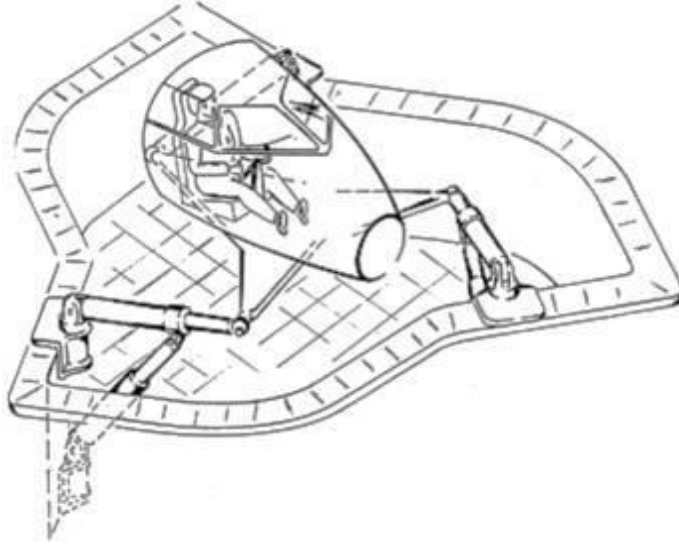
2. KAYNAK ÖZETLERİ

Stewart'ın uçuş simülatörlerinde kullanılmak üzere öne sürdüğü paralel mekanizma yapısı günümüzde Stewart platformu olarak anılmaktadır. Birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalar sayesinde Stewart platform mekanizması geliştirilmiştir. Bu yapılan çalışmalar arasında Gough ve Whitehall'un otomobil lastiği testi için önermiş olduğu paralel mekanizma yapısı da bulunmaktadır (Bhaskar Dasgupta 1998).



Şekil 2. 1 Gough ve Whitehall tarafından tasarlanan lastik test makinası (Gough and S.G. Whitehall 1962)

Şekil 2.1'de paralel manipülatörlerin ilk tasarımı olan 1962 yılında Gough and Whitehall tarafından gerçekleştirilen mekanizma gösterilmektedir.



Şekil 2. 2 Stewart tarafından dizayn edilen uçuş simülatörü (Stewart 1965)

Şekil 2.2’de Stewart tarafından tasarımı gerçekleştirilen uçuş simülatörü gösterilmektedir.

Gün geçtikçe ortaya atılan çalışmalarla yapılan önemli katkılar, paralel mekanizmaları popüler araştırma konusu konumuna getirmiştir. SPM 1980 yıllarından itibaren robotik alanındaki popüler çalışma konuları arasına girmiştir. 1990 yıllarına bakıldığında ise bu konu ile ilgilenen araştırmacı sayısı gün geçtikçe artış göstermiştir. Robot alanındaki uygulamaları için kinematik yapıları üzerinde durularak yeni metotlar bulunmuştur. Bo Zhang yaptığı araştırmada paralel mekanizmalarda kuvvet kontrolü için yeni bir tasarım öngörerek ileriye sürmüştür. Hareketli platforma yük konularak üst platform ve taban arasında bulunan bacak boylarındaki değişimler için ölçümler yapılmıştır. Böylece hareketli platformun konum pozisyonu için hesaplama yapılmıştır.

Fichter (1980), Stewart platform yapısına benzeyen bir robot manipülatörü yaparak üzerinde çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışmalar doğrultusunda tekillik ve kinematik analizlerini incelemiştir. Fichter yaptığı bu çalışmalarla kendisinden sonraki araştırmacılara Stewart platform hakkında yol göstermiştir.

Merlet (1993), paralel manipülatörler üzerinde insan yaşamını kolaylaştırmak adına çalışmalarda bulunmuş ve yaptığı çalışmalarını detaylı şekilde anlatmıştır. İleri sürdüğü tezinde ağır yüklerin ve hassasiyetin dikkate değer olduğu durumlarda paralel

mekanizmaları kullanmayı ön plana çıkarmıştır. Örnek olarak ise ameliyatı gerçekleştiren cerrah yerine aynı duyarlılıkta bu görevi yerine getiren robotun kullanımı veya yük taşımacılığında yer alan hayvanların yerine robotun yer aldığını ifade etmiştir.

Gosselin (1995), dönel ve prizmatik eyleyicilerden oluşan üç serbestlik dereceli platformlar üzerinde çalışmalar gerçekleştirerek çalışma uzayı, ileri kinematik, ters kinematik, benzetim, tekillik ve tasarımlarını incelemiştir. Kullandığı programlar neticesinde grafik modellemesini oluşturmuştur.

Faugere ve Larza (1995), paralel mekanizmaları bağlantı biçimlerine ve eylem kısıtlılığına göre gruplandırmışlardır. Dafaoui (1998), önerdiği paralel mekanizmada kuvvet geri beslemeli model kullanarak çalışmalar gerçekleştirmiştir. Hunt (1983) ve Pritsschow (2002) savundukları paralel robot manipülatörlerin bulundukları konumlardaki noktalar ve doğrular arasındaki mesafeye göre işlev yapması gerektiğini belirtmişlerdir. Wang (2007), Stewart platform üzerinde yaptığı çalışmalarla endüstriyel alanda bu tasarımı önererek kolaylık sağlamıştır. Önerdiği her bir tasarım için farklı yapılandırmalar kullanmıştır.

Omran (2008) 6 serbestlik dereceli Stewart platform manipülatörün eklem uzayında denetimini gerçekleştirmiştir. Bu denetim ile kazançları ayarlanan bir PD kontrol yapısını sunmuştur. Denetim yapısının güvenilirliğini test etmek amacıyla üç boyutlu dairesel hareket benzetim deneyi yapmıştır.

Ulaş (2009), sistemin çalışma konumunu ve mafsalların taşıma kapasitesini belirleyebilecek şekilde paralel manipülatörlerin tasarımları üzerinde çalışma yapmıştır. Ayrıca iki farklı türde bulunan paralel mekanizmaları karşılaştırarak sistemler arasındaki çıkış davranışları incelemiştir.

Yang (2010), denetim sistemi üzerinde etkili 6 serbestlik dereceli Stewart-Gough paralel platformun doğrusal olmayan karakteristiğini dikkate alarak denetim performansını arttıracak ve kalıcı durum hatalarını giderecek yapı üzerinde çalışmıştır.

Zhu ve arkadaşları (2011), belirsiz karakteristiklere sahip ve harici bozucu etkileri azaltan kayma kipli kontrolüne dayanan 6 serbestlik dereceli Stewart platform manipülatörün tasarımı üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Ayrıca kayan kipli kontrolde meydana gelen salınımları azaltmak için de düzenlemelerde bulunmuşlardır.

Fraguela ve arkadaşları (2012), sadece konum değeri verildiğinde hareketli platformu dengede tutan 3 serbestlik dereceli Stewart platform manipülatörünü kaliteli bir denetim yapısı ile oluşturarak çalışmalar yapmışlardır.

Literatürde yapılan çalışmalar dikkate alındığında paralel mekanizmaların gün geçtikçe kullanımının arttığı görülmektedir. Bu çalışmaların insan hayatına kolaylık ve yararlılık sağlaması beklenmektedir.

Yapılan literatür araştırmasında farklı yapılarda bulunan Stewart platformun doğrusal olmayan kinematik probleminin çözümü için kullanılan farklı tekniklerin olduğu görülmektedir.

Nanua ve arkadaşları 6-3 kinematik yapısında bulunan Stewart platformunun ileri kinematik probleminin çözümü için geometrik yaklaşımları dikkate alarak doğrusal olmayan denklem ifadeleri elde etmişlerdir. Bu denklemlerin çözümü için değişken eleme yöntemine dayanan Bezout metodunu kullanmışlar ve 24. dereceye sahip tek polinom elde ederek platforma uygun konum ve yönelimlerini bulmaya çalışmışlardır (Nanua et al. 1990).

Liu ve arkadaşları 6-3 kinematik yapısında bulunan Stewart platformunun ileri kinematik analizi için üç tane doğrusal olmayan denklem ifadesi elde etmişlerdir. Bu denklemlerden elde edilen ortak köklerini çözüm olarak kabul edip platformun yapısı ile karşılaştırma yapmışlardır. Manipülatörün yapısı ile uyum gösteren bu çözüm kümesinin elemanları platformun konum ve yönelim için değerlerini ifade eden çözümler olarak kabul etmişlerdir (Liu et al. 1993).

Tarokh yapmış olduğu çalışmasında 6-6 kinematik yapısında bulunan Stewart platformunun ileri kinematik problemin çözümünü gerçek zamanlı olarak

değerlendirmiştir. Araştırmacı, yaptığı çalışmada platformun mevcut olan çalışma uzayında uç işlevcinin bulunduğu konumuna karşılık gelen bütün bacak boy değerlerini bir bilgi havuzu içinde muhafaza etmiştir. İleri kinematik için çalışma halindeki platformun bacak boylarına karşılık gelen uç işlevcinin konumunu, bu bilgi havuzundan alarak uygun olan çözümü için çevrim içi olarak hesaplama yapmıştır (Tarokh 2007).

Borras ve Thomas yayınlamış oldukları eserlerinde, Stewart platformunun bir çeşidi olan Zhang- Song platformunun ve Griffis-Duffy platformunun kinematik analizini mekanizma tekniklerinde kullanılan Δ dönüşüm bileşenlerini kullanarak tasarlamışlardır (Borras and Thomas 2009).

Wang ve arkadaşları, altı serbestlik dereceli Stewart platformunun ileri kinematik problemi için Nelder- Mead algoritmasını kullanarak platforma ait konum değişkenleri ile bağımsız parametreleri arasındaki ilişkiyi hesaplamışlardır (Wang et al. 2010).

Su ve arkadaşları 6 serbestlik dereceli Stewart platformunun ileri kinematik probleminin çözümünde genetik algoritmalar kullanarak elde ettikleri ifadeleri ve platformun yapısına uygun olmayan çözümleri açıklamaya çalışmışlardır (Su et al. 2002).

Seri ve paralel manipülatörlerin ters kinematik problemlerinin çözümü için genellikle yalnız bir mafsal değişkenine bağlı cebirsel eşitlikler üretilmeye çalışılmaktadır. Manipülatörlerin dizayn edilen parametrelerine bağlı olan bu cebirsel eşitlikler genellikle vektör cebiri metodu (Chase 1963), matris yaklaşımına dayanan (DH) Denavit-Hartenberg metodu (Denavit and Hartenberg 1955) ve geometrik yaklaşım (Duffy and Crane 1980) kullanılarak elde edilmektedir.

Uçuş simülatörleri için yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde; Domenico P. Coiro, Agostino De Marco, Fabrizio Nicolosi (2007), Napoli Üniversitesi'nde gerçekleştirdiği araştırmaları sonucunda uçuş simülasyon ortamı ve kontrol yüklemeli üretiminde meydana gelen son gelişmeleri hakkında bilgi vermiştir.

Ufuk Çoban (2010), ağ uçuş simülatörü için özelleştirilebilir uçuş gösterge birimi tasarımı konusunda tez çalışması yapmıştır. Bu tez çalışmasında mekanik göstergelerin

birbirinden bağımsız çalışmasından dolayı fazla yer kaplayarak uçağın ağırlığının artırmasına neden olduğu düşüncesiyle bilgisayar destekli ana uçuş göstergeleri üniteleri üzerinde çalışarak bu sorunu gidermeye çalışmıştır.

Mehmet Murat Aygün (2014), uçuş simülatörlerinin gelişimi için helikopter uçuş simülatörleri için uyarlanabilir yapıda kumanda yükleme sistemi geliştirilmesi başlığı adı altında tez çalışması yapmıştır. Bu çalışmasında helikopter uçuş simülatörleri için yüksek doğrulukta kumanda yükleme sisteminin tasarımını ve prototip üretimini gerçekleştirmiştir.

Şafak Tulumoğlu (2017), uçuş simülatörlerindeki dış dünya görsel veri tabanı çözünürlüğünün alçak uçuşta yükseklik ve hız algısına etkisi üzerine tez çalışması yapmıştır. Bu çalışmasındaki amacı uçuş simülatörlerindeki dış dünya görsel veri tabanının alçak irtifa uçuşlarındaki yükseklik ve hız algılamasına etkisini incelemektir.

Tez çalışmasının bir sonraki bölümü olan materyal ve yöntem kısmında Stewart platformun serbestlik derecesi, kinematik analizi, eylemciyi olarak kullanılan doğrusal motorların modellenmesi ve yörünge takip kontrolünün PID denetleyicisi ile gerçekleştirilmesi incelenmiştir.

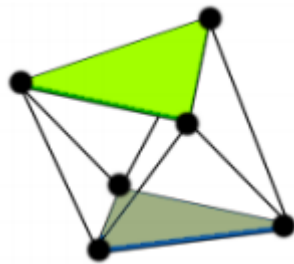
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde öncelikle paralel mekanizmalara ait farklı tasarımlarda bulunan yapıların isimlendirilmesine yer verilecektir. Paralel mekanizmalara ait tekillik ve çalışma uzayı kavramları hakkında açıklamalar yapılacaktır. Daha sonra paralel mekanizmalara ait serbestlik derecesinin nasıl hesaplanabileceği hakkında bilgiler sunulmuştur. Ardından genel kinematik hesapları hakkında bilgi verilerek bu tez aşamasında ele alınan sisteme ait ters kinematik analiz gerçekleştirilmiştir. Ardından sistemde kullanılan doğrusal motorlarının modellenmesi, transfer fonksiyonunun elde edilmesi ve yörünge kontrolünün PID denetleyicisi ile gerçekleştirilmesi hakkında bilgi verilecektir.

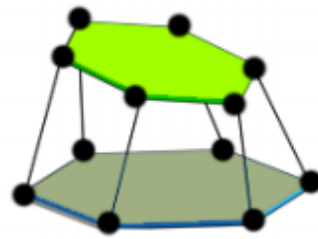
3.1.Paralel Mekanizmaların İsimlendirilmesi

Teknoloji ile birlikte hızla artan araştırmalar ve paralel mekanizmasının (PM) kullanım alanlarının oldukça geniş bir alana yayılması ile birlikte çok sayıda ve farklı yapıda paralel mekanizmalar ortaya çıkmıştır. Xiao-Shan Gao (2003) yaptığı araştırmada 3850 tane farklı yapıda PM olduğunu ifade etmiştir. Bu farklı tasarımlarda bulunan yapıların isimlendirilmesi sistem içerisinde bulunan eklem türlerine ve bağ sayılarına göre yapılır (Elmas Anlı ve Hüseyin Alp 2005).

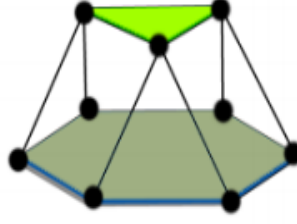
Mekanizma adlandırılırken bağlar hareketsiz platforma a, hareketli platforma b noktadan bağlı ise mevcut yapı a-b'lik bir SPM olarak değerlendirilir. Örneğin bacaklar üst platformda ikişer kümeler halinde bulunup üç noktadan bağlanmış ise 6-3 SPM yapısında bulunan sistem olarak adlandırılır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3. 1 (a)3-3'lük PM mekanizması (b) 6-6'lük PM mekanizması (c) 6-3'lük PM mekanizması (Öztürk 2019)

Şekil 3.1'de 3-3, 6-6, 6-3'lük PM mekanizma çeşitleri ve bağlantı biçimlerinin gösterimi yapılmıştır.

U üniversal, P prizmatik, R dönel, C silindirik, S ise küresel mafsallar için kullanılan semboller olmak üzere, eklem çeşitlerine göre adlandırma yaparken mafsal adlandırmaları dikkate alınarak prizmatik eklemlere sahip bacakları, tabana üniversal, üst platforma ise küresel mafsallarla bağlı bir mekanizma UPS eklemli PM olarak isimlendirilir. Uzunlukları her iki platforma da küresel mafsallarla bağlı bir mekanizmaya ise SPS ismi verilmektedir.

3.2.Paralel Mekanizmaların Çalışma Uzaı ve Tekillik

Paralel mekanizmalar için çalışma uzaı, hareketli platformun ağırlık merkezinin tarayabildiğı uzaı olarak ifade edilir. Çalışma uzaının boyutları; robotun serbestlik derecesi, eklem hareket sınırları ve uzunlukların boyutları gibi geometrik ve kinematik parametrelerine bağlı olarak açıklanır. Başka bir şekilde ifade edilecek olursa, çalışma uzaı hareketli ve hareketsiz parçaların birleşme yerleri ile bacak boy değerlerine bağlı olarak ağırlık merkezinin hareketinin tarayabileceğı konum olarak ifade edilir. SPM'nin çalışma uzaıları tasarım yapılarına yani her bacağın uzunluk limitine ve bağların hareket limitine bağlı olarak mekanik ve geometrik özellikleri ile ilgilidir.

Çalışma uzayının belirlenmesinde genel geçer bir bakış biçiminin olmamasının nedeni düz kinematik denklemlerin çalışma uzayının hesaplanmasında kullanılması ve bunların gerçekten karışık ifade edilen denklemler olmasıdır. Son zamanlarda elde edilen çalışmalar sonucunda PM'lerin çalışma uzayı analizi iki esas grup altında toplanmıştır. Bunlar dönme ve öteleme çalışma uzayı analizleridir. Öteleme çalışma uzayı analizi yapılırken dönme sabit tutulup hareketli platformun x, y ve z eksenlerinde ötelenmesiyle ifade edilir. Yapılan bu teknik ile ötelemelerin eriştiği limitleri belirten konumsal çalışma uzayı analizi elde edilmiş olur. Dönme çalışma uzayı analizi ise ağırlık merkezinin sabit olduğu durumlarda hareketli platformun x, y ve z eksenlerinde dönmesiyle açıklanır (Elmas Anlı 2005). Bu durumda ise yönelmelerin eriştiği limitleri belirten yönelme çalışma uzayı belirtilmiş olur. Bacakların üst platforma göre hızlarıyla ilgili olan transformasyon matrisi; SPM'lerinin tasarımı, boyutu, şekli ve çalışma uzayının simetrisini etkileyen ifadedir. Jacobian matrisi olarak da ifade edilen bu matris 6 SD'li bir mekanizmada 6x6'lık matris olup hareketli platformun doğrusal hız ile altı giriş eklemine doğrusal ve açısal hızını birbiriyle bağdaştırır. Bu 6 SD' ne bağlı 6 boyutlu çalışma uzayının grafik olarak gösterilememesi çalışma uzayının belirlenmesindeki diğer uğraştırıcı yön olarak karşımıza çıkmaktadır. Çalışma uzayı grafiksel olarak 6 boyutlu uzayın daha düşük boyutlu alt kümeleri halinde ifade edilebilir. İfade edilen bu alt kümelerin oluşumunda izlenilecek yöntemde ise 3' ü öteleme 3' ü dönme olmak üzere 6 serbestliğe sahip sistemin bu serbestliklerden üçü sabit tutulur ve o aşamada sabit olmayan diğer üç boyutun çalışma uzayını nasıl etkilediği belirtilerek açıklanır. Lee et al. (2002) yaptığı araştırmada hareketlendiriciyi üst platformun ağırlık merkezi ile bacakların hareketli platform ile birleştiği yer arasında uygulandığı bir tasarım gerçekleştirmiştir. Böylece tipik SPM'ye göre çalışma uzayını maksimize ederek 1,5 kat daha iyi bir sonuç veren uygulama kullanmıştır.

Tekillik, paralel mekanizmaların tasarımı, analizi, hareket alanı ve kontrolündeki en önemli problemlerden bir tanesidir. PM'in kapalı sistemlerinden ötürü hareketleri sınırlıdır ve sahip olunan çalışma uzayından dolayı tekillikler meydana gelir. Tekillik ifadesi çalışma uzayı içinde manipülatörün kontrol edilemediği konumlar şeklinde açıklanabilir (Dasgupta 1998). SPM'nin çalışma uzayındaki tekillikleri üzerine yapılan araştırmalarda bacak uzunluklarının ve mafsalların dönme açılarının limitleri kısıt olarak kullanılmış, müsaade edilen üç ekseninde dönme açıları ve bacakların kesişip

kesişmediği araştırılmıştır (Sait N. Yurt 2002). Tekillik konusunda literatürdeki yapılan çalışmaların öncülleri Hunt tarafından ortaya atılmıştır. Bu yapılan çalışmada platformun altı bacağı aynı anda kesen bir doğru etrafında dönmesi durumunda tekil bir konumun olduğu belirtilmiştir. Diğer bir çalışmada Fitcher alt ve üst platformun paralel olması durumunda, üst platformun z-ekseni etrafında $\pm 90^\circ$ döndürülmesinin tekil bir konum oluşturduğu tezini ortaya koymuştur. Gosselin ve Angles 1990'da SPM'lerde genel olarak 3 çeşit tekilliğin oluşabileceğini ifade etmiştir (Gosselin C. 1990). Çalışma uzayının ve optimum yörüngenin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalar son zamanlarda daha fazla önem kazanmıştır (Collins C. 1995; Kim D. 1999).

3.3.Uçuş Simülatörü Olarak Kullanılan Paralel Mekanizmaların Serbestlik Derecelerinin Belirlenmesi

Şekil 3.2'de bu tez çalışmasında kullanılan prototip uçuş simülatörünün bir görüntüsü verilmiştir. Bu yapıya bakıldığında alt (sabit) ve üst (hareketli) platformlar, boyları prizmatik eklemler vasıtasıyla değişebilen (aktif mafsallı) altı bacak ile birbirine bağlı ve bu bağlantıyı meydana getiren mafsallardan (pasif mafsallı) meydana gelmektedir.



Şekil 3. 2 Tez çalışmasında kullanılan paralel mekanizma

Serbestlik derecesi bir mekanizmanın 3 boyutlu uzayda konum ve yönelimini belirleyebilmek için gerekli olan parametre sayısını ifade etmektedir. Literatürde

genellikle paralel manipülatörlerin serbestlik derecelerinin hesaplayabilmek için denklem 3.1 ile ifade edilen Grübler denklemi kullanılmaktadır.

$$F = \lambda (n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i - f_p \quad (3.1)$$

Burada;

λ : Belirlenen çalışma uzayının serbestlik derecesi

n : Sabit bağlantı dahil mekanizmanın içindeki bağlantıların sayısı (Sistemdeki kinematik bağ sayısı)

j_i : i . serbestlik dereceli eklem sayısı.

f_i : Eklemlerin serbestlik derecesi.

f_p : Mekanizmadaki kısıtlama sayısı.

F : Mekanizmanın serbestlik dereceleri.

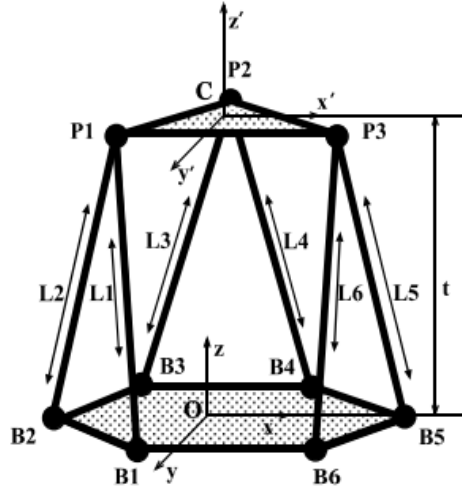
λ sembolünün değeri düzlemsel koordinat sistemlerinde 3 olarak alınırken, uzaysal koordinat sistemlerinde ise 6 olarak alınmaktadır (Uzaysal mekanizmalar için $\lambda = 6$ ve düzlemsel mekanizmalar için $\lambda = 3$). Söz konusu paralel manipülatörlerde alt ve üst platformun uzuvları da dahil olmak üzere 14 adet uzuv ve 18 adet mafsall bulunmaktadır. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi alt ve üst tablaya yerleştirilmiş olan mafsallar küresel mafsall olduğundan bu mafsallar 3 dönme serbestliğine sahiptir. Prizmatik mafsallın serbestlik derecesi ise 1’e eşittir. Prizmatik ve küresel mafsallar art arda geldiğinden manipülatör için 6 adet kısıtlama söz konusu olmaktadır. Bütün bu değerler denklemde yerine yazıldığında paralel manipülatörün serbestlik derecesi 6 olarak belirlenmektedir. Platformunun 6 serbestlik derecesi x, y, z eksenlerinde öteleme ve sırasıyla bu eksenlerin etrafında ϕ , θ , ψ açılarıyla yapılan dönme hareketleridir.

3.4. Uçuş Simülatörlerinde Kullanılan Stewart Platformunun Kinematik Analizi

Kinematik analiz, mekanizmanın hareketinin gerçekleşmesi sırasında bu harekete sebep olan kuvvet ve torkun dikkate alınmadığı bir analiz olarak tanımlanmaktadır. Seri ve paralel mekanizma ayrımı yapılmaksızın, mekanizmaların kontrolünü gerçekleştirebilmek için öncelikle ileri (düz) ve ters kinematik analizinin yapılması gerekmektedir. İleri (düz) kinematik analizde, bacak boylarındaki değişim değerleri bilindiğinde, bu değerlere göre üst platformun alt tabana göre gerekli ötelenme

ve yönelme değerlerini hesaplanması gerekmektedir. Ters kinematik analizde ise üst platformun yönelim ve ötelenme değeri bilindiğinde, bu değerlere göre gerekli olan bacak uzunluğunu hesaplanması gerekmektedir. İleri (düz) kinematik analizi paralel yapıda bulunan sistemler için birden fazla sonuç vermesinden dolayı hesaplama yönünden zorlayıcı, seri sistemler için ise daha kolaydır. Ters kinematik analizinde ise paralel sistemler için kolay olup seri sistemler de zorlayıcıdır. İleri (düz) kinematik analizi genellikle robot manipülatörlerinin çalışma uzayının belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Bu tez aşamasında genel bir 6x6'lık Stewart platform mekanizmasının ters kinematik analizi üzerinde detaylı şekilde yer verilecektir.



Şekil 3. 3 Stewart platform mekanizmasında bacak uzunluğu gösterimi (Alp 2007)

Şekil 3.3'de mekanizmanın ters kinematik analizi gerçekleştirilirken hesaplanacak olan bacak uzunluğunun gösterimi verilmiştir. Bu analizde amaç, üst platform için tanımlanan öteleme ve dönme hareketleri için bacak boylarının olması gereken uzunluk değerlerinin hesaplanmasıdır. Üst platformun öteleme konumu x, y ve z eksenleri ile tanımlanırken, dönme konumu ise Euler açılarına veya global koordinatlar olarak adlandırılan açılara dayanan φ , θ ve ψ şeklinde tanımlanır. Bu açılar;

z- eksen takımı etrafında dönme ψ (sapma)

y-eksen takımı etrafında dönme θ (yunuslama)

x-eksen takımı etrafında dönme φ (yuvarlanma)

şeklinde tanımlanmaktadır.

Bununla birlikte hareketsiz alt platformdaki koordinatlar, referans eksen takımı olarak adlandırılır ve x, y ve z eksen takımı şeklinde ifade edilir. Hareketli üst platformdaki eksen takımına bağlı olan modele ise platform eksen takımı şeklinde adlandırılır ve buna ortagonal x', y' ve z' eksen takımı mevcuttur. z koordinatı etrafındaki dönme eylemi neticesinde oluşan rotasyon matrisi ile denklem (3.2) de görüldüğü gibi açıklanır.

$$R_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Bu eylemler y ve x koordinatları için de gerçekleştirilerek:

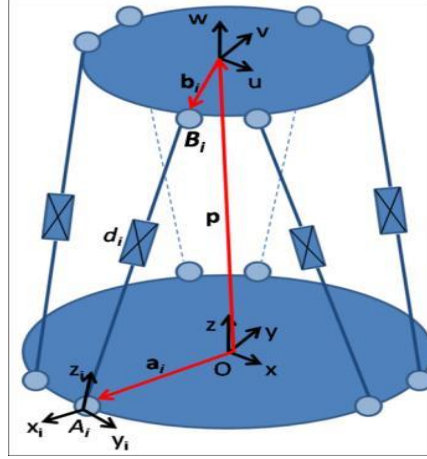
$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$R_x(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

şeklinde ifade elde edilir. Denklem (3.2), (3.3) ve (3.4) kullanılarak genel rotasyon (dönüşüm) matrisi denklem (3.5) gibi ifade tanımlanır:

$${}^A R_B = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \cos \varphi + \cos \psi \sin \theta \sin \varphi & \sin \psi \sin \varphi + \cos \psi \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \varphi + \sin \psi \sin \theta \sin \varphi & -\cos \psi \sin \varphi + \sin \psi \sin \theta \cos \varphi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Böylece denklem (3.5)' da elde edilen rotasyon matrisi tanımlanır.



Şekil 3. 4 Stewart platform mekanizmasının eksen takımı (Albuquerque 2013)

Şekil 3.4 de ise bir Stewart platform mekanizmasının eksen takımları ve bu eksenleri birbirine bağlayan vektörler gösterilmiştir. Üst platformda hareketliliği sağlayan x, y ve z eksenlerine sırasıyla u, v ve w birim vektörleri tanımlanmıştır. Bu doğrultuda rotasyon matrisi denklem 3.6'daki gibi yazılabilir:

$${}^A R_B = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_z & v_z & w_z \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Rotasyon matrisinin birimleri ortogonal koşullarını sağlamalıdır:

$$u_x^2 + u_y^2 + u_z^2 = 1 \quad (3.7)$$

$$v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 = 1 \quad (3.8)$$

$$w_x^2 + w_y^2 + w_z^2 = 1 \quad (3.9)$$

$$u_x v_x + u_y v_y + u_z v_z = 0 \quad (3.10)$$

$$u_x w_x + u_y w_y + u_z w_z = 0 \quad (3.11)$$

$$v_x w_x + v_y w_y + v_z w_z = 0 \quad (3.12)$$

$a_i = [a_{ix} \ a_{iy} \ a_{iz}]^T$ ve ${}^B b_i = [b_{iu} \ b_{iv} \ b_{iw}]^T$ sırasıyla A ve B koordinat çerçevelerinde A_i ve B_i noktalarının konum vektörlerini ifade etmektedir. Yani a_i ifadesi, hareketsiz platformda bulunan A_i noktasının pozisyon vektörlerini belirtmektenken ${}^B b_i$ ifadesi ise hareketli platformda bulunan B_i noktasının pozisyon

vektörlerini temsil etmektedir. Bu ifadelerden yola çıkarak ve şekil 3.4 üzerinden kapalı döngü denklemi denklem 3.13 tanımlanabilir:

$$\overline{A_i B_i} = p + {}^A R_B {}^B b_i - a_i \quad (3.13)$$

Burada p hareketsiz alt platformla bağlantılı olan üst platformun yerini ifade eden pozisyon vektörüdür. $\overline{A_i B_i}$ vektörü, kendisinin transpozu (devriği) ile noktasal çarpım yapıldığı takdir de ters kinematik için aranan bacak uzunluğu aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$d_i^2 = [p + {}^A R_B {}^B b_i - a_i]^T [p + {}^A R_B {}^B b_i - a_i] \quad i=1,2,3...6 \quad (3.14)$$

Denklem de verilen ifadenin açılımını yaparsak:

$$d_i^2 = p^T p + [{}^B b_i]^T [{}^B b_i] + a_i^T a_i + 2p^T [{}^A R_B {}^B b_i] - 2p^T a_i - 2[{}^A R_B {}^B b_i]^T a_i \quad (3.15)$$

$$d_i = \sqrt{p^T p + [{}^B b_i]^T [{}^B b_i] + a_i^T a_i + 2p^T [{}^A R_B {}^B b_i] - 2p^T a_i - 2[{}^A R_B {}^B b_i]^T a_i} \quad (3.16)$$

Eşitliğinden denklem (3.16) bulunur. Bu denklem her bir bağlantı için altı defa tekrarlanır ve ters kinematik analiz gerçekleştirilerek bacak uzunluğu elde edilir.

Bu tez çalışmasında prototip uçuş simülâtörünün bacak boy değerlerinin hesaplanması için MATLAB yazılımından yararlanılmış ve denklem 3.16'yi, verilen değerlere göre çözebilen bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen bu algorithmada hareketsiz alt platformun köşe noktalarının referans eksen takımına göre konum vektörleri ve hareketli üst platformun köşe noktalarının yine hareketli platformun eksen takımına göre olan konum vektörleri bilindiği kabul edilmiştir. Dönme matrisi ve öteleme vektöründen yararlanılarak hareketli platformun köşe noktalarının konum vektörleri hareketsiz platformun referans eksen takımına göre bulunmuştur. Alt ve üst platformun köşe noktalarının konum vektörleri arasındaki normdan bacak boy değerleri hesaplanmıştır. Matlab ortamında yazılan kinematik program kodları Ek-1 kısmında sunulmuştur.

3.5.Uçuş Simülatörlerinde Kullanılan Doğrusal Motorlarının Modellenmesi ve Transfer Fonksiyonun Elde Edilmesi

Simülatörlerin verilen konum veya yönelimi gerçekleştirebilmesi için tahrik mekanizması olarak kullanılan doğrusal motorlarının hareket ettirilmesi gerekmektedir. Simülatörlerin tasarımında bu tahrik işlemi kullanılan altı tane doğrusal motoruyla gerçekleştirilmektedir. Yörünge takip kontrolünü gerçekleştirmek için ilk olarak sistem hakkında bilgi alınıp matematiksel modelini yani transfer fonksiyonunu tanımlamak gerekmektedir. Bu tip sistemlerde kullanılan motorlar için giriş büyüklüğü gerilim olarak tanımlanırken çıkış büyüklüğü motorun milinden alınan doğrusal hız veya konum büyüklüğüdür. $\dot{x}_l(s)$, yük mili hızının Laplace dönüşümü; $V_m(s)$, motor giriş voltajının Laplace dönüşümü, K kararlı hal kazancı, τ zaman sabiti ve s Laplace operatörü olmak üzere bu tip sistemlerin birinci dereceden transfer fonksiyonları denklem 3. 17'deki gibi tanımlanmaktadır.

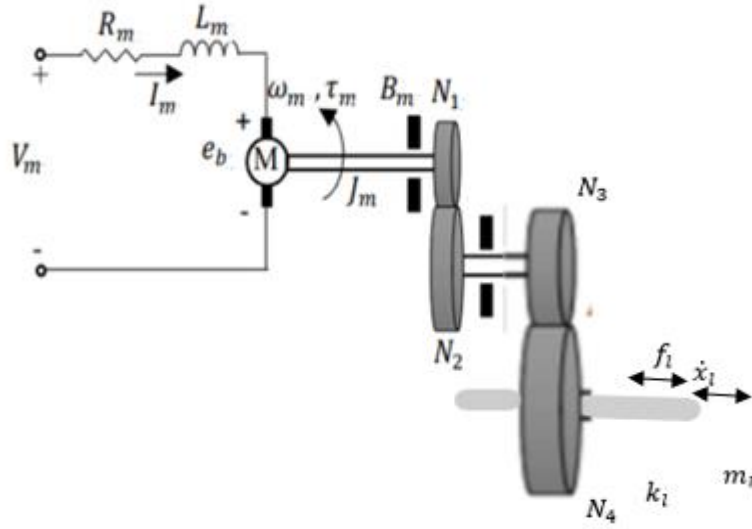
$$\frac{\dot{x}_l(s)}{V_m(s)} = \frac{K}{(\tau s + 1)} \quad (3.17)$$

Söz konusu transfer fonksiyonu elde edebilmek için bu çalışmada bir DC motorun elektriksel ve mekaniksel eşdeğer devrelerinden yararlanılmıştır.

3.5.1. Motorun Elektriksel Eşitliğinin Elde Edilmesi

DC motor armatür devre şeması ve dişli takımı şekil 3.5 de gösterilmektedir. Motor bobinlerden oluştuğu için dirence ve endüktans değerine sahiptir.

R_m : motor direnci, L_m : endüktans, k_m : geri-emf sabiti



Şekil 3. 5 DC Motor Armatür Akımı ve Dişli Takımı

Zıt-emk voltajı $e_b(t)$, motor milinin hızına w_m 'ye ve motorun zıt-emk sabitine k_m ' ye bağlıdır ve zıt-emk gerilimi denklem 3.18'deki gibi ifade edilmektedir.

$$e_b(t) = k_m w_m(t) \quad (3.18)$$

Devreden Kirchhoff' un gerilim yasası uygulanarak aşağıdaki denklem elde edilir:

$$V_m(t) - R_m I_m(t) - L_m \frac{dI_m(t)}{dt} - k_m w_m(t) = 0 \quad (3.19)$$

Motor endüktansı yani L_m motor direncinden çok daha küçük değere sahip olduğu için ihmal edilebilir. Böylece denklem (3.19) denklem (3.20)'e dönüşür.

$$V_m(t) - R_m I_m(t) - k_m w_m(t) = 0 \quad (3.20)$$

Armatür akımı olan $I_m(t)$ ' yi yani motor akımını elde etmek için denklem (3.19) denklem (3.21) şeklinde düzeltilebilir.

$$I_m(t) = \frac{V_m(t) - k_m w_m(t)}{R_m} \quad (3.21)$$

3.5.2. Motorun Mekaniksel Eşitliğinin Elde Edilmesi

Bu kısımda, uygulanan motor torkuna τ_m 'ye göre yük milinin hızını $\dot{x}_l$ 'yi açıklayan hareket denklemi ifade edilmektedir. Newton'un yasasına göre öteleme hareketi yapan cisimler için $f = m.a$ (f : kuvvet, m :kütle ve a : ivme) ifadesi geçerliyen denklem (3.22) Newton' un ikinci hareket yasasına göre dönme hareketi yapan cisimler için aşağıdaki şekilde ifade edilir. Yani kuvvet yerine torkun, kütle yerine ataletin ve ivme yerine açısal hızın geldiğini belirtir.

$$j. \alpha = \tau, f = m.a \quad (3.22)$$

Bu denklemde j cismin eylemsizlik momenti, α sistemin açısal ivmesi ve τ yüzeye uygulanan torkların toplamıdır. Şekil 3.5 de gösterildiği gibi, DC dişli takımı motor mili B_m ve yük şaftı k_l üzerine etki eden viskoz sürtünme ile birlikte dikkate alınır. Çıkış tarafında tork elde etmek için ataletten kaynaklanan tork değerini ve viskoz sürtünmeden kaynaklanan bozucu torku yenmemiz gerekir. Yani amaç girişten gerilim verip çıkıştan açısal hız ya da tork elde etmektir.

$$m_l \frac{d\dot{x}_l(t)}{dt} + k_l \dot{x}_l(t) = \tau_l(t) \quad (3.23)$$

Burada, J_l yükün atalet momenti, τ_l ise yüke uygulanan toplam tork ifadesidir. Mil tarafından aynı şekilde tork denklemini ifade edecek olursa denklem (3.24) elde edilir. Yani denklem, milden tork elde ederek dönmesi için milden kaynaklanan ataleti, viskoz sürtünmeyi ve yük tarafındaki torkun mile aktarılmış halini yenmemiz gerektiğini ifade eder.

$$J_m \frac{dw_m(t)}{dt} + B_m w_m(t) + \tau_{ml}(t) = \tau_m(t) \quad (3.24)$$

Burada, J_m motor mil atalet momenti ve τ_{ml} yük torkundan motor miline etki eden tork kavramıdır. Yük torkundan motor miline etki eden tork değeri şu şekilde yazılabilir:

$$\tau_l(t) = \eta_g K_g \tau_{ml}(t) \quad (3.25)$$

Burada K_g , dişli oranı ve η_g , dişli kutusu verimliliğidir. Doğrudan DC motoruna monte edilen tam dişli kutusu şekil 3.5 de N_1 ve N_2 dişlileriyle temsil edilir ve mil tarafındaki çark oranı şu şekildedir:

$$K_{gi} = \frac{N_2}{N_1} \quad (3.26)$$

Bu, iç dişli kutusu oranı yani yük tarafındaki çark oranıdır. Motor dişlisi N_3 ve yük dişlisi N_4 doğrudan birbirine geçmiştir.

$$K_{ge} = \frac{N_4}{N_3} \quad (3.27)$$

DC motor dişli takımının çark oranı şu şekilde ifade edilir:

$$K_g = K_{ge} K_{gi} \quad (3.28)$$

Böylece yükten mil tarafına aktarılmış olan tork değeri:

$$\tau_{ml}(t) = \frac{\tau_l(t)}{\eta_g K_g} \quad (3.29)$$

Denklem (3.30) yük tarafının açısal konum olarak bir tur dönmesi için motor milinin açısal konum K_g kez dönmesi gerektiğini gösterir.

$$\theta_m(t) = K_g \theta_l(t) \quad (3.30)$$

Motor milinin açısal hızı w_m ve yük milinin açısal hızı $\dot{x}_l$ arasındaki ilişkiyi denklem (3.30)'ın zaman türevini alarak bulabiliriz:

$$w_m(t) = K_g \dot{x}_l(t) \quad (3.31)$$

Denklem (3.24)'de bulduğumuz ifadeleri yerine yazarsak yük milinin hareketine uygulanan motor torkuna göre tanımlayan diferansiyel denklemini bulmak için denklem (3.34) haline getirilir.

$$J_m K_g \frac{d\dot{x}_l(t)}{dt} + B_m K_g \dot{x}_l(t) + \frac{J_l \left(\frac{d\dot{x}_l(t)}{dt} + k_l \dot{x}_l(t) \right)}{\eta_g K_g} = \tau_m(t) \quad (3.32)$$

Katsayıları yük mil hızı ve ivme cinsinden toplandığında denklem (3.33)' ye dönüşür.

$$(\eta_g K_g^2 J_m + J_l) \frac{d\dot{x}_l(t)}{dt} + (\eta_g K_g^2 B_m + k_l) \dot{x}_l(t) = \eta_g K_g \tau_m(t) \quad (3.33)$$

Aşağıdaki terimlerin tanımlayarak denklem (3.33) ifadesini sade hale getirirsek denklem (3.36)' de ki mekaniksel ifadeye dönüşür.

$$J_{eq} = \eta_g K_g^2 J_m + J_l \quad (3.34)$$

$$B_{eq} = \eta_g K_g^2 B_m + k_l \quad (3.35)$$

$$J_{eq} \frac{d\dot{x}_l(t)}{dt} + B_{eq} \dot{x}_l(t) = \eta_g K_g \tau_m(t) \quad (3.36)$$

3.5.3. Motorun Elektriksel ve Mekaniksel Denklemlerinin Birleştirilmesi

Uygulanan motor gerilimi açısından yük mili hızını temsil eden bir ifade elde etmek için elektriksel ve mekaniksel denklemler bir araya getirilmiştir. Laplace dönüşümü gerçekleştirerek transfer fonksiyonu temsil edilir. Milde oluşan tork uygulanan gerilimle orantılıdır ve şu şekilde tanımlanır:

$$\tau_m(t) = \eta_m k_t I_m(t) \quad (3.37)$$

Burada, k_t akım-tork sabiti, η_m motor verimliliği ve I_m armatür akımıdır.

Denklem (3.21)'de ki armatür akımını denklem (3.37)'e uygularsak motor torkunu bulabiliriz:

$$\tau_m(t) = \frac{\eta_m k_t (V_m(t) - k_m \omega_m(t))}{R_m} \quad (3.38)$$

Bunu V_m ve $\dot{x}_l$ cinsinden ifade etmek için, denklem (3.31) kullanılarak denklem (3.38) denklem (3.39)' e dönüşür.

$$\tau_m(t) = \frac{\eta_m k_t (V_m(t) - k_m K_g \dot{x}_l(t))}{R_m} \quad (3.39)$$

Denklem (3.39) 'ü denklem (3.36) da yerine koyulduğunda aşağıdaki denklem elde edilir:

$$J_{eq} \left(\frac{d}{dt} \dot{x}_l(t) \right) + B_{eq} \dot{x}_l(t) = \frac{\eta_g K_g \eta_m k_t (V_m(t) - k_m K_g \dot{x}_l(t))}{R_m} \quad (3.40)$$

Terimleri parantez değişkenine göre toplarsak ve sabit katsayılarla sadeleştirirsek denklem aşağıdaki gibi olur. Daha sonra Laplace dönüşümü yaparak transfer fonksiyonu elde edilir.

$$\left(\frac{d}{dt} \dot{x}_l(t) \right) J_{eq} + \left(\frac{k_m \eta_g K_g^2 \eta_m k_t}{R_m} + B_{eq} \right) \dot{x}_l(t) = \frac{\eta_g K_g \eta_m k_t (V_m(t))}{R_m} \quad (3.41)$$

$$B_{eq,v} = \frac{\eta_g K_g^2 \eta_m k_t k_m + B_{eq} R_m}{R_m} \quad (3.42)$$

$$A_m = \frac{\eta_g K_g \eta_m k_t}{R_m} \quad (3.43)$$

$$\left(\frac{d}{dt} \dot{x}_l(t)\right) J_{eq} + B_{eq,v} \dot{x}_l(t) = A_m V_m(t) \quad (3.44)$$

Böylece transfer fonksiyonu aşağıdaki hale gelir.

$$\frac{\dot{x}_l(s)}{V_m(s)} = \frac{A_m}{(J_{eq}s + B_{eq,v})} \quad (3.45)$$

Yukarıdaki denklemin denklem (3.17)' da ki transfer fonksiyonu haline gelmesi için $B_{eq,v}$ ' ye her ifade bölünür. Böylece τ ve K ifadeleri bulunur.

$$\tau = \frac{J_{eq}}{B_{eq,v}} \quad (3.46)$$

$$K = \frac{A_m}{B_{eq,v}} \quad (3.47)$$

Bu tez çalışmasında kullanılan prototip uçuş simülatörünün katalog bilgilerinden yararlanılarak $K=1.53$ rad/s ve $\tau=0.0253$ olarak hesaplanmıştır.

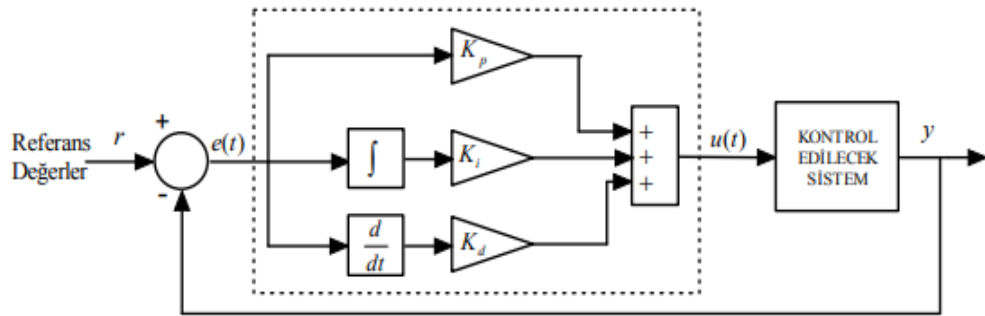
3.6. Uçuş Simülatörlerinin Yörünge Kontrolünün PID Kontrol ile Gerçekleştirilmesi

Stewart platform mekanizmasında yörünge denetimi, yapının verilen komuta gelmesi için hareketli üst platformun konum ve yöneliminin bacaklar vasıtasıyla takibinin gerçekleşmesi olayıdır. Stewart platformun doğrusal olmayan dinamiğe sahip olması, eyleyicilerde meydana gelen sürtünme etkisi, eklemler arasındaki dinamik etkileşim, sistem belirsizlikleri ve yük değişimlerinden dolayı sistem kontrolünün doğru bir şekilde yapılması oldukça zordur. Meydana gelen tüm bu bozucu etkilerinin en aza indirgenmesi için doğrusal veya doğrusal olmayan kontrol yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Bunlardan PD ve PID kontrol, hesaplamalı tork kontrol, uyarlamalı kontrol, bulanık mantık kontrol, ters dinamik kontrol, kayma kipli kontrol ve yapay sinir ağı kontrol şeklinde karşımıza çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında manipülatörün kontrol yöntemlerinden, yörünge kontrolü için yapılan tek girişli tek çıkışlı PID kontrol yöntemi kullanılacaktır.

Platform kontrol tasarımında üzerinde durulması gereken konulardan biri, kontrol yönteminde mevcut bulunan seçenekler arasında yapılacak olan yöntemin tercih edilmesidir. Seçenekler arasında oransal (P), oransal + türev (PD), oransal + integral (PI) ve oransal + integral + türev (PID) gibi tasarımlar yer almaktadır. Endüstriyel alanlarda en çok tercih edilen geri beslemeli kontrolör PID kontrol yöntemidir. Bu kontrol yönteminin ön planda tutulmasının nedeni ise sistemin cevap hızı, kararlılığı ve de ekstra serbestlik derecesine olanak tanıyabilmesi gibi avantajları bünyesinde bulunmasından kaynaklanmaktadır. PID algoritması sistemin kontrolünde, büyük hassasiyetle kontrolü gerçekleştirme, sönümlemeyi artırma ve de izleme hatasını azaltma gibi durumlarda iyileştirilmiş performans için kontrol yapısını üretecek kontrol hatası üzerinde etkili olan oransal, integral ve türevsel parametrelerin doğrusal olmayan birleşimi kullanılır.

PID denetleyicisinin verimliliğini etkileyen PID kontrol katsayıları olarak ifade edilen K_p oransal, K_i integral ve K_d türev kazanç değerleridir. Stewart platform mekanizmasında yüksek performansla yörünge takip denetiminde verilen komut çerçevesinde gerçekleşmesi için bu katsayıların uygun değerlerde seçilmesi gerekir. Bu değerler ne kadar iyi seçilirse hata sinyali o kadar en düşük seviyeye indirgenmiş olur. PID kontrol yönteminde hata sinyali $e(t)$ dediğimiz kavram ters kinematik analizi sonucu elde etmiş olduğumuz bacak referans uzunluğu ile robotun gerçekleştirmiş olduğu bacak uzunluğu arasındaki fark ifadesidir.



Şekil 3. 6 Yörünge takip denetleyici tasarımı (Karahan 2012)

Sisteme ait yörünge takip kontrolünü gerçekleştirmek için oluşturulan kontrol blok diyagramı, Şekil 3.6'da gösterilmektedir.

PID kontrolör tasarımı, oransal (Proportional), türev (Derivative) ve integral (Integral) olan üç kontrolörün birleşiminden meydana gelmektedir. Referans değeri ile meydana gelen çıkış değeri arasındaki fark hata $e(t)$ değerini verir. Bu hata PID kontrolöre yönlendirilerek hatanın hem türevi hem de integrali hesaplanır. Kontrol edilen mekanizmanın girişine uygulanılacak olan kontrol sinyali K_p ile $e(t)$ hata değeri, K_i ile $e(t)$ hata değerinin integrali K_d ile $e(t)$ hata değerinin türevi çarpımlarının toplamına eşittir.

Çizelge 3. 1 PID denetleyicilerinin karşılaştırılması

Denetleyici	Yükselme zamanı	Aşım	Oturma zamanı	Kalıcı durum hatası
K_p	Azaltır	Artırır	Az artırır	Azaltır
K_i	Biraz azaltır	Artırır	Artırır	Yok eder
K_d	Biraz değiştirir	Azaltır	Azaltır	Çok az etkiler

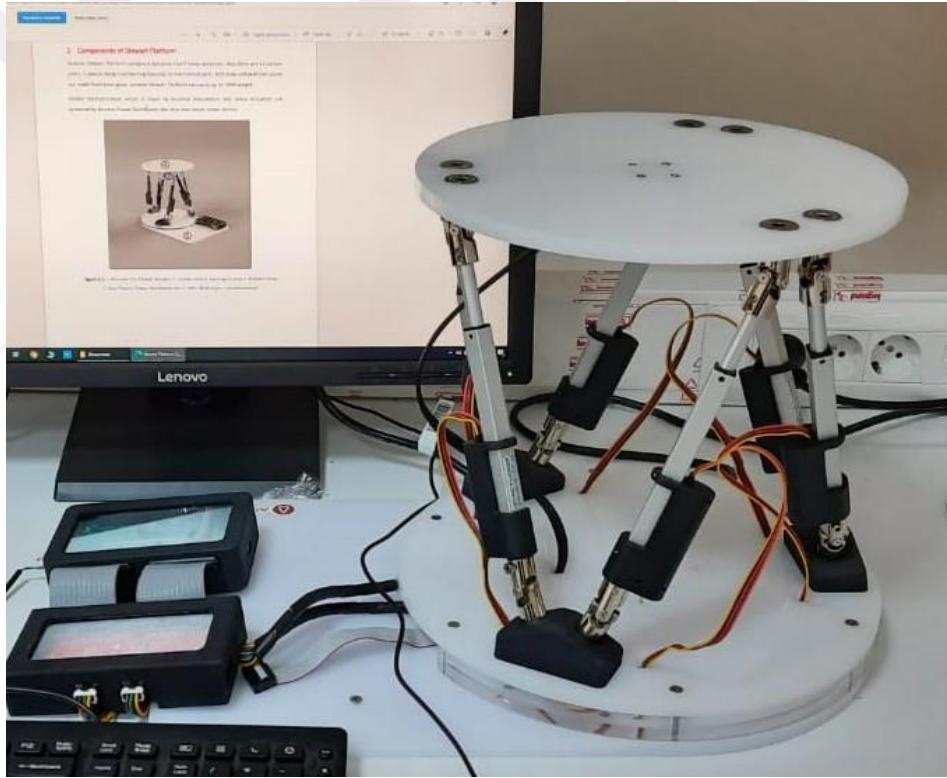
Çizelge 3.1 de PID denetleyicisinde kullanılan kazanç değerlerinin sistem üzerine olan etkilerini göstermektedir.

Kontrol sisteminin hedefinde referans bacak uzunlukları ($l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$), ters kinematik bloğu ile hesaplanarak hareketli platformun verilen yörüngesinden ($x, y, z, \varphi, \theta, \psi$) elde edilen verilerin arasında karşılaştırma yapmaktır. Yapılan karşılaştırma sonucunda elde edilen fark kontrolöre yönlendirilerek yapı kontrol altına alınmaya çalışılır. Böylelikle yörünge takip performansını gösteren kontrolör tasarımı gerçekleştirilir.

Tez çalışmasında yörünge takip denetimi için hem MATLAB/Simulink programında gerçekleştirilen hem de gerçek zamanlı olarak yapılan denetleyici tasarımına yer verilmiştir. Yapılan bu tasarımlardan MATLAB/Simulink programına ait benzetimleri ve gerçek zamanlı konum denetimine ait benzetimleri, tasarımları araştırma bulguları ve tartışma bölümünde verilmiştir.

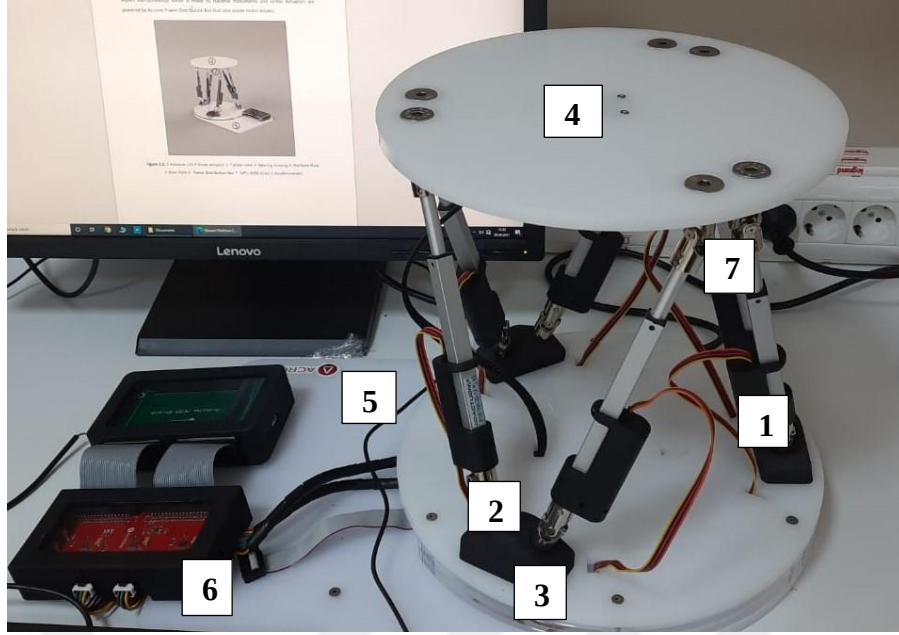
3.7. Tez Çalışmasında Kullanılan Prototip Uçuş Simülatörünün Özellikleri

Bu tez çalışmasında kullanılan ve Acrome firması tarafından tasarlanmış olan prototip uçuş simülatörünün görüntüsü şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3. 7 Stewart platformun genel görünüşü

Acrome Stewart Platformu, 6 Actunox P16-P lineer aktüatöre sahiptir. Ayrıca mekanik aksam olarak 12 kardan mafsalsı, 3 özel tasarım rulman yatağı (yuvarlanma elemanı) bulunmaktadır. Hem taban hem de platform plakaları pleksi classdan yapılmıştır. Katalog bilgilerine göre Acrome Stewart Platformu, 180N ağırlığa kadar yük taşıma kapasitesine sahiptir. Sistem kontrolü National Instruments tarafından üretilen MyRIO mikroişlemcisi tarafından gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3. 8 Stewart platformun bileşenleri

1-Actuonix L16-P lineer aktüatör

2- Kardan Mafsalı

3- Yatak Yuvası

4- Platform Plakası

5-Taban Plakası

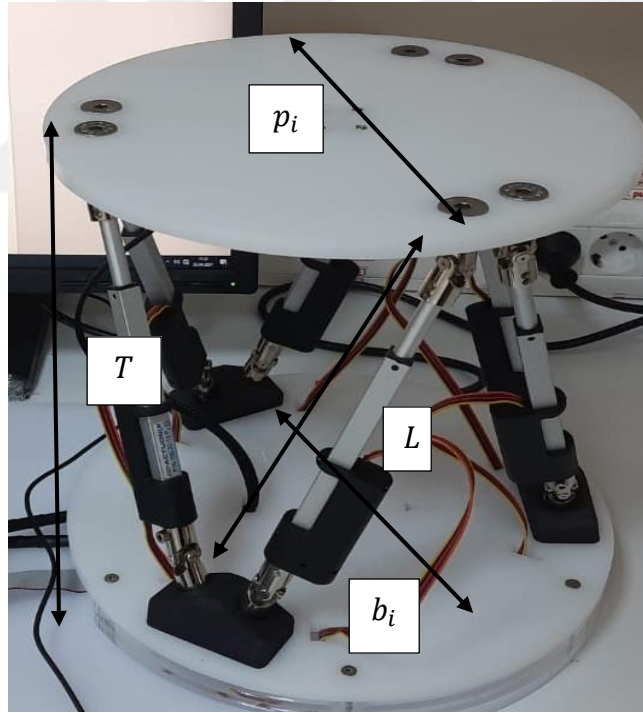
6- Güç Dağıtım Kutusu

7- MPU-6050 (Gyro + İvmeölçer)

Stewart Platform aşağıda gösterilen boyutları ve parametrelerine sahiptir. Sistemin bu parametreleri tez çalışmasında analizi yapılan kinematik model kullanılmıştır. Çizelge 3.2 ‘de mekanizmaya ait parametre değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 3. 2 Sisteme ait parametreler

Semboller	Tanım	Değer	Birim
p_i	Platform Yarıçapı	200	(mm)
b_i	Taban Yarıçapı	240	(mm)
T	İki düzlem arasındaki mesafe	165-270	(mm)
L	Aktüatör Uzunluğu	180-280	(mm)



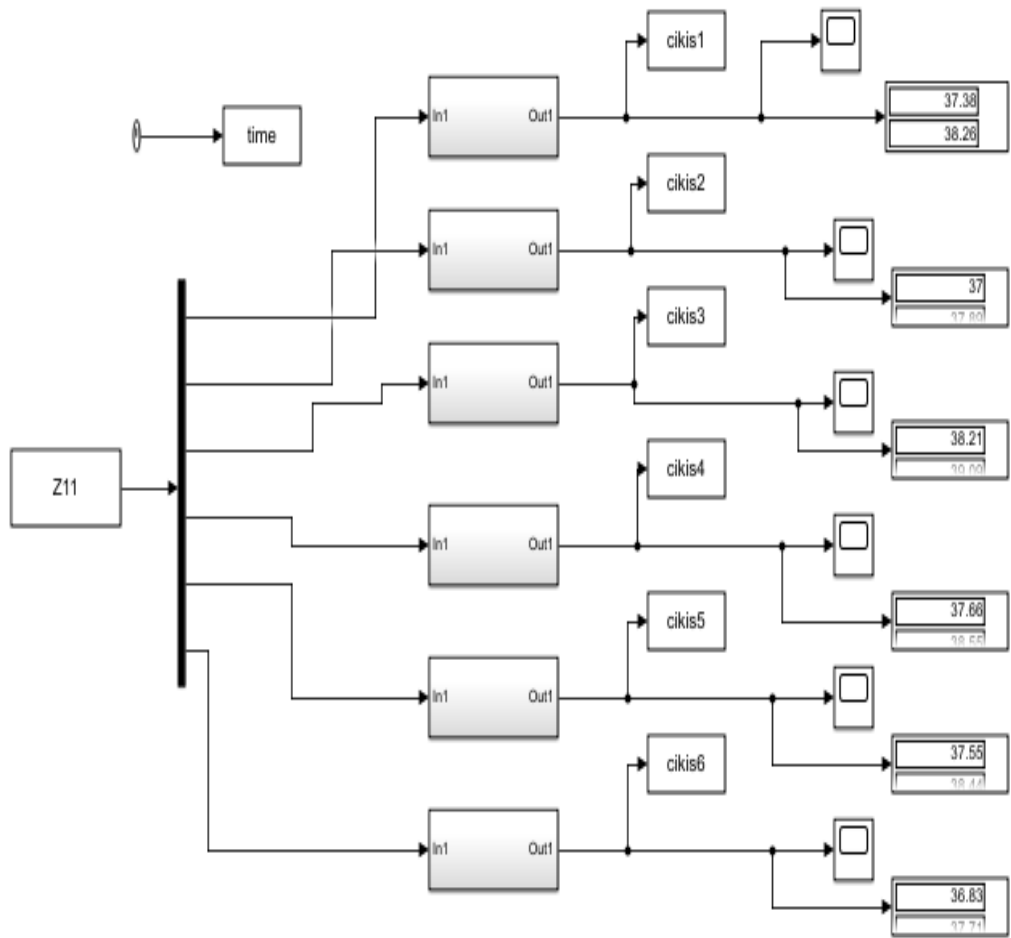
Şekil 3. 9 Sisteme ait parametrelerin mekanizma üzerinde gösterimi

Şekil 3.9’da çizelge 3.2’de verilen parametrelerin Stewart platform üzerinde gösterimi verilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

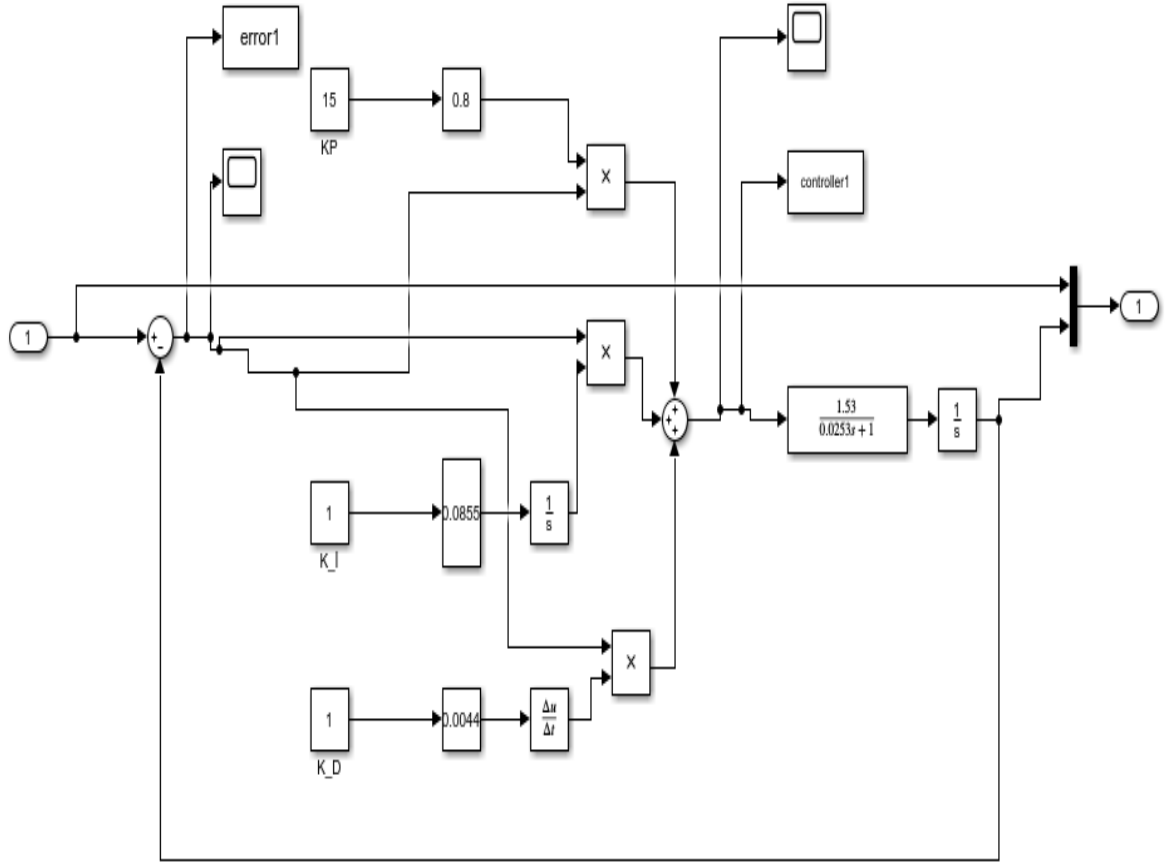
Bu bölümde öncelikle prototip uçuş simülatörünün yörünge kontrolü için gerçekleştirilen benzetim sonuçları paylaşılmış ve ardından sistem parametreleri dikkate alınarak Matlab/Simülink programında yapılan gerçek zamanlı PID yörünge kontrolünden elde edilen bulgular sunulmuştur.

4.1.Simülasyon Sonuçlarının Elde Edilen Bulgular



Şekil 4. 1 Matlab-Simulink programında hazırlanan simülasyon tasarımı

Şekil 4.1 de tez çalışmasında kullanılan Stewart platformun kontrolü için Matlab-Simulinkte hazırlanan simülasyon tasarımı verilmiştir.



Şekil 4. 2 Simülasyonda kullanılan PID denetleyici tasarımı

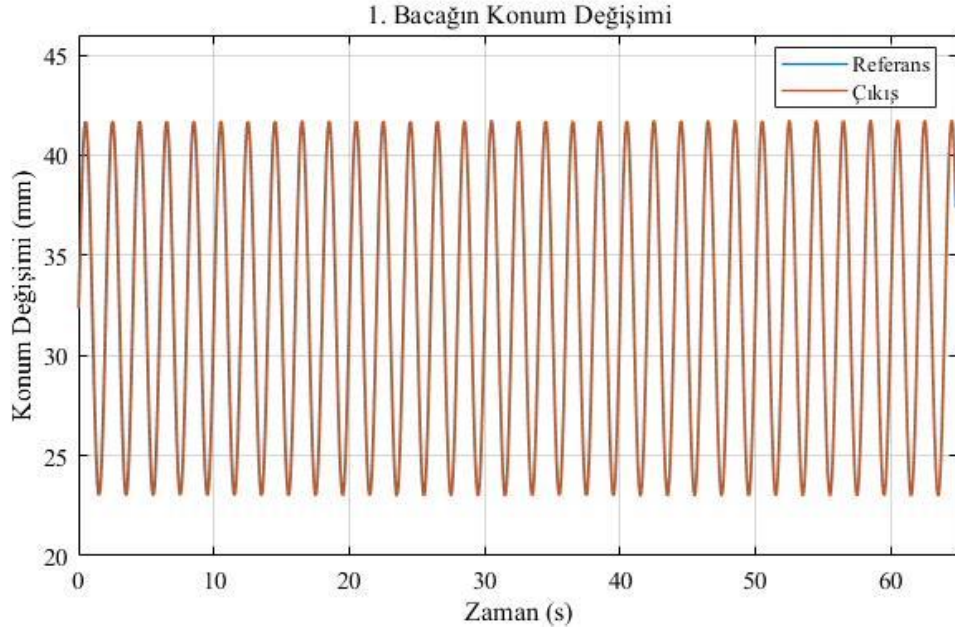
Şekil 4.2 de, şekil 4.1 de tasarımı gerçekleştirilen simülasyon içerisinde kullanılan PID denetleyici modeli verilmiştir. Şekil 4.2 altı adet bacak boy kontrolü için kullanılan alt sistemlerinden birini göstermektedir. 1 numaralı giriş ile referans olarak tanımlanan koordinat ve yönelim değerleri ters kinematik denklemler kullanılarak elde edilen referans bacak boy uzunluğunu hesaba almaktadır. Daha sonra bu referans değer toplayıcının artısına bağlanırken toplayıcının eksi ucuna o anda ki mevcut bacak boy değeri bağlanmaktadır. Aradaki hata değeri Şekil 4.2 de gösterildiği gibi PID kontrol kısmına giriş olarak verilmektedir. Kontrolcü çıkışındaki işaret ise sisteme girdi olarak uygulanmaktadır. Yapının sonuna eklenen integratör ise konum kontrolü gerçekleştirdiğimiz için transfer fonksiyonunda elde edilen doğrusal hızın integralini alarak konuma geçmektedir. Tüm bu benzer işlemler diğer beş bacak içinde geçerlidir.

Bu aşamanın örneklendirilmesi için 3 ayrı simülasyon gerçekleştirilmiştir. Denetleyici parametreleri ise en iyi sonucu sağlayacak şekilde PID kontrol için kazanç değerleri $K_p = 12$, $K_i = 0,0855$, $K_d = 0,0044$ olarak seçilmiştir.

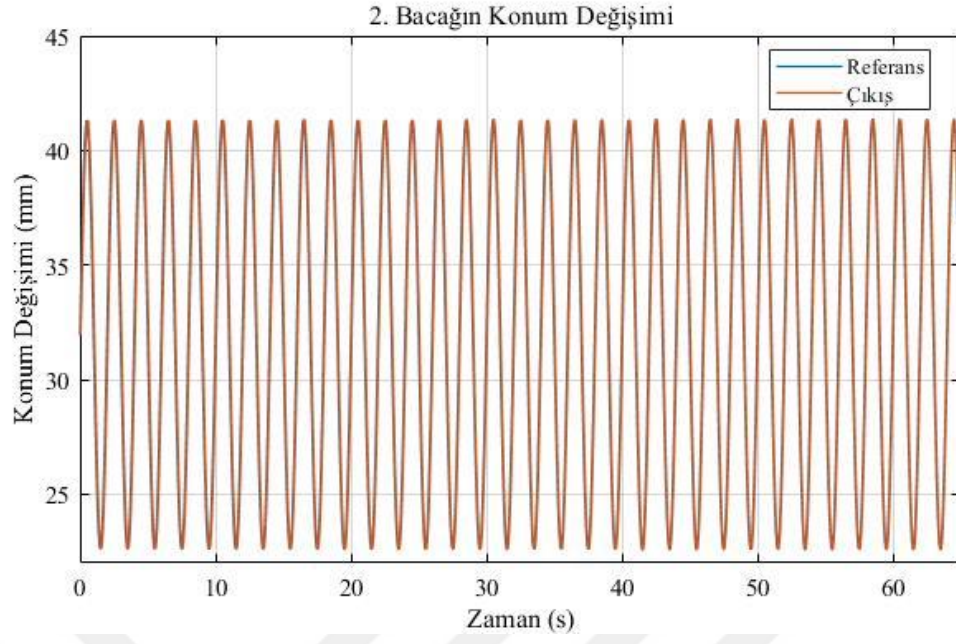
4.1.1 Simülasyon 1: Bu simülasyonda, hareketli üst platformun z eksenini doğrultusunda hareketinin gerçekleşmesi esnasındaki konum değişim takibi incelenmiştir. Kontrol sistemine referans değeri olarak ters kinematik analiz ile platformun istenen konum değerine karşılık gelen bacak boy değerleri, çıkış olarak ise simülasyon da elde edilen bacaklarının boyları esas alınmıştır. Bu simülasyonda kullanılan referans koordinatlar denklem 4.1.1 ile aşağıda belirtilip bu esnada elde edilen grafikler sunulmuştur.

$$x(t) = 0, y(t) = 0, z(t) = 200 + 10\sin(2 * \pi * (5/10) * t) \quad (4.1.1)$$

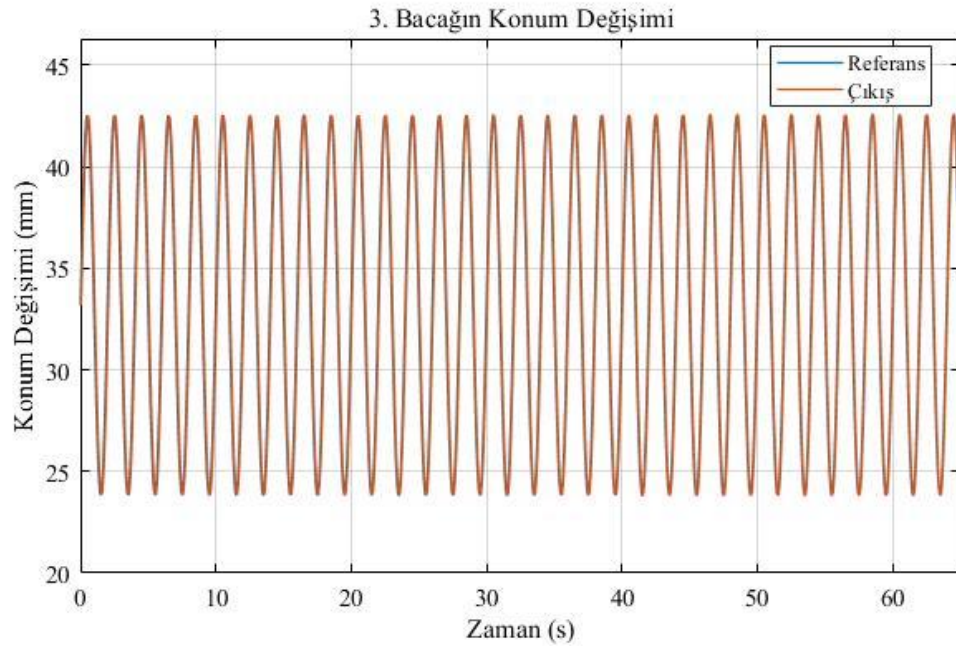
Yukarıda tanımlanan koordinatlara göre sırasıyla bacaklarda meydana gelen konum değişimleri, konum hataları ve denetleyici işaret grafiklerinin sonucu alınarak tez çalışmasının bu kısmında belirtilmiştir.



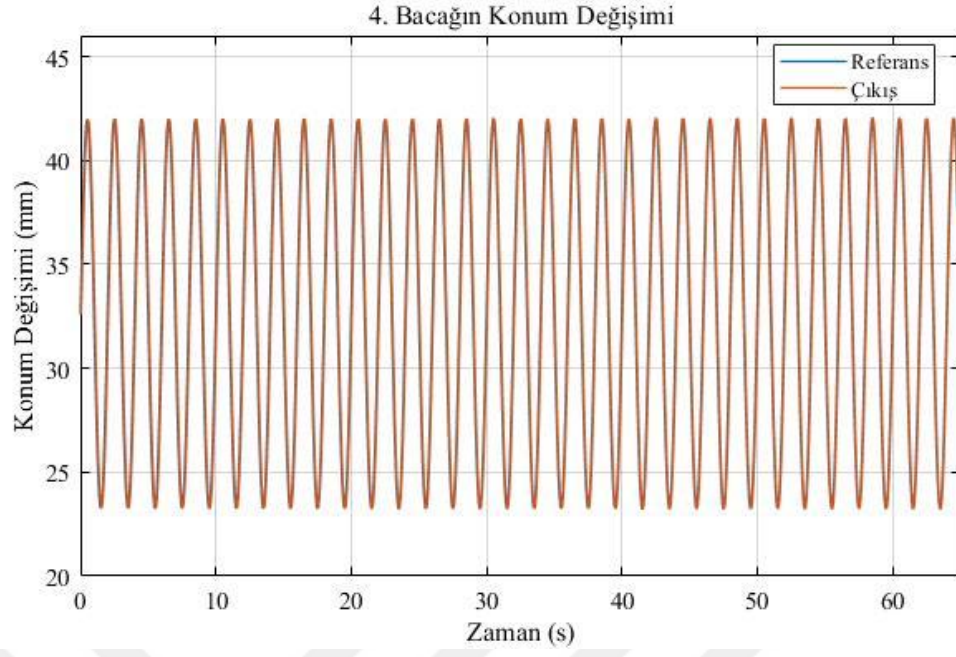
(a)



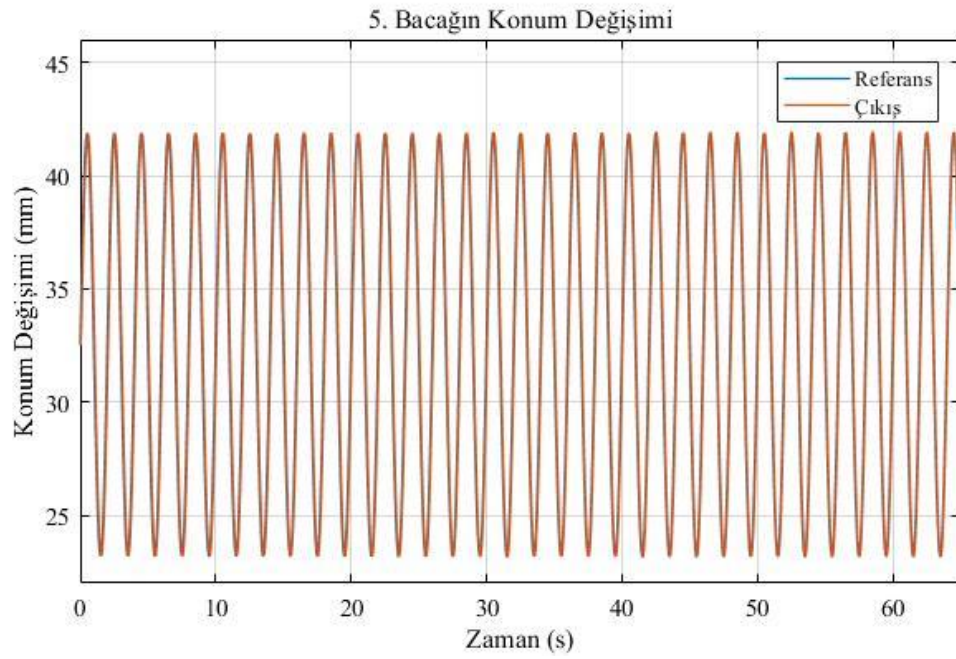
(b)



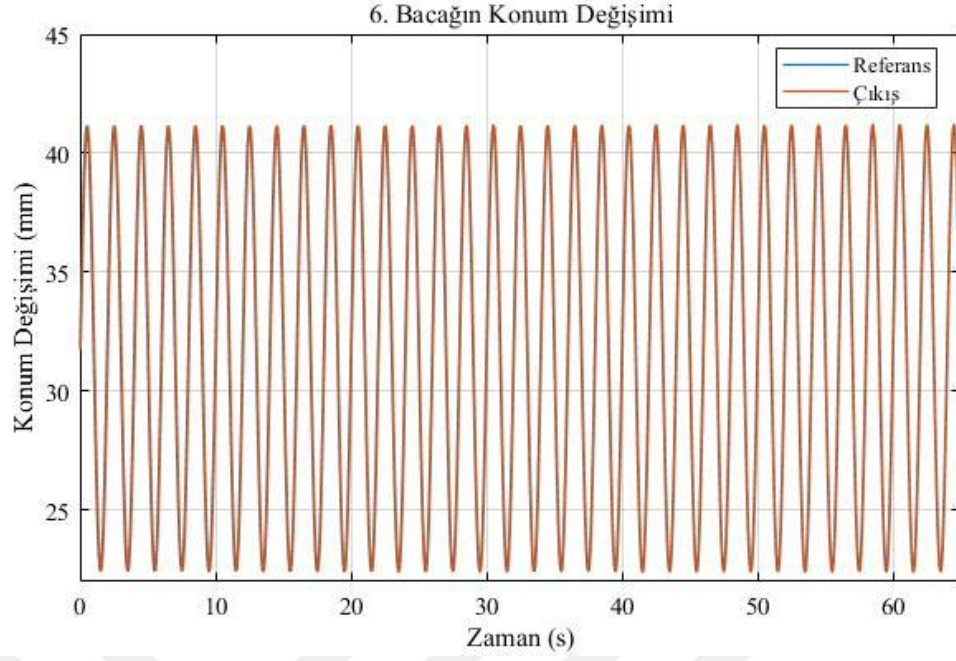
(c)



(d)



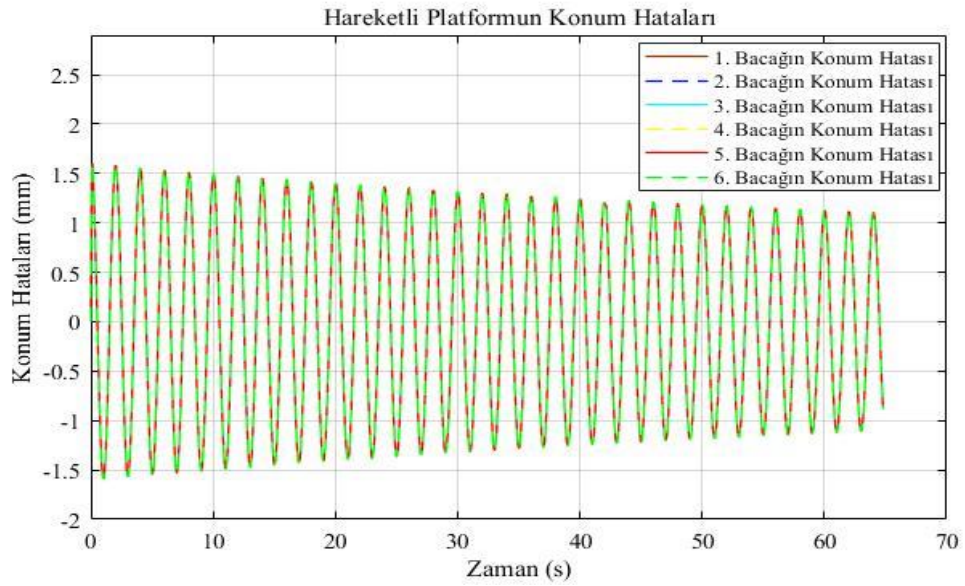
(e)



(f)

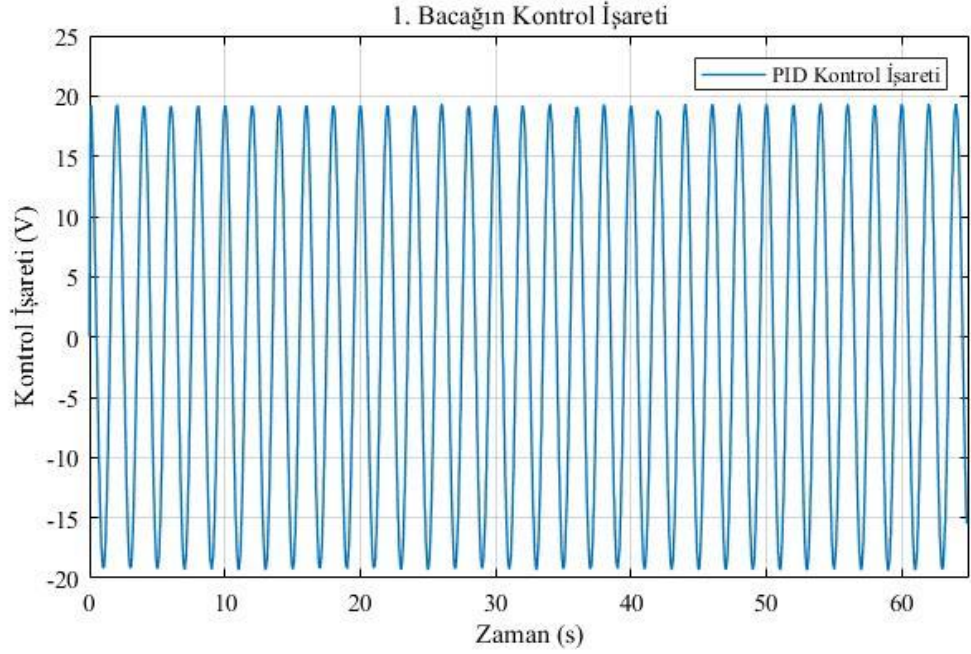
Şekil 4. 3 Simülasyon 1 için PID denetleyicisi ile gerçekleştirilen konum değişimleri

Şekil 4.3’de simülasyon 1 için verilen değişkenler uygulanarak her bir bacak için meydana gelen konum değişimleri incelenmiştir. Her bir altı bacak için konum değişimleri 64,82 saniyede gerçekleştirilerek sonuç alınmıştır. Grafiklerin üzerinde hangi bacağa ait konum değişimi olduğu belirtilmiştir.

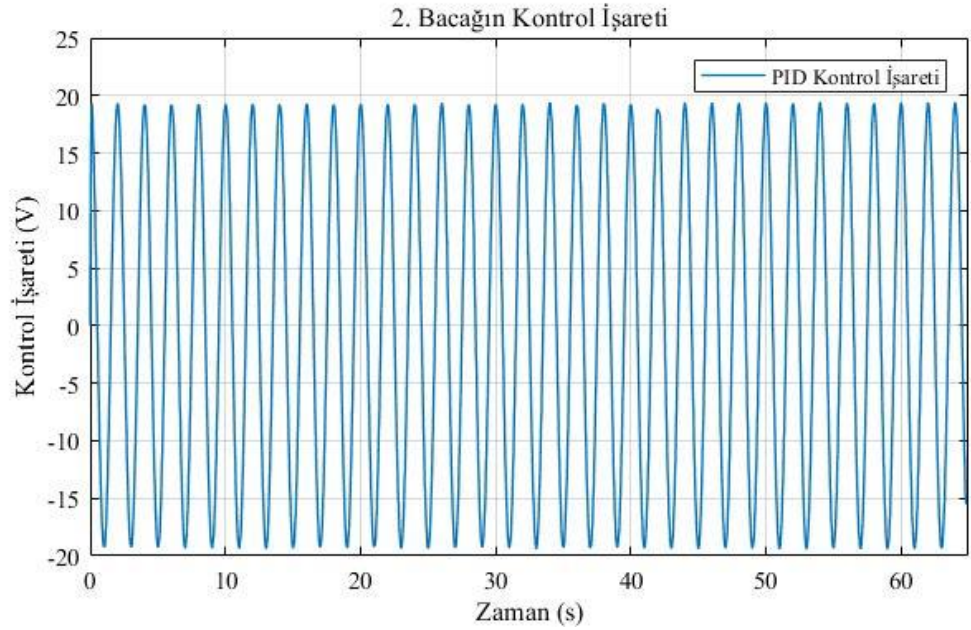


Şekil 4. 4 Simülasyon 1 için PID denetleyicisinin kullanılması durumunda bacaklarda meydana gelen konum hataları

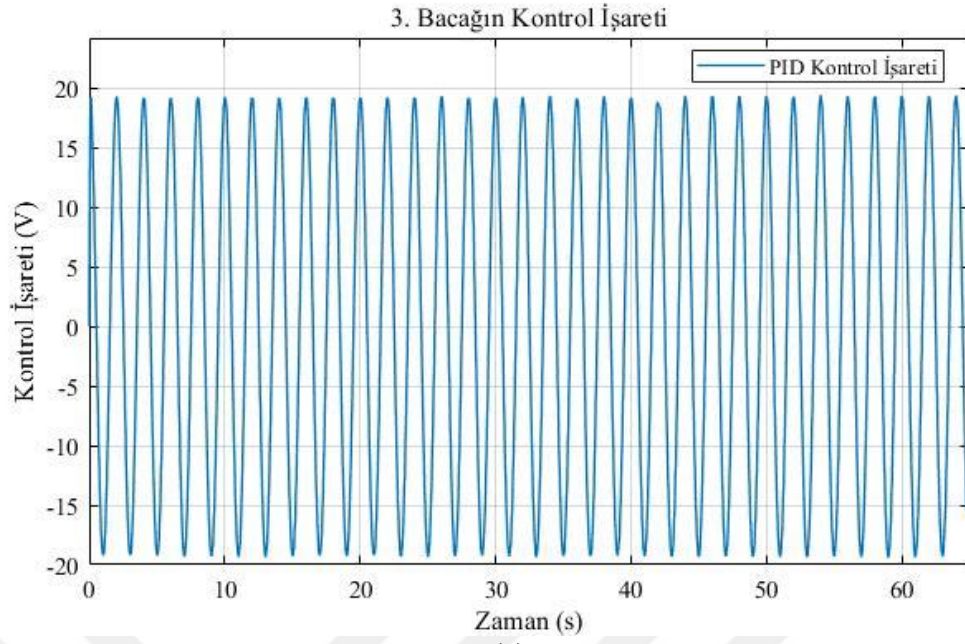
Şekil 4.4 de PID denetleyicisi kullanılarak bacaklarda meydana gelen konum hataları verilmiştir. Bu simülasyon tüm bacaklarda oluşan hataların aynı olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 4.4 de görüldüğü üzere konum hataları yaklaşık $+1,6$ ile $-1,6$ arasında değişmektedir. Bütün bacaklarda oluşan hatanın salınımlı olarak zamanla azaldığı görülmüştür.



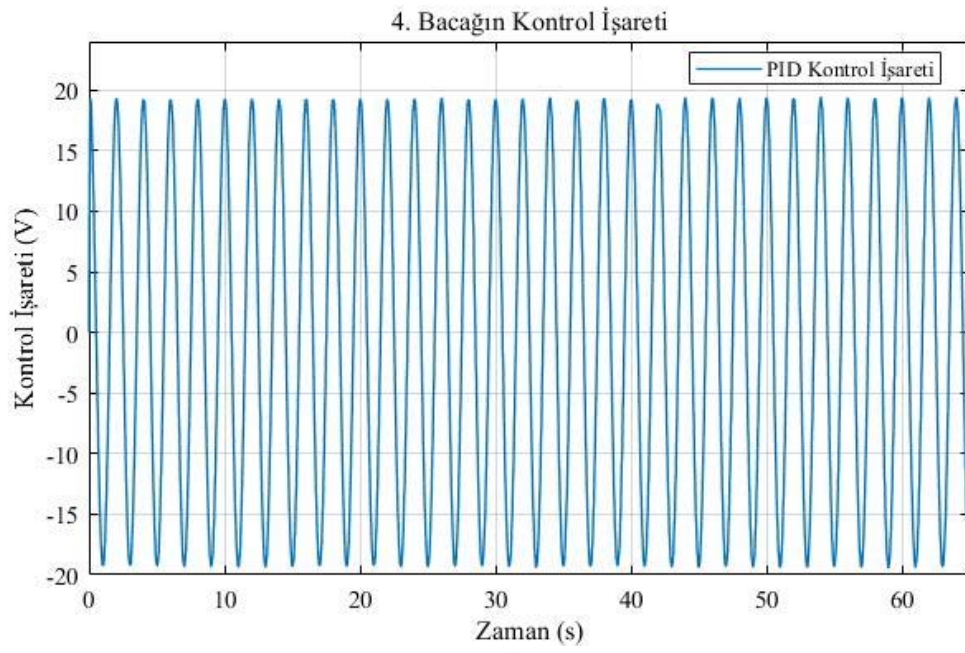
(a)



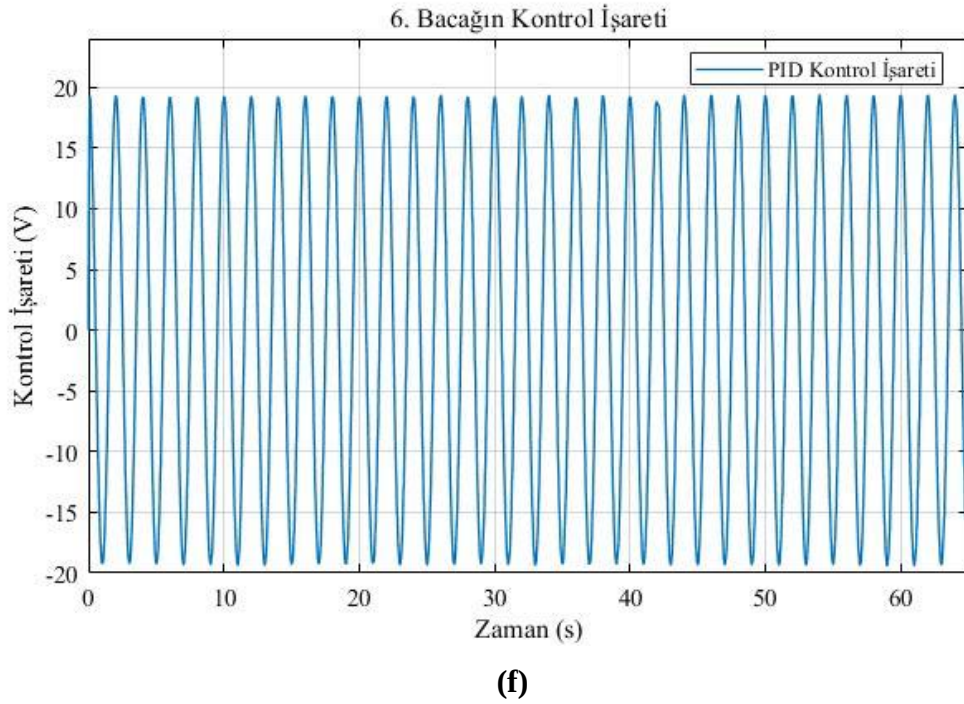
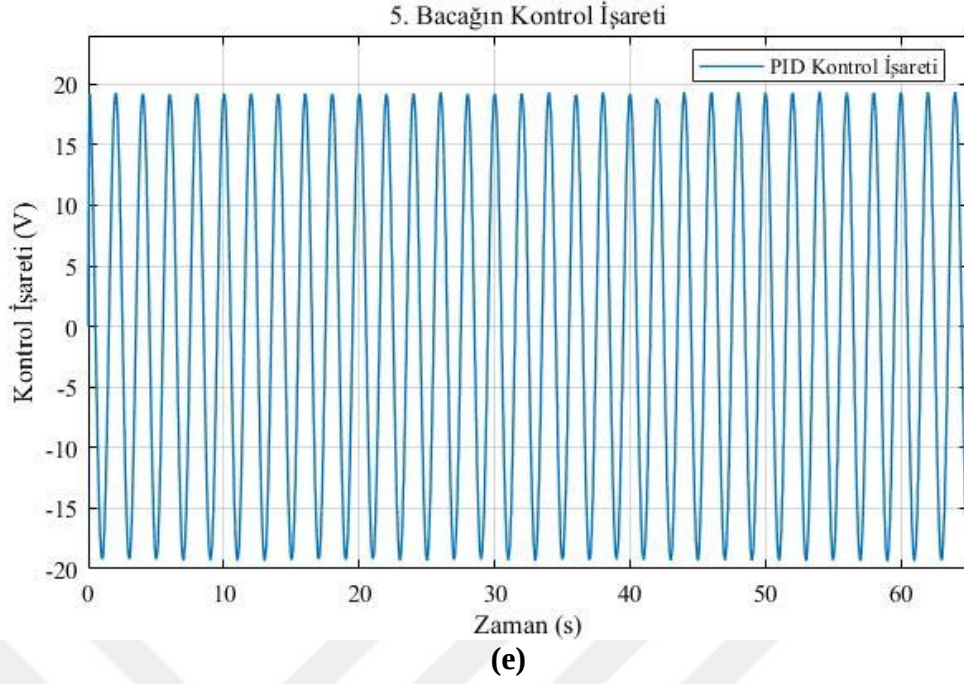
(b)



(c)



(d)



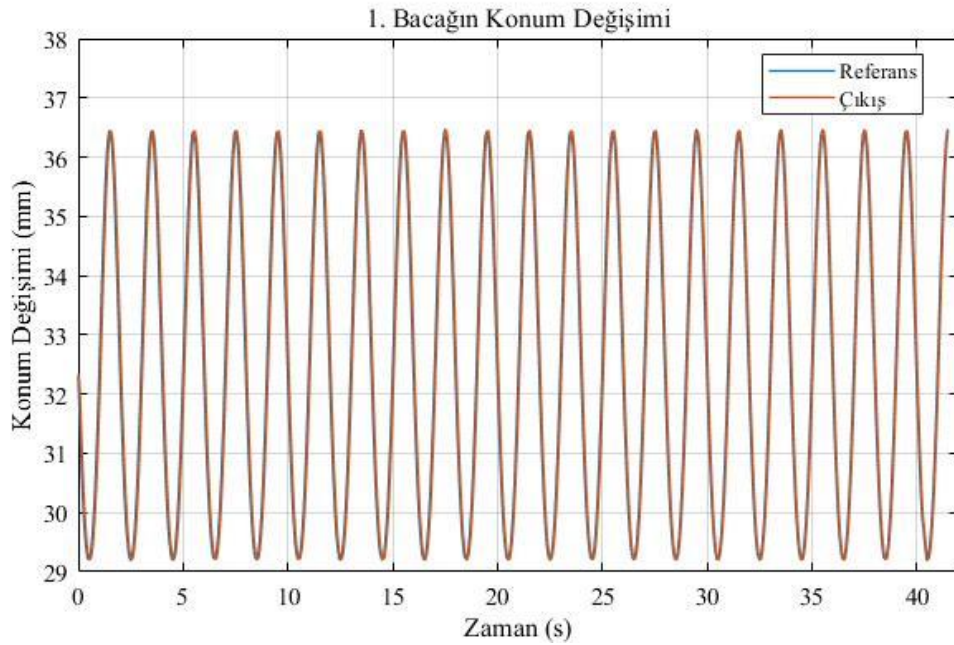
Şekil 4. 5 Simülasyon 1 için kullanılan denetleyici işaretleri

Şekil 4.5 de tez çalışmasında kullanılan Stewart platformda her altı bacağa ait kontrol işaret grafik sonuçları sunulmuştur. Denetleyici işaretlerinin hangi bacağa ait olduğu grafikler üzerinde belirtilmiştir. Bu simülasyonda kullanılan DC motor 24 volt üst sınır gerilimiyle çalışmaktadır. Şekil 4.5 de görüldüğü üzere her bir altı bacağa ait hiçbir grafik bu üst sınır gerilimini aşmamıştır. PID kontrolcü sayesinde elde edilen kontrol

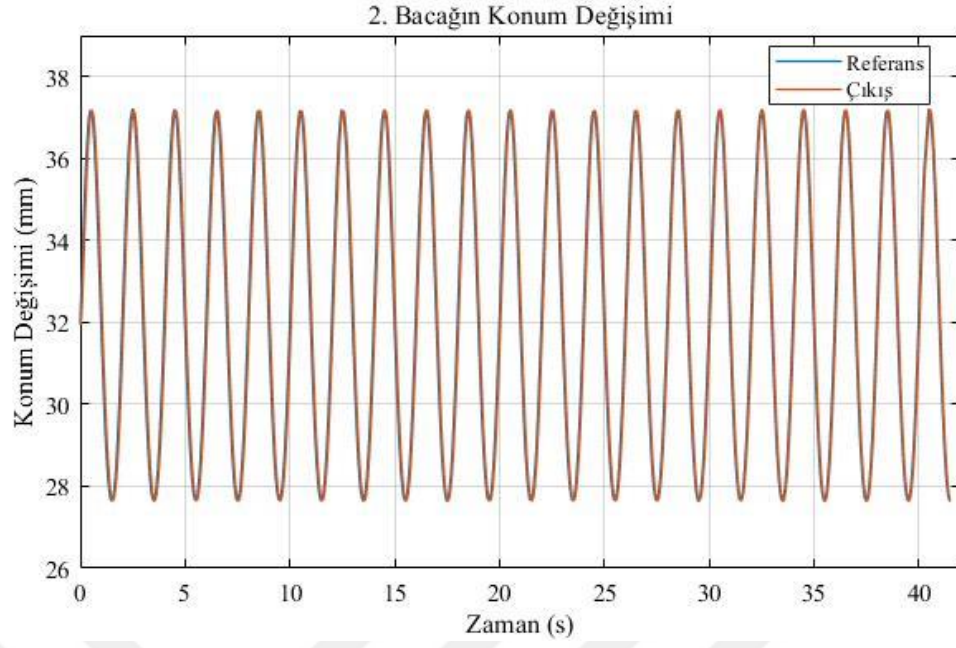
işaretleri sistemle uyumlu olup bu işaretler sayesinde iyi bir kontrol performansı elde edilmiştir.

4.1.2 Simülasyon 2: Bu simülasyonda, mekanizmanın hareketli üst platformun x eksenini doğrultusunda hareketinin gerçekleşmesi esnasındaki konum takibi incelenmiştir. Kontrol sistemine referans değeri olarak ters kinematik analiz ile platformun istenen konum değerine karşılık gelen bacak boy değerleri, çıkış olarak ise simülasyon da elde edilen bacaklarının boyları esas alınmıştır. Bu simülasyonda kullanılan referans koordinatlar denklem (4.1.2) ile aşağıda belirtilip bu esnada elde edilen grafikler sunulmuştur.

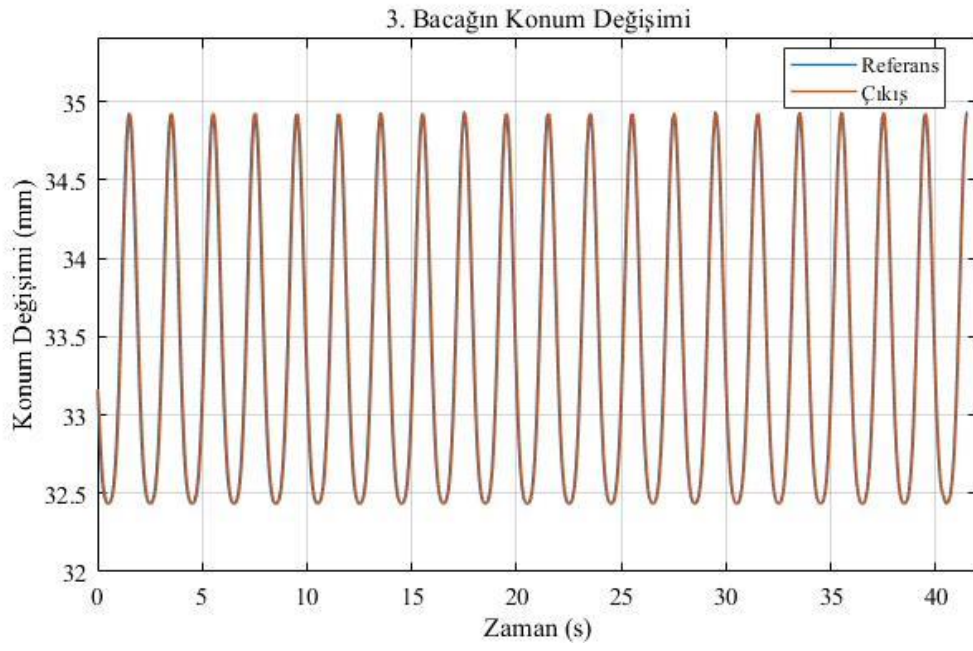
$$x(t)= 15\sin (2 * \pi * (5/10) * t), y(t)= 0, z(t)= 200 \quad (4.1.2)$$



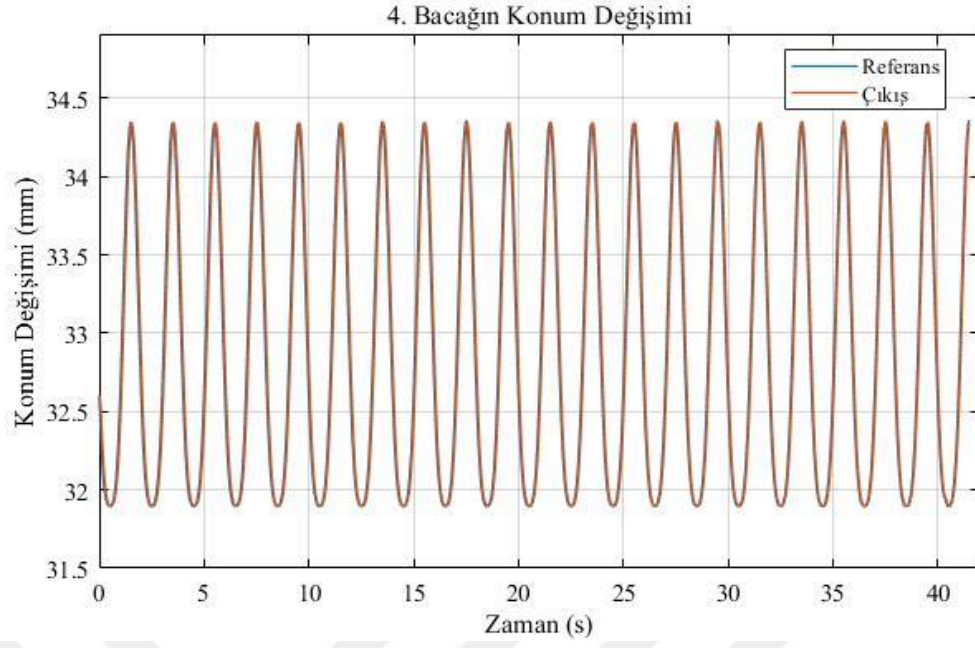
(a)



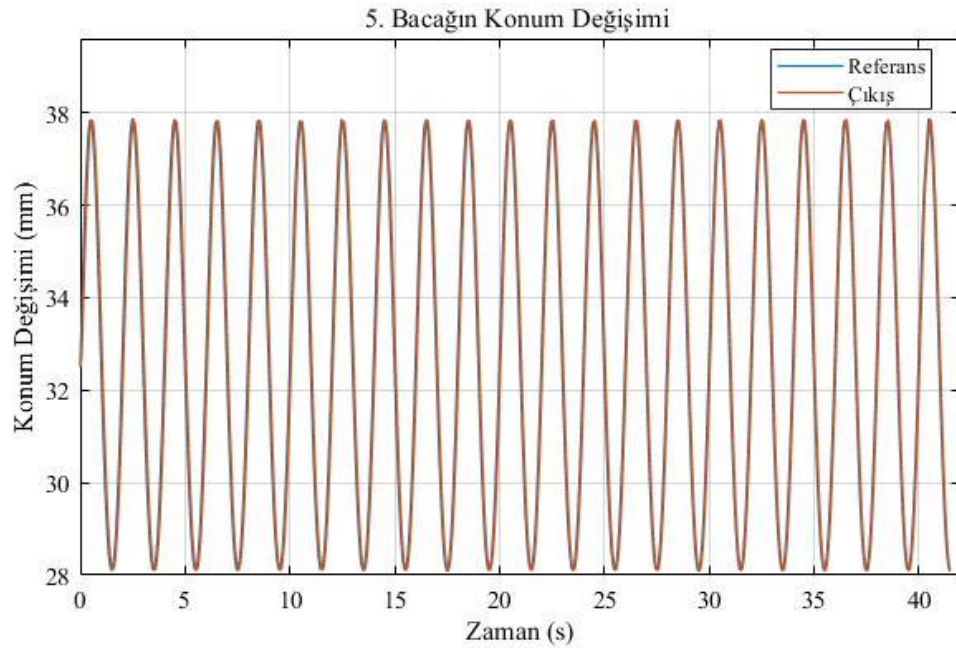
(b)



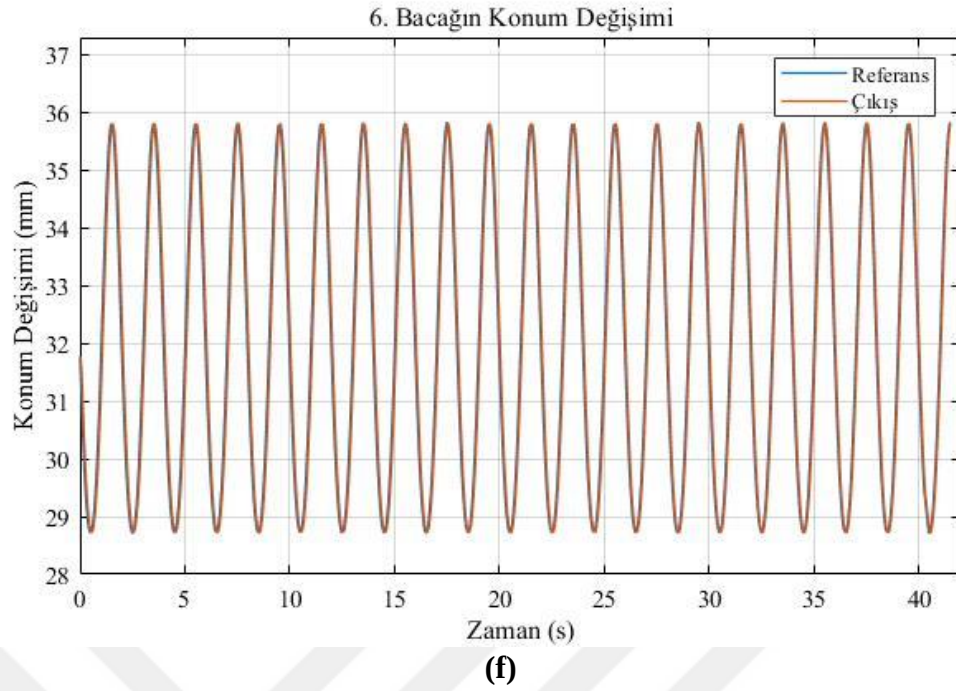
(c)



(d)

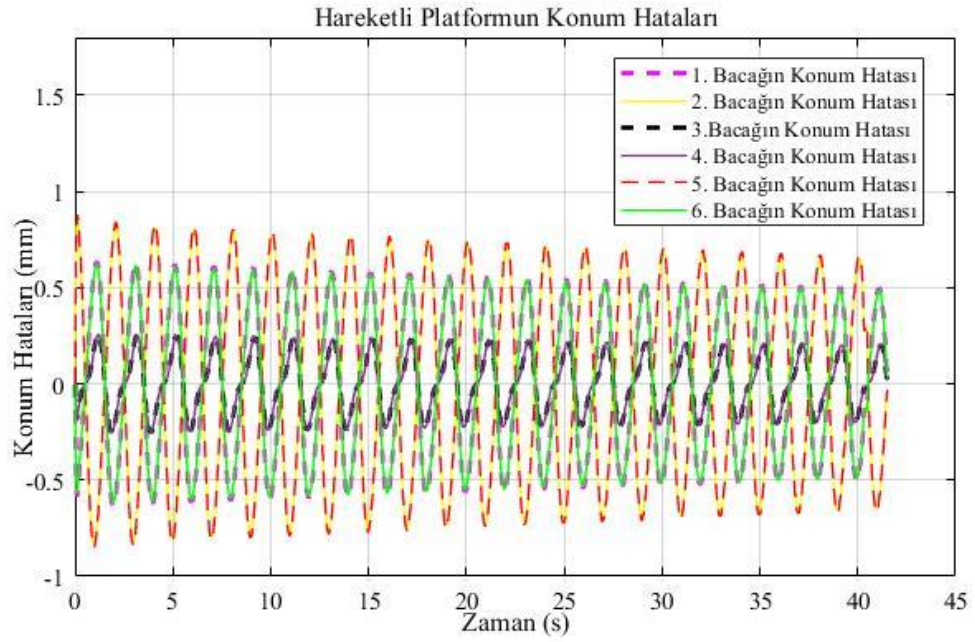


(e)



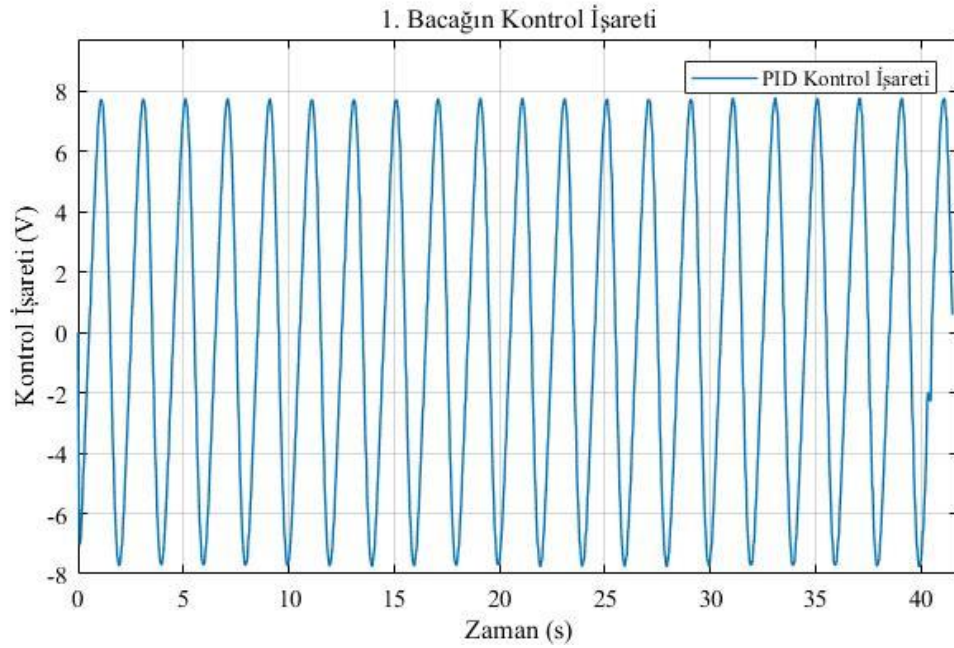
Şekil 4. 6 Simülasyon 2 için PID denetleyicisi ile gerçekleştirilen konum değişimleri

Şekil 4.6’da simülasyon 2 için verilen değişkenler uygulanarak her bir bacak için meydana gelen konum değişimleri incelenmiştir. Her bir altı bacak için konum değişimleri 41,51 saniyede gerçekleştirilerek sonuç alınmıştır. X eksenı doğrultusunda hareketin gerçekleşmesi için şekil 4.6 da görüldüğü üzere her bir 6 bacak içinde meydana gelen konum değişimlerini grafiklerdeki alt ve üst sınır aralıklarına bakılarak hareket konumları belirlenmiştir.

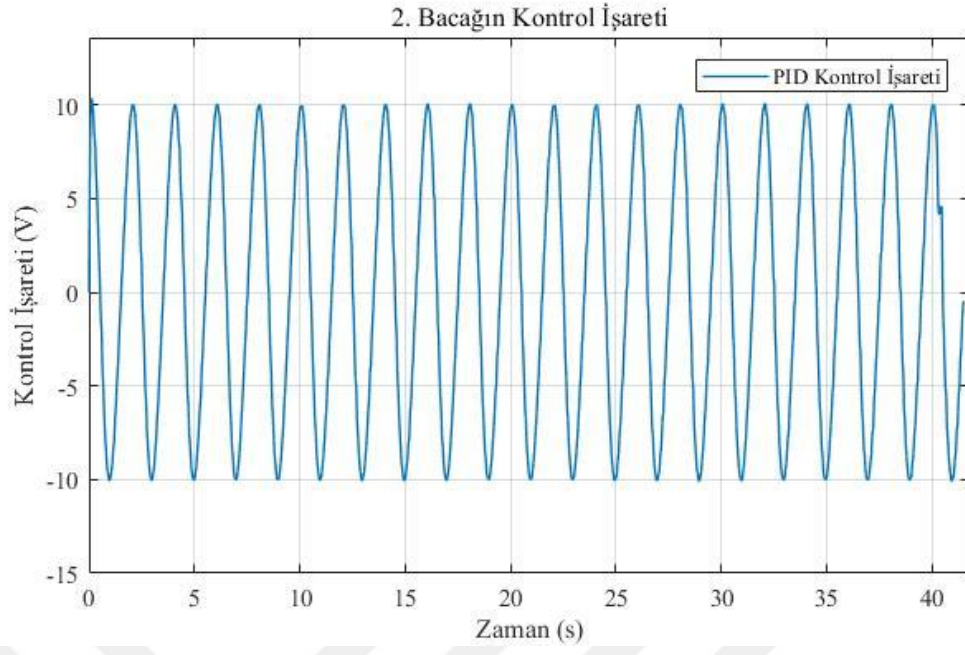


Şekil 4. 7 Simülasyon 2 için PID denetleyicisi kullanılması durumunda bacaklarda meydana gelen konum hataları

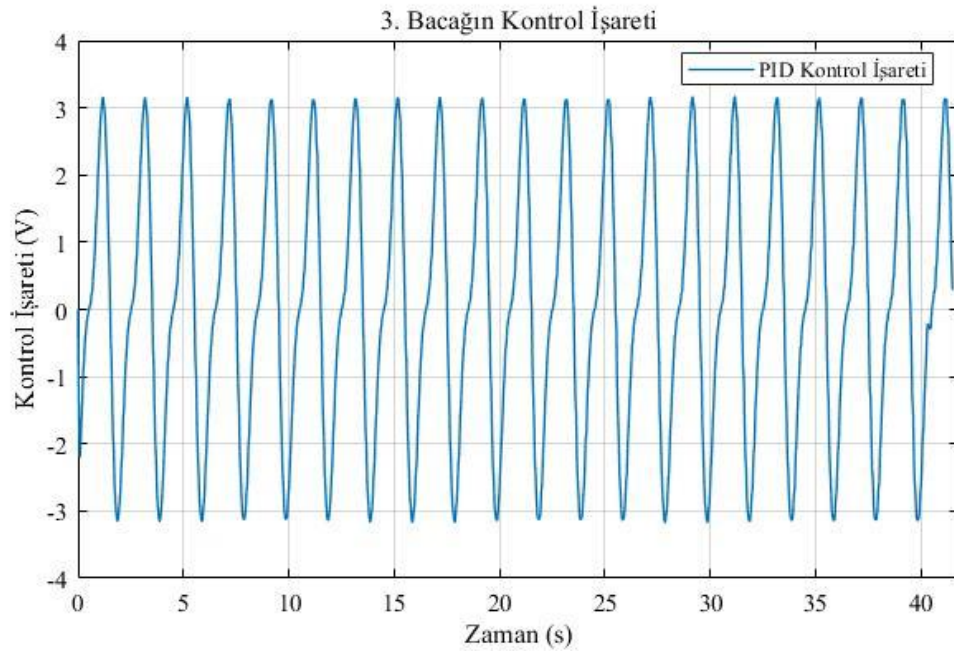
Şekil 4.7’de Stewart platformun altı bacağına ait konum hataları verilmiştir. Bu konum hataları her bir bacak için farklı renkte gösterilmiştir ve bu hataların sinüsoidal şeklinde zamanla azaldığı görülmektedir.



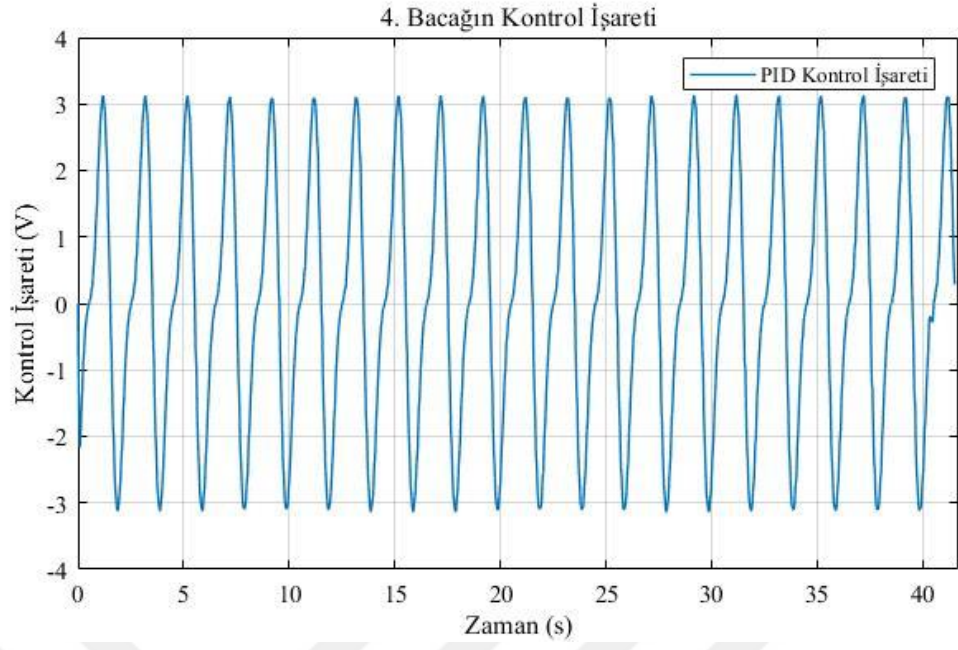
(a)



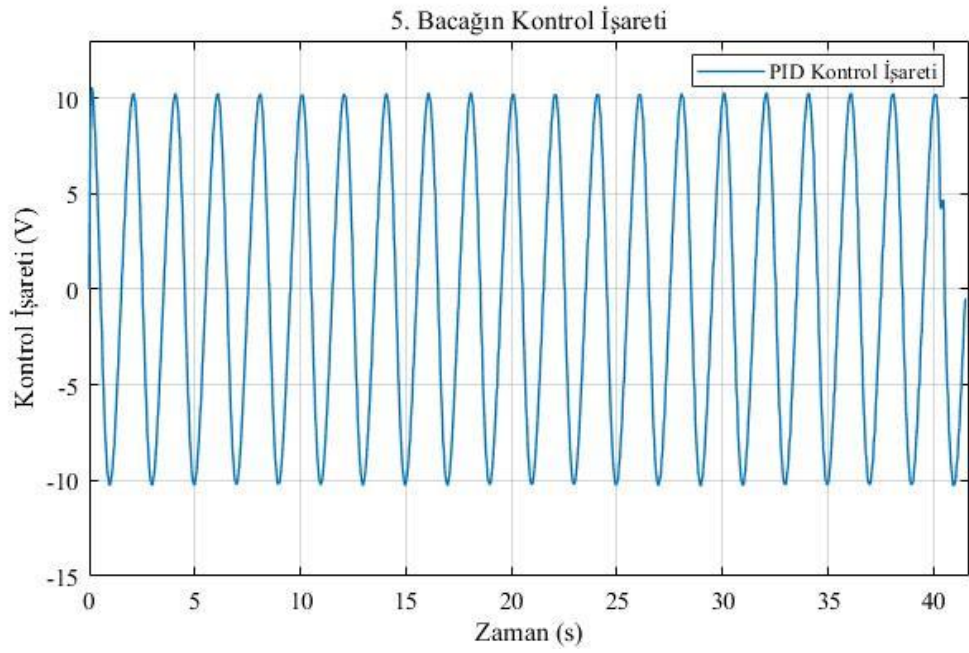
(b)



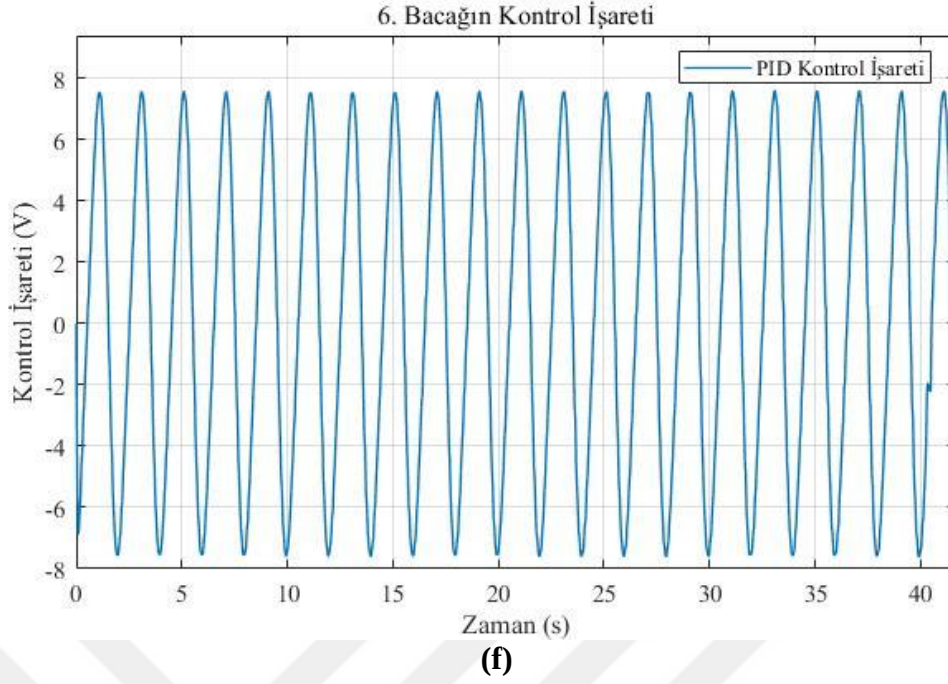
(c)



(d)



(e)

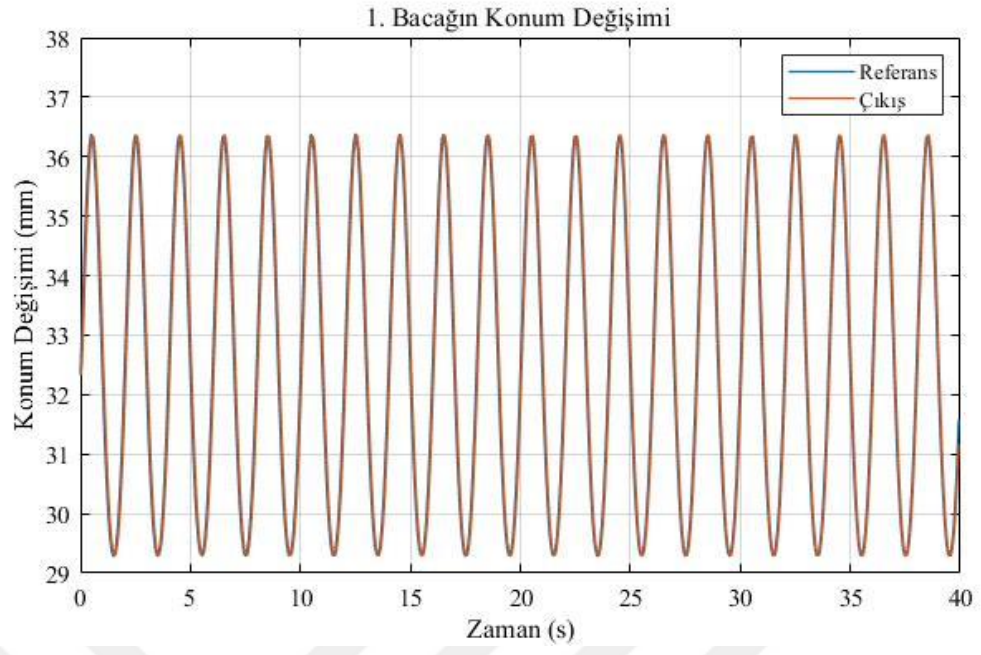


Şekil 4. 8 Simülasyon 2 için kullanılan denetleyici işaretleri

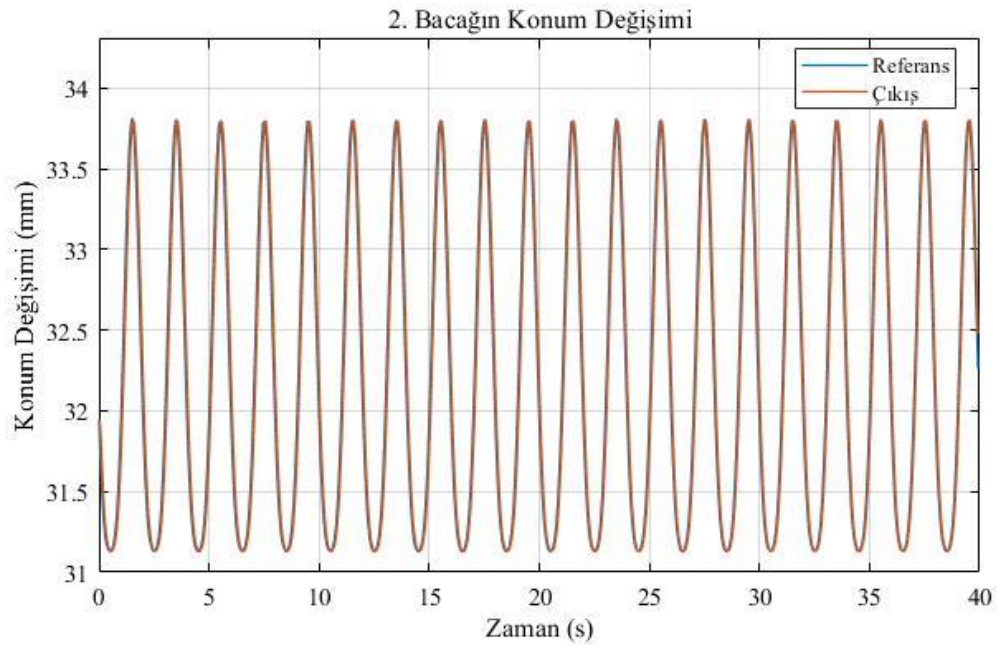
Şekil 4.8’de tez çalışmasında kullanılan Stewart platformda her bir altı bacağa ait kontrol işaret grafik sonuçları gösterilmiştir. Bir önceki çalışmada olduğu gibi doğrusal motorların 24 volt üst sınır gerilimi aşmadığı gözlemlenmektedir. Denetleyici işaretlerinin hangi bacağa ait olduğu grafiklerin üzerinde belirtilmiştir.

4.1.3 Simülasyon 3: Bu simülasyonda, mekanizmanın hareketli üst platformun y eksenini doğrultusunda hareketinin gerçekleşmesi esnasındaki konum takibi incelenmiştir. Kontrol sistemine referans değeri olarak ters kinematik analiz ile platformun istenen konum değerine karşılık gelen bacak boy değerleri, çıkış olarak ise simülasyonda elde edilen bacak boyları esas alınmıştır. Bu sayede sistemin konum takibi elde edilmiştir. Bu konum takibinde kullanılan referans koordinatlar denklem (4.1.3) ile aşağıda belirtilip bu deney esnasında elde edilen grafikler sunulmuştur.

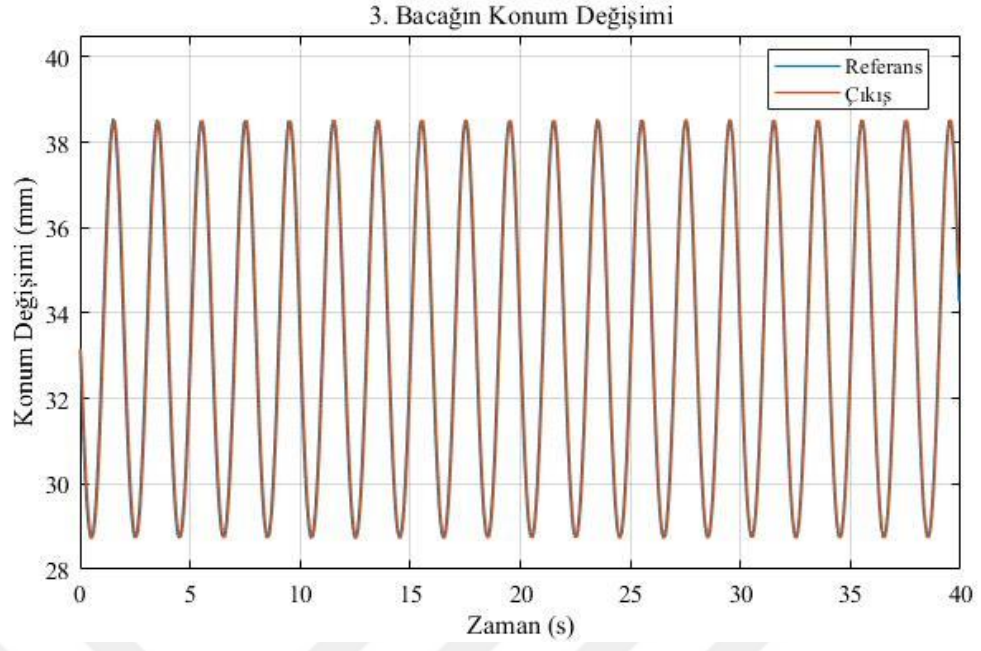
$$x(t)= 0, y(t)= 15\sin (2 * \pi * (5/10) * t), z(t)= 200 \quad (4.1.3)$$



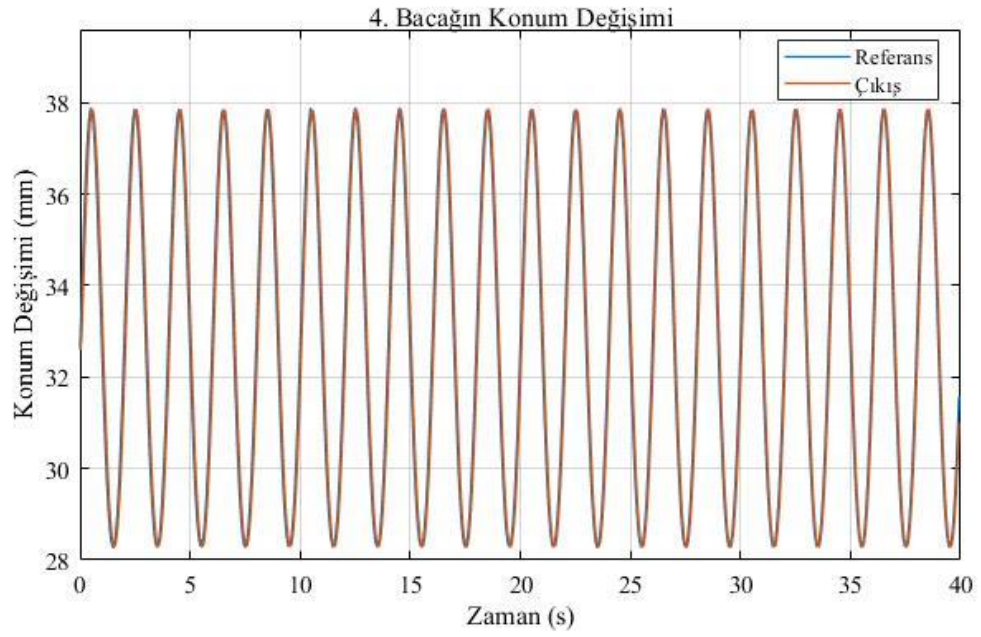
(a)



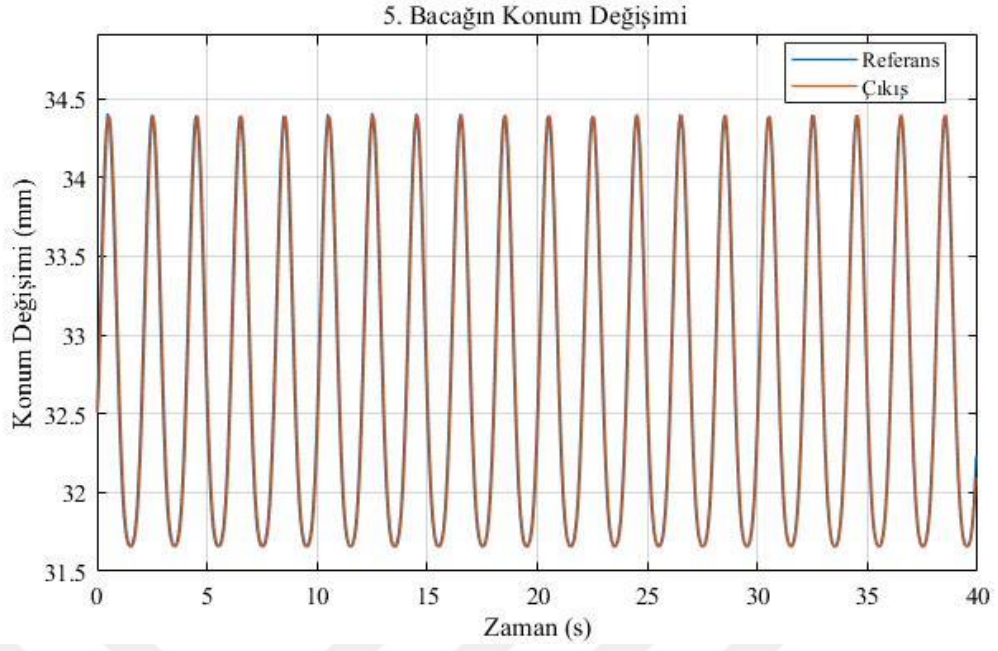
(b)



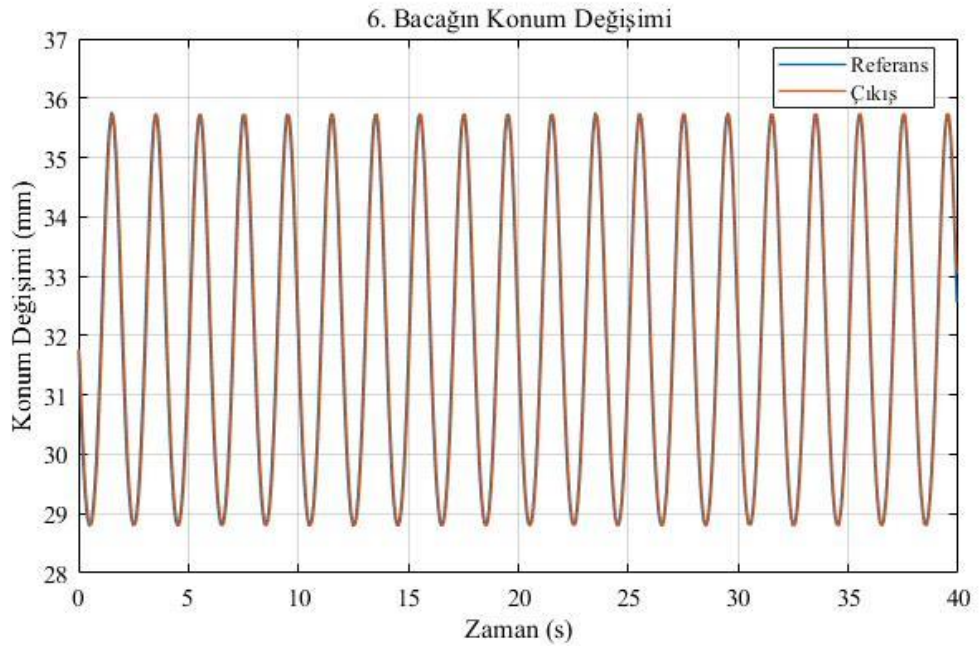
(c)



(d)



(e)

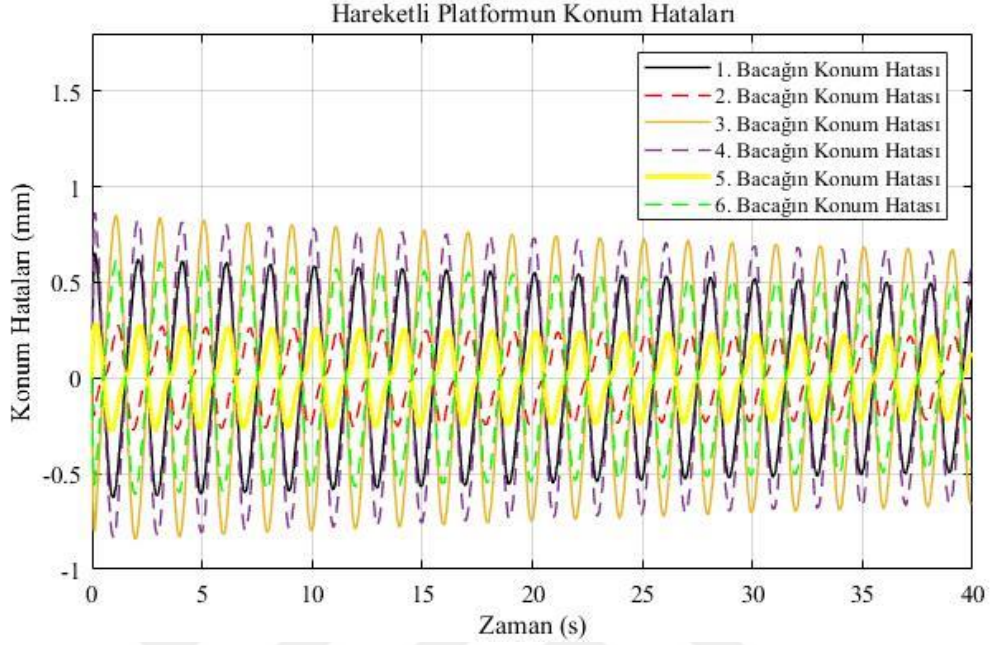


(f)

Şekil 4. 9 Simülasyon 3 için PID denetleyicisi ile gerçekleştirilen konum değişimleri

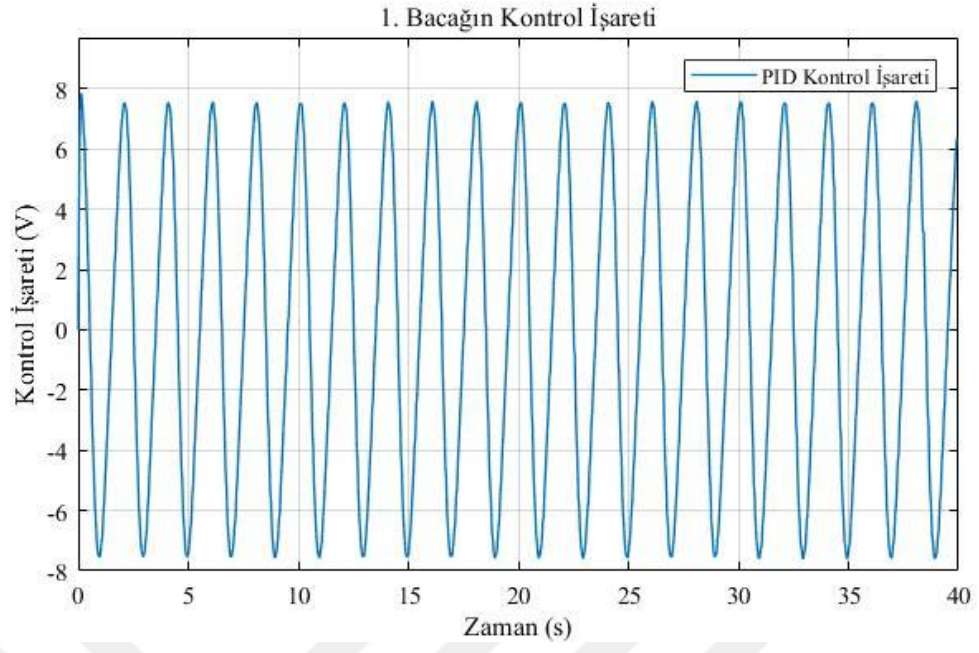
Şekil 4.9’da simülasyon 3 için verilen değişkenler uygulanarak her bir bacak için meydana gelen konum değişimleri incelenmiştir. Her bir altı bacak için konum değişimleri 39,93 saniyede gerçekleştirilerek sonuç alınmıştır. Y eksenı doğrultusunda hareketin gerçekleşmesi için şekil 4.9 da görüldüğü üzere her bir 6 bacak için meydana

gelen konum değişimlerini grafiklerdeki alt ve üst sınır aralıklarına bakılarak hareket yönelimleri gözlemlenmiştir. Grafiklerin üzerinde hangi bacağına ait olduğu belirtilmiştir.

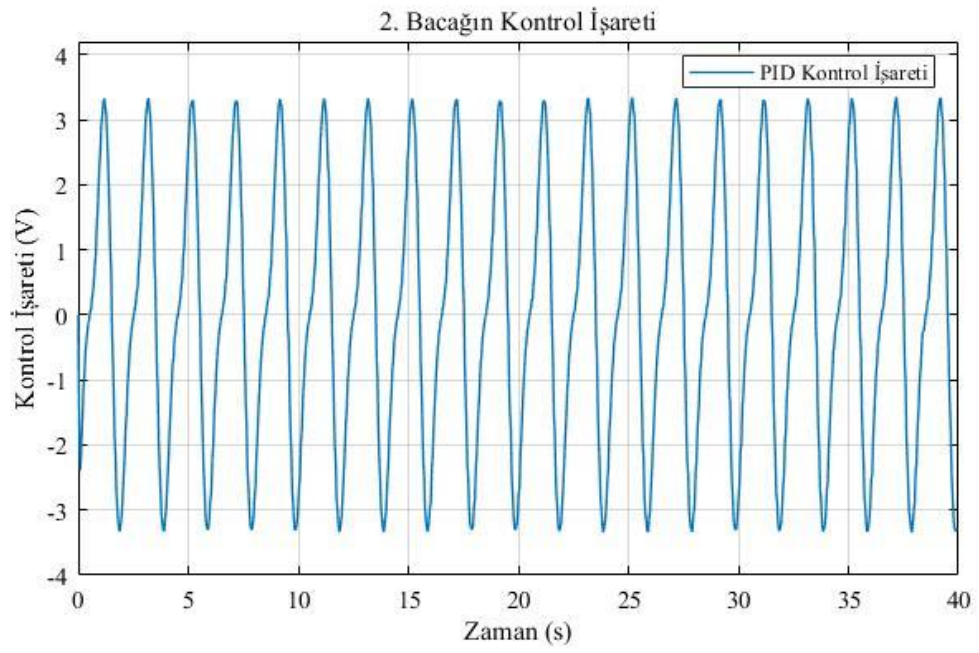


Şekil 4. 10 Simülasyon 3 için PID denetleyicisi kullanılması durumunda bacaklarda meydana gelen konum hataları

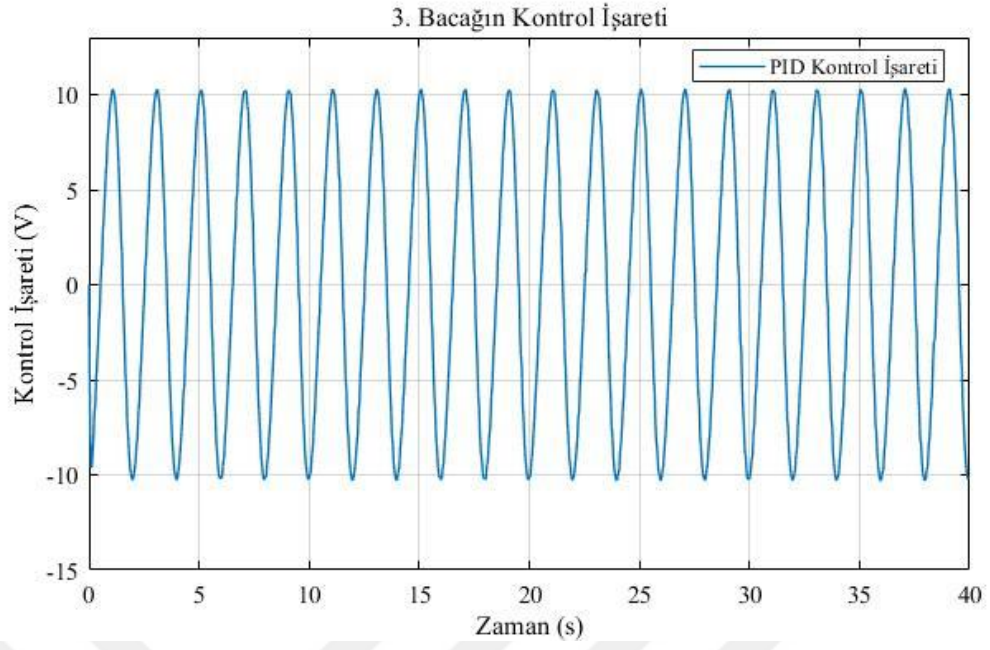
Şekil 4.10 da simülasyon 3 için bacaklarda meydana gelen konum hatalarını göstermektedir. Her bir bacaktıraki konum hatası farklı renklerle belirtilmiştir. Şekil 4.10 da görüldüğü üzere tüm bacaklardaki hatalar zamanla salınımlı olarak azalmaktadır.



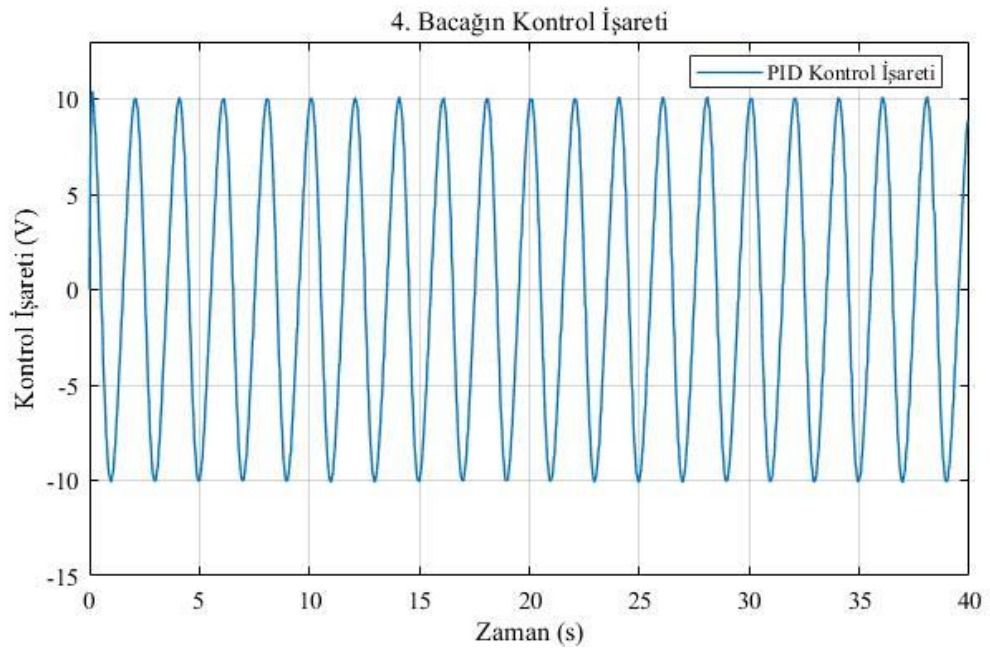
(a)



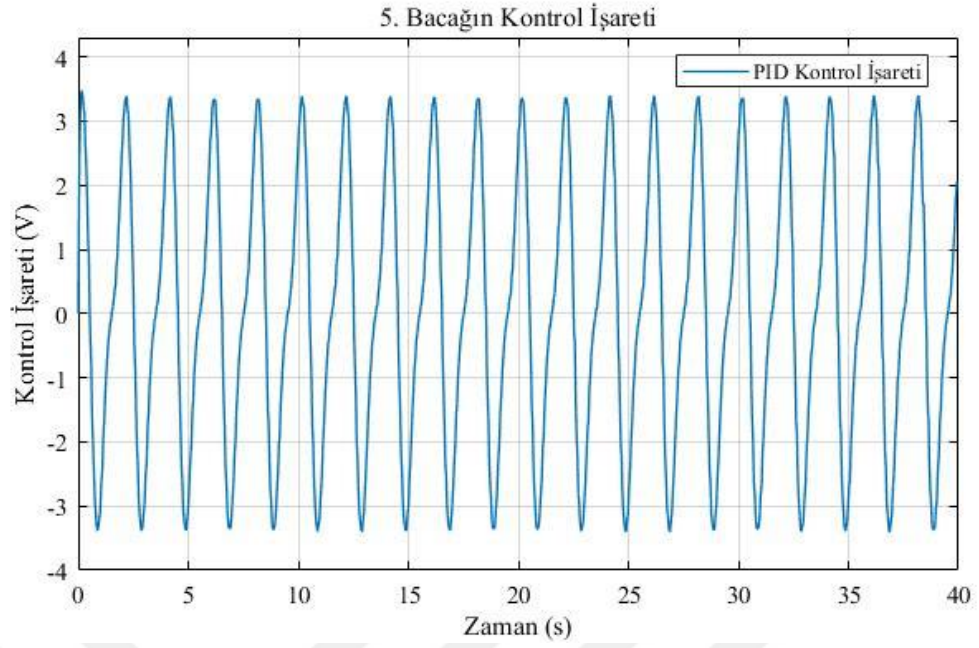
(b)



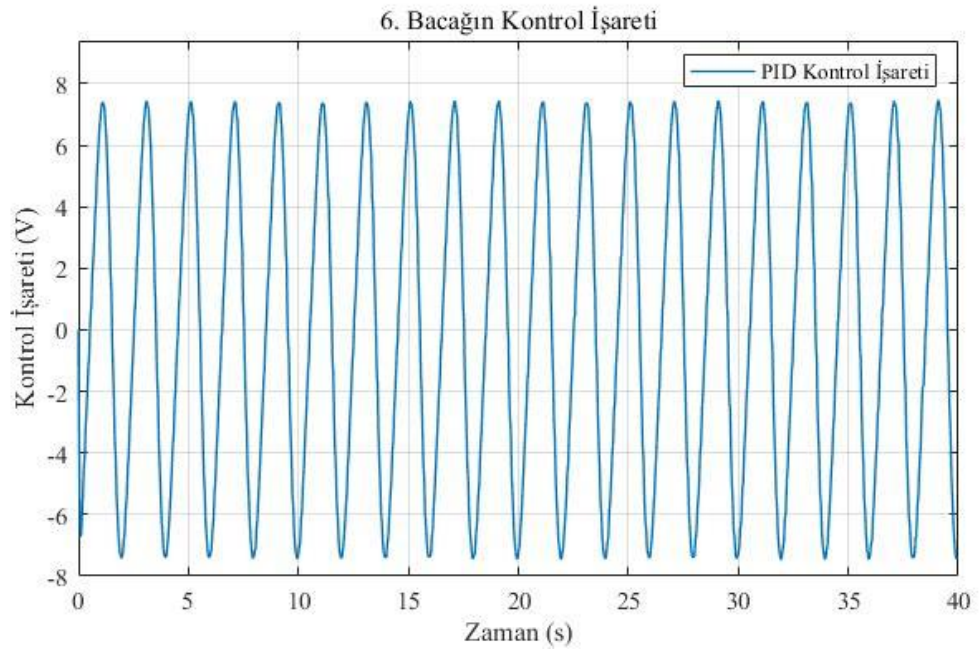
(c)



(d)



(e)

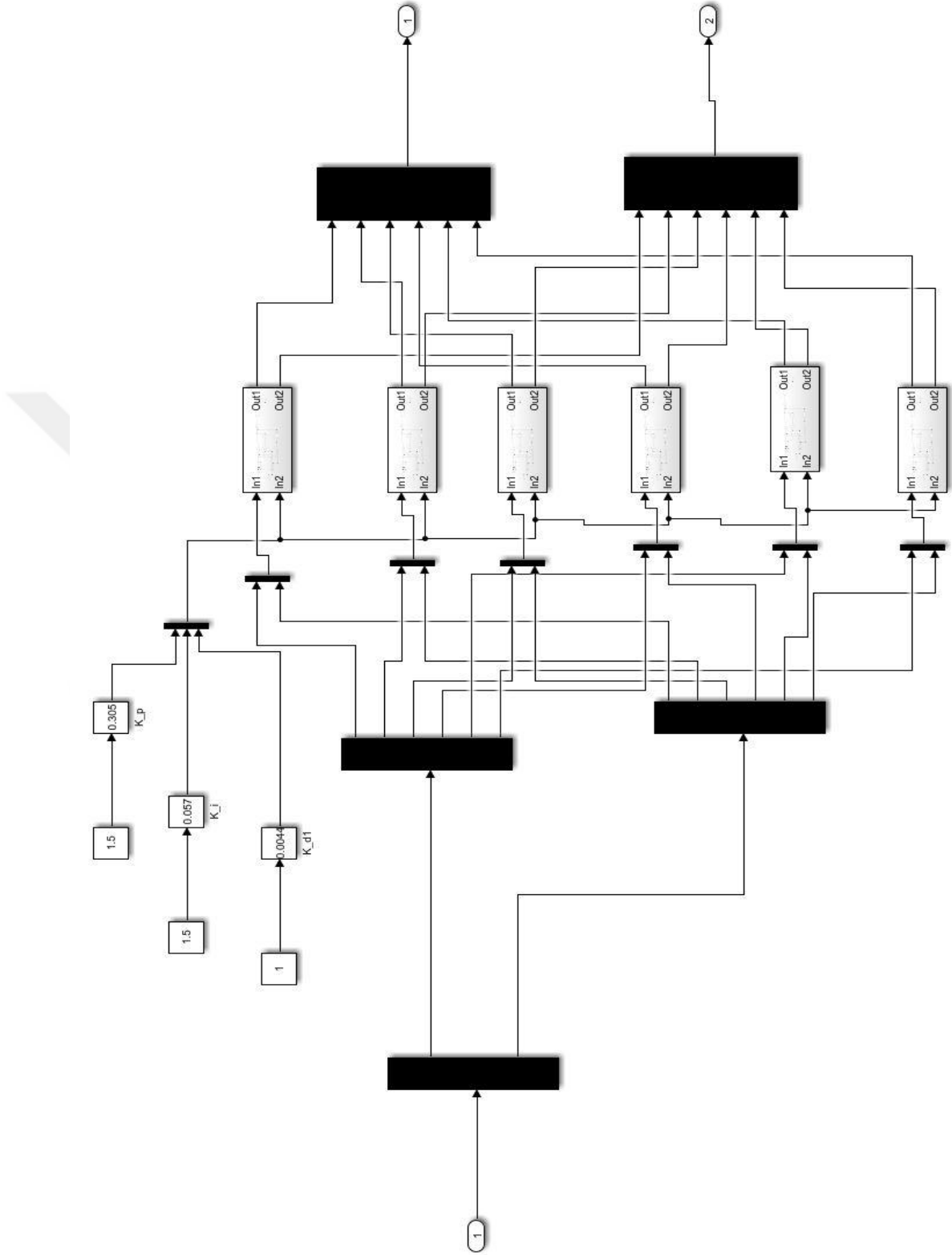


(f)

Şekil 4. 11 Simülasyon 3 için kullanılan denetleyici işaretleri

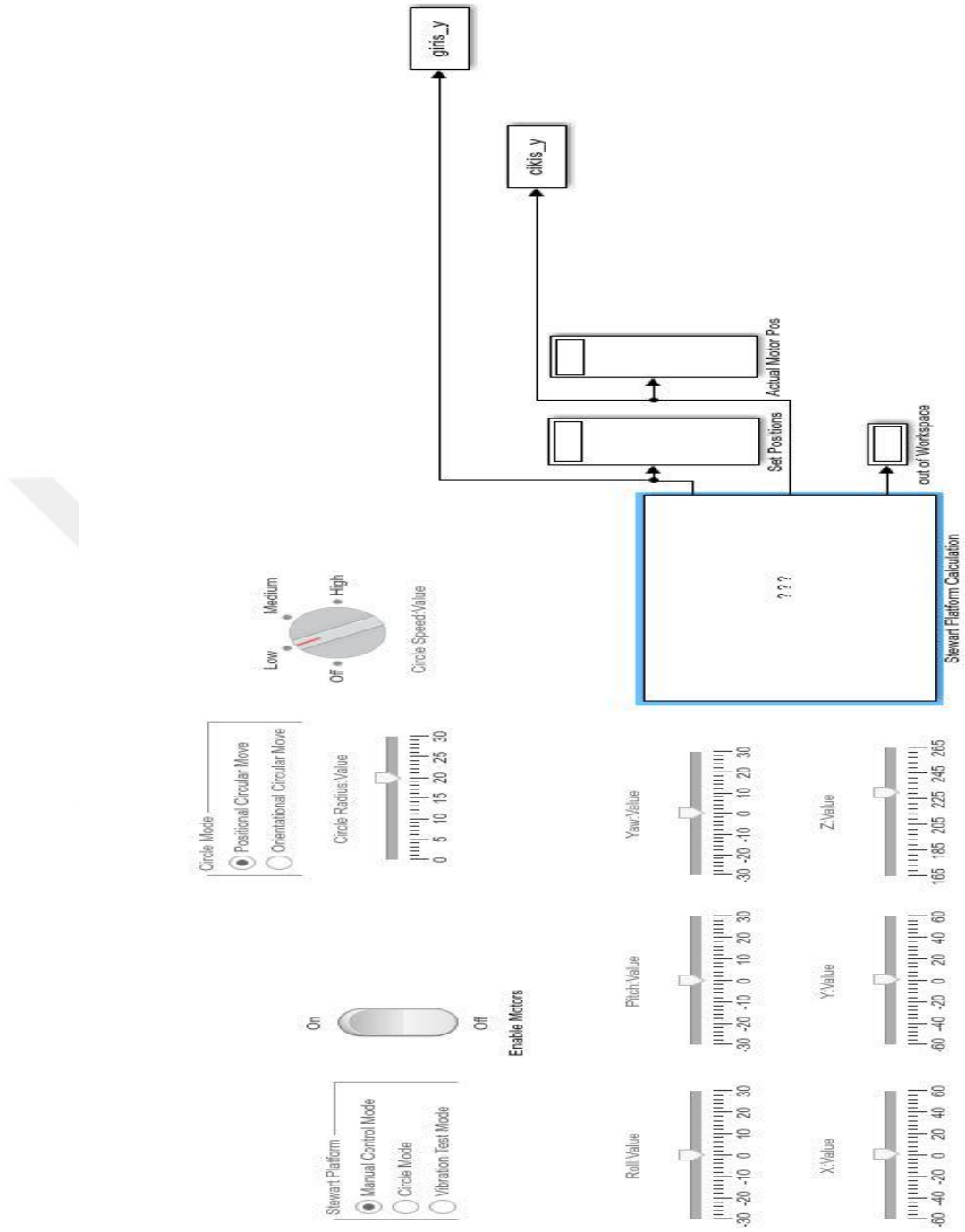
Şekil 4.11’de tez çalışmasında kullanılan Stewart platformda her bir altı bacağı ait kontrol işaret grafik sonuçları gösterilmiştir. Önceki çalışmalarda olduğu gibi doğrusal motorların 24 volt üst sınır gerilimi aşmadığı gözlemlenmektedir.

4.2. Gerçek Zamanlı Yörünge Kontrol Deneylerinden Elde Edilen Bulgular



Şekil 4. 12 Gerçek zamanlı Stewart platform uygulamasında kullanılan tasarım

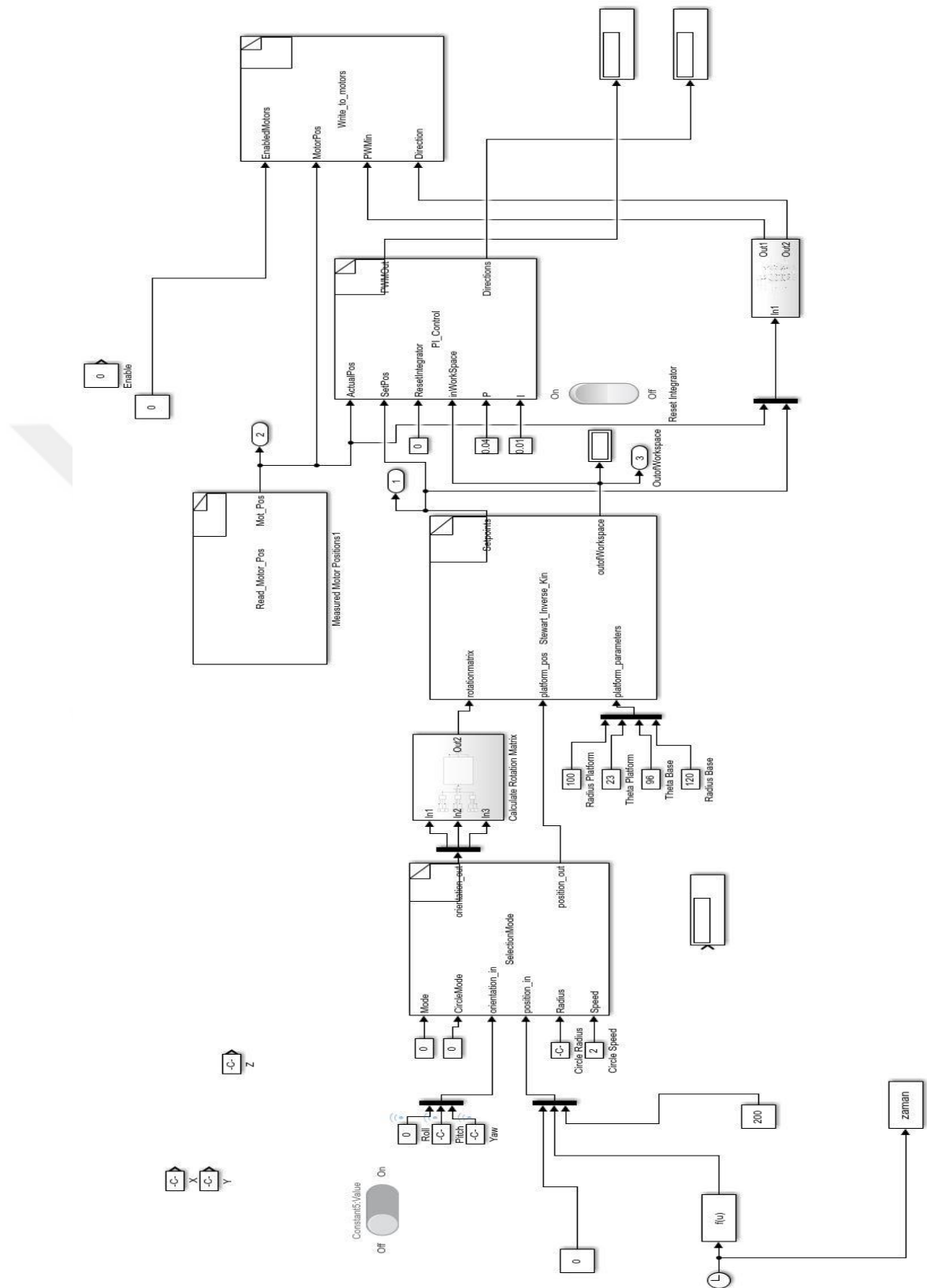
Şekil 4.12 de Stewart platform uygulamasında yörünge kontrolünün gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmesi aşamasında tasarlanan yapı gösterilmektedir. Şekil 4.12 de altı adet bacak boy kontrolü için kullanılan alt sistemlerinden birini göstermektedir. 1 numaralı giriş ile referans olarak tanımlanan koordinat ve yönelim değerleri ters kinematik denklemler kullanılarak elde edilen referans bacak boy uzunluğunu hesaba almaktadır. Daha sonra bu referans değer toplayıcının artısına bağlanırken toplayıcının eksi ucuna o anda ki mevcut bacak boy değeri bağlanmaktadır. Aradaki hata değeri Şekil 4.12 de gösterildiği gibi PID kontrol kısmına giriş olarak verilmektedir. Kontrolcü çıkışındaki işaret ise sisteme girdi olarak uygulanmaktadır. Elde edilen kontrol işareti öncelikle PWM işaretine dönüştürülerek veri iletişim kartının PWM çıkışlarına bu işaret gönderilir. Daha sonra bu işaretler doğrusal motorların sürücülerine uygulanarak motorların istenilen konuma gelmesi sağlanmaktadır.



Şekil 4. 13 Gerçek zamanlı Stewart platformun ön panel gösterimi

Şekil 4.13 de uçuş simülatörünün ön panel yapısı gösterilmektedir. Bu ön panel ile yörünge denetimi sağlanmaktadır. Ön panelin sağ alt köşesinde iki ekran vardır. Ayarlanan konumları ve gerçek motor konumlarını gösterirler. Ön panelin sol üst köşesinde, program Stewart Platformunu kontrol etmek için mod yapısına sahiptir. Yapının “Manuel Kontrol”, “Daire” ve “Titreşim” olmak üzere üç modu vardır. Manuel Kontrol modunda, X-Y-Z konumlarını ve yuvarlanma-eğim-yaw oryantasyon açılarını değiştirmek için altı kaydırıcı vardır.

Şekil 4.13 de gerçek zamanlı uçuş simülatörlerinde kullanılan Stewart platformun çalışma içeriği verilmiştir. Bu aşamada gerçekleştirilen PID denetleyicisi ve kullanılan doğrusal motorların işlevleri gösterilmektedir. Bu aşama üzerinde çalışılarak Stewart platform çalışır hale getirilmektedir.



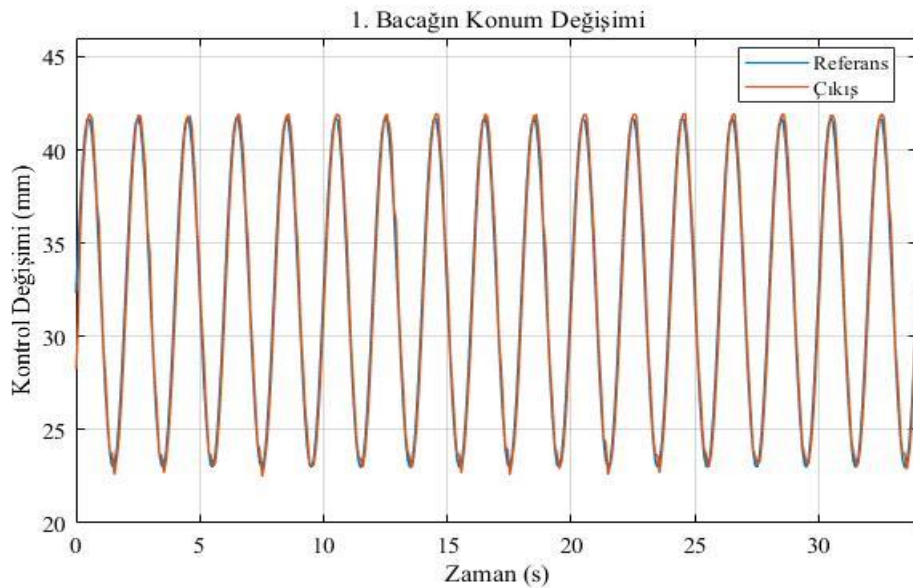
Şekil 4. 14 Gerçek zamanlı Stewart platform uygulamasının çalışma içeriği

Tez çalışmasının son aşaması olan gerçek zamanlı PID konum kontrolünde konum değişim cevapları, konum hata ve kontrolcü işaret grafikleri alınarak belirtilmiştir. Bunun için x, y ve z eksenlerine değişken atayıp üç farklı deney sonucu alınmıştır. Denetleyici parametreleri ise en iyi sonucu sağlayacak şekilde PID kontrol için kazanç değerleri $K_p = 0,4575$, $K_i = 0,0855$, $K_d = 0,0044$ olarak seçilmiştir.

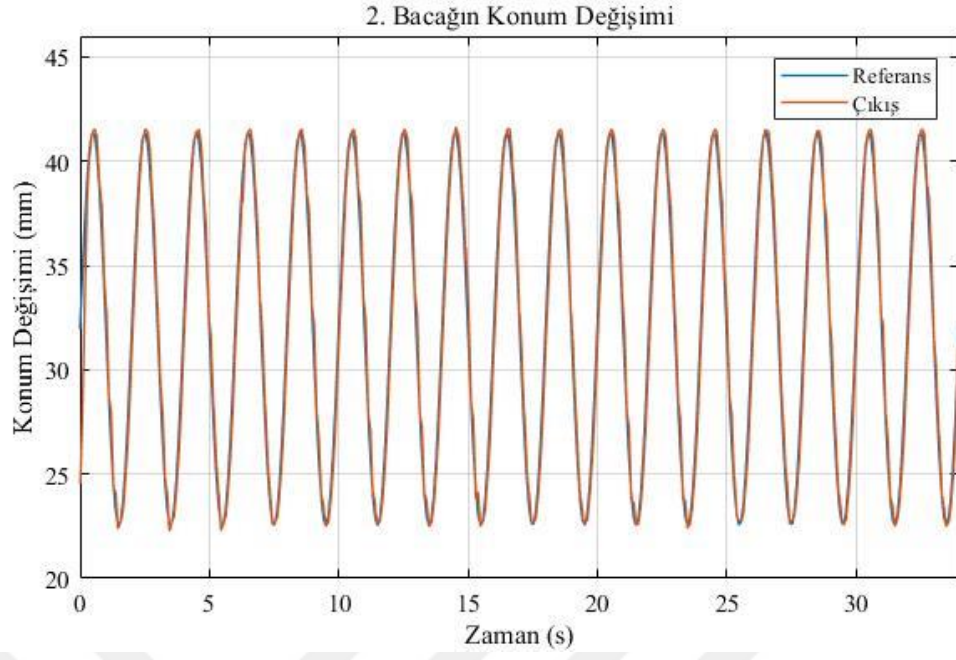
4.2.1 Deney 1: Bu deneyde, mekanizmanın hareketli üst platformun z eksen doğrultusunda hareketinin gerçekleşmesi esnasındaki konum takibi incelenmiştir. Kontrol sistemine referans değeri olarak ters kinematik analiz ile platformun istenen konum değerine karşılık gelen bacak boy değerleri, çıkış olarak ise mekanizma bacaklarının boyları esas alınmıştır. Bu sayede sistemin konum takibi elde edilmiştir. Bu konum takibinde kullanılan referans koordinatlar denklem (4.2.1) ile aşağıda belirtilip bu deney esnasında elde edilen grafikler sunulmuştur.

$$x(t) = 0, y(t) = 0, z(t) = 200 + 10\sin(2 * \pi * (5/10) * t) \quad (4.2.1)$$

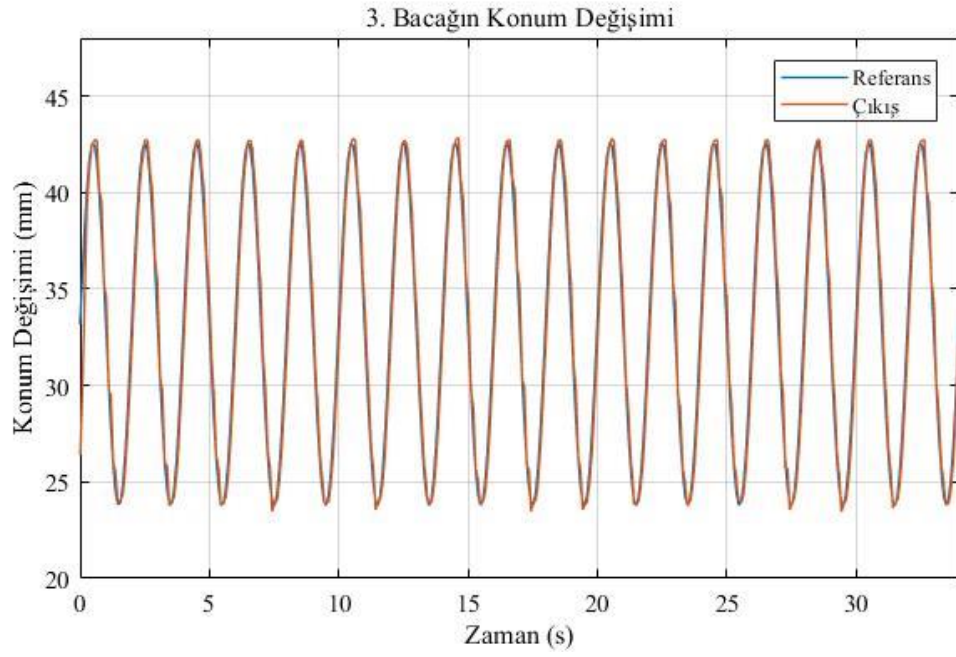
Değişken değerleri esas alınarak mevcut bulunan 6 bacak için takip yapılarak konum değişim grafikleri şekil 4.15 de gösterilmiştir.



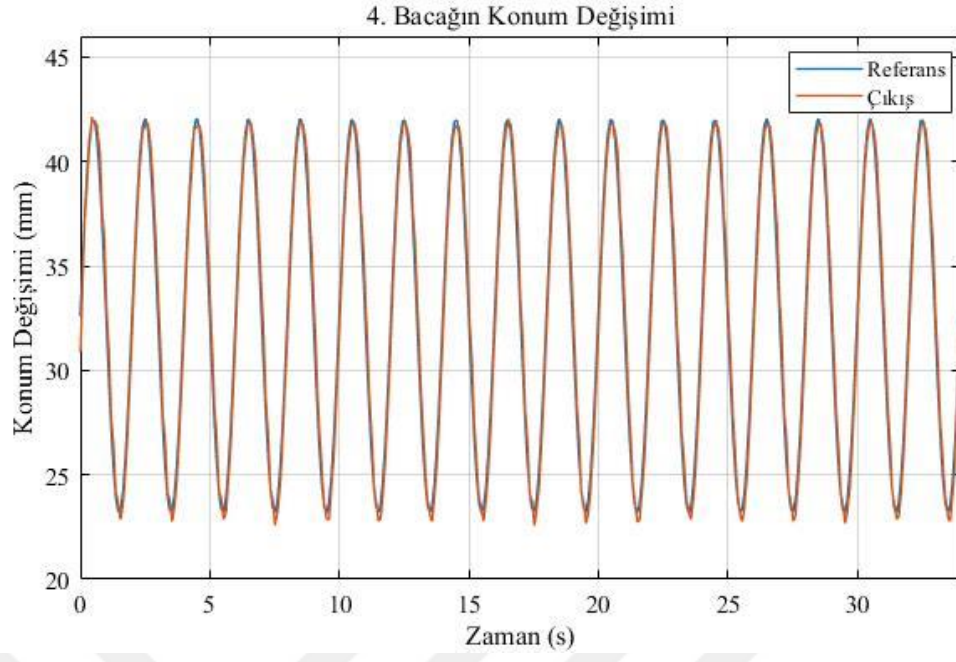
(a)



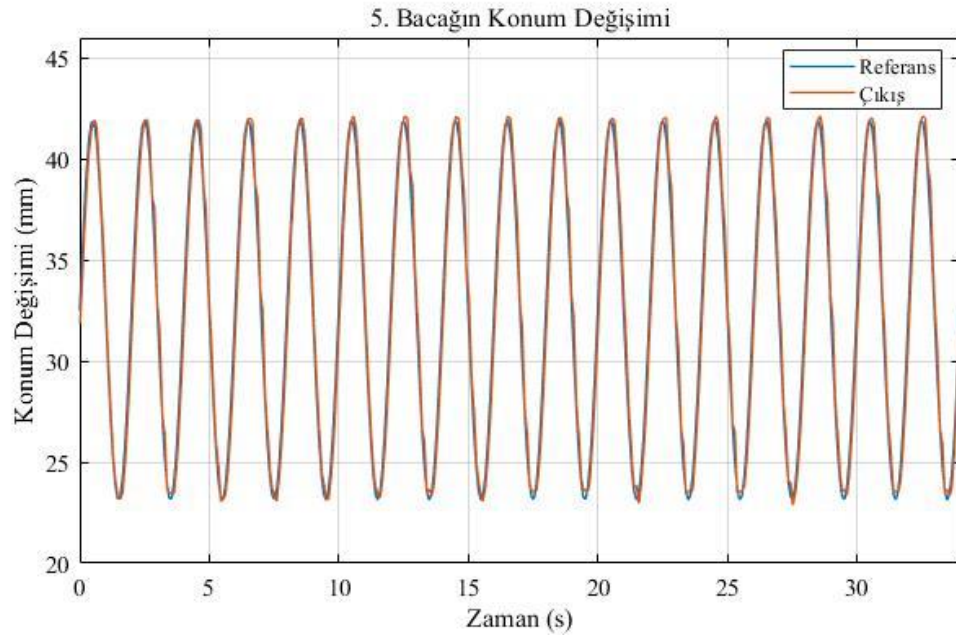
(b)



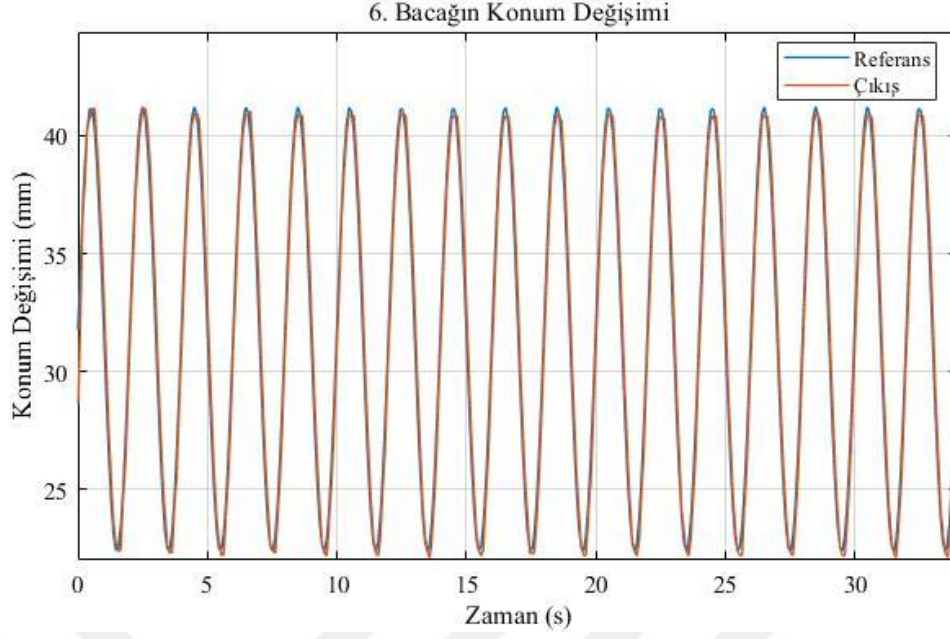
(c)



(d)



(e)

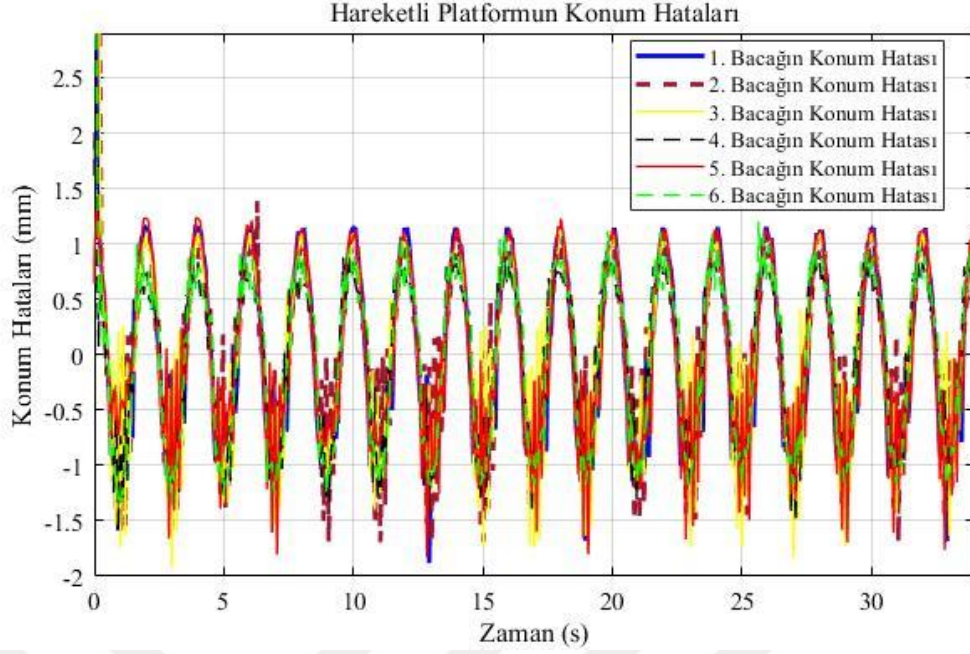


(f)

Şekil 4. 15 Gerçek zamanlı deney 1 için PID denetleyicisi ile gerçekleştirilen konum değişimleri

Şekil 4.15 de z ekseninde verilen referans değerleri için bacakların PID kontrol ile yapılan konum değişim grafikleri sunulmuştur. Grafiklerin alt ve üst sınırlarında gerçekleşen değerler sonucunda bacaklar harekete geçerek z ekseninde yönelim gerçekleştirmiştir. Konum değişimlerinin hangi bacağa ait olduğu grafiklerin üzerinde belirtilmiştir. Konum değişimleri 37,82 saniyede gerçekleştirilerek sonuç alınmıştır.

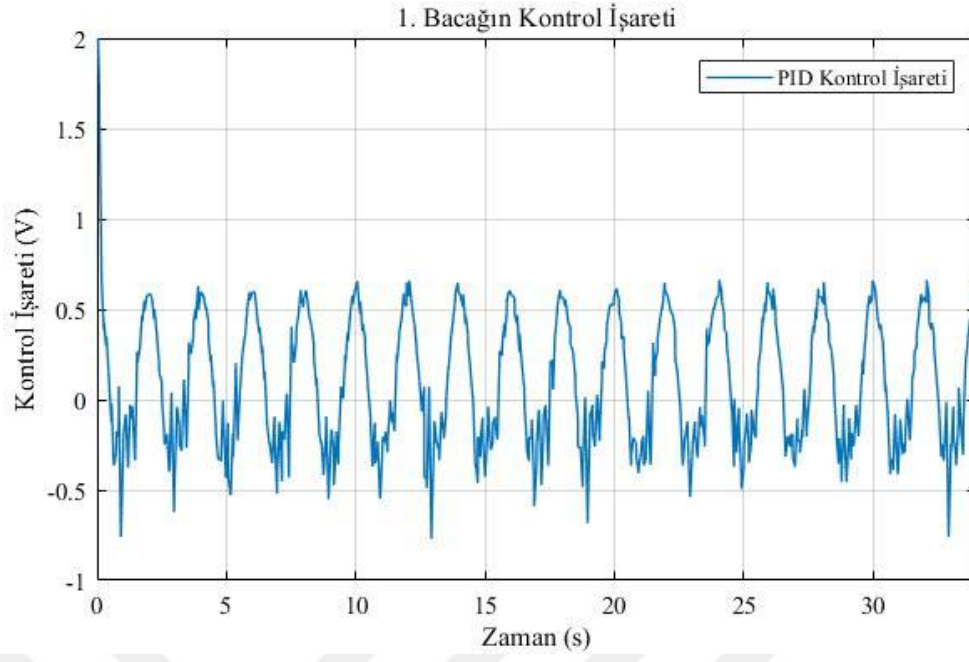
Seçilen kazanç parametrelerine bağlı olarak PID denetleyicisi kullanılması durumunda tüm bacak boylarında meydana gelen konum hataları şekil 4.16 da gösterildiği gibi elde edilmiştir.



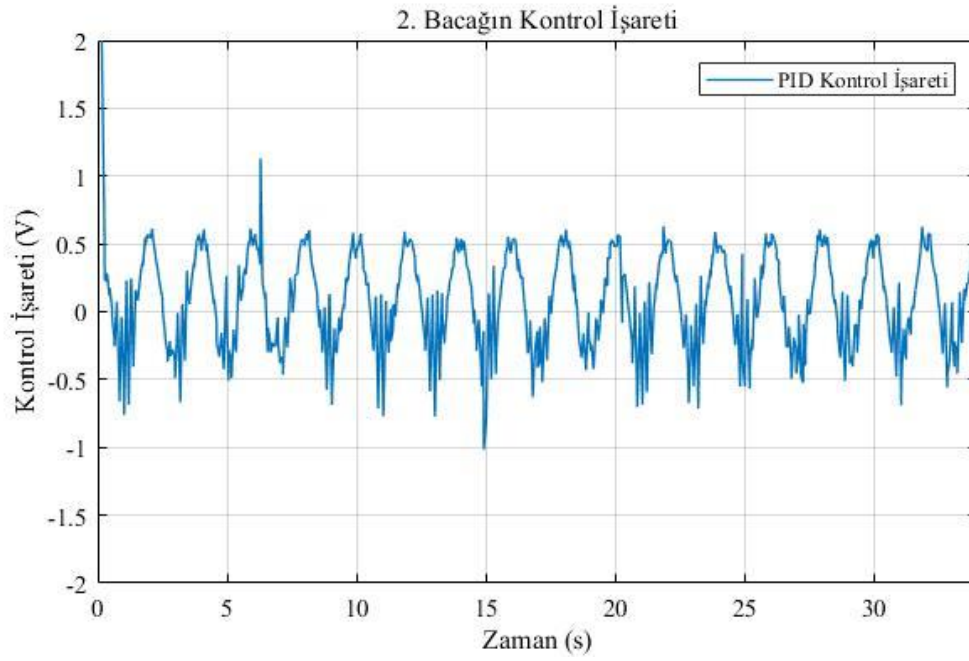
Şekil 4. 16 Gerçek zamanlı sistemde deney 1 için PID denetleyicisi kullanılması durumunda bacaklarda meydana gelen konum hataları

Şekil 4.16 da görüldüğü gibi bacak boylarında meydana gelen konum hataları, manipülörün hareketli platformu için tanımlanan yörüngelerde az da olsa istenmeyen konum hatalarına sebep olmuştur. Gerçek zamanlı elde edilen konum hataları için her bir 6 bacak farklı renklerde gösterilmiştir.

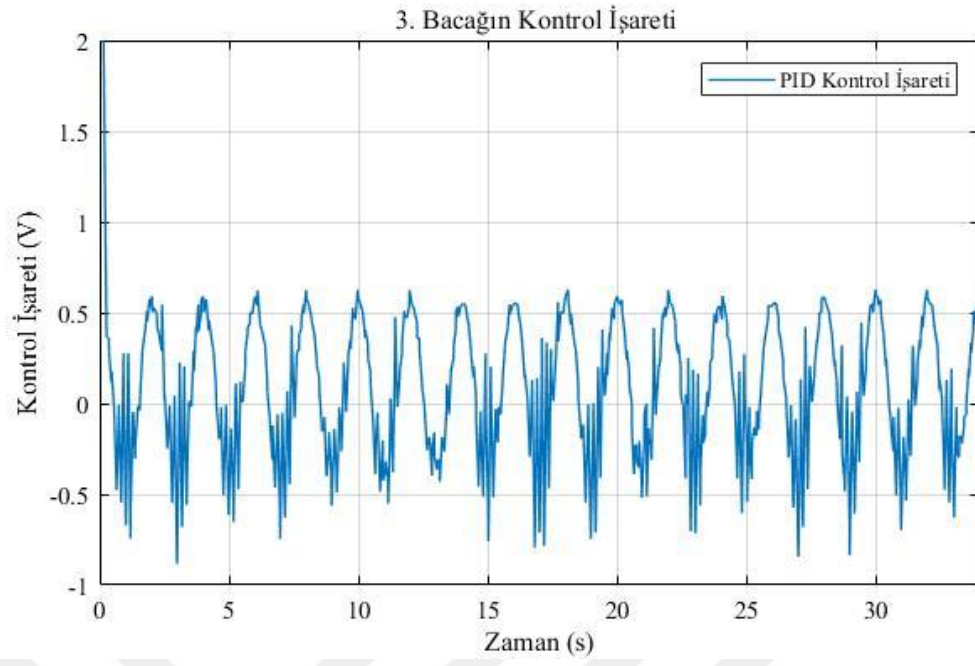
Kontrolcülerin performanslarına göre her bir bacakta bulunan motorlar için üretilen kontrolcü işaret değişimleri şekil 4.17 de gösterilmiştir.



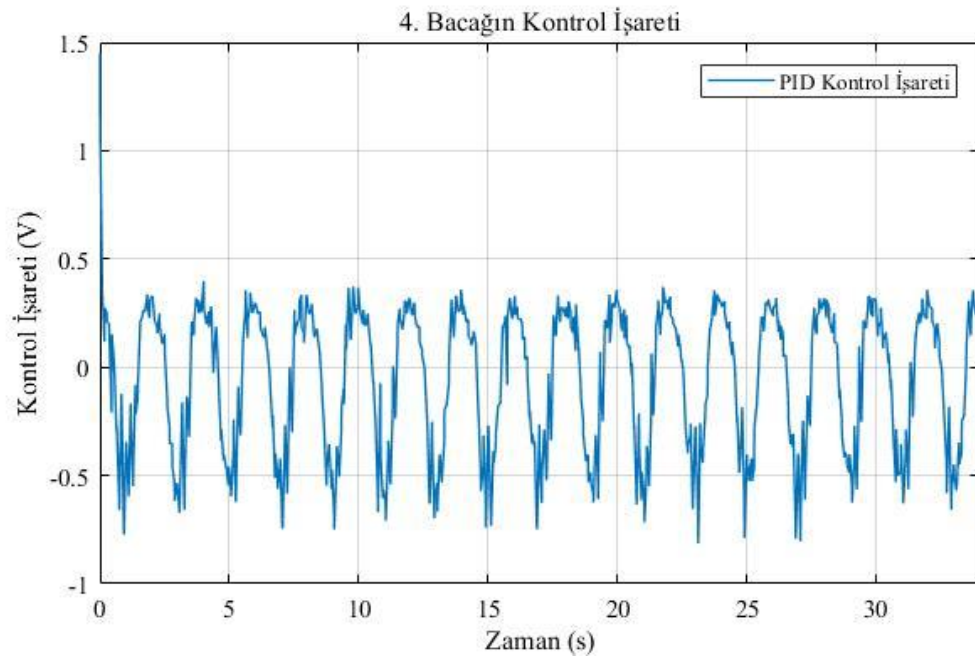
(a)



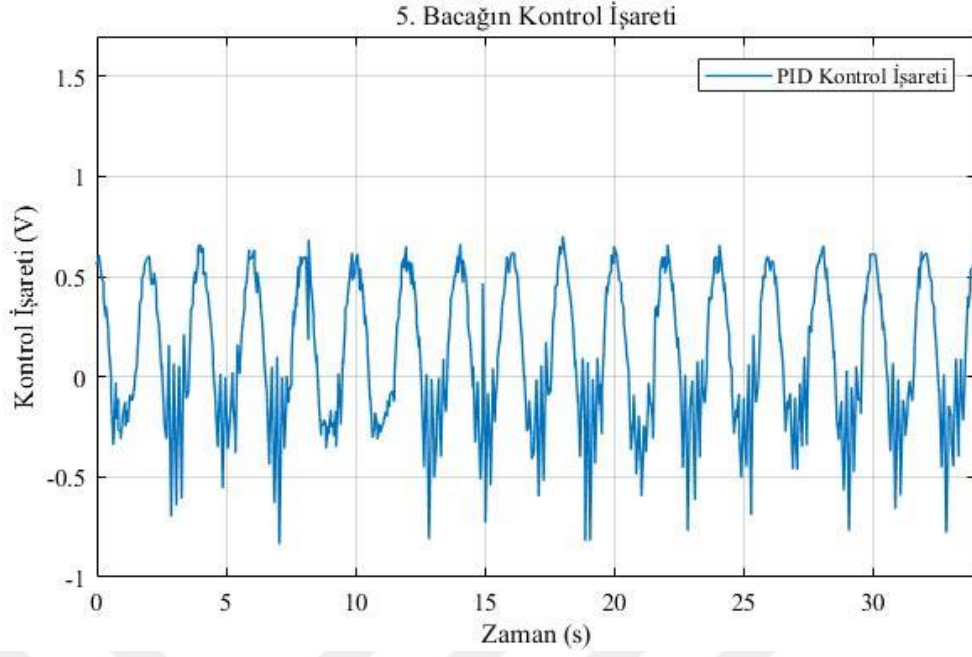
(b)



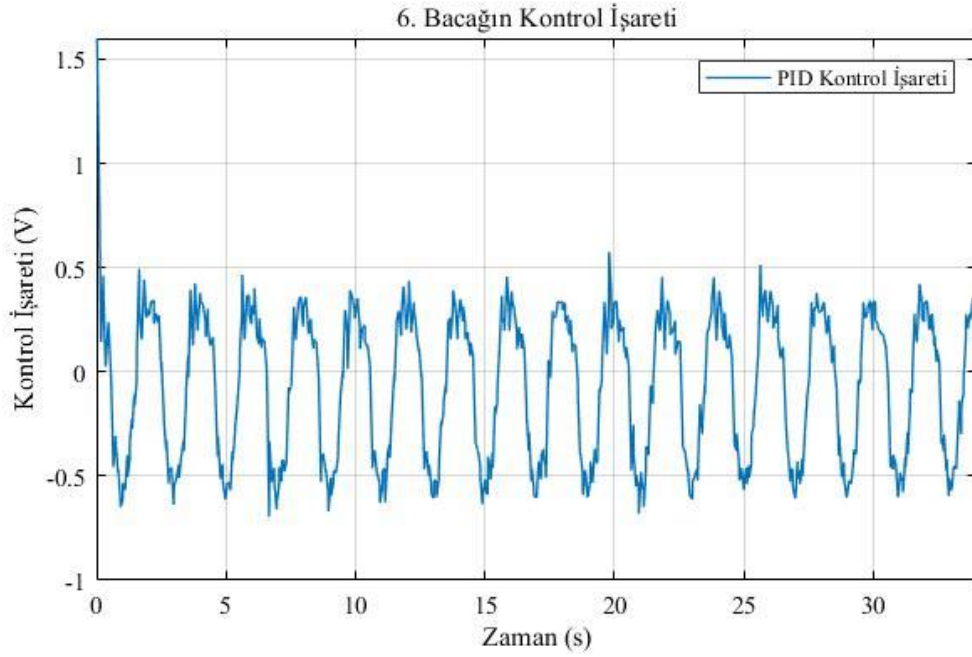
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4. 17 Gerçek zamanlı sistemde deney 1 için kullanılan denetleyici işaretleri

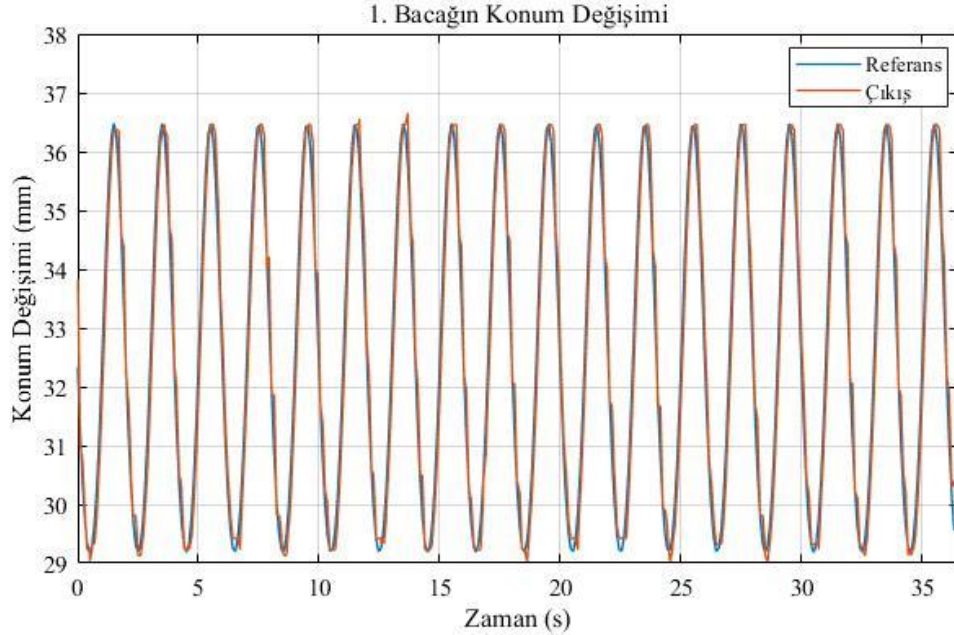
Şekil 4.17’de tez çalışmasında kullanılan Stewart platformda her bir altı bacağa ait kontrol işaret grafik sonuçları gösterilmiştir. Ayrıca grafiklerin hangi bacağa ait olduğu üzerinde belirtilmiştir. Gerçek zamanlı kontrol işaretlerinin simülasyona göre düşük genlikte çıkmasının sebebi kullanılan PID parametrelerinden kaynaklanmakta olup

bu kontrol işaretleri bir kazanç ve aralık vasıtasıyla PWM işaretlerine dönüştürülmektedir.

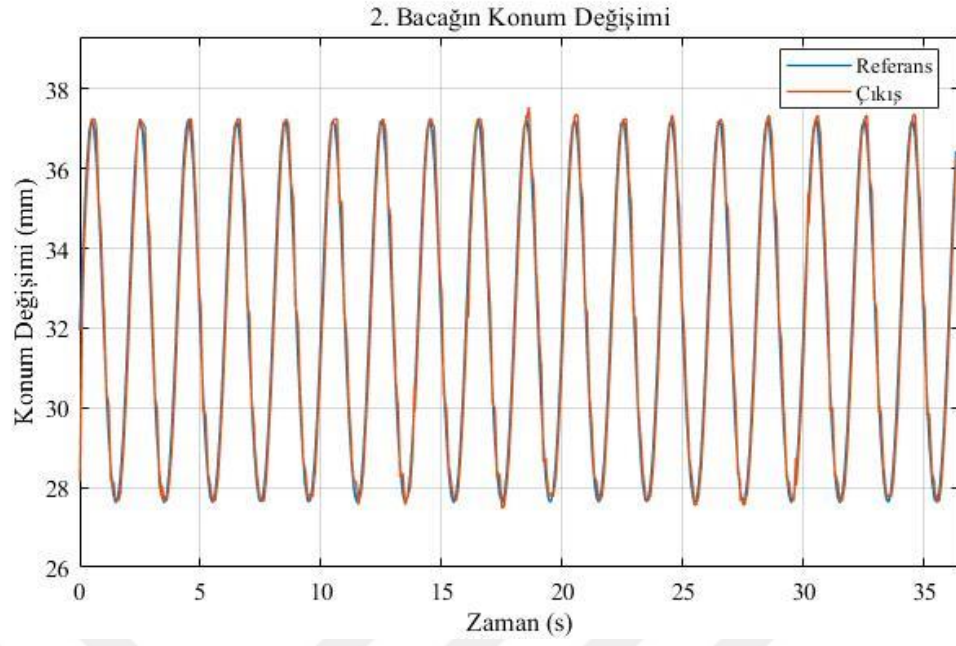
4.2.2 Deney 2: Bu deneyde, mekanizmanın hareketli üst platformun x eksenini doğrultusunda hareketinin gerçekleşmesi esnasındaki konum takibi incelenmiştir. Kontrol sistemine referans değeri olarak ters kinematik analiz ile platformun istenen konum değerine karşılık gelen bacak boy değerleri, çıkış olarak ise mekanizma bacaklarının boyları esas alınmıştır. Bu sayede sistemin konum takibi elde edilmiştir. Bu konum takibinde kullanılan referans koordinatlar denklem (4.2.2) ile aşağıda belirtilip bu deney esnasında elde edilen grafikler sunulmuştur.

$$x(t) = 15 \sin(2 * \pi * (5/10) * t), y(t) = 0, z(t) = 200 \quad (4.2.2)$$

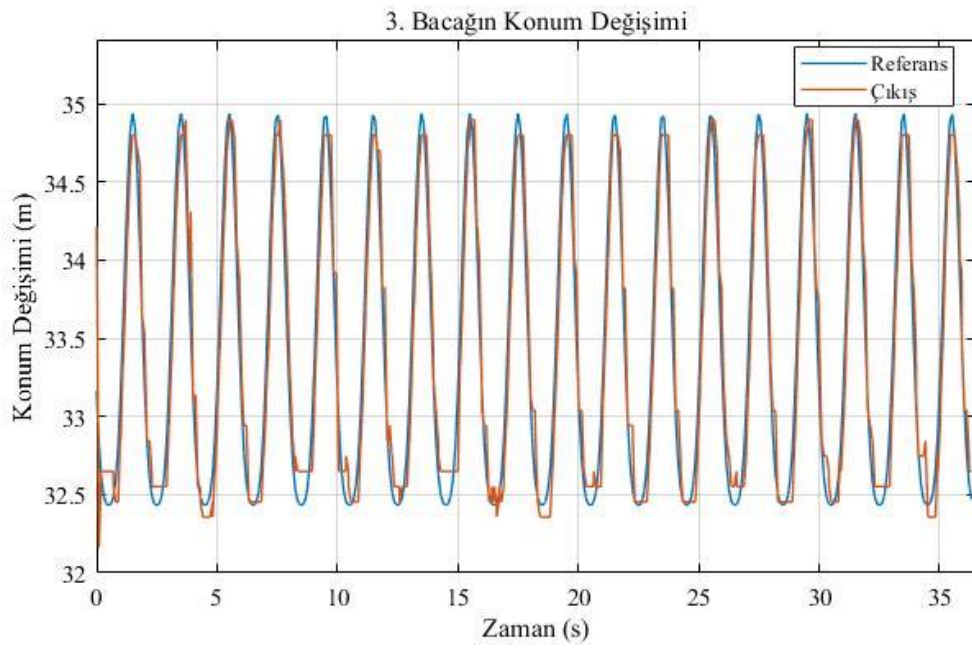
Değişken değerleri esas alınarak mevcut bulunan 6 bacak için konum takibi yapılarak konum değişim grafikleri şekil 4.18 de gösterilmiştir.



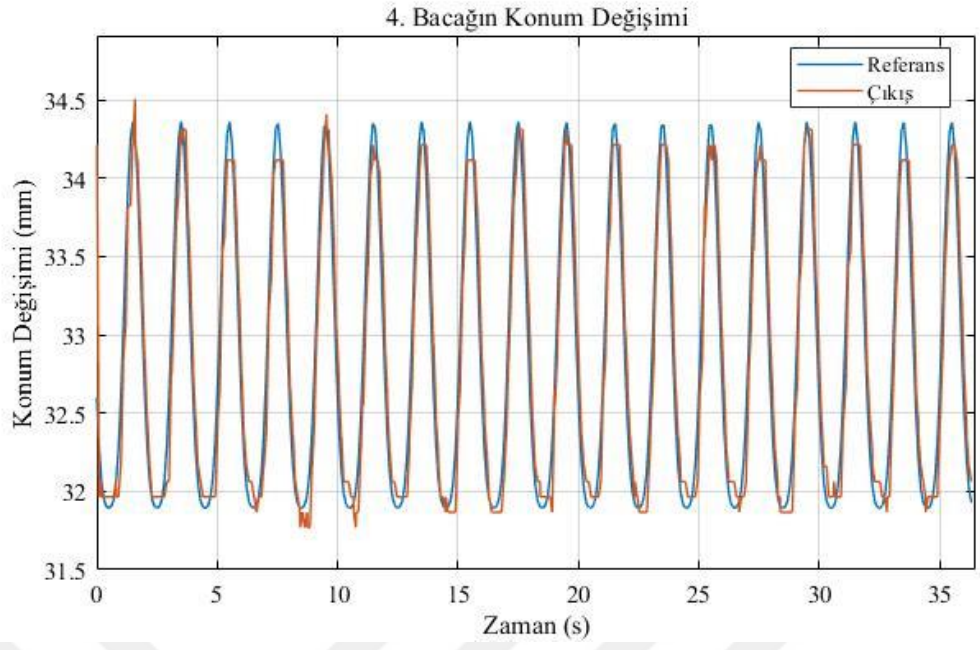
(a)



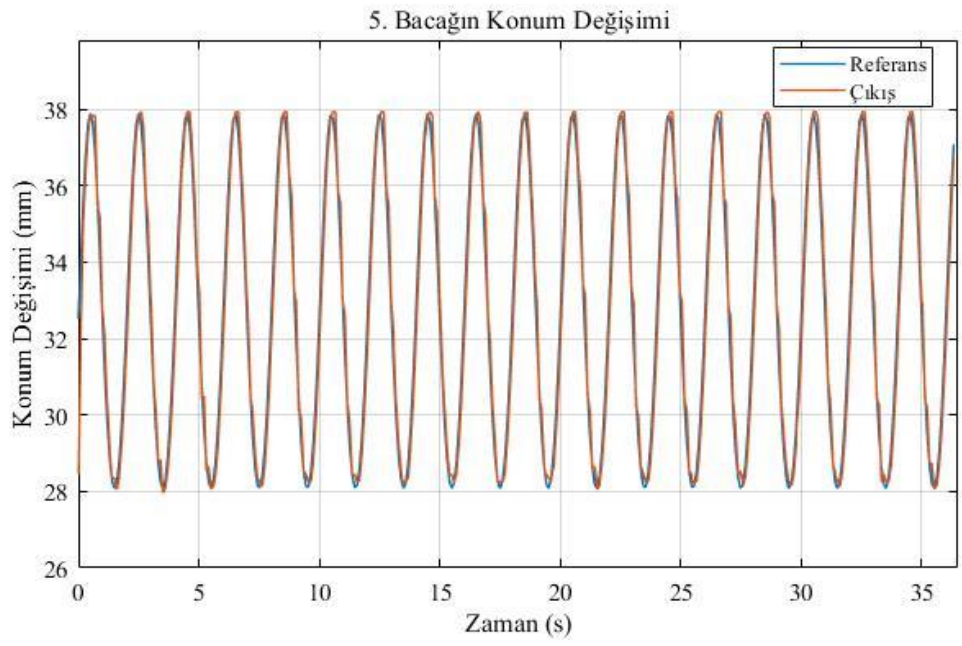
(b)



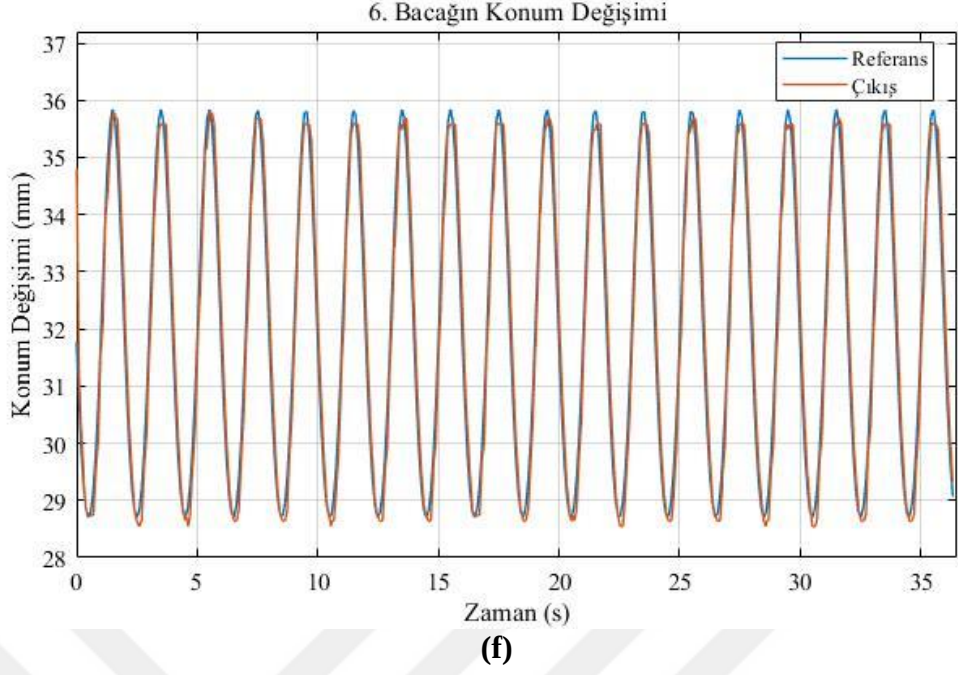
(c)



(d)



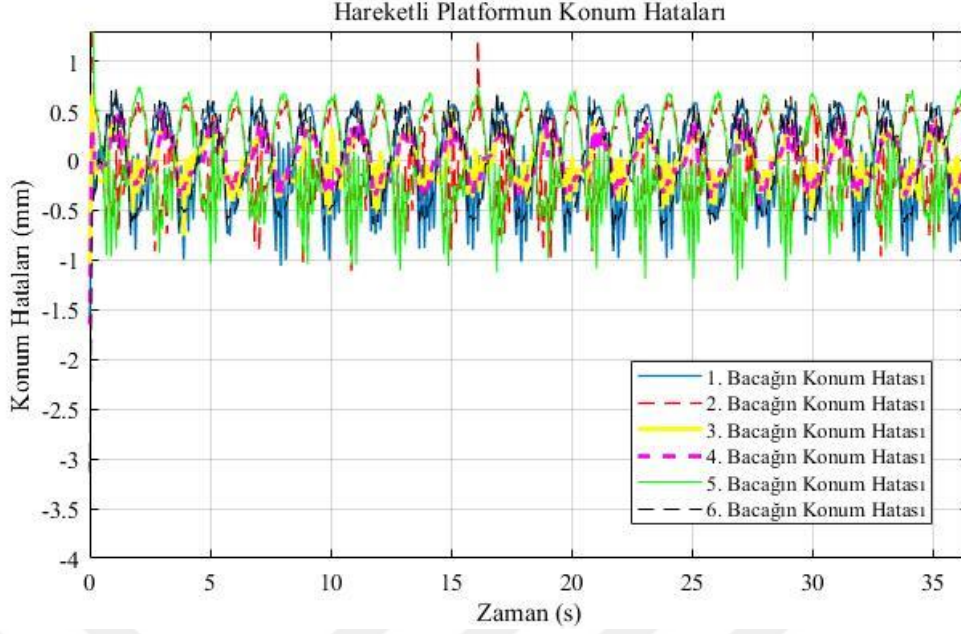
(e)



Şekil 4. 18 Gerçek zamanlı deney 2 için PID denetleyicisi ile gerçekleştirilen konum değişimleri

Şekil 4.18’de gösterilen grafikler x ekseninde verilen referans değerleri için bacakların PID kontrol ile yapılan konum değişim grafikleri sunulmuştur. X ekseninde hareketin gerçekleşmesi için grafiklerde görülen aralıklarda her bir bacağa ait değişim sergilenmiştir. Grafiklerin üzerinde hangi bacağa ait konum değişimi olduğu isimlendirilmiştir. Konum değişimleri 36,51 saniyede gerçekleştirilerek sonuç alınmıştır.

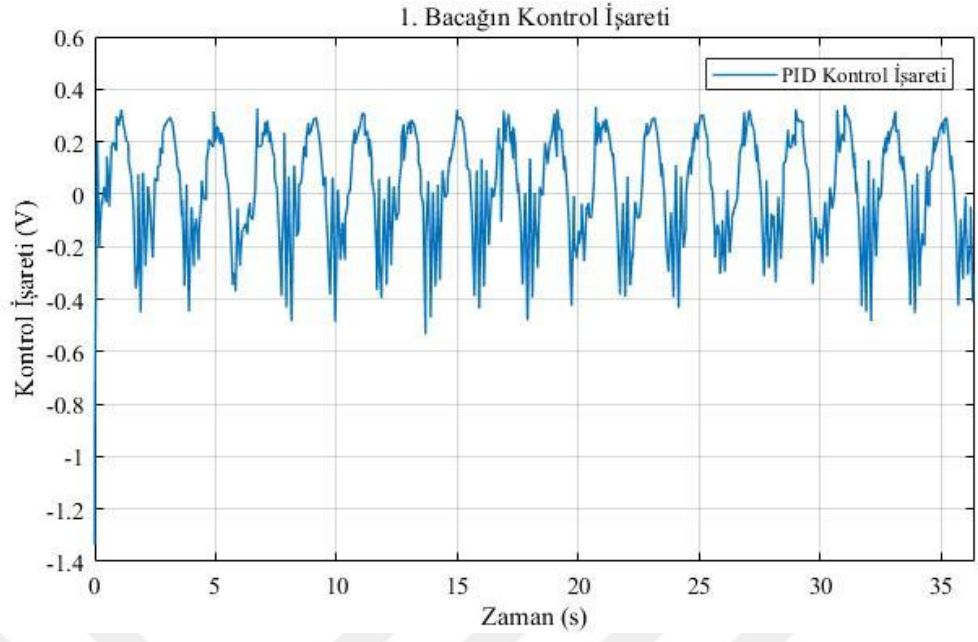
Seçilen kazanç parametrelerine bağlı olarak PID denetleyici kullanılması durumunda tüm bacak boylarında meydana gelen konum hataları şekil 4.19’da gösterildiği gibi elde edilmiştir.



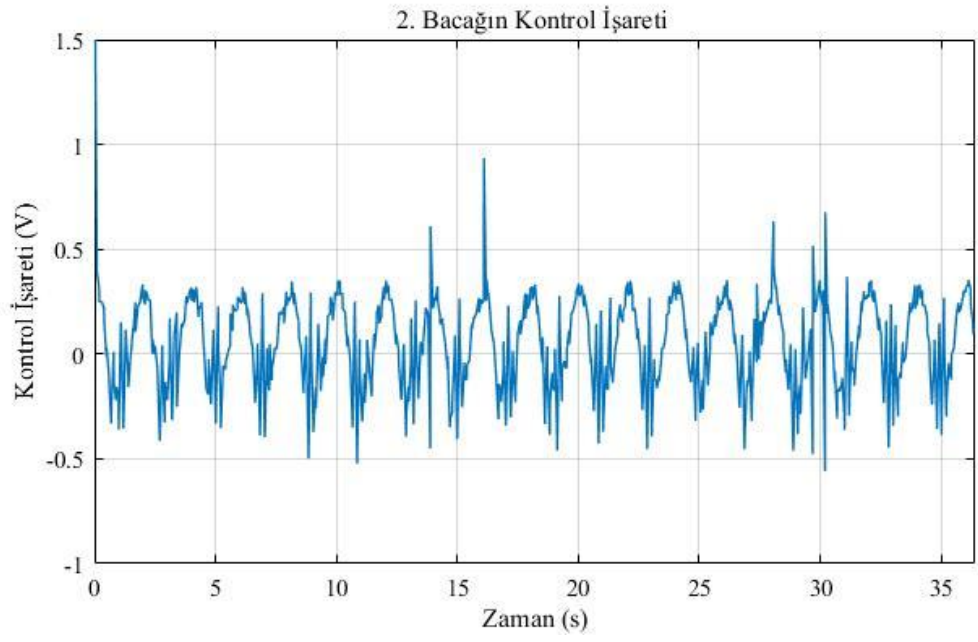
Şekil 4. 19 Gerçek zamanlı sistemde deney 2 için PID denetleyicisi kullanılması durumunda bacaklarda meydana gelen konum hataları

Şekil 4.19’da görüldüğü gibi bacak boylarında meydana gelen konum hataları, manipülörün hareketli platformu için tanımlanan yörüngelerde az da olsa konum hatalarına sebep olmuştur. Altı bacağa ait konum hataları farklı renklerle gösterilerek incelenmiştir.

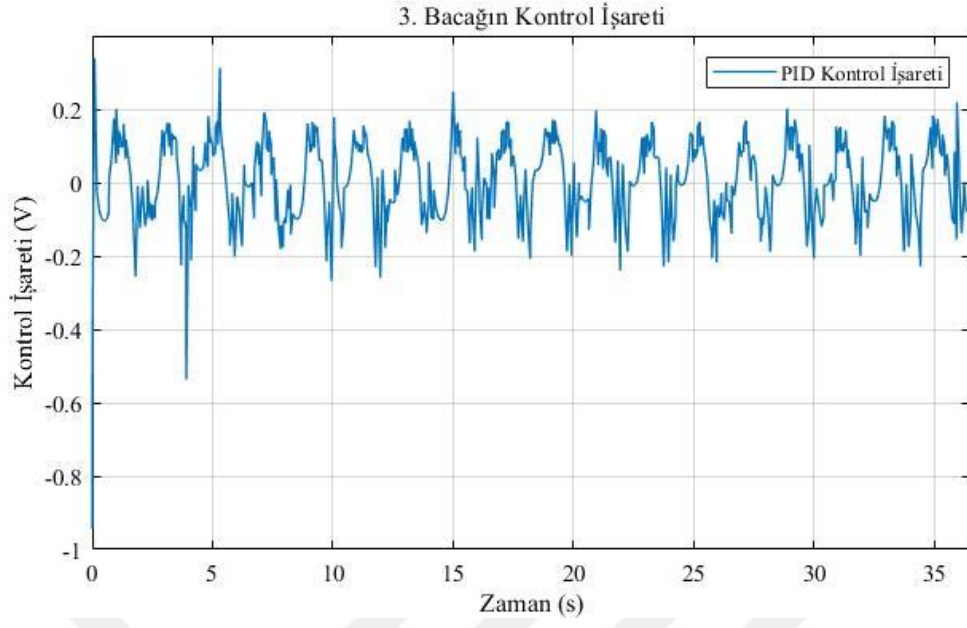
Kontrolcülerin performanslarına göre her bir bacakta bulunan motorlar için üretilen kontrolcü işaret değişimleri şekil 4.20 de gösterilmiştir.



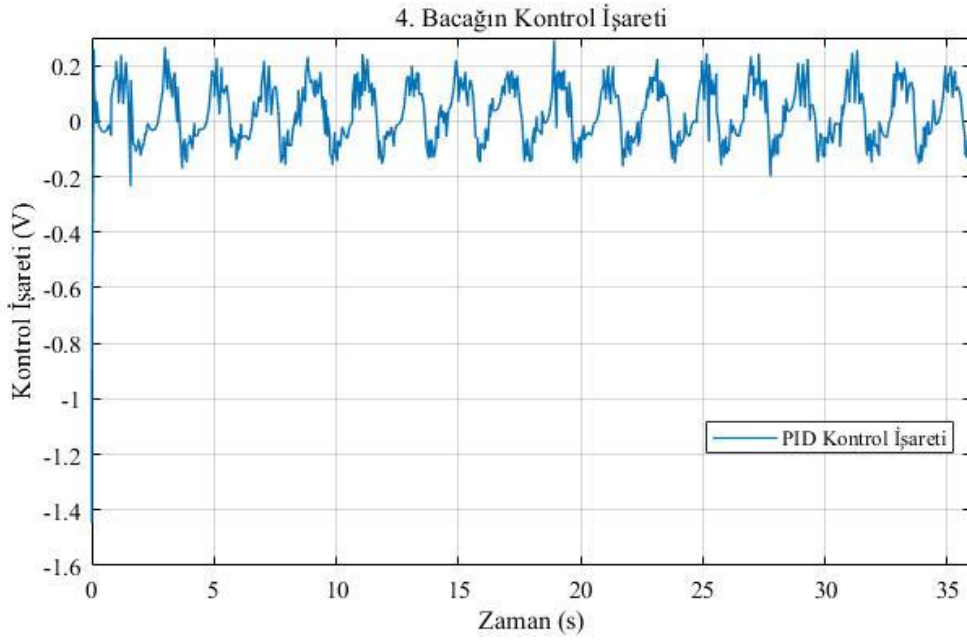
(a)



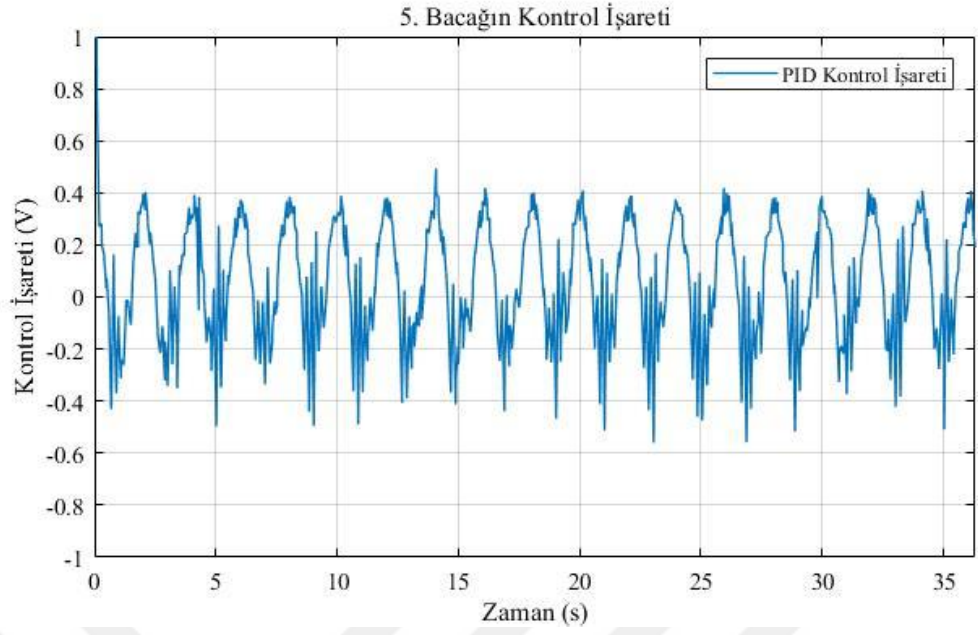
(b)



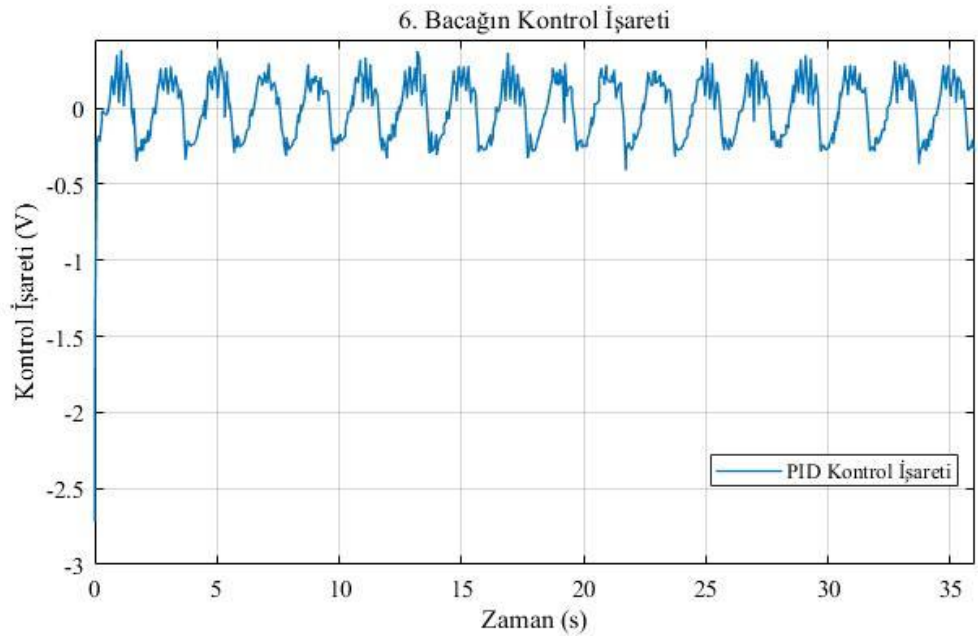
(c)



(d)



(e)



(f)

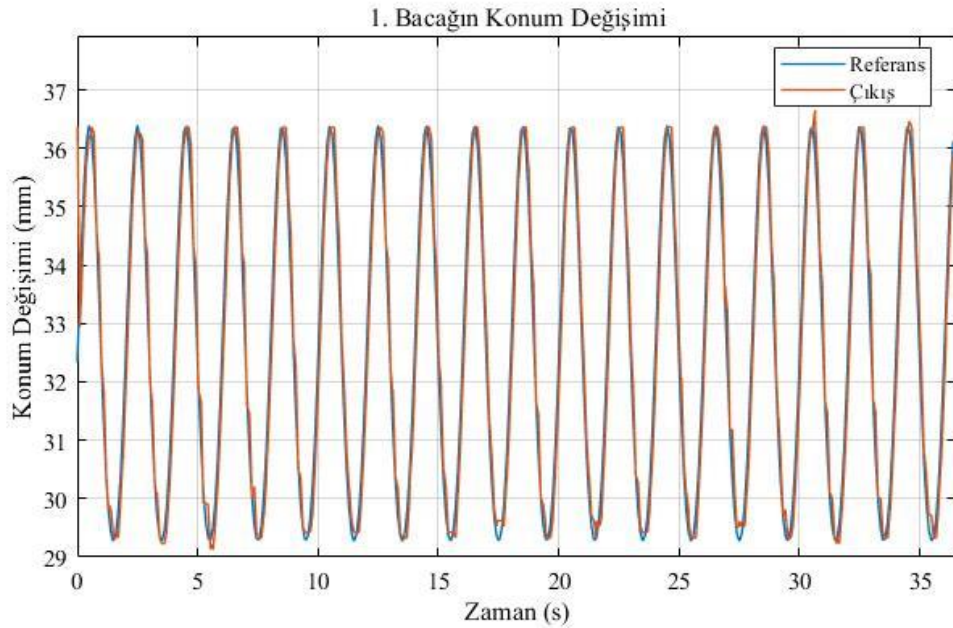
Şekil 4. 20 Gerçek zamanlı sistemde deney 2 için kullanılan denetleyici işaretleri

Şekil 4.20 de gerçek zamanlı sistemde kullanılan kontrolcü işaret grafikleri her altı bacak içinde gösterilerek grafikler üzerinde kaçınıcı bacağa ait olduğu verilmiştir.

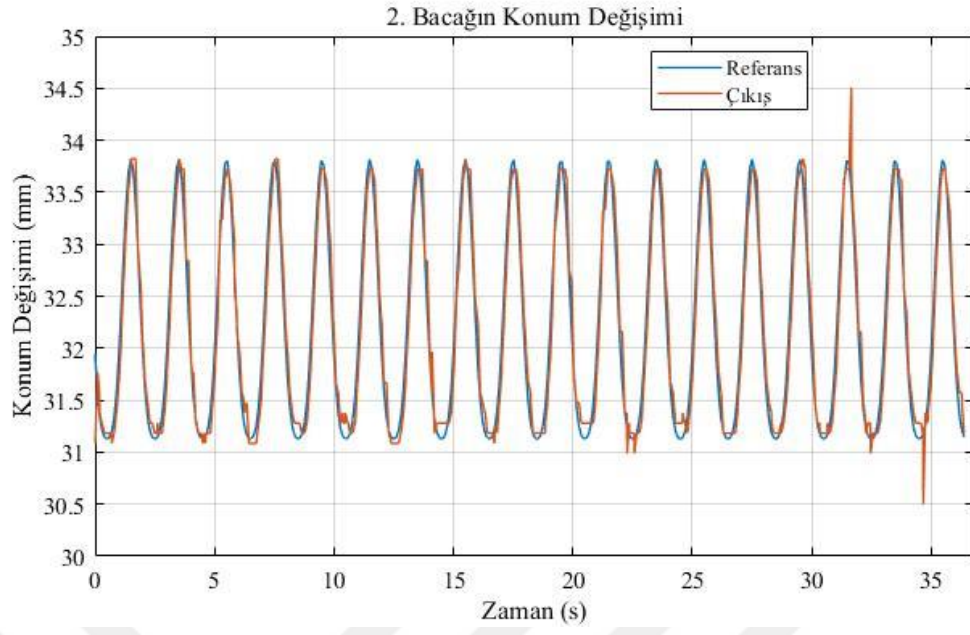
4.2.3 Deney 3: Bu deneyde, mekanizmanın hareketli üst platformun y eksenini doğrultusunda hareketinin gerçekleşmesi esnasındaki konum takibi incelenmiştir. Kontrol sistemine referans değeri olarak ters kinematik analiz ile platformun istenen konum değerine karşılık gelen bacak boy değerleri, çıkış olarak ise mekanizma bacaklarının boyları esas alınmıştır. Bu sayede sistemin konum takibi elde edilmiştir. Bu konum takibinde kullanılan referans koordinatlar denklem (4.2.3) ile aşağıda belirtilip bu deney esnasında elde edilen grafikler sunulmuştur.

$$x(t)=0, y(t)=15\sin(2 \cdot \pi \cdot (5/10) \cdot t), z(t)=200 \quad (4.2.3)$$

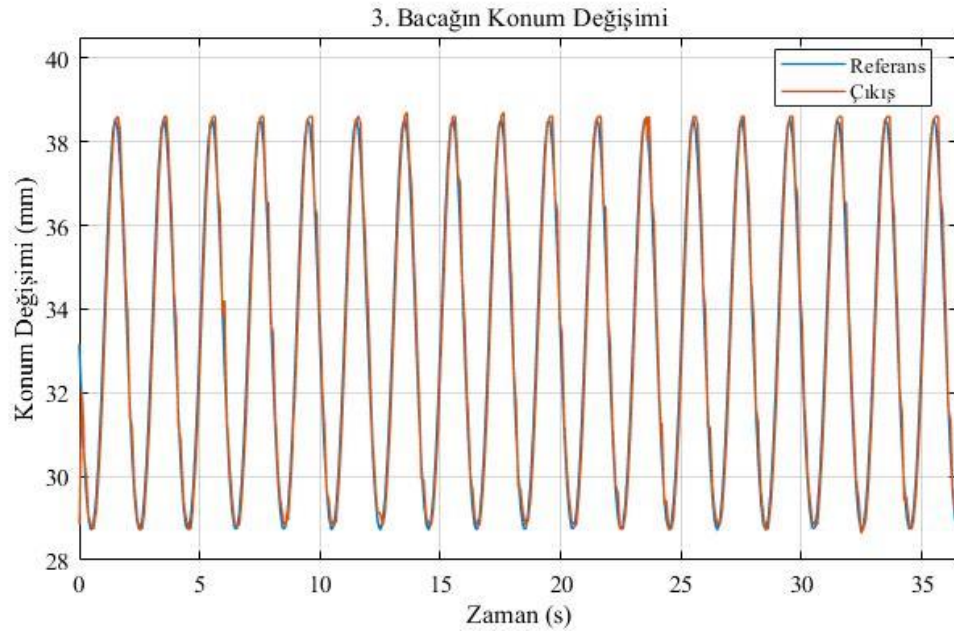
Değişken değerleri esas alınarak mevcut bulunan 6 bacak için konum takibi yapılarak konum değişim grafikleri şekil 4.21 de gösterilmiştir.



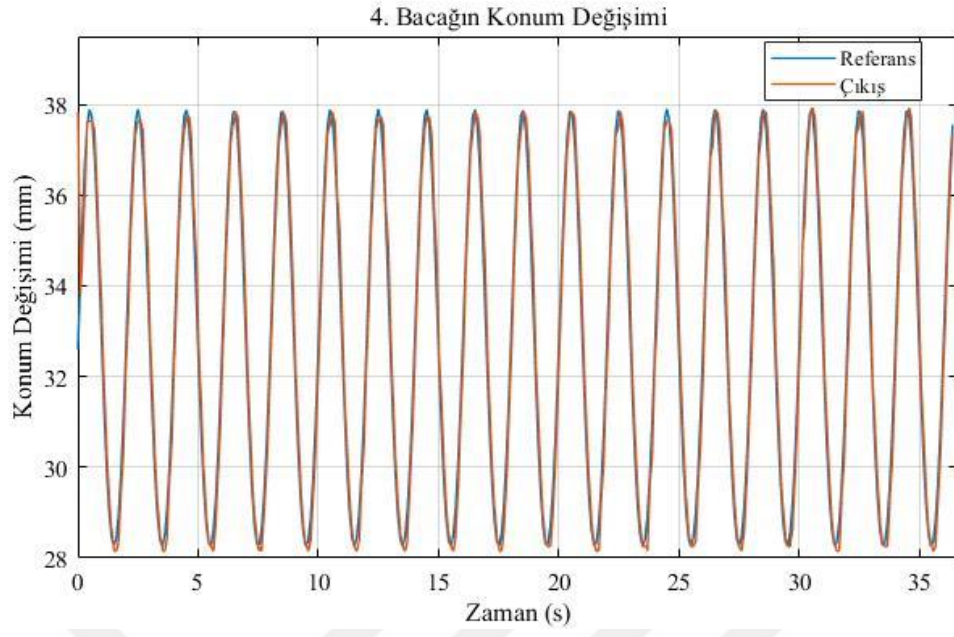
(a)



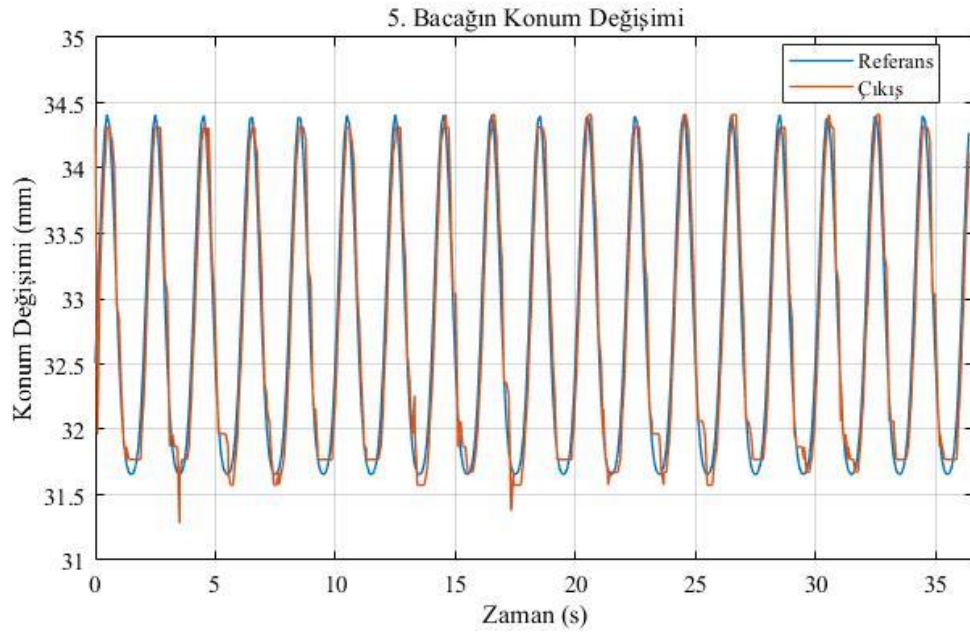
(b)



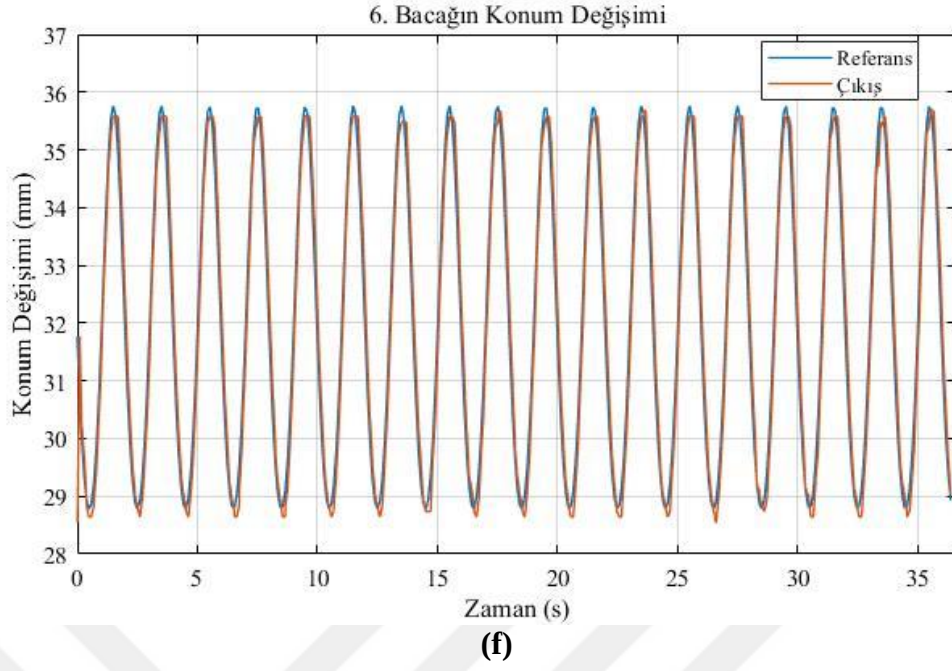
(c)



(d)



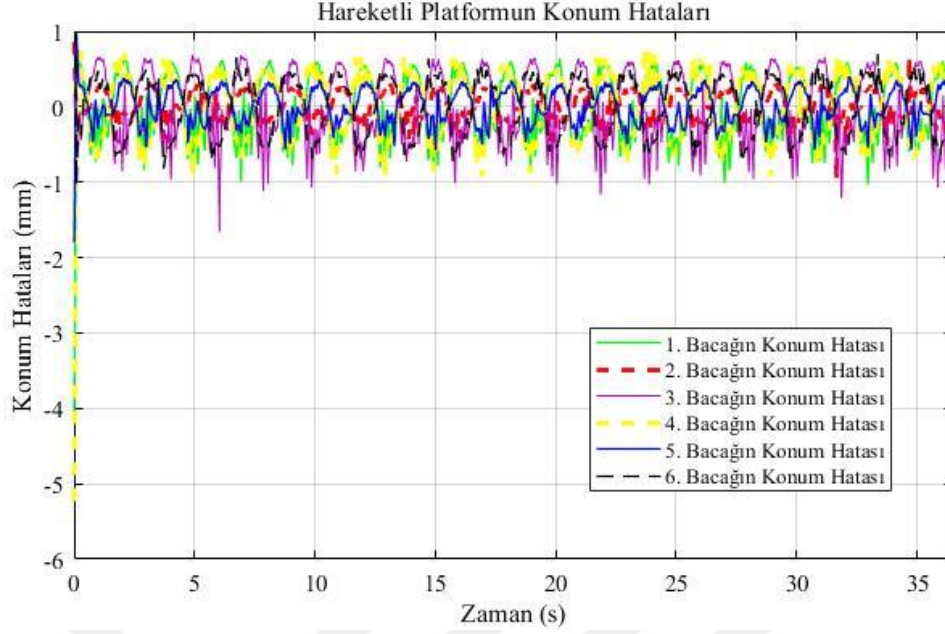
(e)



Şekil 4. 21 Gerçek zamanlı deney 3 için PID denetleyicisi ile gerçekleştirilen konum değişimleri

Şekil 4.21’de gösterilen grafikler y ekseninde verilen referans değerleri için bacakların PID kontrol ile yapılan konum değişim grafikleri sunulmuştur. Konum değişimleri 39,93 saniyede gerçekleştirilerek sonuç alınmıştır.

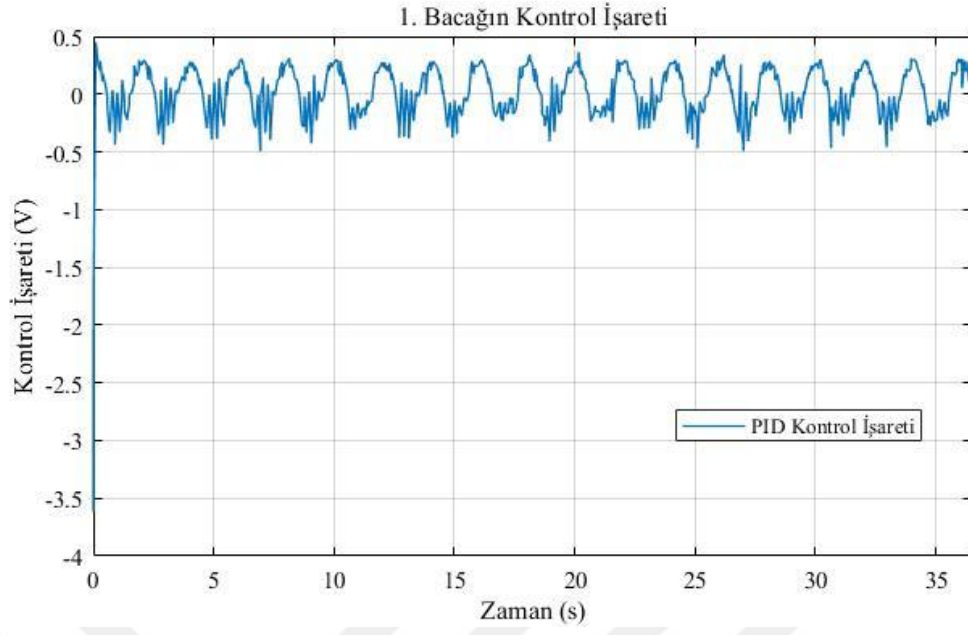
Seçilen kazanç parametrelerine bağlı olarak PID kontrolcüsü kullanılması durumunda tüm bacak boylarında meydana gelen konum hataları şekil 4.22’de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



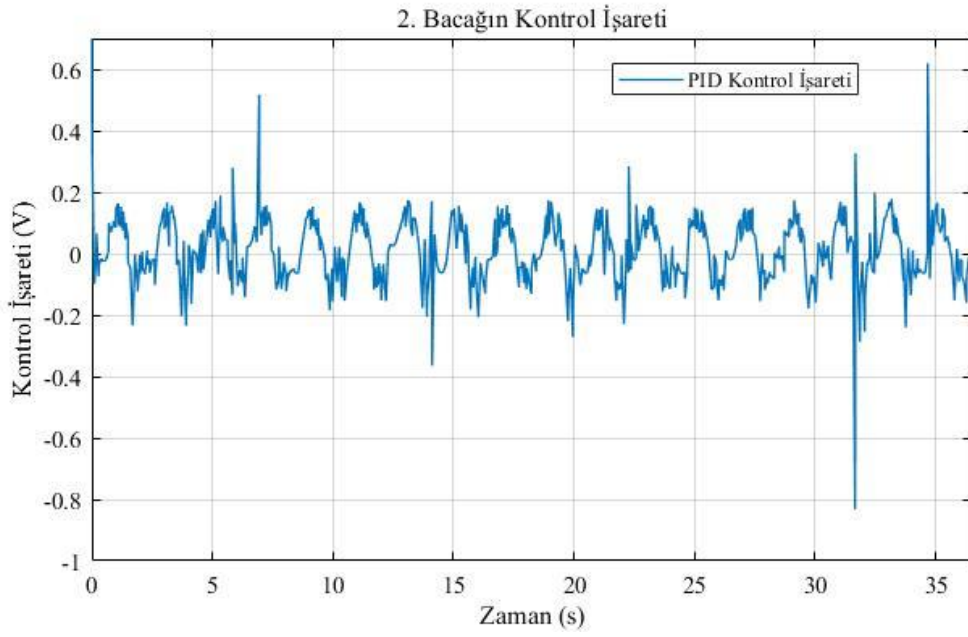
Şekil 4. 22 Gerçek zamanlı sistemde deney 3 için PID denetleyicisi kullanılması durumunda bacaklarda meydana gelen konum hataları

Şekil 4.22’de görüldüğü gibi bacak boylarında meydana gelen konum hataları, manipülâtörün hareketli platformu için tanımlanan yörüngelerde az da olsa konum ve hatalarına sebep olmuştur.

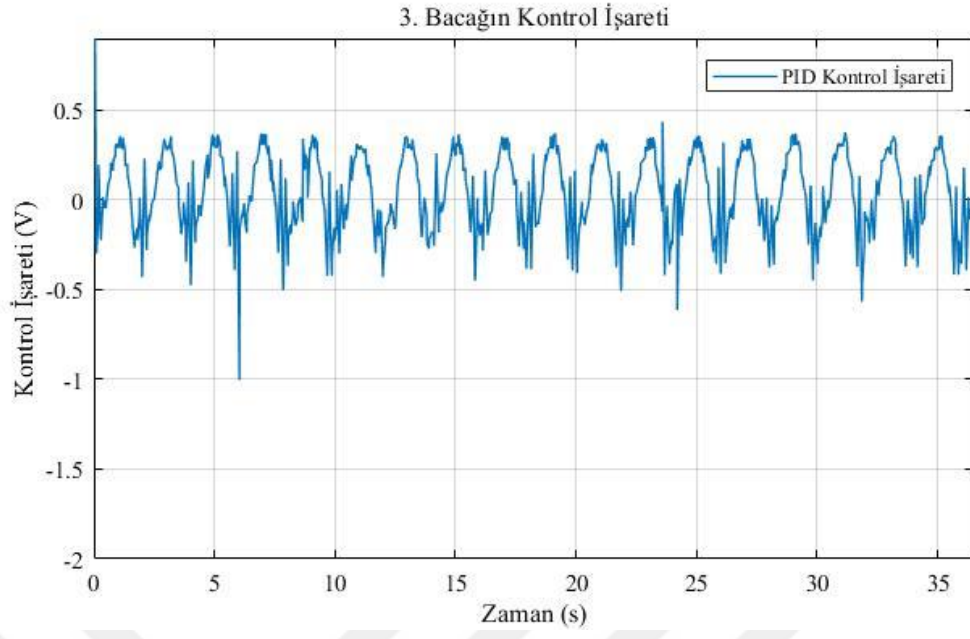
Kontrolcülerin performanslarına göre her bir bacakta bulunan motorlar için üretilen kontrolcü işaret değişimleri şekil 4.23 de gösterilmiştir.



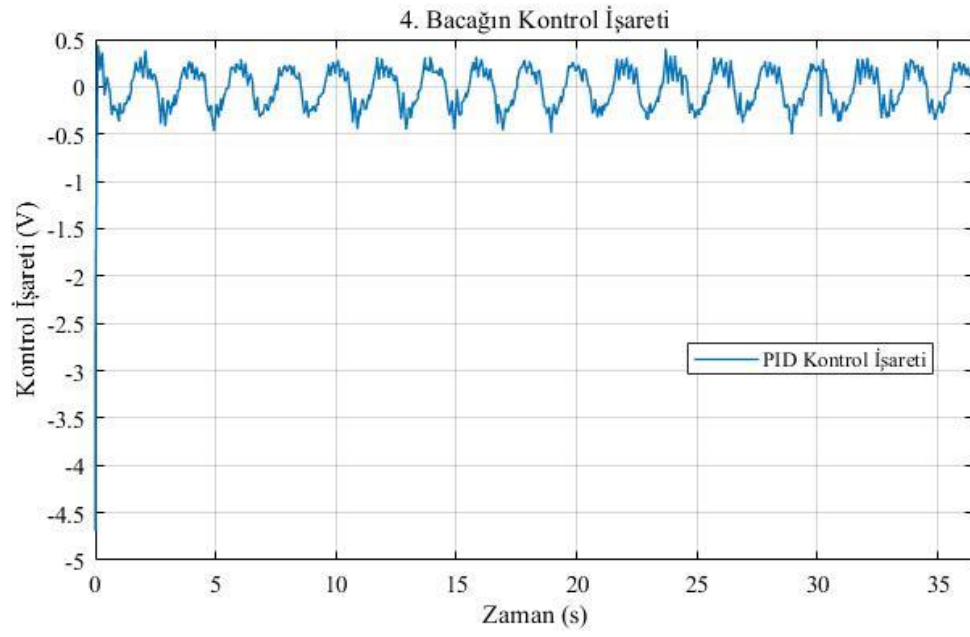
(a)



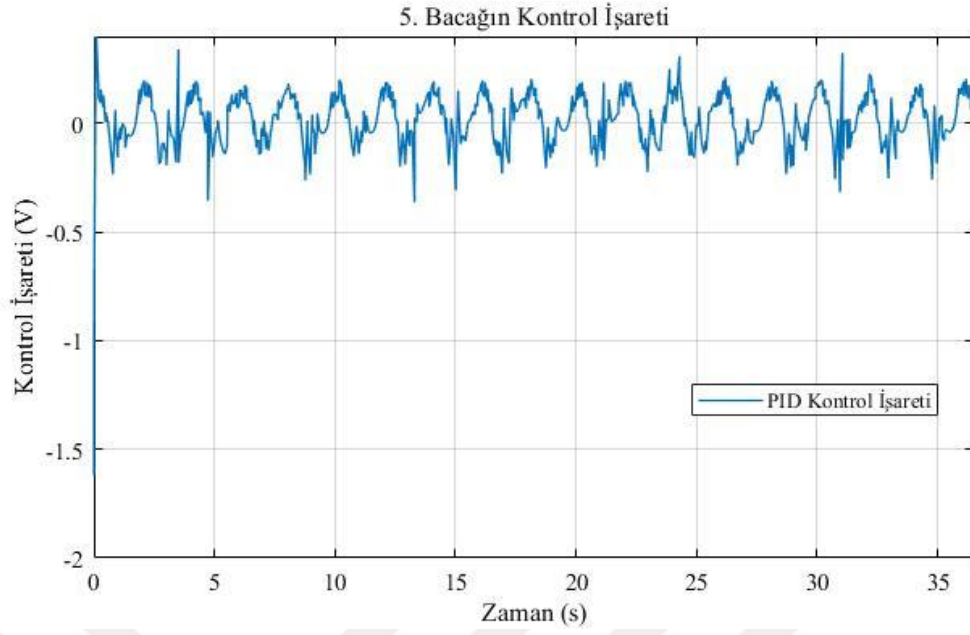
(b)



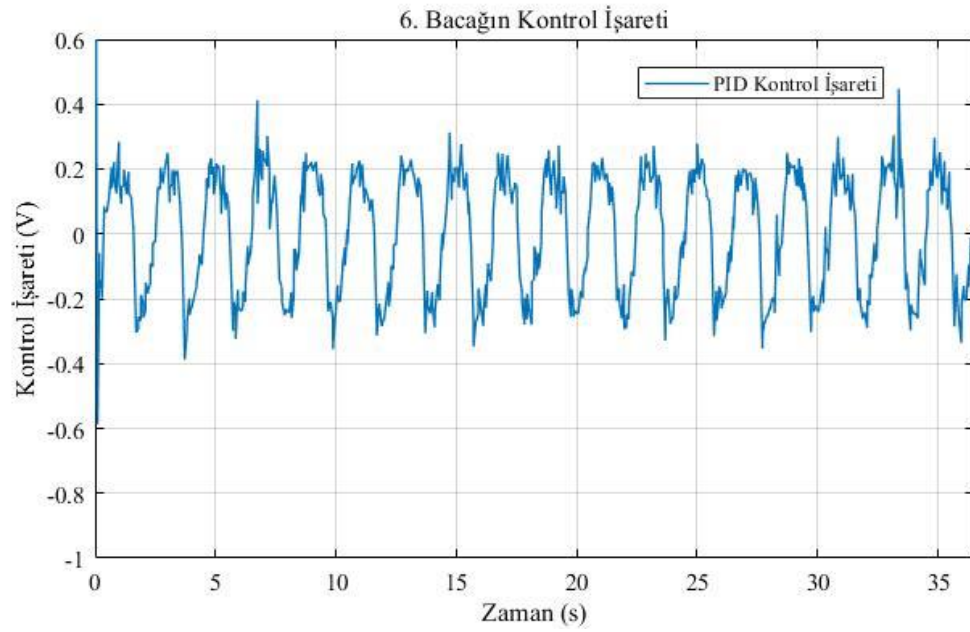
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4. 23 Gerçek zamanlı sistemde deney 3 için kullanılan denetleyici işaretleri

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tezde, yaygın olarak kullanılmaya başlanılan 6 serbestlik dereceli uçuş simülatörleri üzerinde çalışılmıştır. Öncelikle paralel ve seri mekanizmalar hakkında bilgi verilmiştir ve bu sistemlerin sahip olduğu özelliklerinin birbirleriyle karşılaştırılması yapılarak avantaj ve dezavantajları ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Paralel mekanizmaların özel bir hali olan uçuş simülatörlerinde kullanılan Stewart platformun genel içeriği hakkında bilgi sunulmuştur. Uçuş simülatörlerinin gelişimi ve bu gelişim sürecinde literatürde yer alan önemli çalışmalardan bahsedilmiştir.

İkinci bölümde uçuş simülatörlerinin matematiksel analizi üzerinde durulmuştur. Öncelikle söz konusu sistemin kinematik analizi gerçekleştirilmiştir. Ters kinematik problemimin çözümü için bir başka deyişle hareketli üst platformun konum ve yönelim değerleri verildiğinde bacak boy uzunluğunu hesaplanma işlemi vektörel analizi yapılarak detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Ters kinematik analizinden elde edilen matematiksel ifadeler Matlab yardımıyla çözdürülmüştür. Daha sonra ise uçuş simülatörünün doğru bir şekilde kontrol edilebilmesi için sistemde kullanılan doğrusal motorların modellenmesi Kirchhoff ve Newton yöntemleri kullanılarak elde edilmiştir. Yapılan tüm bu analizler simülasyon vasıtasıyla test edilmiş ve bir uçuş simülatörünün pozisyon kontrolü için simülasyon çıktıları bu tez çalışmasında sunulmuştur. Bununla birlikte prototip bir uçuş simülatörünün gerçek zamanlı pozisyon kontrolü tez çalışmasında yapılan matematiksel analizler sayesinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak elde edilen verilere göre yapılan kinematik analizinin doğru olduğu kanıtlanmış ve parametreleri uygun bir şekilde ayarlanan PID kontrol sayesinde sisteme doğru pozisyon kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasının literatüre asıl katkısı havacılık sektöründe sıklıkla kullanılmaya başlanılan uçuş simülatörlerinin tüm matematiksel analizlerini paylaşmak ve sistemi gerçek zamanlı olarak doğru bir şekilde pozisyonlanabilmek için gerekli olan PID kontrolcü yapısını oluşturmaktır. Yapılan bu tüm analizler farklı tipteki kontrolcüler üzerinden de denilerek literatüre yeni katkılar sağlayabilecektir.

KAYNAKLAR

- Lung-Wen Tsai-Robot Analysis-The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators-Wiley-Interscience (1999) Chapter 3, 151-154.
- Tsai L. W., 1999. Introduction, Chapter 1, Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. John Willey & Sons Inc., New York, 1-53.
- Tsai L. W., 1999. Position Analysis of Serial Manipulators, Chapter 2, Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. John Willey & Sons Inc., New York, 54-116.
- Tsai L. W., 1999. Position Analysis of Serial Manipulators, Chapter 10, Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. John Willey & Sons Inc., New York, 424-456.
- Tsai, L. W., 1998. Solving the inverse dynamics of parallel manipulators by the principle of virtual work. Proc. ASME Design Engineering Technical Conference.
- Ahmed Abu Hanieh, “Active Isolation and Damping of Vibrations via Stewart Platform”, Thesis submitted in candidature for the degree of Doctor in Applied Sciences Academic year 2002 – 2003.
- Elmas Anlı, Hüseyin Alp, Sait N. Yurt ve İbrahim Özkol, “Paralel Mekanizmaların Kinematikı, Dinamikı ve Çalışma Uzayı”, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi Cilt 2 Sayı 1 (19- 36), Ocak 2005.
- Renk Graf and Rudiger Dillmann, “Active Acceleration Compensation Using a StewartPlatform on a Mobile Robot”, Institute for Realtime-Systems and Robotics University of Karlsruhe, 1997.
- William J. Kirkwood, Sheri N. White, Mark Brown, Richard Henthorn, Scott Jensen, Karen A. Salamy, Edward T. Peltzer, and Peter Brewer, “Precision Underwater Positioning for In Situ Laser Raman Spectrographic Applications”, Monterey Bay Aquarium Research Institute, USA.
- Ulrich Seibold, Bernhard Kuebler, Holger Weiss, Tobias Ortmaier, and Gerd Hirzinger, “Sensorized and Actuated Instruments for Minimally Invasive Robotic Surgery”, German Aerospace Center, Institute of Robotics and Mechatronics, Oberpfalz_enhofen, D- 82234 Wessling, Germany.
- Zoran Lazarevic, “Feasibility of a Stewart Platform with Fixed Actuators as a Platform for CABG Surgery Device”, Master’s Thesis Columbia University Department of Bioengineering.
- Mevlütöğlü, A. 2010. “Modelleme ve Simülasyon Teknolojilerinin Tedarik Süreç Yönetiminde Kullanımı ve Simülasyon Tabanlı Tedarik Yöntemi”, Savunma Sanayii Gündemi, sayfa 21 – 25.

- Mevlütöğlu, A. 2009. “İnsansız Hava Araçları ve Ağ Merkezli Muharebe Kavramı”, V. Ulusal Havacılık ve Uzay Mühendisliği Kurultayı Bildiriler Kitabı, TMMOB/MMO yayını, E/2009/497-1, Eskişehir sayfa 65 – 71.
- R.F. Boian, M. Bouzit, G.C. Burdea, J. Lewis and J.E. Deutsch, “Dual Stewart Platform Mobility Simulator”, Int. Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR’05), Chicago, IL, June 2005.
- H. Ersel ÖNER, M. Burak GÜRCAN, İlhan BAŞÇUHADAR, ve Tuna BALKAN, “Hidrolik Simülatör Tasarımı”, II. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi.
- Dasgupta, B. and Mruthyunjava, T.S. (2000). The Stewart Platform manipulator: a review. Mechanism and Machine Theory, 15-40.
- Merlet, J.P. (2006). Parallel Robots (Second Edition). Springer, Dordrecht, Netherlands, 261-312.
- Lee, S. H., Song, J. B., Choi, W. C., and Hong, D., 2002. “Workspace and Force-Moment Transmission of a Variable Arm Type Paralel Manipulator”, Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, May, 3666-3671.
- Hüseyin Alp, “Sezgisel Yöntemlerle Paralel Mekanizmaların Çalışma Uzayı Analizi”, Doktora Tezi, ITU, 2007.
- Dasgupta, D. And Mruthyunjaya, T. S., 1998. “Singularity-free Path Planning for the Stewart Platform Manipulator”, Mechanism and Machine Theory, 33, 711-725.
- Sait N. Yurt, “6-3 Stewart Platform Mekanizmasının Kinematik, Dinamik Analizi ve Kontrolü”, Doktora Tezi, ITU, 2002.
- Mehmet Murat Aygün, “Helikopter Uçuş Simülatörleri için Uyarlanabilir Yapıda Kumanda Yükleme Sistemi Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, 2014.
- Ufuk Çoban, “Ağ Uçuş Simülatörü için Özelleştirilebilir Uçuş Gösterge Birimi Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, ITU, 2010.
- Şafak Tulumoğlu, “Uçuş Simülatörlerindeki Dış Dünya Görsel Veri Tabanı Çözünürlüğünün Alçak Uçuşta Yükseklik ve Hız Algısına Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Türk Hava Kurumu Üniversitesi, 2017.
- Collins C. L. And Long G. L., 1995, “The Singularity analysis of an In-Parallel Hand Controller for Force-Reflected Teleoperation”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 5, 661-669.
- Gosselin C. And Angeles J., 1990, “Singularity Analysis of Close Loop Kinematic Chains”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 6, 281-290.
- L. Stocco and S. E. Salcudean, “A Coarse-Fine Approach to Force-Reflecting Hand Controller Design”, IEEE International Conference on Robotics and Automation Minneapolis, Minnesota, April 22-28, 1996.

- Xiao-Shan Gao and Deli Lei, “Generalized Stewart Platforms and Their Direct Kinematics”, Institute of Systems Science, AMSS Academia Sinica, Beijing, China, 2003.
- Fichter, E.F. (1986). A Stewart Platform-Based Manipulator: General Theory and Practical Construction. The International Journal of Robotics Research. 5, 157-182.
- Faugère, J. and Lazard, D. (1995). Combinatorial classes of parallel manipulators. Mechanism and Machine Theory. 30, 765-776.
- Anlı, E., Alp, H., Sait, N.Y. ve Özkol, İ. (2005). Paralel Mekanizmaların Kinematiği, Dinamiği ve Çalışma Uzayı. Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi Cilt 2 Sayı. 1, 19- 36.
- Dafaoui, E.M., Amirat, Y., Pontnau, J. and Francois C. (1998). Analysis and design of a six- DOF parallel manipulator, modeling, singular configurations, and workspace. IEEE Transactions on Robotics and Automation. 14, 78-92.
- ASME J Mech Trans Auto Des. Journal of Mechanisms Transmissions and Automation in Design. 105, 705–712.
- Pritschow, G., Eppler, C. and Lehner, W.D. (2002). Highly dynamic drives for parallel kinematic machines with constant arm length, Proc. 1st Int. Colloq. Collaborative Res. Center, Braunschweig, Germany.
- Zeki Yağız Bayraktaroğlu, Robot Teknolojisine Giriş- Matematiksel Modelleme, 10-17.
- Stewart, D. (1965). A platform with six degrees of freedom. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 180(1), 371-386.
- Z. Ekicioğlu, 2011. Paralel Mekanizmaların Çalışma Uzayı Analizinde Kullanılan Yapay Sinir Ağı Yapısının Genetik Algoritmalar ile Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Liu, K., Fitzgerald J. M. and Lewis F. L., 1993. Kinematics analysis of a Stewart platform manipulator. IEEE Trans. Industrial Electronics, 40(2), 282-293.
- Nanua, P., Waldron K. J. and Murthy V., 1990. Direct kinematic solution of Stewart platform. IEEE Transactions on Robotic and Automation, 6(4), 438-444.
- Tarokh M., 2007. Real time forward kinematics solutions for general Stewart platforms. IEEE International Conference on Robotics and Automation.
- Borras, J. and Thomas F., 2009. On Δ -Transforms. IEEE Transactions on Robotics, 25(6), 1225-1236.
- İnal U. R., 2019. Üç Serbestlik Dereceli Paralel Eksenli Kararlılaştırma Platformunun Dinamik Modellemesi ve Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Karahan O., 2012. Seri ve Paralel Robotlarda Parçacık Sürü Optimizasyonu ile Yörünge Kontrolörü Tasarımı, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

- Duffy, J. and Rooney J., 1975. A foundation for a unified theory of analysis of spatial mechanism. ASME J. Eng. Ind., 97(4), 1159-1164.
- Wang, Z., He, J., and Gu H., 2010. Forward kinematics analysis of a six degree of freedom Stewart platform based on independent component. IEEE Transaction on Systems, 1083-4427.
- Su, Y. X., Zang, C. H. and Duan B.Y., 2002. Singularity analysis of a 6 DOF Stewart platform using genetic algorithm. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics.
- Denavit, J. and Hartenberg R. S., 1955. A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices. ASME J. Appl. Mech., 77, 215-221.
- Ulaş B., 2009. Stewart Platformu Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ünsal A. 2007. Farklı Yapıdaki Stewart Platform Mekanizmalarının Düz ve Ters Kinematik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Omran A., El-Bayiumi G., Bayoumi M., Kassem A., Genetic Algorithm Based Optimal Control for a 6-DOF Non Redundant Stewart Manipulator, International Journal of Mechanical Systems Science and Engineering, 2008, 2, 73-79.
- Yang C., Huang Q., Jiang H., Peter O. O., Han J., PD control with gravity compensation for hydraulic 6-DOF parallel manipulator, Mechanism and Machine Theory, 2010, 45, 666-677.
- Zhu D., Mei T., Sun L., Fuzzy Support Vector Machines Control for 6-DOF Parallel Robot, Journal of Computers, 2011, 1, 1926-1934.
- Fraguela L., Fridman L., Alexandrov V. V., Position stabilization of a Stewart platform: High-order sliding mode observers based approach, Journal of The Franklin Institute, 2012, 349, 441-455.
- Duffy, J. and Rooney J., 1975. A foundation for a unified theory of analysis of spatial
- Wang J. and Gosselin, C. M., 1997. Dynamic analysis of spatial four-degree-of-freedom parallel manipulators. Proc. ASME Design Engineering Technical Conferences.
- Söylemez E., 2000. Mekanizma Tekniği, Birsen Yayınevi, 440s, Türkiye.
- Domenico P. Coiro, Agostino De Marco, Fabrizio Nicolosi, Flight Simulation Environment of The University of Naples And Recent Developments in Control Loading Reproduction, SIMAI Congress, Vol. 2, 2007, page 1-5.
- Öztürk V., 2009. Doğrusal Motor Sistemi Üzerine 6 Serbestlik Derecesine Sahip Platform Tasarımının Yapılarak Uygulanması ve Yazılımının Eniyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Spong M. W., Hutchinson S. and Vidyasagar M., 2006. Introduction, Chapter 1, Robot Modeling and Control. John Willey & Sons, Inc., United States of America, 1-33.

- Spong M. W., Hutchinson S. and Vidyasagar M., 2006. Introduction, Chapter 4, Robot Modeling and Control. John Willey & Sons, Inc., United States of America, 119-160.
- Bora Demirci, SOLIDWORKS Teknik Destek ve Analiz Projeleri Uygulama Mühendisi,2020.
- Ulaş, B. (2009). Stewart Platform Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 42-43.



EKLER

EK-1

```
i=1;
% Ofset Acılarının tanımlanması
theta_k=0;
theta_m=2*(pi/3);
% Hareketli Platformun pozisyon ve rotasyonlarının tanımlanması
alfa=0.0001;
beta=0.0001;
gama=0.0001;
x1=gama;
y1=beta;
z1=alfa;
for t=0:0.001:5
koordinat1=0.05*sin(2*pi*1*t);
koordinat 2=0.05*cos(2*pi*1*t);
koordinat 3=0.05;
%Üst platform bağlantı noktalarının x eksenine ile yapacağı açılar
lamda_1=(pi/3)-(theta_k/2);
lamda_3=(3*pi/3)-(theta_k/2);
lamda_5=(5*pi/3)-(theta_k/2);
lamda_2=(lamda_1+theta_k);
lamda_4=(lamda_3+theta_k);
lamda_6=(lamda_5+theta_k);
%Alt platformun x eksenine ile yapacağı açılar
Blamda_1=(pi/3)-(theta_m/2);
Blamda_3=(3*pi/3)-(theta_m/2);
Blamda_5=(5*pi/3)-(theta_m/2);
Blamda_2=(Blamda_1+theta_m);
Blamda_4=(Blamda_3+theta_m);
Blamda_6=(Blamda_5+theta_m);
rp=0.20;%üst platform yarıçapı
rb=0.24;%alt platform Yarıçapı
%Rotasyon Matrisi
R=[(cos(y1)*cos(z1)) (cos(z1)*sin(y1)*sin(x1)+sin(z1)*cos(x1)) -
cos(x1)*sin(y1)*cos(z1)+sin(x1)*sin(z1);
-(sin(z1)*cos(y1)) -sin(x1)*sin(y1)*sin(z1)+cos(x1)*cos(z1)
sin(y1)*sin(z1)*cos(x1)+cos(z1)*sin(x1);
(sin(y1)) -cos(y1)*sin(x1) (cos(x1)*cos(y1))];
%Üst Platform bağlantı noktalarının pozisyonları
k2=R*[rp*cos(lamda_2);rp*sin(lamda_2);0]+[ koordinat 1; koordinat 2; koordinat 3];
k3=R*[rp*cos(lamda_3);rp*sin(lamda_3);0]+[ koordinat 1; koordinat 2; koordinat 3];
k1=R*[rp*cos(lamda_5);rp*sin(lamda_5);0]+[ koordinat 1; koordinat 2; koordinat 3];
% Alt platform bağlantı noktalarının pozisyonları
m1=[rb*cos(Blamda_1);rb*sin(Blamda_1);0];
m2=[rb*cos(Blamda_2);rb*sin(Blamda_2);0];
```

```
m3=[rb*cos(Blamda_4);rb*sin(Blamda_4);0];  
%bacak Uzunlukları  
l1=norm(k1-m1);l2=norm(k2-m1);l3=norm(k2-m2);  
l4=norm(k3-m2);l5=norm(k3-m3);l6=norm(k1-m3);  
L(i,:)=[l1;l2;l3;l4;l5;l6];  
i=i+1;  
end
```